

Федеральное агентство по образованию
Уральский государственный университет
им. А. М. Горького

Ф И З И К А К О С М О С А

Труды 38-й Международной
студенческой научной конференции

Екатеринбург

2—6 февраля 2009 г.

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2009

УДК 524.4
Ф 503

Печатается по решению
организационного
комитета конференции

Редколлегия:

П. Е. Захарова (ответственный редактор), Э. Д. Кузнецов,
А. Б. Островский, С. В. Салий, А. М. Соболев (Уральский государ-
ственный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский
государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии
РАН)

Физика Космоса: Тр. 38-й Международ. студ. науч.
Ф 503 конф., Екатеринбург, 2–6 февр. 2009 г. — Екатеринбург:
Изд-во Урал. ун-та, 2009. — 398 с.

ISBN 978–5–7996–0405–9

УДК 524.4

ISBN 978–5–7996–0405–9

© Уральский государственный
университет, 2009

ФИЗИКА КОСМОСА
38-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Организаторы

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра астрономии и геодезии
Астрономическая обсерватория

2—6 февраля 2009 г.

Екатеринбург, Россия

Научный организационный комитет:

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский государственный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский государственный университет), О. Ю. Малков (Институт астрономии РАН), М. Г. Мингалиев (САО РАН), В. В. Орлов (НИАИ СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский государственный университет), М. Е. Прохоров (ГАИШ МГУ), А. М. Соболев (Уральский государственный университет), К. И. Чурюмов (Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Жюри конкурса студенческих научных работ

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), С. О. Алексеев (ГАИШ МГУ), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), М. Г. Мингалиев (САО РАН), В. В. Орлов (Научно-исследовательский астрономический институт СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский государственный университет).

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района
г. Екатеринбурга

Уральский государственный университет им. А. М. Горького

Программа конференции

Место проведения — Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета.

Открытие конференции		Ауд. № 15
2 февраля, понедельник	15.00	

Пленарные заседания		Ауд. № 15
2 февраля, понедельник	15.30—18.45	
3 февраля, вторник	10.00—13.00, 14.30—18.45	
4 февраля, среда	10.00—13.15, 14.30—18.45	
5 февраля, четверг	14.30—18.45	

Семинар «Физика звезд»		Ауд. № 10
3 февраля, вторник	10.00—13.00	

Семинар «Небесная механика»		Ауд. № 10
4 февраля, среда	10.00—13.00	

Семинар «Физика звездно-газовых комплексов»		Ауд. № 10
4 февраля, среда	14.30—18.15	

Стендовые доклады		Холл
5 февраля, четверг	11.00—13.00	

Заккрытие конференции		Ауд. № 15
5 февраля, четверг	20.00	

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

2 февраля, понедельник, ауд. 15

15.00—15.30 ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ (выступления президента Уральского университета В. Е. Третьякова, ректора Уральского университета Д. В. Бугрова, председателя научного организационного комитета конференции К. В. Холшевникова, директора Астрономической обсерватории П. Е. Захаровой)

Председатель Константин Владиславович Холшевников,
д-р физ.-мат. наук

15.30—16.15 Борис Михайлович Шустов (чл.-корр. РАН, Институт астрономии РАН)
Введение в ультрафиолетовую астрономию.

16.15—17.00 Эдуард Дмитриевич Кузнецов (канд. физ.-мат. наук, УрГУ), **Константин Владиславович Холшевников** (д-р физ.-мат. наук, АИ СПбГУ)
Запас устойчивости Солнечной системы по массам планет.

17.00—17.15 П Е Р Е Р Ы В

17.15—17.30 Алексей Евгеньевич Сапронов (5 курс, КГУ)
Оценка геодезического использования системы ГЛОНАСС.

17.30—17.45 Александр Владимирович Додин (5 курс, МГУ)
О природе ультрафиолетового континуума CTTS короче 2000 Å на примере звезды Т Тау.

17.45—18.00 Александр Олегович Верёвкин (5 курс, СПбГУ)
Поиск филаментов в каталоге SDSS DR6.

18.00—18.45 Олег Юрьевич Малков (д-р физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)
Международный год астрономии в России.

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

3 февраля, вторник, ауд. 15

Председатель Борис Михайлович Шустов, чл.-корр.
РАН

10.00—10.45 Владимир Михайлович Липунов (д-р физ.-мат.
наук, ГАИШ МГУ)

Малые телескопы-роботы и современная астрофизика.

10.45—11.30 Владимир Евгеньевич Панчук (д-р физ.-мат.
наук, САО РАН), Максим Владимирович Юшкин
(канд. физ.-мат. наук, САО РАН)

Оптоволоконные спектрографы высокого разрешения.

11.30—11.45 П Е Р Е Р Ы В

11.45—12.00 Галина Геннадьевна Млодик (5 курс, УрГУ)

Определение лучевых скоростей ОВ звезд в комплексах звезд-
дообразования S231—S235 и S254—S257.

12.00—12.15 Марина Андреевна Старцева (1 курс, МГУ)

Фотометрия галактик трех массивных рентгеновских групп.

12.15—12.30 Сергей Александрович Хоперсков (4 курс, Вол-
ГУ)

Динамика сверхбыстрых звезд (HVS) с учетом триаксиально-
сти гало и балджа.

12.30—12.45 Валентин Евгеньевич Панфилов (4 курс, ТГУ)

Построение и исследование областей возможных движений в
обратных задачах орбитальной динамики ИСЗ.

12.45—13.00 Леонид Николаевич Судов (1 курс, СПбГУ)

Кинематическое уравнение для близпараболического кеплеро-
ва движения.

13.00—14.30 О Б Е Д

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

3 февраля, вторник, ауд. 15

Председатель Владимир Михайлович Липунов, д-р физ.-мат. наук

14.30—15.15 Татьяна Александровна Рябчикова (д-р физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)

Исследование атмосфер звезд по спектральным наблюдениям высокого разрешения.

15.15—16.00 Владимир Павлович Гринин (д-р физ.-мат. наук, ГАО РАН)

Фотополяриметрическая активность звезд с протопланетными дисками.

16.00—16.15 Сергей Александрович Хайбрахманов (1 маг., ЧелГУ)

Ионизационное состояние аккреционных дисков молодых звезд.

16.15—16.30 Полина Борисовна Исакова (3 курс, ЧелГУ)

Моделирование аккреции в промежуточных полярах в дрейфовом приближении.

16.30—16.45 Артём Витальевич Плахотский (3 курс, ЧелГУ)

Моделирование аккреции в магнитных полярах в дрейфовом приближении.

16.45—17.00 П Е Р Е Р Ы В

17.00—17.15 Любовь Владимировна Костюкова (1 маг., ЮФУ)

Моделирование разрушения межзвездной пыли в молекулярных облаках.

17.15—17.30 Дмитрий Николаевич Лебедев (2 курс, ВолГУ)

Молекулярная модель процесса взаимодействия пылевых частиц с атомом водорода.

17.30—17.45 Оксана Леонидовна Баранова (4 курс, РГПУ)

Курс дистанционного обучения «Практическая астрономия».

17.45—18.00 Алина Ильшатовна Хайруллина (4 курс, КГУ)

Исследование топографии избранных участков лунной территории методами орбитальной цифровой фотограмметрии.

18.00—18.45 Юрий Васильевич Хачай (д-р физ.-мат. наук, Институт геофизики УрО РАН), Всеволод Николаевич Анфилов (чл.-корр. РАН, Институт минералогии УрО РАН)

Модели распределения температуры в Земле на этапе аккумуляции планеты.

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

4 февраля, среда, ауд. 15

Председатель Марат Габдуллович Мингалиев, д-р физ.-мат. наук

10.00—10.45 Илья Геннадьевич Коваленко (д-р физ.-мат. наук, ВолГУ)

Аккреция на черные дыры.

10.45—11.30 Станислав Олегович Алексеев (канд. физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Общая теория относительности и ее современное развитие.

11.30—11.45 П Е Р Е Р Ы В

11.45—12.00 Дарья Алексеевна Стародубцева (1 маг., УрГУ)

Черные дыры в моделях с некомпактными дополнительными измерениями.

12.00—12.15 Федор Владимирович Моросеев (1 курс, СПбГПУ)

Симплектическая геометрия и сжатые состояния.

12.15—12.30 Екатерина Александровна Немченко (1 курс, ТГУ)

Тонкая структура профилей изгибного излучения пульсаров.

12.30—12.45 Егор Ралифович Сафутдинов (3 курс, МГУ)

Зондирование межзвездной плазмы сигналами радиопульсаров.

12.45—13.00 Сергей Юрьевич Парфёнов (3 курс, УрГУ)

Влияние наличия 2S3 метастабильного уровня He на размеры и структуру зон ионизации H и He вокруг массивных звезд.

13.15—14.30 О Б Е Д

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

4 февраля, среда, ауд. 15

Председатель Виктор Владимирович Орлов, д-р физ.-мат. наук

14.30—15.15 Лидия Васильевна Рыхлова (д-р физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН), Баканас Елена Сергеевна (м. н. с., Институт астрономии РАН)
Экология Земли и околоземного космического пространства.

15.15—16.00 Геннадий Юрьевич Харламов (д-р тех. наук, Институт астрономии РАН)
Координатно-временное обеспечение современных астрономических наблюдений.

16.00—16.45 Клим Иванович Чурюмов (д-р физ.-мат. наук, Киевский НУ)
О природе комет после космических миссий «Стардаст» и «Дип Импект» и перед «Розеттой».

16.45—17.30 Валентин Федорович Есипов (д-р физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)
Моя жизнь в науке.

17.30—18.15 Михаил Иванович Шпекин (канд. физ.-мат. наук, КГУ)
Были ли люди на Луне, вращается ли Земля вокруг Солнца и еще несколько интересных вопросов...

П Л Е Н А Р Н Ы Е З А С Е Д А Н И Я

5 февраля, четверг, ауд. 15

Председатель Владимир Евгеньевич Панчук, д-р физ.-мат. наук

14.30—15.15 Марат Габдуллович Мингалиев (д-р физ.-мат. наук, САО РАН)

Нестандартная космология.

15.15—16.00 Дмитрий Зигфридович Вибе (д-р физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)

Космические окрестности Солнца.

16.00—16.45 Евгений Игоревич Старицин (канд. физ.-мат. наук, УрГУ)

Эволюционное происхождение феномена звезд Ве раннего спектрального класса.

16.45—17.00 П Е Р Е Р Ы В

17.00—17.15 Резюме секции стендовых докладов

17.15—18.00 Виктор Владимирович Орлов (д-р физ.-мат. наук, СПбГУ)

Динамика групп галактик.

18.00—18.45 Ольга Касьяновна Сильченко (д-р физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Далекие галактики.

20.00 ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ

Семинар «ФИЗИКА ЗВЕЗД»
3 февраля, вторник, ауд. 10, 10⁰⁰—13⁰⁰

Председатель Юрий Васильевич Хачай, д-р физ.-мат. наук

10.00—10.45 Александр Анатольевич Соловьев (д-р физ.-мат. наук, ГАО РАН)

Меридиональная циркуляция и солнечный магнитный цикл.

10.45—11.00 Ренат Александрович Бисенгалиев (аспирант, КалмГУ)

МГД-центробежная неустойчивость солнечной магнитной аркадной структуры.

11.00—11.15 Константин Александрович Гунаев (преподаватель, КалмГУ)

Корональные магнитные аркады и корональные электрические токи.

11.15—11.30 Андрей Сергеевич Шугаров (аспирант, Институт астрономии РАН)

Современные панорамные приемники излучения оптического и УФ-диапазона.

11.30—12.15 Михаил Евгеньевич Прохоров (д-р физ.-мат. наук, ГАИШ МГУ)

Современные датчики звездной ориентации.

12.15—12.30 Павел Вячеславович Кайгородов (канд. физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)

Механизм пополнения оболочки полуразделенной тесной двойной звезды.

12.30—12.45 Анна Михайловна Фатеева (аспирант, Институт астрономии РАН)

Оболочки полуразделенных предконтактных двойных звезд.

12.45—13.00 Александра Михайловна Зубарева (аспирант, Институт астрономии РАН)

Фотометрия MT Dra в 2008 г.

Семинар «НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА»

3 февраля, среда, ауд. 10, 10⁰⁰—13⁰⁰

Председатель Лидия Васильевна Рыхлова, д-р физ.-мат. наук

10.00—10.45 Николай Борисович Железнов (канд. физ.-мат. наук, ИПА РАН)

Семейства и группы малых планет.

10.45—11.00 Роман Владимирович Балугев (аспирант, СПбГУ)

О поиске периодических компонент в наблюдательных данных.

11.00—11.15 Ольга Михайловна Дубас (аспирант, ТГУ)

Особенности построения доверительных областей в нелинейных задачах оценивания.

11.15—11.30 Вахит Шамильевич Шайдулин (аспирант, СПбГУ)

Соотношения между нормами сферических функций в представлении геопотенциала.

11.30—11.45 Борис Борисович Эскин (преподаватель, СПбГУ)

Экзопланетные системы: некоторые особенности орбит.

11.45—12.00 Владимир Сергеевич Усанин (аспирант, КГУ)

Динамическая эволюция частиц, выброшенных из кометы Холмса.

12.00—12.15 Иван Николаевич Чувашов (аспирант, ТГУ)

Численное моделирование движения систем ИСЗ в сфере параллельного вычисления.

12.15—13.00 Олег Станиславович Угольников (канд. физ.-мат. наук, ИКИ РАН)

Лунные затмения: история и наука.

13.00—13.15 Марина Геннадьевна Ишмухаметова (доцент, КГУ)

Критерии генетической общности малых тел применительно к метеорным роям.

Семинар «ФИЗИКА ЗВЕЗДНО-ГАЗОВЫХ КОМПЛЕКСОВ»

3 февраля, среда, ауд. 10, 14³⁰—18¹⁵

Председатель Ольга Касьяновна Сильченко, д-р физ.-мат. наук

14.30—15.15 Алексей Валерьевич Моисеев (канд. физ.-мат. наук, САО РАН)

Галактические кольца.

15.15—16.00 Александр Валентинович Хоперсков (д-р физ.-мат. наук, ВолГУ)

Спиральные галактические структуры: механизмы генерации и поддержания.

16.00—16.15 Марина Владимировна Рябова (научный работник, ЮФУ)

Моделирование соотношения масса-металличность для карликовых сфероидальных галактик Местной группы.

16.15—16.30 Галина Николаевна Дремова (канд. физ.-мат. наук, РФЯЦ-ВНИИТФ)

Роль темного вещества в динамической эволюции скопления галактик в рамках задачи N тел.

16.30—16.45 Роман Александрович Алексейчук (аспирант, ВолГУ)

Влияние турбулентности на характер течения межзвездного газа при пересечении галактической ударной волны.

16.45—17.00 Мария Сергеевна Кирсанова (научный работник, Институт астрономии РАН)

Химико-динамическая эволюция газа вблизи расширяющейся зоны НШ.

17.00—17.15 Ярослав Николаевич Павлюченков (канд. физ.-мат. наук, Институт астрономии РАН)

Открытие и моделирование вращающегося истечения у протопланетного диска CB26.

17.15—17.30 Андрей Борисович Островский (преподаватель, УрГУ)

Мазерные источники метанола на 12.178 ГГц.

17.30—18.15 Николай Геннадьевич Лебедев (д-р физ.-мат. наук, ВолГУ)

Применение методов квантовой химии для моделирования процессов газопылевой трансформации межзвездной среды.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ
31 января, четверг, холл, 11⁰⁰—13⁰⁰

Председатель Дмитрий Зигфридович Вибе, д-р физ.-мат. наук

1. **Боли П. Э., Соболев А. М. (УрГУ), Моисеев А. В., Юшкин М. В. (САО РАН)**
Результаты спектроскопических наблюдений молодого звездного объекта S235B на 6-м телескопе БТА САО РАН.
2. **Балуев Р. В. (СПбГУ)**
Резонансные конфигурации планетной системы HD37124.
3. **Бирюкова Е. С. (СПбГУ)**
Новый численный метод решения ограниченной круговой задачи трех тел.
4. **Захаров В. И., Грибанов К. Г., Береснев С. А., Калинин А. А., Шагабутдинов А. И. (УрГУ)**
Фурье-станция для спектрометрии атмосферы и Солнца в Коуровской астрономической обсерватории.
5. **Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кузнецов Э. Д. (УрГУ)**
Наблюдения низкоорбитальных объектов на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории в 2008 г.
6. **Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кайзер Г. Т., Кузнецов Э. Д. (УрГУ)**
Результаты наблюдений геосинхронных спутников на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории в 2008 г.
7. **Кирсанова М. С., Павлюченков Я. Н. (Институт астрономии РАН)**
Образование спектральных линий излучения атомов и молекул вокруг молодой массивной звезды.
8. **Кожевников В. П. (УрГУ)**
Обнаружение когерентных колебаний блеска с периодом 769.6 секунды в катаклизмической переменной EI UMa.
9. **Кожевникова А. В., Свечников М. А., Кожевников В. П. (УрГУ)**
Пятенная активность затменной переменной маломассивной системы CM Dra.

10. **Кузнецов Э. Д., Кайзер Г. Т., Гламазда Д. В., Вибе Ю. З.** (УрГУ)
Результаты наблюдений избранных геосинхронных спутников на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории.
11. **Никифорова Т. П., Кожевникова А. В.** (УрГУ)
Наблюдения частных фаз солнечного затмения 01.08.2008 в АО УрГУ.
12. **Ромашин Г. С.** (УрГУ)
Проблема орбитального момента.
13. **Салий С. В., Соболев А. М.** (УрГУ)
Исследование диагностических возможностей серии линий метанола на частоте ~ 145 ГГц.
14. **Соболев А. М.** (УрГУ), **Цивилёв А. П., Смирнов Г. Т.** (ПРАО АКЦ ФИАН), **Ниязгулова С. Ю., Парфенов С. Ю.** (УрГУ)
Наблюдения водяных мазеров в окрестностях G173 на радиотелескопе РТ-22 ФИАН.
15. **Шелемей О. В., Островский А. Б.** (УрГУ), **Gaylard M. J.** (HartRAO), **Соболев А. М.** (УрГУ)
Распределение источников излучения в мазерной линии метанола на 12 ГГц в Галактике.
16. **Шелемей О. В., Соболев А. М., Крушинский В. В.** (УрГУ), **Мойсеев А. В.** (САО РАН)
Скопление аккрецирующих объектов в районе звездообразования S235A-B-C.

Обзорные лекции

С. О. Алексеев

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ЕЕ СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ

Тестирование современных моделей

С момента появления любой новой теории люди задумываются о возможности ее экспериментальной проверки, так как физика — наука экспериментальная. Долгое время существовала возможность прямой экспериментальной проверки новой теории — например, в случае классической механики, классической электродинамики, поправок теории относительности. Однако в последние годы развитие физики выходит за рамки физических и финансовых возможностей человечества и прямая проверка таких теорий, как теория суперструн, уже становится невозможной. Огромную роль приобретает поиск таких косвенных следствий теории, которые, будучи доступны для опытной проверки, также позволяют провести селекцию теории. В этой связи приобретают большое значение новые типы решений, получающиеся при расширении теории с помощью добавления новых членов в лагранжиан. Далее, огромную роль приобретает самосогласованность теории. Если теоретическая модель, претендующая на фундаментальность, хорошо описывает один класс явлений (например, космологические решения), то она также должна давать адекватные результаты и в смежных областях (например, в физике черных дыр).

Интерес к идеям модификации действия теории относительности S , имеющего вид [1]

$$S = \int d^4 \sqrt{-g} R,$$

где R — скалярная кривизна, $\sqrt{-g}$ — корень квадратный из детерминанта метрического тензора g , возник еще очень давно. Одной

из первых модификаций было предложенное самим А. Эйнштейном добавление в действие космологической постоянной для устранения следовавшего из решения Фридмана расширения Вселенной, так что действие приобретало вид

$$S = \int d^4 \sqrt{-g} (R + \Lambda).$$

Но такая модификация с самого начала и до наших дней (когда смысл космологической константы поменялся) представляется не самой удачной, потому что получается теория с «подгоночным» параметром, то есть теория, в которой один член в лагранжиане имеет (как и вся общая теория относительности) геометрическую природу, а другой привнесен руками для подстройки теории под существующие экспериментальные данные. В то же время задача теории (на современном этапе это звучит как «получить космологию как решение М-теории, то есть найти фундаментальное происхождение скалярных полей, используемых в космологии» (С. Хокинг) — построение непротиворечивой модели с минимальным набором подгоночных параметров. Достаточно естественным путем является использование в качестве лагранжиана не самой скалярной кривизны (и/или тензоров Римана и Риччи), а ее степеней. В этом случае не теряется геометрическая природа членов, входящих в действие, но число степеней свободы (то есть возможных решений) значительно расширяется, частично снимая необходимость точной подстройки. В то же время эти новые решения могут давать какие-то новые эффекты, которые можно попытаться проверить экспериментально или через астрономические наблюдения.

Модели с поправками по кривизне

Модели П. В. Хиггса

Одним из первых рассмотреть действия, состоящие из квадрата скалярной кривизны, тензоров Риччи и Римана, предложил П. Хиггс в 1959 г. в своей работе [2]. Он изучил, что будет с уравнениями поля и решениями, если в качестве лагранжиана теории гравитации рассмотреть квадрат скалярной кривизны, тензоров Риччи и Римана, и варьировать независимо по метрике $g_{\mu\nu}$ и символам Кристофеля $\Gamma_{\mu\nu}^\sigma$. В результате Хиггс отметил, что все лагранжианы инвариант-

ны относительно преобразования Вейля $g_{\mu\nu} \rightarrow \phi(x)g_{\mu\nu}$ и показал, что уравнения поля сводятся к уравнениям типа Эйнштейна с космологической постоянной в новой метрике.

Гравитация Д. Лавлока

Важный шаг в направлении поиска путей модификации действия общей теории относительности был сделан в 1971 г. благодаря работам Д. Лавлока [3]. (Здесь необходимо отметить, что в те годы еще не было прямой необходимости в модификации общей теории относительности, это были попытки просто выйти за рамки и посмотреть, что будет, если немного расширить геометрическую формулировку теории.) Он рассмотрел требования к тензору Эйнштейна G^{ij} в вакууме, которые формулируются следующим образом:

- 1) G^{ij} симметричен по перестановкам индексов;
- 2) G^{ij} состоит из метрики, ее первых и вторых производных;
- 3) $G_{;j}^{ij} = 0$;
- 4) G^{ij} линеен по вторым производным от метрики.

Тогда уравнения Эйнштейна в пустоте имеют вид $G^{ij} = 0$. Лавлок предложил отказаться от п. 4, сохранив все остальные требования. В этом случае уравнения Эйнштейна перестают быть дифференциальными уравнениями второго порядка (в общем случае они уже будут четвертого порядка). При этом он рассмотрел, каким должен быть лагранжиан для того, чтобы не создавать дополнительных степеней свободы (то есть дополнительных нефизических решений). В случае четырехмерного пространства-времени наиболее общий вид лагранжиана второго порядка (не создающего дополнительных проблем в гравитации)

$$L = \sqrt{-g} (\alpha R^2 + \beta R_{ij} R^{ij} + \gamma R_{ijkl} R^{ijkl}) + \mu R_{ijkl} * R^{ijkl},$$

где $*R^{ijkl}$ — дуальный тензор.

Квантование гравитационного поля

К настоящему моменту времени законченной квантовой теории гравитации еще не создано. Так как общая теория относительности (ОТО) неперенормируема (при перенормировке требуется бесконечное число контрчленов из-за того, что взаимодействие неполиномиально), то есть процедура квантования, разработанная для

квантово-механических полевых теорий, неприменима [4]. В соответствии с требованиями математической формулировки ОТО, важна дифференцируемость пространственно-временной метрики (гравитационного поля), в то время как в квантовой теории поля траектории имеют фрактальный характер, то есть недифференцируемы (понятие классической траектории заменяется волновой функцией — вероятностью обнаружения частицы в некотором неинфинитизимальном объеме пространства-времени).

В квазиклассическом приближении (когда квантовые флуктуации малы и еще можно пользоваться классическим подходом) для описания квантовых процессов вводятся в рассмотрение средние значения физических величин, например, метрики $\langle g_{\mu\nu} \rangle$, тензора энергии-импульса $\langle T_{\mu\nu} \rangle$. Вводимые величины удовлетворяют модифицированным уравнениям Эйнштейна $\langle G_{\mu\nu} \rangle = 8\pi \langle T_{\mu\nu} \rangle$. Мы работаем в системе единиц, где скорость света $c = 1$. В областях, где характерный размер L много больше длины Планка $l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$, можно использовать разложение по малому параметру $\epsilon = (l_{Pl}/L)^2$ и ограничиться первыми членами разложения. Первый член порядка ϵ^0 совпадает с выражением для тензора энергии-импульса классического поля; член порядка ϵ^1 , содержащий множитель \hbar , дает основной вклад квантовых эффектов и описывается с помощью членов вида R^2 . Следующие по ϵ члены — это поправки, связанные с излучением и поглощением виртуальных частиц. Важно подчеркнуть, что при использовании диаграммной техники, широко применяемой в физике высоких энергий, членам порядка \hbar^0 соответствуют древесные диаграммы (рис. 1, а), членам порядка \hbar^1 — однопетлевые диаграммы (рис. 1, б), членам порядка \hbar^N ($N > 1$) — многопетлевые диаграммы (рис. 1, в) [5].

Теория струн/М-теория

Основные идеи 10-мерной теории

В современной физике принята шкала энергий, приведенная на рис. 2. При этом объединение электрослабого и сильного взаимодействий (великое объединение на уровне квантовой теории поля) еще не требует введения дополнительных размерностей. Только при попытках создать объединенную теорию физических взаимодействий, включая гравитацию, необходимо вводить дополнительные измерения и переходить от квантовой теории поля (очень хорошо заре-

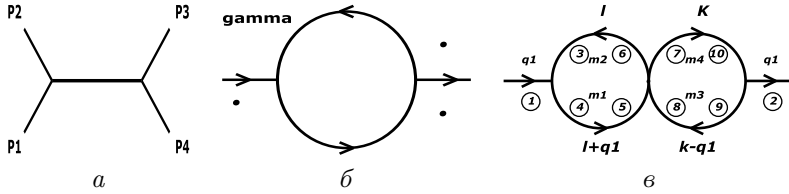


Рис. 1. Членам порядка \hbar^0 соответствуют древесные диаграммы (а), членам порядка \hbar^1 — однопетлевые диаграммы (б), членам порядка \hbar^N ($N > 1$) — многопетлевые диаграммы (в)

комендовавшей себя в физике высоких энергий) к каким-то более общим теориям. Одним из популярных подходов (наряду с построением петлевой квантовой гравитации) является теория струн [6]: теория взаимодействия одномерных объектов (струн) на фоне многомерного пространства-времени. Теория струн является естественным обобщением квантовой теории поля (как «струна», являющаяся обобщением понятия «материальная точка»).

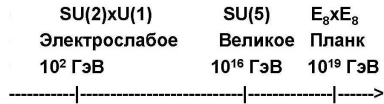


Рис. 2. Шкала энергий современной физики

В настоящее время вместо единой струнной теории существуют пять независимых струнных теорий, а именно гетеротические струны, основанные на группе $E_8 \times E_8$, гетеротические струны, основанные на группе $SO(32)$, суперструны I-го типа, суперструны II-го типа (открытые и закрытые).

Теория струн позволяет получить квантовую теорию гравитации без ультрафиолетовых расходимостей. Следовательно, спектр такой струны содержит безмассовое состояние спина 2, обладающее всеми свойствами гравитона — переносчика гравитационных взаимодействий. Таким образом, гравитация включается в теорию струн естественным образом, как одна из степеней свободы. После сокра-

щения аномалий оказалось, что суперсимметричные теории с супергравитацией могут существовать в десятимерном геометрическом пространстве-времени с определенной группой, например, $SO(32)$ (ортогональная группа вращений размерности $n = 32$ с положительным определителем, равным единице), которая описывает гетеротические струны, то есть струны с сокращающимися аномалиями (на однопетлевом уровне) и обладающие свойствами унитарности, суперсимметрии, лоренц-инвариантности, конечности, а также отсутствием тахионов, что исключает нестабильные вакуумные состояния и влияние на инфракрасные расходимости в петлевых диаграммах. Такую десятимерную теорию можно компактифицировать для использования в четырехмерном пространстве-времени [7].

Одним из интересных свойств теорий струн является Т-дуальность [8], которая устанавливает, что две геометрии пространства-времени в области дополнительных измерений могут быть эквивалентными с точки зрения физического описания. Например, окружность радиуса R может быть эквивалентной окружности радиуса ℓ^2/R , где ℓ — фундаментальная длина (струны, часто полагают, что $\alpha' = \ell^2$). То есть Т-дуальность связывает два типа теории. Значит, эти два типа теории не являются независимыми и их можно трактовать как два конечных представления одной, более общей, теории при изменении радиуса дополнительного измерения. Преобразования Т-дуальности уменьшают число независимых теорий струн с 5 до 3 за счет отождествления обоих (открытые и закрытые) типов гетеротических струн и обоих типов суперструн типа II.

В течение первых 25 лет развития теории струн основным подходом было разложение в ряд теории возмущений с использованием струнной константы g в качестве малого параметра. При переходе из 10-мерного в 4-мерное пространство этот ряд превращается в разложение по степеням скалярной кривизны (и соответственно тензоров Римана и Риччи). Здесь важно подчеркнуть, что в том случае, если теория струн рассматривается как единая теория всех четырех видов физических взаимодействий, включая гравитацию, базовым значением (нулевым порядком) такого разложения должен быть хорошо известный лагранжиан теории относительности. Именно наличие этого ряда является основной причиной интереса к гравитации Лавлока, моделям с рядами по степеням R , R_{ij} , которые, таким образом, приобретают фундаментальную основу.

М-теория и 11-мерная супергравитация

Другой тип дуальности — S-дуальность — позволяет выйти за границы применимости рядов теории возмущений. Аналогично тому, как T-дуальность устанавливает преобразование $R \leftrightarrow 1/R$, S-дуальность устанавливает преобразование $g \leftrightarrow 1/g$. Основные примеры использования — преобразование теории струн типа $I \leftrightarrow$ гетеротические с $SO(32)$ и теории струн типа $IIB \leftrightarrow IIB$ (саму в себя, самодуальность). Получается предел $g \gg 1$. Таким образом, число независимых теорий сокращено до одной (а имеющиеся пять различных теорий струн — асимптотики в различных предельных случаях). В низкоэнергетическом пределе эта новая теория (названная М-теорией) дает 11-мерную супергравитацию. Соотношение теорий схематически показано на рис. 3.

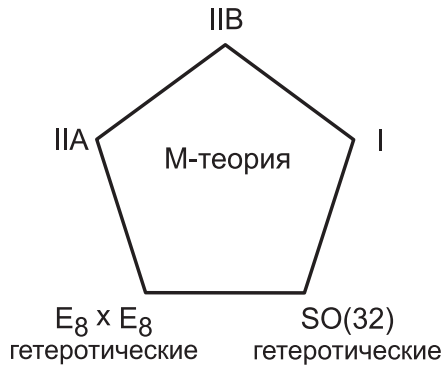


Рис. 3. Схематическое соотношение пяти теорий струн, связанных преобразованиями дуальности, и «базовой» М-теории

Модели с некомпактными дополнительными измерениями

Причины разработки

За последние годы в теоретической физике появился ряд проблем, которые не удастся решить, оставаясь в рамках стандартной версии теории относительности [9]. Прежде всего это результаты на-

блюдений сверхновых типа II [10]. После анализа полученных астрономических данных был сделан вывод о том, что постоянная Хаббла не является постоянной, а сама зависит от красного смещения [10]. То есть более дальние части Вселенной удаляются от нас со скоростью большей, чем предсказывается в стандартной версии закона Хаббла. Имеет место явление, названное «ускоренным расширением Вселенной». Для учета этого явления необходимо добавить какие-то дополнительные члены в лагранжиан теории относительности. Самым простым выбором является добавление в действие космологической постоянной.

Со времен Эйнштейна считалось, что если наш мир имеет число размерностей, большее 4, то дополнительные измерения должны быть компактны [11], то есть иметь размер Планка (10^{-33} см). Были развиты модели компактификации на торе, сфере, других типов. Но все эти теории не отвечали на вопрос о причине малости дополнительных измерений. Наконец, в [12, 13] была показана возможность раскомпактификации, то есть процесса экспоненциального роста дополнительных измерений. Так как такого не наблюдалось, модели требуют доработки.

Также основанием для расширения ОТО является ее непроверенность на сверхмалых (менее 0.01 мм) и сверхбольших (больше масштабов Галактики) расстояниях. В соответствии с современными космологическими представлениями только 4 % материи во Вселенной является видимой. Остальное — это либо темная материя (то есть материя, не излучающая и не поглощающая фотоны, существование которой было выявлено косвенными методами по отклонениям от законов гравитации), либо темная энергия (ускоренное расширение Вселенной).

Модели АДД и понижение величины фундаментальной энергии

Основные положения модели АДД

Одной из первых моделей, реализовавших идею некомпактности дополнительных измерений в физике высоких энергий, стала модель В. А. Рубакова и М. И. Шапошникова [14, 15]. Следующим важным шагом стала модель Аркани—Хамеди, Димитрополуса и Двали (АДД) [16]. Авторам модели удалось понизить фундаментальный планковский масштаб с 10^{19} ГэВ до диапазона ТэВ при помощи локализации всех физических полей, кроме гравитации, на 3 +

+ 1 гиперповерхности (или бране), помещенной в многомерное пространство. Дополнительные измерения, скомпактифицированные в *большой* объем, и дают это смещение фундаментальной планковской энергии.

Основными чертами модели АДД являются:

- n дополнительных измерений, каждое скомпактифицировано с радиусом r (одинаковым для всех некомпактных дополнительных измерений) на торе с объемом $V_n = (2\pi r)^n$;
- все поля, за исключением гравитации (то есть материя, Хиггсовские поля, калибровочные поля), локализованы на трехмерной бране, находящейся в дополнительном (балк) пространстве, где, в дополнение к бране, существует гравитационное взаимодействие;
- брана устойчива (флуктуациями поверхности браны в многомерном пространстве можно пренебречь).

Тогда лагранжево действие для модели можно расписать как сумму двух частей:

$$S = S_{bulk} + S_{brane}. \quad (1)$$

Основным предположением модели АДД является плоскость дополнительного пространства, то есть метрику можно переписать как

$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu - r^2 d\Omega_{(n)}^2). \quad (2)$$

На основании такого представления многомерные величины метрики и скалярной кривизны можно заменить их 4-мерными значениями, то есть, приравнявая стандартный коэффициент ОТО и коэффициенты в преобразованном действии теории, получим знаменитое соотношение между фундаментальной и четырехмерной массами Планка:

$$M_{Pl}^2 = M_*^{n+2} (2\pi r)^n. \quad (3)$$

То есть наша масса Планка отличается от фундаментальной на объемом дополнительного пространства-времени $(2\pi r)^n$.

Таблица 1. Порядок размера дополнительных измерений, на котором можно ожидать нарушения закона Ньютона при $M_* = 1$ ТэВ

Число некомпактных дополнительных измерений, n	1	2	3	...	6
r , м	$\approx 10^{12}$	$\approx 10^{-3}$	$\approx 10^{-8}$		$\approx 10^{-11}$

Отклонения от ньютоновской гравитации

Из-за изменения значения массы Планка происходит и изменение потенциала гравитационного взаимодействия (ньютоновского потенциала):

$$V(r') = -G_N^{(4)} \frac{m_1 m_2}{r} \left(1 + \alpha e^{-r'/\lambda} \right). \quad (4)$$

Таким образом, можно оценить тот размер дополнительных измерений r , при котором закон тяготения начнет отличаться от проверенного сейчас ньютоновского значения. Считая $M_* = 1$ ТэВ (шкала электрослабого взаимодействия, на которой будет работать новое поколение ускорителей, например, *Large Hadron Collider*, LHC), порядок будет следующим (табл. 1):

Как видно из табл. 1, случай с одним некомпактным дополнительным измерением полностью исключен тестами в нашей Солнечной системе. Случай $n = 2$ является пограничным (то есть размер дополнительных измерений соответствует верхней оценке). Для случая двух дополнительных измерений предсказывается нарушение закона Ньютона на масштабах менее 1 мм. В 1998 г., когда создавалась модель АДД, экспериментальный предел на нарушение закона Ньютона как раз и равнялся 1 мм. В настоящее время закон проверен до расстояния в 200 мкм, и, так как никаких отклонений пока не зафиксировано, это исключает случай двух некомпактных дополнительных измерений (при $M_* = 1$ ТэВ). Для случая 3 и более дополнительных измерений нарушения закона Ньютона должны начаться при достижении расстояний в 10 нм, что на данный момент не исключено.

*Рождение гравитонов в эксперименте и ограничения на размер
дополнительных измерений*

Используя формулу (54) из [17], можно выписать общую формулу для дифференциального сечения рассеяния с учетом гравитонов, уходящих в дополнительное пространство:

$$\frac{d^2\sigma}{dtdm} = S_{n-1} \frac{M_{Pl}^2}{(2\pi)^n M_*^{n+2}} m^{n-1} \frac{d\sigma_m}{dt}, \quad (5)$$

где $d\sigma/dt$ — дифференциальное сечение рассеяния для одиночного гравитона массой m .

Общую формулу (5) можно применить для реальных процессов, в которых появятся гравитоны. Например, можно рассмотреть рождение гравитонов и фотонов вида $ff \rightarrow \gamma G$. Эта реакция может иметь место на ускорителе, при этом гравитоны будут уходить с браны. Ситуация с данной реакцией в адронном ускорителе в свете строительства LHC привлекла обширное внимание [18].

*Ограничения на размер
дополнительных измерений из астрофизики*

Ограничения на размер некомпактных дополнительных измерений также можно извлечь из астрофизики. Следствием наличия некомпактных дополнительных измерений явится наличие гравитонов в дополнительном пространстве, то есть гравитонов, уходящих с браны. Скорость производства таких гравитонов пропорциональна $M_{Pl}^{-2}(Tr)^n \propto T^n/M_*^{n+2}$. Поэтому необходимо найти наиболее яркий астрофизический объект и использовать его как тест-лабораторию. В качестве такого объекта был использован SN1987A [19], открытый, в том числе и на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН группой Е. Н. Алексеева [20]. В соответствии с расчетами из [21], ограничения на фундаментальную массу (размер дополнительных измерений) приведены в табл. 2 ($M_D = (2\pi)^{n/(n+2)} M_*$).

Ограничения на размер дополнительных измерений из космологии

Если вторичный разогрев происходил до температуры, меньшей некоторого граничного значения [17], в соответствии с моделью должно было родиться множество легких долгоживущих гравитонов. Сами по себе они не вносят значительного вклада, но можно

Таблица 2. Ограничение на фундаментальную массу и размер дополнительных измерений из данных по SN1987A в соответствии с расчетами [21]

Число некомпактных дополнительных измерений, n	2	3	4
M_D , ТэВ	50	4	1
r , мм	10^{-4}	10^{-7}	10^{-8}

попробовать поискать в эксперименте продукты их распадов. Процесс распада этих гравитонов на фотоны описывается с помощью общей формулы (5). Мы видим, что часть гравитонов с массами до 5 МэВ, рожденных при вторичном разогреве, распадается вплоть до сегодняшнего дня. Эти фотоны должны вносить свой вклад в общий фоновый спектр космических γ -лучей. Данная часть спектра изучалась в эксперименте COMPTEL. Так как из моделей вторичного разогрева следует, что его температура была не менее 1 МэВ, можно получить оценку вклада фотонов от распадов первичных гравитонов, взяв граничную температуру T_* равной 1 МэВ. Подобный анализ был проделан в [22], дав следующее ограничение на шкалу квантовой гравитации:

$$\begin{aligned} M_D &> 110(350) \text{ ТэВ для } T_* = 1(2.2) \text{ МэВ при } n = 2, \\ M_D &> 5(14) \text{ ТэВ для } T_* = 1(2.2) \text{ МэВ при } n = 3. \end{aligned}$$

Для $n > 3$ никаких ограничений получить не удастся.

Модели Л. Рэндал и Р. Сандрума

Модель RS1

В 1999 г. в работах [23] была предложена оригинальная модель, которая впоследствии получила название модель «Рэндал—Сандрума 1 (RS1)». Рассмотрено 5-мерное многообразие из двух бран с космологическими константами на границах и в дополнительном пространстве, устроенными так, чтобы дать 4-мерную устойчивую теорию на бране с исчезающе малой космологической константой.

Фоновая метрика имеет вид

$$ds^2 = e^{-k|y|} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu - dy^2,$$

то есть метрика уже не столь тривиальна, как в АДД случае. Зависимость от координаты y , в метрике выглядящая как $e^{-k|y|}$, получила название «фактор искривления».

Действие модели:

$$S = S_{bulk} + S_{Plank} + S_{TeV}. \quad (6)$$

Четырехмерная планковская шкала может быть получена интегрированием по дополнительным измерениям (аналогично АДД):

$$M_{Pl}^2 = M_{RS}^3 \int_{y=-b}^{y=+b} e^{-2k|y|} dy = \frac{M_{RS}^3}{k} (1 - e^{-2k|y|}).$$

При этом все фундаментальные параметры могут быть подогнаны под 4-мерные значения при соответствующем изменении $e^{-2k|y|}$.

Модель RS2 получается из модели RS1 при удалении дополнительной (ТэВ) браны на бесконечно большое расстояние. На ее основе построена модель Двали—Габададзе—Паратти (DGP).

Выводы: связь физики высоких энергий и гравитации

Значение $M_D \sim 1$ ТэВ не противоречит имеющимся экспериментальным данным. То есть речь уже идет о величинах порядка долей миллиметра в зависимости от радиуса дополнительного пространства (которое предполагается имеющим характерный размер такого же масштаба и плоским). Более того, столь малая величина планковской энергии минимизирует расстояние между характерными энергиями электрослабого взаимодействия и планковской энергией, как и предполагалось вначале. В этом сценарии на энергиях, близких к масштабу электрослабого взаимодействия, поля из «стандартной модели» должны быть локализованы на четырехмерной поверхности «толщиной» масштаба электрослабого взаимодействия, помещенной в многомерное пространство. Как показано в работах [24], основанных на предположении о шестимерности пространства, такую локализацию построить можно.

Другой важный путь построения гравитации на масштабах ТэВ — это изучение свойств геометрии дополнительного пространства модели Рэндал—Сандрума [23]. Если параметр модели мал по сравнению с размером браны, массы частиц могут лежать в диапазоне ТэВ, что объясняет проблему иерархии [25]. При этом также ожидаются эффекты сильных гравитационных полей при рассеянии частиц высоких энергий на бране [11].

В рамках этих моделей черные дыры могут рождаться на ускорителе LHC. Два партона с энергией в системе центра масс \sqrt{s} , двигающихся в противоположных направлениях с прицельным параметром меньше радиуса горизонта, могут сформировать черную дыру массой $M \approx \sqrt{s}$ с сечением рассеяния порядка $\sigma \approx \pi r_+^2$. Эти величины, конечно, приближенные, так как масса черной дыры может быть лишь частью энергии в системе центра масс, точное значение зависит от размерности пространства и углового момента родившейся черной дыры [26]. Более того, необходимо учитывать и другие возможные каналы. Так как точные значения величин неизвестны, возможно применение квазиклассического анализа рождения черных дыр [27].

Работа была поддержана грантом РФФИ №07-02-01034-а.

Список литературы

1. *Ландау Л. Д., Лифшиц Л. Е.* Теория поля. — М.: Мир, 1986.
2. *Higgs P. W.* Quadratic lagrangians and general relativity // *Nuovo Cimento*. — 1959. — Vol. 11, № 10. — P. 816.
3. *Lovelock D.* The Einstein tensor and its generalizations // *J. Math. Phys.* — 1971. — Vol. 12. — P. 498.
4. *Новиков И. Д., Фрозов В. П.* Физика черных дыр. — М.: Наука, 1986.
5. *Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В.* Введение в теорию квантованных полей. — М.: Наука, 1984.
6. *Schwarz J. H., Seiberg N.* String theory, supersymmetry, unification, and all that // *Rev. Mod. Phys.* — 1999. — Vol. 71. — P. S112—S120.
7. *Banks T.* Matrix theory // *Nuc. Phys. B Proc. Suppl.* — 1998. — Vol. 67. — P. 180.
8. *Hawking S. W., Hertog T., Reall H. S.* Brane new world // *Phys. Rev. D*. — 2000. — Vol. 62. — P. 043501.

9. *Schwarz J. H.* Update on String theory // Measuring and modeling the Universe / Ed. by W. L. Freedman. — 2004. — P. 53.
10. *Linder E. V.* Dark energy, expansion history of the universe, and SNAP // Particle Physics and Cosmology / Ed. by J. F. Nieves, C. N. Leung: AIP Proc. conf. — Vol. 655. — 2003. — P. 193.
11. *Рубаков В. А.* Большие и бесконечно большие дополнительные измерения: введение // УФН. — 2001. — Т. 171. — С. 913.
12. *Linde A.* Inflationary cosmology, Ed. by M. Lemoine, J. Martin, P. Peter. — Heidelberg: Springer Berlin, 2008. — Vol. 738 of Lecture notes in Physics. — P. 1.
13. *Linde A. D., Zel'nikov M. I.* Inflationary universe with fluctuating dimension // Phys. Let. B. — 1988. — Vol. 215. — P. 59.
14. *Rubakov V. A., Shaposhnikov M. E.* Do we live inside a domain wall? // Phys. Let. B. — 1983. — Vol. 125. — P. 136.
15. *Rubakov V. A., Shaposhnikov M. E.* Extra space-time dimensions: towards a solution to the cosmological constant problem // Phys. Let. B. — 1983. — Vol. 125. — P. 139.
16. *Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G.* Phenomenology, astrophysics, and cosmology of theories with submillimeter dimensions and TeV scale quantum gravity // Phys. Rev. D. — 1999. — Vol. 59. — P. 086004.
17. *Kribs G. D.* TASDI 2004 lectures on the phenomenology of extra dimensions // Physics in $D > 4$. — Boulder, 2004. — P. 633.
18. *Giudice G. F., Rattazzi R., Wells J. D.* Quantum gravity and extra dimensions at high-energy colliders // Nuc. Phys. B. — 1999. — Vol. 544. — P. 3–38.
19. *Raffelt G. G.* Particle physics from stars // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. — 1999. — Vol. 49. — P. 163.
20. *Алексеев Е. Н., Алексеева Л. Н.* Двадцать лет наблюдений за Галактикой в поисках всплесков коллапсных нейтрино на баксанском подземном сцинтилляционном телескопе // ЖЭТФ. — 2002. — Т. 122, вып. 1. — С. 10.
21. *Cullen S., Perelstein M.* SN 1987A Constraints on Large Compact Dimensions // Phys. Rev. Lett. — 1999. — Vol. 83. — P. 268–271.
22. *Hall L. J., Smith D.* Cosmological constraints on theories with large extra dimensions // Phys. Rev. D. — 1999. — Vol. 60. — P. 085008.

23. *Randall L., Sundrum R.* An Alternative to compactification // Phys. Rev. Lett. — 1999. — Vol. 83. — P. 4690.
24. *Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G.* The hierarchy problem and new dimensions at a millimeter // Phys. Let. B. — 1998. — Vol. 429. — P. 263.
25. *Giddings S. B., Thomas S.* High energy colliders as black hole factories: The end of short distance physics // Phys. Rev. D. — 2002. — Vol. 65. — P. 056010.
26. *Eardley D. M., Giddings S. B.* Classical black hole production in high-energy collisions // Phys. Rev. D. — 2002. — Vol. 66. — P. 044011.
27. *Barrau A., Grain J., Alexeyev S.* Gauss-Bonnet black holes at the LHC: beyond the dimensionality of space // Phys. Let. B. — 2004. — Vol. 584. — P. 114.

КОСМИЧЕСКИЕ ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА

В лекции рассматриваются различные аспекты положения и движения Солнечной системы в Галактике, а также процессы взаимодействия Солнечной системы с окружающей ее межзвездной средой.

The lecture describes various aspects of the Solar System location and motion within the Galaxy as well as processes of interaction between the Solar System and the surrounding interstellar medium.

Где заканчиваются окрестности

— Космические окрестности Солнца? Странное название.
Разве бывают какие-то еще?
Коллега по институту

В наше время модным течением не только (или даже не столько) научной, но и общественно-политической мысли стала экология — отрасль знания, посвященная различным аспектам взаимоотношений между человеком и окружающей его природой [1]. По понятным причинам нас пока беспокоят в основном «локальные» экологические проблемы, оказывающие на нашу жизнь сиюминутное и вполне определенное влияние. Как правило, эти проблемы не выходят за рамки земной атмосферы, скажем озонового слоя или радиационных поясов. Однако за атмосферой Природа не заканчивается и не заканчивается наше взаимодействие с ней. Правда, механизмы этого взаимодействия могут быть не столь очевидными, а его (возможные) последствия сказываются на существенно более длительных промежутках времени, но от этого они не становятся ни менее важными, ни менее интересными.

Из «внешних» факторов, действующих на Землю, на слуху в основном находятся два — астероидно-кометная опасность и солнечный ветер. И это естественно: примеры их действия хорошо известны и весьма наглядны — взять хотя бы падение Тунгусского метеорита, 100-летие этого события мы отмечали в прошлом году, и масштабные отключения электричества в США и Канаде в 1989 г. Однако

про эти факторы я говорить не буду, поскольку информации о них и так достаточно много. В частности, об астероидно-кометной опасности на Школе рассказывал в 2008 г. Б. М. Шустов [2]. К тому же их скорее можно отнести к окрестностям Земли, а не Солнца. Я же постараюсь рассказать о наших космических окрестностях в более широком, галактическом масштабе, о том, что окружает не Землю и даже не Солнце, а всю Солнечную систему.

Положение Солнца в Галактике

Вдали от райцентра и главных дорог,
Где снег по оврагам особо глубок
И где в связи с этим царит тишина,
Деревня Ковылкино размещена.

Ю. Коваль. Песня из фильма «Недопесок Наполеон III»

Представление о том, что у землян есть некие галактические *окрестности*, доступные изучению, возникло сравнительно недавно — в начале XX века. Ни во времена Аристотеля, ни даже во времена Коперника разговор об окрестностях Солнечной системы не имел особого смысла. За орбитой Сатурна располагалась либо сфера неподвижных звезд, либо (в более продвинутых вариантах) бесконечное пустое пространство. Впервые задача определения положения Солнца относительно других звезд и всей звездной системы была сформулирована и решена В. Гершелем. Используя метод звездных подсчетов, он определил, что Солнце находится в центре звездного диска, толщина которого равна 150 средним расстояниям между звездами, а поперечник — 800 таким расстояниям. В этой работе он исходил из двух неверных предположений: наблюдениям доступны все звезды; все звезды имеют одинаковую яркость. Поэтому результат получился весьма далеким от реальности: если перевести размеры, определенные Гершелем, в понятные нам единицы, то получится, что Галактика представляет собою лепешку толщиной 340 пс и диаметром 1 800 пс.

Центральное положение в Галактике Солнце занимало вплоть до начала XX в. Я. Каптейн довольно верно определил поперечник галактического диска, составлявший по его оценке около 20 кпс, но при этом получил, что от центра Галактики Солнце отстоит всего на 600–700 пс [3]. Интересно, что он продолжал придерживаться «галактического гелиоцентризма» несмотря на полученные несколькими годами ранее результаты Шепли, который показал, что Солнце

находится *очень* далеко от центра Галактики — на расстоянии около 20 кпс при диаметре Галактики 100 кпс [4]. Современные оценки несколько сократили это расстояние, но не отменили «провинциальное» положение Солнца: сейчас считается, что мы находимся примерно в 8 кпс от центра Галактики и в нескольких десятках парсеков «над» плоскостью галактического диска.

Сложнее разобраться в расположении Солнца относительно спиральных ветвей. Первыми на наблюдаемые признаки наличия в Галактике спиральной структуры еще в 1952 г. указали Морган, Шарплесс и Остерброк [5] (общефилософские соображения о возможном сходстве Галактики со спиральными туманностями высказывались еще в XIX в.). Однако и по сей день структура спирального узора Млечного Пути остается довольно неопределенной. Наиболее распространено представление о двух- или четырехрукавной структуре с двумя основными рукавами — Персея и Щита—Центавра (он же рукав Южного Креста—Щита) — и двумя рукавами меньшего масштаба — Наугольника и Стрельца—Киля [6] (рис. 1). Солнце расположено примерно посередине между рукавами Персея и Стрельца—Киля на расстоянии примерно 1.5–2 кпс от обоих. Кроме того, гораздо ближе к нам в направлении, противоположном центру Галактики, расположен небольшой фрагмент рукава — рукав Ориона (или рукав Ориона—Лебеда). Он не похож на полноценный рукав, и его часто считают ответвлением от рукава Стрельца.

Отсутствие в окрестностях Солнца крупных спиральных рукавов довольно часто называют среди факторов, благоприятствовавших появлению жизни: в спиральных рукавах сосредоточены очаги звездообразования, а значит, там часты вспышки сверхновых, многочисленны источники ультрафиолетового излучения. . . Правда, чтобы удаленность Солнечной системы от бурных проявлений галактической жизни сохранялась на протяжении всей ее жизни, Солнце должно находиться в так называемом кольце коротации — области Галактики, в которой скорость вращения звездного диска совпадает со скоростью вращения спирального узора. Имеется много указаний на то, что именно так оно и есть на самом деле [7], что, однако, не исключает и других точек зрения [8]. Еще один фактор, влияющий на расположение Солнца в Галактике, — возможная эволюция его орбиты. Расчеты показывают, что в результате движения в сложном гравитационном поле Галактики звезды могут существенно мигрировать как по азимуту, так и по радиусу [9, 10]. Иными словами, вполне может оказаться, что современная позиция Солнца не толь-

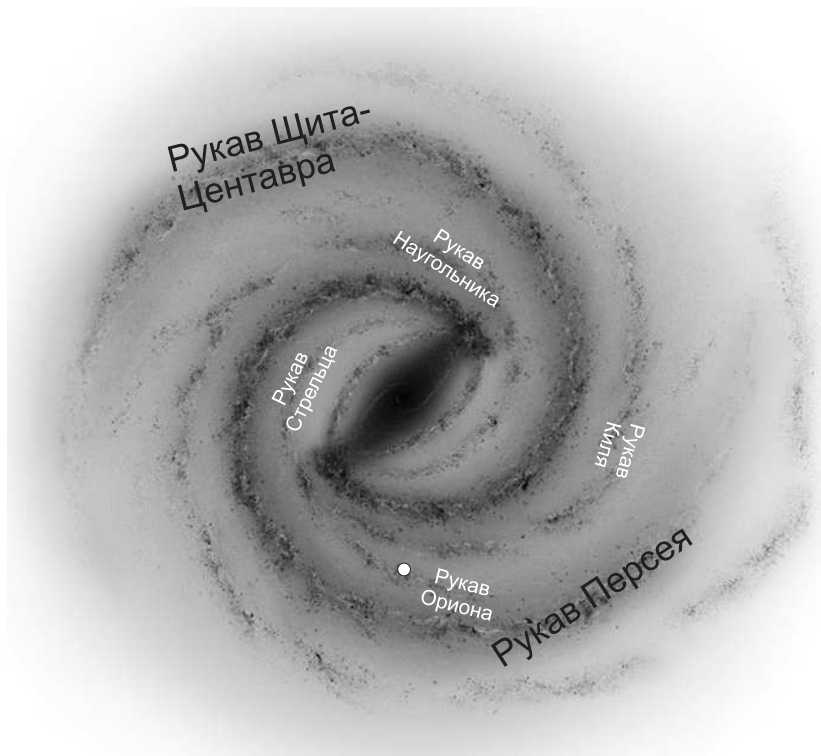


Рис. 1. Примерный вид спиральной структуры нашей Галактики. Белой точкой отмечено положение Солнца. Фоновое изображение — © NASA/JPL-Caltech

ко не отражает его исходное расположение относительно спиральных рукавов, но и не соответствует изначальному галактоцентрическому расстоянию. Современное окружение Солнца (даже из числа объектов диска) не связано с ним ни общностью происхождения, ни общностью истории.

Звездное окружение Солнца и Пояс Гулда

— Интересно, что это так бумкнуло?
Маленький Пятачок

В целом с точки зрения звездного населения окрестности Солнца выглядят весьма блекло. На расстоянии до 5 пс от Солнца известно 60 звезд (без учета самого Солнца), 4 белых карлика и 4 коричневых карлика. Среди этих звезд 50 относятся к красным карликам спектрального класса М. Неудивительно поэтому, что красным карликом оказалась и ближайшая к Солнцу звезда — Проксима (1.3 пс). В два раза дальше находится ближайший к нам белый карлик — спутник Сириуса. Ближайший коричневый карлик, точнее два коричневых карлика, входят в систему ϵ Индейца на расстоянии 3.6 пс. На 3.2 пс удалена от нас ближайшая внесолнечная планетная система ϵ Эридана.

Больше ничего интересного (из звездного ассортимента) в непосредственных окрестностях Солнца нет. До ближайшего к нам рассеянного звездного скопления (Гиады) 4 пс, до ближайшей звездной ассоциации (ТW гидры) — 55 пс, до ближайшей нейтронной звезды (1RXS J141256.0+792204) — 80—300 пс, до ближайшей черной дыры (V4641 Sgr) — 460 пс. И уж совсем далеки от нас шаровые звездные скопления: даже самое близкое из них (М4) отстоит от Солнца более чем на 2 кпс.

Несколько сложнее обстоит дело с движущимися группами — остатками распадающихся звездных скоплений и ассоциаций. Они имеют существенно большие пространственные размеры, чем рассеянные звездные скопления (РЗС), и иногда разбросаны по небесной сфере на десятки градусов. Основным критерием для выделения членов движущейся группы является общее пространственное движение, дополненное схожими возрастами и химическим составом звезд-членов. Поскольку все эти параметры известны с довольно значительными погрешностями, часто существует значительная неопределенность не только в отнесении конкретной звезды к той или иной группе, но и в идентификации группы как таковой. Поэтому четко ответить на вопрос о том, какая движущаяся группа является ближайшей к Солнцу, не так просто. По одним данным это группа Большой Медведицы (20—30 пс), по другим — группа Геркулеса—Лиры (13—46 пс) [11]. Если же реальна движущаяся группа (сверхскопление) Сириуса, то Солнце вполне может оказаться не только в нескольких парсеках, но и внутри движущейся группы. С другой

стороны, некоторые движущиеся группы могут иметь динамическое происхождение, то есть объединять звезды на резонансных орбитах, не связанные общим происхождением (прошлым членством в одном скоплении или ассоциации). По данным [12, 13], динамическим происхождением обладают и группа Сириуса, и группа Геркулеса—Лиры, поэтому ближайшей группой с общим происхождением звезд снова можно считать группу Большой Медведицы.

Если отойти от Солнца на более значительное расстояние, то мы обнаружим, пожалуй, наиболее интересное звездное образование в окрестностях Солнца — Пояс Гулда. По сути, его обнаружил еще в 1847 г. Джон Гершель, обративший внимание на то, что в Южном полушарии неба яркие звезды расположены несимметрично относительно Млечного Пути. Однако честь окончательного открытия принадлежит Бенджамину Гулду, который в 1874 г. отметил, что полукольцо, очерченное Гершелем, продолжается и на северном небе, образуя полный большой круг, наклоненный к галактическому экватору под углом примерно $18\text{--}20^\circ$.

Сейчас известно, что Пояс Гулда — это эллиптическая структура размером примерно 700 на 400 пс, центр которой находится примерно в 100 пс от Солнца в направлении на антицентр Галактики. Визуально Пояс Гулда лучше всего выделяется в распределении массивных звезд (в его состав входит 90 % всех ОВА-звезд в радиусе 1 000 пс от Солнца, однако помимо них пояс прослеживается также в распределении молодых маломассивных звезд, молекулярных облаков, источников жесткого излучения (остатков тех массивных звезд, которые уже закончили свой жизненный путь).

На рис. 2 показана примерная карта распределения газа и звезд в Поясе Гулда в проекции на плоскость Галактики. Солнце расположено в точке пересечения осей. Центр Пояса Гулда расположен примерно в 200 пс от Солнца в направлении созвездия Персея и совпадает с РЗС α Персея. Известно, что система газовых облаков, связанных с Поясом Гулда, расширяется со скоростью $2\text{--}5\text{ км с}^{-1}$ [14]. Возраст Пояса Гулда, оцененный по этому расширению, составляет около 60 млн лет. Вначале Пояс был, вероятно, более округлым, а нынешнюю вытянутую форму приобрел из-за дифференциального вращения Галактики. Единого мнения о происхождении Пояса Гулда пока нет. Совпадение центра его расширения с РЗС α Персея и предполагаемыми остатками звездной ассоциации Кассиопеи—Тельца, возраст которых ~ 50 млн лет, приводит к предположению, что возникновение Пояса было стимулировано вспышками сверхно-

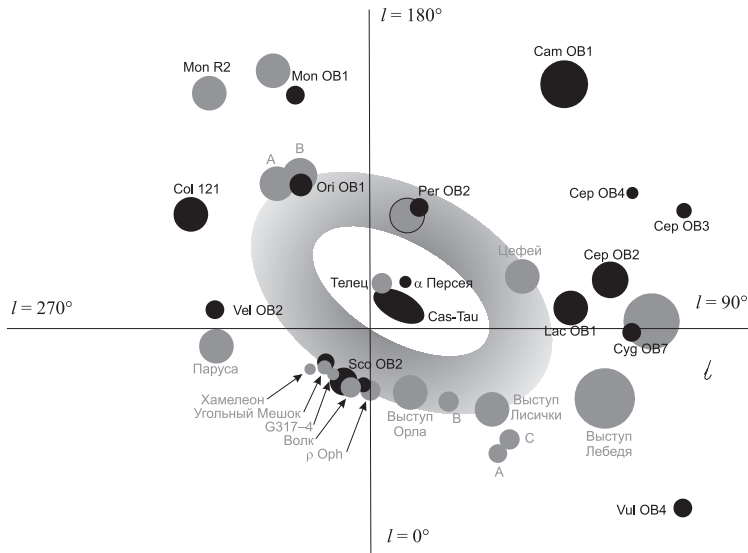


Рис. 2. Карта Пояса Гулда в проекции на плоскость Галактики, построенная на основе изображения из работы [17]. Широкой овальной полосой показано примерное распределение газа. Серыми кружками отмечены молекулярные облака и области звездообразования, черными — звездные скопления и ассоциации. Солнце находится в точке пересечения осей

вых в ныне распавшемся звездном комплексе [15]. Другая гипотеза — падение на галактический диск массивного высокоскоростного облака [16]. Одно из наиболее труднообъяснимых свойств Пояса Гулда в обоих случаях — его довольно значительный наклон к плоскости Галактики.

Полная масса звезд в Поясе Гулда составляет несколько сотен тысяч M_{\odot} , причем значительная доля этой массы сосредоточена в ближайшей к Солнцу ОБ-ассоциации — ассоциации Скорпиона—Центавра (150 пс) [18]. Она разделяется на три группировки разного возраста: Верхний Скорпион—Центавр (17 млн лет), Нижний Центавр—Крест (12–17 млн лет) и Верхний Скорпион (5 млн лет). Возрасты всех этих группировок меньше предполагаемого возрас-

та Пояса Гудда, поэтому мы, вероятно, наблюдаем здесь вторичное звездообразование, стимулированное предыдущими поколениями звезд Пояса. В любом случае следующих поколений звезд в ассоциации Скорпиона—Центавра уже не будет, поскольку она практически лишена газа.

Этого не скажешь о другом выдающемся представителе населения Пояса Гудда — ближайшей к нам области образования массивных звезд в Орионе. Масса газа в этом грандиозном комплексе молекулярных облаков составляет, вероятно, не одну сотню тысяч M_{\odot} , это заметная доля всех запасов газа в Поясе. Именно здесь находятся такие жемчужины небосвода, как Большая Туманность Ориона и туманность Конская Голова. Благодаря Поясу Гудда (точнее, событию, которое привело к его образованию) мы получили возможность изучать образование массивных звезд на таком сравнительно небольшом расстоянии от Солнца. Если бы неведомая катастрофа несколько десятков миллионов лет назад не вдохнула новую жизнь в местную межзвездную среду, нам пришлось бы довольствоваться областью образования массивных звезд в Единороге — Mon R2, которая расположена почти в два раза дальше.

Ближайшая к нам область образования маломассивных звезд расположена на расстоянии 140 пс в направлении созвездий Тельца и Возничего. Это существенно менее масштабное образование, чем облака в Орионе. Полная масса газа в нем составляет несколько единиц на $10^4 M_{\odot}$, а поперечник не превышает 30 пс. Происхождение молекулярных облаков в Тельце до сих пор вызывает вопросы. Этот комплекс — практически единственный значительный резервуар молекулярного газа внутри Пояса Гудда, причем его возраст по большинству оценок не превышает 10^7 лет [19], то есть облака в Тельце значительно моложе Пояса. Высказывалось предположение, что они были выброшены из Пояса Гудда и теперь летят по направлению к его центру [20]. Именно этому движению мы обязаны наличию отражательных туманностей вокруг Плеяд. Звезды скопления освещают налетающий на них газ, но «генетически» никак с ним не связаны [21, 22].

Локальная межзвездная среда

Рассупонилося солнышко,
расталдыкнуло свои лучи по белу светушку.
Писатель из группы «Стальное вымя»

Какое бы событие ни обусловило возникновение Пояса Гулда, оно, по-видимому, неплохо очистило окрестности Солнца от плотного молекулярного газа. Однако менее плотное межзвездное вещество в окрестностях Солнца все же имеется, и именно это вещество является интерфейсом, посредством которого осуществляется взаимодействие между Солнечной системой и Галактикой. При этом возникает, конечно, интереснейший вопрос о том, где именно происходит это соприкосновение. Где проходит граница между Солнечной системой и Галактикой? Как далеко нужно отправить космический аппарат, чтобы его можно было с полным правом называть межзвездным?

Логичнее всего провести границу там, где находится (движется) самый далекий объект Солнечной системы. Но, чтобы назвать некий объект самым далеким, нужна уверенность в том, что более далеких объектов нет. Самыми далекими телами Солнечной системы, существование которых не вызывает сомнений, являются тела из пояса Койпера, но как провести по ним границу? Дальше других — на сотни а. е. — улетают от Солнца объекты из резонансного пояса Койпера. Предполагается, что изначально они не были столь далеки от Солнца, но потом были выброшены на резонансные орбиты притяжением Нептуна. Классический же пояс Койпера не распространяется дальше 50 а. е. Именно в этих пределах сосредоточена подавляющая доля массы *наблюдаемого вещества* Солнечной системы. Есть, правда, еще Седна, которая в афелии улетает от Солнца на 1 000 а. е. Перигелийное расстояние Седны составляет 74 а. е., это слишком далеко, чтобы чувствовать влияние Нептуна на его теперешней орбите, но что если, например, в прошлом Нептун находился на орбите с большим эксцентриситетом [23]?

Сами авторы работы [23] предпочитают гипотезу о том, что Седну на ее сегодняшнюю орбиту «пристроило» сближение Солнца с другой звездой. Это роднит Седну с объектами гипотетического Облака Оорта — резервуара, который (как предполагается) возник в результате рассеяния планетезималей при сближении протосолнечного диска с другими звездами и теперь окружает Солнечную систему сферически симметричной оболочкой поперечником около парсека. Облако Оорта (как предполагается) населено триллионами каменно-

ледовых глыб, которые изредка (опять же под воздействием близких звезд) переходят с круговых на вытянутые орбиты и посещают внутреннюю область Солнечной системы в виде долгопериодических комет.

Граница Облака Оорта, проходящая в 200 тыс а. е. от Солнца, — самая далекая мыслимая граница Солнечной системы. Представьте себе — если у α Центавра есть собственное кометное облако, оно почти соприкасается с нашим. По сравнению с поясом Койпера Облако Оорта обладает еще одним достоинством: будучи (почти) сферически-симметричным, оно избавляет от необходимости отвечать на вопрос, где проходит граница Солнечной системы в направлении, перпендикулярном эклиптике. К сожалению, Облако Оорта по-прежнему остается гипотетическим объектом... Хотя в будущем ситуация может и измениться [24].

Есть еще одна «естественная» пограничная область, которая уже напрямую связана с интерфейсом между Солнечной системой и межзвездным веществом. Это гелиосфера — область пространства, заполненная солнечным ветром. Первая реалистичная модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной плазмой была построена в 1970 г. Барановым, Краснобаевым и Куликовским [25]. Эта модель стала основой для современных представлений о строении интерфейса между Солнечной системой и межзвездной средой.

Итак, внутренние области Солнечной системы заполнены солнечным ветром — потоком заряженных частиц, скорость которого на уровне орбиты Земли составляет около 400 км с^{-1} , а концентрация — около 10 см^{-3} . При столкновении сверхзвукового солнечного ветра со сверхзвуковым же набегавшим потоком межзвездного вещества, который сталкивается с Солнечной системой со скоростью около 25 км с^{-1} , неминуемо образуются ударные волны. Одна из них — гелиосферная ударная волна — возникает там, где поток солнечного ветра тормозится до дозвуковой скорости. В настоящее время гелиосферная ударная волна находится примерно на расстоянии 90 а. е. от Солнца на «наветренной» стороне гелиосферы и в два раза дальше на «подветренной» стороне. Вторая ударная волна — головная — образуется в 250 а. е. от Солнца при торможении межзвездного газа. Между двумя этими ударными волнами на расстоянии около 150 а. е. находится гелиопауза — область, где сравниваются давления солнечного ветра и межзвездной плазмы. Именно гелиопаузу принято считать границей между межпланетной и межзвездной средой.

До сих пор преодолеть хотя бы первую из трех этих границ — гелиосферную ударную волну — удалось двум космическим аппаратам. «Вояджер-1» вошел в промежуток между ударной волной и гелиопаузой 16 декабря 2004 года на расстоянии 94 а. е., а «Вояджер-2» преодолел тот же рубеж 31 августа 2007 г. на расстоянии 84 а. е. от Солнца. Нужно отметить, что положение гелиосферного ударного фронта зависит от уровня солнечной активности. Сейчас эта активность нарастает, и ударная волна будет удаляться от Солнца. Не исключено, что она обгонит «Вояджеры», и им придется еще не один раз покидать гелиосферу [26]. К сожалению, никакие другие экспедиции на окраины Солнечной системы на ближайшее будущее не запланированы.

Впрочем, если Магомет не идет к горе, горе не остается ничего иного, как идти к Магомету. Межзвездное вещество способно пересекать гелиопаузу и гелиосферную ударную волну, поэтому его можно изучать внутри Солнечной системы. Исследования потока нейтральных атомов водорода и гелия, а также межзвездных пылинок проводились при помощи многих космических аппаратов, как международных, так и отечественных [27]. Последним по времени шагом к исследованию межзвездного вещества в окрестностях Земли (не Солнца, а именно Земли) стал запуск зонда IBEX в октябре 2008 г. В этом проекте, нацеленном на прямое детектирование межзвездных атомов водорода, гелия и кислорода, участвуют и российские специалисты.

По результатам исследований потока вещества через Солнечную систему удалось измерить температуру и плотность межзвездной среды непосредственно за головной ударной волной. Сейчас Солнечная система пробирается через очень разреженное межзвездное облачко, которое астрономы с присущей им изобретательностью назвали Локальным межзвездным облаком (ЛМО). Концентрация частиц в нем составляет $0.1\text{--}0.3\text{ см}^{-3}$ при температуре около 7000 К. ЛМО обладает собственным движением относительно местной системы отсчета, и потому направление втекания вещества в Солнечную систему не совпадает с направлением на апекс, а лежит почти на эклиптике, в созвездии Змееносца. Помимо него в пределах 10 пс от Солнца имеется еще несколько подобных облаков с той же кинематикой, что и ЛМО.

Концентрация $0.1\text{--}0.3\text{ см}^{-3}$ не кажется значительной по сравнению с концентрацией газа в молекулярных облаках, достигающей 10^6 см^{-3} , однако в целом пространство вокруг Солнца заполнено су-

ещественно более разреженным веществом. Исследования межзвездного поглощения света в различных направлениях и для звезд на различных расстояниях показывают, что Солнце находится внутри гигантской полости с характерным размером порядка 100 пс. Эту полость называют Локальной полостью (еще одно свидетельство склонности астрономов к красивым необычным названиям), или Локальным пузырем (ЛП). В некоторых работах термины «Локальная полость» и «Локальный пузырь» используются в разных значениях: полостью называют собственно область диска Галактики, а пузырем — заполняющий эту полость горячий разреженный газ.

Изначально температура и плотность газа в ЛП оценивались по результатам наблюдений мягкого рентгеновского фона. Расчеты показывали, что этот газ обладает параметрами, типичными для галактической короны, — концентрацией 0.005 см^{-3} и температурой выше 10^6 К . Поскольку основным механизмом нагрева короны считаются вспышки сверхновых, логично предположить, что они же повинны и в образовании Локального пузыря. Моделирование динамики расширения пузыря показало, что его параметры наилучшим образом описываются в рамках предположения о последовательных вспышках 15–20 сверхновых, произошедших около 15 млн лет назад. Позже выяснилось, что некоторая, возможно значительная, доля рентгеновского фона имеет местное происхождение [28], и потому энергетика событий, приведших к образованию пузыря, нуждается в переоценке [29].

Примерная карта Локального пузыря в проекции на плоскость Галактики показана на рис. 3. Локальный пузырь имеет довольно сложные очертания [30]. Его ближайшая граница находится на расстоянии примерно 60 пс в направлении центра Галактики. В противоположном направлении ситуация более сложная — ближайшие области плотного газа удалены от нас на 70–80 пс, но за ними продолжается пустота, которая, впрочем, может уже быть не связана с Локальным пузырем. Очень сильно — на сотни парсеков — Локальный пузырь протянулся в вертикальном направлении. Фактически он насквозь пронзает диск Галактики. Интересно отметить, что линия, вдоль которой вытянут Локальный пузырь, не перпендикулярна плоскости Млечного Пути, но наклонена под углом около 20° к нормали. Иными словами, ось Локального пузыря перпендикулярна плоскости Пояса Гулда. Возникает искушение как-то связать две этих структуры, но для наличия прямой связи у них слишком разные возрасты.

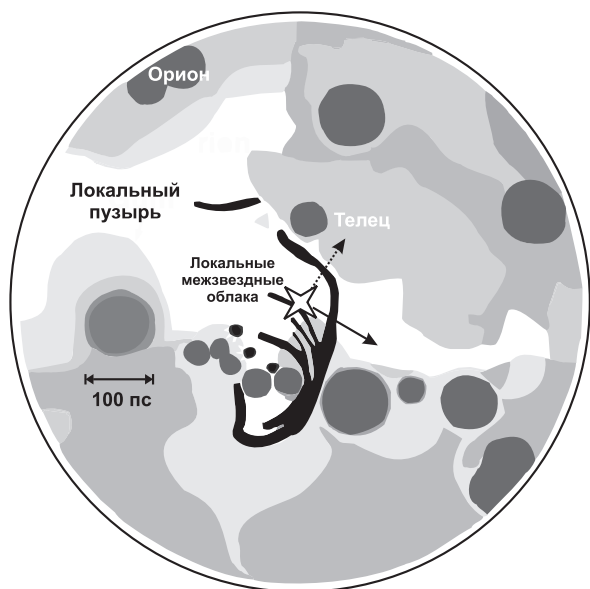


Рис. 3. Схематическое изображение Локального пузыря (область белого цвета) в проекции на плоскость Галактики. Звездочкой отмечено положение Солнца. Черные контуры в центре карты — комплекс разреженных облаков, частью которого является ЛМО. Пунктирной стрелкой показано направление движения ЛМО, сплошной стрелкой — направление движения Солнечной системы. © The University of Chicago, P. Frisch

Косвенным связующим звеном между Поясом Гулда и Локальным пузырем может оказаться ассоциация Скорпиона—Центавра. Анализ движения звезд—членов этой группировки показал, что около 10—15 млн лет назад они находились внутри нынешнего расположения Локального пузыря. Сверхновые более старых подгрупп ассоциации могли стать источником энергии для образования полости наблюдаемых размеров и температуры [31]. Кстати, с более недавней вспышкой сверхновой в ассоциации Скорпиона—Центавра связывают и происхождение локальных межзвездных облаков. Они должны быть относительно молодыми образованиями, иначе сложно объяснить их выживание в горячем газе Локального пузыря.

Путь Солнца

Мы — дети Галактики.

Р. Рождественский

Солнце летит относительно ближайших звезд со скоростью около 20 км с^{-1} . За год мы смещаемся относительно своих соседей на 4 а. е., за миллион лет — на 20 пс (конечно, при условии, что на этом интервале сохраняются величина и направление скорости). Это означает, что наши нынешние окрестности стали таковыми лишь недавно. Свое путешествие по Локальному пузырю Солнце начало несколько миллионов лет назад, а в Локальном облаке и вовсе находится примерно 100 тыс. лет, если не меньше. Что бы ни стало причиной возникновения Пояса Гулда, Солнца в этот момент не было рядом, но оно было в каком-то другом месте, где наверняка происходили не менее захватывающие события.

Насколько бесследно для земной жизни проходят эти события, насколько сильно отражается на ней движение Солнца по Галактике? Не грозят ли нам в будущем катаклизмы, по сравнению с которыми бледнеет даже риск столкновения с Апофизом, и не происходили ли они в прошлом? В целом потенциальные опасности можно разделить на несколько групп.

Косвенные последствия прохождения плоскости диска.

Солнце колеблется в вертикальном направлении около плоскости галактического диска с периодом в несколько десятков миллионов лет. Сейчас мы удалены от плоскости на 10–20 пс, однако время от времени Солнце оказывается ближе к максимуму в распределении звезд диска. Можно предположить, что в эти периоды более частыми становятся сближения Солнца с плотными молекулярными облаками и другими звездами. Эти сближения могут дестабилизировать Облако Оорта и повысить интенсивность кометной бомбардировки во внутренних областях Солнечной системы [32].

Прохождение через плотное межзвездное облако. Последние миллионы лет Солнце находится в очень разреженной среде и, судя по его нынешней траектории, в близком будущем не попадет в существенно более плотный газ. Если же это все-таки случится, давление плотного межзвездного вещества может сжать гелиосферу, в результате чего вблизи Земли возрастет поток космических лучей. Кроме того, усилится непосредственная аккреция вещества (в том числе космических пылинок) на земную атмосферу. Оба фактора способны привести к существенным изменениям климата.

Близкая вспышка сверхновой или гамма-всплеск. В настоящее время вблизи Солнца нет объектов, которые могли бы считаться предсверхновыми. Потенциально опасные Антарес и Бетельгейзе отстоят от нас более чем на 100 пс. Имеются, правда, косвенные признаки того, что около трех миллионов лет назад неподалеку от Солнца вспыхнула сверхновая, обогатившая осадочные породы на океанском дне атомами ^{60}Fe [33]. Однако и эта вспышка была, вероятно, слишком далека для сколько-нибудь серьезного воздействия. Согласно расчетам критическое с точки зрения последствий для Земли расстояние до вспышки сверхновой не превышает нескольких парсеков. Однако движение Солнечной системы может привести ее в окрестности «опасной» звезды (или движение опасной звезды может привести ее в окрестности Солнечной системы). Гамма-всплеск более опасен (именно как источник жесткого излучения), однако ближайшая к нам система, которая может (по современным представлениям) генерировать гамма-всплеск, — это очень далекая η Киля.

Этот список наверняка не исчерпывает всех возможных вариантов. С другой стороны, в нем пока очень много умозрительного и чрезмерно гипотетического. Но изучение прошлых, настоящих и будущих взаимосвязей между Солнечной системой и Галактикой будет продолжаться. Слишком уж это увлекательное занятие. Ведь в данном случае речь идет не просто о Космосе, а о Галактике, которая начинается там, куда мы можем дотянуться рукой.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 07-02-00454 и НШ-4354.2008.2.

Список литературы

1. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Экология>.
2. *Шустов Б. М.* Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра // Тр. 37-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв.—1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 206.
3. *Kapteyn J. C.* First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system // Contrib. Mount Wilson Obs. — 1922. — Vol. 230. — P. 1.
4. *Shapley H.* Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. Twelfth paper: Remarks on the arrangement of the sidereal universe // Contrib. Mount Wilson Obs. — 1918. — Vol. 157. — P. 1.

5. *Morgan W. W., Sharpless S., Osterbrock D.* Some features of galactic structure in the neighborhood of the Sun // *Astron. J.* — 1952. — Vol. 57. — P. 3.
6. *Preibisch T., Mamajek E.* The nearest OB association: Scorpius-Centaurus (ScoOB2) // *Handbook of Star Forming Regions* / Ed. by B. Reipurth. — ASP, 2008. — Vol. II. — P. 235.
7. *Mishurov Y. N., Zenina I. A.* Yes, the Sun is located near the corotation circle // *Astron. Astrophys.* — 1999. — Vol. 341. — P. 81.
8. *Bissantz N., Englmaier P., Gerhard O.* Gas dynamics in the Milky Way: second pattern speed and large-scale morphology // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — Vol. 340. — P. 949.
9. *Lépine J. R. D., Acharova I. A., Mishurov Y. N.* Corotation, stellar wandering, and fine structure of the Galactic abundance pattern // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 589. — P. 210.
10. *Roškar R., Debattista V. P., Quinn T. R. et al.* Riding the spiral waves: implications of stellar migration for the properties of galactic disks // *Astrophys. J., Lett.* — 2008. — Vol. 684. — P. L79.
11. *López-Santiago J., Montes D., Crespo-Chacón I., Fernández-Figueroa M. J.* The nearest young moving groups // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 643. — P. 1160.
12. *Famaey B., Siebert A., Jorissen A.* On the age heterogeneity of the Pleiades, Hyades, and Sirius moving groups // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 483. — P. 453.
13. *Bensby T., Oey M. S., Feltzing S., Gustafsson B.* Disentangling the Hercules Stream // *Astrophys. J., Lett.* — 2007. — Vol. 655. — P. L89.
14. *Lindblad P. O., Grape K., Sandqvist A., Schober J.* On the kinematics of a local component of the interstellar hydrogen gas possibly related to Gould's Belt // *Astron. Astrophys.* — 1973. — Vol. 24. — P. 309.
15. *Bally J.* Overview of the Orion Complex // *Handbook of Star Forming Regions* / Ed. by B. Reipurth. — ASP, 2008. — Vol. I. — P. 459.
16. *Olano C. A.* The origin of the local system of gas and star // *Astron. J.* — 2001. — Vol. 121. — P. 295.
17. *Brown A. G. A., Blaauw A., Hoogerwerf R. et al.* OB Associations // *The Origin of Stars and Planetary Systems* / Ed. by C. J. Lada, N. D. Kylafis. — Kluwer Academic Publishers, 1999. — P. 411.

18. <http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2008-10/release.shtml>.
19. *Palla F., Stahler S. W.* Star formation in space and time: Taurus-Auriga // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 581. — P. 1194.
20. *Olano C. A., Pöppel W. G. L.* Kinematical origin of the dark clouds in Taurus and of some nearby galactic clusters // *Astron. Astrophys.* — 1987. — Vol. 179. — P. 202.
21. *White R. E., Bally J.* Interstellar matter near the Pleiades. IV. The wake of the Pleiades through the interstellar medium in Taurus // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 409. — P. 234.
22. *Herbig G. H., Simon T.* Barnard's Merope nebula revisited: new observational results // *Astron. J.* — 2001. — Vol. 121. — P. 313.
23. *Morbidelli A., Levison H. F.* Scenarios for the origin of the orbits of the Trans-Neptunian Objects 2000 CR₁₀₅ and 2003 VB₁₂ (Sedna) // *Astron. J.* — 2004. — Vol. 128. — P. 2564.
24. *Moskalenko I. V., Porter T. A.* Isotropic gamma-ray background: cosmic-ray induced albedo from debris in the Solar System? // *Astrophys. J., Lett.* — 2009. — In press. arXiv:0901.0304.
25. *Баранов В. Б., Краснобаев К. В., Куликовский А. Г.* Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // *Докл. АН СССР.* — 1970. — Т. 194. — С. 41.
26. *Измоленов В. В.* Граница гелиосферы // *Земля и Вселенная.* — 2005. — № 4. — С. 34.
27. *Курт В. Г., Миронова Е. Н., Фадеев Е. И.* УФ-наблюдения локальной межзвездной среды // *Ультрафиолетовая Вселенная II* / Ред. Б. М. Шустов, М. Е. Сачков, Е. Ю. Кильпио. — М.: Янус-К, 2008. — С. 298.
28. *Cravens T. E.* Heliospheric X-ray emission associated with charge transfer of the solar wind with interstellar neutrals // *Astrophys. J., Lett.* — 2000. — Vol. 532. — P. L153.
29. *Shelton R. L.* Revising the Local Bubble model due to solar wind charge exchange X-ray emission // *Space Sci. Rev.* — 2008. — In press.
30. *Lallement R., Welsh B. Y., Vergely J. L. et al.* 3D mapping of the dense interstellar gas around the Local Bubble // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 411. — P. 447.

31. *Fuchs B., Breitschwerdt D., de Avillez M. A. et al.* The search for the origin of the Local Bubble redivivus // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2006. — Vol. 373. — P. 993.
32. *Wickramasinghe J. T., Napier W. M.* Impact cratering and the Oort Cloud // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — Vol. 387. — P. 153.
33. *Knie K., Korschinek G., Faestermann T. et al.* ^{60}Fe anomaly in a deep-sea manganese crust and implications for a nearby supernova source // Phys. Rev. Lett. — 2004. — Vol. 93. — P. 171103.

В. П. Гринин

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД С ПРОТОПЛАНЕТНЫМИ ДИСКАМИ

Изучение фотометрической и поляриметрической активности молодых звезд дает важную информацию о структуре и динамическом состоянии внутренних областей околозвездных дисков. В лекции дан краткий обзор состояния этой проблемы. Суммированы результаты наблюдений звезд типа UX Ori в оптической и ближней инфракрасной областях спектра. Основной акцент сделан на свойствах циклической активности этих звезд и ее современных моделях. Проводится аналогия между циклами активности и продолжительными затмениями, наблюдаемыми у некоторых экзотических затменных систем.

СЕМЕЙСТВА И ГРУППЫ МАЛЫХ ПЛАНЕТ

Введение

Во второй половине XIX в., когда число открытых астероидов составило всего несколько десятков, были сделаны первые попытки разобраться в закономерностях распределения астероидных орбит. Д. Кирквуд был одним из первых, кто занялся этой проблемой. Сначала он открыл названные впоследствии его именем люки — узкие области в пределах пояса астероидов с более низкой концентрацией малых планет, чем в соседних с ними областях. Кирквуд приписал образование люков тому факту, что они располагаются в окрестности соизмеримости средних движений с Юпитером. Затем он на основе схожести орбитальных параметров выделил около 10 групп астероидов, каждая из которых состояла всего из нескольких членов. Им было высказано предположение, что члены групп имеют общее происхождение и являются обломками более крупных тел.

Исследования Кирквуда продолжили другие ученые. Например, Ф. Тиссеран составил в 1891 г. свой список групп из анализа орбит более четырехсот открытых в то время астероидов. Со временем число групп росло по мере роста числа открытых астероидов [1].

Главный недостаток тех работ заключался в том, что в поисках «родственных» астероидов сравнивались современные орбиты астероидов. Возмущения от больших планет с течением времени могли сильно и по-разному изменить орбиты тех астероидов, которые действительно являлись обломками одного и того же тела и двигались в прошлом по сходным орбитам. А сходство современных орбит еще не означает, что и в далеком прошлом астероиды двигались по сходным орбитам, при большом числе астероидов это сходство может быть случайным.

Согласно теории движения спутников планет с учетом возмущений, разработанной Лагранжем, эксцентриситеты и наклоны орбит спутников остаются почти неизменными на больших промежутках

времени, в то время как долготы перигея и узла орбиты непрерывно меняются. Это привело Хираяму в 1918—1919 гг. к идее поиска семейств астероидов на основе «инвариантных» (неизменных) элементов астероидных орбит, которые тоже не менялись бы (или менялись медленно) под действием планетных возмущений.

Хираяма нашел такие инвариантные элементы и назвал их собственными элементами орбиты. Собственные элементы характеризуют орбиту планеты, осредненную на длительном интервале времени. Собственные большие полуоси, наклоны и эксцентриситеты почти не подвержены вековым изменениям, и можно считать, что они остаются неизменными на протяжении длительных промежутков времени [2].

Хираяма решил воспользоваться собственным наклоном и эксцентриситетом орбит для поисков семейств. Сначала он учитывал только возмущения от Юпитера, пренебрегая более слабым влиянием Сатурна и остальных планет. Ему удалось выявить три семейства: Фемиды, Эос и Корониды, а затем еще четыре и с некоторым сомнением еще шесть. Но скоро стало ясно, что учитывать воздействие Сатурна и других планет все же необходимо. Сатурн, например, оказывал заметное воздействие на астероиды с малым средним суточным движением. С учетом этого Хираяма пришел к выводу о существовании пяти семейств — Фемиды, Эос, Корониды, Марии и Флоры. К этим семействам он отнес десятки известных астероидов. В дальнейшем они были пополнены астероидами, открытыми позднее. Подобные исследования проводились и другими учеными, и к 70-м гг. прошлого века стало ясно, что «семейственность» широко распространена среди астероидов — около 40 % малых планет были «приписаны» к различным многочисленным семействам.

Под описанным выше семейством подразумевается совокупность астероидов общего происхождения, образованная, вероятнее всего, в результате распада родительского тела. Однако семействами часто называют и группы случайных астероидов, изолированные от остальной части кольца зонами вековых резонансов. Между астероидами в таких группах мало общего, они имеют лишь сходную динамическую эволюцию орбит, например семейства Венгрии или Фокеи. В научной среде такие сообщества астероидов называют как семействами, так и просто группами.

После того как на рубеже XIX—XX вв. были открыты малые планеты на орбите Юпитера, названные впоследствии «тройняцами», а также астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), стало ясно, что

распределение малых планет более сложное и масштабное. Впоследствии астероиды и в этих областях были выделены в отдельные группы. Очевидно, что «троянцы» и АСЗ оказались на своих орбитах благодаря «вымыванию» из главного пояса и последующей динамической эволюции.

Существование «кентавров» — малых планет между орбитами Юпитера и Нептуна, а также «траснептуновых» объектов (ТНО) было предсказано теоретически, что подтвердилось открытием первых объектов в указанных областях в последней четверти XX в. ТНО по сути представляют собой отдельный пояс астероидов, названный в честь первооткрывателей Эджворта и Койпера. Существование в этом поясе семейств малых планет, образованных в результате распада родительских тел, наподобие семейств Хираямы вполне возможно. Как доказательство получены первые свидетельства того, что астероид (136108) Науфеа является главным объектом одноименного семейства. Однако по числу обнаруженных к настоящему времени ТНО и их свойствам сложно еще делать соответствующие выводы, разделение по семействам произошло лишь на основе результатов их динамической эволюции.

Что касается «кентавров», то они представляют собой всего лишь небольшую группу астероидов, которые в результате возмущений от больших планет оказались выброшены из пояса Эджворта—Койпера и «зажаты» между орбитами Юпитера и Нептуна. И возможное совпадение физических характеристик двух каких-либо представителей кентавров по большому счету случайно.

Рассмотрим семейства и группы малых планет более подробно, начиная с АСЗ, как малых планет, двигающихся в области, наиболее близкой к Солнцу.

Семейства и группы малых планет

Астероиды, сближающиеся с Землей

Астероиды с перигельными расстояниями, меньшими или равными 1.3 а. е., принято называть астероидами, сближающимися с Землей (АСЗ). Исторически первым из астероидов с такой орбитой был открыт (433) Eros (1898).

Таблица 1. Классификация АСЗ

Тип (русск./англ.) Сокращенное название	Описание	Область движения
Атирцы (Atiras) At	АСЗ, орбиты которых полностью расположены внутри орбиты Земли (названы по первому занумерованному такому астероиду (163693) Atira)	$a < 1.0$ а. е. $Q < 0.983$ а. е.
Атонцы (Atens) At	АСЗ, пересекающие орбиту Земли, с большими полуосями, меньшими, чем у Земли (названы по первому такому астероиду (2062) Aten)	$a < 1.0$ а. е. $Q \geq 0.983$ а. е.
Аполлонцы (Apollos) Ap	АСЗ, пересекающие орбиту Земли, с большими полуосями, большими, чем у Земли (названы по первому открытому астероиду такого типа (1862) Apollo)	$a > 1.0$ а. е. $q \leq 1.017$ а. е.
Амурцы (Amors) Am	АСЗ с орбитами, лежащими вне орбиты Земли (названы по астероиду (1221) Amor)	$a > 1.0$ а. е. $1.017 < q \leq 1.3$ а. е.

В табл. 1 дается классификация четырех типов АСЗ [3]. В первом столбце приводятся русское и английское названия группы, а также ее сокращенное обозначение, во втором столбце — их краткое описание, а в третьем — область движения.

На конец 2008 г., включая нenumерованные АСЗ, открыто Атирцев 10, Атонцев — 481, Аполлонцев — 3100, а астероидов класса Амур — 2227 [4].

Под влиянием планетных возмущений перигельные и афелльные расстояния астероидов, как и другие элементы орбит, испытывают постоянные изменения. При этом возможен переход астероидов из одного типа в другой. Однако темп этих изменений невелик и подобные переходы в обозримом будущем могут иметь место лишь для очень ограниченного числа астероидов. Самый яркий пример — астероид (99942) Apophis, который в результате тесного сближения с Землей 13 апреля 2029 г. сменит свой тип с Атонца на Аполлонца.

Из астероидов всех перечисленных групп выделяют потенциально опасные астероиды (РНА) (Potentially Hazardous Asteroids). К ним относят все астероиды, орбиты которых в настоящую эпоху

сближаются с орбитой Земли до расстояний, меньших или равных 0.05 а. е., и абсолютная звездная величина которых не превышает 22.0^m . Потенциально опасные астероиды составляют примерно пятую часть всех АСЗ. Подобные тела заслуживают пристального внимания с точки зрения астероидной опасности.

Главный пояс

В настоящее время различными методами учеными определено более сотни семейств астероидов в главном поясе. Часто оказывалось, что результаты, полученные разными учеными, не совпадали, ввиду различия используемых критериев для выделения семейств. Поэтому в данной статье нет смысла приводить результаты всех исследований, ограничимся рассмотрением наиболее значимых семейств, существование которых не подвергается сомнению.

Для начала рассмотрим семейства, образованные путем динамической эволюции. На рис. 1 показано распределение астероидов главного пояса по большой полуоси и наклону [3]. На этом рисунке тонкой сплошной линией показано расположение векового резонанса ν_6 (совпадение средних скоростей движений перигелиев орбит астероида и Сатурна), отделяющего планеты с большими наклонами от остальной части пояса. Над этой линией хорошо заметны группы Венгрии и Фокеи, очерченные зонами резонансов.

В табл. 2 приводится описание наиболее значимых семейств малых планет, образованные путем динамической эволюции. В первом столбце дается название семейства, а во втором — его описание [5].

В табл. 4 приводятся результаты определения границ и количественного состава наиболее значимых семейств, полученные В. Заппала [6]. В первом столбце таблицы дается название семейства, во втором — астероид, в честь которого названо семейство, в 3—5 столбцах — диапазон возможных значений большой полуоси, эксцентриситета и наклона соответственно астероидов внутри семейства, в последнем столбце — количество известных астероидов в данном семействе.

Границы и численный состав семейств определены В. Заппала с помощью иерархического кластерного анализа. Поскольку работа была проведена в 1995 г., результаты были получены на основе известных в то время 12 487 астероидов. В настоящее время, когда открыто уже более 300 000 малых планет, количественный состав семейств может быть заметно увеличен.

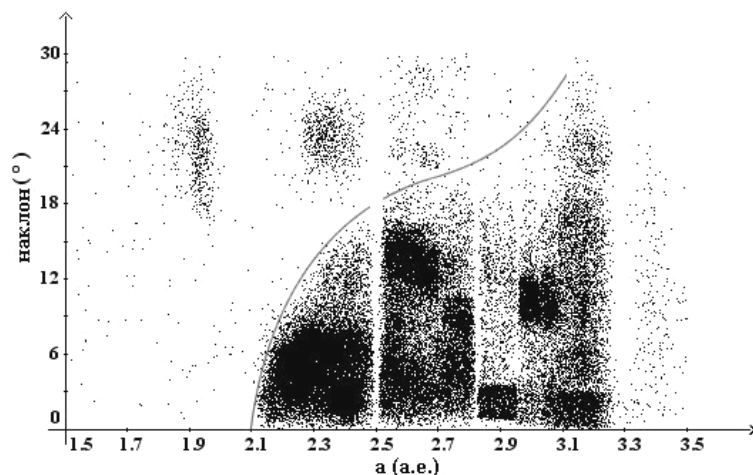


Рис. 1. Распределение малых планет в плоскости a, i . На фоне распределения четко выделяются люки вблизи значений большой полуоси 2.5, 2.82, 3.3 а. е. Хорошо заметна группа Венгрии (большие наклоны, значения большой полуоси, близкие к 1.93 а. е.) Заметны также концентрации точек, соответствующих семействам малых планет Фемиды, Эос, Корониды и др.

Троянцы

Троянцами называют две группы астероидов, движущихся практически по одной орбите с Юпитером и располагающихся вблизи точек Лагранжа, отстоящих на 60° по обе стороны планеты. В процессе гелиоцентрического движения астероиды колеблются вокруг точек L4 и L5 с периодами в 150–200 лет, удаляясь или приближаясь к Юпитеру в пределах $45\text{--}80^\circ$. Астероиды, совершающие либрационные колебания вокруг точки L4, преимущественно (за несколькими исключениями) получили имена греков, участников Троянской войны, а астероиды, движущиеся в окрестности L5, — троянцев.

Первым из троянцев (588) Achilles был открыт немецким астрономом М. Вольфом в 1906 г. Наименование открытого астероида в честь Ахиллеса и стало причиной присвоения всем открытым впоследствии в этом районе астероидам имен героев Троянских войн. Наибольший из троянцев астероид (617) Patroclus имеет диаметр 272 км.

Таблица 2. Семейства малых планет главного пояса, образованные путем динамической эволюции

Название	Описание
Венгрии (Hungarias)	Группа астероидов у внутреннего края главного пояса на среднем расстоянии в 1.9 а. е. от Солнца и с большим наклонами от 16 до 34°. Названы по имени самого крупного представителя — (434) Hungaria с диаметром около 20 км
Гильды (Hildas)	Группа астероидов у внешнего края главного пояса на среднем расстоянии в 4.0 а. е. от Солнца. Названа по имени астероида (153) Hilda диаметром 180 км, открытого в 1875 г. Орбитальные периоды астероидов соизмеримы с периодом обращения Юпитера в отношении 2:3. Орбиты заметно вытянуты, и в афелии астероиды оказываются в верхнем соединении к Юпитеру, то есть «прячутся» от него за Солнцем
Фокеи (Phocaeas)	Группа астероидов с орбитами, наклоненными в среднем на 24° к плоскости Солнечной системы и находящимися на среднем расстоянии в 2.36 а. е. от Солнца. Группа названа по имени астероида (25) Phocaea с диаметром около 70 км

На январь 2009 г. известно уже 2910 троянцев, включая нумерованные малые планеты. Из них 1632 грека и 1278 троянцев.

На январь 2009 г. открыто также 6 троянцев у Нептуна: 2001 QR₃₂₂, 2004 UP₁₀, 2005 TN₅₃, 2005 TO₇₄, 2006 RJ₁₀₃ и 2007 VL₃₀₅. Все они движутся по орбите Нептуна в окрестности точки L₄.

Обладает троянцами и Марс. На сегодняшний день у него обнаружено 4 таких астероида: (121514) 1999 UJ₇, движущийся в окрестности точки L₄, и возле точки L₅ астероиды (5261) Eureka, (101429) 1998 VF₃₁ и 2007 NS₂.

Кентавры

Кентавры — группа астероидов, находящихся между орбитами Юпитера и Нептуна, переходная по свойствам между астероидами главного пояса и объектами пояса Эджворта—Койпера. Первым открытым в 1977 г. кентавром был (2060) Chiron. При приближении к перигелию у него образуется кома, характерная для комет, поэтому Хирон считается по классификации одновременно и кометой (95P/Chiron), и астероидом (2060) Chiron. Астероидам этого семейства даются имена кентавров из античной мифологии.

Таблица 3. Наиболее значимые семейства малых планет главного пояса

Название семейства	Главный представитель	a (а. е.)	e	$i(^{\circ})$	Кол. аст.
Эос (Eos)	(221) Eos	2.99—3.03	0.01—0.13	8—12	480
Эвномии (Eunomias)	(15) Eunomia	2.53—2.72	0.08—0.22	11.1—15.8	370
Флоры (Floras)	(8) Flora	2.15—2.35	0.03—0.23	1.5—8.0	590
Гигеи (Hygieas)	(10) Hygiea	3.06—3.24	0.09—0.19	3.5—6.8	105
Корониды (Koronis)	(158) Koronis	2.83—2.91	0.00—0.11	0.0—3.5	310
Марии (Marias)	(170) Maria	2.5—2.706		12—17	80
Нисы (Nysas)	(44) Nysa	2.41—2.50	0.12—0.21	1.5—4.3	380
Фемиды (Themis)	(24) Themis	3.08—3.24	0.09—0.22	0—3	530
Весты (Vestas)	(4) Vesta	2.26—2.48	0.03—0.16	5.0—8.3	240

Таблица 4. Наиболее значимые семейства малых планет главного пояса

Объект	e	$i(^{\circ})$	$a(\text{а. е.})$	%
«Cubewanos» (15760) 1992 QB ₁	0.000—0.215 0.072	0.2—5.7 2.2	41.2—47.4 44.1	70
«Plutinos» (134340) Pluto	0.034—0.336 0.224	0.4—28.2 17.2	38.1—41.5 39.2	20
Scattered disk (15874) 1996 TL ₆₆	0.34—0.69 0.58	17—30 24.02	51—120 82.9	10

В 1992 г. был обнаружен второй кентавр — (5145) Pholus, а в 1993 — третий, (7066) Nessus. К январю 2009 г. открыто 84 подобных объекта. Все кентавры расположены между орбитами Юпитера и Нептуна ($5.5 < a < 30.1$ а. е.) и движутся по сильно вытянутым орбитам с большим эксцентриситетом, а наклоны их орбит к плоскости эклиптики лежат в пределах $0\text{--}25^{\circ}$.

Транснептуновые объекты

К. Эджворт в 1949 г. и Г. Койпер в 1951 г. высказали предположение о существовании популяции небесных тел за орбитой Нептуна. Это предположение подтвердилось открытием астероида (15760) 1992 QB₁ [7].

Параметры орбит открытых астероидов позволяют разделить их на три динамических класса. В табл. 3 показаны в первом столбце класс объектов и его главный представитель, во 2—4-м столбцах — соответственно эксцентриситет, наклон и большая полуось орбиты ск'бмнсп представителя, а также диапазон возможных значений этих параметров для объектов данного класса, в 5-м столбце — процентный состав каждого класса.

На январь 2009 г. открыто 1249 транснептуновых объектов, включая 156 ТНО третьего типа [8].

С точки зрения динамической структуры, пояс Эджворта—Койпера разделен в основном на две части: внутренний пояс с $a < 40$ а. е., где устойчивые орбиты связаны в основном с резонансами с Нептуном и Ураном, и внешний (классический) пояс с $a > 42$ а. е., где устойчивые орбиты являются в основном нерезонансными.

Карликовые планеты

По решению 26 Генеральной ассамблеи МАС в 2006 г. был введен новый класс объектов в Солнечной системе — карликовые планеты [9]. Согласно определению, данному на ассамблее, карликовой планетой является объект: 1) движущийся на орбите вокруг Солнца, 2) обладающий достаточной массой для приобретения гидростатически равновесной формы, 3) не расчищающий окрестность своей орбиты от других тел, 4) не являющийся спутником другого, более крупного тела.

В настоящее время официальный статус карликовой планеты имеют пять тел: (1) Ceres (размером 975×909 км), (134340) Pluto (2306 км), (136108) Haumea (1000—1960 км), (136472) Makemake (1300—1900 км), (136199) Eris (2400 км).

Заключение

В данной статье был дан краткий обзор семейств и групп малых планет, существующих в Солнечной системе. Ограниченный объем статьи не позволил привести много интересной информации, например, физические свойства астероидов внутри семейств остались неохваченными. Тем не менее даже такой краткий обзор дает картину многообразия распределения малых планет в Солнечной системе.

Процесс обнаружения новых астероидов продолжается и поныне. Открытие все большего числа астероидов даст понимание эволюционных процессов, которые протекают в Солнечной системе от момента ее образования до настоящего времени.

Список литературы

1. *Симоненко А. Н.* Астероиды или тернистые пути исследований. — М.: Наука, 1985.
2. *Hirayama K.* Groups of asteroids probably of common origin // *Astron. J.* — 1918. — Vol. 31. — P. 185—188.
3. *Виноградова Т. А., Железнов Н. Б., Кузнецов В. Б. и др.* Каталог потенциально опасных астероидов и комет. — СПб.: ИПА РАН, 2003.
4. Каталог AC3. — www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LSBSS/hazard/.

5. Малые тела Солнечной системы. — <http://galspace.spb.ru/index65-1.html>.
6. *Zappala V., Bendjoya P., Cellino A. et al.* Asteroid Families: Search of a 12,487-Asteroid Sample Using Two Different Clustering Techniques // *Icarus*. — 1995. — Vol. 116. — P. 291.
7. *Luu J., Marsden B., Jewitt D. et al.* A new dynamical class in the outer Solar System // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 1997. — Vol. 29. — P. 1020.
8. List Of Transneptunian Objects. — <http://www.cfa.harvard.edu/iau/lists/TNOs.html>.
9. News Release — IAU0603: IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU Resolution votes. — http://www.iau.org/public_press/news/release/iau0603/.

АККРЕЦИЯ НА ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Приведен обзор основных теоретических моделей аккреционных течений на черные дыры. Основное внимание уделено моделям течения с малым угловым моментом. Показано, что турбулентность существенным образом изменяет характер квазисферического аккреционного течения на черную дыру. Причиной служит появление вследствие возбуждения ненулевого удельного углового момента в турбулентном потоке эффективной «турбулентной» центробежной силы, тормозящей падение вещества. На расстояниях, близких к гравитационному радиусу, становятся возможными течения со стационарными ударными волнами.

We give a review of basic theoretical models of accretion flows on to black holes. The review zeroes in on the models of flows with low angular momentum. It is shown that turbulence substantially alters the character of quasi-spherical accretion flow on to a black hole. This is caused by the excitation of an effective centrifugal force slowing down accretion due to non-zero net angular momentum. Flows with a shock standing near the gravitational radius become possible.

Основные представления о черных дырах

Открытия в физике в большинстве своем делаются в следующей последовательности: вначале обнаруживается некоторое необычное явление, которому присваивается имя, и только затем, по мере осмысления происходящего, ему дается теоретическое толкование. В случае черных дыр (ЧД) история развивалась в обратной последовательности. В мире черных дыр вообще все не как у людей.

О существовании объектов столь массивных, что гравитационное поле не позволяет свету покинуть поверхность объекта, упоминал еще Лаплас [1], ссылаясь на идею своего предшественника — священника и естествоиспытателя Джона Мичелла [2].

Поскольку скорость света является ключевым параметром в характеристике свойств ЧД, черная дыра — объект существенно релятивистский. Распределение гравитационного поля ЧД в рамках

Общей теории относительности в 1916 г. построил Шварцшильд [3]. Чандрасекар в 1931 г. заложил основы физики ЧД, найдя предел по массе для нейтронных звезд [4, 5], называемый теперь пределом Чандрасекара (Нобелевская премия, 1983), а Оппенгеймер и Волков [6] и Оппенгеймер и Снайдер [7] показали, что ЧД является конечным состоянием массивных звезд.

Термин «черная дыра» был введен в научный обиход только под новый 1968 г. (предложен Уилером) [8].

Название закрепляет за объектом его свойство невидимости, поскольку свет не может покинуть его пределы (т. н. горизонт). Однако черные дыры можно наблюдать по излучению, выделяемому падающим на ЧД (аккрецирующим) веществом. За счет сильного гравитационного поля окружающая ЧД материя притягивается к ЧД и разгоняется вблизи ее горизонта до сверхбольших ультрарелятивистских скоростей, что заставляет вещество интенсивно излучать при торможении. Торможение возникает, если аккреция имеет несферический характер. О возможности бурного энерговыделения аккрецирующего вещества и, таким образом, детектирования ЧД впервые заявили Зельдович и Солпитер [9, 10].

Кроме того, было осознано, что ЧД могут излучать и самостоятельно, без участия окружающего ЧД вещества. В сильном гравитационном поле ЧД вблизи горизонта могут рождаться пары частиц. В случае если один из партнеров находится вне горизонта, он может покинуть ЧД, унеся с собой часть ее массы. Этот механизм получил название «испарение ЧД» (Хоукинг, 1975 [11]). Тогда же заговорили о микроскопических ЧД с массами много меньшими солнечных. Именно для таких «карманных» ЧД эффект испарения наиболее существен.

Наблюдения черных дыр.

Распределение черных дыр по массам.

Дисковая аккреция

Наблюдать ЧД стало возможно после освоения летательными аппаратами околоземного пространства. Первыми кандидатами в ЧД стали яркие рентгеновские источники, обнаруженные на внеатмосферных рентгеновских телескопах *UHURU* и *Einstein* в 1971 и 1978 гг. соответственно (Нобелевская премия, 2002). Тогда же появились первые теоретические модели, объясняющие природу яр-

ких рентгеновских источников: рентгеновское излучение обусловлено мощным энерговыделением в ходе дисковой аккреции в двойных системах. Идея была предложена Зельдовичем и развита Шакурой (1972) и Шакурой и Сюняевым (1973) [12].

В двойных системах, где один из компонентов — ЧД, а другой — звезда-донор, вещество, сбрасываемое компаньоном и притягиваемое к ЧД, не может упасть непосредственно на ЧД, а, поскольку обладает большим угловым моментом, закручивается в аккреционный диск. Диск вращался бы неограниченно долго вокруг ЧД, если бы не существовали механизмы, перераспределяющие угловой момент по диску и отводящие избыток момента из внутренних слоев наружу. В результате потерявшие момент прилежащие к ЧД слои вещества падают на ЧД и излучают. Главным механизмом, обеспечивающим транспорт углового момента наружу, была признана турбулентная вязкость. Авторы [12] построили модель аккреционного диска с турбулентной вязкостью. Причиной возникновения турбулентности в диске, по мнению авторов, являются гидродинамические неустойчивости той или иной природы.

По признанию авторов, «все свое незнание природы турбулентности они спрятали в единственный феноменологический параметр — α », устанавливающий пропорциональность внедиагональному компоненту тензора вязких напряжений термодинамическому давлению.

Механизмы возникновения турбулентности в диске, однако, до сих пор до конца не ясны. Ведется долголетняя дискуссия относительно того, устойчив или нет кеплеровский диск. Турбулизировать диск может вторгающееся в диск аккрецирующее вещество («hot spot»). Этот же источник может порождать ударные волны в диске [13]. Ударные волны рассматриваются как альтернативный турбулентной вязкости диссипативный механизм, способный отводить угловой момент. Генерация крупномасштабных ударных волн в диске может происходить, например, за счет действия приливных сил [14, 15].

ЧД, населяющие рентгеновские двойные системы, являются объектами звездных масс ($3M_{\odot} < M_{BH} < 20M_{\odot}$). Несмотря на популярность модели дисковой аккреции в 70-е и 80-е гг., степень ее применимости оказалась достаточно ограниченной. К 2006 г. было обнаружено всего 18 ЧД в рентгеновских двойных в Галактике и Ма-

геллановых облаках [16], в то время как число найденных сверхмассивных ЧД (их массы оставляют $10^6 M_{\odot} < M_{BH}$) в ядрах галактик перевалило за три сотни [17].

Поток наблюдательных данных о ЧД стремительно растет из года в год. Если в 2000 г. количество детектированных сверхмассивных ЧД оценивалось в 33 (Rochester conference), в 2002 г. — более 80 [17], то к 2004 г. их число составило около 300 (Черепашук, 2004). Новые возможности предоставляют действующие на орбитах внеатмосферные рентгеновские телескопы (XMM-Newton, ASCA, ROSAT, Верро-SAX, Rossi, Ginga, Swift, ГРАНАТ) и особенно Chandra с его субарксекундным разрешением. Планируется к запуску рентгеновский телескоп Спектр—Рентген—Гамма. Информацию о ЧД удастся получить также из анализа гамма-вспышек (телескопы Compton, HETE-2, Swift, Integral, GLAST), оптического (Hubble), инфракрасного (Spitzer) и радиодиапазона (наземные интерферометры). По данным Интеграла за 2006 г., например, в Галактике содержится около 300 рентгеновских и гамма-источников, ассоциируемых с ЧД, и около 100 сверхмассивных ЧД в других галактиках [18]. Оценки с учетом эффектов наблюдательной селекции предсказывают величину в миллионы или десятки миллионов единиц ЧД в Галактике. Новое поколение внеатмосферных радиообсерваторий (Радиоастрон, запланирован к пуску в 4-м квартале 2009 г.) с разрешением в одну миллионную доли секунды начнет разрешать угловые размеры, меньшие чем угловые размеры сверхмассивных ЧД в соседних галактиках [17].

В последние годы активно стала обсуждаться проблема провала в спектре масс — «отсутствие» черных дыр промежуточных масс (IMBH). Найдены первые кандидаты в IMBH в шаровых скоплениях NGC104, NGC6397 (Rijke et al., 2006) в Галактике, G1 в галактике M31 [19], а также в галактике M82 [20], но их общее число невелико. Возможная причина их наблюдаемой малочисленности — низкая светимость.

Микроскопические же ЧД с массами $M_{BH} \ll M_{\odot}$ пока вообще не регистрировались.

Модели радиативно неэффективных аккреционных течений на черные дыры

Слабое излучение ЧД не редкость. Например, в центре Галактики наблюдается сверхмассивная черная дыра Sgr A* с массой $\sim 10^6 M_\odot$ [21] (по более свежим данным, это то ли четверная система ЧД, Sgr A*-D*, то ли двойная). В то же время рентгеновская светимость данного объекта в 10^{-9} раз ниже эддингтоновского предела (Nayaksin, 2004). Доля слабосветящихся ядер (светимость меньше одного процента от эддингтоновского предела) из общего числа ядер галактик, содержащих сверхмассивные ЧД, велика и составляет около 40 % (Ho, 2003).

В соответствии с многочисленными фактами регистрации ЧД слабой светимости было введено понятие радиативно неэффективных аккреционных течений (RIAF). Примерами RIAF служат строго сферическая ламинарная аккреция Бонди [22], аккреция с малым угловым моментом [23] и модели ADAF [24].

Модель сферической адиабатической аккреции на покоящийся относительно удаленного фона точечный гравитирующий объект [22] вместе со своим обобщением для движущегося относительно среды гравитирующего объекта [25] были исторически первыми моделями аккреции. В модели Бонди радиативная эффективность аккреции чрезвычайно низка (только $\sim 10^{-11}$ гравитационной энергии аккрецируемого вещества уходит в излучение [26]). Данная модель предписана объяснять аккрецию на уединенные ЧД, однако реально эта модель, как правило, не согласуется с наблюдениями (например, для источника Sgr A*, [27]). Более продвинутой RIAF-моделью является модель адвективно-доминированного аккреционного течения (ADAF) [28]. Она позволяет объяснить спектры ряда объектов, таких как Sgr A* [29], но также далеко не всю совокупность наблюдаемых изолированных ЧД. Модель ADAF по сути несамосогласована — аккреционное течение в ней конвективно неустойчиво и гравитационно несвязано, то есть кроме нисходящих потоков возможны истечения в виде ветра. При этом ADAF построена как одномерная модель и не в состоянии адекватно описать как конвекцию, так и чередующиеся области истечения и аккреции. Попытки решить проблему положительной энергии связи в рамках модели ADIOS [30] оказались не слишком успешными. Более продвинутой является модель

конвективно-доминированного течения CDAF [31, 32], но и она не в состоянии адекватно воспроизвести наблюдаемые степенные спектры и коротко временную периодичность в рентгеновском диапазоне (Mineshige, 2002).

В последнее время возобновился интерес к модели квазисферической аккреции Бонди с учетом возможности ее модификации на предмет учета возбуждения слабых нерадиальных движений. Наблюдается увеличение количества публикаций по проблеме квазисферической аккреции [33–35]. Одним из факторов, способных принципиально изменить профиль квазисферического аккреционного течения, является турбулентность. Турбулентность разрушает строгую сферическую симметрию течения и тем самым приводит к торможению и разогреву аккрецирующего вещества с последующим излучением избыточного тепла и увеличением радиативной эффективности аккреции. Кроме того, турбулентность способна приводить к качественной перестройке картины течения, скажем, к переводу аккреции из сверхзвукового в дозвуковой режим.

Нужно отметить, что полноценных аналитических моделей турбулентной аккреции для моделей RIAF не существует. К примеру, модель CDAF учитывает конвективные движения только качественно, феноменологически, основываясь на результатах отдельных численных экспериментов.

В астрофизических задачах при построении турбулентных моделей установилась практика, основывающаяся на феноменологическом описании турбулентности, в рамках которого турбулентность учитывается через один или несколько параметров, которые вводятся в уравнения движения вручную. Наиболее популярным из такого рода подходов является α -модель [12]. Турбулентность в такой модели играет роль только механизма переноса момента импульса, причем сам α -параметр в некотором смысле выступает подгоночным параметром.

В современной астрофизике, с одной стороны, ощущается потребность в использовании более подробных («микроскопических») турбулентных моделей, поскольку феноменологическая модель не всегда способна воспроизвести многообразие проявлений турбулентности, и одного параметра для объяснения многочисленных динамических проявлений турбулентности уже недостаточно. С другой стороны, развитие вычислительной техники делает возможным прямое численное моделирование турбулентных течений.

В настоящей лекции приведены результаты численных расчетов и теоретических построений, выполненных автором совместно с Андреем Занковичем, Михаилом Ереминым и Алексеем Коловым в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ-Поволжье 07—02—96611 [36, 37].

Модель квазисферической аккреции турбулентного газа

Нами разработана модель турбулентной аккреции, в которой рассматривается аккреция на ЧД турбулизованного вещества, обладающего малым полным удельным угловым моментом \mathbf{l}

$$|\tilde{\mathbf{l}}/r\tilde{u}| \ll 1, \quad (1)$$

где \tilde{u} — средняя (ламинарная) радиальная скорость течения на радиусе r . При этом среднеквадратичный угловой момент существенно не мал:

$$\frac{\tilde{l}^2}{r^2\tilde{u}^2} = \frac{\langle \rho v'' v'' \rangle}{\langle \rho \rangle \tilde{u}^2} + \frac{\langle \rho w'' w'' \rangle}{\langle \rho \rangle \tilde{u}^2} \lesssim 1. \quad (2)$$

Здесь v'', w'' — флуктуационные (турбулентные) составляющие нерадиальных компонент скоростей, а $\langle \rho \rangle$ — среднее значение плотности.

Модель строится при минимуме упрощающих предположений и в отличие от α -модели не содержит феноменологических параметров. Все уравнения модели выводятся из полных уравнений газовой динамики невязкого газа через усреднение по угловым координатам и по времени. Такое усреднение возникает естественным образом в силу сферической симметрии в среднем и установившегося характера аккреционного течения. Используются два типа усреднения — взвешенное с плотностью и без нее, что отмечается двумя разными значками — тильдой или угловыми скобками соответственно [38].

После усреднения уравнения выглядят следующим образом (для простоты угловые скобки и тильды в последующих формулах опущены):

$$r^2 \rho u = J = \text{const}, \quad (3)$$

$$r^2 \tau u^3 = \mathfrak{C} = \text{const}, \quad (4)$$

$$\frac{u^2}{2} + \frac{c_s^2}{\gamma - 1} + \Phi + \frac{3}{2} \frac{\tau}{\rho} + \frac{\alpha}{r^2} = B = \text{const}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho u^2 + r^2 \tau) - \frac{2\alpha\rho}{r^3} = -\frac{\partial p}{\partial r} - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial r}. \quad (6)$$

Уравнения (3) и (5) отражают законы сохранения потоков массы и энергии соответственно (последнее есть интеграл Бернулли), уравнение (4) выражает сохранение энергии турбулентного движения, а уравнение (6) есть радиальная проекция уравнения Эйлера. В этих уравнениях присутствует переменная τ , характеризующая удельную (на единицу объема среды) кинетическую энергию радиального турбулентного движения, и постоянная α , имеющая смысл среднего квадрата удельного углового момента, сохраняющегося в потоке. Именно слагаемыми, содержащими τ и α , и отличается развиваемая нами математическая модель от модели ламинарной сферической аккреции Бонди [22].

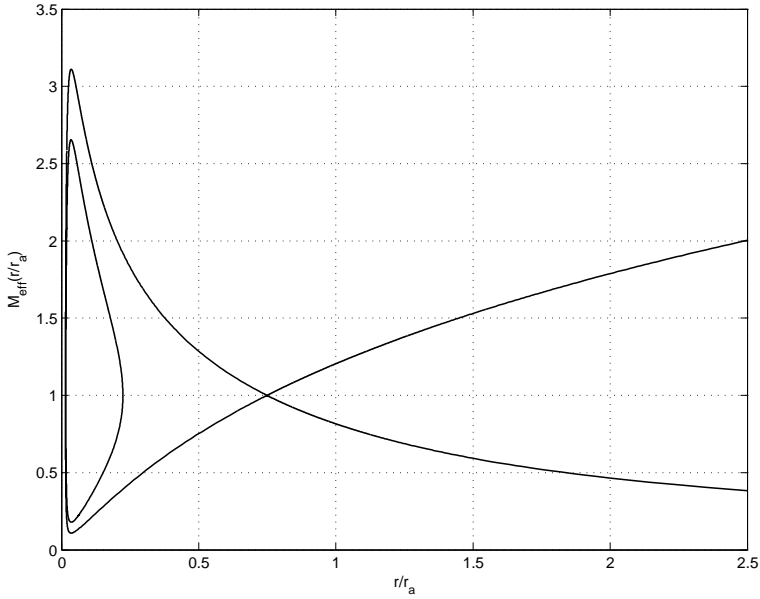


Рис. 1. Радиальное распределение числа Маха в модели квазисферической аккреции турбулентного газа для случая ньютоновского потенциала. Течение становится непродолжимым на некоторых конечных радиусах вблизи начала координат. Расстояния выражены в единицах аккреционного радиуса $r_a = Gm/B$

Турбулентность при квазисферической аккреции проявляет себя в некотором смысле прямо противоположным образом тому, что приписывается ей в условиях дисковой аккреции: она выступает фактором, не способствующим аккреции, а наоборот, препятствующим ей. Турбулентность проявляет себя динамически, через возбуждение нерадиальных движений. В этой связи наибольший интерес представляет слагаемое $\frac{2\alpha\rho}{r^3}$ в уравнении (6), которое можно интерпретировать как эффективную центробежную силу. Наличие центробежного барьера при определенных условиях может полностью затормозить падение вещества на притягивающий центр. В отличие от ламинарной сферической аккреции Бонди разгон сверхзвукового турбулентного потока в ньютоновском потенциале возможен только до некоторого конечного максимального числа Маха, после чего на малых радиусах поток замедляется до звукового и течение перестает

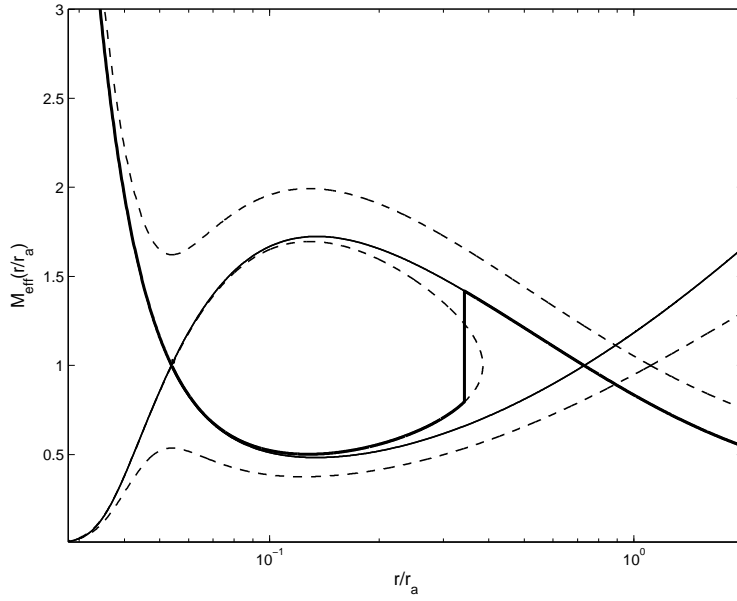


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для случая псевдоньютоновского потенциала. Появляется вторая звуковая точка, и становится возможным стационарный ударно-волновой переход

быть продолжимым до начала координат (рис. 1). Для псевдоньютоновского потенциала $\Phi = -Gm/(r - r_g)$, где r_g – гравитационный радиус, возможен двукратный переход через скорость звука. На расстояниях близких к гравитационному радиусу, картина аккреции меняется качественно и становятся возможными течения со стационарными ударными волнами (рис. 2). Картина течения в этом случае подобна той, что получается в моделях аккреции с ненулевым полным угловым моментом [39, 40].

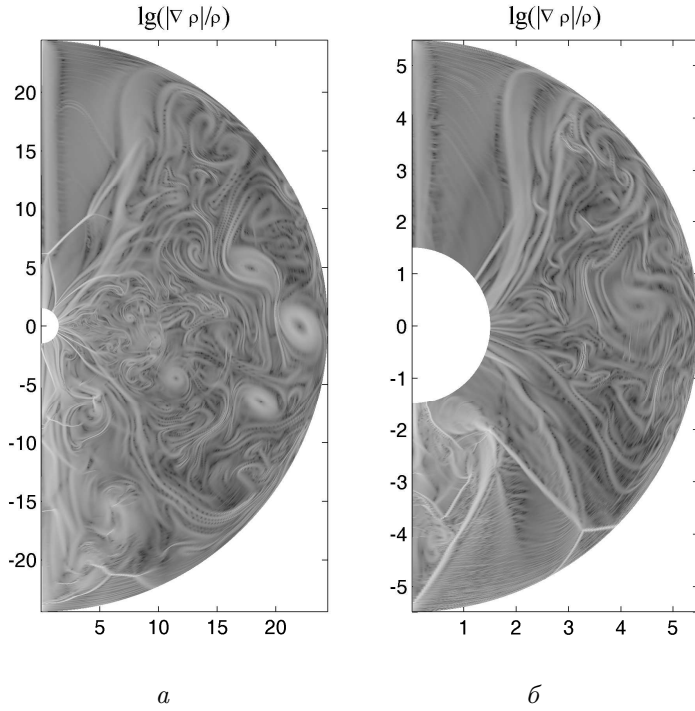


Рис. 3. Слева — характерная структура турбулентного аккреционного течения (шлирен-фотография плотности) вблизи аккретора. Изображено вертикальное сечение, течение симметрично относительно вертикальной оси. Справа — то же в непосредственной окрестности аккретора. Видна картина множественных протяженных ударных фронтов. Расстояния даны в единицах гравитационного радиуса

Численное моделирование выполнялось на двумерной сетке в сферической системе координат в предположении осевой симметрии течения. Для численного интегрирования уравнений гидродинамики в сферической системе координат использовалась конечно-объемная MUSCL TVD схема без расщепления по пространству. Схема обладает вторым порядком точности по времени и третьим по пространству. Численные потоки через границы ячеек вычислялись методом Хартена—Лакса—ван Лиира с учетом контактного разрыва (метод HLLC). Разрешение в проведенных численных экспериментах составляло 1 градус по азимутальному углу и $0.01 r_g$ по радиусу.

Гравитационное поле моделировалось псевдоньютоновым потенциалом [41], который часто применяется для учета эффектов ограниченности высоты центробежного барьера и неограниченного падения на центр на гравитационном радиусе. Течение рассчитывалось вплоть до r_g , физический смысл имеют области течения вне $3r_g$.

Невозмущенное течение задавалось как стационарное бондиевское транзвуковое течение. На входе в расчетную область на радиусе $r_{out} = 25r_g$ подавались возмущения с амплитудой $\delta\rho/\rho \lesssim 1$. Спустя несколько сотен динамических времен происходило установление к квазистационарному состоянию.

Результатирующие профили течения приведены на рис. 3 *а* и *б*. Подобрать условия, при которых образуется стоячая сферическая ударная волна, опоясывающая аккректор, в расчетах пока не удалось, но была отмечена тенденция образования немонотонного профиля числа Маха с уменьшением абсолютной величины числа Маха при приближении к центру в соответствии с предсказаниями аналитической модели. Уменьшение абсолютной величины числа Маха на малых радиусах и его переход из сверхзвукового режима в дозвуковой есть следствие торможения вещества возбужденными турбулентностью нерадиальными движениями.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области (грант РФФИ-Поволжье 07-02-96611).

Список литературы

1. *Laplace P. S.* Exposition du Systeme du Monde. — Paris, 1796.
2. *Michell J.* On the Means of Discovering the Distance... // Philos. Trans. R. Soc. London. — 1784. — Vol. 74. — P. 35–57.
3. *Schwarzschild K.* Ueber das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie // Sitzungsber. Konigl. Preuss. Akad. Wiss. Physik-Math. Klasse. — 1916. — P. 424–434.
4. *Chandrasekhar S.* Highly Collapsed Configurations of Stellar Mass // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1931. — Vol. 91. — P. 456–466.
5. *Chandrasekhar S.* The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs // Astrophys. J. — 1931. — Vol. 74. — P. 81–82.
6. *Oppenheimer J. R., Volkoff G.* On Massive Neutron Cores // Phys. Rev. — 1939. — Vol. 55. — P. 374–381.
7. *Oppenheimer J. R., Snyder H.* On Continued Gravitational Contraction // Phys. Rev. — 1939. — Vol. 56. — P. 455–459.
8. *Wheeler J. A.* // Am. Sci. — 1968. — Vol. 56. — P. 1.
9. *Зельдович Я. Б.* // Докл. АН СССР. — 1964. — Т. 155. — С. 67.
10. *Salpeter E. E.* Convection-dominated accretion flow // Astrophys. J. — 1964. — Vol. 140. — P. 796.
11. *Hawking S. W.* Particle Creation by Black Holes // Commun. Math. Phys. — 1975. — Vol. 43. — P. 199–220.
12. *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance // Astron. Astrophys. — 1973. — Vol. 24. — P. 337–355.
13. *Bisikalo D. V., Boyarchuk A. A., Chechetkin V. M. et al.* 3D numerical simulation of gaseous flows structure in semidetached binaries // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1998.
14. *Spruit H. C.* Stationary shocks in accretion disks // Astron. Astrophys. — 1987. — Vol. 184. — P. 173–184.
15. *Matsuda T., Inoue M., Sawada K. et al.* A reinvestigation of gas response to an ovally deformed gravitational potential // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1987. — Vol. 229. — P. 295–314.
16. *Remillard R. A., McClintock J. E.* X-Ray Properties of Black-Hole Binaries // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2006. — Vol. 44, iss. 1. — P. 49–92.

17. Черпащук А. М. Поиски черных дыр // Успехи физ. наук. — 2003. — Т. 173, № 4. — С. 345—384.
18. Churazov E. Integral observations of the cosmic X-ray background in the 5-100 keV range via occultation by the Earth.
19. Pooley D., Rappaport S. X-Rays from the Globular Cluster G1: Intermediate-Mass Black Hole or Low-Mass X-Ray Binary? // Astrophys. J. — 2006. — Vol. 644. — P. 45—48.
20. Matsumoto H., Tsuru T. G., Harashima T. et al. Multi wavelength observations of the IMBH in M82 // Bull. Am. Astron. Soc. — 2001. — Vol. 33. — P. 869.
21. Genzel R., Schodel R., Ott T. et al. Near-infrared flares from accreting gas around the supermassive black hole at the Galactic Centre // Nature. — 2003. — Vol. 425, iss. 6961.
22. Bondi H. On spherically symmetrical accretion // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1952. — Vol. 112. — P. 195—209.
23. Proga D., Begelman M. C. Accretion of Low Angular Momentum Material onto Black Holes: Two-dimensional Magnetohydrodynamic Case // Astrophys. J. — 2003. — Vol. 592. — P. 767—781.
24. Narayan R., Quataert E., Igumenshchev I. V., Abramowicz M. A. The Magnetohydrodynamics of Convection-dominated Accretion Flows // Astrophys. J. — 2002. — Vol. 577. — P. 295—301.
25. Bondi H., Hoyle F. On the mechanism of accretion by stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1944. — Vol. 104. — P. 273.
26. Шварцман В. Ф. Ореолы вокруг звезд // Астрон. журн. — 1971. — Т. 48. — С. 479—488.
27. Quataert E. Radiatively Inefficient Accretion Flow Models of Sgr A* // The central 300 parsecs of the Milky Way: Proc. of the Galactic Center Workshop, 2002. — 2002. — P. 435—443.
28. Narayan R., Yi I. Advection-dominated accretion: a self-similar solution // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 428. — P. 13—16.
29. Narayan R., Yi I., Mahadevan R. Explaining the Spectrum of SAGITTARIUS-A* with a Model of an Accreting Black-Hole // Nature. — 1995. — Vol. 374. — P. 623.
30. Blandford R. D., Begelman M. C. On the fate of gas accreting at a low rate on to a black hole // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1999. — Vol. 303. — P. 1.

31. *Narayan R., Igumenshchev I. V., Abramowicz M. A.* Self-similar Accretion Flows with Convection // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 539. — P. 798–808.
32. *Quataert E., Gruzinov A.* Convection-dominated accretion flow // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 539. — P. 809–814.
33. *Krumholz M. R., McKee C. F., Klein R. I.* Bondi Accretion in the Presence of Vorticity // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 618. — P. 757–768.
34. *Igumenshchev I. V.* Three-Dimensional Simulations of Spherical Accretion Flows with Small-Scale Magnetic Fields // *Astrophys. J.* — 2006.
35. *Ray A. K., Bhattacharjee J. K.* Large-Scale Properties in Turbulent Spherically Symmetric Accretion // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 627. — P. 368–375.
36. *Колов А. Н., Коваленко И. Г.* // Письма в Астрон. журн. — 2009. — В печати.
37. *Еремин М. А., Колов А. Н., Коваленко И. Г.* // Вестн. ВолГУ. — 2009. — В печати.
38. *Wilcox D. C.* Turbulence modeling for CFD. — DCW Industries, Inc., 1994.
39. *Chakrabarti S. K.* Standing Rankine-Hugoniot shocks in the hybrid model flows of the black hole accretion and winds // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 347. — P. 365–372.
40. *Molteni D., Rue D., Chakrabarti S. K.* Numerical simulations of standing shocks in accretion flows around black holes: A comparative study // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 470. — P. 460–468.
41. *Paczynski B., Wiita P. J.* Thick accretion disks and supercritical luminosities // *Astron. Astrophys.* — 1980. — Vol. 88. — P. 33.

ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ПО МАССАМ ПЛАНЕТ

Введение

Исследование орбитальной эволюции Солнечной и других планетных систем является одной из фундаментальных задач небесной механики. Устойчивость Солнечной системы — ее жизненно важное для нас свойство. Только устойчивые планетные системы могут служить прибежищем жизни и космической цивилизации.

За редчайшими исключениями устойчивость системы N тел на космогонических временах обеспечивается двумя факторами: иерархией масс и иерархией расстояний. Иерархия расстояний типична для систем кратных звезд, но встречается и в Солнечной системе.

Пример 1: тесная двойная плюс одиночная или тесная двойная на большом удалении.

Пример 2: Солнце — Земля — Луна.

В планетных системах основную роль играет иерархия масс. Так, масса Юпитера на три порядка меньше массы Солнца. Удаленность планетных орбит друг от друга также вносит некоторый вклад в устойчивость, но он не столь существен. Отношение больших полуосей орбит Сатурна и Юпитера равно примерно 2, а для Земли и Венеры (имеющими существенно меньшие массы) оно составляет всего 1.4.

Здесь мы попытаемся выяснить запас устойчивости Солнечной и одной экзопланетной системы по массам при сохранении в начальный момент положения в фазовом пространстве. Для простоты ограничимся случаем двух планет, Юпитера и Сатурна для Солнечной системы. Масса Урана, который в вдвое дальше Сатурна от Солнца, составляет 15 % от массы Сатурна, а Нептуна, в полтора раза более далекого, — 18 %. Массы планет земной группы существенно меньше. Так что двухпланетное приближение вполне приемлемо для выяснения качественной картины движения.

Понятие *устойчивость* не имеет определенного смысла без дополнительных пояснений. Мы будем понимать под устойчивым такое поведение системы, при котором оскулирующие эллипсы на космогонических временах остаются в границах, препятствующих тесным сближениям. Точнее,

$$c_1 < a_1(1 - e_1), \quad a_1(1 + e_1) < a_2(1 - e_2) - c_2, \quad a_2(1 + e_2) < c_3. \quad (1)$$

Здесь и ниже a, e, i, Ω, g, M — большая полуось, эксцентриситет, наклон, долгота восходящего узла, аргумент перицентра, средняя аномалия; индексы 1, 2 при массах и оскулирующих элементах относятся к Юпитеру и Сатурну соответственно; c_1, c_2, c_3 определяют размах допустимых колебаний. Разумно положить, например, $c_1 = 4, c_2 = 1, c_3 = 16$ в астрономических единицах длины. Впрочем, мы еще вернемся к вопросу о постоянных c_k . Заметим, что приведенное выше определение устойчивости совпадает с одним из видов устойчивости по Лагранжу.

Численное интегрирование

Насколько нам известно, первое исследование поставленной задачи выполнено П. Накози [1–3]. Масса Солнца принята равной единице. Массы планет m_i^0 заменены на $m_i = \chi m_i^0$.

Дифференциальные уравнения движения интегрировались численно, для контроля двумя различными методами, на интервале времени 10^5 лет для 27 значений χ от 0.1 до 1 000. Использовались два набора начальных данных. В обоих при варьировании параметра χ сохранялись начальные значения кеплеровских элементов e, i, Ω, g, M . В первом наборе, кроме того, сохранялись начальные значения больших полуосей орбит Юпитера и Сатурна, во втором — начальное отношение их средних движений. Последние, в силу третьего закона Кеплера, зависят не только от больших полуосей, но и от масс планет. Оба варианта приводят к практически одинаковому поведению планетной системы. Она оставалась устойчивой вплоть до значения $\chi = 29$. При $\chi > 29$ наступает резкий переход к неустойчивости. Уже при $\chi = 29.4$ во всех элементах орбит появляются вековые возмущения. Сатурн выбрасывается из системы за время 10^4 лет.

Осредненные уравнения

Численные исследования в небесной механике при малейшей возможности принято дополнять аналитическими. Разделим орбитальные элементы на две группы: медленные $x = (a, e, i, \Omega, g)$ и быстрые $y = (M)$. В невозмущенном движении первые постоянны, вторые — линейные функции времени. В двупланетной задаче вектор x десятимерен, y — двумерен. На практике вместо средней аномалии M и аргумента перицентра g используют среднюю долготу $M + g + \Omega$ и долготу перицентра $g + \Omega$, но это несущественно.

Дифференциальные уравнения движения имеют вид

$$\dot{x} = \mu f(x, y, \mu), \quad \dot{y} = \omega(x) + \mu \tilde{f}(x, y, \mu). \quad (2)$$

Здесь $\mu \sim m_1$ — малый параметр; ω — вектор средних движений, f и \tilde{f} — аналитические функции, периодические по y , а также по Ω, g .

Для исследования поведения решений системы (2) на больших временах К. Ф. Гаусс предложил исключить из правых частей (2) короткопериодические колебания и заменить систему (2) на

$$\dot{X} = \mu F(X, \mu), \quad \dot{Y} = \omega(X) + \mu G(X, \mu). \quad (3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} F(X, \mu) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \iint f(X, y, \mu) dy, \\ G(X, \mu) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \iint \tilde{f}(X, y, \mu) dy, \end{aligned} \quad (4)$$

где $dy = dy_1 dy_2$; по каждой переменной интеграл берется в пределах от 0 до 2π . Средние элементы обозначены через X, Y , чтобы отличить их от оскулирующих x, y . Первое из уравнений (3) не зависит от второго. Последнее можно отбросить, поскольку поведение быстрых переменных на космогонических временах не представляет интереса. Остается

$$\dot{X} = \mu F(X, \mu). \quad (5)$$

В работе [4] уравнения (5) для задачи Солнце—Юпитер—Сатурн получены методом Альфана—Горячева (модификация метода Гаусса). Уравнения (5) интегрировались методом Рунге—Кутты на интервале времени $2 \cdot 10^5$ лет (вперед и назад на 10^5 лет от эпохи 1900.0) при значениях параметра χ от 1 до 99.1. Планетная система оставалась

устойчивой вплоть до значения $\chi = 99$. Дальше наступает резкий переход к неустойчивости. При $\chi = 99.1$ афельное расстояние Юпитера превысило перигельное расстояние Сатурна

$$a_1(1 + e_1) > a_2(1 - e_2).$$

Таким образом, распад планетной системы наступает при $\chi \approx 99$, что существенно больше полученного Накози критического значения $\chi \approx 29$. Сделан вывод (как оказалось, неверный, см. ниже), что осреднение сильно приукрашивает картину движения в том смысле, что область возможных значений масс планет, при которых сохраняется устойчивость, для осредненной системы становится намного шире.

Осредненные уравнения с возвратом к оскулирующим элементам

Отличие в три раза критических значений χ , полученных двумя давно апробированными методами, требует объяснения. Оказалось, дело в следующем. В предыдущем параграфе исследовано поведение средних элементов X , тогда как интерес представляют оскулирующие элементы x . Необходимо к дифференциальным уравнениям (5) добавить уравнения замены переменных

$$x = X + \mu u(X, Y, \mu). \quad (6)$$

Правая часть (6) зависит от Y . Поскольку Y меняется быстро, интерес в задаче об устойчивости представит максимальное значение

$$\bar{u}(X, \mu) = \max_Y |u(X, Y, \mu)|. \quad (7)$$

Как оказалось, увеличение $|x - X|$ играет в потере устойчивости с ростом μ не менее важную роль, чем изменение средних элементов X .

Соответствующие расчеты проделаны в работе [5]. Предварительно в статьях [6, 7] с помощью рациональной версии эшелонированного пуассоновского процессора [8] получены явные выражения величин f , \tilde{f} , F , G , u . Опишем соответствующую процедуру более подробно. Уравнения движения двухпланетной задачи составлены в координатах Якоби как более адекватных по сравнению с гелиоцентрическими. Гамильтониан записан в системе элементов, близких к

обычным кеплеровским, в виде ряда Пуассона, то есть ряда Фурье по переменным типа M, g, Ω с коэффициентами в виде ряда Маклорена по степеням переменных типа $e, \sin i, a - a^\circ$, где a° — некоторое среднее значение большой полуоси. Малый параметр μ и массы планет m сохранены в символьном виде. Методом Хори—Депри получены подобные ряды для осредненного гамильтониана, производящей функции осредняющего преобразования, правых частей осредненных уравнений F, G и функций замены переменных u .

Уравнения (3) интегрировались методом Эверхарта 15-го порядка на интервале в 10^6 лет. Параметр χ варьировался от 1 до 19, причем начальные значения больших полуосей не изменялись.

Устойчивость планетной системы оценивалась по поведению трех переменных: минимальная на промежутке интегрирования разность ξ_1 между перигельным расстоянием Сатурна и афелийным расстоянием Юпитера в средних элементах

$$\xi_1 = \min[a_2(1 - e_2) - a_1(1 + e_1)],$$

аналогичная минимальная разность ξ_2 в оскулирующих элементах и, наконец, минимальное расстояние ξ_3 между самими планетами

$$\xi_3 = \min |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|.$$

Величина ξ_3 введена по двум причинам. Во-первых, даже при $\xi_2 = 0$ орбиты не обязательно близки к пересечению, особенно при не слишком малых эксцентриситетах и взаимном наклоне. Для пересечения нужна специальная ориентация орбит. Во-вторых, Юпитер и Сатурн находятся в зоне слабого резонанса $\omega_2 : \omega_1 \approx 2 : 5$. Поэтому совпадение афелия внутренней планеты с перигелием внешней еще не гарантирует тесного сближения.

В табл. 1 представлены величины ξ_1, ξ_2, ξ_3 и радиус ϱ сферы действия Юпитера относительно Солнца (в астрономических единицах длины) в зависимости от χ . При $\chi = 18$ величина $\xi_3 = 0.93$ сравнима с радиусом сферы действия Юпитера $\varrho = 1.02$. При $\chi = 19$ величина $\xi_3 = 0.21$ уже существенно меньше $\varrho = 1.04$. При этом $\xi_2 = -1.13$, то есть афелий Юпитера может располагаться существенно дальше перигелия Сатурна. Между тем $\xi_1 = 2.55$, так что анализ поведения только ξ_1 дает приукрашенный результат устойчивости системы при $\chi = 19$. В действительности же система теряет устойчивость, скорее всего при $\chi = 18$. При $\chi = 19$ развал неизбежен.

Таблица 1. Значения $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \varrho$ (в а. е.) для системы Солнце — Юпитер — Сатурн

χ	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ϱ
2	3.36	3.31	3.70	0.42
5	3.22	3.10	3.56	0.61
10	3.04	2.66	3.20	0.81
15	2.82	1.74	2.53	0.95
16	2.77	1.39	2.27	0.97
17	2.71	0.89	1.64	0.99
18	2.64	0.14	0.93	1.02
19	2.55	-1.13	0.21	1.04

Как именно происходит сближение орбит при увеличении параметра χ , можно выяснить, анализируя минимальные значения перигелийных и максимальные значения афелийных расстояний в средних элементах:

$$\eta_1 = \min[a_1(1 - e_1)], \quad \eta_2 = \max[a_1(1 + e_1)],$$

$$\eta_3 = \min[a_2(1 - e_2)], \quad \eta_4 = \max[a_2(1 + e_2)]$$

и аналогичных расстояний $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ в оскулирующих элементах (табл. 2). Для орбиты Юпитера сравниваемые расстояния различаются не более чем на 0.02 а. е. как при изменении параметра χ , так и при переходе от средних элементов к оскулирующим. Для орбиты Сатурна при увеличении χ от 2 до 19 расстояния η_3, η_4 изменяются в пределах 10 %, а расстояния ζ_3, ζ_4 , полученные на основе оскулирующих элементов, примерно в 2 раза. Различия в описании орбитальной эволюции Сатурна при росте χ — следствие увеличения амплитуды короткопериодических возмущений, исключаемых при проведении осредняющих преобразований.

Данные (табл. 2) позволяют найти гарантированные значения постоянных c_k в неравенствах (1). Так, $c_1 = 4.9$ во всех рассмотренных случаях; $c_3 = 11.6$ в средних элементах, тогда как в оскулирующих c_3 быстро растет вместе с χ вплоть до $c_3 = 20.2$ для $\chi = 19$; $c_2 = 2.5$ в средних элементах, тогда как в оскулирующих c_2 становится меньше 1 при $\chi < 17$ и меньше 0 при $\chi = 19$.

Замечание 1. Метод осреднения оказался прекрасным инструментом для определения пределов устойчивости по массам. Однако для описания движения после сближения он непригоден: резкое изменение элементов при сближении не укладывается в схему осреднения.

Таблица 2. Значения минимальных перигельных и максимальных афелльных расстояний в средних элементах $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ и в оскулирующих элементах $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ (в а. е.) для системы Солнце — Юпитер — Сатурн

χ	η_1	η_2	η_3	η_4	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4
2	4.91	5.44	8.71	10.40	4.91	5.45	8.66	10.45
5	4.93	5.43	8.61	10.55	4.92	5.43	8.48	10.72
10	4.93	5.42	8.43	10.80	4.93	5.43	8.05	11.44
15	4.93	5.42	8.21	11.13	4.93	5.43	7.12	13.38
16	4.93	5.42	8.16	11.22	4.92	5.43	6.76	14.20
17	4.93	5.42	8.10	11.31	4.92	5.43	6.25	15.40
18	4.93	5.42	8.02	11.42	4.92	5.43	5.50	17.18
19	4.93	5.42	7.94	11.55	4.91	5.44	4.22	20.11

Замечание 2. Неожиданно наше критическое значение $\chi \approx 19$ оказалось существенно *ниже* критического значения Накози $\chi \approx 29$. Вероятно, это связано с тем, что на относительно короткой шкале времени в 10^5 лет устойчивость при $\chi \leq 28$ еще сохраняется. Так, указанные в табл. 1 при $\chi = 18$ и 19 сближения Юпитера и Сатурна на расстояние, меньшее радиуса сферы действия Юпитера, происходят в моменты времени 408 930 и 466 450 лет соответственно.

Планетная система 47 UMa

Разложения с символьными параметрами, построенные в работах [6, 7], можно использовать для исследования орбитальной эволюции систем, в которых более массивная планета расположена ближе к звезде, чем менее массивная, а эксцентриситеты орбит каждой из планет не превосходят 0.1. Система 47 UMa удовлетворяет этим условиям. В табл. 3 приведены элементы орбит планет этой системы по данным каталога [9]. Здесь и ниже T_0 — эпоха прохождения перицентра, i — наклон к картинной плоскости. В скобках указаны ошибки элементов в единицах последнего знака. За единицу масс планет принята масса Юпитера m_J .

Осредненные уравнения движения интегрировались на интервале времени 10^6 лет. В качестве начальных данных были выбраны средние значения элементов и масс из табл. 3. Наклоны орбит полагались равными $i_1 = 0^\circ$ и $i_2 = 5^\circ$, начальные значения долгот восходящих узлов были выбраны нулевыми. Масса звезды 47 UMa равна $1.08 M_\odot$ [9]. Параметр χ варьировался от 1 до 38.2.

В табл. 4 приведены значения расстояний ξ_1, ξ_2, ξ_3 , радиуса сферы действия ϱ планеты 47 UMa b относительно звезды, а также наибольшие значения эксцентриситета обеих планет в зависимости от параметра χ . При $\chi = 38.1$ решение в оскулирующих элементах показывает, что расстояние в афелии для орбиты планеты 47 UMa b превышает расстояние в перигелии для орбиты планеты 47 UMa c, $\xi_2 = -0.003$ а. е. Решение в средних элементах дает весьма приукрашенный результат $\xi_1 = 1.59$ а. е.

При $\chi = 38.2$ минимальное расстояние между планетами $\xi_3 = 0.40$ а. е. становится меньше радиуса сферы действия $\varrho = 0.51$ а. е. планеты 47 UMa b. Таким образом, при увеличении масс планет системы 47 UMa более чем в 38 раз, возможны тесные сближения этих планет, приводящие к неустойчивости.

Данные табл. 5 показывают, что с ростом параметра χ изменяются перигельные и афельные расстояния орбит обеих планет системы 47 UMa в отличие от системы Солнце — Юпитер — Сатурн, в которой элементы орбиты более массивного Юпитера менялись мало.

Приведенные в табл. 4 максимальные значения эксцентриситетов e_{1max}, e_{2max} планет 47 UMa b и 47 UMa c соответственно совместно с данными табл. 3 о получаемых из наблюдений значениях эксцентриситетов позволяют оценить угол i наклона плоскости орбит к картинной плоскости. По данным наблюдений (табл. 3), максимально возможные значения эксцентриситетов равны $e_{1max} = 0.075$, $e_{2max} = 0.12$. Из табл. 4 получаем, что максимальное значение $e_{1max} = 0.075$ эксцентриситет орбиты планеты 47 UMa b достигает при $\chi = 10$, а эксцентриситет орбиты планеты 47 UMa c превышает значение $e_{2max} = 0.12$ при $\chi = 38$. Следовательно, для системы 47 UMa максимальное значение коэффициента χ , при котором диапазоны изменения эксцентриситетов орбит не противоречат наблюдениям, не превышает 10, что дает нижнюю оценку значения угла

Таблица 3. Элементы орбит и массы планет системы 47 UMa

Элемент	47 UMa b	47 UMa c
a , а.е.	2.13(12)	3.79(24)
e	0.061(14)	0.00(12)
g , градусы	172(15)	127(56)
T_0 , JD	2450365(34)	2451360(500)
$m \sin i$, m_J	2.63(23)	0.79(13)

Таблица 4. Значения ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ϱ (в а. е.) и максимальные значения эксцентриситетов e_{1max} , e_{2max} для системы 47 UMa

χ	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ϱ	e_{1max}	e_{2max}
1	1.50	1.48	1.52	0.13	0.063	0.018
10	1.58	1.44	1.55	0.33	0.075	0.016
20	1.61	1.31	1.33	0.43	0.106	0.025
30	1.62	1.07	1.23	0.50	0.196	0.048
35	1.63	0.92	1.25	0.53	0.243	0.071
36	1.65	0.86	1.05	0.53	0.265	0.080
37	1.59	0.73	0.93	0.53	0.289	0.101
38	1.56	0.22	0.75	0.52	0.391	0.149
38.1	1.59	-0.003	0.66	0.52	0.442	0.167
38.2	1.64	-0.38	0.40	0.51	0.526	0.191

Таблица 5. Значения минимальных перигельных и максимальных афельных расстояний в средних элементах η_1 , η_2 , η_3 , η_4 и в оскулирующих элементах ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 (в а. е.) для системы 47 UMa

χ	η_1	η_2	η_3	η_4	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4
1	2.01	2.26	3.72	3.85	1.99	2.27	3.72	3.86
10	2.07	2.19	3.75	3.82	1.97	2.32	3.73	3.85
20	2.13	2.14	3.75	3.81	1.90	2.43	3.70	3.89
30	2.07	2.20	3.69	3.86	1.70	2.63	3.61	3.98
35	2.04	2.24	3.67	3.88	1.59	2.72	3.53	4.08
36	2.02	2.26	3.67	3.88	1.52	2.77	3.50	4.12
37	2.04	2.24	3.63	3.91	1.46	2.89	3.44	4.22
38	2.04	2.24	3.61	3.93	1.22	3.23	3.30	4.46
38.1	2.03	2.26	3.61	3.93	1.10	3.38	3.25	4.55
38.2	1.99	2.29	3.63	3.91	0.90	3.58	3.19	4.69

$i = 5.7^\circ$ и верхние оценки масс планет $m_1 = 26.3$, $m_2 = 7.9$ масс Юпитера. Обратим внимание, что нижние оценки масс получаются почти непосредственно из наблюдений, тогда как получение верхних оценок — существенно более трудная задача.

Полученные оценки параметров i , m_1 , m_2 согласуются с результатами других авторов (табл. 6). Здесь i_1 , i_2 — наклоны к картинной плоскости для планет 47 UMa b и 47 UMa c соответственно.

Таблица 6. Параметры системы 47 UMa

i_1	m_1	i_2	m_2	Примечание
$30 - 90^\circ$	$< 4.8 m_J$			[10]
$< 3.4^\circ$	$> 40 m_J$			[10]
$> 19.5^\circ$	$< 7.6 m_J$	$> 19.5^\circ$	$< 2.25 m_J$	[11]
$> 11.5^\circ$	$< 7.5 m_J$	$> 11.5^\circ$	$< 7.5 m_J$	[11]
30°	$5.08 m_J$	30°	$1.52 m_J$	[11]

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ для поддержки ведущих научных школ (грант НШ-1323.2008.2), Федерального агентства по образованию Министерства образования и науки РФ (Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)»).

Список литературы

1. *Nacozy P. E.* On the stability of the Solar System // *Astron. J.* — 1976. — Vol. 81. — P. 787–791.
2. *Nacozy P. E.* A discussion of long-term numerical solutions of Jupiter–Saturn–Sun system // *Celest. Mech.* — 1977. — Vol. 16. — P. 77–86.
3. *Nacozy P. E.* Numerical studies on the stability of the Solar System // *Dynamics of the Solar System* / Ed. by *Duncombe R. L.*: *Proc. IAU Symposium №81.* — 1979. — P. 17–21.
4. *Сухотин А. А., Холшевников К. В.* Эволюция планетных орбит за 200 тысяч лет, рассчитанная методом Альфана–Горячева // *Астрономия и геодезия.* — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1986. — Т. 14. — С. 5–21.
5. *Кузнецов Э. Д., Холшевников К. В.* Запас устойчивости двухпланетных систем по массам планет // *Астрон. вест.* — 2009. — Т. 43. — В печати.
6. *Кузнецов Э. Д., Холшевников К. В.* Разложение гамильтониана двухпланетной задачи в ряд Пуассона по всем элементам: применение пуассоновского процессора // *Астрон. вест.* — 2004. — Т. 38, вып. 2. — С. 171–179.
7. *Кузнецов Э. Д., Холшевников К. В.* Динамическая эволюция слабозмущенной двухпланетной системы на космогоническом

- интервале времени: система Солнце – Юпитер – Сатурн // Астрон. вест. — 2006. — Т. 40, вып. 3. — С. 263—275.
8. *Ivanova T.* A new echeloned Poisson series processor (EPSP) // Celest. Mech. Dyn. Astr. — 2001. — Vol. 80. — P. 167—176.
 9. *Butler R. P., Wright J. T., Marcy G. W. et al.* Catalog of nearby exoplanets // Astrophys. J. — 2006. — Vol. 646. — P. 505—522.
 10. *Butler R. P., Marcy G. W.* A planet orbiting 47 Ursae Majoris // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 464. — P. L153—L156.
 11. *Fisher D. A., Marcy G. W., Butler R. P. et al.* A second planet orbiting 47 Ursae Majoris // Astrophys. J. — 2002. — Vol. 564. — P. 1028—1034.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КВАНТОВОЙ ХИМИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГАЗОПЫЛЕВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

Представлен краткий обзор методов квантовой химии, разработанных для исследования реакционной способности и физико-химических свойств атомов и молекул. Предложена модель взаимодействия атомов водорода с пылевыми частицами межзвездной среды на примере диоксида кремния. С помощью методов квантовой химии в рамках модели молекулярного кластера рассчитаны геометрические характеристики, ультрафиолетовые и инфракрасные спектры частиц с сорбированным на их поверхности атомом водорода.

Квантовая механика молекул и кристаллов

Современная теория химической связи основана на квантово-механическом рассмотрении устойчивых многоатомных систем. Электронное строение и свойства любой многоэлектронной системы в стационарном состоянии определяются решением стационарного уравнения Шредингера [1]:

$$\mathbf{H}\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}) = E\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}), \quad (1)$$

где \mathbf{H} — гамильтониан многоэлектронной системы (атом, молекула или твердое тело), $\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r})$ — волновая функция системы, зависящая от координат ядер \mathbf{R} и электронов \mathbf{r} , образующих систему, E — полная энергия системы.

Оператор Гамильтона \mathbf{H} всей системы можно представить в виде суммы трех вкладов:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_e + \mathbf{H}_N + \mathbf{H}_{eN}, \quad (2)$$

где \mathbf{H}_e включает операторы кинетической энергии электрона i и электростатического отталкивания электронов i и j :

$$\mathbf{H}_e = -\frac{1}{2} \sum_i \nabla^2(i) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{1}{r_{ij}}, \quad (3)$$

\mathbf{H}_N — оператор кинетической энергии ядер

$$\mathbf{H}_N = -\frac{1}{2} \sum_n \frac{1}{m_n} \nabla^2(n), \quad (4)$$

\mathbf{H}_{eN} — операторы взаимодействия электронов и ядер и отталкивания ядер

$$\mathbf{H}_{eN} = -\sum_{i,n} \frac{Z_n}{r_{in}} + \frac{1}{2} \sum_{n,k} \frac{Z_n Z_k}{r_{nk}}. \quad (5)$$

Здесь Z_n и m_n — соответственно заряд и масса ядра n ; r_{ij} , r_{in} , r_{nk} — расстояния между электронами i и j , ядром n и электроном i , ядрами n и k . Гамильтониан (1) записан в атомных единицах, в рамках нерелятивистского приближения и не содержит операторы, отвечающие за воздействие на систему всевозможных внешних сил и внутренних неэлектростатических сил.

В случае многочастичной системы строгое решение уравнения (1) наталкивается на непреодолимые вычислительные трудности. Задача упрощается введением *приближения Борна—Оппенгеймера*, или адиабатического приближения [2], позволяющего рассматривать электронные движения отдельно от движения ядер. Последние при решении электронной задачи считаются фиксированными, расположенными на заданных расстояниях друг от друга. Электроны в системе обладают существенно меньшей массой, чем ядра (для атома водорода отношение соответствующих масс составляет 5×10^4) [2, 3]. Медленно движущиеся ядра образуют электростатическое поле, в котором с намного большей скоростью движутся электроны. Отношение средней скорости электронов к средней скорости ядер настолько велико, что движение электронов успевает установиться почти мгновенно после изменения конфигурации ядер.

Согласно *теореме Борна—Оппенгеймера* [2] волновую функцию системы можно представить в виде

$$\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}) = \Psi(\mathbf{R}|\mathbf{r})\Phi(\mathbf{R}). \quad (6)$$

В этом случае задача отыскания стационарных состояний системы сводится к решению уравнения, которому удовлетворяет функция $\Psi(\mathbf{R} | \mathbf{r})$:

$$[\mathbf{H}_{\text{эл}} - E(\mathbf{R})] \cdot \Psi(\mathbf{R}|\mathbf{r}) = 0, \quad \mathbf{H}_{\text{эл}} = \mathbf{H}_e + \mathbf{H}_{eN}. \quad (7)$$

Функция $\Phi(\mathbf{R})$ удовлетворяет уравнению движения ядер в потенциале $E(\mathbf{R})$:

$$[\mathbf{H}_N + E(\mathbf{R}) - E] \cdot \Phi(\mathbf{R}) = 0. \quad (8)$$

Здесь \mathbf{R} — совокупность координат ядер, которые в (7) выступают в качестве параметров, \mathbf{r} — совокупность координат электронов. Уравнение (7) называется *электронным уравнением Шредингера*. Величина $E(\mathbf{R})$ имеет смысл полной энергии системы, которая находится в состоянии, описываемом волновой функцией $\Psi(\mathbf{R}|\mathbf{r})$; ее принято называть адиабатическим потенциалом.

Адиабатическое приближение справедливо в определенных границах. Для применения адиабатического приближения необходимо, чтобы разность энергетических уровней колебательной задачи (9) была существенно меньше разности энергий электронных уровней $E_k - E_l$. Это возможно, когда электронная волновая функция является медленно меняющейся функцией ядерных координат.

Электронное уравнение Шредингера (7) можно записать в явном виде:

$$\left[-\frac{1}{2} \sum_i \nabla^2(i) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{1}{r_{ij}} - \sum_{n,i} \frac{Z_n}{r_{in}} \right] \Psi(\mathbf{R}|\mathbf{r}) = E \Psi(\mathbf{R}|\mathbf{r}). \quad (9)$$

Уравнение (9) является основным электронным уравнением квантовой химии. Решение этого уравнения возможно лишь с использованием приближенных методов, одним из которых является *метод Хартри*, или *одноэлектронное приближение* [4].

Гамильтониан рассматриваемой системы можно представить в виде суммы одноэлектронных и двухэлектронных вкладов:

$$\mathbf{H} = \sum_i h(i) + \sum_{i < j} g(i, j), \quad \text{где } h(i) = -\frac{1}{2} \nabla^2(i) - \sum_n \frac{Z_n}{r_{in}}, \quad g(i, j) = \frac{1}{r_{ij}}. \quad (10)$$

Присутствие в гамильтониане (10) члена, отвечающего за электростатическое взаимодействие электронов, не позволяет точно решить уравнение (9). Д. Р. Хартри [5] предложил разбить суммы двухэлектронных операторов на вклады, которые можно приписать отдельным электронам:

$$\sum_{i < j} g(i, j) \approx \sum_i V(i). \quad (11)$$

Это предположение можно интерпретировать как движение каждого электрона в электростатическом поле ядер и в усредненном по пространству и времени потенциале остальных электронов. В результате

гамильтониан (10) запишется в виде

$$\mathbf{H} \approx \sum_i [h(i) + V(i)] = \sum_i \mathbf{H}_i. \quad (12)$$

Решение уравнения Шредингера (9) ищется в виде произведения одноэлектронных функций:

$$\Psi(\mathbf{x}) = \lambda_1(\mathbf{x}_1) \cdot \lambda_2(\mathbf{x}_2) \cdot \dots \cdot \lambda_N(\mathbf{x}_N), \quad \text{где } \lambda_i(\mathbf{x}_i) = \varphi_i(\mathbf{r}_i) \eta_i(\mathbf{s}). \quad (13)$$

Волновая функция $\lambda_i(\mathbf{x}_i)$ называется спин-орбиталью, $\varphi_i(\mathbf{r}_i)$ — молекулярной или атомной орбиталью; $\eta_i(\mathbf{s})$ — спиновая волновая функция, которая может принимать значение $\alpha(\mathbf{s})$, если проекция спина равна $1/2$, и $\beta(\mathbf{s})$, если проекция равна $-1/2$; \mathbf{x}_i — совокупность пространственных \mathbf{r}_i и спиновых координат \mathbf{s} i -го электрона, $i = 1, \dots, N$, где N — число электронов. Спировые волновые функции являются ортонормированными.

После подстановки (13) в уравнение Шредингера с гамильтонианом (12) получается

$$\frac{\mathbf{H}_i \lambda_i(\mathbf{x}_i)}{\lambda_i(\mathbf{x}_i)} = \varepsilon_i, \quad \text{где } \sum_i \varepsilon_i = E. \quad (14)$$

Уравнение (14) представляет собой одночастичное уравнение Шредингера, описывающее движение одного электрона. Здесь ε_i — одноэлектронная энергия. Для выполнения принципа Паули [1] антисимметричная волновая функция представляется в виде слейтеровского детерминанта (метод Хартри—Фока), который для системы с N электронами, расположенными на $n = N/2$ орбиталях, имеет вид

$$\begin{aligned} \Psi(\mathbf{x}) &= N^{-1/2} \begin{vmatrix} \lambda_1(\mathbf{x}_1) & \lambda_1(\mathbf{x}_2) & \dots & \lambda_1(\mathbf{x}_N) \\ \lambda_2(\mathbf{x}_1) & \lambda_2(\mathbf{x}_2) & \dots & \lambda_2(\mathbf{x}_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_n(\mathbf{x}_1) & \lambda_n(\mathbf{x}_2) & \dots & \lambda_n(\mathbf{x}_N) \end{vmatrix} = \\ &= N^{-1/2} \cdot |\lambda_1(\mathbf{x}_1), \lambda_2(\mathbf{x}_2), \dots, \lambda_n(\mathbf{x}_N)| = N^{-1/2} \cdot \det \|\lambda(\mathbf{x}_i)\|. \end{aligned} \quad (15)$$

Для систем, содержащих неспаренные электроны на однократно заселенных орбиталях φ , волновую функцию Ψ необходимо искать в виде линейной комбинации слейтеровских детерминантов (15), соответствующих различным электронным конфигурациям.

Одноэлектронное приближение Хартри—Фока полностью пренебрегает эффектами корреляции электронов, которые стремятся находиться на возможно большем расстоянии друг от друга.

Решения уравнения Шредингера (9) должны соответствовать стационарным значениям энергии, которая находится усреднением гамильтониана:

$$E = \langle \Psi | \mathbf{H} | \Psi \rangle = \int \Psi^* \mathbf{H} \Psi d\tau, \quad \text{где} \quad \int \Psi^* \Psi d\tau = 1, \quad (16)$$

интегрирование ведется по пространственным и спиновым координатам. Волновая функция предполагается нормированной на единицу.

Подстановка (15) в (16) дает выражение для электронной энергии системы с замкнутой оболочкой:

$$E = 2 \sum_i H_{ii} + \sum_{i,j} (2J_{ij} - K_{ij}). \quad (17)$$

Здесь H_{ii} — матричный элемент одноэлектронного гамильтониана на остова $\mathbf{H}^{\text{ост}}(1)$, соответствующий молекулярной орбитали φ_i и включающий оператор кинетической энергии электрона и оператор притяжения электрона к ядрам молекулы:

$$H_{ii} = \int \varphi_i^*(1) \mathbf{H}^{\text{ост}}(1) \varphi_i(1) d\mathbf{r}_1, \quad \mathbf{H}^{\text{ост}}(1) = -\frac{1}{2} \nabla^2(1) - \sum_n \frac{Z_n}{r_{1n}}. \quad (18)$$

Величины J_{ij} и K_{ij} называются кулоновскими и обменными интегралами соответственно:

$$J_{ij} = \int \varphi_i^*(1) \varphi_j^*(2) \frac{1}{r_{12}} \varphi_i(1) \varphi_j(2) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2, \quad (19)$$

$$K_{ij} = \int \varphi_i^*(1) \varphi_j^*(2) \frac{1}{r_{12}} \varphi_i(2) \varphi_j(1) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2. \quad (20)$$

Интегрирование проводится по пространственным координатам первого и второго электронов.

Одноэлектронный интеграл H_{ii} представляет собой энергию электрона на молекулярной орбитали φ_i в поле ядер. Двухэлектронный кулоновский интеграл J_{ij} представляет среднее кулоновское отталкивание между двумя электронами, один из которых находится на орбитали φ_i , а другой — на φ_j . Обменный интеграл K_{ij} , возникающий вследствие принципа антисимметричности волновой функции, уменьшает энергию взаимодействия между электронами с параллельными спинами на различных орбиталях φ_i и φ_j , т. е. описывает обменную корреляцию в движении электронов с одинаковыми

спинами. Корреляция, вызванная кулоновским отталкиванием пар электронов с противоположными спинами, в одноэлектронном методе Хартри—Фока не учитывается.

Для получения наилучшего приближения к волновой функции Ψ используется вариационный принцип с учетом ортонормированности молекулярных орбиталей (МО):

$$\int \varphi_i^* \varphi_j d\tau = \delta_{ij}, \quad \text{где } \delta_{ij} \text{ — символ Кронекера.} \quad (21)$$

Предположение о том, что электрон должен «ощущать» влияние потенциала атомного ядра преимущественно вблизи этого ядра, позволяет орбитали φ_i , соответствующие одночастичным состояниям электрона в молекуле, записать в виде линейной комбинации атомных орбиталей χ_μ (ЛКАО) [1–5]:

$$\varphi_i = \sum_{\mu} C_{\mu i} \chi_{\mu}, \quad (i = 1, 2, \dots), \quad (22)$$

где $C_{\mu i}$ — коэффициенты разложения МО по базису атомных орбиталей (АО).

Метод МО ЛКАО дает возможность учесть тип атомов, образующих молекулу. Для описания химической связи в молекулах обычно используют валентный базисный набор, состоящий из АО, входящих в валентную оболочку каждого атома системы. Поэтому базис является ограниченным.

Из условия ортонормированности молекулярных орбиталей вытекает условие на коэффициенты разложения МО:

$$\sum_{\mu, \nu} C_{\mu i}^* C_{\nu j} S_{\mu \nu} = \delta_{ij}, \quad (23)$$

где $S_{\mu \nu}$ — интеграл перекрывания атомных орбиталей χ_μ и χ_ν :

$$S_{\mu \nu} = \int \chi_{\mu} \chi_{\nu} d\mathbf{r}. \quad (24)$$

Тогда остоный, кулоновский и обменный интегралы в методе МО ЛКАО примут вид

$$H_{ii} = \sum_{\mu \nu} C_{\mu i}^* \cdot C_{\nu j} \cdot H_{\mu \nu}, \quad (25)$$

$$J_{ij} = \sum_{\lambda\sigma} \sum_{\mu\nu} C_{\mu i}^* \cdot C_{\nu i}^* \cdot C_{\lambda j} \cdot C_{\sigma j} \cdot \langle \mu\nu | \lambda\sigma \rangle, \quad (26)$$

$$K_{ij} = \sum_{\lambda\sigma} \sum_{\mu\nu} C_{\mu i}^* \cdot C_{\lambda j}^* \cdot C_{\nu i} \cdot C_{\sigma j} \cdot \langle \mu\lambda | \nu\sigma \rangle, \quad (27)$$

где $H_{\mu\nu}$ — матричный элемент гамильтониана остова для атомных орбиталей χ_μ и χ_ν :

$$H_{\mu\nu} = \langle \chi_\mu | \mathbf{H}^{\text{ост}} | \chi_\nu \rangle. \quad (28)$$

После введения матрицы электронной плотности, или матрицы порядков связей \mathbf{P} , в АО-базисе

$$P_{\mu\nu} = \sum_i n_i C_{\mu i}^* C_{\nu i}, \quad (29)$$

где n_i — заселенность i МО, полная энергия системы примет вид

$$E = \sum_{\mu\nu} P_{\mu\nu} H_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu} \sum_{\lambda\sigma} P_{\mu\nu} P_{\lambda\sigma} \cdot \left[\langle \mu\nu | \lambda\sigma \rangle - \frac{1}{2} \langle \mu\lambda | \nu\sigma \rangle \right]. \quad (30)$$

Здесь $\mu, \nu, \lambda, \sigma$ — индексы суммирования по базису АО.

Интегралы электронного отталкивания типа $\langle \mu\nu | \lambda\sigma \rangle$ в базисе канонических орбиталей представляют собой энергию кулоновского взаимодействия между зарядовыми распределениями $\chi_\mu \chi_\nu$ на атоме А и $\chi_\lambda \chi_\sigma$ на атоме В:

$$\langle \mu\nu | \lambda\sigma \rangle = \iint \chi_\mu(1) \chi_\nu(1) \frac{1}{r_{12}} \chi_\lambda(2) \chi_\sigma(2) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2. \quad (31)$$

Минимизация энергии методом неопределенных множителей Лагранжа при варьировании коэффициентов разложения по базису приводит к *вековому*, или *секулярному*, уравнению

$$\sum_{\mu} [F_{\mu\nu} - \varepsilon_i S_{\mu\nu}] \cdot C_{\mu i} = 0. \quad (32)$$

Уравнение (32) называется уравнением Хартри—Фока—Рутана. Оператор \mathbf{F} называется оператором Хартри—Фока:

$$F_{\mu\nu} = H_{\mu\nu} + \sum_{\lambda\sigma} P_{\lambda\sigma} \cdot \left[\langle \mu\nu | \lambda\sigma \rangle - \frac{1}{2} \langle \mu\lambda | \nu\sigma \rangle \right]. \quad (33)$$

Уравнение Хартри—Фока—Рутана решается итерационным методом, так как является кубическим относительно коэффициентов $C_{\mu i}$.

Если оператор Хартри—Фока записать в матричном виде

$$\mathbf{F} = \mathbf{H} + \mathbf{G}, \quad (34)$$

где \mathbf{H} — оператор остова, \mathbf{G} — оператор электронного взаимодействия, уравнение Хартри—Фока—Рутана принимает вид

$$\mathbf{FC} = \mathbf{SCE}. \quad (35)$$

Здесь \mathbf{S} — матрица интегралов перекрывания орбит базиса, \mathbf{C} — матрица коэффициентов разложения по базису, \mathbf{E} — диагональная матрица собственных значений ε_i оператора Хартри—Фока \mathbf{F} .

Уравнение (35) решается методом итераций. Начальное приближение к оптимальным МО, \mathbf{C}_0 получается решением уравнения Хартри—Фока—Рутана при условии $\mathbf{F}_0 = \mathbf{H}$. Используя \mathbf{C}_0 , можно вычислить \mathbf{F}_1 ; решение (35) дает \mathbf{C}_1 , затем опять строится матрица \mathbf{F} и т. д. [5]. Итерационный процесс останавливается, когда достигнута необходимая точность расчета матрицы \mathbf{C} .

Все вышесказанное относится главным образом к системам с закрытыми молекулярными оболочками, т. е. когда все электроны в системе спарены. Однако описанный метод МО ЛКАО справедлив и для систем с открытыми оболочками [2–5].

Волновые функции атомных орбиталей выбирают в виде произведения радиальной и угловой частей:

$$\chi_{nlm} = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi), \quad (36)$$

где $R_{nl}(r)$ — радиальная часть волновой функции; $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ — угловая часть; n — главное квантовое число; l — орбитальное квантовое число; m — магнитное квантовое число; (r, θ, φ) — сферические координаты. Функции $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ являются сферическими гармониками и имеют следующий вид [6]:

$$Y_{lm}(\theta, \varphi) = (-1)^{(m + \frac{|m|}{2})} \cdot \left[\left(\frac{2l+1}{4\pi} \right) \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!} \right]^{1/2} \times \\ \times P_l^{|m|}(\cos \theta) \cdot \exp(-im\varphi), \quad (37)$$

где $P_l^{|m|}(\cos \theta)$ — присоединенный полином Лежандра [7].

Радиальные части АО могут быть трех типов [5]:

1. Водородоподобные орбитали:

$$R_{nl}(r) = - \left[\frac{(n-l+1)!}{2n[(n+1)!]^3} \left(\frac{2Z}{n} \right)^3 \right]^{1/2} \times \\ \times \left(\frac{2Z}{n} \right)^l \cdot \exp\left(\frac{Zr}{n}\right) \cdot L_{n+1}^{2l+1}\left(\frac{2Zr}{n}\right), \quad (38)$$

где $L_{n+1}^{2l+1}\left(\frac{2Zr}{n}\right)$ — присоединенные полиномы Лагерра [7]; Z — заряд ядра атома.

2. Слейтеровские орбитали:

$$R_{nl}(r) = (2\xi)^{n+\frac{1}{2}} \cdot [(2n)!]^{-1/2} \cdot r^{n-1} \cdot \exp(-\xi r), \quad (39)$$

где ξ — слейтеровская экспонента: $\xi = (Z - \sigma)/n^*$, здесь n^* совпадает с n (для $n = 1, 2, 3$) и $n^* \neq n$ (для $n = 4, 5$), σ — постоянная экранирования.

3. Гауссовские функции:

$$R_{nl}(r) = \left[\frac{2^{2n}(n-1)!}{(2n-1)!} \left(\frac{(2\alpha)^{2n+1}}{\pi} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \cdot r^n \cdot \exp(-\alpha r^2), \quad (40)$$

которые существенно упрощают расчеты интегралов (31). Недостаток этих функций заключается в неправильной асимптотике вблизи ядра и при $r \rightarrow \infty$.

Расчет интегралов (31) проводится различными методами аналитического и численного интегрирования на современных ЭВМ (это так называемые *ab initio* методы, или неэмпирические). Для таких методов характерны большие затраты машинного времени и необходимы самые современные вычислительные машины, которые обладают высокой скоростью обработки информации. Даже после введения всех возможных упрощений в расчеты интегралов и сокращения используемого набора базисных АО неэмпирические расчеты, учитывающие все члены многоэлектронного гамильтониана, остаются все же сложными. Другой путь — это вычисление интегралов полуэмпирическим путем, который существенно сокращает машинное время. В этом случае интегралы параметризуются с использованием экспериментальных характеристик атомов или из результатов неэмпирических расчетов.

Модель молекулярного кластера

В настоящее время разработано множество различных методов исследования электронной структуры неидеальных твердых тел и кристаллитов [8, 9]. Для изучения электронной структуры идеального кристалла наиболее распространенными являются зонные подходы, в которых используется свойство периодичности кристаллической решетки [10]. Однако любые отклонения от модели идеального кристалла, такие, как поверхность, примеси, дефекты, рентгеновские и оптические возбуждения, неупорядоченность в системе, должны учитывать нарушение периодичности кристаллической решетки и делают недействительной основу зонной теории — теорему Блоха [10].

Всевозможные нарушения трансляционной симметрии реальных кристаллов приводят к необходимости отказаться от представлений о \mathbf{k} -пространстве. В этом случае используют представления, связанные с реальным пространством, и оперируют не с Фурье-образами волновых функций и потенциалов, а с характеристиками реальных атомов, их геометрическим расположением, рассмотрением химических связей между ними. Отсюда возникают альтернативные подходы к исследованию электронной структуры твердого тела, использующие расчетные квантово-химические процедуры теории молекул для описания электронного строения в реальных кристаллах [8, 10].

Отказ от трансляционной симметрии предполагает рассмотрение не всей совокупности атомов кристалла, а его малой части — кластера, образованного небольшой группой атомов, выделяемой из кристаллической решетки твердого тела. Такой подход к расчету электронной структуры твердых тел получил название *кластерного подхода* [8, 10].

При расчете электронной структуры кристаллов широко используются различные квазимолекулярные кластерные модели. В них делаются попытки получить основные характеристики электронно-энергетической структуры и распределение электронной плотности в кристалле, исходя из его небольшого фрагмента — молекулярного кластера (МК). Принципиальная возможность применения данных моделей для кристаллов обусловлена тем, что при расчете электронной структуры как молекул, так и кристаллов рассматривают систему электронов и ядер, взаимодействие которых между собой определяет ее свойства [10]. В кластерной модели фрагмент либо просто «вырывают» из кристалла и рассматривают как изолированную мо-

лекулу, либо на линии порванных связей помещают фиктивные атомы (псевдоатомы), стремясь учесть влияние кристаллохимического окружения граничных атомов кластера [8, 10].

Молекулярный кластер имеет более низкую симметрию, чем точечная симметрия кристалла. Поэтому применение молекулярных моделей в теории электронной структуры твердых тел должно быть обусловлено физической сущностью рассматриваемой задачи и целесообразно прежде всего при исследовании тех явлений в твердых телах, которые не поддаются описанию в рамках зонной теории. К таким явлениям относятся адсорбция и катализ, связанные с процессами на поверхности кристаллов и обусловленные наличием примесей или дефектов структуры (локальных центров) и др. В рамках квазимолекулярных моделей удастся описать многие локальные свойства твердых тел, такие, как распределение электронной плотности на атомах, характер межатомного взаимодействия [8, 10].

Выбор квазимолекулы оказывается достаточно сложной задачей, решение которой невозможно в отрыве от учета симметрии рассматриваемых систем. Поэтому обычно предполагается, что кластер, моделирующий кристалл, должен обладать точечной симметрией последнего [8, 10].

Один из наиболее упрощенных подходов — модель простого молекулярного кластера, который представляет собой кластер без граничных условий и является наиболее подходящим для ионных кристаллов. Это обусловлено тем, что из-за малой составляющей ковалентной связи в таких кластерах необходимо подавить только граничные эффекты, вызванные различиями электростатического потенциала внутри и на границе кластера, что обычно достигается за счет выбора формы и размеров кластера. Кроме того, эффекты на границе сведутся к минимуму, если кластер выбрать незаряженным [8, 10].

Выбор способа задания граничных условий, как правило, определяется рассчитываемой системой и поставленной задачей. Часто применяется методика граничных атомов, которыми насыщаются оборванные внешние валентные связи кластера. Для этого обычно используются одновалентные атомы, имеющие примерно ту же электроотрицательность, что и атомы кристалла. Подбор параметров для псевдоатомов проводится из следующих соображений [11, 12]: а) энергии молекулярных орбиталей (МО) кластера должны качественно правильно передавать характер энергетических зон кристалла; б) должно правильно передаваться соотношение между заряда-

ми на атомах, обусловленное стехиометрией кристалла; в) решение должно быть устойчиво при расширении кластера. Подобный подход приемлем, когда граничный атом кластера имеет одну разорванную связь. В случае если граничный атом имеет две и более разорванные связи, применение метода замыкания их псевдоатомами становится затруднительным.

Таким образом, в модели молекулярного кластера [12]: 1) задача расчета электронных состояний бесконечного твердого тела сводится к квазимолекулярной задаче; 2) кластерные подходы легко моделируют дефектные центры твердых тел и их поверхности; 3) рассматривая кластер как квазимолекулу, принципиально возможно учесть электростатическое взаимодействие выделенного фрагмента (кластера) с его кристаллическим окружением.

Однако кластерные молекулярные модели обладают также рядом недостатков [12]:

- 1) в выделенном из твердого тела кластере существуют оборванные связи (нескомпенсированные валентности), что создает неэквивалентность идентичных атомов внутри и на границе кластера;
- 2) в энергетическом спектре кластера из-за существования границы возникают поверхностные состояния, локализованные в запрещенной зоне, не присущие объемной фазе твердого тела и не имеющие физического смысла;
- 3) при насыщении нескомпенсированных валентностей необходимым числом электронов кластер оказывается сильно заряженным, что приводит к искажению распределения электронной плотности;
- 4) применение кластерной модели для совершенного кристалла связано с принципиальными трудностями, обусловленными различием симметрии кристалла и кластера. Это затрудняет использование данного подхода в задачах, в которых существенное значение имеет симметрия выделенного центра и ближний порядок.

На основе анализа различных квазимолекулярных моделей и имеющегося расчетного материала, полученного с применением различных подходов, можно сформулировать ряд требований к кластерным моделям твердых тел [13]:

- 1) кластер должен правильно передавать стехиометрию моделируемого кристалла; атомы, эквивалентные между собой в кри-

сталле, должны оставаться эквивалентными между собой и в кластере, независимо от того, находятся они «внутри» или на границе кластера;

- 2) кластер, моделирующий «объем» твердого тела, должен быть незаряженным, отражая факт электронейтральности кристалла, и правильно передавать распределение электронной плотности в кристалле;
- 3) кластер, вообще говоря, должен воспроизводить точечную симметрию кристалла;
- 4) уровни энергии МО кластера должны правильно отражать зонную структуру кристалла;
- 5) необходимо, чтобы расчетные схемы, применяемые в теории молекул, без каких-либо существенных видоизменений (в особенности без дополнительной специальной подгонки параметров) были применимы для расчета кластера;
- 6) модель должна быть пригодна для возможно большего числа типов кристаллических структур; должна осуществляться легкость перехода от моделирования «объема» кристалла к моделированию «активного центра» поверхности;
- 7) для энергетических характеристик кластера должен существовать метод оценки погрешностей, обусловленных «вырыванием» его из кристалла; при расширении кластера необходима достаточно быстрая сходимость результатов расчета к результату, качественно правильно отражающему изучаемые характеристики твердого тела; получаемые таким путем оптимальные размеры кластера не должны быть слишком велики, чтобы не возникало вычислительных трудностей из-за большого базиса.

Молекулярная модель процесса взаимодействия пылевых частиц с атомом водорода

Проведено исследование энергетических характеристик процесса адсорбции атома водорода на активном центре поверхности пылевой частицы в рамках модели молекулярного кластера с применением неэмпирических и полуэмпирических методов квантовой химии. В качестве модели пылевой частицы рассмотрен микроскопический кристалл оксида кремния SiO_2 . Для моделирования взаимодействия

Таблица 1. Электронные и геометрические характеристики модели поверхности с адсорбированным атомом водорода — кластера $\text{O}[\text{Si}(\text{OH})_2]_2\ldots\text{H}$

	$E_{\text{ВЗМО}},$ эВ	$E_{\text{НЗМО}},$ эВ	$E_g,$ МКМ	$\Delta E_g,$ МКМ	q(Si)	q(H)	R(Si-H), Å	$E_{\text{ads}},$ эВ
STO-3G	-9.26	11.46	0.106	—	1.21	-0.17	1.42	-4.73
MNDO	-12.17	1.59	0.213	-0.055	1.61	-0.25	1.39	-3.76
PM3	-9.66	1.63	0.257	-0.081	1.06	-0.10	1.52	-3.11
AM1	-11.59	1.40	0.231	-0.108	1.61	-0.27	1.45	-3.02

атома водорода с частицей рассмотрен фрагмент (кластер) поверхности оксида кремния вида $\text{O}[\text{Si}(\text{OH})_2]_2$ (рис. 2).

Полуэмпирическими методами MNDO, PM3, AM1 и неэмпирическим методом Хартри—Фока в базисе STO-3G рассчитаны энергии верхней занятой ($E_{\text{ВЗМО}}$) и нижней вакантной ($E_{\text{НЗМО}}$) молекулярных орбиталей, ширина запрещенной зоны кластера (E_g) и ее изменение в результате адсорбции атома водорода (ΔE_g), заряды на атомах H и Si, длина адсорбционной связи (R(Si-H)) и энергия адсорбции (E_{ads}) кластера $\text{O}[\text{Si}(\text{OH})_2]_2\ldots\text{H}$. Полученные результаты представлены в табл. 1. Ширина запрещенной зоны рассчитана как первая линия УФ-спектра электронов кластера, энергия адсорбции — как разница полной энергии кластера $\text{O}[\text{Si}(\text{OH})_2]_2\ldots\text{H}$ (рис. 1, б) и исходных частиц: кластера $\text{O}[\text{Si}(\text{OH})_2]_2$ (рис. 1, а) и атома водорода.

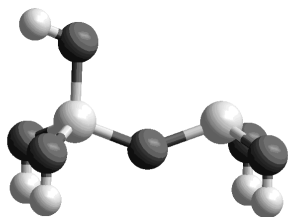


Рис. 1. а

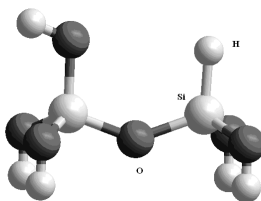


Рис. 1. б

Таблица 2. Колебательные частоты (см^{-1}) и интенсивности (отн. ед.) для длины адсорбционной связи R(Si-H), рассчитанные полуэмпирическими и неэмпирическими методами

	STO-3G	MNDO	PM3	AM1
$\nu_{\text{vib}}, \text{см}^{-1}$	2 862.16	2 490.08	2 422.05	2 445.50
I	1.2	6.9	3.9	3.0

Как и следовало ожидать, результаты зависят от выбора метода расчета. Критерием достоверности получаемых теоретических квантово-химических результатов может служить совпадение с экспериментом отдельных энергетических и геометрических характеристик изучаемой структуры. В качестве экспериментальных величин, с которыми сравниваются прогнозируемые параметры частиц МЗС, могут выступать спектральные характеристики объектов.

Например, расчет молекулы водорода указанными методами свидетельствует, что наиболее близкое к экспериментальному значению длины Н-Н связи (0.65 \AA) дает полуэмпирический метод MNDO (0.66 \AA) и несколько худшее значение — метод AM1 (0.68 \AA). Наилучшее согласие с частотой водородной линии 21 см^{-1} показывают методы STO-3G (20.5), AM1 (20.3) и MNDO (19.1).

Результаты исследования колебательных частот ИК-диапазона, относящихся к адсорбированному на поверхности частицы МЗС атому водорода, представлены в табл. 2. Как следует из таблицы, частоты колебаний адсорбционной связи R(Si-H) лежат в диапазоне $2\,400 \div 2\,800 \text{ см}^{-1}$ и дают дополнительную линию в спектре ИК-излучения, поэтому могут быть определены экспериментально. Интенсивности валентных колебаний, конечно, относительно малы по сравнению со спектром самой частицы МЗС. Однако сами частицы имеют микроскопический размер, поэтому концентрация атомарного водорода на их поверхности может быть значительной для наблюдения данной линии спектра.

Заключение

Резюмируя представленный здесь материал, хотелось бы отметить, что использование современных методов квантовой химии позволит прогнозировать спектральные характеристики частиц МЗС и определить механизмы химических процессов, протекающих в МЗС.

Список литературы

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. — М.: Наука, 1974. — Т. 3 Теоретическая физика.
2. Слэтер Д. Электронная структура молекул. — М.: Мир, 1965.
3. Заградник Р., Полак Р. Основы квантовой химии. — М.: Мир, 1979.
4. Hartquist T. W., Nejad L. A. M., Williams D. A. The Chemistry in Low Mass Star Formation // Dust and Chemistry in Astronomy. — 1993. — P. 205.
5. Хартри Д. Расчеты атомных структур. — М.: ИЛ, 1960.
6. Blake G. A. High angular resolution observations of the gas phase composition of young stellar objects // IAU Symposium / Ed. by E. F. van Dishoeck. — 1997. — Vol. 178. — P. 31–44.
7. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. — М.: Наука, 1979.
8. Абаренков И. В., Батцев В. Ф., Тулуб А. В. Начала квантовой химии. — М.: Высш. шк., 1989.
9. Степанов Н. Ф. Квантовая механика и квантовая химия. — М.: Мир, 2001.
10. Эварестов Р. А. Квантовохимические методы в теории твердого тела. — Ленинград: ЛГУ, 1982.
11. Эварестов Р. А., Котомин Е. А., Ермошкин А. Н. Молекулярные модели точечных дефектов в широкощелевых твердых телах. — Рига: Зинатне, 1983.
12. Закис Ю. Р., Канторович Л. Н., Котомин Е. А. и др. Модели процессов в широкощелевых твердых телах с дефектами. — Рига: Зинатне, 1991.
13. Литинский А. О. — Квазимолекулярные модели хемосорбции и поверхностных структур: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук / МГУ. — Москва, 1987.

МАЛЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ-РОБОТЫ И СОВРЕМЕННАЯ АСТРОФИЗИКА

Введение

В прошлом астрономы классической школы не воспринимали всерьез сообщения о вспышках, появляющихся на небе на несколько секунд. В любом случае такие наблюдения нельзя было подтвердить фотопластинками, которые на создание изображения использовали всего лишь около одного процента собранного телескопами света. Остальной свет пропадал зря, никак не воздействуя на фотоэмульсию, и поэтому, чтобы «вытянуть» слабые объекты, применялись экспозиции длительностью десятки минут, а иногда и несколько часов. Транзиенты исчезали с таких снимков, как люди и машины с городских фотографий, сделанных камерой-обскура.

Революция началась в 1990-х гг. с приходом в астрономию больших ПЗС-матриц, мощных процессоров и сетей передачи данных. Вместе они позволили открывать и изучать явления в новом временном масштабе, который прежде ускользал от наблюдения. И тогда выяснилось, что в небе кипит бурная жизнь. Здесь сотнями взрываются сверхновые, далекие планеты затмевают свои звезды, носятся десятки тысяч астероидов, темные гравитационные линзы фокусируют на Земле свет далеких звезд, и происходит еще много интересного и непонятного. Но, чтобы все это увидеть, нужны очень чувствительные и внимательные «глаза» с максимально широким полем зрения.

В погоне за вспышкой

26 сентября 2006 г. космический гамма-телескоп SWIFT зарегистрировал чрезвычайно далекую вспышку жесткого излучения. Через несколько секунд в центре обработки данных NASA получили и обработали сигнал. Приблизительные координаты источника появились на сайте и были разосланы во все заинтересованные организации мира. Сотрудники Лаборатории релятивистской астрофизики

Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга (ГАИШ) в Москве получили сообщение среди ночи по СМС. И одновременно по мобильному Интернету (кабель был в течение всего года поврежден) извещение поступило в подмосковную деревню, где расположен робот-телескоп МАСТЕР. Он немедленно прервал текущую программу наблюдений и стал наводиться в точку с указанными координатами. Еще несколько лет назад такая оперативность в астрономических наблюдениях была просто немыслимой.

Прошло всего 76 с, а робот-телескоп уже начал первую из серии 30-секундных экспозиций, на которых видно, как постепенно гаснет едва различимое пятнышко — оптическое излучение колоссально-го взрыва на краю Вселенной, в 11 млрд световых лет от Земли. Через несколько минут свечению предстояло исчезнуть, во всяком случае, так всегда бывало раньше. Но вместо этого на пятой минуте оно стало разгораться снова и, достигнув максимума на десятой минуте, окончательно угасло только через час [1]. Незначительная, казалось бы, аномалия заставила астрофизиков ГАИШ несколько месяцев ломать голову. В конце концов объяснить странную вспышку удалось, только предположив, что на месте взрыва образовалась вращающаяся черная дыра [2]. Если эта гипотеза получит поддержку научного сообщества (а вскоре была зарегистрирована еще одна подобная вспышка), можно будет говорить о совершенно новом способе подтверждения существования черных дыр. Но все это было бы невозможно, если бы не поразительная слаженность работы наблюдательной техники. Только благодаря телескопам-роботам мы можем сегодня изучать столь быстротечные небесные явления, которые на профессиональном жаргоне называют транзиентами.

Затяжной прыжок в черную дыру

Известно, что при коллапсе массивной звезды образуется черная дыра — сферическая область пространства-времени, окруженная горизонтом событий, из-под которого ничто не может выйти наружу. Но если исходная звезда вращалась, возникшая черная дыра устроена сложнее: горизонт у нее поменьше, зато его, подобно белку вокруг яичного желтка, окружает особая область — эргосфера, в которой само пространство вращается и увлекает за собой любые объекты. Остановиться здесь нельзя никакими силами, но вот выбраться при некотором везении возможно. Если скорость вращения коллапсирующей звезды очень велика, вещество не может сразу уй-



Рис. 1. Оптическая вспышка на месте гамма-всплеска 26 сентября 2006 г. была зарегистрирована на пределе чувствительности телескопа МАСТЕР. После начального спада на 400-й секунде блеск стал нарастать, по-видимому, за счет излучения вещества, находящегося в эргосфере только что образовавшейся черной дыры

ти под горизонт и «зависает» в эргосфере, пока не потеряет из-за газодинамического трения лишнюю энергию. При этом оно разогревается до чудовищной температуры и интенсивно излучает. Именно этим астрофизики ГАИШ объясняют редкие случаи затянувшегося оптического свечения гамма-всплесков. В январе 2007 г. было зарегистрировано еще одно такое событие, где коллапсирующее вещество получило «отсрочку приговора» на целых пять часов. Излучение в это время приходит к нам из области, которая по размерам даже меньше обычного гравитационного радиуса (горизонт у вращающейся черной дыры меньше, чем у обычной). Из-за огромного гравитационного поля время здесь замедляется в 10–15 раз. Нигде больше во Вселенной мы не наблюдаем процессов, происходящих в условиях столь сильно выраженных эффектов общей теории относительности.

Наблюдательные «малыши»

Приемником излучения нового поколения стали полупроводниковые ПЗС-матрицы — приборы с зарядовой связью, или, как иногда более удачно расшифровывают эту аббревиатуру, пропорциональные зарядовые счетчики. В каждой из миллионов ячеек на поверхности ПЗС-матрицы под действием света накапливается заряд, пропорциональный количеству попавшего в эту ячейку излучения. Хорошая матрица регистрирует до 90 % собранного телескопом света — почти на два порядка больше, чем фотопластинка. Соответственно и экспозицию можно сократить в десятки раз.

Телескоп МАСТЕР [3], который зарегистрировал описанную в начале удивительную вспышку, имеет диаметр всего 35 см — у иных любителей астрономии есть инструменты покрупнее, но на нем установлена вполне профессиональная охлаждаемая с помощью элементов Пельтье 16-мегапиксельная ПЗС-матрица. Объекты до 19-й звездной величины она регистрирует всего за 30–45 с. (Невооруженным глазом видны звезды до шестой величины — 6^m . Каждые следующие пять звездных величин соответствуют ослаблению блеска в 100 раз.) Еще полминуты уходит на загрузку изображения в память компьютера. За ночь МАСТЕР делает сотни снимков, каждый из которых покрывает поле 2.4×2.4 градуса и «весит» около 60 мегабайт.

Но для того чтобы робот «увидел» интересный новый объект, мало того, что он будет в кадре, надо еще найти его на снимке и определить координаты. Первоначально предполагалось, что можно просто вычесть два снимка, сделанных в разное время, чтобы автоматически выявить новые и исчезнувшие объекты. Но это не сработало: слишком велики оказались различия между кадрами. На изображение влияют температура, состояние атмосферы, переменность звезд, шумы и неоднородности матрицы, наконец, то, как та или иная звезда легла на сетку пикселей ПЗС.

Пришлось заниматься поштучным распознаванием всех видимых на снимке звезд, а их обычно бывает 10–15 тысяч. Тут-то и понадобился мощный процессор с большим объемом памяти, куда для быстроты обработки загружаются данные всех доступных каталогов звезд и галактик. Первым делом программа определяет блеск и взаимное расположение всех звезд на снимке, а затем начинает искать по каталогу участок неба, где известные звезды образуют такую же конфигурацию. Чем больше звезд, тем труднее задача. Вблизи Млеч-

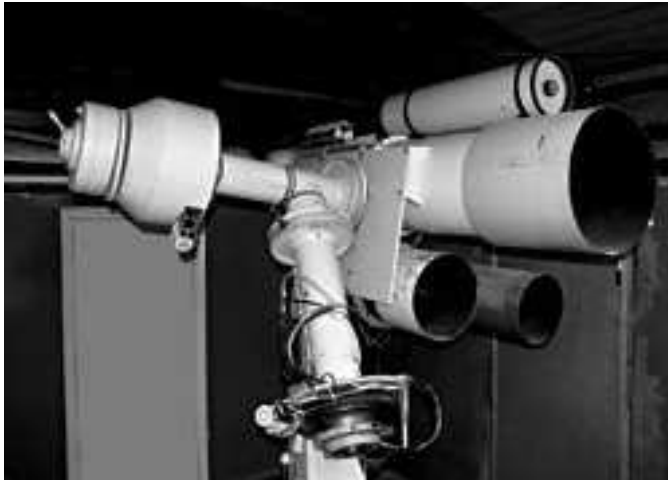


Рис. 2. У робота-телескопа МАСТЕР четыре трубы: основная (35 см) регистрирует звезды до $19-20^m$, остальные параллельно ведут съемку с различными фильтрами, но могут уловить только яркие объекты

ного Пути в кадр попадает более ста тысяч звезд, и такие участки приходится пока обходить — их просто не успеть обработать за те 1.5 мин, пока телескоп делает следующий снимок.

Когда звезды распознаны, среди них непременно обнаруживаются сотни объектов, которые не удастся отождествить по каталогу. Часть из них оказывается астероидами — это тоже проверяется по базе данных, в которой зарегистрировано около 160 000 малых планет. Оставшиеся «лишние» точки — это по большей части не новые объекты, а дефекты изображения. Привлекать к ним внимание астрономов еще рано. Робот должен снова сфотографировать ту же область неба, и только сохранившиеся на повторном кадре «неопознанные объекты» могут считаться реально существующими на небе.

Сетчатка есть, хрусталик не нужен

ПЗС-матрица — это плоский кремниевый кристалл, поверхность которого разбита на миллионы мельчайших клеточек. Каждая из них — ловушка для электронов, выбиваемых светом из кристал-

ла. Вертикальные линейки сетки образованы внедренной в кристалл примесью, которая препятствует поперечному дрейфу электронов. А от продольных смещений их удерживает электрическое поле тонких горизонтальных электродов из прозрачного поликристаллического кремния, нанесенных на поверхность матрицы. Они создают множество потенциальных ям, в которых накапливаются электроны. После экспозиции напряжение на электродах начинает волнообразно меняться, смещая накопленные заряды к краю матрицы, где их величина строчка за строчкой измеряется и заносится в память. При избытке света некоторые электронные ловушки переполняются и заряд перетекает в соседние. Этот эффект называется блюмингом. Для борьбы с ним на ПЗС могут быть предусмотрены специальные «сточные канавы», но это снижает разрешение и чувствительность матрицы. Из-за тепловых флуктуаций электроны могут появляться в ловушках и без воздействия света. Для снижения этого шума матрицу охлаждают на десятки и даже сотни градусов. Наблюдениям мешают и сами управляющие электроды — они поглощают синий свет и ультрафиолет. С этим справляются, сошлифовав кремниевый кристалл до толщины 10–20 мкм и нанеся электроды с тыльной стороны. Стоимость таких астрономических матриц, понятное дело, тоже астрономическая.

Звездный мартиролог

Таким «неопознанным объектом» может, например, оказаться вспышка сверхновой — колоссальный взрыв, отмечающий гибель массивной звезды. На десятки дней она сравнивается по светимости с галактикой, содержащей сотни миллиардов обычных звезд. Так что, если рядом с туманным пятнышком далекой галактики появилась неподвижная светлая точка, которой тут раньше не было, скорее всего, это сверхновая.

Но окончательное решение может принять только человек. Телескоп МАСТЕР после хорошей ночи наблюдений выдает около сотни кандидатов в сверхновые (первое время, пока параметры поиска еще не были толком отрегулированы, их бывало больше тысячи). Утром сотрудники ГАИШ, а иногда и студенты проверяют список, сравнивая «подозрительные» снимки галактик с их изображениями из классических обзоров неба — Паломарского и Слоуновского, а также с прошлыми снимками самого МАСТЕРа. Абсолютное большинство кандидатов при этом отпадает. В августе, когда студенты

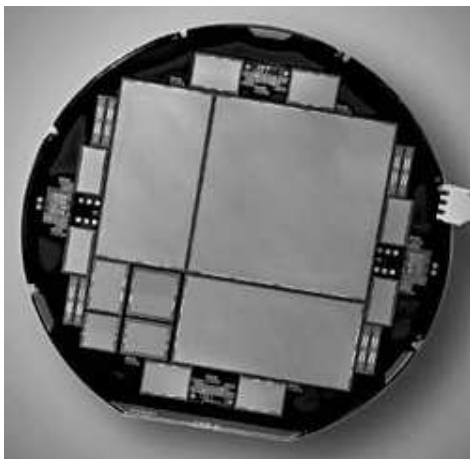


Рис. 3. Современная астрономическая ПЗС-матрица. Небольшие сегменты используются для гидирования телескопа (отслеживания движения неба). На крупных инструментах они управляют еще и адаптивной оптикой

на каникулах, а сотрудники в отпусках, бывает, что проверка затягивается — некому открыть сверхновую! А между тем конкуренты не дремлют. Бюро астрономических телеграмм постоянно публикует информацию об открытых сверхновых. Обидно, когда в списке непроверенных еще кандидатов загорается пометка: эта сверхновая уже открыта кем-то другим.

В крупной галактике вроде нашей или туманности Андромеды сверхновые вспыхивают примерно раз в сотню лет. Чтобы добиться успеха, надо внимательно следить за тысячами галактик. В XX в. сверхновые искали «вручную». Сначала они вообще были побочным результатом других наблюдений — свежие снимки галактик на всякий случай сравнивали со старыми и иногда находили сверхновые. Темп открытий составлял всего десяток-другой вспышек в год, но уже это позволило заметно уточнить теорию эволюции звезд. Потом сверхновые стали искать целенаправленно. Подключились к работе и астрономы-любители.

В первой половине 1990-х американский астрофизик Карл Пеннипакер (Carl Pennypacker) даже организовал образовательный проект Hands-on Universe («Ручная Вселенная») с целью привлечь

школьников к поиску сверхновых на многочисленных снимках галактик с разных телескопов, и в 1994 г. была открыта первая «школьная сверхновая». Общими усилиями поток зарегистрированных звездных некрологов вырос до нескольких десятков в год, а в 1997 г. перевалил за сотню. В 1998 г. группа под руководством Сола Перлмуттера (Saul Perlmutter) из Калифорнийского университета в Беркли, в которую входил и Пеннипакер, на основе наблюдений далеких сверхновых показала, что наша Вселенная в последние несколько миллиардов лет расширяется не с замедлением, как следовало из общепринятых космологических теорий, а ускоренно. Причина этого ускорения получила название «темной энергии», но ее природа пока остается непонятной. Ясно только, что для уточнения ее параметров нужно собрать как можно больше данных по далеким, а значит слабым, сверхновым.

И вот на рубеже веков за дело взялись роботы. В проекте КАИТ, стартовавшем в 1998 г., телескоп с зеркалом 76 см в методично, по программе «ходит» по известным ярким галактикам. Статистика открытий: одна сверхновая на 7 000 наблюдавшихся галактик. В 2002 г. КАИТ вышел на крейсерскую скорость — 80—90 сверхновых в год. Но такой метод поиска приводит к искажению статистики: сверхновые ищут «под фонарем» — там, где шансы найти выше. Небольшие или далекие и потому малозаметные галактики, которых гораздо больше, чем крупных, оставались без внимания. А для космологических задач важно, чтобы данные были однородными. В идеале надо обнаруживать все доступные наблюдениям вспышки, которых ежегодно происходит несколько тысяч.

Шаг в этом направлении был сделан в проекте «Фабрика близких сверхновых» (Nearby Supernova Factory). Здесь решили не строить специальный робот-телескоп, а просто по-своему обработать данные, идущие с уже имеющихся широкоугольных камер NASA, которые действуют по программе поиска астероидов, сближающихся с Землей. (Кстати, во многом благодаря этой программе число открытых астероидов уже перевалило за 160 000.) Каждую ночь камеры поставляют для анализа 50 гигабайт данных и, надо сказать, не зря. В 2005 г. было открыто 15 сверхновых, в 2006-м — 67, а в этом году уже к сентябрю «Фабрика» выдала на-гора 131 взорвавшуюся звезду. Всего же в мире за 2006 г. открыли 551 сверхновую.

Микролинзирование на звезде с планетами

По эффекту гравитационного микролинзирования можно приближенно определить некоторые параметры линзы. Например, ширина пика пропорциональна корню квадратному из ее массы. Конечно, есть еще зависимость от скорости и направления движения, но при большом числе событий можно определить усредненную массу линз. Линза звездной массы действует примерно в течение месяца, а планетной — несколько часов. Приведенная кривая — гравитационный автограф звезды с двумя небольшими планетами.

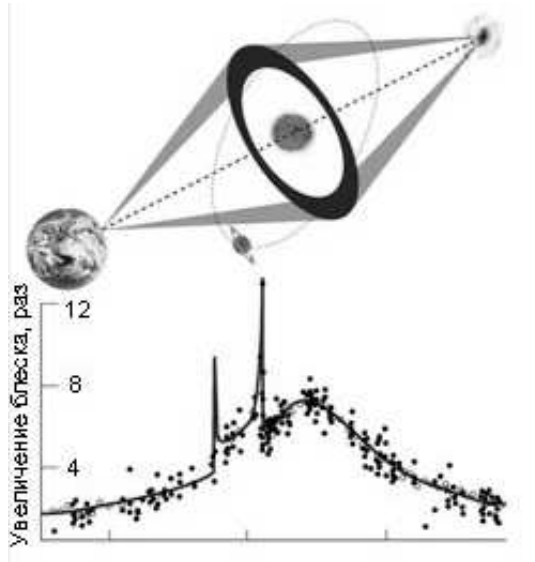


Рис. 4. Первая экзопланета была открыта методом микролинзирования 21 июля 2003 г. в эксперименте OGLE. Плавный «горб» на кривой блеска далекой звезды в ядре Галактики вызван звездой-линзой, а короткие сильные всплески на нем — планетой, примерно в 1.5 раза массивнее Юпитера

Гравитационные линзы и далекие земли

Если темную энергию изучают по сверхновым, которые видны за миллиарды световых лет, то темную материю приходится изучать по объектам совершенно невидимым. Характер движения звезд

вокруг центра нашей Галактики еще много лет назад показал, что масса вещества в ней должна быть значительно больше, чем мы видим, наблюдая светящиеся звезды и туманности. Какое-то невидимое вещество притягивает звезды, заставляя их быстрее обращаться вокруг галактического центра. Согласно одной из гипотез эта темная материя могла бы состоять из массивных несветящихся объектов — одиноких черных дыр, тусклых белых и коричневых карликов, отбившихся от звезд планет. Непосредственно увидеть их практически невозможно. Однако американский астрофизик польского происхождения Богдан Пачинский (Bogdan Paczynski) предложил неожиданно простой способ проверки этой гипотезы. По теории относительности любая масса немного искривляет проходящие рядом с ним световые лучи, а значит, каждый темный компактный объект — это летящая в космосе линза, которая, проходя в точности между нами и далекой звездой, будет фокусировать и усиливать ее излучение. Этот эффект называют гравитационным микролинзированием (в отличие от обычного гравитационного линзирования, когда свет идет от квазара, а линзой служит находящаяся на пути галактика). Вероятность такого события очень невелика, но если следить сразу за миллионами звезд, гравитационные линзы должны себя проявить. Чтобы повысить шансы, Пачинский предложил наблюдать район центра нашей Галактики, а также Магеллановы Облака, где концентрация звезд очень велика.

Проект OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), начавшийся в 1992 г., успешно продолжается и сейчас. В центре Галактики регулярно отслеживается 130 млн звезд, в Магеллановых Облаках — 33 млн. Конечно же, все этапы этих наблюдений полностью автоматизированы. Телескоп установлен в обсерватории Лас-Кампанас (Чили) и работает без участия человека. Лишь раз в неделю заходит сотрудник сменить ленту для записи данных и на всякий случай перезагрузить компьютер. Ежегодно здесь регистрируется более 500 событий микролинзирования. Причем среди них найдено несколько таких, когда рядом с объектом звездной массы явно находилась небольшая планета — всего в несколько раз тяжелее Земли.

Этот смелый эксперимент позволил открыть новое астрономическое явление с помощью очень скромного оборудования. Правда, в итоге выяснилось, что обнаруженных невидимых объектов недостаточно, чтобы списать на них темную материю. Но это как раз тот случай, когда принято говорить: отрицательный результат тоже результат.

Открытие экзопланет

В настоящее время первый российский телескоп-робот МАСТЕР обучается открывать другие планетные системы.

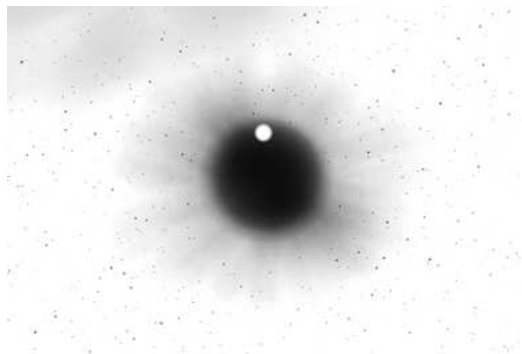


Рис. 5. Прохождение экзопланеты по диску звезды

Идея поиска планетных систем фотометрическим методом (то есть измерением блеска звезды) была предложена А. В. Тутуковым. Собственно, сама идея очень проста: надо как можно чаще измерять блеск произвольной звезды, и если вокруг этой звезды вращается планета — можно поймать ее в тот момент, когда она окажется между звездой и вами. При этом блеск звезды слегка упадет на величину, определяемую размером планеты.

Казалось бы, чего проще? Но, во-первых, еще 20 лет назад было непонятно, какова вероятность такого события (она определяется числом планетных систем, ориентацией орбит и т. д.), а во-вторых, сам эффект очень мал. Например, если предположить, что другие планетные системы похожи на нашу, в которой Юпитер (самый большой экран) вращается с периодом в два десятка лет, то поиск можно было и не начинать.

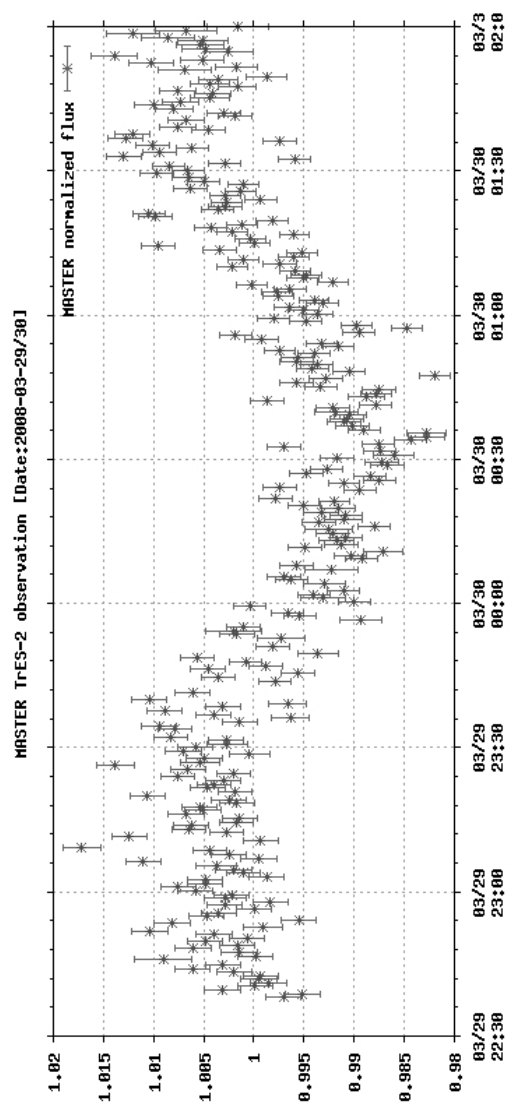


Рис. 6. Падение блеска звезды при покрытии ее далекой планетой TrES2.
Эффект порядка 1.6 %

Однако Александр Тутуков настаивал на том, что метод будет работать. Сказалась прекрасная астрофизическая интуиция ученого.

К счастью (или наоборот), оказалось, экзопланеты (так называют «не наши» планеты) типа Юпитера совсем не похожи на наш Юпитер. Они обращаются с периодом в дни, то есть расположены гораздо ближе к своей звезде, чем Юпитер к Солнцу.

Сейчас методом «прохождения» уже открыто несколько десятков таких планетных систем. При этом используются телескопы-роботы диаметром 10 см! Мы — группа МАСТЕР — решили тоже открыть экзопланету. Но для этого надо сначала отнаблюдать уже известную и соответственно отладить «софт» обработки изображений. Недавно мы провели наблюдение прохождения планеты *Tres2* и получили очень обнадеживающий результат, представленный на рис. 6.

Вселенская деревня

Наиболее ярко роботы проявили себя в деле изучения гамма-всплесков, где требуется мгновенная реакция на регистрируемые события. Первый такой роботизированный телескоп ROTSE-I построил Карл Акерлоф (Carl Akerlof) в Национальной лаборатории Лос-Аламос (штат Нью-Мексико). Инструмент состоял из четырех оптических труб диаметром всего 11 см. Он заработал в 1997 г. и отзывался на сигналы орбитальных гамма-обсерваторий COMPTON и HETE.

Гамма-всплески были открыты в конце 1960-х гг. американскими спутниками, следившими за ядерными испытаниями. Наряду со взрывами на Земле они стали регистрировать короткие импульсы жесткого излучения из космоса. Тридцать лет оставалось непонятным, что их порождает и даже на каком расстоянии от Земли они случаются, а все потому, что никак не удавалось получить о них никакой дополнительной информации. За те десятки секунд, в течение которых длится типичный гамма-всплеск, другие инструменты просто не успевали на него отреагировать. К тому же гамма-телескоп определяет координаты источника с низкой точностью, так что после вспышки искать источник по координатам бесполезно. Нужно действовать молниеносно и попробовать поймать источник в оптике, пока он не угас.

Только в 1997 г. было зарегистрировано так называемое послесвечение гамма-всплеска — излучение газа, окружающего место космической катастрофы. Но увидеть в оптике, как развивается сам

взрыв, удалось только в 1999 г. 23 января ROTSE-I навелся на источник всего через 22 с после его регистрации гамма-телескопом, повезло, что инструмент сразу смотрел почти в нужную сторону. Тогда вспышку застали еще на «подъеме». На первом кадре источник имел звездную величину 12^m , а в максимуме блеска — примерно через две минуты — стал ярче 9^m . Именно эти наблюдения позволили окончательно убедиться в том, что гамма-всплески происходят на космологических расстояниях в миллиарды световых лет, буквально на краю наблюдаемой Вселенной, там, где ее возраст составляет всего 20 % от современного.

Вспышка, зарегистрированная тогда ROTSE-I, лишь немного не дотягивала до видимости невооруженным глазом, и при этом гамма-всплеск был не самым ярким. Значит, природа наделила наш разум такими органами чувств, что их как раз хватает увидеть границы дома, в котором мы живем. В отличие от города, в деревне вам видна околица. И наша Вселенная, подобно деревне, простреливается одним взглядом.

После нескольких лет успешной работы компьютер, который управлял телескопом ROTSE-I, был взломан хакерами, и в ответ служба безопасности Лос-Аламоса — это как-никак центр ядерных исследований — потребовала немедленно вывести эксперимент с их территории. Телескоп перебазировали в Чили, где он теперь методично строит кривые блеска переменных звезд. Хотя поля зрения и быстродействия ROTSE-I достаточно для того, чтобы дважды за ночь отснять все видимое небо, его программное обеспечение не позволяет вести самостоятельный поиск транзиентов — не написаны соответствующие программы. Это, кстати, довольно распространенная проблема — труд программистов дорог, а телескопы-роботы, напротив, весьма скромные в финансовом плане инструменты. ROTSE-I, к примеру, обошелся всего в 200 000 долларов, большая часть из которых пошла на приобретение ПЗС-матриц. Содержать в течение пары лет команду квалифицированных программистов-разработчиков обошлось бы дороже.

Между тем именно софт (программное обеспечение) является ключевым элементом, отличающим полноценный робот-телескоп от обычного автоматизированного инструмента, складывающего снимки в архив для последующей ручной обработки. Программы, управляющие телескопом МАСТЕР, например, сами по сигналам погодных датчиков открывают крышу обсерватории и начинают наблюдения. Получив сообщение о гамма-всплеске, робот не только делает

снимки, но и сам ищет новый объект, а найдя, уточняет координаты и автоматически отправляет сообщение в Бюро астрономических телеграмм. Это позволяет быстро подключить к работе других наблюдателей.

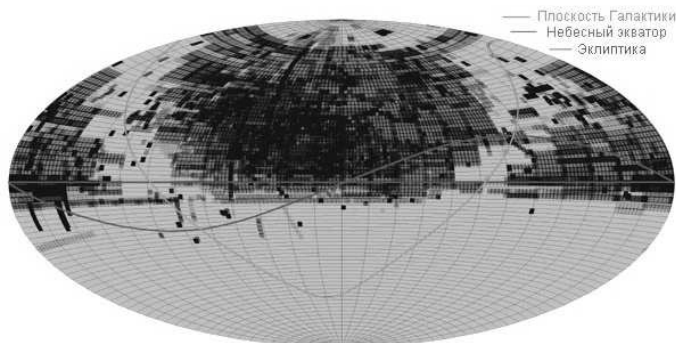


Рис. 7. Плотность покрытия неба снимками телескопа МАСТЕР за три года. Неохваченная (темная) полоса — Млечный Путь, где снимки трудно анализировать

Новые горизонты

Но один телескоп-робот, даже если он безупречно запрограммирован, не может решить задачу полного мониторинга всего неба. Для этого нужна сеть телескопов на разных широтах и долготах, которые вместе смогут целиком охватить «взглядом» все ночное небо и обеспечить независимость от капризов погоды. Первая такая сеть создана под руководством все того же Карла Акерлофа и состоит из четырех телескопов-роботов ROTSE-III, расположенных в Техасе, Австралии, Намибии и Турции. Это уже довольно серьезные инструменты диаметром 45 см с полем зрения 1.85×1.85 градуса. Их основная задача — по-прежнему реакция на гамма-всплески, но в остальное время они ведут патрулирование неба. Вот только получаемые снимки подвергаются лишь первичной обработке — определяются координаты и звездные величины видимых на снимке объектов, но не распознается, что нового появилось на небе. Все данные выкладываются в Интернет и доступны для дальнейшей обработки другим научным группам.

Напротив, команда телескопа МАСТЕР разработала софт, который в реальном времени выделяет на сделанных снимках сверхновые, астероиды и гамма-всплески. Но до последнего времени она располагала лишь одним небольшим инструментом диаметром 35 см, который к тому же расположен в зоне довольно посредственного астроклимата (под Москвой). И даже этот телескоп построен фактически на частные пожертвования фирмы «Очкарик», поскольку государственного финансирования таких исследований в России не было.

А между тем создание сетей телескопов-роботов могло бы стать очень выигрышным ходом для российской астрономической науки. После постройки в 1975 г. знаменитого 6-метрового телескопа БТА на Северном Кавказе в нашей стране перестали создаваться новые крупные оптические инструменты. Астрономы Америки и Европы уже всю работу на инструментах диаметром 8–10 метров и проектируют 20–40-метровые машины. Вряд ли нам их удастся скоро догнать. Но как раз сейчас массу важных результатов можно получить с помощью удивительно скромных инструментов размером не больше полуметра. Добавьте к этому огромную российскую территорию, и станет ясно, что нынешний момент может стать отличным стартом одной из самых перспективных программ российских астрономов, если только вовремя развернуть сеть телескопов-роботов по всей стране, а по возможности и за рубежом. Причем имеющиеся наработки по распознаванию новых объектов могут дать такой сети качественное преимущество по сравнению с коллегами-конкурентами. Ведь фактически вместо того, чтобы для каждого типа транзиентов создавать отдельный проект со своими инструментами, можно сделать универсальную мониторинговую сеть, которая будет работать сразу по всем направлениям.

В идеале они должны дополняться быстродействующей системой на основе очень маленьких телескопов с большим полем зрения, которые служат для выявления ярких транзиентов — до 13–14^м. Примерно такими характеристиками обладает ROTSE-I. Аналогичная установка есть и на Кисловодской станции ГАИШ, где установлен крошечный телескоп диаметром всего 70 мм, оснащенный охлаждаемой 11-мегапиксельной ПЗС-матрицей. Всего за 5 с он регистрирует все звезды до 12–13-й величины на площади 420 квадратных градусов. Полусотни таких снимков достаточно, чтобы покрыть все видимое из этой точки ночное небо.

Мастер-сеть

В 2008 г. наконец начал прорисовываться прообраз будущей российской сети телескопов-роботов МАСТЕР. Усилиями двух университетов — Уральского и Московского им. М. В. Ломоносова — на Урале (Коуровская обсерватория) и под Кисловодском (Высокогорная обсерватория ГАИШ МГУ) установлены телескопы-роботы МАСТЕР II. МАСТЕР II представляет собой две светосильные трубы диаметром 40 см и фокусом 1 м. Телескопы устанавливаются симметрично на современной монтировке немецкого типа, способной двигаться со скоростью до 30 градусов в секунду. Общее поле зрения, получаемое на двух 16 мегапиксельных камерах составляет 8 квадратных градусов. Кроме всего прочего, трубы имеют дополнительную степень свободы. Если телескоп получает сигнал о гамма-всплеске, то трубы сводятся и становится возможной синхронная многоцветная фотометрия, что не умеет делать, например, американская система ROTSE III.



Рис. 8. Слева — телескоп-робот МАСТЕР II Коуровской обсерватории УрГУ (производится московским объединением «Оптика», декабрь 2008 г.). Справа — башня телескопа МАСТЕР II под Кисловодском (ГАИШ МГУ)

Параллельно с «большими» обзорно-алертными телескопами устанавливаются камеры сверхширокого поля зрения МАСТЕР VWF. На горной обсерватории ГАИШ установлены четыре такие камеры с общим полем зрения 4000 квадратных градусов, то есть примерно в 1/10 часть неба! С середины 2008 г. аналогичная роботизированная установка уже работает под Иркутском (обсерватория Иркутского государственного университета) с полем 2000 квадратных градусов. Таким образом, сеть камер МАСТЕР сейчас представляет одну из самых мощных в мире систем данного класса. Только такие системы позволяют проводить синхронные или даже предвспышечные наблюдения гамма-всплесков в оптическом диапазоне.



Рис. 9. Камеры сверхширокого поля МАСТЕР VWF (ГАИШ МГУ, Солнечная станция Пулковской обсерватории)

Наверняка такие сети, как и любой принципиально новый инструмент, позволят обнаружить что-то совершенно неожиданное. Ну, к примеру, подтвердят (или опровергнут) существование загадочных «вспышек-сирот», которые сегодня находятся на грани признания наукой. Эти короткие вспышки никак не проявляются вне оптического диапазона, в частности не связаны с гамма-всплесками. На сегодня есть несколько сообщений об их регистрации, вот только ни одно из них не удастся надежно подтвердить: без быстродействующих обзорных телескопов-роботов такие явления просто не получается заснять дважды.

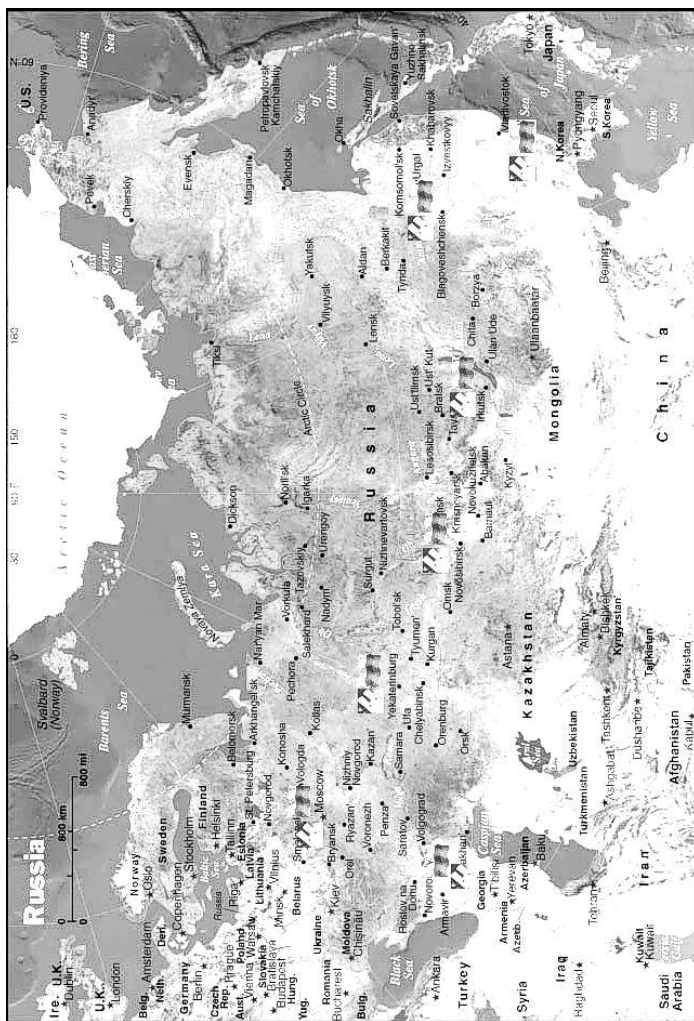


Рис. 10. МАСТЕР-СЕТЬ. Вблизи Кисловодской высокогорной станции установлены четыре камеры сверхширокого поля (июль 2006 г.) и телескоп МАСТЕР II (2008). В Подмоскowie система МАСТЕР работает с 2002 г. На Урале (Коуровская обсерватория УрГУ) — телескоп МАСТЕР II (2008). Под Иркутском — камера сверхширокого поля (август 2008 г.)

Список литературы

1. *Липунов В. М., Корнилов В. Г., Горбовской Е. С. и др.* Открытие оптической вспышки гамма-всплеска GRB060926 телескопом-роботом МАСТЕР: возможное образование предельно-вращающейся черной дыры // Письма в Астрон. журн. — 2008. — Т. 34, вып. 3. — С. 167.
2. *Lipunov V., Gorbouskoy E.* An Extra Long X-Ray Plateau in a Gamma-Ray Burst and the Spinar Paradigm // *Astrophys. J., Lett.* — 2007. — Vol. 665, iss. 2. — P. L97—L100.
3. *Lipunov V. M., Kornilov V. G., Krylov A. V. et al.* Optical Observations of Gamma-Ray Bursts, the Discovery of Supernovae 2005bv, 2005ee, and 2006ak, and Searches for Transients Using the «MASTER» Robotic Telescope // *Astron. Rep.* — 2007. — Vol. 51, iss. 12. — P. 1004.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГОД АСТРОНОМИИ В РОССИИ

Международный год астрономии (МГА) 2009 был инициирован Международным астрономическим союзом и ЮНЕСКО под девизом «Вселенная — для Вас». Несколько глобальных проектов, перечисленных ниже, а также тысячи локальных и региональных событий МГА будут организованы в различных странах, включая Россию.

The International Year of Astronomy 2009 (IYA2009) has been launched by the International Astronomical Union and UNESCO under the theme «The Universe, yours to discover». A few of the global projects, listed below, and thousands of local and regional IYA2009 events will happen in different countries, including Russian Federation.

МГА и его основные проекты

По инициативе Международного астрономического союза и ЮНЕСКО 2009 г. был объявлен ООН Международным годом астрономии (МГА). Это безусловное признание выдающегося значения астрономии в жизни общества, а также ознаменование четырехсотлетия телескопической астрономии. В мероприятиях МГА принимают участие 135 стран, которые направлены на усиление общественной поддержки научных исследований, улучшение качества фундаментального образования на всех уровнях, привлечение интереса молодежи к научной деятельности, создание современных подходов популяризации астрономии. Официальная торжественная церемония открытия МГА проходит в середине января в Париже.

Среди событий МГА несколько тысяч локальных или региональных, описанных на сайте www.astronomy2009.org и национальных сайтах, а также несколько глобальных проектов. Одним из примеров глобального проекта является Космический дневник. Проект посвящен описанию повседневной жизни астрономов. Более 50 блоггеров-профессионалов из разных стран и организаций, включая ESO, NASA, ESA, JAXA, пишут о своей жизни, работе и проблемах, с ко-

торыми они сталкиваются. В рамках другого проекта, «365 дней в астрономии», на протяжении всего года ежедневно в Сети будет публиковаться один подкаст.

Еще один глобальный проект, «100 часов астрономии», состоится со 2 по 5 апреля и будет включать большое количество событий по всему миру, привлекающих интерес общества к астрономии. Одна из ключевых задач проекта — предоставить как можно большему числу желающих посмотреть в телескоп, так же, как это сделал 400 лет назад Галилей.

Проект «С Земли во Вселенную» представляет собой выставки астрономических изображений, устраиваемые для широкой общественности в нетрадиционных местах: таких, как общественные парки и сады, музеи, торговые центры и станции метро. В рамках еще одного проекта, «Мир ночью», создается и будет представлена широкой общественности коллекция великолепных фотографий, запечатлевших земные ландшафты со звездным небом на заднем плане.

Одной из задач МГА является повышение нашей информированности о засветке ночного неба (световом загрязнении), в особенности над городами. В рамках проекта «Темное небо» делается попытка подойти к этому вопросу практически, а именно путем проведения звездных подсчетов в определенных участках неба из разных районов Земли с последующим сравнением результатов.

Полный список проектов МГА может быть найден на указанных выше сайтах.

В 2009 г. произойдут также некоторые интересные небесные явления, в том числе самое продолжительное полное солнечное затмение XXI века, которое произойдет 22 июля и продлится 6 мин 39 с в узком коридоре, проходящем через Индию, Бангладеш и Китай. Мощный метеорный поток Леониды ожидается в середине ноября и, согласно прогнозам, покажет интенсивность свыше 500 «падающих звезд» в час. В середине октября в северном полушарии Юпитер, находящийся на вечернем небе, предоставит хорошую возможность показать широкой общественности гигантскую планету и ее спутники. Все это впечатляющие зрелища даже с небольшим телескопом.

Организаторы МГА стремятся вовлекать общественность в свою деятельность и с этой целью широко привлекают астрономов-любителей, которые призваны помочь организовать и провести мероприятия МГА.

МГА в России

Координацию деятельности по проведению национальных и локальных мероприятий МГА в России осуществляет Национальный комитет российских астрономов (НКРА). Комитет по проведению МГА, сформированный руководством НКРА совместно с Научным советом по астрономии РАН, включает руководителей ведущих астрономических и образовательных организаций России, представителей соответствующих государственных структур (Администрация Президента РФ, Совет Федерации, Министерство образования и науки, Российская академия наук) и организаций-спонсоров (Компания «MEADE», Новосибирский приборостроительный завод).

Россия принимает участие в глобальных проектах МГА, а также проводит ряд собственных мероприятий, неполный список которых приводится ниже:

- создание на сайтах астрономических учреждений страниц, популярно освещающих научную, а также образовательную деятельность;
- создание службы ответов на письма в виде всероссийского сайта;
- установка связи с организациями любителей астрономии;
- определение и постановка задач, в которых любители могут внести вклад в профессиональную астрономию;
- конкурс детского рисунка с открытым голосованием за победителя;
- организация выездных лекций по астрономии для детей: школы, лагеря отдыха, детские дома;
- организация оперативного информирования общественности;
- создание ежемесячной астрономической рубрики в одной из газет;
- компиляция и выпуск календаря на 2009 г.;
- выпуск почтовой марки и конверта;
- организация ежегодного Всероссийского дня астрономии;
- организация выставки литературы «Астрономия и книга»;
- участие в долгосрочных программах: поддержка планетариев, сохранение статуса астрономического образования в вузах, возвращение астрономии в школьную программу;
- организация и проведение конференции ЮНЕСКО «Астрономия и всемирное наследие» в Казани.

Центральным мероприятием МГА в России является Всероссийская конференция «Астрономия и общество», которая состоится с 25 по 27 марта в Москве, в МГУ им. М. В. Ломоносова.

На конференции планируется обсудить как фундаментальное, так и прикладное значение астрономии; проблемы взаимодействия астрономов с общественностью, с органами государственной власти, со СМИ, с любителями астрономии; вопросы астрономического образования и популяризации астрономии, а также будущее астрономии в России.

В программу конференции входит проведение «круглых столов» по следующим тематикам: «Астрономия и государство», «Астрономия и политика», «Астрономия в науке и культуре», «Прикладное значение астрономии», «Астрономическое образование», «Популяризация астрономии».

В программу конференции включены также обзорные лекции ведущих российских астрономов на популярные в обществе темы. Лекции рассчитаны на широкий круг слушателей.

На конференции также будет дана экспертная оценка будущего астрономии. Для этого был скомпилирован список из 35 вопросов, начинающихся со слова «когда» (например, «Когда будет разгадана природа темной энергии?»), на которые профессиональным астрономам предлагается дать ответы. Список был подготовлен ведущими астрономами-популяризаторами, независимо апробирован (и скорректирован) на нескольких научных журналистах и одобрен руководством НКРА и НСА. Результаты опроса астрономического сообщества будут обработаны к середине марта, и коллективный прогноз развития астрономии доложен на конференции «Астрономия и общество».

Заключение

Цель МГА заключается в том, чтобы стимулировать во всем мире, особенно среди молодежи, интерес к астрономии и науке в целом в рамках центральной темы: «Вселенная — для Вас». Мероприятия МГА будут содействовать правильному восприятию творческих аспектов астрономии, которые представляют собой бесценный общий ресурс для всех стран.

ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОЛЬЦА

Лекция посвящена исследованию кольцевых структур, располагающихся как в дисках галактик, так и вне их. Рассмотрены различные механизмы формирования колец, их связь со строением и эволюцией галактик. Особое внимание уделяется наблюдательно-му изучению внутренней кинематики таких объектов.

Введение

Концентрические кольцевые структуры достаточно часто заметны на изображениях галактик. Это прежде всего относится к спиральным галактикам с перемычками (морфологические типы SBa—SBd), однако в некоторых случаях кольца обнаруживаются и в галактиках без баров, а также в объектах ранних типов (E—S0). Диапазон возможных размеров весьма велик — от ультракомпактных околоядерных колец радиусом 50 пк до гигантских образований диаметром в сотни килопарсек. Даже с чисто эстетической точки зрения галактические кольца на оптических снимках выглядят весьма выразительно, во многом благодаря тому, что здесь часто концентрируются очаги современного звездообразования, молодые звезды и газопылевая материя. Этим они напоминают спиральные рукава галактик, более того, исследователи часто используют термин «псевдокольцо» для описания туго закрученных спиральных ветвей. Действительно, в обоих случаях мы, как правило, сталкиваемся с результатом работы коллективных процессов в звездно-газовых дисках. Существует несколько причин, по которым в галактиках образуются кольцевые структуры. Это иногда приводит к путанице в терминологии, когда даже специалисты-внегалактики, говоря о «галактических кольцах», имеют в виду только какой-то один, строго определенный тип таких колец. В то же время по механизму образования их можно разделить на следующие три основных класса.

- Кольца связанные с динамическими резонансами самогравитирующего звездно-газового диска (в дальнейшем — «резонансные»). Это самый многочисленный тип, в подавляющем боль-

шинстве он встречается в галактиках с барами, хотя известны примеры таких колец и в галактиках без перемычек.

- Значительно реже встречаются кольцевые волны плотности в столкновительных кольцевых галактиках (здесь мы используем не очень удачную кальку с английского «colliding rings», которая, однако, очень верно передает смысл процесса взаимодействия галактик, порождающего подобные структуры).
- Полярные кольца и диски, которые также являются результатом взаимодействия галактик. Сюда же можно отнести и разного рода приливные структуры.

Ниже мы по отдельности рассмотрим каждый из вышеперечисленных типов. Следует отметить, что, используя только снимки галактик, то есть ориентируясь лишь на внешний вид кольца, далеко не всегда можно понять причину его возникновения. Большую помощь здесь оказывают кинематические данные, под которыми мы будем подразумевать поля лучевых скоростей — то есть измерения доплеровских скоростей газовой или звездной компоненты, равномерно заполняющие поле зрения. Ниже речь в основном будет идти о полях скоростей, получаемых нами с помощью сканирующего интерферометра Фабри—Перо, установленного на приборе SCORPIO [1] 6-метрового телескопа САО РАН.

Резонансные кольца

Согласно статистическим оценкам кольца и псевдокольца присутствуют в значительной доле (от 20 до 50 %) спиральных галактик. В подавляющем большинстве они морфологически связаны с неосесимметричным возмущением гравитационного потенциала центральной перемычкой (баром). Эта связь, установленная вначале эмпирически, далее нашла подтверждение в многочисленных теоретических работах и модельных расчетах, обзор которых можно найти в [2]. Напомним, что движения звезд в галактическом диске на расстоянии r от ядра можно в первом приближении представить как колебания с некоторой частотой κ , происходящие вокруг центроида, равномерно вращающегося с угловой скоростью $\Omega(r) = V_{rot}(r)/r$, где $V_{rot}(r)$ — линейная скорость дифференциального вращения (кривая вращения). При этом эпициклическая частота целиком определяется кривой вращения галактики, то есть распределением гравитационного потенциала:

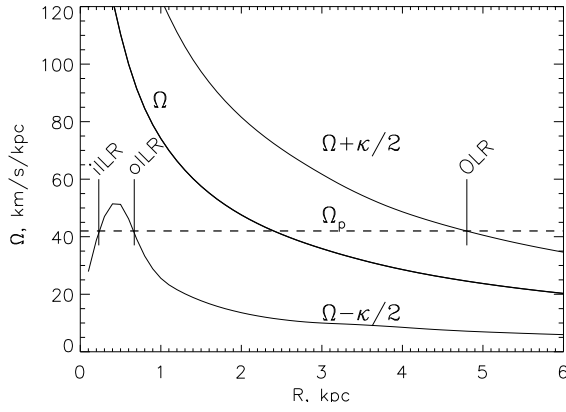


Рис. 1. Схема, поясняющая расположения внутренних (iILR, oILR) и внешнего (OLR) линдбладовских резонансов в галактике с произвольной кривой вращения. Жирной линией показана радиальная зависимость угловой скорости вращения Ω , тонкой – кривые $\Omega \pm \kappa/2$. Пунктир соответствует угловой скорости вращения бара Ω_p

$$\kappa(r)^2 = r \frac{d\Omega(r)}{dr} + 4\Omega(r)^2.$$

Если же в диске возникает узор (спиральная волна или бар), вращающейся твердотельно с угловой скоростью Ω_p , то в определенных областях возникает резонанс между ней и частотой κ , условие которого записывается в виде

$$\Omega_p = \Omega \pm \kappa/m,$$

где m — число рукавов, для бара $m = 2$. Эти резонансы носят имя шведского астронома Бертиля Линдблада, знак плюс здесь соответствует внешнему (OLR), а минус — внутреннему (ILR) линдбладовскому резонансу. Рис. 1 показывает достаточно типичную ситуацию наличия в галактике сразу двух внутренних резонансов, неоригинально называемых внутренним внутренним (iILR) и внешним внутренним (oILR). Линдбладовские резонансы играют чрезвычайно важную роль в теории спиральной структуры, к примеру, долгоживущая волна плотности может существовать именно между ILR и OLR. А в галактиках с перемычками в области резонан-

сов резко меняется ориентация периодических орбит, составляющих «каркас» бара. Под воздействием неосесимметричного потенциала перемычки возникает момент сил, действующий таким образом, что газ из областей с $r < r_{CR}$ перемещается ближе к ядру, а из областей с $r > r_{CR}$, наоборот, движется наружу. Знак момента сил меняется на радиусе коротации, где $\Omega_p = \Omega(r_{CR})$. Численные расчеты показывают, что в областях резонансов газ накапливается, так как здесь радиальные движения прекращаются. Возможна ситуация, когда большая часть газа диска сконцентрируется на резонансах. При достижении необходимой плотности газа, вспыхивает звездообразование и в дальнейшем мы видим не только газовые, но и звездные кольца. Теория неплохо согласуется с большинством наблюдательных данных, в частности, объясняет эмпирическое разделение колец на ядерные (размером около 1 кпк, расположенные на ILR), внешние (расположенные на OLR) и внутренние. Последние соответствуют ультрагармоническому резонансу 1:4 (UHR), расположенному между ILR и коротацией, здесь для концентрации газа требуется достаточно контрастный бар, который, как правило, и оканчивается на этом резонансе, упираясь в кольцо.

Особенности формы орбит на резонансах объясняют и то, что кольца, вообще говоря, не круглые, а вытянуты либо вдоль, либо поперек к породившей их перемычке. При этом внешние кольца могут иметь забавную «восьмеркообразную» форму (UGC 12646, ESO 287-56), вызванную соответствующими орбитами вблизи OLR.

Зная расположение колец, можно вычислить Ω_p — один из ключевых параметров, описывающих динамику бара. И наоборот, независимо определив скорость узора, можно проверить и уточнить теорию формирования колец. В целом наблюдения подтверждают теорию и в качестве примера можно привести наше исследование галактики NGC 6104 [3], где измеренное по полю скоростей Ω_p хорошо согласуется с положением кольца на резонансе UHR (рис. 2). Согласно современным представлениям скорость вращения бара должна меняться в ходе медленной (секулярной) эволюции галактики. При этом ранее сформировавшееся и еще не распавшееся кольцо сохранит информацию о предыдущей величине Ω_p . К сожалению, такие работы пока еще весьма немногочисленны, что связано с объективными трудностями в измерении Ω_p . Возмущения поля скоростей газа в резонансных кольцах обычно невелики (в пределах 10–15 км/с) и значительно меньше, чем некруговые скорости, порождаемые самим баром или спиральной волной.

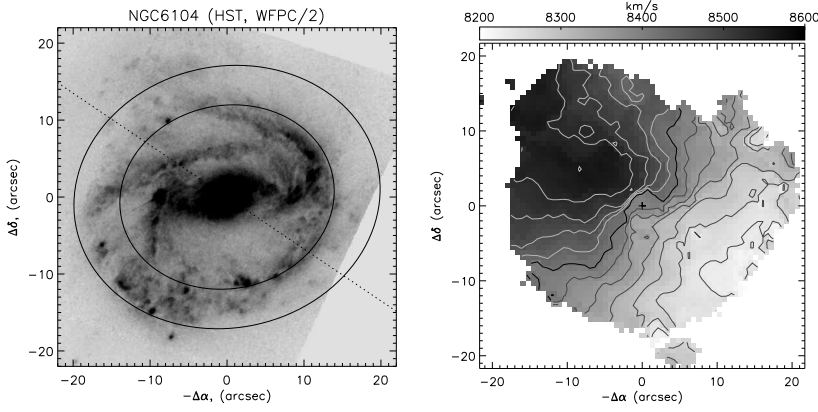


Рис. 2. Псевдокольцо в NGC 6104 [3]. Слева — изображения с HST, эллипсами показаны границы области резонанса 1:4. Справа — поле скоростей ионизованного газа, по которому рассчитывалась угловая скорость бара

Наибольший интерес представляют факты, выпадающие из общей картины формирования резонансных колец. Буквально в последние годы обнаружена популяция ультракомпактных ядерных колец (UCNR) [5], радиус которых составляет всего 30—130 пк, что на порядок меньше, чем обычно наблюдается у колец на внутренних резонансах. Возможно, что в центральных областях присутствует (или ранее присутствовало) маломасштабное возмущение, например, второй бар, с иной угловой скоростью. Похоже, что именно такую ситуацию недавно удалось застать в NGC 4255 [6]. Либо же здесь становятся важными гравитационные эффекты, связанные с центральной сверхмассивной черной дырой.

Второй интересный момент — наличие четко выраженных колец в галактиках без бара. Здесь вновь предполагают существование резонанса диска и какой-либо несимметричной структуры, вроде вытянутого балджа, «овального возмущения» или даже несферичного темного гало. Либо же говорят о том, что бар в галактике был, но разрушился под воздействием внутренних (перераспределение массы в результате секулярной эволюции) или внешних (взаимодействие с компаньоном) факторов. Последнюю версию, правда, тяжело воспроизвести в моделировании, так как при приливном разрушении перемычки неизбежно разрушается и кольцо. Более разумным пред-

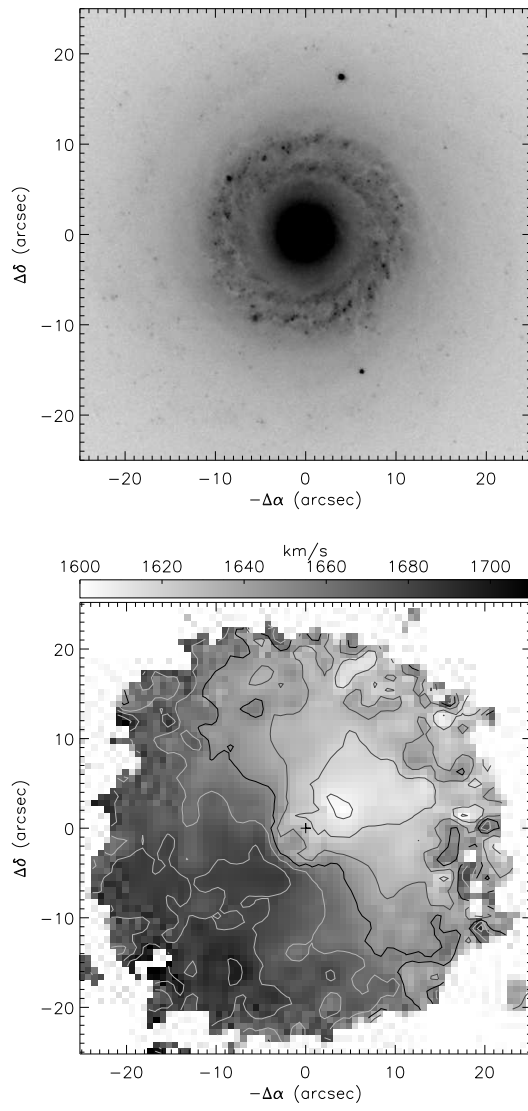


Рис. 3. Галактика NGC 7742 [4]. Вверху — изображения с HST, внизу — поле скоростей ионизованного газа

ставляется вариант, когда воздействие спутника на диск галактики является не разрушающим, а, наоборот, созидающим. Действительно, при определенных условиях возмущение гравитационного потенциала в результате пролета компаньона будет сходно с воздействием бара на диск галактики. Такой механизм был предложен недавно нами [4] для объяснения структуры галактики NGC 7742, являющейся известнейшим примером кольца без бара (рис. 3). Кроме резонансного кольца свидетельством недавнего поглощения спутника со специфическим направлением момента вращения является наблюдаемое здесь противовращение газового и звездного дисков. Такое объяснение согласуется с результатами расчетов взаимодействия галактик в случае движения компаньона в экваториальной плоскости против направления вращения основной галактики [7].

Столкновительные кольцевые галактики

Последствия взаимодействия галактик могут быть различны. Чаще это либо полное поглощение маломассивного компаньона («галактический каннибализм» — «малый мержинг»), или же, для близких по массе галактик, полная перестройка изначальной структуры с образованием, по сути, нового объекта. Но в редких случаях лобового столкновения при осевом прохождении спутника через галактический диск в нем образуется кольцевая волна плотности. Хрестоматийный пример — галактика «Тележное колесо» (Cartwheel), красочные снимки которой широко известны даже людям, далеким от астрономии. Первые численные модели формирования таких галактик появились в 70-е гг. прошлого века и с тех пор многократно совершенствовались (см. подробный обзор [8]). Пролетая вблизи центра галактики, спутник своим притяжением воздействует на диск, так что звезды и газовые облака испытывают радиальное смещение. Отметим, что объемная плотность звезд в галактиках столь низка, что вероятность их прямого столкновения при таких пролетах очень мала. Возникшее возмущение потенциала порождает сверхзвуковую волну плотности,двигающуюся из центра к периферии. Понятно, что такая картина возникнет только при выполнении целого ряда условий. Спутник должен быть массивным, а скорость его пролета достаточно высока, чтобы его воздействие на диск было одновременно и мощным и кратковременным. Все это, вместе с относительно коротким временем жизни кольцевых волн и со специфическими

требованиями к взаимной ориентации галактик, приводит к тому, что наблюдаемое число столкновительных колец составляет лишь доли процента от общего числа ярких галактик.

В то же время кольцевые галактики представляют собой уникальную лабораторию для изучения распространения сверхзвуковой волны плотности по невозмущенному диску, а также для проверки различных теорий распространения звездообразования. Волна динамически разогревает диск, а также, подобно спиралям галактик, сжимает газ, что приводит к массовому образованию звезд. Благодаря этому мы и видим гребень волны, на котором концентрируются молодые объекты — от областей H II до ультраярких рентгеновских источников. Скорость кольцевой волны может достигать сотни километров в секунду, что значительно выше, чем для галактических спиральных волн. Исследования ряда галактик показали, что прохождение такой волны вызывает рождение существенной доли звездного населения в галактике.

Размеры кольцевых волн в отдельных галактиках впечатляют. Так, недавно обнаруженное кольцо в UGC 7069 имеет диаметр около 115 кпк [9]. Сходные размеры имеет гигантское кольцо нейтрального водорода вокруг галактики NGC 5291 [10]. В редких случаях достаточно большой галактики удается застать сразу два кольца, бегущих по диску, как в Cartwheel или Agr 10 [11].

Возмущения, вносимые кольцевыми волнами в кинематику дисков, должны быть весьма значительными. В то же время наблюдательные исследования их кинематики очень немногочисленны. Имеющиеся поля скоростей H I в линии 21 см обладают слишком низким угловым разрешением. Статья [12], в которой было построено поле скоростей ионизованного водорода в «Тележьем колесе», оставалась до недавнего времени практически единственной работой с детальными измерениями возмущенных скоростей в кольце. Отсутствовали и самосогласованные модели столкновительных кольцевых галактик, одновременно удовлетворяющие кинематическим, спектральным и фотометрическим данным. Поэтому по инициативе Д. В. Бизяева мы предприняли комплексное исследование выборки таких галактик на 6-м телескопе САО РАН. Опубликованы первые результаты, касающиеся галактики Agr 10 [11], в которой сосуществуют два кольца звездообразования и остатки внешней спиральной структуры (рис. 4). Нами доказана столкновительная природа эмиссионных колец, построена численная модель движения газа с учетом воздействия спутника, пролетающего через диск основной

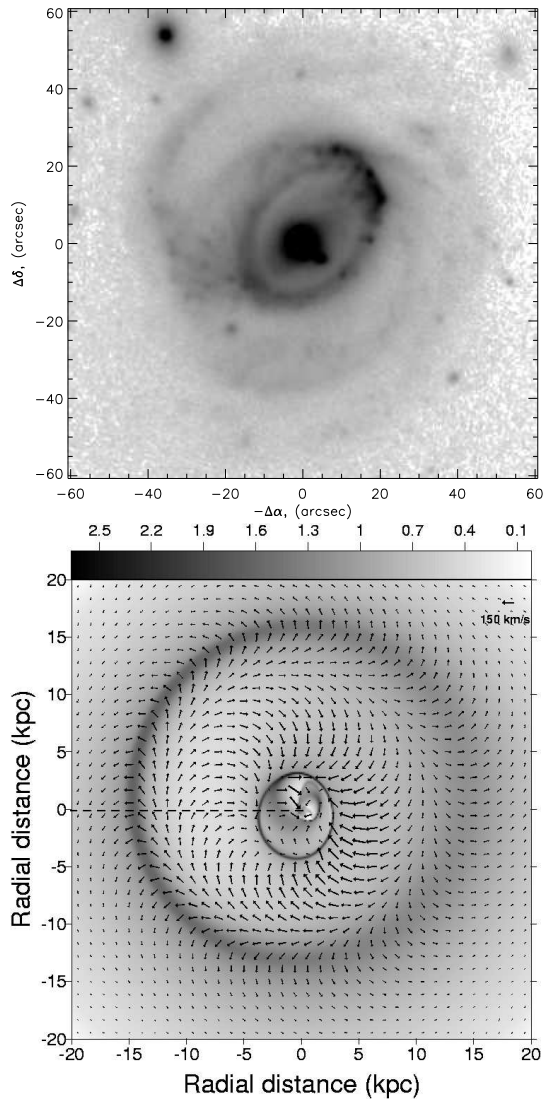


Рис. 4. Столкновительные кольца в A910 [11]. Вверху — изображение в фильтре B (6-м телескоп САО РАН). Внизу — результат численного моделирования: распределение плотности газа в плоскости галактики и поле остаточных скоростей (за вычетом средней кривой вращения)

галактики. Удалось обнаружить и сам спутник, уже частично разрушившийся в процессе взаимодействия. Наши наблюдения позволили однозначно разделить круговую и некруговую составляющие в движениях газовых облаков и обнаружить расширение кольцевой волны звездообразования со скоростями от 30 до 100 км/с в плоскости галактики.

Отметим еще один важный момент в изучении столкновительных галактик. Слишком массивный сферический компонент (балдж и гало) стабилизирует диск относительно вертикальных колебаний. Поэтому кольцевые волны, в которых присутствует заметная вертикальная составляющая, смогут возникнуть и распространяться только в относительно массивном диске (так называемая модель максимального диска). Даже сам факт существования столкновительных кольцевых галактик позволяет ввести ограничение «сверху» на относительную долю в них темного гало.

Галактики с полярными кольцами

Еще одним красивым следствием галактических взаимодействий являются галактики с полярными кольцами (ГПК). В таких объектах наблюдаются кольца или диски из газа, пыли и звезд, вращающиеся в плоскости, примерно перпендикулярной (полярной) к диску основной («хозяйской») галактики. Считается, что образование ГПК в большинстве случаев вызвано слиянием галактик, аккрецией хозяйской галактикой вещества спутника или газовых филаментов из межгалактической среды [13, 14]. Как показано в [13], большая часть полярных колец образуются именно в рамках «аккреционного» сценария, впервые предложенного в [15]. Возникновение долгоживущего кольца наиболее вероятно, когда богатая газом галактика пролетает в околополярной плоскости свободной от газа галактики раннего типа. Показано, что в случае сплюснутого или трехосного гравитационного потенциала в полярной плоскости существуют устойчивые орбиты, поэтому захваченное вещество спутника будет вращаться здесь достаточно долго. Если же плоскость орбиты заметно отличается от полярной, то образующееся кольцо относительно быстро прецессирует к плоскости галактики.

Поскольку в случае ГПК наблюдается круговое вращение в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то появляется возможность изучить трехмерное распределение массы в галактике, в том числе определить форму темного гало: сплюснутость, вытянутость, откло-

нения от осевой симметрии. Для этого необходимо получить достаточно подробную информацию о внутренней кинематике ГПК. В известном каталоге [16] приведен список из 157 кандидатов в галактики с полярными кольцами, отобранных в основном по пекулярности их внешнего вида. К сожалению, число «реальных» ГПК, то есть таких, где действительно наблюдается вращение в ортогональных плоскостях, значительно меньше. Даже в самом простом случае, когда и центральная галактика, и кольцо видны в положении «с ребра», требуется получить как минимум два спектральных разреза с длинной щелью, чтобы определить характер вращения обеих подсистем. Если же пространственная ориентация такова, что одна из плоскостей вращения видна под умеренным наклоном к лучу зрения, то возникает ряд трудностей. Во-первых, используя только прямые снимки далеко не всегда удастся понять, что объект может относиться к ГПК. Во-вторых, для детального изучения кинематики необходимо получить значительно большее количество разрезов с различной ориентацией щели спектрографа. В этом случае лучше построить двумерное поле скоростей, используя методы панорамной спектроскопии в оптическом диапазоне или радиоинтерферометрии в линиях молекулярного или атомарного газа. Хорошей иллюстрацией является пример галактики NGC 2655. В ней присутствие внутреннего полярного кольца было заподозрено благодаря мощной пылевой полосе, пересекающей диск галактики. Сравнение полей скоростей газа и звезд в околоядерной области подтвердило правильность такой интерпретации [17]. А недавние наблюдения в линии 21 см позволили уже детально отследить структуру и кинематику полярного кольца [18].

Хотя пока известно всего около двух десятков объектов, в которых уверенно подтверждено наличие внешнего полярного кольца, их реальная доля среди ярких галактик может достигать 0.5 % и более, см. обзор [20]. Предпринятые попытки оценить форму темного гало из кинематики ГПК дают противоречивые результаты: в одних галактиках гало оказывается вытянутым, в других, наоборот, сплюснутым. Скорее всего, это отражает реальное различие в распределении темной материи от объекта к объекту. Далеко не всегда кольцо располагается строго на полярных орбитах, часто его плоскость сильно изгибается, что указывает на трехосную форму потенциала гало. Сильный изгиб газового полярного кольца недавно обнаружен в одной из известнейших пекулярных галактик — NGC 2685 [21]. На рис. 5 показан пример поля скоростей ионизованного водорода в галактике Agr 212 [19]. Здесь в пределах оптического радиуса нами

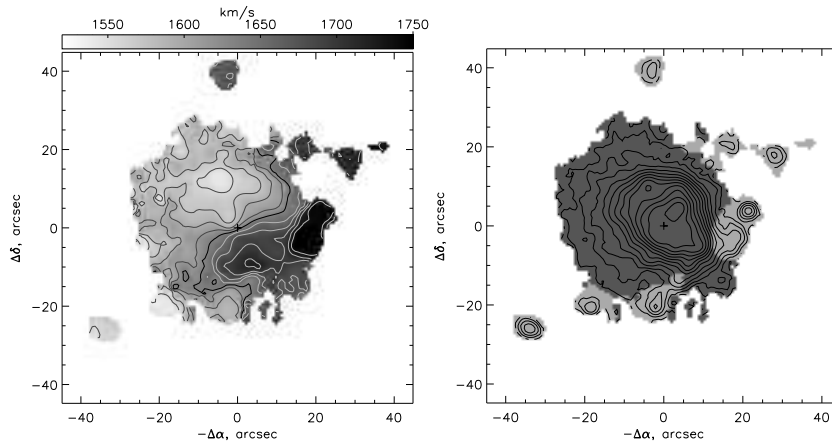


Рис. 5. Изогнутое полярное кольцо в *Апг* 212 [19]. Слева — поле лучевых скоростей в линии $H\alpha$. Справа — схема разделения галактики на область внутреннего диска (выделено темным) и внешние филаменты (выделено светлым). Наложены изофоты изображения в линии $H\alpha$

найденно две кинематически различные подсистемы вращающегося газа — внутренний диск и внешние области НП, образующие кольцо. Внутренний диск располагается в пределах 3.5 кпк от центра, вращение ионизованного газа в нем происходит в плоскости, совпадающей со звездным диском. А орбиты второй подсистемы располагаются под значительным (50°) углом к звездному диску. Имеющиеся сведения о кинематике молекулярного, ионизованного и нейтрального газа объясняются в рамках модели, предполагающей, что большая часть массы нейтрального водорода во внешних областях галактики собрана в широком кольце радиусом около 20 кпк. Возможная причина образования полярного кольца — взаимодействие с богатой газом карликовой галактикой UGC 12549. Внешние области кольца вращаются в плоскости, ортогональной к плоскости звездного диска. С уменьшением галактоцентрического расстояния орбиты газовых облаков прецессируют и приближаются к плоскости диска. Прецессия вызвана трехосностью в распределении гравитационного потенциала гало. Поскольку галактика богата газом, то здесь мы наблюдаем столкновение газовых потоков внутреннего диска и поляр-

ного кольца. Свидетельством такого взаимодействия является мощное пылевое кольцо в центральных областях галактики, которая вся охвачена мощной вспышкой звездообразования.

Кроме вышеописанных внешних структур встречаются и внутренние полярные кольца и диски, окружающие ядерные области галактик. Их размеры составляют всего 1–2 кпк. Эти объекты открыты в близких галактиках сравнительно недавно, большая часть их обнаружена в ходе спектральных наблюдений на 6-м телескопе САО РАН (см., к примеру [17]). Предполагается, что такие диски могут быть сильно изогнуты — плавно переходить из экваториальной в полярную плоскость, но прямых подтверждений этому пока нет. Несмотря на то, что число подтвержденных внутренних полярных дисков (около 30) превышает число «классических» ГПК, природа их остается неясной, до сих пор нет внятного самосогласованного сценария их образования.

Родственными к полярным кольцам также являются и всевозможные низкоконтрастные кольцевые структуры, образованные в результате приливного разрушения карликовых спутников. Их изучение пока только начинается. В качестве примера можно привести известные звездные потоки в нашей Галактике, такие как Sgr I, который почти ортогонален плоскости Галактики и имеет форму гигантского эллипса с большой осью около 30 кпк. Еще большими размерами обладает двойное изогнутое кольцо низкой поверхностной яркости в NGC 5907, имеющее сходное происхождение [22].

Заключение

Феномен кольцевых структур достаточно широко распространен среди галактик разных типов. За происхождение колец ответственны как внутренние, так и внешние факторы. Изучение кольцевых галактик затрагивает многие аспекты галактической эволюции.

Работа частично основана на наблюдательном материале, полученном на 6-м телескопе САО РАН, финансируемом Миннауки РФ (регистрационный номер 01–43), и выполнена при поддержке фонда РФФИ (проект 06–02–16825) и гранта Президента Российской Федерации (проект МК1310.2007.2).

Список литературы

1. *Моисеев А. В., Афанасьев В. Л.* Универсальный редуктор светосилы 6-м телескопа SCORPIO // Письма в Астрон. журн. — 2005. — Т. 31. — С. 214–225. — www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/scorpio.html.
2. *Buta R., Combes F.* Galactic Rings // Fundamentals of Cosmic Physics. — 1996. — Vol. 17. — P. 95–281. — nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Rings/frames.html.
3. *Смирнова А. А., Моисеев А. В., Афанасьев В. Л.* Наблюдательные свидетельства «питания» активных ядер галактик. I. Случай NGC6104 — поглощение спутника. // Письма в Астрон. журн. — 2006. — Т. 32. — С. 577–591.
4. *Sil'chenko O. K., Moiseev A. V.* Nature of Nuclear Rings in Unbarred Galaxies: NGC 7742 and NGC 7217 // Astron. J. — 2006. — Vol. 131. — P. 1336–1346.
5. *Comerón S., Knapen J. H., Beckman J. E., Shlosman I.* Discovery of ultra-compact nuclear rings in three spiral galaxies // Astron. Astrophys. — 2008. — Vol. 478. — P. 403–407.
6. *Сильченко О. К., Чилингарян И. В., Афанасьев В. Л.* История звездообразования в центральной области галактики с баром NGC 4245 // Письма в Астрон. журн. — 2009. — В печати.
7. *Тутуков А. В., Федорова А. В.* Роль близких прохождений галактик и асимметрии их темного гало в формировании спирального узора. // Астрон. журн. — 2006. — Т. 83. — С. 880–897.
8. *Appleton P. N., Struck-Marcell C.* Collisional Ring Galaxies // Fundamentals of Cosmic Physics. — 1996. — Vol. 16. — P. 111–220. — nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Sept01/Appleton/frames.html.
9. *Ghosh K. K., Mapelli M.* UGC 7069: the largest ring galaxy // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — Vol. 386. — P. L38–L42.
10. *Bournaud F., Duc P.-A., Brinks E. et al.* Missing Mass in Collisional Debris from Galaxies // Science. — 2007. — Vol. 316. — P. 1166.
11. *Bizyaev D. V., Moiseev A. V., Vorobyov E. I.* Propagating Star Formation in the Collisional Ring Galaxy Arp 10 // Astrophys. J. — 2007. — Vol. 662. — P. 304–321.
12. *Amram P., Mendes de Oliveira C., Boulesteix J., Balkowski C.* The H α kinematic of the Cartwheel galaxy // Astron. Astrophys. — 1998. — Vol. 330. — P. 881–893.

13. *Bournaud F., Combes F.* Formation of polar ring galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 401. — P. 817–833.
14. *Combes F.* Polar Ring Galaxies and Warps // *EAS Publications Series* / Ed. by G. A. Mamon, F. Combes, C. Deffayet, B. Fort: *EAS Publications Series.* — Vol. 20. — 2006. — P. 97–104.
15. *Reshetnikov V., Sotnikova N.* Global structure and formation of polar-ring galaxies. // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 325. — P. 933–942.
16. *Whitmore B. C., Lucas R. A., McElroy D. B. et al.* New observations and a photographic atlas of polar-ring galaxies // *Astron. J.* — 1990. — Vol. 100. — P. 1489–1522.
17. *Sil'chenko O. K., Afanasiev V. L.* Inner Polar Rings in Regular Lenticular Galaxies // *Astron. J.* — 2004. — Vol. 127. — P. 2641–2658.
18. *Sparke L. S., van Moorsel G., Erwin P., Wehner E. M. H.* NGC 2655: from Inner Polar Ring to Outer Shells and Tails // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 135. — P. 99–111.
19. *Moiseev A. V.* Warped polar ring in the Arp 212 galaxy // *Astrophysical Bulletin.* — 2008. — Vol. 63. — P. 201–215.
20. *Решетников В. П.* Эти странные галактики с полярными кольцами. // *Природа.* — 2005. — Vol. 3. — P. 15–22.
21. *Jozsa G. I. G., Oosterloo T. A., Morganti R. et al.* Kinematic modeling of disk galaxies III. The warped "Spindle" NGC 2685 // *Astron. Astrophys.* — 2008. — in press. 0810.3025.
22. *Martínez-Delgado D., Peñarrubia J., Gabany R. J. et al.* The Ghost of a Dwarf Galaxy: Fossils of the Hierarchical Formation of the Nearby Spiral Galaxy NGC 5907 // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 689. — P. 184–193. 0805.1137.

ДИНАМИКА ГРУПП ГАЛАКТИК

Представлен обзор работ по изучению динамической эволюции групп галактик. Обсуждаются основные подходы к решению этой проблемы с использованием численных экспериментов в рамках гравитационной задачи N тел. Обсуждается устойчивость групп по отношению к слияниям галактик в единый объект. Оцениваются эффекты темной материи и темной энергии на динамику групп. Группы галактик могут эффективно использоваться для проверки космологических моделей.

A review of papers concerning studies of dynamical evolution of galaxy groups is presented. Some main approaches to solution of this problem using numerical simulations in the gravitational N -body problem are discussed. The stability of groups with respect to merging in unique object is discussed. The effects of dark matter and dark energy on dynamics of groups are estimated. One can use the galaxy groups to check the cosmological models.

Введение

Группы галактик, насчитывающие в своем составе от нескольких галактик до нескольких десятков галактик, представляют собой наиболее распространенный тип агрегатов галактик. По оценкам разных авторов, около 50 % всех галактик входят в состав групп. Их размеры составляют от нескольких десятков килопарсек (компактные группы) до нескольких мегапарсек (широкие группы). Наша Галактика входит в состав Местной Группы галактик вместе с М 31 и несколькими десятками галактик меньших размеров и масс. В Местной Группе доминируют две массивные галактики (Галактика и М 31), а остальные галактики играют роль пробных частиц. Похожую структуру (иерархию по массам) имеют и другие близкие группы галактик (например, Сеп А+М 83 и М 81+М 82). Интересно, с чем может быть связана эта особенность строения групп?

Группы галактик вызывают значительный интерес у астрономов. Их изучению был посвящен ряд международных совещаний. Одно из

последних совещаний было проведено Южной Европейской обсерваторией в Сантьяго (Чили) в декабре 2005 г. Оно называлось «Группы галактик в близкой Вселенной». Значительное место на этом совещании было уделено динамике и эволюции групп, а также их связи с космологией.

Критерии отбора групп

Вначале следует сказать несколько слов о критериях отбора групп галактик. После появления больших «трехмерных» обзоров галактик, отличающихся полнотой и глубиной, появилась возможность создания полных и однородных каталогов групп. Примером такого каталога может служить каталог Рамеллы и др. [1]. Каталог покрывает область неба площадью 4.69 стерadians. Группы выделяются с помощью так называемого алгоритма «friends-of-friends». Этот алгоритм был предложен в работе Хукри и Геллер [2].

Вводятся два параметра «связи»: на небесной сфере

$$D_L(V_1, V_2, m_1, m_2)$$

и вдоль луча зрения

$$V_L(V_1, V_2, m_1, m_2).$$

Для каждой галактики определяются все галактики, для которых

$$D_{12} = (V_1 + V_2) \sin(\vartheta/2)/H_0 \leq D_L$$

и

$$V_{12} = |V_1 - V_2| \leq V_L,$$

где V_1 и V_2 — лучевые скорости компонентов пары; m_1 и m_2 — их видимые величины; ϑ — угловое расстояние между компонентами; H_0 — постоянная Хаббла. Все пары, имеющие общую галактику, объединяются в группу, содержащую не менее трех галактик. Параметры D_L и V_L выбираются так, чтобы отобранные группы имели контраст плотности $\delta\rho/\rho$ больше некоторого критического значения. В работе [1] для всех групп галактик $\delta\rho/\rho > 80$. При выборе параметров «связи» важно, с одной стороны, не упустить широкие реальные группы, и, с другой стороны, не допустить случайного расщепления наиболее богатых групп.

Выделенные в [1] группы имеют характерные дисперсии лучевых скоростей ≈ 300 км/с и характерные размеры ≈ 1 Мпк. Для наиболее богатых групп эти величины составляют около ≈ 500 км/с и около ≈ 2 Мпк соответственно.

Структура групп

Из расположения компонентов групп в картинной плоскости можно вынести некоторые суждения об истинной форме групп. Так, в работе Орлова и др. [3] были рассмотрены три различных параметра, характеризующих степень сплюснутости группы:

- 1) среднее значение суммы квадратов синусов углов по всем возможным треугольникам, образованным членами группы;
- 2) вариация квадратов взаимных расстояний между компонентами;
- 3) отношение осей прямоугольника, описанного вокруг группы.

Получены средние значения этих параметров в проекции на случайным образом ориентированную «картинную плоскость» при случайном распределении компонентов внутри сжатых и вытянутых сфероидов с различным отношением осей. Сравнение с наблюдениями показало, что лучшее согласие достигается, если наблюдаемые группы являются сжатыми или вытянутыми сфероидами с отношением большой и малой осей около 3. Более вероятен случай вытянутых структур.

Аналогичный результат был получен в работе Плиониса и др. [4]. Эти авторы восстановили распределение истинного отношения малой и большой осей групп по распределению видимого отношения в проекции на картинную плоскость. Эти авторы показали, что группы галактик, вероятно, являются вытянутыми структурами, хотя имеется популяция групп, близких к сферическим. Паз и др. [5] отмечают, что группы можно аппроксимировать трехосными эллипсоидами с некоторым преобладанием вытянутых форм; при этом более массивные группы имеют более сильную тенденцию к вытянутости. Преобладание сильно вытянутых структур среди групп галактик, вероятно, связано с их формированием в пределах крупномасштабных вытянутых структур — «волокон».

Следует иметь в виду, что в группах галактик мы видим, как правило, только «верхушку айсберга», то есть наиболее яркие галактики. В группах, по-видимому, присутствует значительное число

карликовых галактик, число которых может в несколько раз, а возможно и на несколько порядков величины, превышать число обнаруженных гигантских галактик.

Как показывают численные эксперименты, на формы групп галактик и их внутреннюю кинематику существенно влияет окружение группы (см., например, статью [6] и ссылки в ней). В областях с высокой плотностью галактик (например, в богатых скоплениях и сверхскоплениях) группы в среднем более массивные и ближе сферическим по форме, чем в областях с низкой плотностью. С другой стороны, группы с наличием субструктуры проявляют тенденцию к вытянутости, что, вероятно, связано со слияниями галактик. Таким образом, слияния галактик препятствуют «вириализации» и «сферизации» групп галактик. Дисперсия скоростей в группе в среднем растет с увеличением плотности окружения. Большая ось эллипсоида скоростей, как правило, вытянута вдоль большой оси группы. Причем согласование осей лучше для групп без субструктуры. Если группы располагаются в крупномасштабных структурах типа вытянутых волокон, то, как правило, их большие оси ориентированы вдоль волокон, а малые оси приблизительно ортогональны волокнам. Этот эффект усиливается, если рядом с группой имеется богатое скопление галактик. Представляет большой интерес проверить эти свойства для наблюдаемых групп галактик.

Местная Группа галактик

Наша Галактика входит в состав Местной Группы галактик, поэтому структура и эволюция этой группы представляют особый интерес. Возможную историю Местной Группы пытались восстановить Валтонен и др. [7]. Эти авторы предположили, что примерно 4 млрд лет назад гигантские галактики IC 342 и Maffei 1 находились вблизи M 31 и Галактики. В это время могло иметь место тесное сближение нескольких галактик, временно образовавших компактную группу. На рис. 1 показаны возможные траектории четырех гигантских галактик в проекции на сверхгалактическую плоскость. Кружками отмечены современные положения галактик. Это только один из возможных вариантов движений. Авторы [7] приводят несколько таких вариантов. Во всех случаях в эволюции вначале принимают участие шесть галактик. В результате три галактики сливаются и образуют галактику M 31.

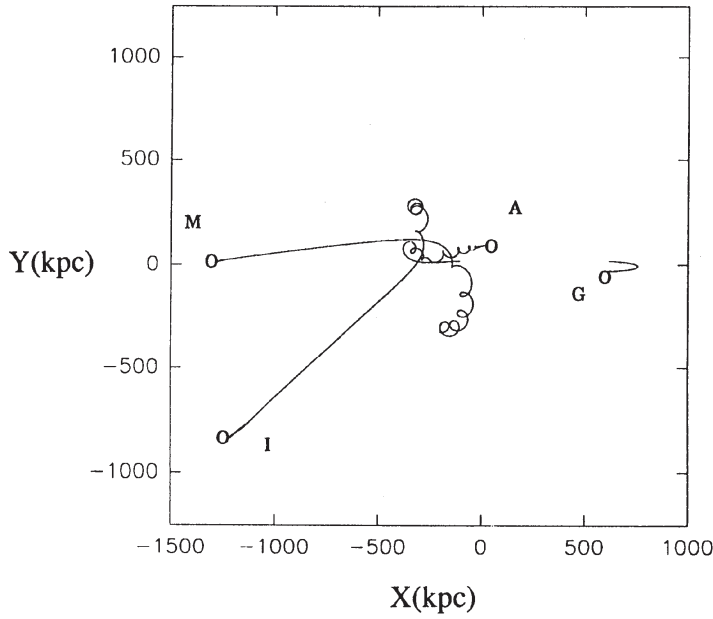


Рис. 1. Возможные орбиты четырех гигантских галактик согласно [7]

Еще один интересный результат по кинематике Местной Группы получили ван дер Марел и Гухатхакурта [8]. Эти авторы смогли оценить трансверсальную скорость М 31 по отношению к центру нашей Галактики $V_{tan} = 42$ км/с в предположении, что спутники М 31 отслеживают движение главной галактики, а удаленные компоненты Местной Группы отслеживают движение центра масс группы. Для того чтобы движение двойной Галактика—М 31 было ограниченным, масса Местной Группы должна быть не меньше, чем $M = (5.6 \pm 0.8) \times 10^{12} M_{\odot}$. Авторы [8] также предсказывают собственные движения Туманности Андромеды $\mu_{\alpha} \cos \delta = -22 \pm 11 \mu as/\text{год}$, $\mu_{\delta} = -10 \pm 9 \mu as/\text{год}$ при расстоянии до М 31, равном $D = 770$ кпк. В ближайшие годы вряд ли удастся научиться измерять собственные движения с такой высокой точностью и проверить этот результат.

Оценка массы Местной Группы была получена также в работе Ли и Уайта [9]. Эти авторы используют аналоги Местной Группы, обнаруженные в космологических моделях N тел. Методом максимального правдоподобия получена медианная оценка массы группы $5.3 \times 10^{12} M_{\odot}$, что прекрасно согласуется с оценкой [8].

Методы исследования динамики групп галактик

При моделировании динамической эволюции групп галактик возможны два подхода (см., например, обзор Киселевой и Орлова [10] и ссылки в нем):

- 1) самосогласованный (self-consistent), когда каждая галактика представляется как система N тел;
- 2) явный физический (explicit-physics), когда каждый член группы представляется как одиночное протяженное тело, а дополнительные эффекты (динамическое трение, слияния галактик, приливное «обдирание» и т. п.) задаются с помощью различных аналитических аппроксимаций (см., например, статью Мамона [11]).

Например, в работе [12] был получен эмпирический критерий слияния двух галактик

$$\left[\frac{(m_1 + m_2)r_p}{2.5(m_1\varepsilon_1 + m_2\varepsilon_2)} \right]^2 + \left[\frac{v(r_p)}{1.18v_e(r_p)} \right]^2 \leq 1,$$

где m_1 и m_2 — массы галактик; ε_1 и ε_2 — радиусы ядер галактик; r_p — расстояние между центрами галактик в момент наиболее тесного их сближения; $v(r_p)$ — относительная скорость галактик в этот момент времени; $v_e(r_p)$ — относительная параболическая скорость галактик. Этот критерий, полученный самосогласованным методом, удобно применять при «явном физическом» моделировании.

Эти два подхода дополняют друг друга. Первый подход позволяет строить более реалистичные модели групп, но не дает возможности рассмотреть большое число вариантов начальных условий. Вторым способом можно исследовать зависимость динамической эволюции групп от их начальных характеристик, используя при этом результаты самосогласованного моделирования.

Слияния галактик

В ходе динамической эволюции групп галактик происходят два процесса, приводящих к уменьшению кратности групп: 1) уход галактик из группы; 2) слияния галактик. Второй процесс доминирует в эволюции групп галактик, находящихся в вириальном равновесии («вириализованных») или сжимающихся в начале эволюции. Согласно результатам самосогласованных численных экспериментов

Асесеса и Веласкиса [13] за хаббловское время около 60 % вириализованных групп сливаются в один объект — продукт слияния (merger). Около 10 % групп «выживают» и формируют более компактные системы, по своим свойствам напоминающие компактные группы галактик Хиксона [14].

Наблюдения групп галактик свидетельствуют о том, что в них имеется множество галактик, показывающих признаки недавнего слияния или находящиеся в процессе слияния.

Динамические оценки масс групп

Универсальную формулу для динамической оценки массы группы можно записать следующим образом:

$$M = \alpha \frac{Rv^2}{G},$$

где R — характерный проективный размер группы; v — характерная остаточная лучевая скорость системы; G — гравитационная постоянная; α — множитель, зависящий от системы единиц, характера внутренних движений и эффектов проекции. В работе [15] были предложены четыре варианта этой общей формулы для оценки массы группы:

- 1) вириальный оценочный параметр (virial mass estimator, VME)

$$M_{VT} = \frac{3\pi n}{2G} \frac{\sum_i V_i^2}{\sum_{i<j} R_{ij}^{-1}},$$

- 2) проективный оценочный параметр (projected mass estimator, PME)

$$M_{PM} = \frac{f_{PM}}{G(n-1.5)} \sum_i V_i^2 R_i,$$

- 3) медианный оценочный параметр (median mass estimator, MME)

$$M_{Me} = \frac{f_{Me}}{G} \text{med}_{i,j} [(V_i - V_j)^2 R_{ij}],$$

- 4) усредняющий оценочный параметр (average mass estimator, AME)

$$M_{Av} = \frac{2f_{Av}}{Gn(n-1)} \sum_{i<j} (V_i - V_j)^2 R_{ij}.$$

Здесь n — количество галактик в группе, V_i — лучевые скорости галактик относительно центроида группы, R_{ij} — расстояния между галактиками в проекции на картинную плоскость, R_i — расстояния от галактик до центра группы в проекции на картинную плоскость; f_{PM} , f_{Me} и f_{Av} — множители, зависящие от характера внутренних движений в группе. Множитель f_{PM} равен $64/\pi$ в случае радиальных движений, $32/\pi$ в случае изотропного распределения скоростей и $64/(3\pi)$ в случае твердотельного вращения. Авторы [15] рекомендуют использовать значение 10.2, поскольку оно находится в хорошем согласии с численными экспериментами (отметим, что оно приблизительно соответствует изотропному распределению пекулярных скоростей галактик). Параметры f_{Me} и f_{Av} в [15] оценены с помощью статистического моделирования, для них рекомендуются значения 6.5 и 2.8 соответственно.

Все предлагаемые оценочные параметры имеют свои достоинства и недостатки. Так, например, VME чувствителен к присутствию в группах близко расположенных друг к другу (в проекции) галактик, что может приводить к завышению вириальных оценок масс групп. Остальные оценочные параметры менее чувствительны к эффекту проекции, однако при их использовании необходимо учитывать характер внутренних движений в группах.

В работе [13] использованы два параметра для оценки масс групп: VME и MME. В вириализованном состоянии оба параметра дают реалистичные оценки масс групп. Для сжимающихся групп оба параметра недооценивают массы групп в несколько раз. Параметр MME дает лучшие оценки масс, чем параметр VME, в современную эпоху.

Массы галактик группы также можно оценить по их светимостям. Сравнение динамических оценок масс с массами, оцененными по светимостям, показывает, что группы содержат значительную «скрытую» массу (см. следующий раздел). О наличии скрытой массы в группе можно судить по высокому отношению масса—светимость M/L . Так, например, для компактных групп галактик средние значения $M/L \approx 250$ солнечных единиц [13], что соответствует центральным областям богатых скоплений галактик [16].

Влияние темной материи на динамику групп

Высокие значения отношения масса—светимость для групп галактик свидетельствуют о присутствии в группах значительной скрытой массы. Темная материя может находиться как в гало от-

дельных членов группы, так и в общем темном гало, охватывающем группу в целом. Из космологических моделей N тел следует, что темные гало на различных масштабах (от гигантских галактик до богатых скоплений галактик) имеют универсальные профили плотности (см. статью Наварро, Френка и Уайта [17]):

$$\frac{\rho}{\rho_{crit}} = \frac{\delta_c}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2},$$

где δ_c и r_s — параметры; $\rho_{crit} = 3H_0^2/(8\pi G)$ — критическая плотность.

Общие массивные темные гало приводят к увеличению дисперсии скоростей галактик в группах и препятствуют слияниям галактик.

Эффект темной энергии

Наблюдения Местной Группы галактик и других близких групп показывают, что в окрестностях групп (примерно от 1 до 3 Мпк от центра группы) наблюдается фактически Хаббловский поток галактик с очень малой дисперсией скоростей (несколько десятков километров в секунду). На рис. 2 показана зависимость скорость—расстояние в системе отсчета, связанной с центром Местной Группы, взятая из работы Чернина и др. [18]. Из рисунка видно, что в пределах приблизительно 1 Мпк Местная Группа примерно вириализована, а на больших расстояниях от центра группы доминирует «холодный» Хаббловский поток.

Авторы [18] связывают это явление с присутствием в группах так называемой темной энергии, «расталкивающей» галактики группы, находящиеся за поверхностью «нулевой гравитации» с радиусом

$$R_0 = \left(\frac{3M}{8\pi\rho_0} \right)^{1/3},$$

где темная энергия играет определяющую роль. Здесь M — масса вещества (темного и светящегося) в группе, ρ_0 — локальная плотность темной энергии.

В наши дни космологические Λ CDM модели с доминирующей темной энергией являются общепризнанными, хотя и продолжают вызывать некоторые дискуссии. Темная энергия, если она существует, значительно изменяет внутреннюю динамику групп. Чтобы понять принцип действия темной энергии, можно рассмотреть про-

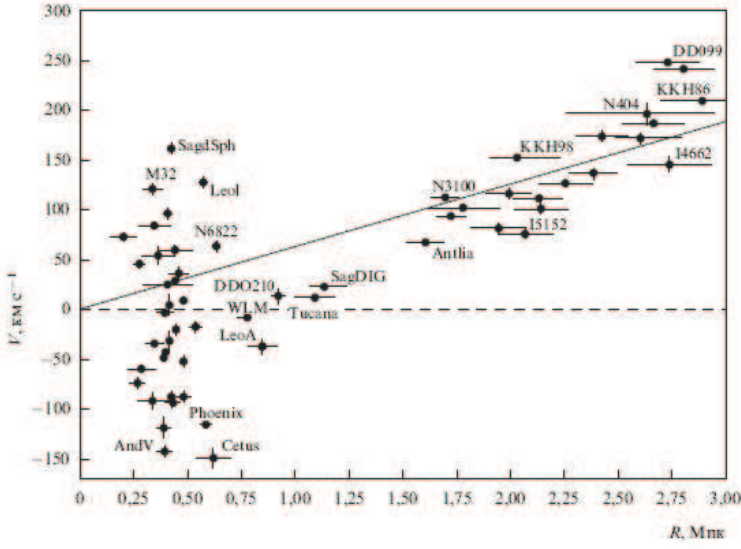


Рис. 2. Диаграмма скорость—расстояние на расстояниях до 3 Мпк от центра Местной Группы согласно [18]

стую задачу двух тел «группа+галактика», находящихся на периферии группы (та же самая задача возникает, если рассматривать движение сферической оболочки в центральном поле с учетом Λ -члена [19]). Уравнение радиального движения галактики при $R > R_0$ имеет вид [20]

$$\ddot{R}(t) = -GM/R^2 + \frac{8\pi}{3}G\rho_0 R.$$

Для выброшенных из группы галактик траектории в фазовом пространстве «скорость—расстояние» «притягиваются» к прямой линии

$$V = H_0 R;$$

где

$$H_0 = \sqrt{\frac{8\pi G}{3}\rho_0}$$

H_0 — «универсальная постоянная Хаббла», определяемая исключительно локальной плотностью темной энергии ρ_0 . Если величина

ρ_0 равна плотности ρ_v темной энергии на космологических масштабах [20] $\rho_0 = \rho_v = (0.72 \pm 0.03) \times 10^{-29} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, то постоянная Хаббла равна $H_0 = H_v = (62 \pm 1) \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Мпк}^{-1}$.

В работе [19] было получено локальное значение постоянной Хаббла по 5 близким группам галактик и скоплению Virgo. Оно получилось равным $H_0 = (65 \pm 7) \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Мпк}^{-1}$, что согласуется с оценкой [20]. В недавнем обзоре Тамманна и др. [21] по различным индикаторам расстояний (цефеиды, сверхновые типа Ia, звезды «верхушки» ветви красных гигантов) получено глобальное значение $H_0 = (62.3 \pm 1.3 \pm 4.0) \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Мпк}^{-1}$, что находится в прекрасном согласии с локальным значением H_0 .

В то же время есть и критические работы по темной энергии в группах галактик. Так, например, Хоффман и др. [22] провели космологические вычисления в рамках ΛCDM и OCDM (открытых) моделей и выявили ряд групп галактик, сходных с Местной Группой по структуре и внутренней кинематике (в частности, имеется доминирующая пара массивных галактик). Локальные Хаббловские потоки в окрестности Местной Группы оказались статистически неразличимы в ΛCDM и OCDM моделях. Таким образом, свойства групп галактик, похожих на Местную Группу, зависят главным образом от содержания темной материи (параметр плотности Ω_M) и слабо зависят от содержания темной энергии (параметр Ω_Λ).

Группы галактик в космологических моделях

Группы галактик не изолированы в пространстве — они являются фрагментами крупномасштабной структуры. Следовательно, при исследовании динамики групп нужно учитывать влияние окружения. Часто выделяют группы в пределах структур больших масштабов, используя результаты численного решения уравнений задачи N тел или уравнений газодинамики с учетом космологического расширения и сравнивают свойства этих модельных групп с наблюдаемыми группами галактик. При этом желательно, чтобы критерии выделения групп были одни и те же. В последние годы обычно рассматриваются ΛCDM модели, в частности Millennium моделирование [23] $N \approx 10^{10}$ тел.

Например, в работе группы финских исследователей [24] показано, что группы галактик, формирующиеся в ΛCDM моделях с $\Omega_\Lambda = 0.73$, по своим свойствам (ход плотности, дисперсия скоростей,

«наблюдаемая» масса) в целом согласуются с наблюдаемыми группами. Показано, что примерно 20 % групп гравитационно не связаны, причем доля таких групп слабо зависит от величины Ω_Λ .

Интересный класс объектов представляют группы галактик, в которых имеются галактики с «противоречивыми» («discordant») красными смещениями. Ниеми и Валтонен [25] показали, что такие случаи могут быть связаны с неправильными отождествлениями центров групп, в особенности для гравитационно несвязанных групп. Поэтому нет необходимости вводить какой-либо дополнительный механизм для объяснения этих «аномальных» красных смещений. Гравитационно связанные группы не показывают значимого избытка аномальных красных смещений. Чтобы избежать трудностей при поиске гравитационно связанных групп, авторы [25] предлагают использовать для идентификации центральной галактики в группе не светимость, а массу звездной составляющей.

Представляет интерес рассмотреть поля скоростей в группах галактик, формирующихся в Λ CDM моделях, а также в их окрестностях. В работе Пивато и др. [26] этому вопросу уделяется особое внимание. На рис. 3 представлен фрагмент поля пекулярных скоростей галактик из работы [26]. На рисунке наблюдаются потоковые движения галактик и падения галактик на области повышенной плотности — группы и скопления галактик. Максимальные скорости падения достигают величин ~ 900 км/с. Это разительно отличается от кинематики галактик в изолированных группах (см. рис. 2), где наблюдается «холодное» хаббловское истечение галактик из групп со скоростями ~ 200 км/с. Таким образом, в Λ CDM моделях имеются противоречия между внутренней кинематикой групп галактик и следствиями из космологических моделей. Эта проблема требует отдельной дискуссии.

Имеется еще одна трудность в объяснении наблюдаемого распределения пекулярных скоростей галактик в Местном Объеме (радиусом около 10 Мпк): дисперсия наблюдаемых скоростей в несколько раз меньше, чем должна быть, если движения галактик порождаются наблюдаемыми структурами за время жизни Вселенной (см. работу Вайтинга [27]). Автор [27] предлагает простое объяснение этого парадокса: в Местном Объеме существует большое количество барионной материи, не связанной с отдельными галактиками или группами галактик, которая «тормозит» движение галактик. Однако это не единственное возможное объяснение. Например, это может быть эффект диссипативного фрактального ускорения, которое оказыва-

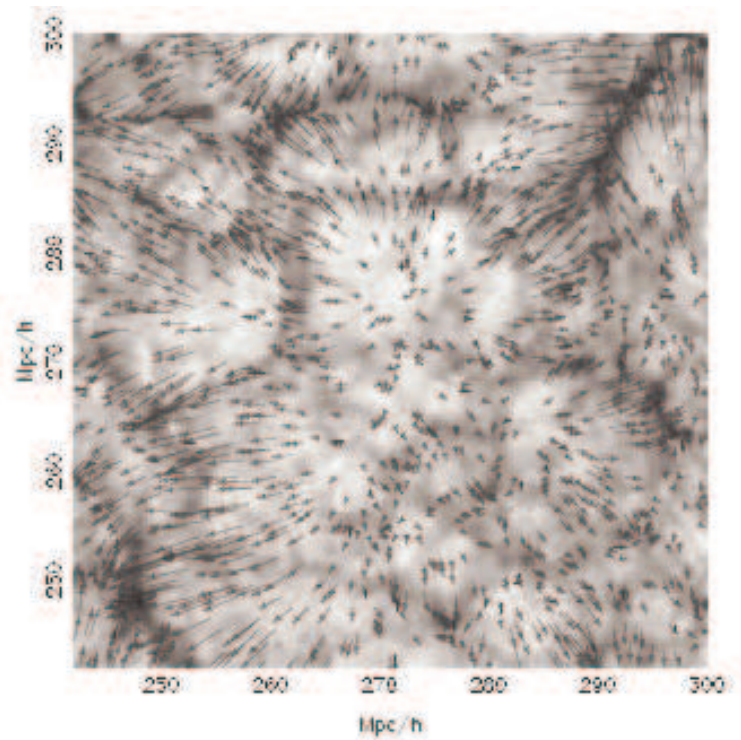


Рис. 3. Поле peculiarных скоростей галактик согласно работе [26]

ет на галактики, выброшенные из групп, фрактальное распределение (размерность $D \approx 2$) гравитирующей материи на космологических масштабах [28].

Еще одна проблема динамики групп галактик — наличие так называемых «ископаемых» («fossil») групп, состоящих из гигантской галактики и большого числа карликовых галактик — спутников гигантской галактики. Салес и др. [29] используют Millennium моделирование с высоким пространственным разрешением для выделения «ископаемых» групп и изучения их структуры и кинематики. Показано, что распределение плотности карликовых галактик вокруг гигантских удовлетворяет универсальному закону Наварро и др. [17]. Движения спутников близки к радиальным. Спутники концентрируются к плоскости, ортогональной вектору углового момента гало гигантской галактики.

Обзор данных космологического моделирования с высоким разрешением (например, моделей *Via Lactea* [30]) показывает, что у нашей Галактики должно быть несколько сотен карликовых спутников (от ~ 300 до ~ 600 в пределах 400 кпк от центра Галактики, согласно [31]). Авторы [31] выражают надежду, что будущие обзоры позволят прояснить ситуацию с этими «недостающими» («missing») спутниками нашей Галактики.

Заключение

В заключении отметим, что группы галактик являются наиболее распространенными агрегатами галактик. Они органично вписываются в общее крупномасштабное распределение материи во Вселенной и отражают некоторые особенности эволюции Вселенной. Группы галактик, в частности, можно использовать для тестирования различных космологических моделей.

Работа была частично поддержана Президентской программой поддержки Ведущих научных школ — проект НШ-1323.2008.2.

Список литературы

1. *Ramella M., Geller M. J., Pisani A., da Costa L. N.* The UZC-SSRS2 group catalog // *Astron. J.* — 2002. — Vol. 123. — P. 2976.
2. *Huchra J. P., Geller M. J.* Groups of galaxies I. Nearby groups // *Astrophys. J.* — 1982. — Vol. 257. — P. 423.
3. *Orlov V. V., Petrova A. V., Tarantaev V. G.* The intrinsic shapes of galaxy groups // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2001. — Vol. 325. — P. 133.
4. *Plionis M., Basilakos S., Tovmassian H. M.* The shape of poor groups of galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 352. — P. 1323.
5. *Paz D. J., Lambas D. G., Padilla N., Merchán M.* Shapes of clusters and groups of galaxies: Comparison of model predictions with observations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 356. — P. 1503.
6. *Ragone-Figueroa C., Plionis M.* Environmental influences on the morphology and dynamics of group-sized haloes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 377. — P. 1785.

7. *Valtonen M., Byrd G. G., McCall M. L., Innanen K. A.* A revised history of the Local Group and a generalized method of timing // *Astron. J.* — 1993. — Vol. 105. — P. 886.
8. *van der Marel R. P., Guhathakurta P.* M31 transverse velocity and Local Group mass from satellite kinematics // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 678. — P. 187.
9. *Li Y.-S., White S. D. M.* Masses of the Local Group and the Milky Way // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 384. — P. 1459.
10. *Kiseleva L. G., Orlov V. V.* Dynamics of galaxy groups — Computer simulations versus observations // *Vistas Astron.* — 1993. — Vol. 36. — P. 1.
11. *Mamon G. A.* The dynamics of small groups of galaxies. I — Virialized groups // *Astrophys. J.* — 1987. — Vol. 321. — P. 622.
12. *Garcia-Gomez C., Athanassoula E., Garijo A.* Dynamical evolution of galaxy groups. A comparison of two approaches // *Astron. Astrophys.* — 1996. — Vol. 313. — P. 363.
13. *Aceves H., Velazquez H.* N-body simulations of small galaxy groups // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* — 2002. — Vol. 38. — P. 199.
14. *Hickson P.* Systematic properties of compact groups of galaxies // *Astrophys. J.* — 1982. — Vol. 255. — P. 382.
15. *Heisler J., Tremaine S., Bahcall J. N.* Estimating the masses of galaxy groups: alternatives to the virial theorem // *Astrophys. J.* — 1985. — Vol. 298. — P. 8.
16. *Bahcall N. A.* Clusters and superclusters of galaxies // *Formation of Structure in the Universe* / Ed. by A. Dekel, J. P. Ostriker. — Cambridge: Cambridge University Press, 1999. — P. 135.
17. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M.* Structure of cold dark matter halos // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 462. — P. 563.
18. *Chernin A. D., Karachentsev I. D., Valtonen M. J. et al.* The very local Hubble flow: simulating the transition from chaos to order // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 467. — P. 933.
19. *Peirani S., de Freitas Pacheco J. A.* Dynamics of nearby groups of galaxies: the role of the cosmological constant // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 488. — P. 845.
20. *Chernin A. D., Teerikorpi P., Karachentsev I. D. et al.* The nearby Universe: local estimators of dark matter and dark energy. — 2008. — In preparation.

21. *Tammann G. A., Sandage A., Reindl B.* The expansion field: the value of H // *Astron. Astrophys. Rev.* — 2008. — Vol. 15. — P. 289.
22. *Hoffman Y., Martinez-Vaquero L. A., Yepes G., Gottlober S.* The local Hubble flow: is it a manifestation of dark energy? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 386. — P. 390.
23. *Springel V., White S. D. M., Jenkins A. et al.* Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars // *Nature*. — 2005. — Vol. 435. — P. 629.
24. *Niemi S.-M., Nurmi P., Heinamaki P., Valtonen M.* Are the nearby groups of galaxies gravitationally bound objects? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 382. — P. 1864.
25. *Niemi S.-M., Valtonen M.* Origin of redshift asymmetries: How LambdaCDM explains anomalous redshift // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Submitted. arXiv: astro-ph/08113968.
26. *Pivato M. C., Padilla N. D., Lambas D. G.* Cluster infall in the concordance LambdaCDM model // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 373. — P. 1409.
27. *Whiting A. B.* You can't get there from here: Hubble relaxation in the Local Volume // *Astron. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1996.
28. *Raikov A. A., Orlov V. V.* Kinematics of galaxy groups: pressure of dark energy or dissipative fractal acceleration? // *Practical Cosmology* / Ed. by Y. Baryshev, I. N. Taganov, P. Teerikorpi. — St. Petersburg: TIN, 2007. — Vol. I. — P. 110.
29. *Sales L. V., Navarro J. F., Lambas D. G. et al.* Satellite galaxies and fossil groups in the Millennium simulation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 382. — P. 1901.
30. *Diemand J., Kuhlen M., Madau P.* Dark matter substructure and Gamma-Ray annihilation in the Milky Way halo // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 657. — P. 262.
31. *Tollerud E. J., Bullock J. S., Strigari L. E., Willman B.* Hundreds of Milky Way satellites? Luminosity bias in the satellite luminosity function // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 688. — P. 277.

ОПТОВОЛОКОННЫЕ СПЕКТРОГРАФЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Проведен обзор схем и конструкций оптоволоконных спектрографов высокого разрешения, разработанных для телескопов различных диаметров.

Введение

Телескопы с диаметром объектива $D = 0.6\text{--}2$ м являются массовыми инструментами наземной оптической астрономии. Совершенствование техники регистрации сигнала и достижения микрооптики позволяют сегодня использовать эти инструменты для широкого круга задач, в том числе и для наблюдений с высоким спектральным разрешением. При этом основным средством являются спектрографы скрещенной дисперсии, где пространственное разведение высоких спектральных порядков обеспечивается вторым диспергирующим элементом.

Когда классический спектрограф фокуса кудэ для 2.6 м телескопа ЗТШ еще не был завершен, в помещении кудэ уже работал первый в мире звездный спектрограф с эшеле [1]. Дифракционная решетка, изготовленная в ГОИ им. С. Вавилова, днем использовалась в спектрографе башенного солнечного телескопа, а ночью — в неподвижном фокусе ЗТШ.

Астрономы быстро освоили основное преимущество работы в высоких порядках дифракции: возможность получать высокое спектральное разрешение при скромных значениях диаметра коллимированного пучка d и, следовательно, при небольших габаритах прибора. Было построено несколько подвесных спектрографов фокуса Кассегрена, основным конструктивным решением являлась схема с близкими параметрами зеркального коллиматора и зеркальной камеры, с компенсацией астигматизма в большом поле [2]. Элементом скрещенной дисперсии являлась дифракционная решетка или призма, иногда необходимый спектральный порядок выделялся узкополосным фильтром. Почти полный перечень подвесных спектрогра-

фов, построенных для телескопов умеренных диаметров к первой половине 80-х, можно найти в [3]. Не вдаваясь в конструктивные особенности разных схем, отметим, что основным признаком, обеспечивающим успешное применение модифицированной схемы Черни—Тернера на спектрографе телескопа с $D \approx 0.6$ м, является небольшой масштаб изображения в фокусе Кассегрена, не требующий усилий по согласованию ширины входной щели и элемента разрешения светоприемника. Например, при масштабе около 23 угл. с в мм (телескоп с $D = 0.6$ м) щель кассегреновского спектрографа шириной 0.05 мм (1.1 угл. с) является согласованной с элементом разрешения светоприемника (0.05 мм). Так как относительные отверстия коллиматора и камеры равны (или близки), уже при $d = 50$ мм обеспечивается спектральное разрешение, достигающее $R = 40\,000$ — $70\,000$. Понятно, что с таким спектральным разрешением, на фотопластинке, а затем с ЭОП регистрировались только спектры звезд, видимых невооруженным глазом. Общим недостатком первого поколения спектрографов скрещенной дисперсии являлась сложная процедура извлечения информации их двумерного изображения эшелле спектра (необходимо было учитывать кривизну спектральных порядков, наклон изображения щели, аберрации электронной оптики и проч.).

Если речь идет об измерении интегральной интенсивности линии — эквивалентной ширины, то небольшие вариации формы линии, связанные с нестабильным положением изображения звезды на щели спектрографа, несущественны. Поэтому подвесные спектрографы используются и сегодня. Но если необходимо измерять точные положения спектральных линий или изучать их форму (например, асимметрию, вызванную конвективными движениями), то необходимо применять средства, стабилизирующие положение центра изображения звезды на входе спектрографа. Известно, что оптическое волокно более чем на порядок понижает нестабильность освещения входа спектрографа. Применение оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа решает и вторую проблему — сохранения жесткости оптико-механической схемы, как во время экспозиции, так и в течение нескольких лет эксплуатации прибора. Ниже упомянем основные разработки, условно разбивая их на три этапа.

Оптоволоконное сочетание телескопа и спектрографа, 80-е гг.

Первая удачная конструкция оптоволоконного спектрографа [4] была разработана для 1.6 м телескопа PennStateUniv. Схема использования эшеле $R2$ ($\tan \theta_b = 2$, размер заштрихованной области 200×100 мм, 79 штр/мм), имела два варианта:

- $R = 10\,000$, с камерой $f/2$ ($F = 200$ мм), с литтровской призмой скрещенной дисперсии;
- $R = 80\,000$, с камерой $f/5$ ($F = 762$ мм), с решеткой скрещенной дисперсии, 226 штр/мм.

Диаметр ядра оптоволокна составлял 200 мкм, что позволяло использовать изображение звезды диаметром 3.6 угл. с. В течение ночи стабильность измерения лучевой скорости составила 1 км/с.

Первый спектрограф [5] для 2.14 м телескопа Cananea, Mexico, изготовлен в Georgia State Univ. Сменные решетки (128×154 мм; 1 200, 400, 150 и 50 штр/мм) работают в схеме Эберта—Фасти, коллиматором и объективом являются части 300 мм параболоида ($f/3.3$, $F = 980$ мм). Изображение звезды проецируется на торец оптоволоконного жгута (34 оптоволокна, общий диаметр 300 мкм, соответствует 2.5 угл. с), на выходе торцы этих волокон выстроены в щель, соответствующую размеру 0.4 угл. с. Каждое волокно имеет диаметр 55 мкм, диаметр ядра 45 мкм (далее 55/45 мкм), потери на упаковке жгута и на пропускании 10-метрового волокна составляют 60 %.

Для 0.75 м ($f/8$) телескопа в Гейдельберге разработан компактный спектрограф [6], использующий оптоволокно 150/100 мкм. Зеркальный коллиматор $f/5$, эшеле $R2$ (110×220 мм, 31.6 штр/мм), решетка скрещенной дисперсии (165×135 мм, 300 штр/мм), камера ($f/2.8$, $F = 300$ мм). В лучших условиях эффективность системы «телескоп—спектрограф—светоприемник» не превышала 1 %. Позже спектрограф был перенесен в ESO, где на 0.5 м телескопе использовался для спектроскопического мониторинга горячих звезд.

Для программы спектроскопических наблюдений, выполняемых из двух обсерваторий, разнесенных по долготе (CFHT и ОНР), был разработан недорогой спектрограф ISIS [7]. Использовались волокна с диаметром ядра 133 или 200 мкм. Две сменные решетки (600 и 300 штр/мм) работали в схеме Черни—Тернера, обеспечивая $R = 35\,000$ или 10 000. Коллиматор параболический ($d = 160$ мм, $F = 600$ мм), камера сферическая ($d = 200$ мм, $F = 1\,000$ мм).

Известны примеры адаптации спектрографов, построенных ранее, под оптоволоконное сочетание с телескопом. Для измерений лучевых скоростей на 0.9 м телескопе LPL разработано [8] сочетание (оптоволоконно 125/200 мкм) со спектрографом, созданным ранее Серковским для наблюдений с интерферометром Фабри—Перо (ИФП). Для 1.5 м гарвардского телескопа разработано [9] сочетание со спектрографом, созданным ранее для фокуса Кассегрена. Оптоволоконно диаметром 100 мкм и длиной 13 м пропускало около 30 % света. Для 1.88 м телескопа DDO было создано оптоволоконное сочетание [10] с термостатируемым помещением «псевдокудэ», применены новый зеркальный редуктор светосилы и резатели Ричардсона. Для 3.6 м телескопа ESO испытывались оптоволоконные сочетания [11, 12] с кудэ-эшеле спектрометром CES. В [12] волокно диаметром 300 мкм сочеталось с резателем Боуэна—Вальравена, что позволило при $R = 72\,000$ за час экспозиции регистрировать фрагменты спектров звезд 11-й величины. Для спектрографа фокуса кудэ 2.1 м телескопа KPNO был сначала изготовлен 10-метровый перемешиватель апертуры (обеспечивший, при половинной потере света, точность измерения лучевой скорости 100 м/с, с разрешением $R = 12\,000$), а затем с 2.1 м телескопом использовался спектрограф [4].

Все телескопы, упомянутые в этом разделе, строились для обеспечения широкого круга наблюдательных программ. Применение оптоволоконного сочетания выдвигает требования к полю зрения, пониженные по сравнению с большинством других программ. Величина центрального экранирования вторичным зеркалом (или кабиной первичного фокуса) оказывается избыточной для спектроскопии одной звезды. Поэтому следующий шаг в развитии оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа должен был проявиться в разработке оптимальной конструкции телескопа. В Georgia State Univ. был создан мультителескопный телескоп (МТТ), состоящий из девяти телескопов диаметром 33 см каждый [13]. В фокусе каждого из зеркал ($f/4.4$) расположен оптоволоконный вход, девять волокон на выходе собраны в «щель», являющуюся входом в спектрограф [5]. Используются волокна диаметром 100 мкм, согласование апертур на входе (в диапазоне от $f/12$ до $f/6$) обеспечивается линзочками Барлоу, что соответствует использованию изображений диаметром от 5.25 до 10.5 угл. с. По светособирающей возможности МТТ эквивалентен классическому телескопу диаметром 1.3 м, но стоимость оптики МТТ в 30 раз ниже.

Первые из вышеперечисленных разработок стартовали в период, когда светоприемники были достаточно громоздкими (счетчики фотонов), это обстоятельство являлось дополнительным аргументом для стационарного размещения спектрографа. Общим признаком первого этапа является применение оптоволоконного сочетания спектрографов высокого разрешения с телескопами, построенными не для этой цели и являющимися многопрограммными. При этом использовались как уже существующие спектрографы, так и специально построенные (с диаметром коллимированного пучка в пределах 70—100 мм). Уже в первый период были созданы средства целенаправленного создания оптических волокон для астрономов, лабораторного испытания оптических волокон и проведен комплексный анализ оптоволоконной техники в задаче точного определения лучевых скоростей (см., например, [14–16]).

Спектрографы 90-х

В начале 90-х основной задачей, продвигающей разработку оптоволоконных спектрографов высокого разрешения, явилось создание нескольких одинаковых спектрографов, распределенных по длине. Такие наблюдения необходимы для изучения спектра нерадиальных пульсаций — одного из немногих средств диагностики внутреннего строения звезд. Был создан относительно недорогой спектрограф MUSICOS [17], предназначенный для трех телескопов диаметром около 2 м (Гавайи, Китай, Европа). Использовались: волокно диаметром 50 мкм, внеосевой параболический коллиматор ($d = 100$ мм), эшелле $R2$ (31.6 штр/мм), две сменные призмы скрещенной дисперсии (для диапазонов 3 800—5 400 и 5 400—8 800 Å), камера ($f/2.8$, $F = 400$ мм). На 2 м телескопе за час экспозиции от звезды 7-й величины, при изображениях 1 угл. с, получено $S/N = 320$ на 5 000 Å с $R = 34\,000$.

Для точных измерений доплеровских смещений на 1.5 м телескопе обсерватории им. Ф. Уиппла был создан спектрограф AFOE [18], название которого подчеркивает преимущество конструкции первого оптоволоконного спектрографа FOE [4] — «Advanced FOE». Оптоволокну диаметром 200 мкм захватывает изображение диаметром 2.75 угл. с. Компоненты спектрографа: внеосевой параболический ($F = 1\,200$ мм) в качестве коллиматора, эшелле $R2$ (100 × 200 мм, 59 штр/мм), решетка скрещенной дисперсии 150 штр/мм, камерой служит зеркало с двухлинзовым корректором в сходящемся пучке

(эффективное фокусное расстояние $F = 690$ мм, относительное отверстие для одной длины волны $f/4.5$). Известно еще одно применение камеры по схеме Росина — в спектрографе GECKO CFHT [19]. Основным новшеством в концепции AFOE является применение оптоволоконного коммутатора, позволяющего изменять функциональные назначения некоторых из семи оптических волокон. На AFOE были впервые обнаружены собственные неустойчивости модуля светоприемника.

Дальнейшее развитие схем оптоволоконных спектрографов сопровождалось увеличением d и увеличением угла блеска эшелю θ_b , то есть, переходом от $R2$ к $R3 - 4$. Использование таких значений ограничивает варианты ориентации решетки (при наклоне оси коллимированного пучка к главной плоскости эшелю развивается астигматизм). Поэтому применение эшелю $R3 - 4$ сочетается со схемой белого зрачка, впервые предложенной еще в начале 70-х [20]. В этой схеме используется дополнительный коллиматор, а в случае эшелю спектрографа — коллиматор двойного хода. Одновременное увеличение d и θ_b позволяет распространить технику оптоволоконного сочетания на телескопы большого диаметра.

Для 10 м телескопа спектроскопических обзоров (SST) был разработан проект оптоволоконного спектрографа высокого разрешения [21]. Спектрограф состоит из двух частей, оптимизированных для коротковолновой («синей») и длинноволновой («красной») области спектра. Компоненты схем: четыре внеосевых параболоида ($F = 2000$ мм, $d = 200$ мм), две эшелю $R4$ (204×816 мм), 31.6 и 41.6 штр/мм и камеры $F = 360$ мм, $F = 450$ мм для красной и синей области соответственно). Для 5 м телескопа был разработан оптоволоконный эшелю спектрограф [22]. Линзовый объектив ($f/3$, $F = 610$ мм) использовался в автоколлимационной схеме, разведение порядков осуществлялось призмой (60°) двойного хода, эшелю $R2$ (154×306 мм, 79 штр/мм). Оптоволокно диаметром 150 мкм и второе волокно, снабженное щелью 34 мкм, обеспечивали $R = 20\,000$ и $R = 100\,000$ соответственно. В варианте пониженного спектрального разрешения эффективность спектрографа достигала 5 %, за час экспозиции от звезды $V = 15^m$ получено $S/N = 75$ на 5500 \AA .

Наиболее удачным решением явилась схема спектрографа ELODIE [23], разработанного специально для точных измерений лучевых скоростей на 1.92 м телескопе обсерватории Верхнего Прованса (ОНР). Используются эшелю $R4$ (102×408 мм, 31 штр/мм), камера ($f/3$, $F = 300$ мм), коллиматор $f/15$. В качестве узла скре-

щенной дисперсии применены 40°-призма и гризма 150 штр/мм, что обеспечивает равномерное расстояние между всеми 67 порядками, регистрируемыми одновременно в диапазоне 3906—6811 Å. В 1998 г. вступила в строй улучшенная копия ELODIE — спектрограф CORALIE, для которого был специально создан 1.2 м телескоп «Эйлер», установленный в ESO (Ла Силья).

По схеме белого зрачка разработан спектрограф FOCES [24], используемый на 2.2 и 3.5 м телескопах обсерватории Калар Альто. Элементы схемы: коллиматоры ($F = 1524$ мм, $d = 254$ мм), эшелле $R2$ (150×340 мм, 31.6 штр/мм), две 33°-призмы, камера ($f/3$, $F = 300$ мм). Для работы с двумя волокнами предусмотрен ввод дополнительной гризмы.

В 1998 г. на 1.52 м телескопе ESO вступил в строй спектрограф FEROS [25–27], обладающий высокой эффективностью (15 % в видимом диапазоне). За два часа экспозиции достигается $S/N = 100$ от $V = 12^m$. Как и в ELODIE, выполняется одновременная регистрация спектра звезды и спектра сравнения, за счет этого точность определения лучевых скоростей составляет 20 м/с на шкале два месяца. Разрешение $R = 48\,000$ обеспечивается применением двойного резателя, установленного на выходе оптоволоконна. Спектрограф был затем перенесен на 2.2 м телескоп.

В 1998 г. был объявлен конкурс на создание оптоволоконного спектрографа 3.6 м телескопа ESO. Команда, выигравшая конкурс, получала по 100 ночей в первые 5 лет использования прибора для задач поиска внесолнечных планетных систем. Несмотря на привлекательность условий, на конкурс была подана всего одна заявка! Спектрограф HARPS [28], вступивший в строй в 2002 г., отличается рекордными характеристиками: одновременно регистрируемый диапазон 3800—6800 Å, $R = 90\,000$, пик эффективности 6 %. Поверхности внеосевых коллиматоров размещены на 700 мм параболе, $F = 1500$ мм, диаметр коллимированного пучка $d = 200$ мм. Эшелле $R4$, (214×840 мм, 31.6 штр/мм), в качестве элемента скрещенной дисперсии используется гризма (диаметр 220 мм, 240 штр/мм). Камера $f/3.8$, $F = 760$ мм. Используются два оптоволоконна (спектры звезды и лампы сравнения) диаметром по 100 мкм, что соответствует 1 угл. с. Эффективность спектрографа в значительной мере определяется устройством (CFA) удержания звезды на входе оптоволоконна. Отметим, что HARPS, разработанный для поиска планет, имеет

большой спрос в задачах изучения абсорбционных систем в спектрах ярких квазаров и в задачах астеросейсмологии, где проводится поиск малоамплитудных изменений лучевой скорости.

Одновременно с проектом HARPS выполнена работа [29] по оптоволоконному сочетанию спектрографа GECKO с телескопом CFHT. Определяющую роль здесь играет кассегреновский адаптер CAFE, где, в частности, размещен вход в оптоволоконно (диаметр ядра 100 мкм). На выходе оптоволоконной длиной 27 м используется резатель Боуэна—Вальравена, на четыре среза.

Общие признаки конструкций, созданных в 90-х: появление монопрограммных телескопов (проекты ELODIE, CORALIE, HARPS). Стоимость спектрографов настолько возросла, что представляется неэкономичным его использование со второстепенным статусом на данном телескопе, в течение одного-двух месяцев в год. Спектрографы разрабатывались под конкретную задачу, но получают расширенный спрос. В 90-е была решена сложная задача переноса оптоволоконной спектроскопии высокого разрешения на крупнейшие телескопы.

Оптоволоконные спектрографы начала XXI века

Не имея возможности перечислить все конструкции, разработанные в последние несколько лет для телескопов средних диаметров, упомянем оптоволоконный эшелле спектрограф HERCULES для 1 м телескопа обсерватории Маунт Джон [30]. Используется эшелле $R2$, (204×408 мм, 31.6 штр/мм), параболический коллиматор ($F = 783$ мм, $d = 210$ мм), 50° -призма скрещенной дисперсии двойного хода, камера «ломаный Шмидт» ($F = 973$ мм, корректор $d = 525$ мм). Как и HARPS, спектрограф помещен в замкнутый объем (труба длиной 4.5 м), в котором поддерживается низкое давление.

В последние годы появилось несколько специализированных телескопов, имеющих оптоволоконное сочетание со спектрографом высокого разрешения. Некоторые из этих инструментов управляются дистанционно или работают в автоматическом режиме. Информацию о таких системах можно найти по адресу: astrospectra.narod.ru/

В CAO РАН начата работа по созданию оптоволоконного спектрополяриметра высокого разрешения для 6 м телескопа БТА, см. ales.sao.ru/Projects/FibSpBTA.files/v3_document.html. В качестве прототипа мы разработали спектрограф с диаметром коллимированного пучка $d = 100$ мм.

Список литературы

1. *Копылов И. М., Стещенко Н. В.* // Изв. КрАО. — 1965. — Т. 33. — С. 308.
2. *Schroeder D. J.* // Appl. Opt. — 1967. — Vol. 6. — P. 1976.
3. *Hearnshaw J. B.* // In IAU Symp. No 118, «Instrumentation and Research Programmes for Small Telescopes». — 1985. — P. 371.
4. *Ramsey L. W., Huenemoerder D. P.* // Proc. SPIE. — 1986. — Vol. 627. — P. 282.
5. *Furenlid I., Cardona O.* // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1988. — Vol. 100. — P. 1001.
6. *Mandel H.* // In IAU Symp. No 132, «The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics». — 1988. — P. 9.
7. *Felenbok P., Guerin J.* // In IAU Symp. No 132, «The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics». — 1988. — P. 31.
8. *McMillan R., Perry M. L., Smith P. H., Merline W. J.* // ASP Conf. Ser. — 1988. — Vol. 3. — P. 237.
9. *Latham D. W., Andersen J., Geary J. C., Stefanik R. P.* // ASP Conf. Ser. — 1988. — Vol. 3. — P. 269.
10. *Kamper K. W.* // ASP Conf. Ser. — 1988. — Vol. 3. — P. 277.
11. *Lund G., Ferlet R.* // Messenger. — Vol. 36. — P. 2.
12. *Avila G.* // ASP Conf. Ser. — 1988. — Vol. 3. — P. 63.
13. *Bagnuolo W. G., Furenlid I. K., Gies D. R. et al.* // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1990. — Vol. 102. — P. 604.
14. *Nelson G. W.* // ASP Conf. Ser. — 1988. — Vol. 3. — P. 2.
15. *Ramsey L. W.* // ASP Conf. Ser. — 1988. — Vol. 3. — P. 26.
16. *Heacox W. D.* // ASP Conf. Ser. — 1988. — Vol. 3. — P. 204.
17. *Baudrand J., Boehm T.* // Astron. Astrophys. — 1992. — Vol. 259. — P. 711.
18. *Brown T. M., Noyes R. W., Nisenson P. et al.* // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1994. — Vol. 106. — P. 1285.

19. *Richardson E. H.* // Proc. SPIE. — 1990. — Vol. 1235. — P. 577.
20. In «Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes». Proc. ESO-CERN Conf. Eds. S.Lautsen, A.Reiz. — 1972. — P. 227.
21. *Tull R. G.* // Proc. SPIE. — 1994. — Vol. 2198. — P. 674.
22. *Libbrecht K. G., Peri M. L.* // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1995. — Vol. 107. — P. 62.
23. *Baranne A., Queloz D., Mayor M. et al.* // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1996. — Vol. 119. — P. 373.
24. *Pfeiffer M. J., Frank C., Baumuller D. et al.* // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — Vol. 130. — P. 381.
25. *Kaufer A., Pasquini L., et al.* // Proc. SPIE. — 1998. — Vol. 3355. — P. 844.
26. *Kaufer A., Stahl O., Tubbesing S. et al.* // Messenger. — 1999. — Vol. 95. — P. 8.
27. *Kaufer A., Stahl O., Tubbesing S. et al.* // Proc. SPIE. — Vol. 4008. — P. 459.
28. *Pepe F., Mayor M., Delabre B. et al.* // Proc. SPIE. — 2000. — Vol. 4008. — P. 582.
29. *Baudrand J., Vitry R.* // Proc. SPIE. — 2000. — Vol. 4008. — P. 182.
30. *Hearnshaw J. B., Barnes S. I., Kershaw G. M. et al.* // Experimental Astron. — 2002. — Vol. 13. — P. 59.

М. Е. Прохоров, А. И. Захаров, А. В. Миронов,
Ф. Н. Николаев, М. С. Тучин
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга

СОВРЕМЕННЫЕ ДАТЧИКИ ЗВЕЗДНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

В работе рассмотрены требования, которые ставятся перед системами астроориентации (звездными датчиками) нового поколения. Основным из них является высокая точность определения ориентации — $0.1\text{--}0.01''$ — при высокой скорости обновления информации. Рассмотрены возможные пути достижения подобных точностей.

In work requirements which are put before astroorientation systems (star gauges) new generation are considered. The most important of them is the very high precision of orientation — $0.1\text{--}0.01''$ — on high speed of updating of the information. Possible ways of achievement similar precision are considered.

Введение

В развитии астроориентации можно выделить несколько этапов. Нулевым или «доисторическим» является использование визуальной ориентации по звездам. Особое значение она приобретала при отсутствии четких ориентиров на местности: у кочевых народов и в мореплавании. Позднее появились приборы для более точных измерений: секстанты, астролэбии и т. п. Подобные навыки и методы навигации используются до сих пор.

Первый технический этап развития астроориентации настал с появлением летательных аппаратов (ЛА). Очень скоро основой их систем ориентации стали гирокомпасы. Эти системы не позволяли длительное время удерживать ориентацию ЛА из-за так называемого ухода гироскопов — их прецессии под действием неполностью учтенных внешних сил. Контроль ухода осуществлялся с помощью звездных датчиков (ЗД). Это поколение приборов астроориентации работало по нескольким ярким звездам с известным положениями. Подобные датчики, как правило, имели систему наведения на яркий объект и систему удержания направления на захваченный объект.

© М. Е. Прохоров, А. И. Захаров, А. В. Миронов, Ф. Н. Николаев,
М. С. Тучин, 2009

На следующем этапе подобные ЗД появились на борту космических аппаратов (КА) и ракет. Они использовались с самого начала космической эры — уже на корабле «Восток» они были применены для выравнивания КА вдоль орбиты. Информация от большинства приборов этого поколения не обрабатывалась на борту КА, а передавалась на землю в общем потоке телеметрии. Ориентация вычислялась на земле и затем сообщалась на борт.

Последний этап развития указанных приборов наступил с появлением матричных приемников излучения: ПЗС и КМОП матриц. Такие ЗД привязываются не к отдельным, заранее определенным звездам, а определяют свою ориентацию по изображениям всех звезд, видимых в поле зрения прибора. Остальная часть статьи посвящена ЗД именно этого класса.

Принципы работы звездных датчиков

Функционирование звездного датчика происходит следующим образом. Оптическая система — объектив ЗД — строит изображение участка звездного неба на ПЗС-приемнике, расположенном в фокальной плоскости. Приемник некоторое время накапливает излучение, а затем передает получившееся изображение на обработку. Блок электроники ЗД или бортовая система управления КА должны проделать над полученным изображением следующие действия:

- произвести поиск изображений звезд на изображении фрагмента неба;
- для найденных звезд получить оценки координат их центров на ПЗС-матрице и оценки блеска;
- произвести отождествление конфигурации звезд в поле зрения ЗД со звездами из бортового каталога с учетом помех;
- определить углы ориентации ЗД и оценить их погрешности;
- сделать прогноз входа и выхода звезд из поля зрения.

В результате этой процедуры мы получаем трехосную абсолютную ориентацию ЗД (и, следовательно, аппарата, на котором он установлен), определенную относительно инерциальной системы координат, связанной со звездами. Объем необходимых вычислений очень сильно зависит от предварительной информации об ориентации ЗД. Самой длительной будет полная процедура восстановления ориентации, когда априорная информация отсутствует: такая процедура выполняется при включении системы ЗД или при потере ориентации.

В ходе ее полученная на изображении конфигурация звезд сравнивается с конфигурациями звезд бортового каталога на всем небе. Если ориентация ЗД в пространстве приблизительно известна, например, по предыдущим измерениям проведенным ЗД, то чем точнее эта информация, тем быстрее можно определить новую ориентацию ЗД. К последней процедуре также применяется термин «уточнение ориентации».

Процедура отождествления групп звезд на изображении со звездами в бортовом каталоге самая алгоритмически сложная часть процедуры определения ориентации. Дело в том, что в каталог не включаются двойные и переменные звезды, кроме того, их число ограничивается: при любой ориентации ЗД в его поле зрения должно попадать достаточное для отождествления количество звезд каталога (см. ниже); дальнейшее увеличение объема бортового каталога не улучшает точность ориентации, но замедляет выполнение процедуры и требует больших ресурсов. Таким образом, в поле зрения могут присутствовать помехи — звездообразные изображения, не имеющие соответствия в каталоге. Помехи создают изображения звезд, не включенных в каталог, тела Солнечной системы, искусственные спутники Земли, освещенные Солнцем пылинки вблизи объектива ЗД, астрофизические транзиенты (вспыхивающие звезды, гамма-всплески, гравитационные микролинзы). Другим источником помех могут быть космические лучи, попадающие на матрицу фотоприемника. Процедура отождествления должна устойчиво функционировать в присутствии помех. Проверенный алгоритм отождествления, устойчиво функционирующий при наличии помех, опубликован в [1], обсуждение других алгоритмов приведено в [2].

В некоторых случаях нас может интересовать не абсолютная, а относительная ориентация ЗД. То есть не ориентация относительно инерциальной системы координат, а изменение ориентации ЗД относительно некоторого его начального положения. В этом случае бортовой каталог звезд не требуется, а отождествляются между собой конфигурации звезд на двух сравниваемых изображениях.

Принципы работы звездных датчиков с ПЗС приемниками

Рассмотрим принципы работы ЗД с фотоприемником на ПЗС-матрице.

Изображение визируемой звезды формируется объективом в плоскости светочувствительных элементов матрицы ПЗС, установленной вблизи фокальной плоскости объектива. В современных ЗД изображение звезды, создаваемое оптической системой, меньше размера пикселя, поэтому для более точного определения координат энергетического центра звезды ее изображение дефокусируется так, чтобы световой поток от нее занял несколько пикселей матрицы ПЗС. Свет, попадая на кремниевую подложку матрицы ПЗС, генерирует пару электрон—дырка. Система электродов ПЗС обеспечивает создание в кристалле кремния потенциальных ям, в которых скапливаются генерируемые электроны, образуя зарядовые пакеты. Область матрицы, в которой располагается зарядовый пакет, и является пикселем. В процессе считывания зарядовые пакеты переносятся вдоль столбцов матрицы ПЗС системой электродов к считывающему регистру. После считывания напряжение с пикселя усиливается, затем оцифровывается аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). В современных датчиках используются 12—16-разрядные АЦП. Оцифрованные отсчеты пикселей поступают для дальнейшей обработки в процессор ЗД.

Матрицы ПЗС делятся на два типа в зависимости от того, с какой стороны кремниевого кристалла расположены управляющие переносом заряда электроды.

В ПЗС с прямой засветкой электроды из полупрозрачного поликристаллического кремния нанесены со стороны, на которую падает свет при экспозиции. Свет, проходя такие электроды, поглощается ими и ослабевает. В результате квантовая эффективность прибора снижается примерно вдвое. Кроме того, нанесение электродов на фоточувствительную сторону кристалла кремния приводит к большой неоднородности чувствительности в пределах пикселя. Это обстоятельство не позволяет получать координаты фотоцентра с погрешностью менее трети размера пикселя в смысле среднеквадратичного отклонения.

ПЗС с обратной засветкой свободны от этих недостатков. Однако они дороже и сложнее в изготовлении.

Важным параметром, от которого зависит точность определения координат центров изображений звезд в поле зрения ЗД, является отношение характерного размера изображения точечного источника к размеру пикселей матрицы ПЗС. В условиях шумов погрешность определения координат достигает минимума, когда указанное отношение близко к 2 [3].

Для получения высокоточной фотометрической и координатной информации при обработке сигнала от ПЗС необходимо учитывать неоднородность чувствительности, байес¹, фон и геометрические искажения [4]. Все перечисленное — обычные процедуры при применении ПЗС в астрономии. В современных ЗД подобный учет не производится в целях экономии памяти и ресурсов процессора.

Фон при малых экспозициях определяется в основном термодегенерацией электронно-дырочных пар в кристалле кремния. Этот фон сильно зависит от температуры кристалла. Типичная зависимость — удвоение термодегенерации на каждые 5° повышения температуры. Фон снижает отношение сигнала к шуму, поэтому необходимо предпринимать меры для его уменьшения.

Важным параметром современных фотоприемников на ПЗС является шум считывания, первая часть которого — потенциал, возникающий в выходном усилителе после сброса заряда от предыдущего пикселя. С этим эффектом борются методом двойной коррелированной выборки — вычитанием запомненного сигнала после сброса заряда из сигнала от пикселя. Вторая часть — шум усилительного полевого транзистора. Этот шум зависит от частоты считывания пикселей: чем выше частота чтения, тем больше эта составляющая. Следовательно, для увеличения отношения сигнал/шум необходимо понижать частоту считывания.

Ясно, что использование ПЗС матриц большого формата приводит к снижению частоты обновления информации об ориентации.

Области применения звездных датчиков

Основными задачами, которые решаются системами ориентации космических и летательных аппаратов, являются:

- 1) собственно определение ориентации датчика — трех углов поворота относительно некоторой системы координат;

¹Байесом называют сигнал при нулевой экспозиции кадра. Он, как правило, содержит различные наводки в тракте усиления и оцифровки сигнала.

- 2) наведение некоторого устройства, установленного на ЛА, — антенны, солнечной батареи, пушки — в заданное направление. Эта задача близка к предыдущей, но требует точного перенесения ориентации от ЗД к устройству;
- 3) нанесение на некоторое изображение например, изображение Земли, координатной сетки. Это типичная задача дистанционного зондирования Земли.

Дополнительными, но очень важными требованиями к перечисленным задачам являются точность определения координат, время за которое эти координаты определяются, а также предельные скорости вращения ЛА, при которых ЗД остается работоспособным.

Характеристики современных звездных датчиков

Ряд фирм как в России, так и за рубежом серийно производят и поставляют датчики астроориентации. Обычно эти производители предлагают линейку ЗД с различными характеристиками для разных применений. Для иллюстрации выберем несколько современных наиболее точных ЗД отечественного и иностранного производства. Их характеристики приведены в табл. 1.

Рассмотрим типичные характеристики ЗД, приведенных в табл. 1. Основной частью всех этих ЗД является оптическая головка, состоящая из объектива с блендой и матрицы ПЗС. Объектив формирует на ПЗС изображение звездного неба. Конфигурация звезд на этом изображении отождествляется с каталогом, после чего выполняется привязка направления оптической оси ЗД к небесным координатам, а также (с меньшей точностью) определяется поворот вокруг этой оси. Точность прибора связана с погрешностью определения координат звезды на матрице ПЗС и числом звезд в поле его зрения.

Во всех современных ЗД используются так называемые ПЗС с прямой засветкой. В этих ПЗС излучение проходит через систему полупрозрачных электродов на поверхности фоточувствительного кристалла кремния, поэтому из-за высокой неоднородности чувствительности в пределах пикселя невозможно рассчитывать на погрешность определения положения звезды, меньшую, чем $1/3$ пикселя.

Для датчика БОКЗ (ИКИ, Россия) эта погрешность составляет $18''$. Уточнение положения оси визирования происходит за счет большого числа звезд. Среднее число звезд бортового каталога, по-

Таблица 1. Основные характеристики современных датчиков звездной ориентации

Производитель	ИКИ РАН Россия	МОКБ «Марс» Россия	Sodern Франция
Наименование	БОКЗ-М	АД-1	SED26
Габариты, мм	$374 \times 235 \times 236$	$235 \times 235 \times 423$	$360 \times 200 \times 215$
Вес, кг	4.15	3.65	3.5
Диаметр входного зрачка объектива, мм	24	25.6	20
Фокусное расстояние, мм	60	52	28.8
Относительное отверстие	1:2.5	1:2	1:1.44
Поле зрения, град.	8	18	25
Площадь поля зрения, кв. град.	60	163	483
Матрица ПЗС:			
формат	512×512	512×512	1024×1024
размер пикселя, мкм	16×16	23×23	13×13
угловой размер пикселя	$55'' \times 55''$	$91'' \times 91''$	$93'' \times 93''$
Каталог ЗД:			
число звезд	8500	3500	2000
предельная звездная величина	7.5^m [†]	6^m	4.5^m
Максимальная уг- ловая скорость ω , $^\circ/\text{с}$	0.3	нет данных	20
Погрешности ориен- тации $\sigma_x, \sigma_y/\sigma_z$ (для разных ω)	$3''/15''$ ($\omega < 0.36''/\text{с}$) $6''/30''$ ($\omega < 300''/\text{с}$)	$15''/60''$	$5''/25''$ ($\omega < 0.5^\circ/\text{с}$) систематич. до $11''/19''$
Частота обновления информации, Гц	0.3	0.5	1–8

[†] Используется каталог звезд в фотометрической полосе, отличной от спектральной полосы прибора.

падающих в поле зрения, составляет примерно 12. Следовательно, после усреднения их координат мы можем рассчитывать на улучшение точности примерно в три раза по сравнению с погрешностью измерений отдельной звезды. Усреднение четырех последовательных измерений позволяет довести погрешность до заявленной в табл. 1.

Аналогичные расчеты показывают, что погрешность однократного измерения в приборе SED26 (Sodern, Франция) составит $6.9''$, следовательно, заявленной точности можно достигнуть после двукратного измерения, что согласуется с описанием этого датчика.

Следует отметить, что заявленная точность в этих двух примерах достигается на частоте работы, в несколько раз ниже максимальной для каждого из приборов. Однако, учитывая, что число звезд в поле зрения существенно больше, чем содержится в бортовых каталогах, удержание КА в трехосной ориентации в принципе может производиться с более высокой точностью.

Из табл. 1 также видно, что все перечисленные в ней приборы обладают сходными конструкциями. Большое поле зрения ЗД определяет малое фокусное расстояние объектива. Из ограничения на относительное отверстие вытекает малый диаметр входного зрачка объектива. Таким образом, все эти ЗД снабжены небольшими короткофокусными линзовыми¹ объективами с малыми диаметрами входных зрачков. Дифракционный размер изображения звезд в этих ЗД меньше размера пикселей ПЗС, угловой размер которых достигает угловой минуты и даже более. Такие конструктивные решения ограничивают достижимую точность ЗД.

Сегодняшние требования к системам астронавигации

Приведем несколько задач, которые сегодня ставятся перед разработчиками космических аппаратов, и покажем какие требования они предъявляют к ЗД нового поколения.

В ближайшее время предполагается использование лазеров в качестве передатчиков информации как с орбиты на землю, так и между КА. Использование маломощных лазеров с малыми углами расхождения лучей требует наведения передатчика на приемник и его удержание с точностью лучше $0.5''$.

¹Для зеркальных объективов ограничения на относительное отверстие еще более сильные.

Современная метеорология требует получения карт облачного покрова Земли с разрешением 10 м. Для геостационарных метеоспутников это соответствует разрешению и точности ориентации не хуже $0.05''$.

Системы ориентации на быстро маневрирующих КА и малых ЛА должны определять их ориентацию не реже чем 10 раз в секунду с точностями не хуже $0.1-1''$.

Отдельно стоит задача разработки ЗД, который функционировал бы в широком диапазоне угловых скоростей вращения аппарата, от 0 до одного оборота в несколько секунд, и при этом обеспечивал бы высокую точность ориентации при малых скоростях вращения и умеренную — при больших.

Таким образом, датчики нового поколения должны обеспечивать:

- 1) точность определения ориентации ЛА $0.1-0.01''$;
- 2) время обновления навигационной информации 10—100 мс;
- 5) определение координат и угловых скоростей при скоростях вращения ЛА до $15-30^\circ/\text{с}$.

В принципе все эти требования могут предъявляться одновременно. Однако сочетание требования точности с другими требованиями приводит к их ужесточению. Например, увеличение скорости вращения ЛА приводит к смазу изображения в фокальной плоскости, следовательно, к ухудшению отношения сигнал/шум для регистрируемых звезд и повышению погрешности определения ориентации. Уменьшение времени обновления информации приводит к сокращению длительности экспозиции звезд, что также приводит к увеличению погрешностей. Большие скорости вращения ЛА требуют либо увеличения поля зрения, либо уменьшения длительности экспозиции.

Как видно из предыдущего раздела, производящиеся сегодня звездные датчики по всем своим характеристикам примерно на порядок недотягивают до предъявляемых требований.

Повышение точности звездных датчиков

Основной задачей, поставленной перед ЗД нового поколения, является повышение точности определения координат при высокой скорости опроса. Для этого в их конструкцию и функционирование требуется внести следующие изменения:

- *уменьшить угловой размер пикселя*, для чего необходимо перейти к большим фокусным расстояниям, следовательно, к меньшим полям зрения и наблюдению более слабых звезд (ярких в узком поле зрения просто не будет);
- перейти к измерению положения центров звезд на ПЗС-матрице *с точностью лучше 0.1 пикселя*, для чего необходимо:
 - *уменьшить неоднородность чувствительности ПЗС-матриц по полю* с помощью использования физически более однородных матриц с обратной засветкой и стандартного набора процедур фотометрической калибровки изображения: учета горячих и холодных пикселей, вычитания байеса (подложки), приведения к плоскому полю [3, 5];
 - *увеличить отношение сигнал/шум для звезд на ПЗС-матрице*, для чего необходимо использовать оптику большего диаметра и более чувствительные матрицы (с обратной засветкой и просветление) и охлаждение для снижения шумов.

Покажем, от чего зависят погрешности определения координат и время обновления информации об ориентации ЛА. Вот некоторые соотношения между основными характеристиками ЗД и параметрами звезд на небесной сфере.

Погрешности измерения координат звезды σ на матрице ПЗС ЗД определяются угловым размером пикселя θ и отношением сигнала к шуму S/N измеренной звезды [3]:

$$\sigma \propto \frac{\theta}{S/N}. \quad (1)$$

Это соотношение справедливо лишь при высокой однородности чувствительности ПЗС в масштабе пикселя, т. е. только для матриц с обратной засветкой. При условии, что характерный размер изображения составляет 2–3 пикселя, коэффициент пропорциональности в приведенной формуле близок к единице.

В свою очередь, угловой размер пикселя θ связан с его линейным размером d и фокусным расстоянием объектива ЗД F следующим соотношением:

$$\theta = \frac{d}{F}. \quad (2)$$

Таким образом,

$$\sigma \propto \frac{d}{F \cdot S/N}.$$

Отношение сигнал/шум S/N зависит от шумов ПЗС, тепловых шумов и квантового шума сигнала от звезды [4]:

$$S/N = \frac{N_* \tau}{\sqrt{(N_* + k N_{bg}) \tau + k \varepsilon^2}}, \quad (3)$$

где N_{bg} [!] — поток электронов от фона в пикселе ПЗС; N_* — поток электронов от звезды; τ — длительность экспозиции; ε^2 — дисперсия шума считывания ПЗС; k — число пикселей, в которые попало излучение звезды. Видно, что для ярких звезд $S/N \propto \sqrt{N_*}$, а для слабых $S/N \propto N_*$.

Поток зарегистрированных фотоэлектронов от звезды N_* зависит от площади входного зрачка объектива ЗД:

$$N_* = \xi F_* = \xi \pi \frac{D^2}{4} f_*, \quad (4)$$

где ξ — квантовая эффективность аппаратуры; D — диаметр входного зрачка; F_* — поток фотонов, падающий на входной зрачок; f_* — освещенность, создаваемая звездой. Последние две величины могут быть выражены через звездную величину наблюдаемой звезды:

$$m_* = -2.5 \lg \frac{F_*}{F(m=0)} = -2.5 \lg \frac{f_*}{f(m=0)},$$

где $F(m=0)$ и $f(m=0)$ соответственно поток и освещенность, создаваемые звездой нулевой звездной величины [6].

Теперь рассмотрим вопрос о том, сколько звезд достаточной яркости необходимо иметь внутри поля зрения для нормального функционирования ЗД.

Для определения ориентации ЛА достаточно двух^{!!} отождествленных звезд с требуемым^{!!!} уровнем S/N . Если в поле зрения находятся более двух отождествленных звезд, то по ним мы можем

[!] N_{BG} определяется, в основном, термогенерацией электронов в кремнии; зависит от температуры кристалла ПЗС.

^{!!} Для определения ориентации ЗД необходимо получить значения трех величин: центра поля зрения и поворота вокруг оси визирования. Две и более отождествленные звезды дают необходимое число параметров, одной недостаточно.

^{!!!} Таковым считается значение S/N , при котором координаты центров каждой из звезд определяются с погрешностью, не хуже требуемой для функционирования ЗД.

оценить погрешности (невязки) ориентации или повысить точность ее определения с помощью усреднения.

По звездам какой величины должен работать датчик, чтобы в его поле зрения всегда находилось минимально необходимое количество n_* отождествленных звезд?

В небольшом поле зрения звезды распределены случайно по закону Пуассона

$$p(k) = \frac{\bar{n}_*^k}{k!} \exp(-\bar{n}_*) , \quad (5)$$

где $p(k)$ — вероятность появления в поле зрения k звезд; \bar{n}_* — среднее число звезд в поле зрения, которое равно произведению его площади на среднюю плотность звезд в данной области неба. Тогда вероятность χ того, что при таком распределении в поле зрения будет наблюдаться не менее n_* , задается уравнением

$$\chi = 1 - \exp(-\bar{n}_*) \times \left(1 + \sum_{k=1}^{n_*-1} \frac{\bar{n}_*^k}{k!} \right) . \quad (6)$$

Это уравнение легко решается относительно \bar{n}_* методом простых итераций. Так, для двух и более звезд $n_* = 2$ в поле зрения ЗД и вероятности $\chi = 0.997$ (3σ) получаем необходимое среднее число звезд в поле зрения $\bar{n}_* \approx 8$.

Средняя плотность звезд в различных областях неба оценивается с помощью звездных подсчетов по фотометрическим каталогам, полным до весьма слабых звезд. Приведенные в них величины звезд в различных полосах предварительно пересчитываются в полосу спектральной чувствительности матрицы ПЗС датчика. Результаты, полученные для типичной кривой спектральной чувствительности ПЗС с обратной засветкой с красным просветлением, приведены в табл. 2.

Используя полученные соотношения из требуемой средней плотности звезд \bar{n}_* в областях полюсов Галактики можно рассчитать, какая предельная звездная величина требуется для бесперебойной работы ЗД, а также определить, какая максимальная погрешность ориентации будет иметь место при минимальном числе звезд в кадре ЗД.

Сформулируем ограничения, которые должны выполняться для достижения требуемых точности ориентации и быстродействия ЗД.

Таблица 2. Количество звезд ярче заданной величины на квадратном градусе

Звездная величина	Средняя плотность звезд		
	Всё небо	Полюс Галактики	Центр Галактики
5.0	0.05	0.04	0.08
6.0	0.15	0.13	0.32
7.0	0.47	0.35	1.32
8.0	1.53	0.88	4.51
9.0	4.10	1.99	12.8
10.0	10.4	4.68	33.2
11.0	25.5	10.6	80.0
12.0	61.2	23.2	192
13.0	139	47.6	446
14.0	297	91.2	968

Время накопления τ_{\max} , ограниченное скоростью обновления информации, и требуемое отношение сигнала к шуму S/N задают предельную звездную величину

$$m_{\lim} = -2.5 \lg \frac{F_*}{f(m=0)_{\tau_{\max}} (\pi D^2/4)}, \quad (7)$$

где число зарегистрированных фотонов от звезды F_* определяется соотношением

$$\xi F_* = N_* \geq (S/N)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 4k(\varepsilon^2 + \tau N_{bg})(S/N)^{-2}}}{2\tau}.$$

На объектив ЗД накладываются следующие технологические ограничения:

- относительное отверстие не больше 1:2:

$$F > 2D;$$

- ограничение размера поля зрения в ($\psi \approx 2.2^\circ$), связанное с уменьшением aberrаций, задает минимальную величину фокусного расстояния

$$F > \frac{\sqrt{2} M d}{\psi},$$

где M — число пикселей по каждой стороне ПЗС матрицы (формат $M \times M$).

Следующее ограничение связано с размером дифракционного изображения точечного источника. Оптимальным размером изображения для определения координат его центра является размер (диаметр) в $p = 1.5\text{--}2$ пикселя [3]. Дифракционное изображение не должно превышать эту величину¹:

$$\frac{2.44\lambda}{D} \frac{F}{d} < p,$$

здесь λ — длина волны. Ниже мы будем полагать $p = 2$.

Далее, зная максимально допустимую погрешность определения ориентации σ , можно найти минимальное число звезд n_* с отношением сигнала к шуму не хуже S/N :

$$\sigma > C_\sigma \frac{d}{F} (S/N)^{-1} (2n_* - n_{par})^{-1/2}$$

или

$$n_* > \frac{1}{2} \left[\left(\frac{C_\sigma d}{\sigma F \cdot (S/N)} \right)^2 + n_{par} \right], \quad (8)$$

где n_{par} — число определяемых параметров ($n_{par} = 3$); C_σ — близкий к единице безразмерный коэффициент, зависящий от профиля изображения точечного источника излучения в объективе (далее полагаем $C_\sigma = 1$).

Число звезд на матрице и в бортовом каталоге при использовании звезд предельной звездной величины, определяемой S/N и τ_{\max} , должно быть больше этого значения.

Число звезд на матрице определяется плотностью звезд на небе и предельной звездной величиной. Плотность звезд зависит от направления объектива ЗД. Минимум плотности звезд достигается в полюсах Галактики.

$$\bar{n}_* \geq \bar{n}_{GPole}(m_{\lim}) \Omega = \bar{n}_{GPole}(m_{\lim}) \left(\frac{Md}{F} \right)^2,$$

где $\Omega = (Md/F)^2$ — телесный угол, занимаемый проекцией ПЗС на небе ($1 \text{ ср} = 3282.8 \text{ кв. град.}$); $\bar{n}_{GPole}(m_{\lim})$ — плотность звезд для звездной величины ярче m_{\lim} в направлении полюса Галактики (табл. 2).

¹В случае когда дифракционный размер изображения меньше оптимального, его можно дефокусировать.

Таблица 3. Параметры возможных вариантов высокоточных ЗД

Параметры ЗД	Номер варианта			
	1	2	3	4
Диаметр входного зрачка D , мм	50	100	100	200
Фокусное расстояние F , мм	500	500	1000	1000
Формат матрицы $M \times M$	1024	1024	2048	2048
Размер пикселя d , мкм	12	20	12	12
Телесный угол, на который проецируется ПЗС Ω , кв. град.	2	5.5	2	2
Предельная зв. величина m_{lim}	10.6	12.1	12.1	13.6
Среднее число звезд в поле зрения в полюсе Галактики \bar{n}_*	15	36	6	6

Мы рассчитали несколько различных конструктивных решений для ЗД, полученных решением системы вышеописанных неравенств и удовлетворяющих следующим основным требованиям: погрешность определения ориентации не более $0.1''$; частота обновления информации об ориентации не менее 10 Гц. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

В варианте 1 изредка могут попадаться звездные поля, содержащие меньше звезд, чем необходимо. В вариантах 3 и 4 точность ориентации может достигать сотых долей угловой секунды.

Внимание! Для абсолютной ориентации с точностью $0.1''$ и лучше нужны астрометрические каталоги звезд с погрешностями $0.1\text{--}0.01''$ полные до $12\text{--}15^m$ (в зависимости от конструкции ЗД). Таких каталогов на сегодня нет, это задача для астрономии.

Другие требования к ЗД

В рамках данной публикации нельзя подробно обсудить все возможности реализации ЗД нового поколения, поэтому ограничимся краткой информацией.

Время, необходимое для определения ориентации

Оценки времени определения ориентации по алгоритму Гладыревского [1] показывают, что при использовании микропроцессоров средней вычислительной мощности (архитектура MIPS, частота 50 МГц, прототип — процессор 1890BM2) достаточно типичных сего-

дня для бортовой аппаратуры, и при наличии информации об ориентации датчика с точностью лучше 1° частота опроса ЗД может быть доведена до 50–100 раз в секунду.

Звездная ориентация при быстром вращении

Использование более изощренных методов управления чтением ПЗС-матриц — использование режимов ВЗН и сложного (переменного по геометрии) бинирования пикселей — позволяет достигать при скоростях вращения $15\text{--}30^\circ/\text{с}$ погрешностей определения ориентации всего в 3–5 раз больших, чем на покоящемся датчике. Отметим, что изменения в механической и оптической конструкции ЗД при этом не требуются.

Аналогичные результаты могут быть достигнуты при использовании новой элементной базы — ПЗС с ортогональным переносом заряда (ОТ ССД [7]).

Краткие выводы

Современные задачи космической навигации требуют создания нового поколения систем звездной ориентации со следующими характеристиками:

- точность определения ориентации $0.1\text{--}0.01''$;
- время обновления навигационной информации 10–100 мс;
- определение координат и угловых скоростей при скоростях вращения ЛА до $15\text{--}30^\circ/\text{с}$

(не все эти требования должны реализовываться в едином устройстве), которые на 1–2 порядка лучше реализованных в производимых сегодня изделиях.

Для достижения указанной точности ориентации необходимо перейти к более длиннофокусным оптическим системам, которые будут работать по более слабым звездам ($11\text{--}14^m$ вместо $5\text{--}8^m$ у современных ЗД).

Одновременно необходимо перейти к измерению положений звезд на ПЗС-матрицах с точностью 0.1 пикселя, для чего строить ЗД на гораздо более однородных по чувствительности ПЗС-матрицах с обратной засветкой, применять процедуры фотометрической калибровки (приведение к плоскому полю, учет байеса и т. д.) и повышения отношения сигнал/шум за счет увеличения диаметров объектов ЗД.

Для работы 3Д нового поколения потребуются астрометрические каталоги звезд полные до 12—15^m с точностями не хуже 0.01^m. Создание подобных каталогов — задача, поставленная сегодня перед астрономией.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 07-02-00961, 09-02-00818 и 09-02-00944).

Список литературы

1. *Гладыревский А. Г., Губаренко С. И.* Методы и алгоритмы ориентации космического аппарата с помощью астросистемы // Математика в приложениях. — 2003. — № 1. — С. 60—65.
2. *Осипик В. А., Федосеев В. И.* Алгоритмы автоматического распознавания групп звезд на борту космического аппарата // Оптический журнал. — 1998. — № 8. — С. 32—40.
3. *Берзин В. Б., Берзин В. В., Цыцумин А. К., Соколов А. В.* Адаптивное считывание изображения в астрономической системе на матричном приборе с зарядовой связью // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2004. — вып. 4. — С. 36—45.
4. *Howell S. B.* Handbook of CCD Astronomy. — Second ed. — Cambridge: Cambridge University Press, 2006. — P. 76.
5. *Миронов А. В.* Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и астрофотометрии звезд. — М.: Физматлит, 2008.
6. *Кононович Э. В., Мороз В. И.* Общий курс астрономии. — М.: Едиториал УРСС, 2004.
7. *Tonry J., Burke B. E.* The Orthogonal Transfer CCD // Experimental Astronomy. — 1998. — Vol. 8. — P. 77—87.

ДАЛЕКИЕ ГАЛАКТИКИ

Ряд крупных, 8- и 10-метровых телескопов, начавших работать в мире в последние 10 лет, позволил в массовом порядке изучать галактики на больших красных смещениях, $z > 1$. Ожидалось прямое установление эволюционной последовательности, приводящей к современным галактикам различных морфологических типов. Вместо этого появился целый зоопарк разнообразных экзотических типов галактик, которые трудно, если вообще возможно, как-то связать между собой эволюционно. В лекции будет рассказано про Lyman-break галактики на $z = 3-6$, про так называемые BzK- и DRG- галактики, отбираемые по цвету на $z = 1.5-2.5$, про супер-красные EROSы на $z > 1$ и про то, удастся ли все это богатство наблюдательных данных согласовать с современными космологическими теориями.

The large, 8m and 10m, telescopes which are now working over the world allow to study galaxies at high redshifts, $z > 1$, as a routine task. Everybody expected that availability of the data on high-redshift galaxies should establish a direct evolutionary sequence connecting the galaxies still forming at $z > 3$ toward the present-day ellipticals and spirals. Instead a true zoo of peculiar galactic types has been found at various z which cannot be associated to their ancestors or descendants unambiguously. This lecture is to review the observable properties of this curious community: of Lyman-break galaxies at $z = 3-6$, colour-selected star-forming BzK- and passive DRG-galaxies at $z = 1.5-2.5$, extremely red EROS at $z > 1$, as well as the compability of their existence and appearance with the predictions of the cosmological theories.

Что мы ожидали увидеть на больших красных смещениях и что увидели

Кванты света летят сквозь Вселенную с большой, но все же конечной скоростью, и значение этой скорости нам хорошо известно. Это значит, что, зная расстояние до какой-то галактики, а также

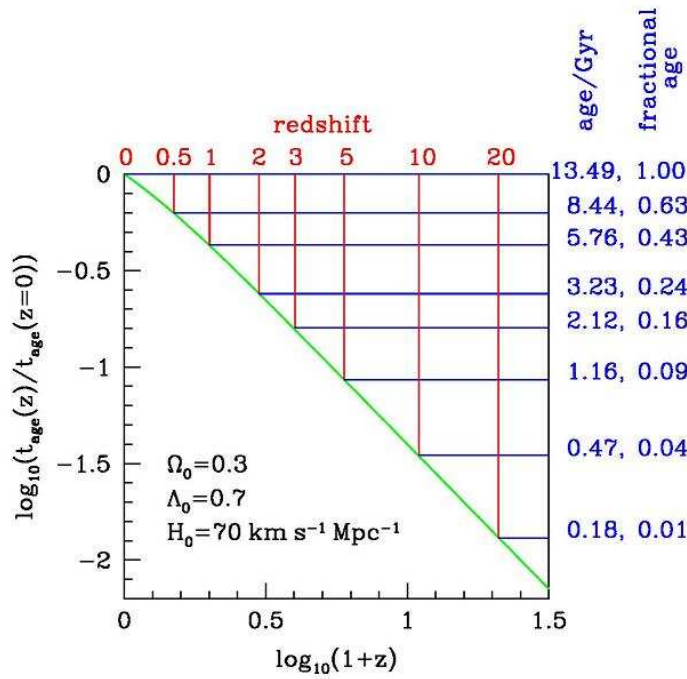


Рис. 1. Связь красного смещения и эпохи, в которую мы наблюдаем галактику на этом красном смещении в данный момент. Для расчета использована общепринятая сейчас космологическая модель Вселенной, в которой 30 % — это материя, большей частью темная, а остальные 70 % — темная энергия

зная (или считая, что знаем) геометрию пространства, мы можем посчитать, сколько времени шел до нас свет от этой конкретной далекой галактики. То есть здесь, сейчас, мы видим далекую галактику в далеком прошлом. И чем дальше галактика — тем более далекое прошлое этой галактики мы наблюдаем здесь и сейчас. На рис. 1 приведена наглядная диаграмма, связывающая время и красное смещение в рамках современной модели Вселенной: на $z = 1$ мы видим галактику 8 млрд лет назад, а на $z = 5$ — целых 12 млрд лет назад, или всего через 1 млрд лет после Большого Взрыва. Казалось бы, «закидывая удочку» на разные красные смещения, мы можем напрямую пронаблюдать весь эволюционный путь галактики. Про-

блема в том, что мы не можем наблюдать *одну и ту же* галактику на разных красных смещениях, мы наблюдаем на *разных* красных смещениях *разные* галактики. Как же связать их в одну цепь? Без модельных предположений тут не обойтись.

Еще в 70-е гг. усилиями сначала Пиблза и Патриджа [1], а потом Беатрис Тинсли, которая изобрела метод эволюционного спектрофотометрического моделирования, стал очень популярен такой образ новорожденной эллиптической галактики: «10 миллионов Орионов» [2]. Действительно, цвета близких эллиптических галактик очень красные, и они свидетельствуют в пользу того, что все звездообразование в этих галактиках закончилось в первый миллиард лет их жизни. Между тем самые крупные из них содержат до $10^{12} M_{\odot}$ звезд. Разделив одно на другое, получаем на заре формирования эллиптической галактики темп звездообразования (SFR) до $1000 M_{\odot}$ в год! Для сравнения — в современных крупных спиральных галактиках в среднем меньше $SFR \approx 1 M_{\odot}$ в год. Спектрофотометрические модели предсказывают, что при $SFR \approx 1000 M_{\odot}$ в год галактика должна быть очень яркой в видимом диапазоне спектра — примерно как квазар, то есть на 4 звездные величины ярче, чем сегодня, а также голубой по цвету и с мощной эмиссионной линией $\text{Ly}\alpha$ в спектре. Вот таких «зверей» и искали весьма активно на небе в 70–80-е гг., сначала с фотографической техникой, а потом уже и с помощью ПЗС-приемников. К 1978 г. был закончен первый глубокий подсчет галактик Крона: он считал их в двух фильтрах, голубом и красном, и обнаружил, что в B -лучах слабых галактик 23–24-й звездной величины гораздо больше, чем можно было предсказать, исходя из парадигмы «никакой эволюции», то есть исходя из предположения, что на любом z присутствуют галактики такие же по характеристикам и в том же количестве в единице объема, что и рядом с нами [3]. Этот результат вдохновил Тинсли: она произвела необходимые модельные расчеты и объявила, что среди «избыточных» слабых голубых галактик Крона должно быть много далеких, эллиптических галактик в момент их основной эпохи звездообразования. Она не дожидаясь результатов массовой спектроскопии слабых голубых галактик; всем остальным эти результаты принесли разочарование: «избыточные» слабые голубые галактики оказались все на $z < 1$, с основной концентрацией между $z = 0.5$ и $z = 0.8$. Из современных подсчетов известно, что на $z = 0.8–1$ все спиральные и эллиптические галактики уже «на месте», то есть их там (и тогда) столько же, сколько и сейчас, слабые голубые галактики не могут

быть их предшественниками. Вместе с тем они не могут иметь отношение и к современным неправильным галактикам — их намного больше, они в среднем массивнее и имеют практически солнечный химический состав межзвездной среды, тогда как близкие Irr-галактики в основном карлики и обеднены металлами. Что это за население, «слабые» (а на самом деле внутренне вполне яркие) голубые галактики, и куда оно потом делось, это население, почему мы не видим «потомков» слабых голубых галактик Крона рядом с нами — все эти проблемы до сих пор не решены.

«Первичные» эллиптические галактики продолжали искать в обзорах в основном, ожидая от них яркую Ly α -эмиссию. Точность и глубина измерений с появлением новых детекторов все улучшались, а первичные галактики все не находились. К 1995 г., когда предел обнаружения оказался в несколько раз ниже теоретических ожиданий для молодых эллиптических галактик, был наконец сделан вывод, что по крайней мере до $z \approx 5$ «первичных» галактик нет. Какие тому могут быть объяснения? Во-первых, пыль. После того как поработал инфракрасный спутник IRAS, к концу 80-х гг., уже все знали, что галактики с самым мощным в современную эпоху звездообразованием и соответственно с самой высокой болометрической светимостью, в оптике и в ультрафиолете почти не видны — их вспышки звездообразования полностью погружены в пыль; все излучение молодых звезд из галактики не выходит, а уходит на нагрев пыли, которая очень ярко светит в инфракрасном диапазоне спектра. Может быть, и первичные вспышки звездообразования на $z = 4-5$ тоже заэкранированы пылью? Оппоненты возражали: если вспышка звездообразования первична, то металлов еще вовсе нет, звезды не успели их создать, а значит, не может быть и пыли. Но сейчас, измеряя эмиссионные линии различных элементов в спектрах квазаров на высоких z , вплоть до $z = 6.28$, исследователи убедились, что на $z = 5-6$ металлы уже были, и в оболочках квазаров металличность даже превосходит солнечную. Следовательно, пыль на этих красных смещениях тоже есть и ее даже может быть много. Откуда все это там взялось — отдельный вопрос, но сам факт вполне установлен. Однако кроме пыли существует и другое возможное объяснение отсутствию ярких «первичных» галактик, и оно особенно нравится космологам — сторонникам иерархической концепции формирования галактик. Что, если первичные вспышки звездообразования происходили не в таких огромных конгломератах, как современные эллиптические галактики, а в относительно небольших

облаках, 10^7 – $10^8 M_{\odot}$, и поначалу на $z = 5$ – 6 , образовывались только карликовые галактики? Масштабы «сотни Орионов» выглядят уже достаточно скромно, и через всю Метагалактику без специальных усилий их не разглядеть. Потом карлики в ходе динамической эволюции должны были многократно сливаться и к сегодняшнему дню «собраться» в массивные сфероидальные звездные системы. Эта альтернатива тоже дает решение проблеме отсутствия ярких первичных галактик на $z = 3$ – 5 ; но способна ли она пройти и другие наблюдательные тесты?

Первые «нормальные» галактики на $z > 3$ в массовом порядке стали находить американцы, используя фотометрию 5-м телескопа и вслед за фотометрией — спектральные подтверждения 10-м телескопа Кеск [4]. После того как вступили в строй 8-м европейские телескопы VLT в пустынных горных условиях Чили, обеспечивающих высокую стабильность атмосферы и соответственно высокое пространственное разрешение наземных наблюдений, поиски далеких галактик на $z > 1$ были поставлены «на поток». Сейчас известны уже сотни и тысячи таких галактик; они оказались весьма разнообразны по своим свойствам и зачастую настолько непохожи на близкие к нам галактики или на наши «ожидания» от изучения близких галактик, что трудно найти им место в пропагандируемых теоретиками «эволюционных последовательностях». Эта область астрофизики сейчас бурно накапливает информацию, качественный скачок в понимании которой очевидно еще впереди.

Как находят галактики на больших z

Какие же методы оказались наиболее эффективными при «массовых» поисках далеких галактик, если простая ориентация на слабые объекты и сильную балмеровскую эмиссию обманула ожидания наблюдателей? Развитие методов эволюционного моделирования интегрального излучения галактик позволило выработать «цветовые» критерии, и вот их-то применение к массовым фотометрическим обзорам и дало богатый «улов». Дело в том, что близкие галактики в принципе демонстрируют довольно узкий диапазон наблюдаемых цветов, и это обусловлено «набором» звезд, из которых они состоят. Например, цвет $B - V$ у близкой галактики может быть от примерно 0.5 до примерно 1.2, а если вы видите «что-то» на высокой галактической широте с цветом $B - V$ 0.0 или 2.0, то это не близкая галактика. Также эволюционное моделирование позволяет рассчитывать,

как изменяется со временем цвет галактики с заданной историей звездообразования. Например, при так называемой пассивной эволюции, если галактика быстро-быстро образовала все свои звезды, а потом звездообразование уже не шло (рядом с нами таковы эллиптические галактики), она будет быстро краснеть со временем. Если же звездообразование все время «теплится» на небольшом, но постоянном уровне, как в близких Sc-галактиках, галактика тоже будет краснеть, но гораздо медленнее. Вся эта эволюция довольно точно просчитывается, и если вы «относите» близкую галактику на какое-то красное смещение, то есть на какое-то время назад, вы примерно знаете, как должен измениться ее цвет. Эта рассчитанная поправка цвета называется «Е»-поправкой. Есть еще «К»-поправка — это учет красного смещения «в лоб»: ведь на $z = 1$ в ваш фильтр, скажем V , с максимумом пропускания на 5500 \AA попадает излучение, которое галактика испустила в своей системе покоя на длине волны 2500 \AA , то есть не в видимых лучах, а в ультрафиолете. Чтобы посчитать «К»-поправку, нужно знать кривую пропускания фильтра, а также распределение энергии в спектре галактики (то есть опять же историю звездообразования данной галактики) и, сдвигая распределение энергии галактики на нужное красное смещение, сворачивать его затем с кривой пропускания вашего фильтра.

Примеры подобных расчетов показаны на рис. 2. При расчете изменения с красным смещением цвета $R - K$ разных типов галактик — эллиптических, спиральных и галактик с запыленной мощной вспышкой звездообразования, так называемых ULIRG, — были учтены «К»- и «Е»-поправки. Видно, что вблизи нас у всех типов галактик $R - K < 4$, и если мы будем в нашем фотометрическом обзоре, проводимом в двух фильтрах, отбирать объекты с $R - K > 5$, мы всегда отберем далекие галактики. Причем они никогда не окажутся спиральными — можно даже не рассматривать специально их морфологию. По этому признаку на телескопе VLT в конце 90-х гг. и отобрали в ряде красно-инфракрасных фотометрических обзоров выборку EROсов — Extremely Red Objects. Были обоснованные надежды, что среди них будет много пассивно эволюционирующих массивных эллиптических галактик. Однако и на рис. 2 видно, что при таком критерии отбора в выборку EROсов попадут не только эллиптические галактики на $z > 1$, но и галактики с запыленными мощными вспышками звездообразования. Так оно и оказалось: после того как были проанализированы изображения первой сотни EROсов, полученные на Хаббловском космическом телескопе, оказа-

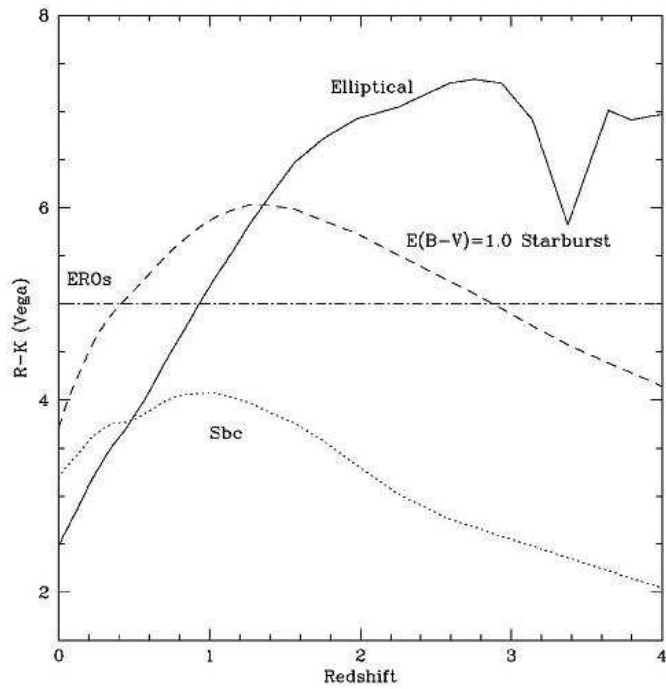


Рис. 2. Расчет изменения с красным смещением цвета $R-K$. Если отсекают красные объекты по $R-K > 5$, то вы выберете эллиптические галактики и ULIRG на $z > 1$, если же поставить предел отбора $R-K > 6$, то в вашу выборку попадут только эллиптические галактики на $z > 1.5$. Картинка взята из работы Рош и др. [5]

лось, что половина из них по морфологии похожа на эллиптические галактики, а половина — похожа на ULIRG, которые практически всегда мерзеры и имеют иррегулярную морфологию.

Время идет, обзоры становятся все «глубже», и появляется возможность «зачерпывать» по цвету все более далекие галактики. На рис. 3 показаны цветовые критерии для отбора галактик на $z = 1.5-2.5$. Начиная с 2004 г. с помощью фотометрических критериев, предложенных Дадди и др. [7], отбираются галактики на $1.4 < z < 2.6$, причем переход к *трех*-цветному обзору позволяет сразу отделять ULIRG от пассивно эволюционирующих массивных эллиптических галактик: вводится независимый от пыли параметр

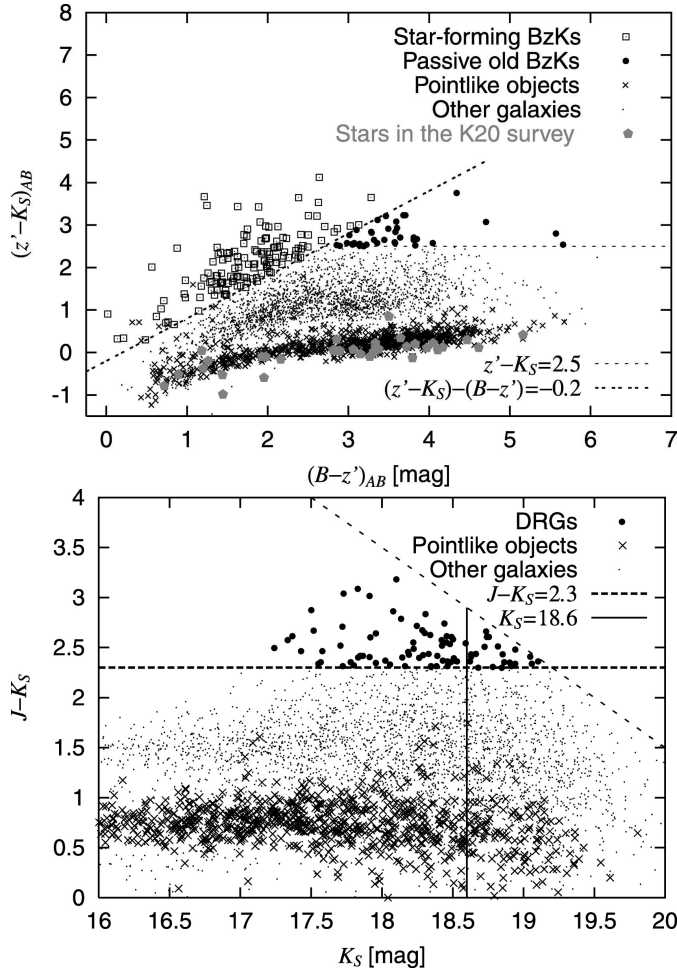


Рис. 3. Цветовые критерии отбора галактик на $z = 1.5\text{--}2.5$, рисунок из статьи Имаи и др. [6]

$BzK \equiv (z - K) - (B - z)$ (максимум пропускания фильтра z — около 9000 \AA), а дальше отбираются галактики с $BzK > -0.2$ — это ULIRG на $z > 1.4$ — и галактики с $BzK < -0.2$ и $(z - K) > 2.5$ — это далекие пассивно эволюционирующие галактики. Типичная масса BzK -галактики около $10^{11} M_{\odot}$. Еще более массивные и еще более

далекие, $2.0 < z < 3.5$, галактики отбираются по ближнему инфракрасному цвету, $J - K > 2.3$ — это так называемые DRG, Distant Red Galaxies [8].

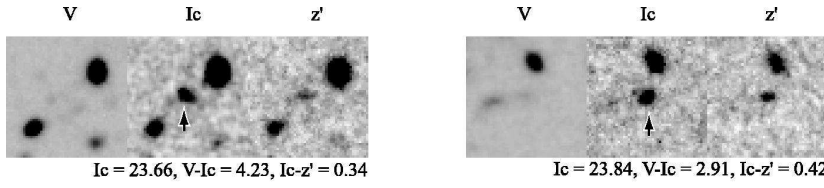


Рис. 4. Как ищут галактики на $z \sim 5$: изображения Lyman-break галактик в трех фильтрах [9]

Еще дальше по красному смещению, на $z > 3$, вступает в действие другой цветовой критерий отбора, предложенный в начале 90-х гг. Стейделем с соавторами: это поиск по многоцветной фотометрии так называемых Lyman-break галактик. Идея критерия такова. В свежесформированных галактиках, где недавно началось первое звездообразование, еще очень много нейтрального водорода: нейтральный водород плотными коконами окружает области активного звездообразования, где много молодых звезд. Нейтральный водород поглощает *все* излучение в области лаймановского континуума — на длинах волн короче 912 \AA в системе покоя галактики. Однако на длинах волн за лаймановским пределом, $\lambda_0 > 912 \text{ \AA}$, галактика сразу оказывается очень яркой — потому что в ней много молодых звезд и она «внутренне» голубая. На больших красных смещениях лаймановский предел сдвигает в видимый диапазон спектра: на $z = 3$ — на $\lambda \sim 3600 \text{ \AA}$ на $z = 4$ — на $\lambda \sim 4600 \text{ \AA}$ на $z = 5$ — на $\lambda \sim 5500 \text{ \AA}$ и т. д. То есть отбирая в многоцветном фотометрическом обзоре «U-droupout»ы («пропадающие в U-фильтре»), вы отбираете галактики на $z = 3$, «B-droupout»ы — галактики на $z = 4$, «V-droupout»ы — галактики на $z = 5$. На рис. 4 можно увидеть, как это выглядит на практике: в фильтре V на месте галактики пустое место, в фильтре I галактика выглядит очень яркой, а в более красном фильтре z она начинает снова слабеть, потому что внутренне она очень голубая, и распределение энергии растет в голубую сторону — пока не «натыкается» на лаймановский предел. Этот метод поиска далеких галактик в эпоху их первого звездообразования оказался очень эффективным, и сейчас известны многотысячные выборки LBG-галактик на $z \sim 3$ и многосотенные выборки LBG-галактик

на $z \sim 5$. Отобранные таким же образом кандидаты в галактики на $z \sim 7$, « z_{850} -dropout»ы ждут пока спектральных подтверждений своих «фотометрических» красных смещений.

Какие они, галактики на больших z ?

Двинемся вдаль по красному смещению и стартуем примерно с половины возраста Вселенной — с $z = 1$.

EROs

Как мы уже упоминали выше, EROs бывают двух видов — пассивно эволюционирующие, внутренние красные звездные системы или галактики с мощными вспышками звездообразования, внутренне голубые, но погруженные в пылевые коконы, «покрасневшие». Соответственно этому разделению — примерно пополам — у них бывают и спектры: или эмиссионные типа HII-области, или чисто абсорбционные, как у галактик, лишенных газа и молодых звезд. Более того, когда на Хаббловском космическом телескопе получили изображения с высоким пространственным разрешением и исследовали форму профиля поверхностной яркости нескольких десятков EROs, то оказалось, что и по форме профиля поверхностной яркости они делятся примерно пополам: у половины — крутые профили, похожие на Вокулеровские, у половины — экспоненциальные или иррегулярные, как у спиральных и неправильных галактик [10]. Исторически, когда в конце 90-х гг. начинали искать EROs, всем больше были интересны пассивно эволюционирующие эллиптические галактики на $z = 1.5$, потому что тогдашние космологические теории решительно требовали образовывать гигантские эллиптические галактики только на $z = 0.5$, не раньше. С точки зрения сравнения с предсказаниями теории всем было очень интересно узнать из обзоров EROs, что пассивно эволюционирующие EROs с крутыми профилями поверхностной яркости еще и достаточно массивны (средняя масса звезд $2\text{--}3 \times 10^{11} M_{\odot}$) и имеют немолодое звездное население, в среднем 2–3 млрд лет от роду [11]. Если учесть, что $z = 1$ соответствует эпохе примерно 5 млрд лет от Большого Взрыва, становится ясно, что массивные сфероидальные EROs образовывались вовсе не последними в иерархической цепочке слияний, как того требует современная космология, а на довольно ранних стадиях эволюции Вселенной.

Массивные галактики на $z = 2\text{--}2.5$

Критерий BzK, так же, как и критерий ERO, выбирает массивные галактики двух типов: пассивно эволюционирующие, внутренние красные, и с мощной вспышкой звездообразования, внутренние голубые, но сильно запыленные. Также два этих типа отмечены и среди DRG-галактик. Чтобы различить их, существуют некоторые цветовые «рецепты», но самое надежное — получить на большом наземном телескопе спектр в ближней инфракрасной области, который все равно нужен для точного измерения красного смещения, и поискать там эмиссии $\text{H}\alpha$ и $[\text{NII}]\lambda 6583$, чтобы удостовериться, что возбуждение газа — типа HII-области и свидетельствует об интенсивном звездообразовании. Все это делается в «промышленных» масштабах, и сейчас уже известны тысячные выборки как пассивных, так и активно образующих звезды галактик на $z = 1.5\text{--}2.5$. Последние — аналоги близких к нам ULIRG, но существенно более крупные: их средняя звездная масса превышает $10^{11} M_{\odot}$, а типичные темпы звездообразования — $200\text{--}300 M_{\odot}$ в год [12]. И их очень много — гораздо больше, чем ULIRGов сейчас. При таких темпах звездообразования весь газ этих галактик должен кончиться за несколько сотен миллионов лет. И Дадди, и др. [12], имея это в виду, сравнили пространственные плотности звездообразующих BzK на $z = 2$ и пассивных EROсов на $z = 1.4$; они совпали. Этот факт позволяет предполагать, что на $z = 2\text{--}2.5$ мы видим в качестве звездообразующих BzK эпоху основного звездообразования массивных эллиптических галактик более поздних эпох, EROs.

Однако на $z = 2\text{--}2.5$ есть и «свои» пассивные эллиптические галактики, которые «отлавливаются» по спектрам среди BzK и DRG. Нужно ли учитывать их пространственную плотность при сравнении с населением эллиптических галактик на меньших красных смещениях? Ко всеобщему изумлению оказалось, что эллиптические галактики на $z = 2\text{--}2.5$ совершенно не похожи на эллиптические галактики на $z = 1$ и $z = 0$. Зирм и др. [14], аккуратно выделив среди выборки DRG-галактик галактики без звездообразования, то есть предположительно эллиптические, обнаружили, что у них их характерные (для данной звездной массы) размеры в 4 раза меньше современных. Соответственно поверхностная яркость выше более чем на порядок, а внутренняя пространственная плотность «упаковки» звезд сравнима с таковой для шаровых скоплений нашей Галактики. На большей выборке и проверив классификацию галактик как

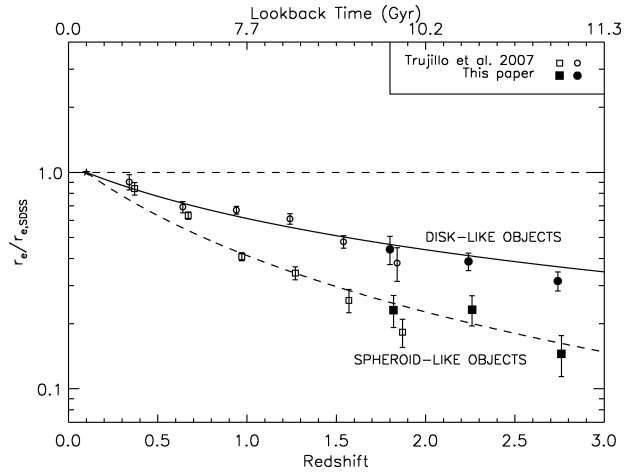


Рис. 5. Эволюция размеров эллиптических галактик с пассивно эволюционирующим населением [13]

эллиптических по форме профиля поверхностной яркости, этот результат подтвердили Буитраго и др. [13]. С одной стороны, эта находка «логична»: при пассивно эволюционирующем звездном населении на $z = 2\text{--}2.5$ эти галактики должны были образовываться на *очень* больших красных смещениях, когда Вселенная была еще маленькой, а плотность материи в ней — большой. С другой стороны, совершенно непонятны дальнейшие эволюционные пути этих галактик. Чтобы стать галактиками с «нормальной» звездной плотностью к $z = 0$, у них один путь — бездиссипативное слияние. Однако уже и на $z = 2.5$ эти галактики имеют такие же массы, как «наши» эллиптические галактики; если они начнут многократно сливаться, они породят сверхмассивные «монстры», которых просто не существует в природе на $z = 0$! Так куда же подевались эти суперстарые, суперплотные, супермассивные эллиптические галактики в процессе своей эволюции?!

Lyman-break (LBG) галактики на $z = 3\text{--}6$

Lyman-break (LBG) галактики по самому принципу своего отбора — это богатые газом галактики с интенсивным звездообразованием. Пионером поиска и изучения этих галактик был Чарльз Стей-

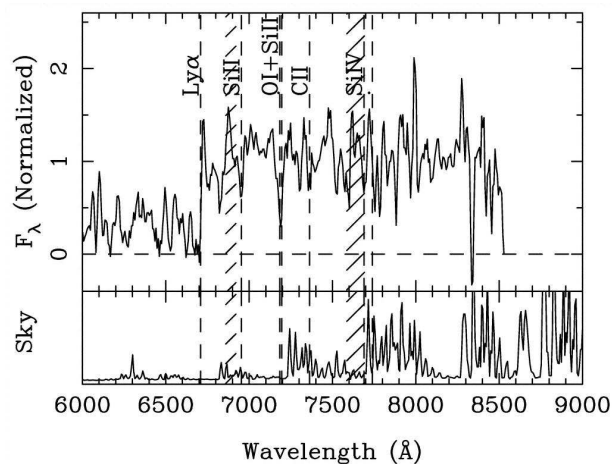


Рис. 6. Пример спектра в ультрафиолетовой области (в системе покоя галактики) для LBG-галактики на $z = 5$ [15]

дель с соавторами [4]; по результатам фотометрического обзора 5-метрового паломарского телескопа и вслед затем спектральных подтверждений 10-м американского телескопа Кеск он составил первые большие выборки LBG на $z = 3$ и $z = 4$. Потом эстафету подхватил японский 8-м телескоп SUBARU, в результате красно-инфракрасных обзоров которого сейчас имеются выборки LBG-галактик на $z = 5$ и $z = 6$. Таким образом, речь идет о том, какие галактики можно видеть во Вселенной между 1 и 2 млрд лет после Большого Взрыва. Типичная LBG-галактика имеет массу звезд около $10^{10} M_{\odot}$ и темпы звездообразования в несколько десятков M_{\odot} в год. Спектры LBG-галактик, полученные Стейделем с соавторами, оказались точной копией спектров галактик со вспышкой звездообразования на $z = 0$. Это означает, что и металличность LBG-галактик близка к солнечной. Забавно, но в спектрах большинства LBG-галактик не оказалось заметной эмиссии, даже $L\alpha$ (рис. 6), а ведь именно по мощной эмиссии $L\alpha$ так долго пытались искать «первичные» галактики! Это происходит оттого, что газовые оболочки LBG оптически толстые; более того, наблюдаются высокоскоростные истечения (профиль спектральных линий типа P Cug в интегральном спектре галактики!), так называемый галактический ветер. Эта черта делает LBG опять-таки похожими на близкие к нам галактики со вспышка-

ми звездообразования. Сведения о морфологии LBG противоречивы. Одна из последних работ на эту тему, Равиндранат и др. [16], утверждает, что 40 % LBG имеют экспоненциальные (дисковые) профили поверхностной яркости, 30 % — вокулеровские и еще 30 % — «множественные ядра» и другие признаки взаимодействующих и сливающихся пар галактик. Таким образом, морфология LBG является собой полный набор всех возможностей, и трудно эволюционно привязать этот тип галактик к какому-либо конкретному типу галактик «потомков».

Менее изучены, но тем не менее существуют на тех же красных смещениях еще и родственные типы галактик: менее массивные, чем LBG, LAE («Lyman-Alpha Emitters»), и более массивные, до нескольких единиц на 10^{11} масс Солнца, красные галактики, у которых в инфракрасном куске распределения энергии отождествляется т. н. скачок на 4000 \AA — свидетельство «старого», до 1 млрд лет, звездного населения. Такое впечатление, что «местожительство» LBG галактик — это еще вовсе не начальная эпоха формирования галактик...

Суммируем проблемы...

Количество наблюдательной информации относительно галактик на больших красных смещениях нарастает лавинообразно; каждый год открывают не то что новые галактики — новые типы галактик. Пока что обобщить всю эту информацию в единую стройную эволюционную последовательность не удастся. Отчасти в этом «виноват» слишком большой темп накопления новых данных, отчасти — неадекватность теории. Современная космологическая теория предлагает жесткую иерархическую схему формирования галактик: от малых к большим, постепенным слиянием карликовых галактик в гигантские, затем сбор гигантских галактик в группы и скопления. Совсем недавно теоретики нам рассказывали, что гигантские эллиптические галактики формируются на $z = 0.5$, а скопления не могут существовать на $z > 1$; сейчас наблюдатели собрали целые большие выборки и тех и других на $z = 1.5$. На иерархический «сбор» галактик нужно время, и эта временная шкала рассчитывается в рамках теории, рассчитывается весьма точно, особенно теперь, когда с высокой степенью надежности на основе данных по анизотропии реликтового фона зафиксированы основные космологические параметры: плотность темной энергии, плотность темной материи, плотность барионов, постоянная Хаббла. То, что получается из наблюдений

и что сейчас называют красивым английским словом «downsizing», — это направление эволюции, прямо противоположное иерархической схеме. По наблюдениям, именно массивные галактики «собрались» раньше всех; уже на $z = 1.5$ в них заканчивается звездообразование, тогда как в карликовых галактиках оно продолжается до сих пор. Если сравнивать напрямую пространственную плотность расположения массивных галактик в теории и в наблюдениях, то на $z = 2$ теория недооценивает количество массивных, $\log(M/M_{\odot}) > 11.5$, галактик на два порядка [17]! Теория старается «поспеть» за наблюдениями, уже появились модификации иерархических схем, включающие мощную «обратную связь»: подавление звездообразования в массивных галактиках активным ядром (квазаром), которое должно «зажечься» вскоре после максимума начальной вспышки звездообразования. Самая острая проблема «старых» массивных галактик на больших красных смещениях таким образом вроде бы решается, но кто поручится, что эти проблемы не возникнут вновь завтра, когда мы доберемся до $z \sim 8$ или 10 и уткнемся там все в те же массивные старые галактики? Теория должна опережать эксперимент. . .

Список литературы

1. *Partridge R. B., Peebles P. J. E.* Are Young Galaxies Visible? // *Astrophys. J.* — 1967. — Vol. 147. — P. 868.
2. *Sunyaev R. A., Tinsley B. M., Meier D. L.* Observable properties of primeval giant elliptical galaxies or ten million Orions at high redshift // *Comments Astrophys.* — 1978. — Vol. 7, iss. 6. — P. 183.
3. *Kron R. G.* Photometry of a complete sample of faint galaxies // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 1980. — Vol. 43. — P. 305.
4. *Steidel C. C., Giavalisco M., Pettini M. et al.* Spectroscopic Confirmation of a Population of Normal Star-forming Galaxies at Redshifts $z > 3$ // *Astrophys. J., Lett.* — 1996. — Vol. 462. — P. 17.
5. *Roche N. D., Almaini O., Dunlop J. et al.* The clustering, number counts and morphology of extremely red ($R-K > 5$) galaxies to $K \leq 21$ // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 337. — P. 1282.
6. *Imai K., Pearson C. P., Matsuhara H. et al.* Number Density Evolution of Ks-band-selected High-Redshift Galaxy Populations in the AKARI North Ecliptic Pole Field // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 683. — P. 45.

7. *Daddi E., Cimatti A., Renzini A. et al.* A New Photometric Technique for the Joint Selection of Star-forming and Passive Galaxies at $1.4 < z < 2.5$ // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 617. — P. 746.
8. *Forster-Schreiber N. M., van Dokkum P. G., Franx M. et al.* A Substantial Population of Red Galaxies at $z > 2$: Modeling of the Spectral Energy Distributions of an Extended Sample // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 616. — P. 40.
9. *Iwata I., Ohta K., Tamura N. et al.* Lyman Break Galaxies at $z \sim 5$: Luminosity Function // *Publ. Astron. Soc. Jpn.* — 2003. — Vol. 55. — P. 415.
10. *Moriondo G., Cimatti A., Daddi E.* The morphology of extremely red objects // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 364. — P. 26.
11. *McGrath E. J., Stockton A., Canalizo G.* Stellar Populations of Luminous Evolved Galaxies at $z \sim 1.5$ // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 669. — P. 241.
12. *Daddi E., Dickinson M., Chary R. et al.* The Population of BzK-selected ULIRGs at $z \sim 2$ // *Astrophys. J., Lett.* — 2005. — Vol. 631. — P. 13.
13. *Buitrago F., Trujillo I., Conselice C. J. et al.* Size Evolution of the Most Massive Galaxies at $1.7 < z < 3$ from GOODS NICMOS Survey Imaging // *Astrophys. J., Lett.* — 2008. — Vol. 687. — P. 61.
14. *Zirm A. W., van der Wel A., Franx M. et al.* NICMOS Imaging of DRGs in the HDF-S: A Relation between Star Formation and Size at $z \sim 2.5$ // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 656. — P. 66.
15. *Ando M., Ohta K., Iwata I. et al.* Lyman Break Galaxies at $z \sim 5$: Rest-Frame Ultraviolet Spectra // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 610. — P. 635.
16. *Ravindranath S., Giavalisco M., Ferguson H. C. et al.* The Morphological Diversities among Star-forming Galaxies at High Redshifts in the Great Observatories Origins Deep Survey // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 652. — P. 963.
17. *Conselice C. J., Bundy K., Trujillo I. et al.* The properties and evolution of a K-band selected sample of massive galaxies at $z \sim 0.4-2$ in the Palomar/DEEP2 survey // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 381. — P. 962.

МЕРИДИОНАЛЬНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ И СОЛНЕЧНЫЙ МАГНИТНЫЙ ЦИКЛ

В последние годы в связи с развитием гелиосейсмологии получило наблюдательное подтверждение такое важное явление, как меридиональная циркуляция вещества от солнечного экватора к полюсам Солнца, совершающаяся за время, близкое к характерному времени солнечного цикла (11 лет) и имеющее скорость около 10–15 м/с вблизи поверхности Солнца и около 1–2 м/с в значительно более плотных слоях вблизи основания его конвективной зоны [1]. Очевидно, этот эффект должен играть важную роль в формировании солнечного магнитного цикла, но его включение в существующие динамо-теории встречается с большими математическими трудностями. Получили развитие так называемые транспортные модели солнечного цикла [2–4], в которых транспортный эффект (перенос полоидального потока меридиональной циркуляцией) учтен, но глубокая проблема удаления с поверхности Солнца «отработавшего» магнитного поля предыдущего цикла решается в этих моделях формально, феноменологически.

В лекции излагаются идеи дальнейшего развития предложенной ранее диффузионно-релаксационной модели солнечного магнитного цикла [5], основанной на представлениях о том, что наблюдаемый на Солнце магнитный цикл активности создается знакопеременной магнитной структурой, образующейся под воздействием конвекции в конвективной зоне Солнца и выходящей из нее в течение 22 лет вследствие диффузии магнитного поля. При этом на поверхности Солнца «прорисовывается» магнитный цикл со всеми его характерными особенностями (бабочки Маундера, смена знака глобального магнитного поля на полюсах светила в моменты, близкие к максимуму пятенной активности, и пр.). Магнитная структура, формирующая солнечный цикл, имеет, согласно данной модели, вид двух магнитных тороидов, вписанных один над другим в сферический слой конвективной зоны. Основной проблемой модели остается, как

и во всех динамо-теориях, механизм восстановления (регенерации) полоидального магнитного потока в цикле, в ходе того, как один из магнитных торов, проходя через фотосферу, начинает необратимо уходить в межпланетное пространство.

Меридиональная циркуляция, в том виде, как она представляется на сегодня, может играть роль основного регулятора магнитного цикла и обеспечивать регенерацию полоидального магнитного поля в цикле за счет того, что течения плазмы, направленные от экватора к полюсам, могут приводить к разрыву верхнего магнитного тороида за счет пересоединения магнитных силовых линий в подфотосферных слоях в околополярных зонах Солнца. При этом происходит удвоение полоидального магнитного потока. Одна его часть уходит в корону и затем в межпланетную среду, а другая — увлекается течениями меридиональной циркуляции под нижележащий тороид. В глубоких слоях течения газа направлены уже от полюсов к экватору, здесь магнитные потоки движутся навстречу друг другу, и благодаря этому вблизи экватора, у нижней границы конвективной зоны, встречаются разнонаправленные поля и формируется магнитная структура, аналогичная той, что уже покинула конвективную зону. Процесс регенерации полоидального магнитного поля тем самым завершается.

В рамках модели можно указать и физические причины перехода солнечной активности в режим с низким уровнем типа маундеровского: это может быть связано с временным ослаблением меридиональной циркуляции. В этом случае потоки магнитного поля не доходят от полюсов до экватора и в каждом полушарии формируется своя независимая система магнитных тороидов, которые циркулируют под воздействием меридиональных течений — каждая внутри своего полушария, меняясь местами друг с другом и почти не выходя на поверхность Солнца.

В предлагаемой модели солнечного цикла высокоширотная полярная активность, обусловленная динамикой полоидального магнитного поля, на несколько лет опережает низкоширотную, пятенную активность, создаваемую тороидальной составляющей общего магнитного поля Солнца.

Список литературы

1. *Roth M., Stix M.* // Solar Phys. — 2008. — Vol. 251. — P. 77.
2. *Dikpati M., Gilman P.* // J. ApA. — 2008. — Vol. 29. — P. 29.
3. *Dikpati M., de Toma G., Gilman P.* // Astrophys. J. — 2008. — Vol. 675. — P. 520.
4. *Dikpati M., de Toma G., Gilman P.* // Astrophys. J. — 2004. — Vol. 601. — P. 1136.
5. *Соловьев А., Киричек Е.* // Изв. РАН. Сер. Физ. — 2006. — Т. 70. — С. 1433.

ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ: ИСТОРИЯ И НАУКА

В лекции рассказывается об истории наблюдений лунных затмений и о научных задачах, которые решались и решаются методом анализа данных явлений. Если в древние времена наблюдения затмений были основой развития теории движения Луны и небесной механики вообще, то сейчас они являются интересным аспектом атмосферной оптики. Наблюдаемые характеристики затмений проявляют связь с вулканическим и полярным стратосферным аэрозолем, атмосферным озоном, глобальным распределением водяного пара. Также заметна корреляция с изменениями солнечной активности. Подробно разбираются результаты наблюдений пяти лунных затмений в 2004—2008 гг. в ближней инфракрасной области спектра.

The lecture contains the historical description of the lunar eclipses observations and the scientific problems that had been solved and is being solved now by the lunar eclipses analysis. In ancient times this analysis was the development base of the theory of the motion of the Moon and the celestial mechanics in general. Now the lunar eclipses observations are the interesting topic of the atmosphere optics. The observed characteristics of the eclipses show the relation with the volcanic and polar stratospheric aerosol, atmospheric ozone, global distribution of water vapor. The results of the observations of 5 lunar eclipses in 2004—2008 in near infra-red spectral region are described in details.

Введение

Лунные затмения являются одними из самых значительных астрономических явлений, наблюдавшихся людьми с древнейших времен. По масштабности они уступают только полным солнечным затмениям. При этом каждое лунное затмение видно со значительной части поверхности Земли, и потому в любой отдельно взятой точке нашей планеты лунные затмения наблюдаются чаще даже частных солнечных затмений, не говоря уже о полных. Это обусловило большое количество упоминаний о лунных затмениях в исторических документах и летописях.

Вид Луны во время затмения бывает непредсказуемым уже при частных фазах. В этом состоит еще одно отличие от солнечных затмений, где картину нельзя в точности описать заранее лишь в коротких мгновения полной фазы. Резкие вариации яркости Луны и ее красная окраска при погружении в земную тень становились причиной панического страха людей, связывающих затмения с войнами, эпидемиями, катаклизмами. Считалось, что Луна во время затмения обливается кровью.

Лунные затмения имеют более сложную геометрию и оптическую схему по сравнению с солнечными. Даже в древние времена было несложно понять, что Солнце затмевается Луной. А для восстановления правильной схемы лунного затмения было необходимо установить, что Луна светит лишь отраженным солнечным светом, а также то, что Земля имеет шарообразную форму, отбрасывая в пространство конус тени. Еще более сложным являлся вопрос о причинах нечеткой границы тени и свечения Луны даже в полной фазе затмения. Ответ на него был дан всего несколько веков назад с развитием атмосферной оптики.

Многообразие оптических эффектов, наблюдающихся во время лунного затмения, и связь этих эффектов с атмосферой Земли указывают на возможность исследования самой атмосферы на основе анализа лунных затмений. Геометрия затмения во многом схожа со схемой космических миссий по изучению атмосферы, роль космического аппарата при этом играет Луна, а роль источника излучения — Солнце. До начала космической эпохи лунные затмения были единственным средством изучения различных слоев атмосферы на расстоянии в несколько тысяч километров от пункта наблюдения. Все это предопределило большое внимание ученых к данным явлениям на протяжении многих веков.

История наблюдений

Первое достоверное упоминание о наблюдении лунного затмения содержится в древнекитайских летописях и относится к 1137 г. до н. э. По-видимому, китайские астрономы первыми отметили основные закономерности наступления затмений и научились предсказывать их на будущее. Несколькими веками позже это удалось вавилонским астрономам. Они отметили трехлетние циклы, в течение каждого из которых лунные затмения наступают с интервалом в 6 лунных месяцев или около 177 суток. На самом деле этот цикл

охватывает 4 года, но первые и последние его затмения обычно лишь полутеневые, и в Вавилоне их не замечали.

Объяснить причину наступления лунного затмения удалось древнегреческому ученому и философу Анаксагору в V в. до н. э. Многие идеи Анаксагора опережали свое время. Так, за 2 тысячи лет до Джордано Бруно он утверждал, что звезды подобны Солнцу, но находятся значительно дальше, а обитаемые миры представлены во Вселенной во множестве. В частности, населенной вполне может оказаться даже Луна. Правильное толкование природы лунных затмений указывает на шарообразность нашей планеты — Земли. Данный вывод приписывается Аристотелю, хотя он встречается и раньше, у других древнегреческих ученых — Пифагора и Парменида.

Аристарх Самосский, один из первых приверженцев гелиоцентрической системы мира, использовал лунные затмения для определения соотношения размеров Луны и Земли, которое получилось равным $1/3$, что достаточно близко к правильному значению. В то же время размеры Солнца и расстояние до него по Аристарху оказались сильно заниженными.

Так как лунные затмения были видны из той же Древней Греции чаще, чем солнечные (которые должны были еще иметь значительную фазу, чтобы быть замеченными), их наблюдения на протяжении десятилетий и веков стали фундаментом для построения теории движения Луны — основной задачи небесной механики на то время. Благодаря прежде всего Гиппарху эта наука существенно продвинулась вперед во II—I вв. до н. э. Об уровне ее развития говорит антикитера — механическое устройство, моделирующее движение небесных светил, найденное на дне Средиземного моря в 1901 г. Для точного отображения движения Луны этот механический планетарий содержал спираль с четырьмя витками. Она была разделена на 223 сегмента — именно столько лунных месяцев содержится в саросе, периоде повторяемости солнечных и лунных затмений, составляющем 18 лет и 10.3 дня.

Развитие античной теории движения Луны было увенчано Клавдием Птолемеем в его труде «Альмагест», на много веков ставшим базовой теорией для небесной механики и астрономии в целом. Основой для теории движения Луны был практически 1 000-летний анализ наблюдений лунных затмений, начиная с Древнего Вавилона.

Дальнейшее развитие в Европе астрономическая наука получила только через почти полторы тысячи лет, с началом эпохи Возрождения. После многовекового периода застоя и регресса в научном

познании было необходимо восстановить все утраченное с античных времен. Важным событием для астрономической науки стал перевод «Альмагеста» Птолемея на латынь, доступную европейским ученым того времени. Этот перевод был выполнен во второй половине XV века немецким ученым Иоганном Мюллером, более известным под именем Региомонтан. Он же использовал этот труд для вычисления ежедневных эфемерид Луны и планет на 1475—1506 гг. Фактически это были последние и самые точные эфемериды, рассчитанные на основе теории Птолемея.

Эфемериды небесных светил были нужны не только астрономам. В них остро нуждались мореплаватели. Фиксирование моментов восхода и захода Луны, а также начала и конца лунных затмений давало возможность определить долготу места, что в отсутствие точных хронометров было важной и очень сложной задачей. Поэтому эфемериды Региомонтана были на борту многих кораблей, отправлявшихся в далекие плаванья. Взял их с собой и Христофор Колумб, еще не предполагая, что они фактически спасут ему жизнь.

Во время своего четвертого, последнего плаванья к берегам Америки в июне 1503 г. экспедиция Колумба потерпела кораблекрушение вблизи Ямайки. Колумбу удалось достичь берега, но он вместе с командой был вынужден длительное время ожидать испанских кораблей. Местное население встретило Колумба недружелюбно и через некоторое время отказало ему в поставке продовольствия. Чтобы спастись от голодной смерти, Колумб пошел на хитрость. Зная из таблиц Региомонтана о лунном затмении, предстоящем 29 февраля 1504 г., он пригласил к себе туземных вождей и объявил им, что если поставки продовольствия не возобновятся, он отнимет у них Луну. Вожди не поверили, но как только началось затмение, они прибежали к Колумбу и пали перед ним ниц, умоляя вернуть Луну на небо. Через пару часов Луна была возвращена, а Колумб больше не испытывал проблем с продовольствием.

Данный случай не единственный пример непосредственного участия лунных затмений в исторических событиях. Древнегреческий историк Фукидид, описывая Пелопонесскую войну между Афинами и Спартой, сообщает о лунном затмении, произошедшем вечером перед отплытием афинского флота. Афиняне увидели в этом затмении дурное предзнаменование, и отплытие флота было отложено. Подробное описание Фукидидом хода затмения позволило установить его дату: 27 августа 413 г. до н. э., что во многом уточнило хронологию Пелопонесской войны.

Лунное затмение 21 июня 168 г. до н. э. фактически решило судьбу сражения между римской и македонской армиями. Перед сражением римский оратор Сульпиций Галл, который ранее был римским консулом, сообщил войску о лунном затмении, которое должно принести победу, чем сильно ободрил своих воинов. Македонское же войско о затмении не знало, и с его началом обернулось в смятение, а потом и в бегство.

Подобные примеры указывают на важность анализа упоминаний о солнечных и лунных затмениях для датировки исторических событий. С развитием небесной механики и уточнением элементов орбиты Луны вычисление моментов затмений с высокой точностью стало возможным на века и тысячелетия вперед и назад. В XIX в. были изданы каталоги солнечных и лунных затмений на длительные периоды. Среди них нужно выделить прежде всего «Канон затмений» австрийского астронома Теодора Оппольцера, охватывающий период с 1207 г. до н. э. до 2163 г. н. э. Подобная работа велась и в России. В предисловии к «Таблицам показания времени солнечных и лунных затмений с 1840 по 2001 год» их автор, Федор Алексеевич Семенов, отмечает, что одной из целей этого издания было восполнение недостатка подобной литературы на русском языке. За этот труд Ф. А. Семенов в 1858 г. был удостоен золотой медали Русского географического общества.

Если в механической части теории лунных затмений уже давно наступила полная ясность и их точное предсказание уже не является сложной задачей, то другая, феноменологическая часть этой науки содержала массу вопросов, ответы на которые получить долго не удавалось. Их анализу посвящена следующая глава работы.

Оптика лунных затмений

Первый вопрос оптики лунных затмений формулируется очень просто: почему Луна остается видимой, даже полностью погрузившись в тень. Правильный ответ был впервые четко сформулирован Иоганном Кеплером. Луну освещают солнечные лучи, преломленные в атмосфере Земли. Эффект преломления (или рефракции) света в атмосфере был известен астрономам давно — его действие увеличивало видимую высоту небесных светил на небе. Особенно сильным этот эффект становится у горизонта, где он достигает $35'$. Ход лучей при этом аналогичен лунному затмению, только в последнем случае лучи не только входят, но и выходят из атмосферы. Поэтому мак-

симальный угол преломления оказывается больше 1.1° , что немного превышает горизонтальный параллакс Луны. Поэтому даже самые глубокие области тени оказываются освещенными.

Более сложный вопрос состоял в причине столь необычной окраски Луны во время затмения. Какое-то время казалось, что красные лучи сильнее подвержены явлению рефракции, что и придает затмившейся Луне красный цвет. Подобное объяснение даже сейчас можно встретить в средствах массовой информации. В том, что этот вывод неверен, можно убедиться на характерном примере явления «зеленого луча», наблюдающегося иногда при заходе Солнца при хороших атмосферных условиях. Эффект наглядно показывает, что в зеленой спектральной области величина преломления в атмосфере немного больше, нежели в красной. Вообще, спектральная зависимость преломляющей способности атмосферы слишком слаба, чтобы вызвать сколь угодно заметные цветовые эффекты во время лунных затмений. Чтобы разобраться в их природе, подробнее рассмотрим оптическую картину лунного затмения (рис. 1).

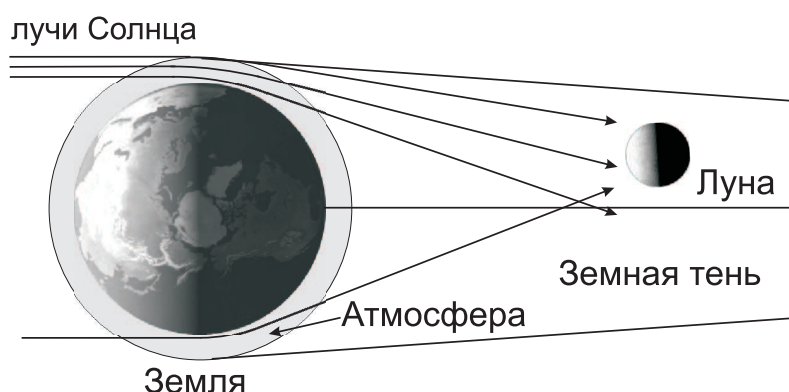


Рис. 1. Оптическая схема лунного затмения

Яркость элемента лунного диска, погруженного в тень Земли, определяется тремя основными факторами. Первый из них, наиболее значительный по величине, — рефракционная дивергенция или уменьшение потока излучения вследствие расхождения лучей. Этот эффект хорошо виден на рис. 1: солнечное излучение, захваченное узким кольцом атмосферы над лимбом Земли, далее распространяется на обширное пространство в конусе тени. Очевидно, что

его поток при этом уменьшается. Эффект фокусировки, напротив, несколько увеличивает освещенность, особенно в центральных областях тени. Оба фактора мало зависят от состояния атмосферы и длины волны излучения, легко численно моделируются и не связаны с изменениями вида Луны от затмения к затмению. Их действие во многом аналогично гравитационному линзированию.

Однако указанная аналогия не распространяется на третий фактор. Это ослабление излучения за счет рассеяния и поглощения в атмосфере Земли. Наша газовая оболочка — смесь нескольких рассеивающих и поглощающих субстанций с разными свойствами. Основная среда — газовая, рассеивающая свет в соответствии с законом Релея. Коэффициент релеевского (или молекулярного) рассеяния сильно зависит от длины волны ($\sim \lambda^{-4}$), что придает ясному дневному небу голубой цвет, а Луне в полной фазе затмения — красный, так как коротковолновое излучение рассеивается в атмосфере и в конус тени практически не проникает. По этой же причине атмосфера оказывается оптически толстой для коротковолнового излучения, идущего вдоль касательной к поверхности Земли. Таким образом, природа красного цвета Луны во время затмений совпадает с природой покраснения Солнца и Луны у горизонта.

Но молекулярное рассеяние не является причиной вариаций яркости Луны во время затмения, так как газовая плотность в фиксированной точке атмосферы сравнительно слабо зависит от времени. Эти изменения создаются рассеянием на частицах пыли и аэрозоля, присутствующих в атмосфере. Их концентрация и оптические свойства постоянно меняются в пространстве и времени. Зависимость коэффициента рассеяния от длины волны существенно слабее, чем для молекулярного рассеяния. Увеличение содержания аэрозоля в атмосфере Земли может вызвать сильное уменьшение яркости Луны в земной тени. Поэтому ее измерения эффективны для исследований глобального распределения атмосферного аэрозоля.

Оптические характеристики лунного затмения, очевидно, должны быть связаны с состоянием атмосферы в тех областях, через которые проходит солнечное излучение, преломляющееся к Луне. Это области лимба Земли, в которых Солнце и Луна во время затмения располагаются вблизи горизонта. Если Луна проходит через северную часть тени, то ее вид определяется атмосферными характеристиками в северной части лимба Земли, если через южную часть тени — то в южной части лимба. Луна имеет значительный угловой диаметр и движется сквозь земную тень в течение затмения, что

позволяет исследовать распределение аэрозоля вдоль длинной дуги земного лимба. Помимо этого разные участки Луны погружаются в тень на разную глубину и, как видно на рис. 1, освещаются солнечными лучами, преломленными на разных высотах в атмосфере Земли. Поэтому фотометрия лунных затмений обеспечивает разрешение не только по горизонтали вдоль лимба, но и по высоте. Аналогичными возможностями обладают только космические исследования атмосферы, начавшиеся в последние десятилетия.

В некоторых спектральных интервалах, особенно в инфракрасном диапазоне, к молекулярному и аэрозольному рассеянию добавляется селективное газовое поглощение на ряде атмосферных составляющих (кислороде O_2 , водяном паре H_2O , озоне O_3 , углекислом газе CO_2 и др.). Проводя спектральные измерения поверхности Луны в этих интервалах, можно также исследовать горизонтальные и вертикальные распределения этих составляющих. Благодаря большой длине касательных лучей сквозь атмосферу данный метод будет достаточно чувствительным.

Помимо изменений яркости и цвета Луны, с земной атмосферой связывались и другие оптические эффекты, наблюдаемые во время лунных затмений. Немецкий астроном Иоганнес Гартман в 1891 г. на основе обширной базы визуальных наблюдений прохождения границы тени по лунным кратерам указал, что тень несколько больше своих геометрических размеров. Эффект устойчиво наблюдался от затмения к затмению, и для его учета в настоящее время во всех эфемеридах лунных затмений размеры тени и полутени умножаются на фактор 1.02.

Гартман связал эффект увеличения размеров тени с поглощением света в земной атмосфере. Но в этом случае поглощение должно оставаться существенным до высот порядка 100 км, чего на самом деле не наблюдается. Правильное объяснение эффекта в 1892 г. дал другой немецкий астроном, Хуго Зеелигер. Видимое увеличение размеров тени связано со свойствами человеческого зрения, имеющего, как известно, логарифмическую зависимость отклика от яркости объекта. Глаз человека фиксирует границу темной тени и светлой полутени там, где перепад логарифма яркости поверхности Луны наиболее резкий. Как будет видно далее на рис. 3, подобные условия имеют место чуть дальше геометрической границы тени.

Лунные затмения и вулканическая активность

Яркость и окраска Луны во время затмения подвержены существенным вариациям. Наблюдатели отмечали лунные затмения, во время которых Луна практически исчезала с неба. Случались и затмения, сам факт которых ставился под сомнение случайными очевидцами — настолько яркой оставалась Луна.

Вопрос о причине столь резких изменений прозрачности атмосферы рассматривался учеными с XIX в. И уже тогда было отмечено, что самые темные затмения наблюдались после сильных вулканических извержений. Характерным подтверждением этого стало катастрофическое по своей мощи извержение вулкана Кракатау в Индонезии в августе 1883 г. Извержение унесло многие тысячи человеческих жизней и по сути уничтожило сам вулкан, на месте которого сейчас осталось несколько более мелких вулканов. 4 октября 1884 г. в Европе наблюдалось аномально темное лунное затмение. Связь характеристик затмения с извержением вулкана была отмечена известным французским астрономом Камилем Фламарионом. Необходимо обратить внимание на столь длительное по времени загрязнение атмосферы вулканическими выбросами. Темным было не только описанное выше затмение, произошедшее через год после извержения, но и последующие затмения в 1885 г. Это в равной степени коснулось как «северных», так и «южных» затмений, что указывало на глобальный характер загрязнения атмосферы.

Американский астроном Ричард Кин на основе данных о большом количестве затмений во второй половине XX столетия установил, что все самые темные затмения этого периода также произошли вскоре после мощных вулканических извержений. Среди темных затмений выделяются два явления, произошедшие в одну и ту же дату — 30 декабря 1963 и 1982 гг. Несомненной была связь с извержениями вулканов Агунг (Индонезия, март 1963 г.) и Эль-Чичон (Мексика, апрель 1982 г.). Самым сильным извержением XX в. стало извержение вулкана Пинатубо на Филиппинах в июне 1991 г. Существенное увеличение содержания аэрозоля в атмосфере отмечалось в течение нескольких последующих лет на основе самых разных измерений, в том числе оптических. Полные лунные затмения не происходили полтора года после извержения, а после этого периода, 9 декабря 1992 г., наблюдалось темное лунное затмение, причем с сильно неоднородной оптической структурой земной тени.

Столь сильное влияние вулканов на оптическое состояние атмосферы объясняется не только их мощностью, но и существованием сразу двух механизмов загрязнения газовой среды. В ее нижний слой, тропосферу, попадает большое количество пылевых частиц и пепла, которые остаются там в течение длительного времени. Более высокий слой — стратосфера — подвергается химическому загрязнению. Среди продуктов вулканических выбросов в значительной степени присутствует диоксид серы SO_2 . В привычных нам условиях этот газ достаточно химически устойчив. Однако в стратосфере, содержащей активные молекулы и радикалы, такие, как озон O_3 , гидроксил OH и атомарный кислород O , диоксид серы вступает в химические реакции, продуктом которых является серная кислота H_2SO_4 . Конденсируясь, она образует частицы сульфатного аэрозоля, наподобие тех, что существуют в большем количестве в атмосфере Венеры. Все это оказывает прямое влияние на оптические характеристики лунных затмений, так как именно через верхнюю тропосферу и нижнюю стратосферу проходит излучение Солнца, которое преломляется в область тени Земли.

Здесь же необходимо отметить, что благодаря своему высокому альбедо в видимой части спектра сульфатный аэрозоль отражает солнечное излучение и уменьшает приток солнечной энергии к поверхности Земли. Данный эффект получил название «антипарниковый», так как его действие противоположно парниковому эффекту, создаваемому водяным паром H_2O , углекислым газом CO_2 и другими парниковыми газами в атмосфере. Эти газы пропускают солнечное излучение, но задерживают инфракрасные лучи, уходящие от Земли в космос. Облака серной кислоты уберегают поверхность Венеры от еще более сильного разогрева, создаваемого огромным количеством углекислого газа в нижних слоях ее атмосферы.

Подобное свойство сульфатного аэрозоля заложено в основу весьма спорных, но при этом серьезно обсуждаемых предложений компенсировать парниковый эффект выбросом большого количества диоксида серы в стратосферу. Однако химические процессы, которые начнутся в стратосфере, ставят под сомнение подобный метод остановки процесса «глобального потепления».

Яркость затмений и солнечная активность

Вулканические извержения не являются единственным фактором, определяющим яркость лунных затмений. Это очевидно хотя

Таблица 1. Шкала Данжона

0	Затмение очень темное, в середине полной фазы Луна едва заметна на небе
1	Затмение темное, Луна имеет серо-коричневый цвет, детали на ней трудноразличимы
2	Темно-красные, ржавые цвета, темная зона в центре и более светлые края
3	Кирпично-красный цвет, края тени желтоватые, более яркие
4	Ярко-оранжевые, медные цвета, яркая, голубоватая граница тени

бы потому, что атмосфера Земли оказывается загрязненной вулканическими выбросами меньшую часть времени, а оптические характеристики затмений меняются постоянно. Поэтому задача поиска других факторов была и остается актуальной.

Большое внимание этой задаче уделил французский астроном Андре Данжон. Он объединил большое количество описаний и результатов наблюдений лунных затмений и в 1920 г. ввел их классификацию с оптической точки зрения — известную шкалу Данжона, которая используется и в настоящее время. Во времена Данжона систематической фотометрии поверхности Луны еще не проводилось, и за основу своей классификации он взял визуальные восприятия яркости и цвета затмившейся Луны. Каждому затмению приписывалось от 0 до 4 баллов в соответствии с табл. 1.

Естественно, подобная классификация была далека от совершенства. Визуальное восприятие могло не соответствовать истинным оптическим характеристикам. То же самое можно сказать о цветовых оттенках затмения. Исчезновение цвета у темных затмений может быть связано с цветовой чувствительностью глаза, ухудшающейся для темных объектов. Голубая кайма земной тени, которую Данжон рассматривает как признак большой яркости (4 балла), может наблюдаться как у светлых, так и у темных затмений, как это было, к примеру, 9 декабря 1992 г., и вообще связана не с аэрозолем, а с другой компонентой атмосферы, речь о которой пойдет ниже.

Тем не менее оценка по шкале Данжона могла использоваться как показатель яркости затмений с целью их систематического анализа, поиска возможной периодичности и связи с какими-либо внешними

факторами. Данжон решал эту задачу, сразу отбрасывая темные затмения, произошедшие после вулканических извержений. В результате он обнаружил циклические изменения яркости лунных затмений с периодом 10.87 года, близким к периоду изменения солнечной активности. При этом яркость постепенно увеличивается в эпоху нарастания, максимума и спада солнечной активности и резко уменьшается во время ее минимума. Позже было предложено возможное объяснение этого феномена: во время минимума активные области на Солнце появляются в основном вблизи экватора, энергичные частицы солнечного ветра в большем количестве распространяются в плоскости эклиптики и достигают земной атмосферы, вызывая образование аэрозоля.

Найденная Данжоном связь не была достаточно четкой. Английский астроном Эдвард Маундер в 1921 г. указал на возможные эффекты селекции, вызванные включением глубоких частных лунных затмений в обзор Данжона. Засветка от части диска Луны, не погруженной в тень, может создать восприятие темного затмения. Кроме того, циклы яркости затмений Данжона не были сопоставлены с реальной зависимостью солнечной активности от времени.

Важнейшим этапом в развитии науки об оптике лунных затмений стал выход в 1956 г. монографии чехословацкого астронома Франтишека Линка «Лунные затмения» (переведена на русский язык в 1962 г. [1]). В этой книге содержится обзор теоретических и экспериментальных работ на то время. Особое внимание уделяется вариациям яркости лунных затмений и их возможным причинам. Детально проверялась и гипотеза Данжона с учетом критических замечаний Маундера. На основе этой проверки был сделан вывод, что связь яркости затмений и солнечной активности действительно существует. Но при этом отмечалась необходимость ее дальнейшей проверки, а также решения вопроса о механизмах этой связи. Эти проблемы окончательно не решены и в настоящее время.

В книге Линка сделан обзор исследований оптической структуры земной тени, начавшихся в XX в. с использованием появившихся фотометрических средств. Оптическая структура оказалась далека от симметрии, во время некоторых затмений тень содержала светлые или темные пятна, что указывало на существенную неоднородность атмосферы на разных высотах вдоль лимба Земли. В большинстве случаев экваториальные зоны тени оказывались темнее полярных, а темные пятна часто соответствовали положению циклонов и скоплений облаков над лимбом Земли. Увеличить точность и разрешение

поверхностной фотометрии деталей лунной поверхности и проследить связь структуры тени с атмосферными и климатическими особенностями стало возможным на рубеже XX и XXI вв. с появлением приемников излучения нового поколения и усовершенствованием вычислительной техники.

Затмения 2004—2008 гг.: наблюдения и результаты

Первое десятилетие XXI в. стало урожайным на лунные затмения, видимые из Европейской части России и сопредельных стран. Данный раздел работы написан на основе наблюдений пяти лунных затмений. Поверхностная фотометрия Луны проводилась во время полных затмений 4 мая и 28 октября 2004 г., 4 марта 2007 г. и 21 февраля 2008 г. в Крымской лаборатории ГАИШ МГУ, а также во время глубокого частного затмения 16 августа 2008 г. в Москве. Приборы состояли из ПЗС-матриц SBIG ST-6 и Sony DSI Pro с объективами «Рубинар-500» и «Юпитер-36В» соответственно. Измерения проводились вне затмения, в полутеневой, частной и полной теневой фазе затмений. В зависимости от камеры, спектральной полосы и фазы затмения экспозиция составляла от 0.005 до 20 с. Фотометрический контроль изменения прозрачности атмосферы осуществлялся с помощью измерений стандартной звезды, находящейся рядом с Луной во время затмения.

Фотометрия обоих затмений 2004 г. проводилась в двойной спектральной полосе на границе видимого и инфракрасного диапазонов с максимумами на длинах волн 6750 и 8550 Å. Эта спектральная область в основном свободна от полос селективного поглощения атмосферных газов, лишь несильно задевая полосы озона O_3 и водяного пара H_2O , что учитывалось при обработке данных. Оптическая карта трех затмений 2007 и 2008 гг. строилась в узкой полосе с длиной волны 8670 Å. Эта полоса полностью свободна от селективного поглощения атмосферных газов. Ослабление света в атмосфере в этих спектральных областях создается прежде всего молекулярным и аэрозольным рассеянием излучения. Процедура фотометрии фрагментов поверхности Луны и вычитания фона неба, включая лунный ореол, описаны в [2].

Период 2004—2008 гг. особенно интересен тем, что он содержит момент минимума солнечной активности. В соответствии с гипотезой Данжона это должно было привести к резкому уменьшению ярко-

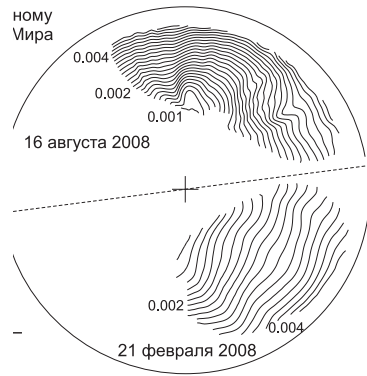


Рис. 2. Оптическая структура земной тени во время затмений 2004—2008 гг.

сти затмений 2007 и 2008 гг. Данный эффект мог быть еще усилен извержением вулкана Рабаул в Новой Гвинее в октябре 2006 г., после которого в течение нескольких месяцев в атмосфере наблюдался повышенный фон стратосферного аэрозоля [3, 4].

Рис. 2 содержит распределение величины относительного потемнения поверхности Луны внутри земной тени для четырех лунных затмений в указанных выше спектральных полосах. Сразу можно сказать, что уменьшения яркости затмений в 2007—2008 гг. не произошло. Данная величина в эти годы даже несколько выше, чем в 2004 г., однако это связано с большей инструментальной длиной волны. Для затмений 4 мая 2004 г. и 4 марта 2007 г. обращает на себя внимание существенное потемнение в экваториальной области в соответствии с [1]. Во втором из этих случаев потемнение вырождается в глубокий минимум яркости, удаленный от центра земной тени точно в экваториальном направлении. Оба затмения 2008 г. характеризуются менее типичной оптической структурой тени с потемнением в полярных областях (южной и северной для первого и второго затмения соответственно). Темное пятно в южной полярной области заметно и для затмения 4 мая 2004 г..

На рис. 3 показаны зависимости относительного потемнения элементов лунной поверхности от углового расстояния до центра тени для затмения 4 мая 2004 г. Символы соответствуют наблюдательным данным для разных позиционных углов в тени, линия — результатам численного моделирования для газовой атмосферы без аэрозоля. На

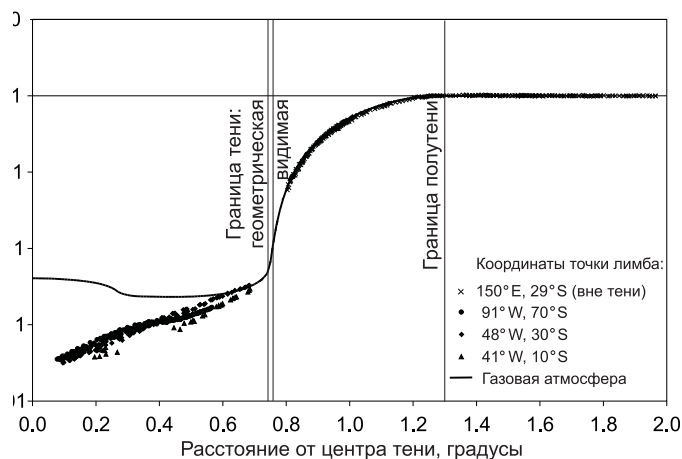


Рис. 3. Экспериментальный и теоретический профиль яркости лунного затмения 4 мая 2004 г.

рисунке виден эффект Зеелигера — максимальный градиент яркости лунной поверхности наблюдается чуть дальше геометрической границы тени.

Можно видеть, что во внешней части тени, а также за ее пределами яркость Луны совпадает с данными теоретической газовой модели, в то время как во внутренних областях тени экспериментальная яркость существенно ниже. Подобная картина наблюдается и для других затмений. Из этого можно сделать вывод, что тропопауза и стратосфера, «ответственные» за внешние области тени, вполне соответствуют газовой модели, а ниже появляется дополнительное ослабление очевидно связанное с атмосферным аэрозолем. На этом базируется метод решения обратной задачи и определения аэрозольного ослабления на разных высотах над разными точками лимба, подробно описанный в [2, 5].

Результатами подобных вычислений являются значения оптической толщины аэрозоля вдоль луча, проходящего на разных высотах над земной поверхностью. Распределения этих величин для высоты 10.5 км величин вдоль лимба Земли для всех пяти затмений показаны на рис. 4. Вполне естественно, что темные пятна, наблюдавшиеся на оптических картах лунной тени, соответствуют областям повышенной аэрозольной оптической толщины над лимбом.

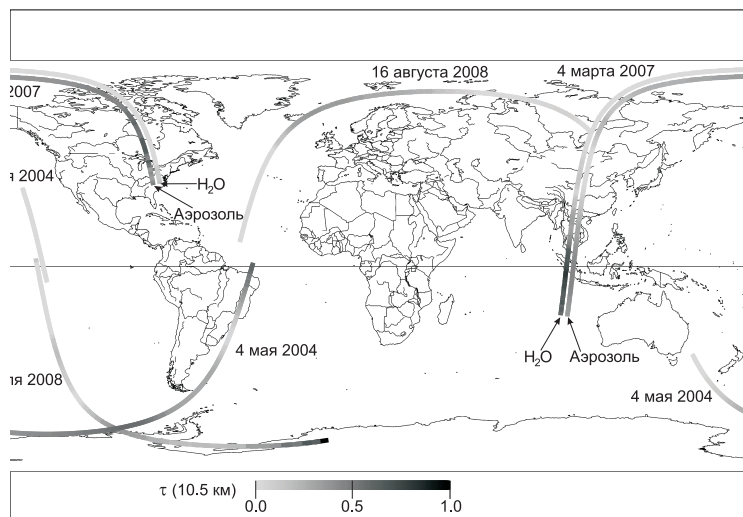


Рис. 4. Распределение аэрозоля в верхней тропосфере на основе данных лунных затмений

Сопоставление полученной картины с метеокартами на даты затмений показывает, что в большинстве случаев областям повышенного содержания аэрозоля на высоте 10.5 км соответствуют зоны облачности на меньших высотах. Во время затмений 4 мая 2004 г. и 4 марта 2007 г. экваториальная зона лимба пришлась на материковые зоны, тропосфера которых содержит большое количество аэрозоля, что стало причиной потемнения экваториальных зон тени в эти два затмения. Экваториальная часть лимба затмения 2007 г. находится недалеко от вулкана Рабаул, что могло дополнительно увеличить содержание аэрозоля.

Затмения 21 февраля и 16 августа 2008 г. раскрывают другую картину: экваториальные зоны лимба приходятся на океаны и оказываются более прозрачными. В то же время облачные районы в Антарктиде и вблизи Исландии задерживают солнечное излучение и вызывают полярное уменьшение яркости тени в первом и втором затмении соответственно. Антарктическая облачность также связана с полярным пятном в тени 4 мая 2004 г.

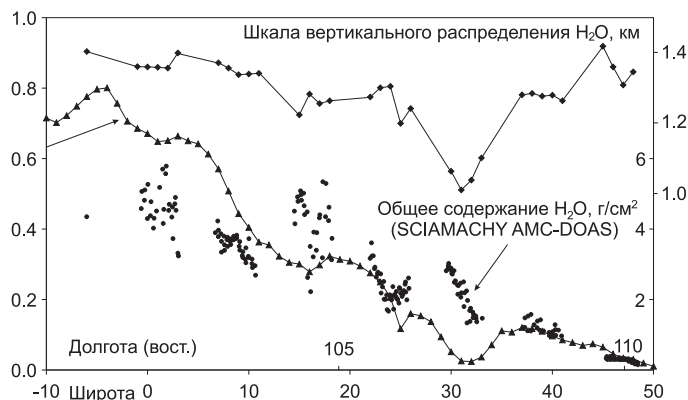


Рис. 5. Характеристики водяного пара по данным затмения 4 марта 2007 г.

Лунные затмения и водяной пар

Как уже говорилось выше, лунные затмения можно использовать для исследования глобального распределения малых газовых примесей в атмосфере. С этой целью поверхностная фотометрия Луны во время затмения 4 марта 2007 г. наряду с узкой полосой 8670 \AA проводилась в полосе с эффективной длиной волны 9380 \AA , попадающей в область сильного селективного поглощения водяного пара H_2O (эффективное сечение поглощения молекулы в инструментальной полосе составляет $5.6 \times 10^{-23} \text{ см}^2$). Сопоставляя результаты наблюдений в обеих полосах и считая аэрозольное ослабление (которое мало зависит от длины волны) в них одинаковым, мы можем получить значения оптической толщины водяного пара, аналогичные полученным выше значениям для атмосферного аэрозоля.

Оптическая структура земной тени 4 марта 2007 г. во второй инструментальной полосе во многом аналогична первой полосе, но темное пятно в экваториальной зоне тени выражено еще более резко [5], что указывает на значительное присутствие водяного пара в экваториальной тропосфере. Этот естественный вывод подтверждается результатами, показанными на рис. 4.

Получившееся широтное распределение водяного пара в верхней тропосфере оказывается в хорошем согласии с данными космического мониторинга этой атмосферной составляющей. На рис. 5 приведены зависимости оптической толщины водяного пара по кас-

тельной траектории с высотой 10.5 км от координат точек лимба на основе измерений лунного затмения, а также общего содержания H_2O в атмосфере в тех же районах по данным космической миссии SCIAMACHY [6]. Уверенная корреляция обеих величин позволяет определить величину характерной шкалы вертикального распределения водяного пара в этих районах, также показанную на рис. 5. Ее значение составляет около 1.3 км, что в 6 раз меньше аналогичной шкалы для воздуха. Широтные вариации этой величины невелики, заметно лишь ее уменьшение в горных районах юго-восточной Азии.

Лунные затмения и атмосферный озон

Одна из самых важных малых составляющих земной атмосферы, защищающая живые организмы от солнечного ультрафиолета, является также химически и оптически активной компонентой нашей газовой оболочки. Молекула озона O_3 характеризуется большим количеством полос поглощения не только в ультрафиолетовом, но и в других диапазонах электромагнитного спектра. Наличие инфракрасных полос на длине волны 9.6 мкм включает тропосферный озон в список парниковых газов. Есть у озона полосы поглощения и в видимом диапазоне — полосы Шайюи. Они охватывают зеленую, желтую и красную область, а их максимум приходится на длину волны 6 000 Å. Эти полосы не очень сильные, при нормальном содержании озон задерживает лишь 4–5 % излучения, идущего вертикально через атмосферу. Но если излучение распространяется по касательной сквозь озоновый слой, оно будет существенно поглощаться, изменяя свой спектральный состав и приобретая голубой цвет, присущий концентрированному озону в лабораториях (голубые лучи озоном не поглощаются).

Максимальная концентрация озона достигается в стратосфере на высотах 20–25 км. Молекулярное рассеяние на этих высотах уже невелико, и коротковолновое излучение может пройти по касательной траектории и частично выйти из атмосферы. Угол преломления у него будет также мал, и оно попадает в самые внешние области земной тени. В итоге, если во время лунного затмения лимб Земли пройдет через районы, богатые озоном, внешние области тени могут приобрести весьма нетипичный для затмения голубоватый оттенок. Подобная ситуация имела место 4 марта 2007 г., когда лимб пересе-

кал обширные зоны зимне-весеннего озонового максимума в Азии и Северной Америке. Наличие полос Шапюи позволило уже в первой половине XX в. исследовать высотное распределение озона на основе фотометрии лунных затмений [1].

Наблюдения затмений 2004–2008 гг., описанные выше, проводились вне полос поглощения озона (за исключением небольшого перекрытия полос Шапюи и инструментального диапазона 2004 г.), и корреляции результатов с распределением озона, казалось бы, быть не должно. Однако результаты наблюдений в южной области земной тени 4 мая 2004 г. и 21 февраля 2008 г. показали сходство распределения аэрозоля в верхней тропосфере и нижней стратосфере (темных зон в тени) и локальных минимумов общего содержания озона в южных умеренных и полярных широтах. Ситуация обратна случаю истинного озонового поглощения.

Данный факт можно объяснить тем, что в южной полярной стратосфере на высоте 15–17 км эффективен механизм образования перламутровых или полярных стратосферных облаков. Эти облака имеют сложный химический состав и содержат, в частности, соединения хлора и азота. При освещении Солнцем на поверхности аэрозольных частиц протекают химические реакции, в ходе которых в атмосферу поступают свободный атомарный хлор и окиси «нечетного» азота (NO , NO_2). Эти химические компоненты активно разрушают стратосферный озон в ходе циклических реакций, сами при этом сохраняясь. Подобным образом один атом хлора может уничтожить несколько миллионов молекул озона. Выброс в атмосферу соединений хлора и брома антропогенного происхождения в XX веке посредством описанного механизма привел к появлению «озоновых дыр» в южной атмосфере. После принятия Монреальского протокола в 1987 г. выброс галогеносодержащих соединений в атмосферу сократился, но восстановление озонового слоя продлится как минимум несколько десятилетий.

В северном полушарии процесс образования полярного стратосферного аэрозоля идет не столь эффективно, и, к счастью, такого сильного уменьшения количества озона там не наблюдается. Соответственно корреляция данных «северных» лунных затмений 4 марта 2007 г. и 16 августа 2008 г. и общего содержания озона также отсутствует.

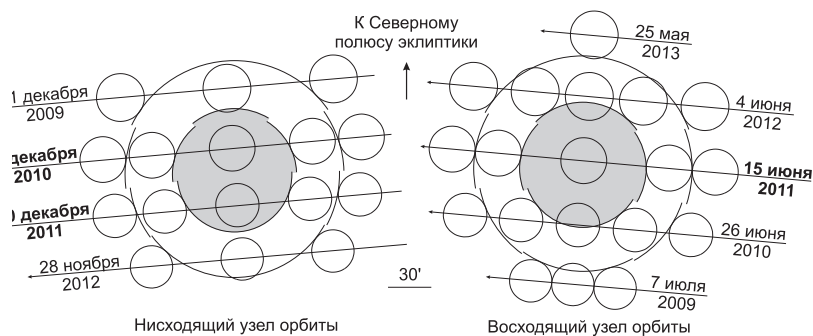


Рис. 6. Лунные затмения с середины 2009 до середины 2013 г.

Заключение

Как мы видим, лунные затмения имеют не только богатую историю наблюдений, но и проявляют связь со многими актуальными проблемами оптики и состава атмосферы Земли. Ряд вопросов, которые казались уже решенными в XX в., по-прежнему остаются открытыми. К примеру, вывод Данжона об увеличении содержания аэрозоля в атмосфере и потемнении лунных затмений во время минимума солнечной активности не подтвердился в ходе наблюдений 2004—2008 гг. В статистической проверке нуждается связь аэрозольного ослабления и общего содержания озона как в южном, так и в северном полушарии.

Все это прибавляет интерес к фотометрическим и спектральным наблюдениям лунных затмений. В заключение кратко опишем лунные затмения, которые произойдут в предстоящие годы. Летом 2009 г. начнется новая четырехлетняя «вавилонская серия», состоящая из 9 лунных затмений, разделенных интервалами в шесть лунных месяцев. В нее войдут 3 полутеневых, 3 частных и 3 полных теневых затмения. Видимый путь Луны сквозь земную тень и полутень во время всех затмений показан на рис. 6, выполненном в эклиптической системе координат.

Первое теневое затмение этой серии начнется практически одновременно с новым 2010 г. в Уральском федеральном округе России и будет видно на всей территории нашей страны. В России будут также хорошо видны два полных теневых затмения 15 июня и 10 декабря 2011 г. Особенно интересным будет первое из этих затмений,

во время которого Луна пройдет практически через центр земной тени. Его наблюдения будут эффективны для анализа аэрозоля и малых газовых составляющих экваториального пояса Земли. Второе затмение вновь обратит внимание на проблемы стратосферного аэрозоля и содержания озона в южном полушарии нашей планеты. Необходимо также добавить, что после 2011 г. начнется длительный период, неблагоприятный для наблюдений полных лунных затмений из центральных регионов нашей страны.

Автор работы выражает благодарность своему многолетнему коллеге Игорю Алексеевичу Маслову, совместно с которым проводились наблюдения лунных затмений 2004—2008 гг..

Список литературы

1. *Линк Ф.* Лунные затмения. — М.: Физ.-мат. лит., 1962.
2. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Atmospheric Aerosol Limb Scanning Based on the Lunar Eclipses Photometry // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2006. — Vol. 102. — P. 499.
3. *Зуев В. В., Бурлаков В. Д., Долгий С. И., Невзоров А. В.* Аномальное аэрозольное рассеяние в атмосфере над Томском в осенне-зимний период 2006/2007 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. — 2007. — Т. 20, вып. 6. — С. 524.
4. *Угольников О. С., Маслов И. А.* Исследования стратосферного аэрозольного слоя на основе поляризационных измерений сумеречного неба // *Космические исследования*. — 2009. — Т. 47. — В печати.
5. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Altitude and Latitude Distribution of Atmospheric Aerosol and Water Vapor from the Narrow-Band Lunar Eclipse Photometry // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2008. — Vol. 109. — P. 378.
6. *Noel S., Buchwitz M., Bovensmann H., P.Burrows J.* Validation of SCIAMACHY AMC-DOAS water vapour columns // *Atmosphere Chemistry and Physics*. — 2005. — Vol. 5. — P. 1835.

**КООДИНАТНО-ВРЕМЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СОВРЕМЕННЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЙ**

Обоснованы требования к координатно-временному обеспечению при проведении высокоточных астрономических наблюдений с помощью наземных и космических измерительных инструментов. Приведены особенности использования аппаратно-программных средств космических навигационных систем, частотно-временных стандартов для астрономических измерительных средств различных классов. Рассматриваются новые методы определения ПВЗ и учета релятивистских эффектов, позволяющих обеспечить высокие точности астрометрических измерений.

СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ: МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ И ПОДДЕРЖАНИЯ

В лекции рассмотрены некоторые вопросы природы спиральных галактических узоров. Основное внимание уделено влиянию темной материи на свойства спиральных структур, которые могут нести важнейшую информацию о характере распределения темного вещества.

Some problems of nature of spiral galactic patterns are considered. The basic attention is given to influence of a dark halo on properties of spiral structures, which can give the important information on character of distribution of dark matter.

Наблюдаемые свойства спиралей в газовом и звездном дисках

Спиральный узор [1] является важнейшей характеристикой, определяющей морфологический тип большинства галактик (рис. 1). Принято выделять галактики с глобальным спиральным узором (Grand Design), для которого характерны правильность и гладкость структур, охватывающих почти весь диск в пределах оптического радиуса R_{opt} . У некоторых галактик мы видим систему клочковатых непротяженных спиралей без образования регулярной спиральной структуры. Такие узоры принято называть флокулентными (англ. flocculent = хлопьевидный). Достаточно типичными представителями являются NGC4414, NGC0598, NGC2841.

Отметим, что при определении морфологического типа вопрос о характере спиралей (глобальный или флокулентный узор) не является определяющим. Но большинство флокулентных спиралей относятся к галактикам поздних морфологических типов (Sc—Sm). Флокулентные спирали в галактиках более ранних типов характеризуются более упорядоченной общей структурой.

Перечислим важнейшие результаты наблюдений, связанные со спиральной структурой.

Рис. 1. Классификация галактик по Вокулеру [2] (слева) и классическая диаграмма Хаббла (справа)

1. Морфология спиралей, в частности степень закрученности спиралей, в среднем систематически зависит от относительной массы сфероидальной подсистемы (линза, балдж), относительной доли газа, максимальной скорости вращения диска, общей массы галактики.
2. Спиральные рукава представляют собой области активного звездообразования и состоят по большей части из молодых горячих звезд.
3. Примерно $2/3$ S -галактик в центре имеют бар (центральную перемычку, см. рис. 1), от концов которого отходят спиральные рукава. Доля галактик с баром, по наблюдениям, неуклонно возростала от $\sim 15\%$ 30—40 лет назад до современных $\simeq 70\%$.
4. Несмотря на встречающуюся шутку «если в галактике нет бара, значит его не искали», у значительной части дисковых систем спирали простираются до самого центра ($r \lesssim 0.5$ кпк). Хорошо изученными примерами являются NGC.

5. Типичным являются «отроги» и «хвосты» от основной спирали, «ветвления» спиралей, многоярусные спиральные структуры.
6. В разных электромагнитных диапазонах (радио-, ИК, оптика, УФ, X-) и для разных показателей цвета морфология спиральной структуры у одной и той же галактики в ряде случаев различается существенно.
7. Важнейшим индикатором галактических спиралей являются тонкие темные из-за поглощения ветви межзвездной пыли вдоль внутреннего края рукавов (результат сжатия газа и пыли ударной волной) и пылевые прожилки поперек рукавов.
8. Динамическим индикатором спирального узора выступает спиральная структура поля систематических скоростей звезд и газа.
9. Внутри бара по газу и пыли прослеживаются сложные спиральные структуры, обусловленные твердотельно вращающимся звездным баром. В частности, имеется сильное сжатие газа на передней кромке перемычки (наблюдаются узкие полосы пыли вдоль передних кромок бара, затем переходящие на внутренний край спиральных ветвей).
10. За последние два года уточнены наши представления о спиральной структуре Галактики: наша система обладает достаточно типичной двухрукавной спиралью с центральным баром (рис. 2). Два рукава находятся внутри радиуса большой оси бара $r \lesssim 3.5$ кпк, и два мощных рукава отходят от концов бара наружу. По-видимому, за пределами 7 кпк происходит ветвление и на периферии имеем 4-рукавный узор (по данным наблюдений молекулярного газа CO [3]).
11. По данным наблюдений, фрагментарных галактик существенно больше, чем галактик с регулярной структурой. Хотя четкое разграничение между ними провести непросто и имеется непрерывный ряд от grand design до флокулентных и неправильных галактик, в которых трудно выделить сколько-нибудь протяженные сегменты спиралей.
12. Как правило, контраст яркости (а следовательно, и плотности) спирального узора галактик по старым звездам диска (в красной области спектра) невелик — в пределах от нескольких

процентов до $30 \div 40$ % от осесимметричного фона. В галактиках с баром может наблюдаться более мощная (до 50 %) волна плотности в старом населении диска.

13. По газу перепад плотности от спирального рукава к межрукавному пространству достигает обычно величины порядка усредненной в азимутальном направлении плотности газового диска (не считая области вблизи ударного фронта волны сжатия, где скачок плотности еще выше).
14. Наблюдается градиент возраста звезд в спиральных ветвях, что объясняется повышенным темпом рождения звезд на фронте галактической ударной волны и различием между скоростью спирального рукава и вращением звездно-газового диска.

Общепринято, что спираль Grand Design является твердотельно вращающейся глобальной волной плотности в дифференциально вращающемся звездно-газовом диске. Флокулентные структуры обусловлены мощными областями звездообразования, которые растягиваются в спирали из-за дифференциальности вращения диска. Такая волна индуцированного звездообразования ярко приводит к появлению ярких молодых звезд и горячего газа, слабо влияя на плотность звездного диска, в котором находится основная доля массы.

Подчеркнем, что, несмотря на 70-летнюю историю исследований и впечатляющий прогресс в наблюдениях и теории, мы не можем сказать, что природа спиральных узоров открыла все свои тайны [4, 5].

Глобальные волны плотности

Первая проблема долговременного существования квазистационарной спиральной структуры связана с дифференциальностью вращения галактического диска, основная часть которого вращается с угловой скоростью $\Omega \propto 1/r$. Гипотеза Б. Линдблада о волновой природе спирального узора объясняет, почему дифференциальность вращения звезд и газа не разрушает спиральный узор за несколько периодов обращения галактики. Основы математического аппарата для описания собственных мод в бесстолкновительном звездном диске были разработаны в работе Lin & Shu [6, 7].

При таком подходе динамика газовой подсистемы является результатом гравитационного воздействия со стороны волны в массивном звездном диске [8]. Для спиральной волны вида в полярной

Рис. 2. Спиральная структура Галактики по результатам обзора на телескопе «Spitzer». В целом наблюдается достаточно классическая картина двухрукавного узора с центральной перемичкой и наличием более слабых фрагментов дополнительных спиралей. Рукава Щит—Центавра и Персея начинаются от концов бара. Имеются второстепенные рукава в центральной области (Стрельца, Нормы) и на периферии (отрог Ориона = рукав Ориона = след Ориона, где располагается Солнце и Внешний рукав за пределами основного рукава Персея)

системе координат (r, φ)

$$\tilde{f} = f_0 \cdot \exp\{-i\omega t + ikr + im\varphi\} \quad (1)$$

дисперсионное уравнение в простейшем случае имеет вид

$$(\omega - m\Omega)^2 = \kappa^2 + k^2 c^2 - 2\pi G \sigma_0 k, \quad (2)$$

где κ — эпициклическая частота вращения диска; σ_0 — равновесная поверхностная плотность; c — характерная тепловая скорость вещества. В таком диске имеются выделенные радиусы — коротационный и Линдбладовские резонансы, определяющие область существования волн в звездном диске (рис. 3).

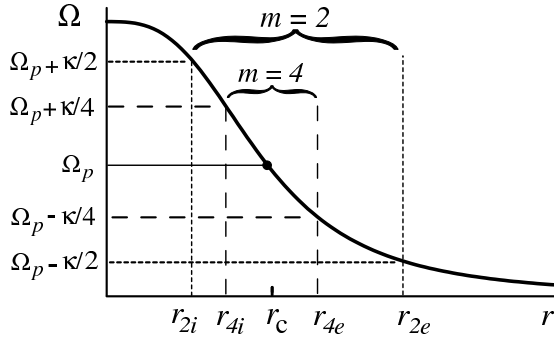


Рис. 3. Линдбладовские резонансы r_{2i} , r_{2e} и радиус коротации r_c ($\Omega(r_c) = \Omega_p$) в дифференциально вращающемся диске для двухрукавной ($m = 2$) и четырехрукавной ($m = 4$) спиральной волны с угловой скоростью вращения $\Omega_p = \text{Re}(\omega/m)$

Разработана теория генерации спиральной структуры, основанная на механизме swing amplification. В ее рамках свойства узора могут существенно зависеть от массы гало [9].

Генерация спиральных волн центральным баром или триаксиальным балджем

Считается, что отсутствие центральной симметрии гравитационного потенциала галактики из-за бара или неосесимметричного (триаксиального) балджа полностью объясняет природу спирального узора. Особенно наглядными являются многочисленные численные эксперименты с динамическими моделями звездных и газовых дисков (например, [1, 10]). Отметим некоторые сохраняющиеся вопросы, связанные с генерацией спиральных волн центральной перемычкой.

Темное гало — важная компонента галактики

Перечислим основные доводы, указывающие на то, что темное массивное гало внутри оптического радиуса и в ближайшей окрестности S -галактик в существенной мере определяет их наблюдаемые свойства галактик. Здесь не будем ограничиваться только S -галактиками, рассматривая и эллиптические.

- Протяженные плоские кривые вращения, когда скорость газа не падает вплоть до расстояний $(2-3)R_{opt}$. У NGC 3741 кривая вращения по HI прослеживается до 38 радиальных шкал ($=8$ оптических радиусов)! Другими словами, форма кривой вращения сильно отличается от ожидаемой в предположении о постоянстве M/L вдоль радиуса. Модели максимального диска уже в пределах R_{opt} дают значения $M_h/M_d \gtrsim 0.5$.
- Отношение массы к светимости M/L оказывается существенно выше, чем можно ожидать для нормального звездного населения, если оценивать по динамике галактического диска (остается, однако, вопрос, что считать нормальным звездным населением).
- По измерению собственных скоростей членов соседних систем галактик общая наблюдаемая масса скоплений существенно меньше, чем требуется из теоремы вириала (проблема Цвикки). Для Местной группы галактик внутри сферы 300–400 кпк $(M/L)_{total} > 100$, что в 10 и более раз превышает соответствующее значение для Галактики.
- Результаты гравитационного линзирования указывают на массивное темное вещество, окружающее звездно-газовые подсистемы галактик. Для крупных скоплений наблюдаемая масса лежит в пределах 10–20 % от общей даже с учетом горячего межгалактического газа.
- Существование холодных звездных дисков без баров указывает на значительное по массе гало. Без последнего диск либо должен иметь бар, либо быть очень горячим $c_r/V \gtrsim 0.5$ на периферии диска (c_r — дисперсия радиальных скоростей звезд в диске).
- На периферии Е-галактик локальные значения отношения массы к светимости M/L_B увеличиваются, превышая значения 5–10 солнечных единиц, типичных для центральных областей. Такой рост указывает на присутствие темной массы.
- Обнаружение горячих (рентгеновских) газовых корон с температурой $\sim 10^6$ К свидетельствует о присутствии значительной темной массы.
- Галактики низкой поверхностной яркости (LSB) имеют скорости вращения до 100–200 км/с, что сложно объяснить без привлечения значительной скрытой массы. Масса барионного ве-

щества у карликовых LSB, по-видимому, не превышает 20 % от общей массы [11].

- Большая часть спиральных галактик на периферии диска ($r \gtrsim 2L_*$) является динамически холодной, поскольку дисперсия радиальных скоростей c_r мала по сравнению со скоростью вращения $c_r/V_{\max} \simeq 0.3 \div 0.1$. Это указывает на присутствие массивного гало в пределах звездного диска.
- Без привлечения темного гало не удастся объяснить толщину звездных дисков, для которых отношение вертикальной шкалы к радиальной лежит в пределах $h_z/L_* \simeq 0.1 - 0.3$. Толщина звездных дисков h_z при прочих равных условиях зависит от массы гало. В отсутствие темной сфероидальной компоненты звездные диски должны быть заметно толще наблюдаемых [12].
- Прямую оценку массы темной материи внутри галактики и в ее ближайшей окрестности дает кинематика полярных колец [13]. Сравнение кинематики в двух ортогональных направлениях (плоскости диска и полярного кольца) предоставляет принципиальную возможность исследовать форму темного гало — его отличие от сферической симметрии.
- Кинематика так называемых сверхбыстрых звезд (Hyper Velocity Stars = HVS), которых обнаружено уже около 20 [14], существенно зависит не только от массы темной материи, но и анизотропии в распределении плотности. Таким образом, данные наблюдений за HVS позволяют получить ограничения на отношения осей гало.
- Динамика наблюдаемых в гало нашей Галактики газовых и звездных потоков (высокоскоростные облака = high-velocity clouds, intermediate velocity clouds, Магелланов Поток, приливные потоки звезд и газа — Стрельца, Орфана) также указывает на присутствие темной материи значительной массы.

Представляется, что вывод о присутствии в пределах оптического радиуса темной массы, сопоставимой или превышающей суммарную массу газа и звезд, неизбежен, по крайней мере для большинства галактик. При этом основная масса темного вещества должна быть вне диска. Оценки отношения темной массы к барионной внутри оптического радиуса с использованием различных методов и различного наблюдательного материала согласуются между собой с точностью до фактора 2.

Газовый диск в неосесимметричном гало

Триаксиальность гало свидетельствует о неосесимметрии в распределении массы гало в плоскости галактического диска. Рассмотрим связанное с этим воздействие на звездный и газовый диск [15]. Если центральная перемычка, масса которой мала по сравнению с массой диска, способна генерировать спиральный узор, то каково воздействие более массивного по сравнению с диском триаксиального гало?

Рассмотрим триаксиальное гало, которое определяется гравитационным потенциалом

$$\Psi(x, y, z) = 4\pi G \varrho_{h0} a^2 \left\{ \ln(\xi) + \frac{\arctg(\xi)}{\xi} + \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \xi^2}{\xi^2} \right\}, \quad (3)$$

где $\xi^2 = (x/a)^2 + (y/b)^2 + (z/c)^2$; ϱ_{h0} — центральная плотность гало; a, b, c — характерные шкалы гало в трех направлениях. В случае $a = b = c$ имеем сферическое квазиизотермическое гало, обеспечивающее постоянство скорости вращения на больших расстояниях $r \gg a$ — кривая вращения типа плато. При $q = a/b \neq 1$ имеет неосесимметричное гало, которое может вращаться с угловой скоростью Ω_h . Данные наблюдений и космологические модели допускают значения $\varepsilon = |q - 1| \simeq 0 \div 0.2$.

Обсудим результаты гидродинамического моделирования методами TVD (автор М. А. Еремин) и SPH (авторы М. А. Бутенко и С. С. Храпов). На рис. 4 показаны спиральные структуры в газовом диске, которые генерируются неосесимметричным гало (<http://spiral.infomod.ru/5>).

Отметим некоторые характерные особенности.

1) Наличие неосесимметричного гало во всех случаях приводит к формированию спиральных структур в газовом диске. Возмущения нарастают до сильно нелинейной стадии, образуя систему ударных волн. Массивное неосесимметричное гало способно генерировать нелинейные волны даже при малых $\varepsilon < 0.01$, но время нарастания в этом случае превышает 10 периодов обращения периферии диска.

2) Геометрия спиральных узоров существенно зависит от кривой вращения газа $V(r)$, характера распределения плотности в темном гало $\varrho_h(r, \varphi)$, радиального профиля поверхностной плотности $\sigma_g(r)$ и скорости звука $c_s(r)$ газа. В частности, в центральной части диска могут формироваться лидирующие спирали, переходящие на периферии в отстающие, образуя в центре сложные Θ -структуры.

Рис. 4. Распределения плотности в газовом диске в плоскости $z = 0$ при различных значениях параметров диска и триаксиального гало. На рис. (ж) видна начальная стадия разрушения спиральных рукавов на периферии диска в случае характерной особенности гало в центральной области

3) При определенных моделях гало, отличных от (3), например характеризующихся каспом, возможно развитие гофрировочной неустойчивости спирального рукава (см. последний слайд на рис. 4), которая приводит к его разрушению.

4) Если зона квазитвердотельного вращения в центре галактики мала по сравнению с радиальной экспоненциальной шкалой диска L_* , то формируются более тугозакрученные спирали.

5) Имеется удовлетворительное согласие между результатами двумерных и трехмерных расчетов. На начальных стадиях (несколько оборотов вращения) генерации спиралей наблюдаются косые сильно нелинейные волны в вертикальном направлении.

6) В более холодных дисках (при больших числах Маха) формируются более тугозакрученные и тонкие волны.

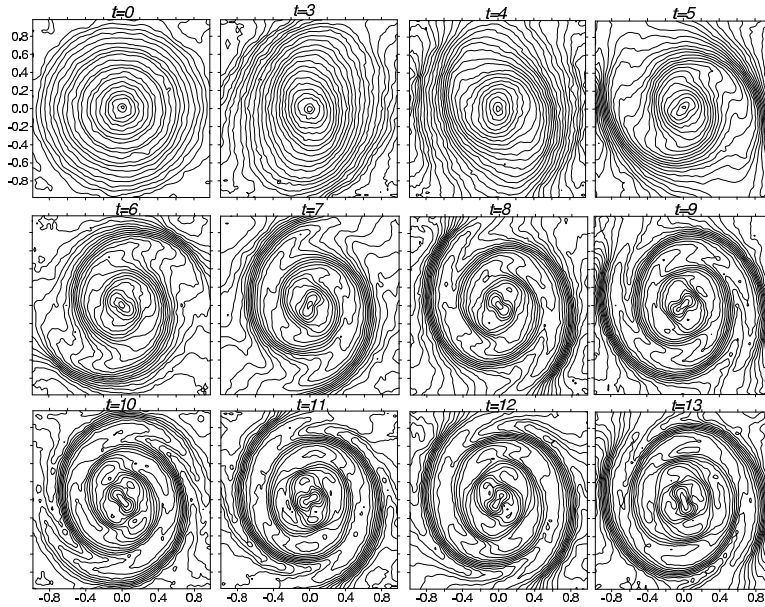


Рис. 5. Изолинии логарифма поверхностной плотности в звездном диске в различные моменты времени в случае $\varepsilon = 0.15$, $N = 10^6$. Отношения масс гало к диску $M_h/M_d = 4$ внутри сферы $r = 4L_* = 1$

Звездный диск в неосесимметричном гало

Масса звездного диска превосходит массу газа, поэтому любые возмущения звездной подсистемы дополнительно влияют на динамику более холодного газового диска. На рис. 5 показаны типичные результаты эволюции звездного самогравитирующего бесстолкновительного диска в модели N -тел в триаксиальном гало. Перечислим основные результаты.

1) Существенно, что, несмотря на заметную неосесимметрию гало и связанное с этим очень мощное для звездного диска неосесимметричное возмущение в виде двухрукавной спиральной волны в целом диск на поздних этапах эволюции имеет симметричный вид, типичный для случая динамики диска с самосогласованной волной плот-

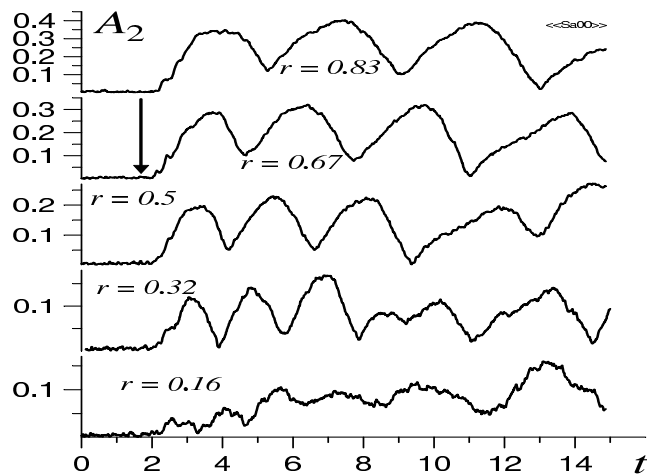


Рис. 6. Зависимости амплитуды Фурье-гармоники $m = 2$ от времени t на различных радиусах r для эксперимента на рис. 5

ности в центральном внешнем гравитационном поле, как это имеет место при моделировании гравитационно неустойчивого диска.

2) В процессе формирования спиральной структуры и в дальнейшем на протяжении десяти оборотов вращения диска усредненные по азимутальному углу параметры диска (поверхностная плотность, три компоненты дисперсии скоростей c_r , c_φ , c_z , скорость вращения V , толщина диска h_z) не испытывают сколько-нибудь заметных систематических изменений (нагрева диска или перераспределения вещества вдоль радиуса). В результате сохраняется исходный источник генерации спиральной структуры.

3) Спиральный узор в звездном диске оказывается нестационарным. Эволюция имеет квазипериодический характер. Нелинейная спиральная волна вращается с характерной частотой $\Omega_p = \text{Re}(\omega/m)$, которая зависит от времени. На фиксированном радиусе r при азимутальном движении амплитуда волны меняется квазипериодически (рис. 6). Причем имеется сдвиг фазы на различных радиусах.

4) Можно выделить две характерные скорости вращения узора на каждом фиксированном радиусе (рис. 7). Большую часть времени волна движется с меньшей частотой Ω_{p1} , для которой радиус

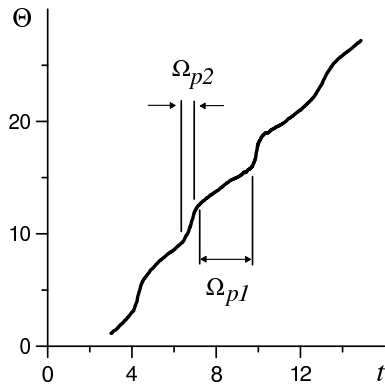


Рис. 7. Зависимость фазы волны от времени $\Theta(t)$ на фиксированном радиусе. Имеется две стадии, характеризующиеся разной частотой вращения $\Omega_p = d\Theta/dt$

коротации r_{c1} находится на периферии диска или за его пределами. Время движения с большой частотой вращения Ω_{p2} существенно меньше, что обусловлено прохождением через потенциальную яму гало. Такой характер движения волны плотности типичен при наличии неосесимметричного гравитационного поля невращающегося или очень медленно вращающегося гало ($\Omega_h \ll \Omega_p$). Частоте Ω_{p2} соответствует радиус коротации r_{c2} , который лежит в пределах диска в области $r \simeq (2 - 3) \cdot L_*$.

5) В случае формирования мощного глобального бара в центре диска (в модели, изображенной на рис. 5, его размер очень мал) характер эволюции может существенно усложниться. В частности, наряду с модой $m = 2$ образуется возмущение с азимутальным числом $m = 3$.

Таким образом, триаксиальное гало (неосесимметричное в плоскости диска) приводит к генерации спирального узора в газовом и звездном дисках с характерными свойствами. Если такого рода модели не могут описывать наблюдаемые рукава, то имеем достаточно жесткие ограничения на форму темного гало в плоскости галактических дисков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-02-01204.

Список литературы

1. Морозов А. Г., Хоперсков А. В. Физика дисков. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2005.
2. Buta R., Mitra S., de Vaucouleurs G. Mean morphological types of bright galaxies // Astron. J. — 1994. — Vol. 107. — P. 118.

3. *Englmaier P., Pohl M., Bissantz N.* The Milky Way Spiral Arm Pattern // ArXiv:0812.3491.
4. *Ефремов Ю. Н.* Очаги звездообразования в галактиках. — М.: Наука, 1989.
5. *Астрономия: век XXI*, Ред. В. Г. Сурдин. — Фрязино: ВЕК2, 2008.
6. *Lin C. C., Shu F. H.* On the spiral structure of disk galaxies // *Astrophys. J.* — 1964. — Vol. 140. — P. 646.
7. *Pasha I. I.* Density-wave spiral theories in the 1960s. I. II. // *Astroph/0406142, astro-ph/0406143.* — 2004.
8. *Ефремов Ю. Н., Корчагин В. И., Марочник Л. С., Сучков А. А.* Современные представления о природе спиральной структуры галактик // *УФН.* — 1989. — Т. 157. — С. 599.
9. *Athanasoula E., Bosma A., Papaioannou S.* Halo parameters of spiral galaxies // *Astron. Astrophys.* — 1987. — Vol. 179. — P. 23.
10. *Fux R.* 3D self-consistent N-body barred models of the Milky Way. II. Gas dynamics // *Astron. Astrophys.* — 1999. — Vol. 345. — P. 787.
11. *Eder J., Schombert J.* Gas-rich Dwarfs from the PSS-II. III. H I Profiles and Dynamical Masses // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 2000. — Vol. 131. — P. 47.
12. *Tyurina N. V., Khoperskov A. V., Bizyaev D. V.* Bending Instability Galaxies: The Stellar Disk Thickness and the Mass of Spheroidal Component / Ed. by A. M. Fridman, et al.: *Astroph. Space Science Library.* — Vol. 337. — Springer, 2006. — P. 291. — (Astroph/0405142).
13. *Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Y.* The polar stellar ring and dark halo of NGC 5907 // *Astron. Lett.* — 2000. — Vol. 26. — P. 277.
14. *Brown W. R., Geller M. J., Kenyon S. J.* MMT Hypervelocity Star Survey // ArXiv:0808.2469.
15. *Хоперсков А. В., Еремин М. А., Бутенко М. А. и др.* Глобальный спиральный узор в галактическом диске в случае неосесимметричного темного гало // *Астрон. журн.* — В печати.

**О ПРИРОДЕ КОМЕТ ПОСЛЕ КОСМИЧЕСКИХ
МИССИЙ «СТАРДАСТ» И «ДИП ИМПЕКТ»
И ПЕРЕД «РОЗЕТТОЙ»**

Введение

Почему астрономов интересуют кометы? Человечество интересуется кометами с очень давних пор. Правда, в далекие времена кометы представлялись людям как знамения, как небесные предвестники трагических событий на Земле — будь то смерть вождя племени, короля какой-либо страны, страшная эпидемия чумы или холеры, разрушительная война, неурожай, голод и т. д. и т. п. Яркую комету, появившуюся в мае—июне 44 г. до н. э. во время игр, организованных Октавианом в память погибшего перед этим в Сенате от рук заговорщиков Юлия Цезаря, сочли небесным знамением, появлением во время игр души скончавшегося римского понтифика. Киевский князь Вещий Олег за год до своей смерти, в 911 г., увидел яркую комету в созвездии Геркулеса и воспринял это как недобрый знак, так как волхвы предсказали ему смерть в год появления кометы на небе. В следующем, 912 г., снова появилась яркая комета, на этот раз в созвездии Льва (это была комета Галлея). И когда она засияла сперва в разрывах облаков, а затем полностью на чистом небе, Олег, справлявший тризну по погибшим своим дружинникам на самой высокой горе под Киевом (сейчас это центр Киева) почувствовал боль в сердце от «укуса небесного змия», вспомнив предсказание волхвов. Это был инфаркт, от которого Вещий Олег скончался. Конечно, все эти весьма странные, но все же случайные совпадения, никакого отношения к науке не имеющие, так как кометы даже ничтожного физически ощутимого влияния на земные события и на судьбы людей не оказывают, а оказывают только психологическое воздействие, да и то на людей со слабой психикой и легко поддающихся гипнозу или внушению.

Древние хроники человеческой цивилизации сохранили многочисленные свидетельства за много веков до н. э. о появлении необыкновенно ярких комет с огромными хвостами, протянувшимися через

весь небосвод. Однако, несмотря на богатый наблюдательный опыт за яркими кометами, древние философы долго полагали, что кометы являются земными испарениями, атмосферными явлениями, пока Тихо Браге в 1577 г. точными параллактическими наблюдениями ярчайшей кометы Средневековья не показал огромную удаленность этой кометы от Земли по сравнению с Луной, доказав тем самым, что кометы являются самостоятельными небесными телами. Теория орбитального движения комет была разработана И. Ньютоном и Э. Галлеем, еще в XVII в. сделавшими верное предположение о том, что кометы обладают твердым ядром, которое для простоты можно считать материальной точкой, движущейся по закону всемирного тяготения вокруг Солнца. Газовую природу кометных хвостов Ньютон предполагал еще в 1687 г., говоря, что «хвост кометы есть не что иное, как тончайший пар, испускаемый головой или ядром кометы вследствие его нагревания». Большую роль для понимания физической природы и особенностей динамической эволюции комет сыграла знаменитая комета Галлея, которая регулярно наблюдалась человечеством через интервалы в 70—80 лет, начиная с XI в. до н. э.

Кометы относятся к группе малых тел Солнечной системы, к которой также принадлежат малые планеты (астероиды, планетоиды) и огромное количество метеорных тел, заполняющих межпланетное пространство. Но в отличие от других малых тел кометы обладают уникальной способностью при приближении к Солнцу развивать из сравнительно небольших по размерам ядер (1—20 км) громадные газово-пылевые оболочки (атмосферы), превосходящие по своей протяженности все известные объекты Солнечной системы — астероиды, планеты и Солнце. Главная особенность кометного ядра — непрерывная способность возобновлять и поддерживать в огромном объеме газово-пылевую атмосферу, состоящую из различных атомов, молекул, ионов, молекулярных комплексов и пылинок разных размеров. Такой процесс возможен вследствие того, что кометные ядра состоят в основном из водного льда, и других замороженных газов, порой сложного химического состава, включая органику, а также из тугоплавкого метеоритного вещества в виде пыли и более крупных фрагментов. Вследствие исходной ледяной природы кометные ядра отличаются крайней нестационарностью происходящих в них физических процессов в результате воздействия на кометное ядро солнечной корпускулярной и фотонной радиации.

Кометы, по современным представлениям, состоят из реликтового вещества, входившего в состав протопланетного облака и из которого в результате аккреции образовались тела Солнечной системы. Следовательно, кометные ядра содержат в себе ценную информацию о начальных физико-химических условиях в протопланетном облаке, поэтому использование достоверных данных о ядрах комет может дать возможность существенно улучшить космогоническую модель Солнечной системы, особенно на ее ранних стадиях развития. Кометы также являются своеобразными индикаторами физических условий в межпланетном космическом пространстве. Они активно взаимодействуют с солнечным фотонным и корпускулярным излучением, а также с межпланетной материей, и поэтому характер эволюционных и нестационарных физических процессов, протекающих в их ядрах, головах и хвостах, порой существенно зависит как от уровня солнечной активности, так и от быстро меняющихся физических условий в межпланетном пространстве. Это позволяет рассматривать кометы как своеобразные зонды для диагностики межпланетной материи и солнечной плазмы, истекающей из солнечной короны в виде солнечного ветра. Сведения, получаемые о межпланетном пространстве при запуске дорогостоящих космических аппаратов, не всегда дают полную информацию о нем, особенно на значительных гелиоцентрических расстояниях и больших удалениях от плоскости эклиптики. Здесь кометы пока остаются практически единственным источником информации о солнечном ветре и межпланетном магнитном поле. В последнее время кометы стали рассматриваться в качестве источника органического вещества, занесенного на планеты Солнечной системы и ставшего возможным источником зарождения жизни на планете Земля.

На больших гелиоцентрических расстояниях комета чаще всего выглядит как звездообразный точечный объект. При приближении к Солнцу она превращается в туманный объект, в котором начинают различаться диффузная оболочка — кома и центральная конденсация, включающая в себя ледяное ядро кометы. В дальнейшем у кометы образуется один или несколько хвостов.

Ученых кометы интересуют, во-первых, потому, что кометные ядра являются реликтовыми «кирпичиками», из которых образовалась Солнечная система. Кометы сохраняют первичное вещество — свидетельство ранней стадии зарождения Солнца и планет 4.6 млрд лет тому назад. Во-вторых, кометы — это своеобразные индикаторы физических условий в межпланетной среде и средство диагности-

ки межпланетной плазмы, солнечного ветра и вспышек солнечных космических лучей, причем как на малых, так и на больших гелиоцентрических расстояниях и гелиографических широтах. В-третьих, кометы — естественные космические лаборатории, в которых происходят уникальные физические явления, невозможные для воспроизведения в земных лабораториях. В-четвертых, существует вероятность столкновения ядра кометы с Землей, следствием которого может быть глобальная катастрофа. Примерами таких столкновений являются Тунгусский «метеорит» в 1908 г. и комета динозавров 65 млн лет тому назад.

Помимо всего прочего, кометы сыграли большую роль в развитии науки, особенно физики, математики и космонавтики. Так, на комете Галлея был проверен и триумфально подтвержден закон всемирного тяготения. Когда она вернулась в 1759 г., как и предсказала ей зарождающаяся тогда наука — небесная механика (Э. Галлей, 1709) закон всемирного тяготения был безоговорочно воспринят всеми учеными как один из фундаментальных законов природы. Первый молекулярный спектр был получен в 1864 г. Донати для кометы 1864 II, который позже был правильно истолкован Хаггинсом как спектр молекулы углерода (полосы Свана), что послужило толчком для первых шагов молекулярной спектроскопии. Кометные хвосты демонстрировали реальность давления света на твердые тела и газы, что было доказано теоретически и экспериментально (Фридрих Бессель, Максвелл, Федор Бредихин, Петр Лебедев) в XIX—XX вв. Для решения уравнений движения комет были развиты новые методы численного интегрирования дифференциальных уравнений (Адамс, Коуэлл и др.). Исследование динамической эволюции комет выявило разительные изменения их орбит в поле тяготения планет, что было использовано в космонавтике для пертурбационных маневров космических аппаратов в поле тяготения планет Солнечной системы для точной доставки аппарата в любую ее точку.

Строение и состав комет

Основными частями яркой кометы являются ядро, кома и хвост. Но подробное исследование строения, физической природы и процессов, происходящих в этих, известных всем составных частях «хвостатых звезд», специалисты продолжают и по сей день. Впереди еще

много работы как у наблюдателей, располагающих теперь данными ряда космических экспериментов и уникальными материалами современных наземных наблюдений, так и у теоретиков, строящих физико-математические модели процессов в кометах.

Ядро

Ядро — небольшое компактное ледяное тело, источник комы и хвостов, которые, несмотря на внушительные размеры, являются вторичными образованиями, зависящими от физико-геометрических параметров ядра, его химического состава и перигелийного расстояния орбиты кометы. Впервые предположения о ледяной природе ядер комет были высказаны П. Лапласом в 1796 г. и Ф. Бесселем в 1836 г. Дальнейшее развитие идея о льдах в кометных ядрах получила в работах С. К. Всехсвятского (1948), Ф. Уиппла (1951), Б. Ю. Левина (1950), и др. Она была блестяще подтверждена в результате одного из самых выдающихся экспериментов XX столетия — пролета АМС «Вега-1», «Вега-2» и «Джотто» в марте 1986 г. в непосредственной близости от ядра кометы Галлея.

На далеких расстояниях от Солнца в условиях низких температур и вакуума ледяное ядро кометы подвергается воздействию окружающей среды на уровне единичных элементарных процессов или крайне редких столкновений с межзвездными пылинками. Поэтому зафиксировать такое ядро можно только по его инфракрасному (ИК) излучению с помощью чувствительных ИК-детекторов, установленных на внеатмосферных околоземных зондах или межпланетных космических станциях. Ядра комет быстро эволюционируют вследствие своей ледяной природы. Они крайне нестационарны в поле солнечной радиации. Типичное ядро кометы можно представить себе в виде километрового сильно запыленного ледяного айсберга или снежно-пылевой глыбы, по структуре напоминающей «мартовский сугроб».

В наземные телескопы невозможно подробно рассмотреть ядра. Первые в истории науки крупномасштабные снимки кометного ядра получены 9 и 14 марта 1986 г. с помощью телевизионных камер и телескопов, установленных на борту АМС «Вега-2» и «Джотто». Тогда определили размеры ядра кометы Галлея: $15.3 \times 7.22 \times 7.2$ км и период его вращения вокруг оси: $P = 2.84$ сут.

Короткопериодическая комета 19P/Боррелли оказалась второй после кометы Галлея, у которой было сфотографировано ядро. 22 сентября 2001 г. АМС «Дип Спейс 1» приблизилась к комете на расстоянии 2 160 км и сделала 72 изображения, на которых четко видно вытянутое ядро кометы размером 8.8 км в длину и 3.6 км в ширину. Период вращения ядра вокруг оси равен приблизительно 25 ч. Третьей кометой, у которой удалось сфотографировать ядро, стала короткопериодическая комета Вильда-2. Снимки получила АМС «Стардаст» 2 января 2004 г. с расстояния 236 км. Ядро имело довольно симметричную округлую форму с геометрическими размерами трехосного эллипсоида $1.65 \times 2.00 \times 2.75 \pm 0.05$ км (средний эффективный диаметр 4 км) и вращалось вокруг своей оси с периодом около 12 ч.

И наконец, посадочный отсек — снаряд «Импактор» АМС «Дип Импект» 4 июля 2005 г. сфотографировал ядро четвертой короткопериодической кометы 9P/Темпеля 1 с различных расстояний. Его размеры: 7.6 км в длину и 4.9 км в ширину. Период собственного вращения ядра кометы 9P/Темпеля 1 равен 41 ч.

Одна из наиболее важных физических характеристик кометных ледяных ядер — удельная скорость выделения газов с их поверхности и приповерхностных слоев или газопроизводительность $Q(r)$ с⁻¹ на гелиоцентрическом расстоянии $r = 1$ а. е. Поскольку основная составляющая ядер комет — водный лед (например, 80 % ядра кометы Галлея), то удобнее всего сравнивать кометные ядра по их удельной газопроизводительности паров молекул воды. У различных комет эта характеристика варьирует в пределах 3—4 порядков: от $Q = 2 \times 10^{26}$ с⁻¹ для одной из наиболее истощенных (кометы Неуймина) до $Q = 6 \times 10^{29}$ с⁻¹ (активная комета Галлея).

Первые наблюдения комет Беннета и Таго—Сато—Косака с помощью космической обсерватории «ОАО-2» в 1970 г. позволили установить, что газопроизводительность или скорость выделения молекул воды из их ядер меняется с изменением гелиоцентрического расстояния приблизительно как r^{-2} . Это хорошо согласовалось с представлением о том, что доминирующей причиной, регулирующей скорость выделения воды в ядрах комет, является полный поток солнечного излучения, который также изменяется по закону r^{-2} . Однако наблюдения кометы Бредфилда (1979 X) космической ультрафиолетовой обсерваторией «IUE» (International Ultraviolet Explorer — международные исследования в ультрафиолете), проведенные на широком интервале гелиоцентрических расстояний, привели к выводу, что для

этой кометы скорость выделения воды с изменением r следует закономерности порядка $r^{-3.7}$. Для кометы Свифта—Туттля (родительской кометы метеорного потока Персеид), наблюдавшейся в 1992 г., показатель степени n оказался примерно в 2 раза больше, чем для кометы Бредфилда, то есть $n \sim 6-9$. Из этих наблюдений можно заключить, что газовыделение из ядер комет регулируется не только сублимационным механизмом, напрямую связанным с потоком солнечного излучения, но и с другими физическими механизмами, например с активными химическими процессами, происходящими в ядрах комет. О таких активных процессах в ядрах комет свидетельствуют и неожиданные вспышки яркости комет, и столь же неожиданные развалы их первичных ядер на вторичные фрагменты. Во время вспышек блеска яркость кометы может возрасти на 3—4 порядка, причем на довольно больших гелиоцентрических расстояниях. Например, комета Швассмана—Вахмана 1 периодически вспыхивает на 5—6 звездных величин на расстояниях более 5 а. е. от Солнца, а комета Галлея увеличила свой блеск на 3^m на гелиоцентрическом расстоянии более 14 а. е..

Разрушение ядер наблюдалось примерно у 40 комет. Самыми впечатляющими из них были кометы Брукса 2 (1889 V), Икея—Секи (1965 VIII), Шумейкеров—Леви 9 (1993e) и C/1999 S4 (LINEAR). Наибольшее число вторичных фрагментов, 23, зафиксировано у знаменитой кометы Шумейкеров—Леви 9 (1993e), столкнувшейся с планетой-гигантом Юпитером 7 июля 1992 г. Мощные приливные силы Юпитера разбили первичное кометное ядро (радиусом около 10 км) на 23 фрагмента (их обозначили латинскими буквами от A до W). Через два года после этого (16—22 июля 1994 г.) все ее вторичные фрагменты упали на Юпитер. Однако в настоящее время возникли сомнения: что, собственно, упало на Юпитер — ядро кометы или астероид? В пользу кометного происхождения упавшего небесного тела свидетельствуют непрочность первичного ядра и вторичных фрагментов, которые разрушались в открытом космосе без приливных воздействий на них; наличие ком и хвостов у каждого фрагмента; присутствие в спектрах ряда эмиссий (например, линии натрия, железа, угарного газа и др.), характерных для многих комет. На то, что упавшее тело было астероидом, указывают малое содержание молекул воды, отсутствие типичных для комет эмиссий циана CN и молекулярного углерода C_2 (полосы Свана). Лишь завершив анализ

огромного наблюдательного материала, связанного с этой кометой (по данным наземных и космических обсерваторий), можно будет ответить на возникший вопрос.

Неожиданно для всех преподнесла сюрприз комета C/1999 S4 (LINEAR), которая в 2000 г. распалась на бесчисленное множество мелких и 12 крупных вторичных фрагментов, после чего полностью прекратила свое существование.

Кома

Кома — сферическая или асимметричная газопылевая оболочка, окружающая ледяное ядро кометы. Она состоит из вещества, выброшенного из кометного ядра. Вместе же ядро и кома составляют голову кометы.

При сближении с Солнцем ледяное ядро подвергается тепловому воздействию, и с его открытых поверхностей начинается все усиливающееся испарение газов. Сначала испаряются более летучие вещества, обладающие низкими значениями удельной теплоты сублимации, а затем и другие замороженные родительские молекулы. Особенно обильное выделение газов из ядра кометы происходит на таких гелиоцентрических расстояниях, когда «включается» сублимация замороженных молекул воды. Водяной лед — основная компонента ледяных ядер комет. Например, в ядре кометы Галлея, по данным КА «Вега-1», «Вега-2» и «Джотто», замороженная вода составляет 80 % массы кометного ядра. Потоки водяного пара увлекают за собой в околоядерную область тугоплавкую и минеральную компоненту в виде пылинок и молекулярных комплексов, создавая таким образом газопылевую кому. У большинства комет кома состоит из трех основных частей, заметно отличающихся своими физическими условиями:

- 1) внутренняя, молекулярная, химическая и фотохимическая кома — прилегающая к ядру область;
- 2) видимая кома, или кома радикалов;
- 3) ультрафиолетовая, или атомная кома.

Размеры этих трех частей существенно зависят от гелиоцентрического расстояния. При $r = 1$ а. е. средний диаметр внутренней комы примерно 104 км, видимой — 105–106 км и ультрафиолетовой — 107 км (диаметр Солнца 1.4×10^6 км).

Спектральные наблюдения ком в радио-, ИК-, видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра позволили обнаружить ряд атомов, молекул и заряженных частиц в кометных атмосферах, среди которых $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$, CN , C_3 , NH_2 , H_2O и др. На основе масс-спектров, полученных с пролетных траекторий АМС «Вега-1», «Вега-2» и «Джотто» вблизи ядра кометы Галлея в марте 1986 г., были идентифицированы частицы $\text{CO}/\text{N}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, H_2CO , H^+ , CH_2^+/N^+ , $\text{CH}_3^+/\text{NH}^+$, $\text{O}^+/\text{CH}_4^+/\text{NH}_2^+$, $\text{OH}^+/\text{NH}_3^+/\text{CH}_5^+$, $\text{H}_2\text{O}^+/\text{NH}_4^+$, H_3O^+ , H_2S^+ , C_3H_3^+ , C_3H^+ , OH^- , CH^- , CN^- , CHO^- . Четыре отрицательных молекулярных иона открыты по масс-спектрам, сделанным АМС «Джотто». Отрицательный ион молекулярного углерода открыл автор статьи впервые в спектре кометы Скоритченко—Джорджа (1990 VI), полученном с помощью спектрального ТВ-сканера, установленного на 6-м телескопе БТА в САО РАН, а литий впервые обнаружен многими наблюдателями, в том числе астрономами В. П. Тарацук и В. В. Прокофьевой в КРАО в ряде пятен на Юпитере, образовавшихся в результате падения на планету фрагментов кометы Шумейкеров — Леви 9. В 1997 г. в радиоспектре кометы Хейла—Боппа было открыто 8 новых молекул: SO , SO_2 , H_2CS , HC_3N , HNCO , NH_2CHO , HCOOH , CH_3OCHO .

Естественно, что многие атомы и молекулы, свечение которых наблюдается в спектрах кометных атмосфер или масс-спектрах пылинки, находившихся в околоядерной области, являются составляющими и кометного ядра. Это в первую очередь металлы: натрий, калий, кальций, ванадий, марганец, хром, железо, кобальт, никель, медь и литий. Обнаружены и молекулы воды, углекислого газа, циановодорода, метилциана, формальдегида, сероводорода и других — родительских по отношению ко многим двухатомным молекулам (радикалам) и атомам, наблюдавшихся в спектрах атмосфер у многих комет. Например, при ударе посадочного зонда-снаряда (импактора), сброшенного с АМС «Дип Импакт», о шестикилометровое ядро кометы 9P/Темпеля образовался кратер предположительно диаметром 100 м и глубиной 25 м (автор полагает эти цифры завышенными в 4—5 раз). В веществе, выброшенном из недр кратера с помощью спектрометра, установленного на 10-м телескопе Кек 2, обнаружены молекулы воды, этана, цианистого водорода, угарного газа, метанола, формальдегида, ацетилена и метана.

Хвост

Молекулы газа и пылинки под действием светового давления уносятся из комы в противоположную от Солнца сторону, образуя хвосты II и III типа по Ф. А. Бредихину. Газ в голове кометы подвергается ионизации солнечным ветром, который также передает через «вмороженное» в него магнитное поле импульс кометной плазме и выталкивает ее почти точно в антисолнечном направлении, образуя хвост I типа. При взаимодействии плазменных хвостов комет с обтекающим их солнечным ветром формируются крупномасштабные структуры, имеющие вид прямолинейных лучей, волнообразных систем, кольцеобразных структур и др. Теорию крупномасштабных плазменных структур детально разработали в Астрономической обсерватории и на кафедре астрономии Киевского университета Н. Я. Коцаренко, К. И. Чурюмов, Г. В. Лизунов, О. П. Верхоглядова. Особый тип представляют собой аномальные хвосты, направленные к Солнцу. Они состоят из крупных пылевых частиц размером 0.1—1 мм и более, для которых сила светового давления намного меньше силы гравитации, чем и объясняется их направленность к Солнцу. Яркие кометы чаще всего обладают несколькими типами хвостов. Например, у кометы Когоутека (1973 XII) наблюдались одновременно хвосты I, II и аномального типа. Анализ аномального хвоста у этой кометы показал, что он состоит из частиц размером 2—3 мм и плотностью примерно 1 г/см³. Выброс этих частиц из ядра кометы произошел за 200 дней до прохождения кометой перигелия орбиты, когда она находилась на расстоянии 4 а. е. от Солнца.

Габриэль Кремонезе со своими коллегами по Европейской команде «Исследование кометы Хейла—Боппа» открыл новый тип хвоста у кометы Хейла—Боппа в 1997 г., который полностью состоял из нейтральных атомов натрия (Na) и имел длину 6 млн км! Это сильно поразило тогда всех исследователей: каким же образом нейтральные атомы натрия, если они вылетели из ядра, могли улететь на такое огромное расстояние от него, оставаясь нейтральными, ведь время жизни этих атомов составляет около 2 суток. Следовательно, через 2 суток летя со скоростью порядка 1 км/с, атомы натрия могли улететь от ядра на расстояние, равное всего $1 \text{ км/с} \times 2 \times 86\,400 \text{ с} = 172\,800 \text{ км}$, после чего они в обязательном порядке должны были бы перейти в возбужденное состояние и ярко-желтый дублет нейтрального натрия должен был бы погаснуть. Однако характерное желтое свечение нейтрального натрия продолжало наблюдаться на

расстоянии, в 35 раз превосходящем теоретический предел. Каким образом в поле солнечной фотонной радиации на расстоянии около 1 а. е. от Солнца это оказалось возможным? Это одна из самых больших кометных тайн.

На орбите кометы, особенно вблизи ее ядра, постепенно накапливается пылевая материя, выброшенная из ядра, которая создает предпосылки для формирования метеорного роя на орбите кометы.

Длины хвостов комет варьируют от нескольких десятков миллионов до нескольких сотен миллионов километров.

Эволюция ядер короткопериодических комет

Значительные запасы замороженных газов и пылевой материи в ядрах комет определяют направленность их достаточно быстрой физической эволюции в поле солнечной радиации и межпланетной среде. Эта эволюция заключается в постепенном истощении летучей и тугоплавкой компонент кометного ядра. Отсюда следует, что конечной стадией эволюции кометного ядра, после потери им летучей компоненты, может быть или полный распад кометного ядра и превращение его в метеорный рой, или его частичное разрушение с образованием метеорного роя и остатка «угасшего» кометного ядра в виде астероидного объекта. Характерные примеры подобной эволюции ледяного ядра — многочисленные действующие в Солнечной системе метеорные потоки (Леониды, Квандрантиды или Геминиды). Астероид Фаэтон, по-видимому, представляет собой остаток прародительской кометы потока Геминид. Однако на орбите метеорного роя, рожденного кометой, могут существовать остатки ледяного кометного ядра, сохраняющего активность в очередных появлениях. Таковы, например, периодическая комета Галлея и порожденные ею метеорные потоки *g*-Аквариды и Ориониды или периодическая комета Свифта—Туттля (1862 III, переоткрытая в августе 1992 г.) и рожденный ею августовский метеорный рой Персеид.

Важной проблемой в последнее время считается возможность перехода короткопериодических комет, ядра которых потеряли свою летучую компоненту, в астероиды, сближающиеся с Землей, вроде астероидов семейств Амура, Аполлона и Атона. Время жизни этих семейств невелико (порядка 30—100 млн лет).

Учитывая, что число астероидов, сближающихся, например, с орбитой Юпитера, невелико, а также тот факт, что физическое время жизни комет намного меньше времени их динамической эволюции,

известный словацкий астроном Любор Кресак отрицал возможность превращения кометы в астероид. Однако в пользу предположения об эволюции ядер короткопериодических комет в астероиды появились весомые аргументы, связанные с открытием в последние годы, большого числа новых астероидов сближающихся с Землей. У многих из астероидов, сближающихся с Землей, неустойчивые эллиптические, типично кометные орбиты. Скорее всего такие астероиды — «бывшие» кометы. Это подтверждают данные об астероиде Итокава, полученные японской АМС «Хаябуса», на поверхности которого отсутствуют кратеры. Вероятно, кратеры там были, но «сглажены» сублимационными процессами, типичными для ледяных ядер комет.

Следует отметить, что в последнее время исследование эволюционных физических и динамических особенностей комет приобретает все большее значение для лучшего понимания проблемы взаимосвязи всей совокупности малых тел. Кроме того, важную роль имеет исследование эволюции ядер короткопериодических комет в поисках решения проблемы астероидно-кометной опасности.

Необходимость космических миссий

Чтобы в деталях изучить многие загадочные явления в кометах и установить связь вещества ледяных кометных ядер с реликтовым веществом протопланетного облака, учеными и инженерами были разработаны, осуществлены и продолжают осуществляться космические миссии к ядрам периодических комет.

Миссия Стардаст (Stardust)

КА Стардаст стартовал с мыса Канаверал 7 января 1999 г., совершил три витка вокруг Солнца и 2 января 2004 г. пролетел на расстоянии 236 км от ядра периодической кометы Вильда 2. При этом сближении были получены наиболее детальные, из всех полученных ранее до этого пролета, изображения поверхности ядра кометы с высоким разрешением. Размеры ядра $1.65 \times 2.00 \times 2.75 \pm 0.05$ км. Альбедо 0.03 ± 0.015 .

На изображениях, полученных Стардастом, видны остроконечные пики высотой 100 м и кратеры глубиной более 150 м. Некоторые кратеры имеют круглые центральные впадины, окруженные неровным рядом выброшенного из недр ядра кометного вещества, тогда как другие кратеры имеют совершенно плоское дно и прямые стены.

Диаметр самого большого кратера, получившего название «Левая ступня», равен 1 км, а это 1/5 всего 5-километрового ядра кометы Вильда 2. Другим большим сюрпризом было обилие (более 25) и активность джетов частиц, вытекающих из различных участков поверхности ядра. Перед сближением предполагалось, что джеты должны выбрасываться на короткие расстояния от ядра, затем диссипировать, образуя светящееся гало вокруг ядра кометы Вильда 2. Вместо этого некоторые сверхскоростные джеты оставались узкими, как струя воды, вытекающая из мощного садового брандспойта. Эти джеты создали весьма серьезную обстановку для КА Стардаст во время его сближения с ядром кометы Вильда 2. Зонд Стардаст был совершенно изрешечен миллионами частичек в секунду при его пролете через три гигантских джета. 12 таких частиц, некоторые больше пули, проникли через верхний слой защитного экрана космического аппарата. В течение 6-летнего полета к ядру кометы Вильда КА Стардаст с помощью специальной ловушки, в ячейки которой были уложены блоки специального вещества низкой плотности — аэрогеля (состав такой же, как у стекла, но в 1 000 раз меньше плотности стекла), производил сбор межзвездного вещества, поток которого был обнаружен в Солнечной системе в направлении от созвездия Стрельца, и сбор кометных частичек вблизи ядра кометы Вильда 2. Частицы проникали в аэрогель, образовали треки, напоминающие головастиков, тормозились и застревали в аэрогеле вблизи треков. Пылинки также сталкивались с экраном из алюминиевой фольги, оставляя в нем следы в виде микрократеров. Капсула с кометными и межзвездными пылинками благополучно вернулась на Землю 15 января 2005 г. и была доставлена в исследовательскую лабораторию в Беркли (США). Сразу же после просмотра ячеек ловушки около 25 треков-«головастиков» было обнаружено невооруженным глазом в некоторых блоках аэрогеля. Сотни других частиц были найдены только с помощью специального микроскопа в Беркли, причем много частиц уже обнаружено любителями, которые подключились к поискам межзвездных и кометных частичек по программе Stardust@home. Анализ уже найденных в аэрогеле кометных частиц показал, что в каждой четвертой из частиц, изученных к настоящему моменту, присутствуют «высокотемпературные» минералы, такие, как форстерит и кальциево-алюминиевые включения (CAIs), которые формируются при температурах $> 1\,000^\circ\text{C}$. Также были найдены другие неожиданные «ингредиенты» — минералы, богатые титаном, и оливин. Но кометы формировались в холодных внешних

областях ранней Солнечной системы, где мог существовать лед, и никогда не подвергались такому нагреву. А это значит, что их история куда более сложна, чем предполагалось ранее, и они представляют собой смесь компонентов, сформированных в самых различных областях молодой Солнечной системы как на её периферии, так и вблизи её центра, в условиях очень высокой температуры. Вполне могут быть по крайней мере две возможности для появления «высокотемпературных» минералов в составе комет. Первая: существует гипотеза о сильном звездном ветре и мощных выбросах корональной плазмы молодого Солнца (проходившего стадию звезды Т Тельца), выдувавших во внешние области зарождающейся планетной системы капельки расплавов из центрального ее района. Вторая версия заключается в том, что данные минералы были сформированы около других звезд, и лишь потом, после странствий по Галактике, проникли и перемешались с веществом Солнечного протопланетного диска. Научный руководитель проекта Стардаст, профессор Дональд Браунли (Donald Brownlee) из университета Вашингтона, полагает, что детальный изотопный анализ этих минералов, вероятно, поможет выбрать одну из этих гипотез. КА Стардаст, с успехом выполнив свою главную программу, продолжает полет по гелиоцентрической орбите. Так как все его приборы продолжают функционировать, было предложено переориентировать его полет к комете Темпель 1 — главной цели миссии Дип Импект. Новая миссия Стардаста получила название Стардаст-Некст (Stardust-NEXT — New Exploration of Tempel). Одна из ее основных целей — сблизиться в 2011 г. с ядром кометы Темпель 1 и сфотографировать искусственный кратер на ее ядре, образовавшийся вследствие удара импактора Дип Импекта с ядром кометы Темпеля 1.

Миссия Дип Импект (Deep Impact)

КА Дип Импект стартовал с космодрома Кеннеди 12 января 2005 г. 3 июля 2005 г. зонд сблизился с короткопериодической кометой семейства Юпитера Темпеля 1 9P/Tempel 1 и с него был направлен на ядро кометы импактор, состоящий на 49 % из меди, на 24 % алюминия и на 25 % из других материалов, в том числе 6.5 кг неиспользованного гидразина (N_2H_4). 4 июля 2005 г. импактор на скорости 10.3 км/с врезался в ядро кометы Темпеля 1. Причем по мере сближения с ядром видеокамера, установленная на импакторе, передавала детальные изображения ядра вплоть до 4 с до столкно-

вения. Пролетный модуль Дип Импект в это время приблизился к ядру кометы на 500 км и зафиксировал удар импактора по ядру кометы. Одной из главных целей пролетного модуля являлось получение четких изображений искусственного ударно-взрывного кратера на поверхности ядра кометы, образовавшегося вследствие удара импактора о ядро. К сожалению, при взрыве из внутренних областей ядра была выброшена огромное облако мелких льдинок с вкраплением пылинок, которое заэкранировало кратер, и пролетный модуль не смог сфотографировать этот новый кратер на ядре кометы Темпеля 1 и определить его диаметр и глубину. А это весьма важный результат, который позволял проверить реальность моделей многих исследователей, в том числе и разработанной в Астрономической обсерватории Киевского национального университета им. Т. Г. Шевченко (Кручиненко, Чурюмов и Чубко). В рамках этой модели, основанной на идее Эпика об использовании закона сохранения импульса при движении импактора в поверхностном слое мишени, были выведены уравнения, связывающие диаметр D и глубину h искусственного кратера, плотность ρ и прочность на сжатие σ_p вещества поверхностного слоя кометного ядра с диаметром d и плотностью ударника δ с КА Дип Импект:

$$\frac{h}{d} = 1.785 \times \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{1/2} \times \left(\frac{V^2}{\sigma_p} \right)^{1/30} \times \cos(Z) \quad (1)$$

и

$$\frac{D}{d^{3/2}} = 1.20 \times \left(\frac{kV\delta}{h} \right)^{1/2} \times (\rho\sigma_p)^{-1/4}. \quad (2)$$

Здесь V — скорость ударника; Z — угловое зенитное расстояние траектории ударника; k — безразмерный коэффициент передачи радиального импульса. Подставляя в уравнения (1) и (2) скорость столкновения $V = 10.3$ км/с, плотность вещества импактора $7.0 \div 8.9$ г/см³, плотность вещества кометного ядра $\rho = 0.5 \div 1.0$ г/см³, прочность вещества кометного ядра $\sigma_p = 10 \div 100$ кН/м², эквивалентный диаметр сферического ударника $d = 43.0 \div 46.6$ см, безразмерный фактор передачи импульса $k = 2.45$, из формулы (1) получаем, что глубина образованного кратера составит $h = 4.8 \div 5.6$ м, а диаметр кратера, который определяется по формуле (2), будет равняться $D = 22. \div 57$ м. С другой стороны, ученые команды «Дип Импект» полагают, что диаметр кратера должен быть $D \sim 110$ м и глубина

$h \sim 27$ м, принимая при этом крайне низкое значение прочности вещества кометного ядра $\sigma_p = 65 \text{ Н/м}^2$ (65 Па), что не представляется реальным, так как даже прочность рыхлых метеорных пылевых шаров в атмосфере Земли (по Уипплу) составляет 1 кН/м^2 . Реальность той или иной модели может быть подтверждена КА Стардаст, который в 2011 г. сблизится с ядром кометы Темпеля 1 и сфотографирует искусственный кратер на нем, который должен находиться между двумя похожими друг на друга ударными кратерами на ядре кометы.

В спектре выброшенного из кратера вещества обнаружен цианид водорода HCN. Также предполагается наличие метилцианида (CH_3CN) в выброшенном из кратера веществе (пик на 4.40 мкм). На начальных стадиях выброса вещество было горячее 1000 К, на последней стадии выброса вещество имело температуру значительно меньшую. Скорость наиболее быстрых частиц в выбросе достигала 5 км/с. В начале выброса количество органики по сравнению с водой возросло.

На изображениях ядра и фрагментов его поверхности, полученных импактором Дип Импакта и покрывающих около 30 % поверхности ядра, хорошо заметны несколько областей с разной морфологией. Поверхность ядра покрыта несколькими десятками кольцевых структур размерами от 40 до 400 м. Общее распределение этих структур по размерам и частоте этих структур согласуется с популяцией ударных кратеров, наблюдающихся на поверхностях других тел Солнечной системы. На поверхности ядра кометы Темпеля существуют две большие области с гладкой поверхностью (плато). Одна из гладких поверхностей ограничена с севера обрывом ~ 20 м высотой. Похожее плато с гладкой поверхностью наблюдалось также на ядре кометы Боррелли. Гладкие области и окружающие их обрывы могут указывать на слоистость строения ядра кометы Темпеля 1. В целом же вся поверхность ядра кометы Темпеля 1 довольно однородна по альбедо и цвету. Вариации альбедо лежат в пределах 50 % от средней величины 0.04. Никаких выходов льда или инея на ядре не было обнаружено, исходя из анализа альбедо или цвета. Была сделана оценка, что ядро кометы Темпеля 1 теряет 10^9 г вещества за одно прохождение через перигелий. С помощью инфракрасных наблюдений (1.05—4.8 мкм) была построена температурная карта ядра, которая показывает вариации температуры на освещенной стороне от 260 ± 6 до 329 ± 8 К. Температурная карта полностью соответствует топографии ядра: тени — это холодные области,

а наиболее теплые области лежат вблизи подсолнечной точки. Период вращения ядра вокруг собственной оси равен 1.701 ± 0.0014 суток (40.832 ± 0.33 ч). Форма ядра определена не полностью из-за малого периода вращения и большой скорости пролетного модуля Дип Импекта. Размеры ядра 7.6×4.9 км. Эффективный радиус ядра кометы равен 3.0 ± 0.1 км. Средняя плотность ядра 0.6 г/см^3 .

КА Дип Импект продолжал свой полет по гелиоцентрической орбите и в декабре 2007 г. он пролетел вблизи Земли, где, получив гравитационный импульс, был переориентирован на пролет вблизи ядра короткопериодической кометы семейства Юпитера Бетина (85P/Boethin), мимо которого он пролетел в 2008 г.

Миссия Розетта (Rosetta)

КА Розетта стартовала 2 марта 2004 г. с космодрома Куру (Французская Гвиана) в направлении к ядру короткопериодической кометы Чурюмова—Герасименко (67P/Churyumov—Gerasimenko). Название миссии — это аббревиатура названия проекта на английском языке, которая удачно совпадает с названием древнего города Розетта, который находился в дельте реки Нил и вблизи которого французским капитаном армии Наполеона Пьером Бушаром 15 июля 1799 г. была найдена базальтовая плита или, иначе, знаменитый «розеттский» камень. На нем сохранились записи одного и того же текста на трех языках: древнеегипетском (иероглифами), коптском (египетском демотическим шрифтом) и древнегреческом. Коптский и древнегреческий языки знали хорошо, и это дало возможность впервые Томасу Янгу и Жану Франсуа Шампольону в 1822 г. расшифровать древнеегипетские иероглифы, что позволило открыть всему миру интереснейшую историю древнего Египта. Эти три текста были нанесены на плиту в 196 г. до н. э. и представляли собой благодарственную надпись египетских жрецов царю Птолемею V Епифану, который руководил Египтом в 204—180 гг. до н. э. Розеттский камень сохраняется в Лондоне в Британском музее. Символическое название миссии Розетта и состоит в том, что ядро кометы Чурюмова—Герасименко, после посадки на него посадочного модуля, который доставит космический аппарат «Розетта», сыграет своеобразную роль «розеттского» камня для расшифровки тайн ледяных кометных ядер — носителей загадочного реликтового вещества Солнечной системы, а от них прямой путь к решению фундаментальной проблемы космогонии Солнечной системы и происхождения жизни на Земле.

Сейчас Розетта совершает свой второй виток по околосолнечной орбите, пролетев в марте 2005 г. вблизи Земли и получив от нее первый гравитационный импульс, 26 марта 2007 г. пролетела над Марсом на высоте 240 км, получив от него второй ускоряющий гравитационный импульс, а в октябре 2007 г. пролетела вблизи Земли, получив от нее третий гравитационный импульс и направилась к Солнцу. При пролете вблизи Марса приборы Розетты провели детальное картографирование поверхности Марса, измерения его магнитного поля и другие исследования.

Обогнув Солнце, Розетта 5 сентября 2008 г., находясь в главном поясе астероидов, приблизилась на 240 км к астероиду Штейнс (№ 2867) и передала на Землю его изображения и другие научные данные о нем. Эта малая планета 2867 была открыта 4 ноября 1969 г. Николаем Степановичем Черныхом в Крыму и названа в честь известного латышского астронома профессора Карла Августовича Штейнса — специалиста по космогонии комет. Удивительная случайность: космический аппарат, летящий к ядру кометы, сблизился с астероидом, названным в честь астронома — специалиста по космогонии комет! Двигается по эллиптической орбите с большой полуосью $a = 2.36$ а. е., эксцентриситетом $e = 0.146$ и наклоном $i = 9.9^\circ$. Предварительные результаты, переданные с «Розетты», таковы: размеры: 5.9×4 км (эквивалентный эффективный диаметр около 5 км). Форма: огранный бриллиант. Альбеда 0.35. Кратеры: доминирует большой кратер на северном полюсе диаметром ~ 2 км; второй большой кратер находится в районе тени; цепочка из 7 кратеров тянется от южного полюса к северному; общее число кратеров 23 с диаметрами более чем 200 м.

Возвращаясь из пояса астероидов к Солнцу, Розетта в ноябре 2009 г. вновь пролетит вблизи Земли и, совершив свой четвертый гравитационный маневр, перейдет на окончательную орбиту полета к комете Чурюмова—Герасименко. Обогнув в третий раз Солнце, Розетта 10 июля 2010 г. пролетит вблизи крупного астероида Лютеция (№ 21) диаметром 99 км и сфотографирует его. Астероид 21, Лютецию, открыл 15 ноября 1852 г. Г. Гольдшмидт. Он движется по эллиптической орбите с большой полуосью $a = 2.43$ а. е., эксцентриситетом $e = 0.163$ и наклоном $i = 3.1^\circ$. Такой крупный астероид будет исследоваться с помощью КА впервые.

После пролета вблизи Лютеции все приборы Розетты будут переведены в «спящий» режим почти на 4 года до подлета к ядру кометы Чурюмова—Герасименко. В мае 2014 г. Розетта снизит свою

скорость относительно ядра кометы до 2 м/с, приблизится к нему на расстояние 25 км и перейдет на орбиту искусственного спутника ядра кометы Чурюмова—Герасименко. Все приборы Розетты будут «разбужены» и приведены в полную готовность, чтобы начать систематические исследования ядра и околоядерной области кометы. В это время будет проведено полное и детальное картографирование поверхности ядра кометы, которое позволит впервые в мире построить детальный «глобус» ядра кометы. Подробный анализ рельефа ядра кометы даст возможность выбрать пять площадок на его поверхности для безопасной посадки спускаемого модуля Филы. В ноябре 2014 г. будет проведен самый сложный и главный этап всей миссии Розетта — отделение от орбитального модуля спускаемого зонда «Филы» и посадка его на одну из почти выбранных для этой цели безопасных площадок на ядре кометы. При этом будет включен двигатель на Филах, который погасит скорость зонда до величины меньше 1 м/с. Филы совершит мягкую посадку сперва на одну из трех его ножек, затем оползется и на две другие ножки, когда они коснутся кометного грунта. При касании второй ножки из зонда выдвинется специальный гарпун, который, проникнув в кометный грунт, закрепит модуль Филы на кометном ядре и сделает его положение надежно устойчивым. После закрепления Филы на кометном ядре девять приборов, установленных на нем, по команде с Земли будут расчехлены и приступят к главной задаче миссии — комплексному исследованию загадочного реликтового вещества кометного ядра и Солнечной системы.

Филы — это уникальный научный контейнер массой около 21 кг. На нем установлено 9 приборов: спектрометр альфа-лучей, протонов и рентгеновских лучей (АРХ) для исследования элементного состава кометного вещества; газохроматограф и масс-спектрограф КО-ЗАК и МОДУЛУС/ПТОЛЕМЕЙ для исследования химического состава, изотопного состава и идентификации сложных органических молекул в кометном веществе; СЕЗАМ для акустического исследования вещества поверхностного слоя ядра, измерения диэлектрических свойств среды, окружающей ядро, и мониторинга столкновений с пылевыми частицами; МУПУС для изучения физических свойств вещества кометы; КОНЦЕРТ для исследования электрических характеристик всего ядра и его внутренней структуры; РОМАП для исследования кометного магнитного поля и его взаимодействия с солнечным ветром; СИВА для получения изображений рельефа ядра в месте посадки Филы и РОЛИС для обеспечения бурения ко-

метного грунта и исследования вещества, которое находится под поверхностным слоем ядра, для изучения распределения и величины электрических зарядов на ядре и в образцах кометного грунта, который будет помещен в специальный коллектор.

На орбитальном модуле Розетте будут работать следующие приборы: ОЗИРИС, АЛИСА, ВИРТИС, МИРО — для получения дистанционным путем прямых изображений поверхности ядра и спектральных исследований ядра и околоядерной области; РОЗИНА, КОЗИМА, МИДАС — для анализа химического состава кометного вещества, КОНЦЕРТ — для исследования крупномасштабной структуры ядра совместно с аналогичным прибором, установленным на Филах, ГИАДА — для исследования потока пыли и распределения пылевых частиц по массам, РПС — для исследования кометной плазмы и ее взаимодействия с солнечным ветром, РСИ — для исследования кометы с помощью радиоволн. С модуля Филы научные данные, полученные каждым из его 9 высокоточных и чувствительных приборов, будут передаваться на орбитальный модуль Розетту, а оттуда с помощью радиотелескопа вместе с данными, полученными 11 приборами Розетты, вся научная информация будет передаваться на Землю.

Для питания приборов космической орбитальной лаборатории будет использоваться солнечная батарея площадью 32 м². С помощью 2-м антенны радиотелескопа, установленного на Розетте, впервые в истории науки будут поступать в научные лаборатории на Земле уникальные данные о реликтовом веществе Солнечной системы. Многие ученые считают, что это эксперимент тысячелетия, а по количеству израсходованных на него средств — большее одного миллиарда евро — это будет наиболее дорогой эксперимент в истории науки, но «игра стоит свечей». Без всякого сомнения, это самая грандиозная кометная миссия, уникальный эксперимент в истории человеческой цивилизации. Через 5 лет наши представления о природе комет и модель кометного ядра будут существенно улучшены и практически адекватны всей совокупности как наземных, так и космических наблюдений. С нетерпением будем ждать 2014 года!

**БЫЛИ ЛИ ЛЮДИ НА ЛУНЕ,
ВРАЩАЕТСЯ ЛИ ЗЕМЛЯ ВОКРУГ СОЛНЦА
И ЕЩЕ НЕСКОЛЬКО ИНТЕРЕСНЫХ ВОПРОСОВ...
К 40-летию высадки людей на Луну**

На конец декабря 2008 г. выпала одна своеобразная юбилейная дата. Это было... на Земле. Ровно 40 лет назад три человека сели в космический корабль и полетели к Луне. Им понадобилось трое земных суток, чтобы долететь до Луны, облететь ее вдоль экватора и через три дня вернуться домой, на Землю. Всего одна неделя, но сколько времени ушло на подготовку! Не будет преувеличением сказать, что готовились «всю жизнь». Точнее говоря — весь предшествующий опыт человечества был сконцентрирован в одном беспрецедентном эксперименте. Первый полет человека к другой планете иначе не назовешь. Это был полет экипажа космического корабля «Аполлон-8». С 21 по 27 декабря 1968 г. Эти люди первыми оказались на обратной стороне Луны! Точнее сказать — над обратной стороной. Они первыми увидели ее «вживую». Основная цель этого полета — подготовка к высадке человека на Луну.

А двумя месяцами ранее, в октябре 1968 г., советский космический аппарат «Зонд-6» доставил снимки обратной стороны Луны на Землю. Важно подчеркнуть, что это стало выдающимся достижением. Первые настоящие фотографии другого небесного тела, сделанные с близкого расстояния, оказались на Земле. Хотя первые телевизионные изображения Луны, включая территорию обратной стороны, были получены намного раньше — в 1959 г. Здесь пальма первенства также принадлежит советским ученым.

Сегодня, к сожалению, уже никого не удивит сообщением о том, что запущен очередной спутник к Луне или Марсу. Космические полеты стали чем-то весьма обыденным и привычным. Не стоит, однако, забывать и о том, что это касается в основном автоматических беспилотных спутников и кораблей. Полеты с экипажем на борту все еще остаются делом уникальным и дорогим. Околоземные ор-

биты, куда выводятся сегодня ракеты с экипажами, совсем рядом с Землей. Всего 300—400 км от ее поверхности! Следовательно, полеты астронавтов к Луне, выполненные по программе «Аполлон» в период с 1968 по 1972 г., остаются событием весьма неординарным.

Значение этой программы трудно переоценить. Досадно лишь то, что об этих событиях мало кто знает. Более того, многие полагают, что и программы-то такой не было, а полеты на Луну — это миф и не более чем рекламная акция. Вопрос о том, были ли люди на Луне, становится не просто вопросом любопытного человека. Сам этот вопрос и ответ на него — это как индикатор степени неведения о том, что происходит в мире. И не только в мире науки. Научковеды утверждают, что это был самый дорогой проект не только в истории США, но и самый дорогой проект за всю историю научно-технического прогресса в мире. Но и результат получился выдающийся. Человек впервые достиг другой планеты, вступил на нее и... увидел среди звезд на лунном небосклоне свою планету, с которой он прилетел... Увидел впервые!

В этот момент мы были студентами второго курса. Сказать, что мы с интересом следили за этими событиями, значит, не сказать ничего. Восторг и восхищение, с которыми воспринимались новости об очередном запуске в сторону Луны, смешивались с интересом чисто профессиональным — мы учились на кафедре астрономии. Кроме того, мы работали в этот период на станции наблюдений искусственных спутников Земли, что находилась прямо на территории университета. И это обстоятельство также играло свою роль. Примерно через полгода после «Аполлона-8», летом 1969 г., на окололунную орбиту вышел «Аполлон-11» с экипажем, которому предстояло впервые сесть на лунную поверхность. Репортаж о посадке лунного модуля с двумя астронавтами на борту передавался по радио в реальном времени. Я помню, как мы с трепетом следили за посадкой с помощью радиоприемника, стоявшего у нас на станции. Более того, мы записали этот репортаж на магнитную ленту. Лента долгое время хранилась, но, к сожалению, не дожидаясь настоящего времени.

Особенно досадно, что вопросы о том, были ли люди на Луне, задаются в стране, которая открыла дорогу в космос всему человечеству. Сначала мне казалось, что это относится лишь к студентам. Именно студенты часто обращаются с этим вопросом. Но, как выясняется, дело обстоит сложнее. В 2006 г. на научном семинаре в авиационном университете я делал доклад о лунных исследованиях. После семинара ко мне подошел человек средних лет и представился

доцентом университета. Среди вопросов, которые он мне задал, был и вопрос о пребывании людей на Луне. Это было в Казани. Летом 2008 г. нам довелось побывать на Южном Урале, где проходила 28-я российская школа по проблемам науки и технологий. Здесь собрались ученые и инженеры из многих городов России. Мы со студентами Казанского госуниверситета представили на этой школе доклад по исследованию обратной стороны Луны. Отвечая после доклада на вопросы, к нашему удивлению, мы услышали тот же вопрос: были ли люди на Луне? Задал его, как и в Казани, уже немолодой человек. И тогда мы решили, что об этом надо написать.

Запуски спутников и кораблей к Луне в тот период проходили совсем не так, как это происходит сегодня. Важно подчеркнуть, что все делалось впервые. Впервые в истории! Во-вторых, все происходило в условиях так называемой «космической гонки». Когда к Луне запускали корабли и спутники лишь две страны — Советский Союз и Соединенные Штаты Америки. Этот период космических исследований уже неоднократно описан в многочисленных публикациях. В том числе и в Интернете. И все же представьте себе, что в течение нескольких лет с интервалом в три-четыре месяца в сторону Луны стартовали корабли с экипажами и автоматические станции. Даже по сегодняшним меркам это было нечто из ряда вон. . . К этим событиям было приковано внимание людей во всем мире.

Сейчас на окололунных орбитах работают одновременно спутники сразу трех стран — Японии, Китая, Индии. Вот-вот будет запущен к Луне разведывательный спутник США. Беспрецедентная активность. Но все это уже новый — второй — этап освоения Луны.

Но вернемся к первому этапу. Действительно, мы живем в стране, которая первой проложила людям путь в космос. В 2007 г. минуло полвека со дня запуска первого искусственного спутника Земли. Именно наша страна, которая называлась тогда Советским Союзом, открыла космическую эру в жизни всего человечества. Именно в Советском Союзе впервые в истории был запущен космический корабль с человеком на борту. Ракета с вымпелом нашей страны также достигла поверхности Луны первой. . . Потом были первая мягкая посадка на Луну, первые снимки, доставленные с орбиты Луны на Землю, первые «Луноходы». Этот список можно долго продолжать.

Луна оказалась тем небесным телом, исследование и освоение которого превратилось в невероятную космическую «гонку» двух стран — Советского Союза и Соединенных Штатов Америки. Мне довелось быть в этот период студентом физического факультета и

наблюдать все «нюансы» этой гонки в реальном времени. Мы следили за этими событиями с особым вниманием по той естественной причине, что были студентами астрономического отделения. На вопрос о том, почему именно Луна стала ареной соревнования, ответ довольно простой — все другие «первые места» в комических исследованиях к тому времени уже были заняты Советским Союзом: первый спутник, первый человек в космосе, первая женщина в космосе, первый выпел на Луне, первая мягкая посадка на Луну и т. д. США ничего не оставалось, как сделать ставку на то, чтобы первыми высадить человека на Луну. Только так можно было добиться реванша в освоении космоса. И такую ставку в США сделали. Программа «Аполлон» по высадке человека на Луну стала одним из крупнейших научно-технических предприятий не только XX столетия, но, по-видимому, одним из выдающихся достижений за всю историю человечества.

В Советском Союзе также без дела не сидели. Продолжалось освоение Луны и других планет Солнечной системы автоматическими космическими аппаратами. На околоземную орбиту выводились спутники и обитаемые космические станции. Шло планомерное изучение всего того, что находится «вне колыбели человечества».

Однако «битва за Луну» заняла особое место в истории космических исследований. Сегодня, в год юбилея, весьма уместно об этом вспомнить и рассказать другим. Особенно важно, чтобы это знали молодые люди, которые, как показывает наш опыт, в большинстве своем искренне полагают, что человек на Луну не летал. Возникает законный вопрос: действительно ли такое, мягко говоря, неведение гражданам страны, первой вышедшей в Космос?

«Битву за Луну», как это называли журналисты, Советский Союз проиграл. В том смысле, что Соединенным Штатам действительно первыми удалось высадить человека на Луну. Как ни прискорбно это звучит для нас, но это так. Сейчас, когда «битва» позади, когда хорошо известны ее результаты, когда эти результаты опубликованы и признаны во всем мире, резонно задать и другой вопрос: почему так легко и просто удалось опельмовать одно из самых выдающихся достижений человечества? Я имею в виду тот фильм, который был подготовлен в тех же Соединенных Штатах Америки и несколько раз показан по российскому телевидению в последнее время. Этот фильм, снятый для того, чтобы показать, что программа «Аполлон» — это некая выдуманная история, фальсификация полетов к Луне. Надо сказать, что многие кадры из этого фильма производят

сильное впечатление в пользу их авторов, которые шаг за шагом пытаются найти свои аргументы «против». Я неоднократно ловил себя на мысли о том, что если бы я не занимался лунными исследованиями со студенческих времен, если бы не был знаком с американскими астронавтами и не слушал их выступлений на научных конференциях, посмотрев вышеназванные телепередачи довольно легко поверить тому, что там показывается. Особенно не выслушав другую сторону. Как известно, «другая сторона», в данном случае — это НАСА, заняла принципиальную позицию: не отвечать на подобные «доказательства». Однако дело в том, что роль другой стороны в известном смысле приходится брать на себя нам, когда такие вопросы задаются. Многие, и не только студенты, и сегодня искренне убеждены, что люди на Луну не летали.

Подобная ситуация, конечно, дает серьезный повод для размышлений. Если так легко удалось «опровергнуть» крупнейшее достижение нашей цивилизации, то что же говорить о других проектах? Хотелось бы напомнить, что программа «Аполлон» потребовала затрат в 15 млн «человеколет». Это означает, что в течение 15 лет около одного миллиона граждан США (в большинстве — специалисты высокой квалификации) трудились на эту программу в самых разных отраслях американской экономики, включая науку и образование. В результате 17 космических кораблей, половина из которых пилотировались экипажами астронавтов, стартовали с планеты Земли. Шесть экипажей («Аполлон-11,-12,-14,-15,-16,-17») успешно высадились на поверхность Луны, провели там серию экспериментов и вернулись на Землю. Один полет к Луне («Аполлон-13») завершился неудачно — без высадки на Луну. Однако астронавтам удалось благополучно вернуться на Землю. Об этом драматическом полете был снят художественный фильм.

Объем затрат, выраженный в долларах, (25 млрд), сегодня не производит впечатления. Чтобы лучше понять масштабы затрат, полезно представить себе, например, группу чудаков из 15 человек, которые вознамерились решить ту же задачу, что и проект «Аполлон». Для этого им потребовалось бы около одного миллиона лет! Это, конечно, чисто формальный пример, который лишь помогает представить себе масштабы самой задачи. Конечно, реально, в ходе выполнения проекта «Аполлон», возникали научные и технические проблемы, решение которых было принципиально не по плечу группе из 15 человек, сколько бы времени такая группа ни трудилась. Другой способ представить объем затрат — это сравнить с другими

проектами. Так, например, разработка операционной системы ДОС для персональных компьютеров заняла в свое время в тех же единицах измерения примерно 5 тыс. «человеколет» (около тысячи специалистов работали над задачей примерно 5 лет).

История с программой «Аполлон» напомнила мне другую историю. В одной из дискуссий, посвященных методике преподавания астрономии, мы с коллегами обсуждали вопрос о том, как лучше и понятнее преподнести школьникам и студентам тему о строении Солнечной системы, орбитальном движении планет, смене времен года и все, что с этим связано. Один из участников обсуждения задал нам на первый взгляд «смешной» вопрос. Он попросил нас перечислить простые, наглядные и понятные всем свидетельства нашей повседневной жизни, говорящие о том, что Земля вращается вокруг Солнца, а не наоборот... Иными словами, нам предлагалось доказать, что Земля вращается вокруг Солнца... Попробуйте и вы, дорогой читатель, сделать это! Несмотря на «элементарность» такого «простого» вопроса, внятного и четкого ответа, как ни странно, сразу не последовало. Опытные преподаватели начали перебирать «свидетельства повседневной жизни», бродя «вокруг да около», но никак не могли попасть в точку с первого раза. Дискуссия затянулась. Тут я представил, а каково же тогда школьникам и студентам?

Тогда мне подумалось, что, действуя тем же методом, что и авторы «антиаполлоновского» фильма, довольно просто доказать, что Солнце действительно вращается вокруг Земли...

По-видимому, не случайно, что именно сейчас появился на свет этот фильм, призванный бросить тень на историю космических исследований. Воспользовавшись теми неудачами, которые имели место в области пилотируемых полетов в США за последнее десятилетие, авторы фильма предприняли попытку склонить на свою сторону общественное мнение и представить дело так, будто программы «Аполлон» не было вообще. Заняв позицию критиков, а точнее сказать — критиканов, авторы прибегли к дешевым методам подтасовки и искажения очевидных фактов. Где были эти авторы лет 10—20 тому назад, когда в лабораториях мира велись анализы образцов лунного грунта доставленного экипажами «Аполлонов», когда никому в голову не приходило ставить под сомнение достигнутые результаты? Критиковать других — это всегда просто и легко. Особенно задним числом. Спустя почти 40 лет после первой экспедиции на Луну! Расчет на неосведомленного и неподготовленного зрителя принес в определенной степени свои плоды.

Однако в целом, думается, что авторы нашумевшего фильма просчитались. Слишком заметным событием в истории человечества оказалась эта программа. Слишком глубокий и значительный след оставила она в истории науки и в истории человечества.

А главное, те следы людей с Земли, что остались на Луне после ее посещения астронавтами. Как быть с ними?..

Работа поддержана грантом РФФИ 08-02-01214.

ВВЕДЕНИЕ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВУЮ АСТРОНОМИЮ

Ультрафиолетовая и другие астрономии

Астрономия всегда была наукой нелабораторной, поскольку объекты изучения удалены от исследователя на огромные (принципиально непреодолимые) расстояния. А те тела, до которых человек все-таки добирается: Луна, планеты, падающие на землю метеориты, или космические процессы, которые человеку удастся в какой-то форме реализовать в наземных лабораториях и полигонах (наиболее «популярный» пример — термоядерный синтез), тут же становятся объектами изучения других, более «земных» наук. И хотя исторически в системе науки и образования астрономия рассматривалась как одна из математических дисциплин, но, конечно, она по сути своей является наукой физической. Недаром в Российской академии наук астрономические институты и обсерватории входят в состав ОФН (Отделения физических наук). В лекции позволю напомнить, что слово «физика» происходит от греческих слов *φύση*, *φυσικός* — «природа, природный», а задачей астрономии как фундаментальной науки является изучение природы Вселенной, то есть различных космических объектов и процессов, протекающих в космосе на различных пространственных и временных масштабах.

Если всего лишь немногим более столетия назад методы астрономии в общем-то ограничивались позиционными наблюдениями светил, математическими методами, описывающими движения небесных тел на небесной сфере и в пространстве, и некоторыми теоретическими моделями, основанными более на гениальных догадках, чем на реальном знании (например, гипотеза Канта—Лапласа), то ныне астрономия — наука весьма разветвленная. Если посмотреть статью «астрономия» в БСЭ, то можно сразу заметить, что пункт «задачи и разделы астрономии» не только заметно устарел, но и вообще написан не очень логично. Много нелогичностей и в современных публикациях, посвященных классификации различных раз-

делов астрономии. Более того, нелогично даже название специальности «астрофизика и радиоастрономия (01.03.02)» из списка ВАК! Здесь объединены разнородные элементы: астрофизика — крупнейший раздел астрономии, собственно, составляющий современную основу этой науки, и радиоастрономия — одна из многих «технических» ветвей астрономии. Классификация астрономической науки — предмет отдельной серьезной лекции. Пока что тем, кто интересуется структурой нашей науки, могу порекомендовать наиболее современный документ — Схема классификации физики и астрономии (<http://www.aip.org/pacs/pacs08/PACS2008.pdf>), изданный Американским институтом физики. В документе выделены четыре направления в астрономии, которые, несколько упрощая, можно определить как:

- фундаментальные основы и методы астрономии;
- Солнечная система и планетология;
- звезды;
- звездные системы от звездных скоплений до Вселенной.

Последние два раздела — предмет именно астрофизики и отчасти космологии. Астрофизические методы (и теоретические, и наблюдательные), естественно, включены в первый раздел.

Как бы то ни было, в реальной практике научных исследований можно встретить довольно много различных «астрономий». Некоторые из ветвей астрономии получили свое название по предмету исследования и частично по историческим причинам («звездная», «внегалактическая» и т. д.). Другие — по степени прикладного назначения («практическая», «мореходная» и т. д.). Пожалуй, наиболее часто употребляется выделение астрономий по спектральному (энергетическому) диапазону и по технологии наблюдений: «гамма», «рентгеновская», «оптическая», «инфракрасная», «радио», «внеатмосферная», «гравитационная» и т. д. В этом ряду стоит и понятие «ультрафиолетовая астрономия». Понятно, что все эти астрономии не являются независимыми. Речь идет лишь о различных технологиях изучения объектов и процессов во Вселенной. Более того, наиболее ценны именно мультиволновые («мультиастрономические») наблюдения. Они позволяют получить всестороннее представление об изучаемом объекте, то есть максимально глубоко выяснить его природу. Некоторые из таких астрономий предоставляют возможность

получать важные научные сведения практически обо всех астрономических объектах, другие — только об избранных классах объектов, и каждый технологический подход имеет свои преимущества.

В этом плане ультрафиолетовая астрономия выделяется в ряду других. Это прежде всего связано с тем фактом, что большая часть наблюдаемого вещества во Вселенной находится в состоянии, которое наиболее эффективно диагностируется методами ультрафиолетовой (УФ) спектроскопии. Это стало мощным стимулом к развитию методов УФ-астрономии. Далее мы обсудим уникальные возможности, которые предоставляет УФ-астрономия для изучения Вселенной.

За последние 30 лет в мире проведены многие десятки кратковременных космических экспериментов и запущено около двух десятков долговременных космических аппаратов (обсерваторий) для наблюдений объектов в УФ-диапазоне, включая знаменитый Космический телескоп им. Хаббла (HST). «Космические» — означает, что все эти эксперименты весьма дорогостоящие, но применение именно внеатмосферных средств неизбежно, поскольку земная атмосфера непрозрачна практически во всем УФ-диапазоне. В мире опубликованы десятки тысяч научных работ, описывающих результаты, которые основаны на УФ-наблюдениях.

Российские ученые также проявляли и проявляют огромную заинтересованность в том, чтобы получить реальную возможность проведения наблюдений в УФ. Это стало основным движущим фактором для включения в конце прошлого века в государственные программы фундаментальных космических исследований проекта «Спектр-УФ», направленного на создание крупной космической УФ-обсерватории. В 2000 г. Институтом астрономии РАН была проведена конференция «Научные перспективы ультрафиолетовой обсерватории Спектр-УФ», по материалам которой в 2001 г. был опубликован сборник «Ультрафиолетовая Вселенная» (ред. Б. М. Шустов, Д. З. Вибе. М.: ГЕОС, 2001. С. 184—198). В то время еще существовала некоторая неуверенность в судьбе российских космических проектов — слишком недостаточно и необязательно финансировалось это, да и другие научные направления. Начиная с 2004 г. ситуация в стране начала кардинально меняться. Финансирование космической отрасли, в том числе и космической науки, увеличилось по сравнению с 90-ми годами во много раз. Была принята Федеральная космическая программа России на 2006—2015 гг. — серьезный план развития космической науки. Проект «Спектр-УФ» получил мощ-

ный импульс к развитию. За эти годы сложилась реальная кооперация, в т. ч. международная, появилась возможность существенно улучшить технические характеристики. Проект получил новое («международное») название «Всемирная комическая обсерватория-Ультрафиолет» (ВКО-УФ). См. о проекте в разделе 4.

Естественно, что за прошедшие со времени проведения первой конференции годы произошли изменения приоритетов в науке, в т. ч. и в астрономии. Например, поиск скрытого барионного вещества стал весьма актуальной (и осуществимой!) задачей. Открытие атмосфер вокруг экзопланет поставило важный вопрос об определении их химического состава и т. д. Для того чтобы российские астрономы могли провести широкий и согласованный обзор актуальных и перспективных задач, которые могут решаться с помощью ВКО-УФ, в мае 2008 г. в Москве ИНАСАН и ГАИШ МГУ провели вторую общероссийскую конференцию, посвященную обсуждаемым вопросам. На конференции были представлены главным образом обзорные доклады по всем направлениям исследований, для которых особенно важны именно УФ-наблюдения. В конце 2008 г. вышел из печати сборник «Ультрафиолетовая Вселенная II» (ред. Б. М. Шустов, М. Е. Сачков, Е. Ю. Кильпио. М.: Изд-во Янус-К. 344 с.), составленный на основе докладов, сделанных на конференции. В этой небольшой лекции рассказывается об изучении Вселенной методами ультрафиолетовой астрономии. Основное внимание уделяется научным проблемам, для которых методы УФ-астрономии являются наиболее перспективными. Для более глубокого изучения научных проблем рекомендую читателям обратиться к материалам конференции.

Что такое УФ?

Ультрафиолетовый участок спектра довольно широк, длины волн лежат в интервале 10–400 нм. Свойства излучения в этом диапазоне и условия его наблюдения сильно зависят от длины волны. В обычной практике (например, в медицине) используется следующая классификация УФ: А — длины волн 400–315 нм, В — 315–280 нм и С — еще более коротковолновое излучение. В физике УФ условно делится на атмосферный или ближний (200–400 нм) и дальний или вакуумный (10–200 нм). Последнее название обусловлено тем, что излучение этих длин волн сильно поглощается воздухом и его исследование производят с помощью вакуумных спектральных приборов. В астрофизике иногда в участке ближнего УФ (БУФ — 200–400 нм)

выделяют подучастки:

- средний УФ (СУФ — 200—320 нм);
- ближний УФ (320—400 нм). Это участок перекрытия с видимым диапазоном.

Пользоваться этими определениями нужно внимательно из-за возможных недоразумений при использовании понятия «ближний УФ». В любом случае необходимо каждый раз внимательно свериться, о каких именно длинах волн идет речь. В вакуумном ультрафиолетовом участке (ВУФ — 10—200 нм) также выделяют подучастки:

- крайний или экстремальный УФ (КУФ — 10—91.2 нм), у которого нижняя граница по длине волны является одновременно верхней границей рентгеновского диапазона, а верхняя соответствует потенциалу ионизации атомарного водорода, т. н. Лаймановскому пределу;
- рентгеновский УФ (10—30 нм) — используется редко;
- лаймановский УФ (ЛУФ — 91.2—121.6 нм), у которого верхняя граница соответствует потенциалу возбуждения линии Ly_{α} водорода;
- дальний УФ (ДУФ — 91.2—200 нм).

Земная атмосфера непрозрачна почти во всем УФ-диапазоне. Порог обрезания атмосферой УФ-излучения космических источников лежит в пределах 300—320 нм. Точное значение зависит от состояния озонового слоя и содержания других молекул в атмосфере. В участке 300—400 нм атмосфера прозрачна. На этих длинах волн эффективны наземные оптические инструменты. В частности, проводятся астрофотометрические исследования в полосе U (Ultraviolet). На более коротких длинах волн наблюдения возможны только с помощью заатмосферных приборов. При наблюдениях в УФ объектов, находящихся вне Солнечной системы, и тем более внегалактических объектов нужно учитывать поглощение пылью (среднее значение в Галактике — ~ 1 зв. величина на 1 кпк) и очень сильное поглощение в КУФ нейтральным водородом. Межзвездное вещество практически непрозрачно в КУФ на линейных масштабах более ~ 1 пк. Детальная картина распределения нейтрального водорода довольно сложна, существует несколько окон, в которых межзвездная среда (МЗС) прозрачна в силу высокой степени ионизованности (области «ожогов» от вспышек сверхновых). Подробной карты прозрачности

МЗС на длинах волн короче Лаймановского предела в конце прошлого века не существовало. Это стало одним из обстоятельств запуска в 1992 г. обсерватория EUVE (США). Космическая обсерватория EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer — Исследователь в крайнем ультрафиолете), на которой было установлено четыре телескопа: три телескопа (т. н. сканеры), предназначенные для проведения обзора в КУФ, и четвертый — для проведения спектральных наблюдений отдельных объектов и глубокого обзора в отдельных участках неба, прекрасно работала с технической точки зрения (см. также в разделе 4). Однако по результатам наблюдений с EUVE оказалось, что число обнаруженных источников в участке 40—70 нм крайне мало. Это свидетельствует не о «нехватке» источников КУФ, а о высокой непрозрачности межзвездной среды. На длинах волн < 30 нм межзвездная среда прозрачнее, поскольку в КУФ-участке поглощение падает с уменьшением длины волны как λ^3 и число обнаруженных источников, как и следует из теории, гораздо больше. Эти результаты объясняют, в частности, тот факт что в отличие от физики Солнца, где наблюдения в КУФ дают важнейшую информацию, перспективы астрофизических наблюдательных проектов в КУФ рассматриваются сдержанно, по крайней мере пока не будут построены очень крупные космические телескопы этого спектрального диапазона. В дальнейшем мы будем обсуждать УФ-наблюдения, подразумевая главным образом участок 912—320 нм.

Почему так важны наблюдения в УФ?

Самое важное обстоятельство, выделяющее УФ-диапазон электромагнитного спектра среди всех остальных, состоит в том, что именно в этом диапазоне наиболее велика плотность астрофизической информации о звездах и газе. Это информация содержится и в непрерывном спектре астрофизических источников, и особенно в линиях различных химических элементов. Перечислим основные достоинства методов УФ-астрономии и направления исследований, в которых УФ наблюдения весьма важны или даже уникальны (методически будем придерживаться плана изложения этого вопроса в <http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/ast511/UV-astron-f01.html>)

Непрерывные УФ-спектры

Список приложений наблюдательных данных о непрерывных спектрах астрономических объектов в УФ-диапазоне включает:

горячие звезды ($T > 10\,000\text{ K}$). Распределение энергии в спектрах горячих звезд до сих пор остается предметом тщательных исследований. Такие звезды (в особенности массивные, массой $M > 3 M_{\text{sun}}$) существенно определяют условия ионизации, диссоциации, химической эволюции и т. д. в галактиках;

более холодные звезды ($T < 8000\text{ K}$). У этих звезд УФ участок спектра находится в Виновской области и весьма чувствителен к эффективной температуре звезды (это, в частности, используется при определении точки поворота на главной последовательности для звездных скоплений);

голубой горб в спектрах активных галактических ядер (проявление внутреннего аккреционного диска?);

нетепловые источники. Например УФ-избыток, наблюдающийся в сталкивающихся скоплениях галактик ([1]).

Атомные и молекулярные спектры

Атомная и молекулярная спектроскопия в УФ — мощное средство диагностики свойств различных объектов: межзвездной среды (МЗС), межгалактической среды (МГС), звезд. В УФ находится множество сильных (резонансных) переходов распространенных химических элементов — H, D, H₂, He, C, N, O, Mg, Si, S, Fe. Уникальные (то есть недублируемые никакими другими методами!) возможности предоставляет УФ-спектроскопия для исследований по линиям Ly α водорода, дейтерия, линиям ионов O VI, C IV, N V, C III, C IV, Лаймановского скачка в спектрах галактик на больших z . В диапазоне 300–400 нм важное значение для диагностики астрофизической плазмы имеют наблюдения линий [O II] и [Ne V] и Бальмеровского скачка для определения параметров звездных атмосфер (T , g).

Электронные переходы наиболее обильных в космосе молекул: H₂, CO, OH, CS, C₂ и др. лежат в УФ. В УФ-диапазоне лежат также наиболее сильные полосы таких экзотически больших молекулярных комплексов, как полиароматические углеводороды.

УФ-спектроскопия атомов и молекул занимает важнейшее место не только в наборе методов астрофизических исследований, но и в изучении верхних слоев атмосфер Солнечной системы. Можно, конечно, отнести эту технологию к методам планетных исследований. Однако в последние годы обнаружено, что и у экзопланет существуют протяженные атмосферы, окруженные водородными коронами. Так что исследование атмосфер с помощью УФ-спектроскопии можно отнести к сфере научных задач астрофизики.

Пик экстинкции на 217 нм Этот пик — важнейший индикатор свойств межзвездной пыли.

Выделение горячих компонент в холодных источниках

Объектами такого метода (подхода) являются звездные хромо-сферы, горячие звезды и активные ядра в эллиптических галактиках и т. д.

Низкий уровень фона

Если сравнивать фон космического излучения за пределами атмосферы на широком участке, включающем УФ, видимый и ИК диапазоны, то в УФ фон на порядки величины ниже. Это означает, что здесь естественный шум меньше влияет на качество получаемой наблюдательной информации, чем при использовании других спектральных каналов. На рис. 1 показан уровень фона ночного неба в зените при отличных условиях наблюдений с земной поверхности (ground) и фон неба в направлении типичном для внегалактических наблюдений. DGL обозначает область, где доминирует диффузный галактический фон, ZODI — область преимущественного вклада зодиакального света. Рисунок взят из <http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/astr511/UV-astron-f01.html>

Возможность «стыковки» наблюдательных методов оптической астрономии и теоретических моделей УФ-излучения для удаленных объектов

Вследствие космологического сдвига частоты длина волны излучения, приходящего от удаленных источников, увеличивается как

$$\lambda_{observed} = (1 + z)\lambda_{localrestframe}.$$

Подставляя предельно возможную для наземных наблюдений длину волны УФ-излучения 300 нм и длину волны Лаймановского предела для водорода — 91.2 нм, получим некоторое пороговое значение космологического фактора z , близкое к 2. Это означает, что оптические методы наблюдений УФ-источников становятся эффективными лишь для достаточно далеких источников ($z > 2$). Примерами таких источников являются Лайман-альфа источники поглощения (Ly_α -absorbers), галактики с Лайман-альфа обрезанием (Lyman-break galaxies — LBG), активные галактические ядра и т. д. С другой стороны, изучение многих объектов и процессов (см. выше),

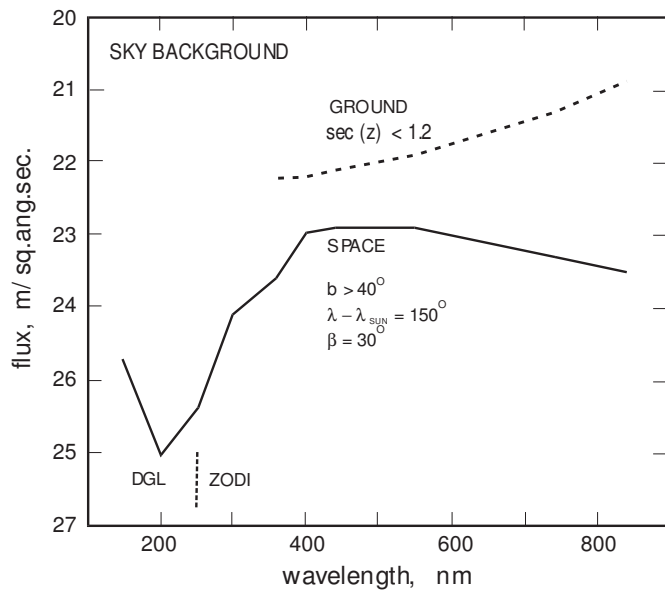


Рис. 1. Фон неба в УФ, видимом и ближнем ИК-участках спектра. Пояснения — в тексте

протекающих с эмиссией (или поглощением) УФ-излучения в ближней Вселенной ($z < 2$), возможно только с помощью методов УФ-астрономии! Отметим, что для Ly_α HeII этот порог лежит еще дальше ($z > 9$).

Таким образом, можно сказать, что методы УФ-астрономии (иногда только они!) позволяют исследовать беспрецедентно широкий список астрофизических объектов и процессов. Этот список безусловно включает:

- области звездообразования;
- протопланетные диски;
- массообмен и аккрецию в двойных системах;
- химический состав звезд и химическую эволюцию галактик;
- образование массивных звезд;
- поздние стадии звездной эволюции (звезды горизонтальной ветви, белые карлики и др.);

- межзвездное пылевое вещество;
- возрасты и химические особенности звездных населений;
- тепло-горячий компонент межзвездной среды;
- протогалактики;
- историю звездообразования в галактиках;
- галактические фонтаны, галактический ветер;
- активные галактические ядра;
- эволюцию межгалактической среды (реионизация, обогащение металлами);
- первичное содержание дейтерия (индикатор истории нуклеосинтеза во Вселенной).

В разделе 5 этой лекции кратко обсуждаются некоторые из этих проблем, точнее те, что вошли в основную программу проекта ВКО-УФ.

О методах наблюдений в УФ

Когда говорят о методах исследования УФ-источников, прежде всего имеют в виду спектральные наблюдения и во вторую очередь построение УФ-изображений. В настоящее время УФ-спектроскопия — мощный развитый и перспективный инструмент исследования. Достаточно сказать, что на создание только одного прибора — УФ-спектрографа COS (Cosmic Origin Spectrograph), который планируется установить на телескопе HST, в США потрачено около 150 млн долларов.

В современной отечественной литературе практически нет даже кратких обзоров по развитию методов ультрафиолетовой спектроскопии.

В работе [2] довольно полно отражено состояние вопроса, но на уровне более чем 20-летней давности. По-видимому, наиболее полный современный обзор основных направлений и этапов развития методов УФ-спектроскопии представлен в работе [3]. Поскольку интерес авторов ограничивается астрофизическими применениями УФ спектроскопии, то именно эти применения были описаны подробнее.

Как наблюдали и наблюдают в УФ

Не будем останавливаться на основах технологии наблюдений в УФ, а просто кратко ознакомимся с конкретными историческими и современными проектами (более подробно см. в [3]). В середине 60-х были предприняты первые попытки фотографической регистрации УФ спектров ярких звезд [4]. Использовались две камеры Шмидта ($F/2$, $F = 100$ мм) с предобъективными дифракционными решетками (разрешающая сила $R = 30$). Пропускание ограничивалось кварцевой и флюоритовой коррекционными пластинами (до 170 и 125 нм соответственно). В [5] представлены спектры звезд до 4-й величины, полученные при помощи электрографической камеры с предобъективными решетками (95–140 нм, $R = 300$). Максимальное спектральное разрешение в ракетных УФ экспериментах было достигнуто на 1-метровом спектрографе Водсворта ($R = 60\,000$, в участке 98–140 нм) для звезды 2-й величины [6].

Характерный интервал высот работы спектрографов, установленных на ракетах, составлял 100 – 200 км, время работы — десятки секунд. Этого было недостаточно для проведения действительно глубоких астрофизических экспериментов, поэтому были использованы методы стратостатных наблюдений. Стратостатные эксперименты хотя и позволяли выполнять наблюдения с большими временами накопления, а также проводить повторные наблюдения, были ограничены непрозрачностью верхних слоев атмосферы, вследствие чего наблюдения в вакуумном ультрафиолете были невозможны. В ракетных и стратостатных экспериментах были отработаны важные для дальнейшего продвижения технические и методические аспекты УФ спектроскопии, но основное развитие этот метод получил только с осуществлением орбитальных экспериментов.

Первые орбитальные эксперименты также характеризовались низким спектральным разрешением, но за счет большего времени экспозиции были доступны уже гораздо более слабые объекты. Так, два сканирующих спектрометра с эффективной апертурой 16×16 см, установленные на американском спутнике ОАО-2, обеспечивали наблюдения звезд до 7-й величины с $R = 100$ –200 в диапазоне 100–400 нм [7]. Точность сопровождения объекта была весьма высокой и составляла 1 угл. с.

Особое место занимает первый обзор неба в диапазоне 135–255 нм, выполненный на 27-см телескопе, установленном на американском спутнике TD-1A [8]. Предельная звездная величина, дости-

жимая при однократном сканировании, составляла 9 для звезд спектрального класса В при $R = 1\,400$. Каталог объектов, наблюдаемых на этом спутнике, почти сразу был доступен мировому астрономическому сообществу.

В 1973 г. с борта КА «Союз-13» космонавты П. Климук и В. Лебедев с помощью 22 см телескопа обсерватории ОРИОН-2 провели фотографические наблюдения звезд до 13-й величины с предобъективной призмой $R = 100\text{—}250$ [9]. По данным наблюдений для 900 звезд составлен каталог распределений энергии в диапазоне 200—380 нм.

В 90-х, во время пилотируемых полетов кораблей-челноков, было выполнено несколько УФ экспериментов. В течение миссий ASTRO (1990 и 1995) на орбиту выводился 90-см американский телескоп HUT, имевший параболическое главное зеркало, покрытое карбидом кремния для достижения лучшего коэффициента отражения на коротких длинах волн. Телескоп был оснащен роуландовским спектрометром, $R \sim 400$ в основном для работы в диапазоне 82—185 нм. В миссии ASTRO-1 также проводились наблюдения в участке 42—92 нм [10]. Детектором служила микроканальная пластина (МКП), сопряженная с линейкой фотодиодов. Этот инструмент позволил получать спектры довольно слабых источников (до $V = 16$).

Еще более крупный (1 м) телескоп ORPHEUS с УФ-спектрографом, сделанный в Германии, дважды, в 1993 и 1996 гг., провел 10-дневные сеансы наблюдений с борта платформы ASTRO-SPAS, выводившейся в космос челноком [11]. Принципы построения УФ спектрометра и особенно приемной части, отработанные в этой миссии, оказались столь удачными, что легли в основу спектрографа HIRDES, разрабатываемого для обсерватории ВКО-УФ (см. ниже).

Таблица 1. Список кратковременных УФ-экспериментов

Эксперимент	Год и месяц запуска	Апертура инструмента, см	Режим наблюдения	$\lambda\lambda$ Å
Orion-1	1971.06	28	s	2000-3800
Orion-2	1973.12	30	s	2000-3000
Skylab	1973.05	15	s	1300-4200
ASTP/EUVT	1975		i	50- 770
FOCA	1988	40	i	1850-2150
Astro-1	1990.12		isp	415-3500
Astro-2	1995.03		isp	415-3500
FAUST	1992.03		i	1400-1800
ORFEUS-1	1993.09	100	s	400-1400
ORFEUS-2	1996.11	100	s	400-1400
UVSTAR-1	1995.09	30	s	500-1200
UVSTAR-2	1995.09	30	s	500-1200
UVSTAR-3	1998.10	30	s	500-1200
NUVIEWS-1	1996.07		i	1470-1720
NUVIEWS-2	2002.06		i	1470-1720

Таблица 2. Долговременные обсерватории с инструментами УФ-диапазона

Обсерватория	Год и месяц запуска	Апертура инструмента, см	Режим наведения	Режим наблюдения	$\lambda\lambda$ Å
ОАО-2	1968.12–1973.01	20	sp	is	1 000–4 250
TD-1A	1972.03–1974.05	28	s	is	1 350–2 800+
ОАО-3	1972.08–1981.02	80	p	s	900–3 150
ANS	1974.08–1977.06	22	p	s	1 500–3 300+
IUE	1978.01–1996.09	45	p	s	1 150–3 200
ASTRON	1983.03–1989.06	80	p	s	1 100–3 500+
EXOSAT	1983.05–1986.	2x30	p	is	250+
ROSAT	1990.06–1999.02	84	sp	i	60–200+
HST	1990.04–2013	240	p	isp	1 150–10 000
EUVE	1992.06–2001.01	12	sp	is	70–760
ALEXIS	1993.04–2005.04		s	i	130–186
MSX	1996.04–2003		s	i	1 100–9 000+

Кратковременные УФ-эксперименты принесли много совершенно нового, но все-таки современный уровень УФ-астрономии определяется долговременными обсерваториями.

Характеристики кратковременных экспериментов и долговременных обсерваторий приведены в табл. 1 и 2 (основа таблиц взята из работы [12]). Все обозначения в табл. 1 вполне понятны. Пояснений требует только режим. Здесь s — обозначает, что использован спектроскопический инструмент, i — УФ-камера, p — поляриметр. В табл. 2 обозначения те же, что и в табл. 1. Дополнительно введена информация о режиме наведения. Для указания на сканирующий режим используется индекс s , а режима наведения на конкретные объекты — p .

Среди долговременных обсерваторий особо выделяются несколько проектов. Важные астрофизические открытия были сделаны с 80-см телескопом, установленным на американском ИСЗ «Коперник» (ОАО-3), период работы которого 1972—1981 гг.). Телескоп был оснащен роуландовским дифракционным спектрографом, обеспечивающим $R = 30\,000$ на 120 нм [13]. Рекордная точность сопровождения объекта (< 0.1 угл. с в течение нескольких минут) позволяла достичь точности электрофотометрии, ограниченной статистикой фотонов. Применялся метод сканирования спектра. Сканирование осуществлялось в диапазоне 95—300 нм при помощи 4-фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). На регистрацию интервала длиной в 30 нм требовалось около недели.

Наибольший вклад в изучение химического состава звезд и межзвездной среды методами внеатмосферной астрономии внесли европейский спутник-обсерватория IUE (International Ultraviolet Explorer, [14]), период работы которой составил 17 лет (1978—1996), и отечественная астрофизическая станция «Астрон» (1983—1989 гг. [15]). В телескопе обсерватории IUE (диаметр главного зеркала, сделанного из бериллия, 45 см; $F/15$) был применен способ коррекции фокусировки за счет тепловых изменений формы зеркала. Для этого на тыльной поверхности зеркала были установлены нагреватели. Входившая в состав комплекса научной аппаратуры камера (поле зрения 16 угл. мин) использовалась как в режиме получения изображений в видимом участке, так и для точного гидирования. Главными научными инструментами были два спектрометра (диапазоны 115—200 и 185—330 нм). У каждого спектрографа были две моды разрешения ($R = 10\,000$ — эшелонный режим и $R = 300$, в которой использовался только кросс-

диспергирующий элемент). Можно отметить также, что IUE открыл эпоху применения панорамных приемников для внеатмосферной УФ спектроскопии. Использовался конвертер УФ излучения в видимое, и видеокон. Формат детектора составлял 768×768 8-битовых пикселей.

За время работы IUE на нем было получено более 104 тысяч УФ спектров для объектов от -2 до 15 звездной величины. По этому показателю созданная в СССР (основные партнеры — Крымская астрофизическая обсерватория АН СССР и НПО им. С. А. Лавочкина) УФ-обсерватория «Астрон» уступала IUE. Аппарат был запущен на высокоэллиптическую орбиту с апогейным расстоянием около 200 000 км. Телескоп диаметром 80 см (Ричи—Кретьен, $F/10$) был оснащен сканирующим УФ спектрографом — основным научным инструментом обсерватории. Спектрограф, созданный совместно с коллегами из Франции, был собран по схеме круга Роуланда; он позволял проводить наблюдения с высоким (0.04 нм) и низким (3 нм) спектральным разрешением. В этом спектрометре была применена вогнутая тороидальная дифракционная решетка отечественного производства. В качестве детекторов использовались три ФЭУ, перекрывавшие спектральный интервал 110—350 нм. Очень интересной особенностью обсерватории была впервые примененная система стабилизации изображения. Вторичное зеркало телескопа могло качаться вокруг некоторой точки, при этом компенсировались небольшие смещения изображения на фокальной поверхности. Такой подход позволял справляться с особенно трудно компенсируемыми высокочастотными колебаниями.

Обсерватория «Астрон» принесла уникальные сведения о химическом составе звезд, свойствах кометы Галлея, Сверхновой SN 1987A и других объектов, но общему мировому признанию этих достижений помешала плохо организованная система работы с научными данными. Общий недостаток долговременных орбитальных УФ-экспериментов того времени — малая мощность телеметрических каналов — в случае обсерватории «Астрон» был усугублен чрезмерно закрытой политикой по распространению информации.

Спутник EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer) работал в конце прошлого века (1992—2001) в КУФ; он был спроектирован для открытия нового окна во Вселенную [16]. До сих пор в этом участке спектра лишь эпизодически работали несколько приборов, начиная с

аппарата Voyager-1, на борту которого был установлен спектрограф низкого разрешения для экстремального УФ. Успешный с технической точки зрения проект оказался не столь успешным в научном отношении (см. раздел 2).

Богатой на интересные результаты оказалась спектроскопическая обсерватория FUSE (США с участием Франции), запущенная в 1999 г., см. [17] для наблюдений в ЛУФ. Четыре телескопа (внеосевые параболоиды с характерными размерами 35×40 см; покрытия: для двух — карбид кремния, для остальных — алюминий и LiF) оснащены спектрографами по Роуландовской схеме. Диспергирующими элементами являются голографические дифракционные решетки с компенсированной сферической аберрацией. Детекторы, как это и характерно для современных УФ экспериментов, включали в качестве усилителя микроканальные пластинки. Планировалось достижение высокого спектрального разрешения (до 25 000), но на практике эта величина составляет около 17 000.

Еще одна современная УФ-обсерватория — GALEX (Galaxy Evolution Explorer) — была спроектирована для массового изучения УФ источников по всему небу. Аппарат GALEX (США) запущен на орбиту в апреле 2003 г. (см. [18]). Телескоп диаметром главного зеркала 50 см оснащен двумя широкоформатными (65 мм) детекторами на основе МКП. Основная задача обсерватории — получение глубокого обзора в УФ всего неба и качественных изображений отдельных объектов. Однако для целей спектроскопии низкого разрешения предусмотрена УФ гризма. Это является новшеством в технике УФ спектроскопии. Важной функцией обсерватории GALEX является построение УФ изображений (см. на сайте обсерватории замечательные УФ-снимки астрономических объектов). Опираясь на обзоры, полученные на аппарате GALEX, будут строиться последующие проекты УФ-спектроскопии высокого разрешения и построения изображений.

Составивший целую эпоху в современной истории методов внеатмосферной астрономии 2.4-м телескоп HST был оснащен сначала спектрографом GHRS (Goddard High Resolution Spectrograph, 1990—1997 гг., [19]), спектральное разрешение которого составляло $R = 80\,000$, $25\,000$ и $2\,000$. Преимущества современных двумерных (панорамных) светоприемников в полной мере реализованы при создании спектрографа STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph [20], заменившего GHRS. Системы сканирования GHRS были заменены фиксированными положениями сменных элементов в STIS. Исполь-

зовались эшелле как среднего ($R = 30\,000\text{--}45\,000$), так и высокого ($R = 110\,000$) разрешения. Приемниками служили матрица ПЗС $1K \times 1K$ (в диапазоне $200\text{--}1\,100$ нм) и две системы на МКП и системы считывания МАМА (Multi Anode Multi Array) с форматом 1024×1024 (для диапазонов $115\text{--}170$ и $165\text{--}310$ нм). В августе 2004 г. эксплуатация STIS была остановлена из-за неполадок в системе смены вариантов наблюдений. Современный спектрограф COS планируется установить на HST в начале 2009 г.

HST был оснащен камерами, которые использовались в основном в оптическом диапазоне спектра.

Первые спектрополяриметрические измерения в УФ диапазоне были выполнены в американском эксперименте WUPPE (50-см телескоп, $140\text{--}320$ нм, $R = 400$ [21]), устанавливавшегося на платформах Astro-1 и Astro-2. Проводилась спектрополяриметрия объектов до 16-й звездной величины. По завершении эксперимента платформа с инструментами и записями спектров возвращалась на спускаемый корабль.

Что касается перспектив УФ-астрономии во втором десятилетии XXI в., то они связаны в первую очередь с проектом ВКО-УФ.

Проект ВКО-УФ

Проект «Спектр-УФ» или ВКО-УФ подробно описан в [22]. Здесь мы дадим лишь краткие сведения о возможностях обсерватории. Основные возможности обсерватории ВКО-УФ заключаются в спектроскопии слабых источников в УФ-диапазоне и построении изображений в УФ и оптическом участках. При этом должны достигаться высокое спектральное разрешение, максимальное пространственное разрешение, а для изучения слабых источников — высокая проникающая способность. Выбор параметров телескопа Т-170М (апертура — 170 см, фокальное отношение — 10) обусловлен следующими конкретными требованиями: достижение углового разрешения 0.1 угл. с и достижение максимальной эффективной площади в рабочем диапазоне длин волн $110\text{--}350$ нм. Напомним, что эффективная площадь зависит от длины волны и определяется как произведение геометрической площади собирающей поверхности на коэффициент пропускания оптического тракта на данной длине волны.

Для обеспечения этих требований в составе обсерватории международной кооперацией создаются следующие инструменты.

- Спектрограф высокого разрешения HIRDES (High Resolution Double Echelle Spectrograph) изготавливается в Германии и предназначен для проведения спектральных наблюдений с высоким ($R = 55\,000$) разрешением точечных объектов в диапазоне 102–320 нм. Спектрограф HIRDES по своей чувствительности более чем в 10 раз превосходит спектрограф STIS проекта HST для аналогичной конфигурации.
- Спектрограф с высокой щелью LSS (Long Slit Spectrograph) изготавливается в Китае для проведения спектральных наблюдений низкого разрешения ($R \sim 1\,500$). Он также будет работать в диапазоне 102–320 нм.
- Блок камер ISSIS (Imaging and Slitless Spectroscopy Instrument for Surveys), имеющий три канала:
 - CfS/FUV — канал для проведения обзоров (120–600 нм), оптимизированный на участок 120–270 нм (тонкая ПЗС с обратным освещением без покрытия);
 - CfS/UVO — канал для проведения обзоров (120–600 нм), оптимизированный на участок 200–270 нм (то же что и в CfS/FUV, но с AR-покрытием);
 - HSC — высокочувствительный канал на 120–200 нм (МКП детектор с CsI-катодом).

Обе камеры создаются в Испании.

Запуск обсерватории планируется на 2011–2012 гг.

Наука с ВКО-УФ

Как уже обсуждалось в разделе 2, круг решаемых методами УФ-астрономии задач весьма широк. В этом разделе обсуждаются только отдельные проблемы, составляющие основную программу обсерватории ВКО-УФ:

- определение содержания барионов в диффузной компоненте Вселенной и химическая эволюция МГС;
- физика аккреции и истечения;
- образование и эволюция Галактики;
- атмосферы экзопланет и астрохимия в сильном поле УФ-излучения.

Определение содержания барионов в диффузной компоненте Вселенной и химическая эволюция МГС

Проблема определения содержания барионов довольно полно изложена в работах [23–26]. Отметим здесь некоторые аспекты, недостаточно освещенные в этих работах.

Реионизация He II

Из теории эволюции МГС мы знаем, что после реионизации водорода МГС охлаждается вследствие расширения и затем вновь нагревается вследствие реионизации HeII на $z = 3$ и затем продолжает охлаждаться с уменьшением z . Наблюдения HeII Ly $_{\alpha}$ -леса в диапазоне $2.1 < z < 2.9$ позволит проверить эту модель наиболее прямым образом [27].

Роль вспышек звездообразования в эволюции МГС

Наблюдаемые свойства мест вспышечного звездообразования указывают на преимущественное содержание в них массивных звезд. Массивные звезды оказывают большое влияние на эволюцию, в том числе химическую, галактик. Сходство физических характеристик локальных вспышек и в галактиках на больших красных смещениях проливают свет на космологические подобию вспышек звездообразования. Более того, изучение близких вспышек звездообразования является хорошей лабораторией для изучения взаимодействия этих объектов с МЗС и МГС. Истечения в холодной, теплой и корональной фазе со скоростями несколько сотен километров в секунду — обычное явление в местах вспышек. Эти обогащенные металлами истечения в значительной степени определяют химическую эволюцию МГС. Спектроскопические возможности ВКО-УФ будут весьма полезны при изучении этих объектов.

Образование галактик

Как образовалось то многообразие галактических форм, которое представлено в современной Хаббловской (морфологической) последовательности галактик? Как вообще образовались галактики? Согласно современным космологическим представлениям галактики сформировались внутри гало (сгустков) темного вещества (ТВ), которые сформировались вследствие роста первичных флуктуаций. Эволюция ТВ успешно предсказывается из первопринципов, поскольку эта эволюция происходит только под действием гравитации. Однако предсказательная мощь теории буксует, как только приходит необходимость учитывать светящееся (диссипативное) барионное вещество.

Ряд наблюдательных программ, которые планируется провести с УФ-камерами ВКО-УФ, например, в широких полосах 150, 220 и 300 нм глубоких полей GOODS/UDF [28], позволят:

- произвести поиск галактик с Лаймановским обрезанием (LBG) на относительно малых z . В то время как поиск LBG на $z \sim 2-3$ — уже хорошо отработанная технология, на $z \sim 1-1.5$ таких исследований практически нет из-за недостатка глубоких УФ-изображений с хорошим разрешением;
- изучить функцию УФ-светимости: слабый конец функции УФ-светимости (на 150 нм в местном стандарте покоя) весьма плохо изучен. Наблюдения на 300 нм позволят закрыть этот пробел особенно на $z \sim 1-1.5$, где начинается падение глобальной скорости звездообразования.

Физика аккреции и истечения. Астрономические машины

Астрономические машины (astronomical engines), то есть звезды, черные дыры и т. д., могут ускорять большие массы до скоростей, близких к скорости света, и генерировать неожиданные и мощные выбросы. Они также могут генерировать гораздо более умеренные выбросы (типа солнечного ветра). Во всех этих явлениях различные формы энергии (гравитационная, тепловая, лучистая, магнитная) переводятся в кинетическую в условиях, весьма отличающихся от лабораторных. Еще более необычны машины, генерирующие сильно коллимированные биполярные истечения и джеты. Такие структуры производятся совместным воздействием магнитного поля, дифференциального вращения и гравитации. Физика высококоллимированных истечений пока что исследована недостаточно. Астрономические машины определяют:

- светимость активных галактических ядер;
- реионизацию Вселенной на $z \sim 3$;
- свойства планетных систем, являющихся «хранилищами» углового момента, оставшегося на момент, когда астрономическая машина выключается на стадии звезды до главной последовательности.

Проект ВКО-УФ позволит получить ключевые данные для ответов на вопросы, касающиеся физики астрономических машин:

- что определяет эффективность аккрецирующих объектов как гравитационных машин?

- нужно ли именно магнитное поле, чтобы получать высокоскоростные истечения?
- каковы временные шкалы для выбросов массы?
- как аккрецируемое вещество движется из диска на гравитационный центр (скажем, звезду) в условиях умеренного магнитного поля?
- какая часть гравитационной энергии, теряемой в этом процессе, поступает на поверхность звезды? Какая часть уходит на усиление/ослабление магнитного потока?
- какова роль давления излучения в этих комплексных процессах?
- каковы основные механизмы, приводящие к дисковым неустойчивостям, и какова роль этих неустойчивостей в процессах аккреции/истечения?

Приведем несколько конкретных примеров.

1. УФ-спектроскопия высокого разрешения позволит изучить структуру аккреционных потоков на магнитные катаклизмические переменные и на звезды ТТави и определить физические условия в истечениях. Она также позволит изучить источники энергии, определяющие существование протяженных плотных ($> 10^{10} \text{ см}^{-3}$) и горячих ($T_e > 60\,000 \text{ K}$) оболочек, которые были обнаружены вокруг звезд Т Тави [29]. Светимости таких оболочек достигают $0.2 L_{\odot}$.
2. УФ-спектроскопия низкого разрешения позволит определить общие физические условия и металличность в областях с широкими эмиссионными линиями АЯГ. Реверберационное картирование позволит изучить кинематику и определить массы сверхмассивных черных дыр.
3. Высокочувствительная УФ-камера позволит обнаружить горячие джеты по их Ly_{α} излучению, а также определить тепловую структуру джетов и областей вокруг них.
4. Весьма интересно с помощью такой камеры провести поиск свободно движущихся тел планетарной массы, подобных тем, что обнаружены в области σOri [30], исследовать магнитную активность и процессы аккреции для этих объектов.

Шаровые скопления — ключ к пониманию процесса образования Галактики?

Шаровые скопления традиционно рассматриваются как хорошие индикаторы процессов, приведших к формированию родительской галактики. Определения абсолютных возрастов скоплений накладывают ограничения на оценки возраста галактик и имеют космологические последствия. Относительные возрасты дают детальную информацию о ходе процесса образования родительской галактики. Для определения абсолютного возраста необходимо точно определять расстояние, металличность и покраснение. Существует простой геометрический метод точного определения расстояний до шаровых скоплений: сравнение дисперсии собственных движений звезд в скоплении (определяется в угловой мере) с дисперсией радиальных скоростей. Радиальные скорости для тысяч звезд шаровых скоплений массово определяются с точностью до единиц километров в секунду с помощью мультиволоконных инструментов на больших (8–10 м) наземных телескопах. Что касается собственных движений, то, как показано в [31], камера WFPC2 на борту HST позволяет проводить астрометрические измерения с точностью в несколько миллисекунд дуги на одном кадре! На камерах ВКО-УФ планируется достичь точности не хуже одной миллисекунды дуги в канале UVO (200–700 нм). Эта точность вместе с использованием архива HST (то есть измерений в эпоху, отстоящую в прошлое на 20–30 лет) позволит определять собственные движения с точностью не хуже 10 мкс дуги в год. С такими точностями ошибка в определении расстояния, зависящая от числа n звезд (обычно несколько тысяч), для которых проведены измерения, как $(2n)^{1/2}$, может быть на приемлемом уровне даже для шаровых скоплений, удаленных на десятки килопарсек. Более того, используя привязку к удаленным источникам (например, квазарам), можно измерять абсолютные собственные движения с точностью до 30 мкс дуги. Зная абсолютные собственные движения, можно изучать трехмерную кинематику шаровых скоплений для определения детальной структуры потенциала Галактики и выявления звездных потоков в Галактике. Для этого важно использовать данные о возрастах скоплений и их металличности. Естественно, что такие данные о потоках — весьма ценный материал для восстановления истории поглощения Галактикой карликовых спутников.

Протопланетные диски и атмосферы вокруг экзопланет

Звезды Т Таури, являющиеся звездами солнечного типа на стадиях до главной последовательности, представляют уникальные возможности для изучения условий в которых, по-видимому, образуются планетные системы, подобные нашей. Согласно современным представлениям планеты земного типа начинают формироваться уже через несколько миллионов лет после образования молодой звезды, то есть когда еще не полностью завершился процесс аккреции. Излучение центральной машины должно оказывать существенное влияние на эволюцию диска и испарение первичных атмосфер планет-эмбрионов через процессы фотоионизации, фотодиссоциации и фотохимических реакций [32, 33]. УФ-спектроскопия позволит изучать в деталях взаимодействие между звездным полем УФ-излучения и молодым планетарным диском и обнаружить молекулярную компоненту в очень разреженных дисках. Недавние исследования по химической эволюции дисков демонстрируют, что УФ-фотоны, проникающие в пылевой диск, могут определять протекание реакций, приводящих к образованию больших органических молекул. В этом аспекте УФ-фотоны $\lambda > 150$ нм, фотодиссоциирующие органические молекулы, могут играть ключевую роль во внутренних областях протопланетного диска, а фотоны, фотодиссоциирующие H_2 и CO, «контролируют» внешние слои диска, экспонированные прямым излучением звезды. Фотохимия может на шкале времени, короче динамической, приводить к образованию больших углеродсодержащих молекул, таких, как C_nH_2 , $HC_{(2n+1)}N$, и C_n . Реакции между этими соединениями и водородом (H и H_2) могут поддерживать их высокое содержание, несмотря на сильное поле излучения.

УФ-спектроскопия весьма перспективна для исследования атмосфер экзопланет. Именно применение УФ-спектроскопии высокого разрешения впервые привело к открытию атмосферы экзопланеты HD 209458b (см. в [34]). Наблюдения экзопланет и детальное изучение их атмосфер поможет понять процессы формирования планет и их атмосфер и дальнейшую эволюцию этих систем. Камеры ВКО-УФ позволят проводить поиск и при обнаружении изучать авроральную эмиссию экзопланет-гигантов. Это, кстати, прямой метод обнаружения таких планет. С другой стороны, наличие авроральных свечений четко указывает на наличие магнитного поля планеты. Это не только прямой, но и единственный способ обнаружения магнитного поля у этих объектов. Авроральное УФ-свечение также несет све-

дения о свойствах этих самых внешних областей атмосфер, в частности, о составе атмосферы и энергиях бомбардирующих атмосферу частиц. В целом УФ-диапазон дает существенные преимущества при сравнении с видимым. Более высокий контраст и лучшее угловое разрешение в УФ позволяют обнаруживать планеты на меньших угловых расстояниях от звезды.

В следующей декаде будет реализовано несколько наземных и космических программ обнаружения экзопланет, что приведет к открытию огромного числа этих объектов. В частности, космические миссии, включая Corot, Kepler и GAIA, приведут к открытию большого числа экзопланет методом прохождения. Наблюдения линии поглощения в видимом и УФ-участках спектра (например, линии озона!) во время прохождения планеты по диску родительской звезды — мощный метод диагностики атмосфер.

Можно ожидать, что будут получены ответы на такие вопросы:

- каково влияние температуры, металличности и других свойств центральной звезды на эволюцию ее планетной системы?
- как орбитальные параметры планеты влияют на ее размеры, массу и потенциальные возможности миграции во время формирования планетной системы (см, например, [35])?

Заключение

УФ-астрономия — мощная и продолжающая развиваться ветвь астрономии. Методы УФ-астрономии представляют эффективные, а часто уникальные средства исследований практически во всех направлениях астрофизики. Этот гигантский потенциал далеко не исчерпан, несмотря на огромные достижения в этом направлении, обусловленные многочисленными проектами (и очень большими затратами), реализованными за последние три десятилетия. Можно сказать, что Вселенная в УФ-диапазоне изучена пока еще очень мало, и остается много весьма важных и интересных вопросов для будущих исследователей. Научные планы обсерватории ВКО-УФ весьма амбициозны и включают в себя многие астрономические направления. ВКО-УФ будет работать в следующей декаде и в кооперации с мощными наземными инструментами, обеспечивающими получение информации в видимом диапазоне, и космическими проектами как

более коротковолновых диапазонов (Спектр-ПГ, Symbol-X и т. д.), так и более длинноволновых (например, GAIA, JWST, Herschel etc.), даст возможность совершить существенное продвижение в наших знаниях о Вселенной.

Автор выражает благодарность за поддержку работы грантами РФФИ-07-02-01031 и НШ-4354.2008.2.

Список литературы

1. *Gabici S., Blasi P.* Nonthermal Radiation from clusters of galaxies: the role of merger shocks in particle acceleration // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 583. — P. 695–705.
2. *Москаленко Е. И.* Методы внеатмосферной астрономии. — М.: Наука, 1984.
3. *Панчук В. Е., Шустов Б. М., Юшкин М. В.* Ультрафиолетовая спектроскопия астрофизических объектов // *Оптический журнал.* — 2006. — Т. 73, № 4. — С. 49–59.
4. *Morton D. C., Spitzer L. J.* Line spectra of delta and pi Scorpii in the Far-Ultraviolet // *Astrophys. J.* — 1966. — Vol. 144. — P. 1–36.
5. *Carruthers G. R.* Far-Ultraviolet spectroscopy and photometry of some early-type stars // *Astrophys. J.* — 1968. — Vol. 151. — P. 269–284.
6. *Smith A. M.* Interstellar molecular hydrogen observed in the ultraviolet spectrum of delta Scorpii // *Astrophys. J., Lett.* — 1973. — Vol. 179. — P. L11–L15.
7. *Code A. D., Houck T. E., McNall J. F. et al.* Ultraviolet photometry from the orbiting astronomical observatory. I. Instrumentation and operation // *Astrophys. J.* — 1970. — Vol. 161. — P. 377–388.
8. *Boksenberg A., Evans R. G., Fowler R. G. et al.* The ultra-violet sky-survey telescope in the TD-IA satellite // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1973. — Vol. 163. — P. 291–322.
9. *Gurzadyan G. A.* Ultraviolet spectra of faint stars from space // *Sky Telesc.* — 1974. — Vol. 48. — P. 213.
10. *Davidson A. F., Long K. S., Durrance S. T. et al.* The Hopkins Ultraviolet Telescope — Performance and calibration during the Astro-1 mission // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 392. — P. 264–271.

11. *Barnstedt J., Kappelman N., Appenzeller I. et al.* The ORFEUS II echelle spectrometer: instrument description, performance and data reduction // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1999. — Vol. 134. — P. 561–567.
12. *Малков О. Ю.* Ультрафиолетовые астрономические ресурсы в сети // *Ультрафиолетовая Вселенная II* / Ред. Б. М. Шустов: Материалы всерос. науч. конф. — М.: Янус-К, 2008. — С. 32–45.
13. *Rogerson J. B., Spitzer L., Drake J. F. et al.* Spectrophotometric results from the Copernicus Satellite. I. Instrumentation and performance // *Astrophys. J., Lett.* — 1973. — Vol. 181. — P. L97–L102.
14. *Boggess A., Carr F. A., Evans D. C. et al.* The IUE spacecraft and instrumentation // *Nature.* — 1978. — Vol. 275. — P. 372–377.
15. *Боярчук А. А.* Астрофизические исследования на космической станции «Астрон». — М.: Наука, 1994. — 415 с.
16. *Welsh B. Y., Vallergera J. V., Jelinsky P. N. et al.* Extreme Ultraviolet Explorer: overview and calibration / Ed. by R. B. Hoover: Proc. SPIE conf. — Vol. 1160. — 1989. — P. 554.
17. *Sahnow D. J., Moos H. W., Ake T. B. et al.* On-orbit performance of the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE) / Ed. by J. B. Breckinridge, P. Jakobsen: Proc. SPIE conf. — Vol. 4013. — 2000. — P. 334–343.
18. *Martin D. C., Fanson J., Schiminovich D. et al.* The Galaxy Evolution Explorer: A Space Ultraviolet Survey Mission // *Astrophys. J., Lett.* — 2005. — Vol. 619. — P. L1–L6.
19. *Brandt J. C., Heap S. R., Beaver E. A. et al.* The Goddard high resolution spectrograph: instrument, goals, and science results // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1994. — Vol. 106. — P. 890–908.
20. *Woodgate B. E., Kimble R. A., Bowers C. W. et al.* The space telescope imaging spectrograph design // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1998. — Vol. 110. — P. 1183–1204.
21. *Nordsieck K. H., Code A. D., Anderson C. M. et al.* Exploring ultraviolet astronomical polarimetry: results from the Wisconsin Ultraviolet Photo-Polarimeter Experiment (WUPPE) / Ed. by S. Fineschi: Proc. SPIE conf. — Vol. 2010. — 1994. — P. 2–11.
22. *Шустов Б. М., Боярчук А. А., Мошнеев А. А., Сачков М. Е.* Проект «Всемирная космическая обсерватория — ультрафиолет» // *Ультрафиолетовая Вселенная II* / Ред. Б. М. Шустов: Материалы всерос. науч. конф. — М.: Янус-К, 2008. — С. 7–19.

23. *Шустов Б. М.* Перспективы исследования межзвездной и межгалактической среды в УФ // *Ультрафиолетовая Вселенная* / Ред. Б. М. Шустов, Д. З. Вибе: Материалы всерос. науч. конф. — М.: ГЕОС, 2001. — С. 184—198.
24. *Шустов Б. М.* Скрытая масса во Вселенной и в Галактике // *Физика космоса: Тр. 34-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 31 янв.—4 февр. 2005 г.* — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005. — С. 207—219.
25. *Wamsteker W., Prochaska J. X., Bianchi L. et al.* The need for ultraviolet to understand the chemical evolution of the universe and cosmology // *Astrophys. Space. Sci.* — 2006. — Vol. 303. — P. 69—84.
26. *Щекинов Ю. А., Шустов Б. М., Васильев Е. О., Дедиков С. Ю.* Перемешивание металлов и скрытые барионы в межгалактической среде // *Ультрафиолетовая Вселенная II* / Ред. Б. М. Шустов: Материалы всерос. науч. конф. — М.: Янус-К, 2008. — С. 229—238.
27. *Reimers D., Fechner C., Hagen H.-J. et al.* Intergalactic HeII absorption towards QSO 1157+3143 // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 442. — P. 63—68.
28. *Dickinson M., Giavalisco M., The Goods Team.* The great observatories origins deep survey // *The mass of galaxies at low and high redshift* / Ed. by R. Bender, A. Renzini: Proc. ESO/USM Workshop. — Berlin: Springer, 2003. — P. 324.
29. *Gómez de Castro A. I., Verdugo E.* Hubble Space Telescope STIS spectrum of RW Aurigae A: evidence for an ionized beltlike structure and mass ejection in timescales of a few hours // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 597. — P. 443—454.
30. *Martín E. L., Zapatero Osorio M. R., Barrado y Navascués D. et al.* Keck NIRC observations of planetary-mass candidate members in the σ Orionis open cluster // *Astrophys. J., Lett.* — 2001. — Vol. 558. — P. L117—L121.
31. *Anderson J., King I. R., Meylan G.* HST Internal Proper Motions at the Center of the Globular Cluster 47 Tucanae // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 1998. — Vol. 30. — P. 1347.
32. *Watson A. J., Donahue T. M., Walker J. C. G.* The dynamics of a rapidly escaping atmosphere — Applications to the evolution of earth and Venus // *Icarus.* — 1981. — Vol. 48. — P. 150—166.

33. *Lecavelier des Etangs A., Vidal-Madjar A., McConnell J. C., Hébrard G.* Atmospheric escape from hot Jupiters // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 418. — P. L1–L4.
34. *Шематович В. И.* Атмосферы планет // *Ультрафиолетовая Вселенная II* / Ред. Б. М. Шустов: Материалы всерос. науч. конф. — М.: Янус-К, 2008. — С. 316–328.
35. *Gómez de Castro A. I.* Foreword // *Astrophys. Space. Sci.* — 2006. — Vol. 303. — P. 1–4.

Тезисы студенческих докладов

О. Л. Баранова

Российский государственный педагогический
университет им. А. И. Герцена

КУРС ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ «ПРАКТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ»

В настоящей работе рассматривается структура и содержание дистанционного курса «Практическая астрономия», который реализуется на базе Центра одаренных школьников «Интеллект» Ленинградской области.

Основой курса «Практическая астрономия» являются программно-аппаратная часть и учебно-методический контент.

В программно-аппаратную часть входят два телескопа системы Meade LX200 с регистрирующими устройствами DSI II Pro в автоматических башнях, соединенных с автоматическими метеостанциями, и образовательный сервер eLearning Server 2.2.

Учебно-методический контент состоит из практической и теоретической частей. Теоретическая часть, в свою очередь, состоит из двух условных блоков – программно-аппаратной и информационной.

В первый блок входит материал для теоретического и практического изучения телескопа Meade LX200 и регистрирующей аппаратуры (ПЗС-матрица DSI II Pro, LPI), а также изучения программных пакетов для управления этими устройствами и обработки изображений. Сюда же входит краткий курс «Основы теории измерений». Во второй блок входит теоретический материал собственно по астрономии, который разбит на пять тем: «Солнечная система», «Солнце», «Астрофизика», «Галактика и звезды», «Основы космологии».

В каждую тему включены собственно теоретический материал, проверочные задания, задачи, лабораторные работы и каталог изображений.

ПОИСК ФИЛАМЕНТОВ В КАТАЛОГЕ SDSS DR6

Поиск и классификация филаментов по визуальным данным (прямые, деформированные, однородные и т. д.) могут позволить сделать выводы относительно скоплений, к которым они примыкают.

Был разработан алгоритм поиска филаментов, радиально примыкающим к богатым скоплениям галактик, используя подсчеты галактик в цилиндрических объемах с направлением оси вдоль радиуса и произвольной угловой ориентацией относительно центра скопления. Были написаны программы, позволяющие в заданном объеме вокруг выбранного центра (скопления) находить направления с повышенной плотностью объектов (галактик) и оценивать распределение численной плотности объектов вдоль оси цилиндра и по расстоянию от оси цилиндра. Разработанная процедура была применена к данным спектрального обзора SDSS DR6, в объеме, ограниченном $z < 0.1$. Значения абсолютных величин вычислялись с учетом К-поправки и были взяты в соответствии с volume limited выборкой для данного z .

В наибольшей связанной области SDSS были отобраны 26 самых богатых скоплений галактик (Abell Clusters). Данная область содержит практически все богатые скопления (класс богатства по Abell около 1) с $z = 0.04\text{--}0.1$. Выборка из скоплений была весьма однородной. По рентгеновской светимости большинство (15) в очень узком диапазоне: $L_x = 0.5 - 1.5 \times 10^{44}$ эрг/с (при $H_0 = 50 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$). Для каждого из них был произведен поиск волокон в сфере радиусом 30 Мпк/h. Во всех случаях найденное число филаментов составило от двух до четырех.

Было найдено, что богатые скопления находятся в узловых точках пересечения ровно трех волокон достаточно высокой плотности (с контрастом больше или порядка 3 над средней плотностью), причем довольно часто эти волокна по угловому расстоянию равноудалены друг от друга. Но также есть случаи, когда к двум волокнам, образующим прямую линию, проходящую через скопление, примыкает третье волокно, как бы сбоку. Такая картина была получена без учета параметров волокон, а только принимая во внимание их наличие.

О ПРИРОДЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО КОНТИНУУМА СТТС КОРОЧЕ 2000 Å НА ПРИМЕРЕ ЗВЕЗДЫ Т ТАУ

Наличие у классических звезд типа Т Тельца УФ континуума короче 2000 Å с почти плоским спектром на сегодняшний день не имеет теоретического объяснения. В работе рассматриваются различные регионы формирования этого УФ континуума. Для моделирования спектра была использована программа Cloudy [1].

1. Магнитосфера. Формирование водородных линий у звезд типа Т Тельца происходит в аккреционном потоке (см. например, [2]), при этом должно возникать двухфотонное излучение водорода. Для определения вклада 2q-излучения в спектр рассмотрена сетка моделей сферически-симметричной магнитосферы.

2. Аккреционная колонка. Рассчитан спектр зоны перед фронтом ударной волны в основании аккреционной колонки. Расчет проведен аналогично работе [3], но с более корректным подсвечивающим излучением от ударной волны, взятым из расчетов [4].

3. Звездный ветер. Атмосфера аккреционного диска. Показано, что 2q-излучение, возникающее при рассеянии L_α -квантов в атмосфере диска и в ветре, недостаточно для объяснения эффекта.

Ни одна из перечисленных зон не объясняет наблюдаемый континуум. Найдены параметры такого газового слоя, излучение которого воспроизводит континуум без противоречия с наблюдаемыми линиями. Такой слой может быть интерпретирован горячими пятнами на поверхности звезды при косом падении вещества в области экватора.

Список литературы

1. *Ferland G. J.* Hazy, a Brief Introduction to Cloudy. — Univ Kentucky Dept. Phys. Astron. Int. Rep., 2007.
2. *Muzerolle J., Calvet N., Hartmann L.* // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 550. — P. 944.
3. *Calvet N., Gullbring E.* // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 509. — P. 802.
4. *Ламзин С. А.* // *Астрон. журн.* — 1998. — Т. 75. — С. 367.

**ИРКУТСКИЙ СЕГМЕНТ СИСТЕМЫ
ТЕЛЕСКОПОВ-РОБОТОВ «МАСТЕР»**

В конце августа 2008 г. в рамках проекта МАСТЕР на окраине города Иркутска, столицы Восточной Сибири, был введен в эксплуатацию очередной элемент сети роботизированных телескопов — камера сверхширокого поля зрения MASTER-VWF-Irkutsk, предназначенная для наблюдений оптических транзиентов ярче 13-й звездной величины.

В докладе обосновывается целесообразность выбора географического положения установки с точки зрения астроклиматических характеристик данной местности и специфики наблюдаемых явлений, кратко описываются техническое устройство и возможности установки. Рассматривается методика наблюдений, приводятся некоторые результаты.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АККРЕЦИИ
В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПОЛЯРАХ
В ДРЕЙФОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ**

Моделируется аккреция плазмы на белый карлик в промежуточных полярах с помощью метода независимых частиц. Учитываются градиент потенциала Роша двойной системы, сила Кориолиса, магнитное поле и собственное вращение белого карлика. Для описания движения ионов используется дрейфовое приближение. Это означает, что вместо точного уравнения движения ионов решается уравнение движения центра ларморовской окружности, что позволяет существенно ускорить расчеты. В начальный момент времени частица находится во внутренней точке Лагранжа двойной системы и имеет случайную скорость, определяемую из распределения Максвелла. В качестве примера промежуточного полюра рассмотрена система SS Cyg. Показано, что поверхности белого карлика достигают 70—80 % ионов, а остальные совершают колебательные движения вдоль магнитных линий между магнитными полюсами и медленно дрейфуют вокруг магнитного экватора. Падение ионов происходит в окрестности магнитных полюсов с характерной скоростью около 5 000 км/с. Исходя из количества упавших частиц и скорости падения, рассчитывается температура поверхности белого карлика в зоне аккреции. Поскольку она заметно превышает эффективную температуру белого карлика (37 000 К), то можно утверждать, что в окрестности северного и южного магнитных полюсов формируются горячие пятна. Доли частиц, упавших на каждый из магнитных полюсов примерно одинаковы. Поэтому интенсивности свечения горячих пятен также примерно равны.

КРИТЕРИИ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ОБЩНОСТИ МАЛЫХ ТЕЛ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МЕТЕОРНЫМ РОЯМ

Отождествление малых тел Солнечной системы с родительскими телами имеет огромное значение для изучения их эволюции и возможного сближения с Землей. Одним из способов генетического отождествления космических объектов с той или иной группой малых тел Солнечной системы являются Д-критерии. Однако основной проблемой их использования является определение величины верхнего предела как меры общего происхождения двух тел.

В работе значение верхнего предела Д-критерия исследовано для двух метеорных роев и их родительских комет. Комета Понса—Виннеке и связанный с ней рой Понс—Виннекиды относятся к планете Юпитер, комета Свифта—Туттля и ее метеорный рой Персеиды имеют размеры орбит, которые достигают окрестностей Нептуна. Показано, что малые тела, принадлежащие к группе Юпитера, не могут быть надежно отождествлены с каким-либо метеорным роем или кометой только на основе Д-критерия. В этом случае величина верхнего предела критерия скорее характеризует степень рассеивания частиц роя в пространстве. Если говорить о малых телах группы Нептуна, то в этом случае Д-критерий может найти свое применение, однако величину его верхнего предела необходимо исследовать для каждого кометно-метеорного комплекса.

На основе Д-критерия, верхний предел которого для роя Персеид был принят равным 0.11, по различным каталогам метеорных орбит исследованы средняя орбита и особенности дезинтеграции его родительской кометы Свифта—Туттля.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКАХ

Эффекты межзвездной пыли всегда присутствуют при астрономических наблюдениях, поэтому столь важно ее исследование. Однако, известны данные В. Т. Draine о распространенности дейтерия в окрестности нашей галактики, которые не согласуются с существующими теоретическими моделями разрушения пыли. Они послужили причиной проведения исследований по поиску процесса, уменьшающего эффективность разрушения межзвездной пыли.

Поэтому была построена модель, описывающая эволюцию молекулярного облака, окружающего центральную звезду и состоящего из газа и пыли. При этом учитывались силы гравитации, торможения, Кулона и радиационного переноса и такие процессы разрушения пыли, как thermal sputtering, kinetic sputtering, sublimation при различном химическом составе пылинок. Расчеты движения пылинки и изменения ее массы проводились на языке Fortran при помощи программы DVODE.

Было показано, что вклад испарения элементов в разрушение пыли при свойственных рассматриваемой задаче условиях незначителен, а при учете распыления при температурах, характерных для молекулярных облаков, пылинки разрушаются на временах порядка $10^3 - 10^5$ лет.

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ
С АТОМОМ ВОДОРОДА**

Проведен расчет энергетических характеристик адсорбции атома водорода на активном центре поверхности пылевой частицы в рамках модели молекулярного кластера с применением неэмпирических и полуэмпирических методов квантовой химии. В качестве модели пылевой частицы рассмотрен микроскопический кристалл оксида кремния SiO_2 . Для моделирования взаимодействия атома водорода с частицей рассмотрен фрагмент (кластер) поверхности оксида кремния.

Полуэмпирическими методами MNDO, PM3, AM1 и неэмпирическим методом Хартри—Фока в базисе STO-3G рассчитаны энергии верхней занятой ($E_{\text{ВЗМО}}$) и нижней вакантной ($E_{\text{НВМО}}$) молекулярных орбиталей, ширина запрещенной зоны кластера (E_g) и ее изменение в результате адсорбции атома водорода (ΔE_g), заряды на атомах H и Si, длина адсорбционной связи ($R(\text{Si-H})$) и энергия адсорбции (E_{ads}) кластера $\text{O}[\text{Si}(\text{OH})_2]_2\cdots\text{H}$. Ширина запрещенной зоны рассчитана как первая линия УФ спектра перехода электронов кластера, энергия адсорбции — как разность полной энергии кластера $\text{O}[\text{Si}(\text{OH})_2]_2\cdots\text{H}$ и исходных частиц: кластера $\text{O}[\text{Si}(\text{OH})_2]_2$ и атома водорода.

Результаты исследования колебательных частот адсорбционной связи $R(\text{Si-H})$ лежат в диапазоне $2400 \div 2800 \text{ см}^{-1}$ и дают дополнительную линию в спектре ИК-излучения, поэтому могут быть определены экспериментально. Интенсивности валентных колебаний, конечно, относительно малы по сравнению со спектром самой частицы МЗС. Однако сами частицы имеют микроскопический размер, поэтому концентрация атомарного водорода на их поверхности может быть значительной для наблюдения данной линии спектра.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 09-02-97019).

Г. Г. Млодик¹, М. В. Юшкин²,
А. А. Соболев¹, С. Ю. Горда¹

¹Уральский государственный университет,

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ОВ ЗВЕЗД В КОМПЛЕКСАХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S231—S235 И S254—S257

В сентябре 2007 г. на эшелъном спектрографе НЭС БТА САО РАН в диапазоне длин волн 5 200—6 680 Å, были получены спектры восьми ОВ звезд, образующих оптические зоны НП в комплексах звездообразования S231-S235 и S254-S257. Разрешение прибора составляло $R = 60\,000$. В работе проводилось определение лучевых скоростей. Первичная обработка проводилась в пакете MIDAS. Непосредственное определение лучевых скоростей было выполнено в пакете DECH методом совмещения прямого и зеркального профиля линии. Во всех полученных спектрах выделяются линии водорода H_α 6562 Å, гелия HeI 5875 Å и HeI 6678 Å с ширинами от 70 до 300 км/с. В четырех более горячих звездах видна линия HeII 5411 Å. В спектрах шести звезд наблюдаются более узкие линии тяжелых элементов, что позволяет определить значение скорости с большей точностью.

В спектрах ряда объектов обнаруживается влияние звездного ветра. Учет зависимости остаточной интенсивности от потенциала возбуждения для двух объектов позволил частично компенсировать влияние звездного ветра и оценить системную скорость источника с точностью до 2 км/с. Для объектов, где такая зависимость не проявляется, в качестве системной скорости звезды принималось среднее значение скорости, полученное по наблюдавшемуся набору линий. В ряде источников профили линий водорода и гелия асимметричны, и на линии, образующиеся в звездной фотосфере, накладываются эмиссионные детали, принадлежащие околос звездному газу. В таких случаях в процедуре оценки скорости не участвует ядро линии.

В результате измерений получено, что системные лучевые скорости звезд комплекса S231—S235 близки между собой. Для звезд комплекса S254—S257 обнаружено сильное различие лучевых скоростей.

Работы были частично поддержаны грантом РФФИ 07-02-00628а.

© Г. Г. Млодик, М. В. Юшкин, А. А. Соболев, С. Ю. Горда, 2009

СИМПЛЕКТИЧЕСКАЯ ГЕОМЕТРИЯ И СЖАТЫЕ СОСТОЯНИЯ

В докладе, во-первых, выводится симплектически-ковариантное многомерное соотношение неопределенности измерения координат и импульсов, аналогичное соотношению неопределенности Робертсона—Шредингера в одномерном случае и уточняющее ранее известные многомерные соотношения неопределенности. Показано, что полученное соотношение неопределенности минимизируется на сжатых состояниях (функция Вигнера имеет гауссовский профиль распределения вероятности с симплектической корреляционной матрицей). Во-вторых, на основе полученных результатов предлагается новый подход к квантовой механике линейных гамильтоновых систем, исходной точкой которого являются гауссовские функции распределения вероятности в фазовом пространстве, классическое уравнение Лиувилля и постулирование полученного выше соотношения неопределенности для состояния в начальный момент времени. Показывается, что в рассматриваемом случае описания динамики системы при помощи функции распределения или при помощи волновой функции полностью эквивалентны. В рамках этого подхода выводятся формула квантовомеханического усреднения физических величин, формула для плотности потока вероятности и уравнение Шредингера. Обсуждается выбор не зависящей от координат, но зависящей от времени фазы волновой функции. В-третьих, обсуждаются моделирующие процесс излучения света примеры динамики слабо связанных осцилляторов. Также показывается, что предлагаемому подходу к квантовой механике соответствует определенный тип упорядочения некоммутирующих операторов, не совпадающий, в частности, с предложенной Вейлем полной симметризацией. Рассмотренные свойства и примеры позволяют говорить о фундаментальном значении сжатых состояний для построения квантовой механики системы «заряженные частицы и электромагнитное поле» в дипольном нерелятивистском приближении. Статья по материалам доклада принята к печати в т. 135 журнала ЖЭТФ (2009. Вып. 3).

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПРОФИЛЕЙ ИЗГИБНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

Разработанный ранее метод кинематического проектирования профилей излучения пульсаров позволяет с большой точностью идентифицировать наблюдаемые в экспериментах профили высоко-частотного излучения пульсаров. Однако этот метод эффективно работает только для гладких по форме профилей. В то же время большое число пульсаров имеют профили с сильно изрезанной формой или с так называемой тонкой структурой. В данной работе мы показываем, что в низкочастотном диапазоне на основе нашего метода возможно также и построение профилей излучения с тонкой структурой.

С этой целью вводится еще один дополнительный параметр, который является переменным во времени, — это угол между скоростью излучающей частицы и ее ускорением. Такая ситуация вполне возможна, если предположить, что излучающие частицы сами находятся в поле излучения предшествующих частиц. Однако для практической реализации этого феномена необходимо потребовать, чтобы в излучающем сгустке частиц внешнее излучение было синхронизировано по фазе, что возможно только при наличии когерентного излучения. В связи с этим мы предполагаем, что излучение происходит в длинноволновом или радиодиапазоне, когда размеры области излучения сравнимы с длиной волны излучения. Кроме того, для наиболее полного учета всей мощности излучения проводится усреднение мгновенных индикатрис углового распределения мощности излучения по азимутальному (относительно магнитной оси) углу.

Таким образом, с учетом этого и других параметров, таких, как угол между лучом зрения и осью вращения пульсара, угол наклона магнитной оси пульсара относительно оси вращения, а также кинематических параметров — скорости и энергии (гамма-фактора) излучающих частиц и др., можно довольно точно смоделировать профили низкочастотного излучения некоторых наблюдаемых пульсаров.

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ВОЗМОЖНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ИСЗ

С появлением в последнее время быстродействующих и многопроцессорных компьютеров для исследования точности орбитальных параметров, получаемых из наблюдений, все чаще прибегают к моделированию областей возможных движений. Область возможных движений представляет собой множество точек в параметрическом пространстве, плотность которого отвечает вероятностной плотности нахождения истинных орбитальных параметров. Вероятностные области обычно строятся на основе оценок линейной задачи наименьших квадратов, поэтому их плотность асимптотически соответствует многомерному нормальному распределению. Поскольку связь между представлениями наблюдений и орбитальными параметрами, вообще говоря, нелинейна, использование оценок линейной НК-задачи для моделирования вероятностных областей будет обоснованным только в случае, если области достаточно малы, где указанная связь может хорошо представляться линейной частью ее разложения по параметрам. В ином случае оценки линейной НК-задачи будут недостоверно описывать вероятностные области.

В данной работе применительно к задачам динамики низколетящего ИСЗ рассматривается способ построения больших областей возможных движений, когда нелинейность модели проявляется существенно и ею нельзя пренебрегать. Исследуются начальные вероятностные области в зависимости от особенностей в распределении наблюдательных данных. Сравниваются результаты моделирования вероятностных областей, полученных по линейным и нелинейным оценкам.

ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ 2S3 МЕТАСТАБИЛЬНОГО УРОВНЯ НЕ НА РАЗМЕРЫ И СТРУКТУРУ ЗОН ИОНИЗАЦИИ Н И НЕ ВОКРУГ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

Относительное содержание $[\text{He}/\text{H}]$ является важным космологическим параметром. Оценки этой величины можно получить на основе исследования структуры зон ионизации Н и Не по наблюдениям рекомбинационных радиолиний. При интерпретации в расчетах ионизационной структуры обычно атом Не рассматривается как одноуровневая система, что может давать неточные результаты.

Целью нашей работы было определить влияние переходов с метастабильного уровня Не на радиусы и структуру зон ионизации для широкого диапазона условий и рассмотреть эффекты, возникающие при повышении плотности на границах зон ионизации. При этом мы рассматривали модель сферически симметричной туманности из водорода, гелия и пыли. Входными параметрами модели являлись излучение центральной звезды, распределение плотности и относительное содержание компонентов. Радиусы зон ионизации определялись из системы уравнений ионизационного баланса. В ходе работы был рассчитан ряд моделей ионизационной структуры с учетом и без учета метастабильного уровня Не.

Были получены следующие результаты. Пренебрежение наличием метастабильного уровня приводит к существенному занижению радиуса зоны ионизации Не при низких значениях эффективной температуры звезды ($T_{eff} < 40\,000\text{ K}$). Инверсия зон ионизации Н и Не в моделях без метастабильного уровня происходит при более высоких T_{eff} . Возрастание плотности на границе туманности приводит к появлению района с повышенной электронной концентрацией на границе зоны и сближению радиусов зон ионизации водорода и гелия. В моделях без метастабильного уровня размер этого района заметно занижается.

Варьирование вероятности перехода с метастабильного уровня гелия на порядок величины (расчетное значение $1.27 \cdot 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ может быть неточным) не изменяет основные выводы работы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АККРЕЦИИ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯРАХ В ДРЕЙФОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Моделируется аккреция плазмы на белый карлик в магнитных полях с помощью метода независимых частиц. Учитываются градиент потенциала Роша двойной системы, сила Кориолиса и магнитное поле. Собственное вращение белого карлика считается синхронным. Для описания движения ионов используется дрейфовое приближение, когда вместо точного уравнения движения ионов решается уравнение движения центра ларморовской окружности. В начальный момент времени частица находится во внутренней точке Лагранжа двойной системы и имеет случайную скорость, определяемую из распределения Максвелла. В качестве примера магнитного полюса рассмотрена двойная звезда AM Her. На основе проведенных расчетов сделан вывод, что до поверхности белого карлика долетают почти все ионы. Падение ионов происходит в окрестности того магнитного полюса, который находится ближе к внутренней точке Лагранжа. Характерная скорость падения ионов по порядку величины равна скорости свободного падения (примерно 5 000 км/с). Исходя из количества упавших частиц и скорости падения, рассчитывается температура поверхности белого карлика в зоне аккреции. Поскольку она заметно превышает эффективную температуру белого карлика (19 000 К), то можно утверждать, что в окрестности одного из магнитных полюсов формируется горячее пятно.

ОЦЕНКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Для научных и прикладных задач геодезии весьма актуальной является проблема использования космических навигационных систем ГЛОНАСС и NAVSTAR GPS в двухсистемных спутниковых приемниках.

В работе проанализированы результаты определений координат пунктов, полученных по измерениям: навигационных спутников только системы GPS; систем GPS и ГЛОНАСС, только системы ГЛОНАСС, системы ГЛОНАСС с использованием точных эфемерид. Были использованы данные, полученные с помощью четырех геодезических приемников Фундаментальной Геодезической Станции Веттцель (Германия). Общее количество обработанных векторов составило 990. Для обработки измерений была применена специальная коммерческая лицензионная программа Topcon Tools. Точность позиционирования при совместном использовании систем GPS и ГЛОНАСС не хуже, чем точность, получаемая только по ГНСС GPS. Привлечение точных эфемерид, полученных методом постобработки, существенно улучшает результат позиционирования. Для повышения производительности ГНСС ГЛОНАСС необходимо в настоящее время прежде всего повысить точность используемых эфемерид навигационных спутников. В России мониторингом функционирования глобальных навигационных спутниковых систем и вычислением точных орбит спутников ГЛОНАСС занимается Информационно-аналитический навигационный центр ЦУП ЦНИИ-маш (г. Королев Московской области), в котором автор проходил производственную практику с июня по сентябрь 2008 г.

Е. Р. Сафутдинов
Московский государственный университет

ЗОНДИРОВАНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЛАЗМЫ СИГНАЛАМИ РАДИОПУЛЬСАРОВ

Проведена обработка данных наблюдения пульсара b1929+10, в ходе которого использовалась 21 из тридцати 45-метровых параболических антенн телескопа GMRT.

Сеанс наблюдения был проведен с частотным разрешением 62.5 кГц в диапазоне от 325 до 341 МГц. Его длительность составила 24 мин при временном разрешении 512 мкс.

В процессе обработки получены динамический спектр пульсара и его характеристики.

Д. А. Стародубцева
Уральский государственный университет

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В МОДЕЛЯХ С НЕКОМПАКТНЫМИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Проведено исследование уравнений геодезических для решения типа черная дыра в модели Рендал—Сандрум. Решение, являясь обобщением метрики Шварцшильда, имеет структуру типа Рейсснера—Нордстрема, где вместо электрического заряда выступает «приливной заряд». В работе исследовано поведение основных параметров геодезических и показано, что данное решение не противоречит наблюдательным данным и не предсказывает появления каких-либо принципиально новых эффектов.

ФОТОМЕТРИЯ ГАЛАКТИК ТРЕХ МАССИВНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ГРУПП

Линзовидные галактики можно назвать одними из самых интересных внегалактических объектов. Изучением их структуры и взаимодействием с окружением занимаются еще с 80-х гг. прошлого столетия, но и сейчас их природа продолжает волновать ученых.

Фотометрическая обработка позволяет получить новые факты, которые смогут помочь в объяснении образования и эволюции линзовидных галактик. К тому же вместе с изучением самих линзовидных галактик в группе происходит изучение их окружения, а также взаимодействие с окружающими их группами. Откуда также можно сделать интересные выводы, много говорящие о внутренней структуре галактик.

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ БЛИЗПАРАБОЛИЧЕСКОГО КЕПЛЕРОВА ДВИЖЕНИЯ

Параболический тип орбиты в задаче двух тел является вырожденным. Сколь угодно малое изменение эксцентриситета может превратить траекторию в эллиптическую или гиперболическую. Мы рассматриваем аналог уравнения Кеплера для двусторонней окрестности параболической орбиты. Это имеет большое значение для качественного анализа в возмущенном случае. Кинематическое уравнение связывающее положение на орбите x , безразмерное время y и эксцентриситет e представлено в виде

$$y = F(x, \nu),$$

где

$$F(x, \nu) = \frac{(1 + \nu^2)x}{2\nu^2(1 - \nu^2x^2)} + \frac{1 - \nu^2}{4\nu^3} \ln \frac{1 - \nu x}{1 + \nu x},$$

$$\nu = \sqrt{\mu}, \quad \mu = \frac{e - 1}{e + 1}.$$

Здесь $x = \operatorname{tg}(\frac{\theta}{2})$, θ — истинная аномалия, $\mu = \frac{e-1}{e+1}$, e — эксцентриситет, $e = \frac{1+\mu}{1-\mu}$, $y = \frac{1}{3}\kappa p^{-3/2}(1 + e^2)(t - T)$, $\kappa = \sqrt{GM}$, p — параметр орбиты, t — время, T — момент прохождения через перицентр (эпоха перицентра), M — масса притягивающего центра, G — постоянная тяготения.

Получено решение этого уравнения в виде ряда по степеням μ . Определен радиус сходимости ряда.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ для поддержки ведущих научных школ (грант НШ–1323.2008.2), Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)» Федерального агентства по образованию Минобрнауки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09–02–00230).

ИОНИЗАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

В работе исследуется ионизационное состояние вещества в аккреционных дисках молодых звезд. Рассматриваются процессы омической диссипации и амбиполярной диффузии магнитного поля. Для этого используется одномерная МГД модель аккреционных дисков, основанная на модели стационарной дисковой аккреции Шакуры и Сюняева (1973).

Основные свойства модели: диск является геометрически тонким, но оптически толстым, остаточное крупномасштабное магнитное поле имеет полоидальную структуру. Вещество диска считается состоящим из водорода, гелия, металлов среднего космического обилия, а также молекулярного водорода, электронов и пылевых гранул.

Основные механизмы: тепловая и ударная ионизация. Тепловая ионизация действует только во внутренних областях диска. В этом случае параметры аккреционного диска мало отличаются от параметров, рассчитанных по стандартной модели.

Основные источники ударной ионизации: космические лучи, радиоактивные элементы, рентгеновские лучи. Для определения степени ударной ионизации решается стационарное уравнение ионизационного равновесия с учетом лучистой рекомбинации электронов и рекомбинации электронов на гранулах. Ударная ионизация действует в основном во внешних менее плотных областях аккреционного диска, где его эффективная полутолщина сравнима с пробегом космических лучей.

В центральных областях диска (3–10 а. е.), согласно расчетам, степень как тепловой, так и ударной ионизации мала. Поэтому здесь возможно формирование так называемой «мертвой зоны», в которой эффективно действует диффузия магнитного поля (преимущественно амбиполярная). Рассчитанная величина магнитного поля меняется здесь в пределах 0.01–1 Гс. Области со слабым магнитным полем (мертвая зона) могут рассматриваться как области вероятного образования планет-гигантов.

Работа поддержана грантом губернатора Челябинской области (011.02.05-08.АХ).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ИЗБРАННЫХ УЧАСТКОВ ЛУННОЙ ТЕРРИТОРИИ МЕТОДАМИ ОРБИТАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

Топография лунной поверхности все чаще рассматривается с точки зрения практического освоения Луны. Так, российские ученые готовят проект лунной базы промышленного назначения в юго-западной части океана Бурь. Японские исследователи планируют установить долговременную обсерваторию на Южном полюсе Луны. Специалисты НАСА облюбовали днище кратера на обратной стороне Луны для размещения большого радиотелескопа. Имеются и другие, не столь известные, но не менее значимые проекты. Определение топографических характеристик тех территорий, где планируется размещение объектов научного и технического назначения, представляет собой важную задачу. Эта работа не менее актуальна, чем подготовка площадки для строительства объектов на Земле. Как известно, такая подготовка начинается с топографии. Однако в случае лунной территории данная задача намного сложнее, так как приходится использовать дистанционные методы.

В докладе представлены результаты исследования топографии кратера Эйткен на обратной стороне Луны. В качестве исходных данных использованы орбитальные снимки, доставленные на землю советскими космическими аппаратами серии «Зонд» и экипажами кораблей «Аполлон». Оригиналы снимков представляют собой фотографические изображения, сделанные на фотопленке. Для наших работ снимки были представлены в цифровом варианте в виде графических файлов. Оцифровка снимков выполнена с применением фотограмметрического сканера, что позволило сохранить измерительные свойства исходных оригиналов. Снимки с кораблей «Аполлон» предоставлены Центром пилотируемых полетов им. Годдарда.

В настоящее время изучается топография в районе кратера Циолковский, а также в нескольких районах видимого полушария Луны. Авторы рассчитывают уточнить сведения о рельефе лунной территории на выбранных участках, а также использовать полученный опыт работы с цифровыми снимками при построении единой системы лунных координат для видимой и обратной стороны Луны.

ДИНАМИКА СВЕРХБЫСТРЫХ ЗВЕЗД (HVS) С УЧЕТОМ ТРИАКСИАЛЬНОСТИ ГАЛО И БАЛДЖА

За последние годы обнаружено около 20 звезд нового класса, которые получили название сверхбыстрых звезд (HVS), поскольку они характеризуются высокой скоростью движения $v \gtrsim 500$ км/с, что превышает третью галактическую скорость. Считается, что высокая скорость у HVS приобретается в результате распада тесной двойной вблизи массивной ЧД в галактическом центре. Имеются наблюдательные и теоретические доводы в пользу триаксиального характера распределения темной массы в гало, что влияет на закон движения HVS. Скорости и положения сверхбыстрых звезд позволяет судить о структуре темного гало, в которое погружен диск (рис. 1).

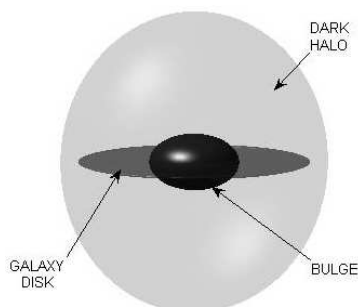


Рис. 1. Структура галактики

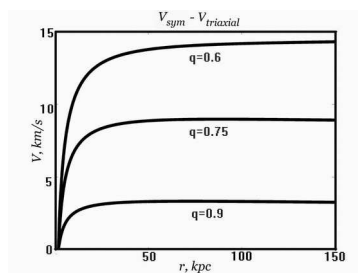


Рис. 2. Изменение скорости HVS с расстоянием при учете триаксиального балджа

В работе изучена динамика звезд в различных моделях гало (oblate, prolate, triaxial, с центральным каспом) с диском и триаксиальным балджем. Показано, что учет центральной ЧД и триаксиального балджа (с отношением осей q) может заметно влиять на динамику HVS (рис. 2). Поэтому центральные компоненты галактики (балдж и ЧД) необходимо принимать во внимание при определении пространственного распределения темной материи в окрестности галактик.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-02-01204.

Тезисы кратких сообщений

Р. А. Алексейчук, И. Г. Коваленко
Волгоградский государственный университет

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ХАРАКТЕР ТЕЧЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В работе ставится вопрос о том, какие именно механизмы ответственны в первую очередь за усиление возмущений за фронтом галактической ударной волны.

Рассматривается адиабатическая модель течения. Проведен анализ устойчивости вынужденных колебаний течения межзвездного газа в гравитационной яме спирального рукава плоской галактики при наличии ударного фронта, расположенного на передней по отношению к натекающему потоку стороне ямы. Возмущающими течение предполагаются мелкомасштабные, малой амплитуды неоднородности плотности, скорости или давления, падающие на фронт вместе с входящим потоком.

Линейный анализ устойчивости показывает, что для реалистичных профилей и глубин гравитационной ямы усиление возмущений хотя и существует, но незначительно по амплитуде.

Численные расчеты в рамках двумерного гидродинамического моделирования, проведенного ранее, подтверждают факт затухания возмущений при прохождении через область спиральной волны плотности.

Данные факты могут служить свидетельством того, что для существенного усиления возмущений за фронтом одних гидродинамических механизмов недостаточно, необходимы физические механизмы иной природы, например, эффекты неадиабатичности, а также наличия самогравитации и магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 08-02-00933-а.

О ПОИСКЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ В НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Представлен обзор результатов, полученных автором в области оценки статистической значимости периодичностей, выявляемых в наблюдательных данных [1–3]. В частности, на основе теории экстремальных значений случайных процессов удалось построить теоретические оценки статистической значимости пиков периодограммы Ломба—Скаргла [4, 5] и мультигармонических периодограмм [6]. Эти оценки имеют замкнутую форму, не требуют предварительного численного моделирования и достаточно точны на практике.

Работа поддержана Советом по грантам Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-1328.2008.2).

Список литературы

1. Балугев Р. В. О поиске периодических компонент в наблюдательных данных // Вестн. С.-Петерб. ун-та. — 2009. — Сер. 1, вып. 2. — В печати.
2. Baluev R. V. Assessing the statistical significance of periodogram peaks // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — Vol. 385. — P. 1279–1285.
3. Baluev R. V. Detecting non-sinusoidal periodocities in observational data using multi-harmonic periodograms // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2009. — Submitted. arXiv: 0811.0907.
4. Lomb N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // Astrophys. Space. Sci. — 1976. — Vol. 39. — P. 447–462.
5. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophys. J. — 1982. — Vol. 263. — P. 835–853.
6. Schwarzenberg-Czerny A. Fast and statistically optimal period search in uneven sampled observations // Astrophys. J., Lett. — 1996. — Vol. 460. — P. 107–110.

МГД-ЦЕНТРОБЕЖНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ МАГНИТНОЙ АРКАДНОЙ СТРУКТУРЫ

Центробежная неустойчивость вращательных течений сжимаемой жидкости в разрывной модели течения была открыта А. Г. Морозовым применительно к объяснению причин формирования спиральной структуры плоских галактик. Полагается, что аналогичная неустойчивость, модифицированная МГД-эффектами, будет развиваться в солнечных условиях и приводить к формированию корональных петель и магнитных аркад.

В данной работе использована достаточно простая исходная (равновесная) модель, поскольку в ее рамках, помимо численных результатов, удастся получить аналитические асимптотические решения для предельных случаев. В качестве такой модели мы предлагаем использовать тонкую цилиндрическую трубку, расположенную горизонтально над поверхностью верхней фотосферы. Внутри трубки, между ее внутренним и наружным радиусом, магнитное поле и скорость замороженного в это поле вещества азимутально, а в остальном пространстве магнитное поле направлено вдоль образующей трубки, плазма изначально покоится. Поскольку в реальной ситуации нижняя часть такой цилиндрической трубки погружена в фотосферу, где наверняка перестает быть трубкой, наше рассмотрение будет приемлемо либо для коротковолновых в азимутальном направлении возмущений, либо для осесимметричных возмущений, не имеющих азимутальной структуры.

Как показали предварительные расчеты, проведенные в рамках линейного анализа устойчивости, описанная выше изначально цилиндрическая конфигурация вращающейся замагниченной плазмы, фрагментируется на отдельные петли возмущениями, распространяющимися вдоль образующей цилиндра. Одновременно с этим под действием гибридного механизма неустойчивости Кельвина—Гельмгольца и центробежной неустойчивости эти петли увеличивают свой радиус. Описанная картина достаточно хорошо согласуется с реально наблюдаемой.

КОРОНАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ АРКАДЫ И КОРОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ

Считается, что энергетика солнечных вспышек определяется свободной энергией корональных магнитных полей (энергией их непотенциальной составляющей, ответственной за наличие электрических токов в короне). Простые петлевые вспышки затрагивают только магнитное поле отдельной корональной петли, большие протонные вспышки обычно приводят к перестройке поля всей активной области, что проявляется даже на уровне фотосферного поля. Протонные вспышки часто наблюдаются в месте изгиба фотосферной нейтральной линии, где она принимает S-образную форму и где, по-видимому, поле отличается от потенциального и имеется повышенная концентрация электрического тока.

В работе даны примеры бессилового и потенциального полей, имеющие искривленную нейтральную линию одной формы, позволяющие моделировать начальное (предвспышечное) и конечное (послевспышечное) состояния активной области. Есть пример реальных наблюдений мощных вспышек, где магнитные поля имеют похожую конфигурацию. Построена также модель поля квадрупольной активной области, содержащей сепаратор. По обе стороны от сепаратора концентрируются электрические токи, реализация энергии которых может служить основой для образования дуленточной вспышки.

При изучении петлевой вспышки обычно предполагается наличие токового слоя, возникающего на некоторой стадии развития магнитного поля, например, в результате кинк-неустойчивости. Что же касается мощных вспышек, затрагивающих всю активную область, то их детальное изучение, по сути дела, еще не начато. Считается, что здесь мы имеем дело со множеством отдельных локальных процессов магнитного пересоединения. Одним из наиболее вероятных механизмов диссипации энергии крупномасштабных электрических токов может быть развитие тиринг-неустойчивости в непотенциальных корональных полях, в результате которой образуются локальные токовые слои.

РОЛЬ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА В ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК В РАМКАХ ЗАДАЧИ N ТЕЛ

Интересный факт наблюдательной астрофизики, свидетельствующий о том, что почти во всех галактических скоплениях зарождается центральный сверхмассивный объект — cD -галактика, заслуживает серьезного внимания и требует объяснения природы этого явления в рамках некоего универсального эволюционного сценария. В данной работе в качестве запуска такого сценария привлекается хорошо известный механизм динамического трения. Согласно современным космологическим представлениям крупномасштабное распределение галактик в скоплениях определяется поведением темного вещества (DM -вещество: *Dark Matter*), которое по результатам наблюдений составляет основную ($\sim 90\%$) часть массы скопления галактик. Поэтому важно оценить его роль в формировании cD -галактики.

Методами численного моделирования в постановке задачи N -тел, с использованием модели явного описания темного вещества — « DM -модель сплошной среды» и «зеренная DM -модель» установлено: 1) низкая эффективность приливного торможения, вызванного перераспределением гравитирующей DM -материи в результате пролета единичной галактики; 2) изменение в широком диапазоне (в 50 раз) доли DM -вещества по отношению к «светящейся» массе не отражается на динамике столкновений — темп слияния галактик приблизительно сохраняется в пределах хаббловской шкалы; 3) стабильность образования за эволюционно значимый интервал времени (3–8 гига-лет) центральной сверхмассивной cD -галактики с 1–2 %-й аккумуляцией массы скопления независимо от истории случайных событий слияния галактик и от начальной плотности DM -субстрата; 4) эффект насыщения кривой роста массы cD -галактики, демонстрирующий отсутствие корреляции плотности DM -вещества и массы cD -галактики; 5) учет вращения DM -вещества замедляет столкновительную эволюцию галактического скопления; 6) DM -материя ускоряет образование cD -галактики.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧАХ ОЦЕНИВАНИЯ

В данном докладе рассматриваются ряд трудностей, возникающих при определении доверительных областей движения малых тел Солнечной системы. Это связано с тем, что весовые (корреляционные) матрицы ошибок наблюдений являются, как правило, неизвестными, а сами задачи оценивания нелинейными. В качестве объектов исследования нами были выбраны астероиды, наблюдавшиеся в одном появлении, и комета 35P Гершеля—Риголле.

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты.

1. Использование более точных весовых матриц позволяет уменьшать вероятностный разброс оценок начальных параметров и размеры доверительных областей. Приводятся примеры, когда возможен простой способ построения таких матриц, уменьшающих значительно размеры этих областей.
2. Введенная нами мера отклонения уровня поверхности целевой функции от эллипсоидальной может быть использована как характеристика степени нелинейности задачи наименьших квадратов (НК). В зависимости от ее значения делается выбор способа построения доверительной области.
3. Число известных астероидов, наблюдавшихся в одном появлении, для которых задача НК является сильно нелинейной составляет, по нашим оценкам, $1/6$ часть от общего числа астероидов.
4. Степень нелинейности задачи НК и свойств методов оценивания зависит от выбора фазового пространства начальных параметров. При построении доверительных областей движения астероидов, наблюдавшихся в одном появлении, лучшей является система декартовых переменных.

ФОТОМЕТРИЯ МТ ДРА В 2008 г.

Звезда МТ Дра относится к магнитным катаклизмическим переменным (поляркам). Это тесные двойные системы, состоящие из белого и красного карликов. Характерной особенностью главных компонентов является наличие магнитного поля величиной в десятки МГс. Поле такой напряженности не дает возможности веществу красного карлика образовывать аккреционный диск. В результате аккрецируемое вещество образует одну или две аккреционные колонки вблизи магнитных полюсов белого карлика.

В июле 2008 г. на телескопе Цейсс-600 Крымской лаборатории ГАИШ МГУ в течение 14 ночей производились фотометрические наблюдения МТ Дра в фильтре R_c системы Кузинса. В этот период времени объект находился в низком состоянии блеска ($R \sim 18^m$). За орбитальный период, составляющий 128.7 мин, на кривой блеска появляются два горба протяженностью по полпериода. Более явно выраженный горб имеет амплитуду в две звездные величины. Вторым горб от ночи к ночи меняет амплитуду и форму, иногда вообще отсутствует.

На основе наблюдений с 2005 по 2008 г. (о части из них было доложено на ЗАШ 2006 и 2007 гг.) изучена зависимость между блеском МТ Дра в первом и втором горбах в высоком и низком состояниях системы.

МЕХАНИЗМ ПОПОЛНЕНИЯ ОБОЛОЧКИ ПОЛУРАЗДЕЛЕННОЙ ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ

Рассматриваются структура и механизм образования общей оболочки полуразделенной двойной звезды. При помощи трехмерного численного моделирования газодинамики исследуется картина течения в системе после достижения стационарного режима аккреции. Показано, что пополнение внешних частей общей оболочки происходит в результате периодических выбросов вещества аккреционного диска и околодискового гало через окрестность точки L_3 .

В рассматриваемом механизме форма и положение значительной части диска определяются прецессионной волной плотности. В системе координат наблюдателя прецессионная волна (а следовательно, и большая полуось диска эллиптического аккреционного диска) на временах порядка орбитального периода будет практически неподвижной, в то время как остальные элементы течения будут менять свое положение из-за орбитального вращения системы. Периодическое изменение положения диска и отошедшей ударной волны, сформированной в результате обтекания диска внутренними частями общей оболочки, приводит к изменению темпа передачи углового момента веществу диска, а также к изменению структуры течения вблизи точки L_3 . Все это обуславливает периодическое увеличение величины потока вещества во внешние слои общей оболочки через окрестность точки L_3 . Общая продолжительность выброса составляет примерно половину орбитального периода.

ХИМИКО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЗА ВБЛИЗИ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ЗОНЫ НН

Представлена самосогласованная модель химико-динамической эволюции зоны ионизованного водорода (НН) вокруг массивной молодой звезды и окружающего ее атомарного и молекулярного газа. В модель включены все основные химические и физические процессы, в том числе реакции фотоионизации атомарного водорода и фотодиссоциации молекулярного водорода и других молекул, а также процессы испарения молекул из мантий пылевых частиц. При помощи модели рассмотрена задача о расширении зоны НН вокруг массивной звезды с эффективной температурой 30 000 и 40 000 К в среде с различными начальными распределениями плотности. Показано, что конкуренция между процессами испарения мантий и фотодиссоциации молекул приводит к формированию переходного слоя между горячей областью НН и холодной спокойной средой, для которой характерно высокое содержание молекул в газовой фазе. Толщина переходного слоя различна для различных молекул. При начальной плотности газа 10^3 см^{-3} рост содержания молекул H_2O и H_2CO в переходном слое после десорбции с пыли происходит не скачком, а постепенно, поэтому понятие «фронта испарения» можно использовать лишь формально. Кроме того, существенно расстояние между фронтами испарения различных молекул. При более высокой начальной плотности (10^4 см^{-3}) происходит образование резких фронтов испарения молекул, причем фронты находятся близко друг к другу и к ударному фронту. В этом случае можно говорить о едином фронте испарения для молекул CO , H_2O и H_2CO .

М. С. Кирсанова благодарит фонд ИНТАС за финансовую поддержку (грант YS-05-109-4862). М. С. Кирсанова и Д. З. Вибе благодарят также фонд РФФИ (грант 07-02-01031-а). А. М. Соболев благодарит фонд РФФИ (гранты 07-02-00628-а и 08-02-00933-а).

МАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ МЕТАНОЛА НА 12.178 ГГц

Мазерные источники метанола на переходе 3_1-4_0 E на 12.178 ГГц ассоциируются с зонами массивного звездообразования и наблюдаются в направлении на ярчайшие мазеры метанола на 6.7 ГГц. Источники на 12.2 ГГц являются вторыми по яркости и распространенности мазерными источниками метанола в Галактике.

В работе представлены результаты моделирования мазеров метанола на 12.2 ГГц в модели радиативно-радиативной накачки инфракрасным излучением пыли через уровни первого и второго крутильных состояний молекулы метанола. Моделировались отношения яркостных температур (потоков) мазерных источников на частотах 12.2, 6.7, 19.9, 23.1, 107 и 37 ГГц для определения наблюдательных ограничений на физические параметры среды в зоне формирования мазерного источника. Проведен анализ наиболее сильных циклов накачки в условиях возникновения ярких мазерных линий на 12.2 ГГц. Обсуждается возможность использования информации об излучении на 12.2 ГГц для оценки физических параметров среды в зоне формирования мазерного источника.

ОТКРЫТИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ИСТЕЧЕНИЯ У ПРОТОПЛАНЕТНОГО ДИСКА CB26

Биполярные истечения из молодых (формирующихся) звезд являются широко распространенным наблюдательным явлением. Есть гипотезы, что истечения играют важную роль в эволюции протопланетных дисков, окружающих молодые звезды, в частности, истечения могут быть ответственны за вынос избытка углового момента из системы. Теория этого процесса предсказывает, что газ в таких истечениях должен вращаться. Однако до сих пор не было обнаружено признаков вращения в молекулярных истечениях. Нами проведены наблюдения протопланетного диска CB26 с высоким угловым разрешением (см. рисунок) на длине волны 1.3 мм (интерферометр SMA), соответствующей излучению пыли, а также в линии CO(2-1) (интерферометр IRAM PdBI). Мы обнаружили присутствие у диска протянутого биполярного истечения, обладающего признаками вращения. Для проверки гипотезы вращения и восстановления параметров истечения построена феноменологическая модель этого объекта. По результатам сравнения наблюдательных и теоретических спектральных карт CO(2-1) показано, что модель вращающегося истечения хорошо воспроизводит спектральные особенности этого объекта.

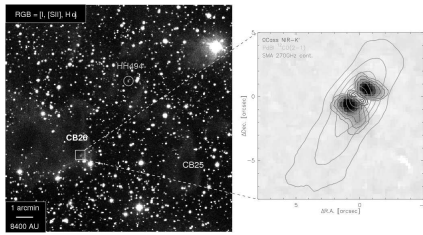


Рис. 1. Слева — оптическое изображение системы CB26 и ее окружения. Справа — композиционное изображение выделенной области в ближнем ИК, на длине волны 1.3 мм и в линии CO(2-1)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СООТНОШЕНИЯ МАССА—МЕТАЛЛИЧНОСТЬ ДЛЯ КАРЛИКОВЫХ СФЕРОИДАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК МЕСТНОЙ ГРУППЫ

В работе представлены результаты моделирования соотношения масса—металличность для карликовых сфероидальных галактик местной группы. Благодаря истечению вещества соотношение между массой и металличностью для галактик может быть немонотонным. В рамках упрощенной однозонной химико-динамической модели было показано, что металличность является убывающей функцией массы для сфероидальных карликовых галактик с полной массой $M \leq 10^8 M_\odot$ и монотонно растущей функцией в области больших масс. Это предсказание находится в согласии с наблюдениями. В работе также была исследована зависимость полученного соотношения от свободных параметров модели.

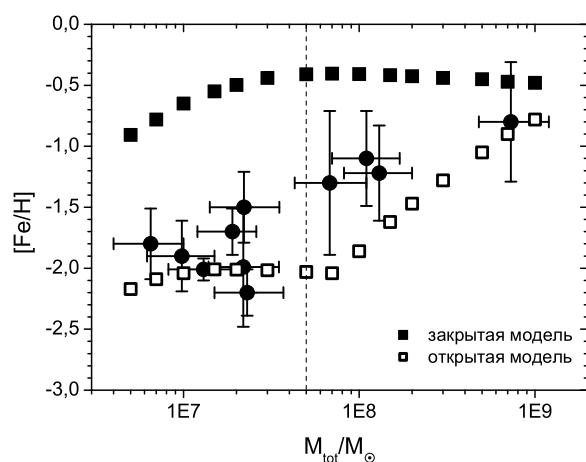


Рис. 1. Соотношение масса—металличность для открытой и закрытой моделей. Кружочки — наблюдаемое распределение масса—металличность dSph галактик Местной группы.

НОВАЯ ПОСТАНОВКА МАГНИТОГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Проблема построения равновесных конфигураций плазмы в магнитном поле играет важную роль во многих разделах астрофизики. Нередко медленную эволюцию той или иной системы также можно рассматривать как прохождение ею непрерывной последовательности равновесных состояний вследствие изменения некоторых «управляющих» параметров. Известно, что система уравнений магнитогидростатики является недоопределенной: часть функциональных зависимостей выбирается в ней произвольным образом. Для осесимметричных магнитоплазменных конфигураций в отсутствие внешних сил задача гидростатики сводится к известному уравнению Града—Шафранова, в котором зависимости газового давления и продольного электрического тока от магнитного потенциала произвольны. Обобщение уравнения Града—Шафранова на случай внешнего силового поля (например, гравитационного) возможно лишь при очень жестких ограничениях на распределение плотности (несжимаемая жидкость). Однако для систем, обладающих осевой, трансляционной или винтовой симметрией, возможна принципиально иная формулировка магнитогидростатической задачи, когда в качестве произвольно задаваемых функций выбираются магнитный потенциал и продольный ток, то есть магнитная структура здесь полностью «задается руками». Пространственные распределения для давления и плотности плазмы получаются при этом в виде готовых квадратурных формул. Показано, что новый подход к решению магнитогидростатической проблемы представляет особый интерес для моделирования предвспышечных конфигураций в солнечной плазме.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЧАСТИЦ, ВЫБРОШЕННЫХ ИЗ КОМЕТЫ ХОЛМСА

Главным астрономическим явлением 2007 г. стала мощнейшая (амплитуда более 14 зв. вел.) вспышка кометы Холмса (17P) 23.7 октября UT. Эта комета испытывала подобную вспышку и непосредственно перед открытием (4.6 ноября UT 1892 г.). Наличие в космосе вещества, выброшенного из кометы Холмса, следует учитывать при планировании миссий к астероидам Главного пояса и во внешнюю часть Солнечной системы.

Для моделирования динамической эволюции выбросов использован созданный автором комплекс программ. Основная программа интегрирует уравнения движения гравитационной задачи N тел (в инерциальной системе координат, в астрономической системе единиц) методом Эверхарта 35-го порядка и выводит результаты во внешний файл.

Моделировалось движение 1 000 частиц на 20 000 суток от вспышки 2007 г. и на 45 000 — от 1892 г. с шагом 4 суток. В качестве верхнего предела скорости задано 222 м/с для вспышки 2007 г. и 270 м/с — для 1892 г. Учитывалось гравитационное воздействие Солнца, больших планет, Луны, Цереры, Паллады, Весты, системы Плутон—Харон. Начальные данные в барицентрической системе J2000.0 взяты из сервиса «Horizons» (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>). Неточность в движении кометы не превысила 4 ч за 115 лет (по элементам 1892 г., без негравитационных эффектов).

При просмотре полученных анимаций выделены общие структурные особенности, возникающие в ходе динамической эволюции выбросов: растягивание шарового роя в эллипсоид; искривление эллипсоида; растягивание вдоль орбиты, ускоряющееся к перигелию и замедляющееся к афелию; появление выступа при сближении с Юпитером и его сглаживание вблизи перигелия; проявление возмущенной части на следующем витке в виде зигзага; формирование дуг на участках, многократно подвергавшихся возмущению (резонансные явления).

ОБОЛОЧКИ ПОЛУРАЗДЕЛЕННЫХ ПРЕДКОНТАКТНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

При помощи трехмерного численного моделирования газодинамики исследуется структура и динамика оболочек преконтактных полуразделенных двойных звезд, где струя вещества из точки L_1 сталкивается непосредственно с поверхностью акретора. Рассматривается два вида оболочек: оболочки, возникающие за счет «отскока» вещества струи от поверхности звезды, и оболочки возникающие в результате срыва вещества с поверхности быстро вращающегося акретора при развитии ротационной неустойчивости. Исследуются пространственное распределение вещества оболочек, а также распределение аккреционного потока по поверхности звезды-акретора в обоих случаях. Рассматривается применимость модели с быстровращающимся акретором в зависимости от параметров двойной звезды.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМ ИСЗ
В СФЕРЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ**

Целью данной работы являлось развитие программно-математического обеспечения для решения задач прогнозирования движения большого числа ИСЗ различных классов орбит на значительных интервалах времени. Была проведена установка программного комплекса «Численная модель движения ИСЗ» на суперкомпьютер СКИФ Cyberia.

После установки программного комплекса была проведена оценка его быстродействия в зависимости от числа используемых процессоров и количества объектов на примере 24 ИСЗ типа «Глонасс» и 200 геостационарных спутников.

Полученные результаты показывают, что время работы программного комплекса существенным образом зависит от увеличения количества процессоров. Интересно, что в первоначальной версии комплекса увеличение быстродействия имело определенный предел и, начиная с некоторого количества процессоров, быстродействие уменьшалось. Это обстоятельство объяснялось тем, что на каждом итерационном шаге метода Эверхарта каждый выделенный процессор обращался к фонду больших планет DE405, который из-за большого объема содержался в отдельном файле, что приводило к постановке в очередь выделенных процессоров на доступ к чтению файла. Эта трудность была устранена за счет загрузки фонда в оперативную память. Кроме того, была выполнена оценка эффективности использования в данном комплексе двух версий метода Эверхарта, традиционной и версии, разработанной В. А. Авдюшевым.

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НОРМАМИ СФЕРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ГЕОПОТЕНЦИАЛА

В книге [1] выведены точные оценки равномерной нормы общего члена ряда Лапласа по сферическим функциям для гравитационного потенциала планеты в зависимости от дифференциальных свойств распределения масс. На практике почти всегда используется средне-квадратичная норма. Представляет интерес перенос оценок с одной нормы на другую.

Для элементарных сферических гармоник достаточно рассмотреть присоединенные функции Лежандра P_n^k . Поскольку евклидова норма P_n^k известна, задача сводится к нахождению чебышевской нормы. Основную роль играет нижний индекс. Поэтому главная цель — установить асимптотическое поведение при $n \rightarrow \infty$. Оно оказывается различным для трех множеств изменения верхнего индекса: $k \ll n$, $k = \mathcal{O}(n)$, $n - k \ll n$.

В докладе представлены результаты исследований для случаев $k \ll n$ (точнее, $k = \mathcal{O}(n^2/3)$) и $s = n - k \ll n$ (точнее, $s = o(\sqrt{n})$). В дальнейшем предполагается применить результаты к исследованию статистических свойств моделей гравитационного поля Земли, содержащих гармоники до степени n порядка $10^2 \div 10^3$, например EGM2008.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ для поддержки ведущих научных школ (грант НШ-1323.2008.2), Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006—2008 годы)» Федерального агентства по образованию Минобрнауки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-02-00230).

Список литературы

1. Антонов В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В. Введение в теорию ньютоновского потенциала. — М.: Наука, 1988.

СОВРЕМЕННЫЕ ПАНОРАМНЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО И УФ-ДИАПАЗОНА

За последние 50 лет астрономам стали доступны наземные и вне-атмосферные телескопы, работающие в очень широком диапазоне длин волн — от гамма-волн до длинных радиоволн. Тем не менее для полного всестороннего изучения большинства астрофизических объектов и явлений по-прежнему очень востребованы высококачественные наблюдательные данные оптического, УФ и ближнего ИК диапазонов.

В настоящее время нет детектора, способного одинаково хорошо работать как в оптическом, так и в УФ-диапазоне. Для оптического диапазона предпочтительным является использование ПЗС приемников, для УФ-диапазона — МКП приемников, не чувствительных к видимому свету.

Получены первые образцы матричных детекторов на базе материалов с большой шириной запрещенной зоны (AlGaN), обладающие хорошими характеристиками в УФ-диапазоне.

Опытные образцы матричных детекторов для ИК-диапазона (HgCdTe) с засветкой с обратной стороны показывают высокий квантовый выход в оптическом и ближнем УФ-диапазоне.

КМОП-приемники представляются весьма перспективными для использования в оптическом диапазоне и для гибридных систем.

Детекторы на основе сверхпроводящих материалов представляются весьма перспективными в долгосрочной перспективе, поскольку они обладают высокой чувствительностью в УФ, оптическом и ИК диапазонах, высоким временным, пространственным разрешением и способны измерять энергию приходящих квантов.

ЭКЗОПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ: НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОРБИТ

В настоящее время (на декабрь 2008 г.) известно 263 экзопланетные системы, открытые по измерению колебаний лучевых скоростей центральных звезд. Из них 31 являются мультипланетными, то есть имеющими более одной планеты. Возможности наблюдательной техники пока позволяют обнаруживать таким методом только планеты с массами Нептуна и больше. Однако представляет интерес наличие в таких системах планет малых (порядка массы Земли) масс. Само наличие таких планет в экзопланетных системах подтверждено наблюдениями, однако эти наблюдения не позволяют с хорошей точностью оценить параметры орбит таких планет, так как выполнены по другой методике (микролинзирование).

В работе рассматривается возможность наличия устойчивых орбит планет с малой массой в системе с массивными планетами. Показаны некоторые особенности таких орбит, влияние больших наклонов и эксцентриситетов на устойчивость систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Ведущие Научные Школы (грант НШ-1323.2008.2).

Стендовые доклады

П. Э. Боли¹, А. М. Соболев¹,
А. В. Моисеев², М. В. Юшкин²

¹Уральский государственный университет,
²Специальная астрофизическая обсерватория РАН

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ МОЛОДОГО ЗВЕЗДНОГО ОБЪЕКТА S235B НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ БТА САО РАН

Представляются результаты наблюдений молодого звездного объекта и окружающей его туманности S235B. Наблюдения были проведены в режимах с длинной щелью, многощелевым блоком, эшелле-спектрометром и интерферометром Фабри—Перо на 6-м телескопе БТА САО РАН. В спектре звезды наблюдаются в эмиссии бальмеровские линии водорода и линии Fe II, а линии He I наблюдаются в поглощении. Спектральный профиль линии H $_{\alpha}$ указывает на присутствие околозвездного аккреционного диска. Сама звезда классифицируется как B1V и принадлежит к классу звезд HAeBe (Herbig Ae/Be stars). Характерные для зоны ионизованного водорода линии ([S II], [N II], [O III]) отсутствуют в спектре туманности. Линия He I 6678, которая наблюдается в поглощении у звезды, тоже видна в поглощении в спектре туманности. Таким образом, данные указывают, что природа туманности чисто отражательная, без эмиссионного компонента.

**РЕЗОНАНСНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ
ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ HD37124**

Проведен подробный анализ полной совокупности опубликованных измерений лучевой скорости звезды HD37124, обладающей системой из трех планет-гигантов. Полный массив данных включает 52 измерения, полученных на телескопе им. Кека, 58 — на спектрографе ELODIE Обсерватории Верхнего Прованса и 17 — на спектрографе CORALIE Европейской Южной Обсерватории. Статистический анализ проведен с учетом так называемого «дрожания» лучевой скорости и годовых систематических ошибок в данных [1].

Показано, что две внешние планеты этой системы могут находиться в орбитальном резонансе 2:1 или 5:2. Орбиты планет могут иметь большие эксцентриситеты (до 0.5), но система вполне может быть динамически устойчивой [2]. При этом две резонансные планеты находятся вблизи состояния апсидальной коротации. В случае резонанса 2:1 это асимметричная апсидальная коротация с углом между перицентрами орбит $\Delta\omega \approx 55^\circ$, а в случае резонанса 5:2 это симметричная апсидальная коротация с $\Delta\omega = 180^\circ$. Устойчивость сохраняется благодаря резонансу и апсидальной коротации, которые предохраняют планеты от слишком тесных сближений.

Работа поддержана Советом по грантам Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-1328.2008.2).

Список литературы

1. *Baluev R. V.* Resonances of low orders in the planetary system of HD37124 // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2008.
2. *Baluev R. V.* Accounting for velocity jitter in planet search surveys // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Accepted. arXiv: 0712.3862.

НОВЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ОГРАНИЧЕННОЙ КРУГОВОЙ ЗАДАЧИ ТРЕХ ТЕЛ

Ограниченная задача трех тел, несмотря на все введенные ограничения, находит широкое применение в задачах динамической астрономии. Решение ограниченной задачи трех тел позволяет описать движение космического аппарата в силовых полях, созданных двумя небесными телами, например Землей и Луной, или движение звезды в поле двух галактик.

В данной работе предлагается новый метод численного решения этой задачи (Олемской И. В., 2005). По сути, он является модификацией известного метода Рунге—Кутты. Однако этот метод обладает рядом достоинств, которые позволят значительно сократить объем используемых для вычисления ресурсов.

Известно, что основное время при численном интегрировании систем обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) занимают вычисления ее правых частей, которые могут быть достаточно сложными. Ускорение расчетов, таким образом, зависит от возможности уменьшения количества вычисления правых частей на исследуемом участке. Структурный метод использует структурные особенности СОДУ на каждом этапе вычисления, то есть на уровне алгоритма, уменьшая, таким образом, время, затрачиваемое на вычисление правой части. Например, широко применяемый классический метод Рунге—Кутты четвертого порядка для СОДУ требует на каждом шаге интегрирования четырех вычислений правых частей. Структурный метод того же порядка требует всего лишь трех вычислений правых частей на каждом шаге.

Принципиальное отличие структурного метода от классической схемы метода Рунге—Кутты заключается в том, что вся информация о значениях корректирующих функций, полученных на некотором этапе, по мере получения сразу используется в вычислительном процессе.

В. И. Захаров, К. Г. Грибанов, С. А. Береснев,
А. А. Калинин, А. И. Шагабутдинов
Уральский государственный университет

ФУРЬЕ-СТАНЦИЯ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ АТМОСФЕРЫ И СОЛНЦА В КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

В 2009 г. в Коуровской астрономической обсерватории УрГУ вводится в строй современная автоматизированная Фурье-станция для измерения спектров солнечного излучения, прошедшего атмосферу. Основу станции составляет Фурье-спектрометр Bruker IFS-125M, сопряженный с солнечным трекером. Данная Фурье-станция позволяет регистрировать спектры во всем инфракрасном и видимом диапазонах ($600\text{--}25\,000\text{ см}^{-1}$) с высоким спектральным разрешением (0.0035 см^{-1}) и предназначена для решения следующих задач:

- измерения пропускания атмосферой солнечного излучения и накопления временных рядов по вариациям оптически активных газовых и аэрозольных составляющих в атмосфере;
- валидации спутниковых данных мониторинга за содержанием ключевых парниковых газов в атмосфере;
- атмосферной коррекции данных астрономических спектральных измерений;
- анализа особенностей спектра различных участков солнечного диска.

Наличие современной Фурье-станции и станции сети AERONET в Уральском регионе предоставляет мировому научному сообществу уникальную возможность изучать источники и стоки парниковых газов в экосистемах Западной Сибири и взаимосвязь региональных и глобальных проблем изменения окружающей среды и климата Евразийского континента. Для УрГУ это открывает перспективу долгосрочного международного научно-технического сотрудничества, участия в международных спутниковых программах по парниковым газам в атмосфере и глобальным изменениям климата, а также в программах повышения качества экологического образования студентов с использованием международного опыта в сфере инноваций и высоких технологий.

**НАБЛЮДЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ
НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ КОУРОВСКОЙ
АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В 2008 г.**

В 2008 г. на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории УрГУ проводились наблюдения низкоорбитальных космических объектов. Телескоп СБГ системы Шмидта с зеркалом диаметром 500 мм и фокусным расстоянием 780 мм оснащен ПЗС-камерой Alta U32 ($1\,472 \times 2\,184$ элементов). Размер поля зрения системы составляет $40' \times 60'$.

Выполнялись наблюдения спутников, движущихся на высотах от 600 до 1 000 км по солнечно-синхронным орбитам. Для отслеживания объектов использовались возможности четырехосной монтировки телескопа СБГ. Выполнена модернизация программного обеспечения, вычисляющего рабочие эфемериды и управляющего работой телескопа. На основе эфемерид для каждого прохождения спутника определялся полюс его орбиты, в который наводилась полярная ось телескопа. Затем вычислялись установки, задающие режимы работы шаговых двигателей третьей и четвертой осей телескопа, для отслеживания движения объекта вдоль траектории. Во время наблюдений использовалась возможность автоматического или ручного запуска программы отслеживания объекта телескопом. При слежении за объектом наблюдатель имел возможность корректировать движение телескопа и выдавать команды начала экспозиции.

Быстрое, до нескольких градусов в секунду, движение объекта среди звезд приводит к тому, что в кадре удается зафиксировать лишь небольшое количество (редко более 10) ярких звезд. В ходе экспериментальной отработки была установлена оптимальная длительность экспозиции — 0.21 с.

Для астрометрической обработки ПЗС-кадров разработан программный комплекс FitsSBG_LEO. Внутренняя ошибка астрометрической редукции комплекса не превышает $5''$.

По результатам наблюдений для нескольких объектов построены предварительные и улучшенные орбиты. Точность прогнозирования движения на основе улучшенных элементов орбит достаточна для вычисления эфемерид на интервале несколько суток.

П. Е. Захарова, Д. В. Гламазда,
Г. Т. Кайзер, Э. Д. Кузнецов
Астрономическая обсерватория УрГУ

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В 2008 г.

На телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории с помощью ПЗС-камеры Alta U32 (матрица 2184×1472 элементов размером 6.8×6.8 мкм) проведено 7 сеансов позиционных наблюдений геосинхронных спутников. Определено более 2000 положений для более чем 150 объектов.

Астрометрическая обработка наблюдений выполнена с помощью программного комплекса Fits_SBG, разработанного в АО УрГУ. Среднеквадратические ошибки определения координат спутников не превышают $1''$.

Для 53 спутников построено 96 улучшенных орбит. Разности О—С сферических координат спутников не превышают $3''$.

Для шести объектов, наблюдавшихся в две эпохи, разнесенные по времени на 14–28 суток, в результате улучшения орбит получены оценки среднеквадратических ошибок единицы веса разностей О—С. Ошибки лежат в интервале $0.54\text{--}0.92''$.

Результаты численного моделирования показали, что полученные улучшенные элементы орбит могут использоваться для прогнозирования движения геосинхронных спутников на интервале времени несколько лет с точностью, достаточной для задачи эфемеридного обеспечения наблюдений этих спутников на телескопе СБГ.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)»).

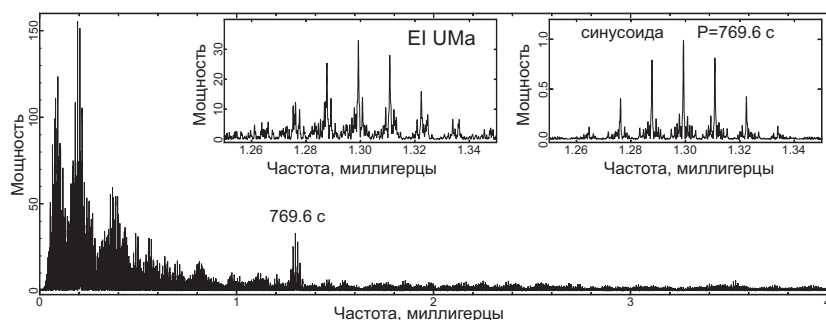
**ОБРАЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ВОКРУГ
МОЛОДОЙ МАССИВНОЙ ЗВЕЗДЫ**

В докладе рассмотрены условия образования и профили спектральных линий излучения ионизованного и атомарного углерода (C^+ и C), а также молекул CO и H_2CO вокруг молодой массивной звезды. Основная цель работы — поиск линий, которые возникают в газе, возмущенном вследствие расширения зоны НП. Эти линии — трассеры физических условий — несут информацию о процессах вблизи ударного фронта, фронта ионизации и диссоциации молекул, а также фронта испарения молекул с поверхности пыли. Показано, что по мере расширения зоны НП и в зависимости от физических параметров околозвездной оболочки и характеристик звезды трассерами могут являться как линии C^+ , так и молекулярные линии.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (грант 07-02-01031-а).

ОБНАРУЖЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ КОЛЕБАНИЙ БЛЕСКА С ПЕРИОДОМ 769.6 СЕКУНДЫ В КАТАКЛИЗМИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ EI UMa

Хотя EI UMa известна уже больше двадцати лет, только в 2005 г. по наблюдениям в рентгене в этой звезде были обнаружены периодические колебания с периодом 741.6 с и было высказано предположение, что она является промежуточным поляраром. Однако рентгеновские наблюдения были непродолжительными и найденные колебания в действительности могли оказаться квазипериодическими. Поэтому оснований для такого предположения было недостаточно. Чтобы обнаружить соответствующие колебания в оптике, мы провели наблюдения EI UMa на 70-см телескопе в течение 13 ночей. Анализ этих наблюдений позволил обнаружить когерентные колебания блеска с периодом 769.6 с. Соответствующие спектры мощности приведены на рисунке. Оказалось, что частота обнаруженных колебаний отличается от частоты рентгеновских колебаний на величину частоты орбитального периода, который равен 6.434 ч. Найденные нами колебания представляют собой рентгеновские колебания, переизлученные поверхностью вторичного компонента двойной системы. Таким образом, не только обнаружение когерентных колебаний с коротким периодом, но и определенное соотношение их частоты с частотой рентгеновских колебаний, следующее из наших наблюдений, убедительно доказывает принадлежность EI UMa к промежуточным полярарам.



**ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ЗАТМЕННОЙ
ПЕРЕМЕННОЙ МАЛОМАССИВНОЙ
СИСТЕМЫ CM DRA**

Получены новые фотометрические наблюдения холодной карликовой затменной системы CM Dra. Наблюдения были проведены в течение 15 ночей в апреле и мае 2005 г. (всего 76 ч) на многоканальном фотометре 70-см телескопа АО УрГУ. Построенная кривая блеска системы показала наличие вращательной модуляции блеска с малой амплитудой 0.016^m , которая объясняется наличием на звезде темных холодных пятен, аналогичных солнечным. Аппроксимация этой модуляции первыми двумя гармониками ряда Фурье позволила определить долготу максимума запытенности, которая соответствует орбитальной фазе 0.73. Сравнение с параметрами вращательной модуляции, определенными для четырех других эпох, по нашим наблюдениям 1996 и 1997 гг., а также наблюдениям Лейси (Lacy, 1977), отдаленных на 30 лет, обнаружило существенное смещение запытенных областей по долготе со временем. В течение двух сезонов (в 1996 и 1997 гг.) пятна располагались вблизи линии, соединяющей центры компонентов, а в два других сезона (в 1976 и 2005 гг.) — практически перпендикулярно к ней. Система считается синхронизованной, поэтому эти изменения должны быть связаны с реальным изменением долготы пятен. Следовательно, можно предположить, что на CM Dra существуют две выделенные активные долготы, подобные тем, что наблюдаются во многих системах типа RS CVn. Кроме того, следует отметить общее понижение вспышечной активности CM Dra: в отличие от сезонов 1996—1997 гг., когда был зарегистрирован темп вспышечной активности 0.017 всп./ч с энергией вспышек до 10^{32} эрг, в 2005 г. ни одной вспышки обнаружено не было, что свидетельствует о возможной цикличности активности CM Dra.

Э. Д. Кузнецов, Г. Т. Кайзер,
Д. В. Гламазда, Ю. З. Вибе
Астрономическая обсерватория УрГУ

**РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ИЗБРАННЫХ
ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ НА ТЕЛЕСКОПЕ
СБГ КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ**

В 2008 г. в Коуровской обсерватории продолжались ПЗС-наблюдения избранных геосинхронных спутников, представляющих интерес для изучения стохастических свойств движения в геосинхронной области. Наблюдения проводились на телескопе СБГ ($F = 790$ мм, $D = 420$ мм) с ПЗС-камерой Alta U32 фирмы Arcee в качестве светоприемника. Каждый сеанс наблюдений состоял из нескольких серий по 7–10 снимков в каждой серии. В течение 16 наблюдательных ночей было получено 2240 снимков десяти ГСС (67026A, 84035A, 95063A, 90102A, 89081A, 79105A, 86044A, 92017A, 79105A, 86044F). Астрометрическая обработка наблюдений выполнялась с использованием программ APX II и IZMCCD (ГАО РАН) и каталогов TYCHO 2 и UCAC 2. В результате определены экваториальные топоцентрические координаты ГСС на 1178 моментов времени. Средняя квадратическая ошибка одного положения в серии не превышает $0.7''$, более половины положений имеют ошибку меньше $0.5''$. По результатам наблюдений определены элементы орбит ГСС.

Полученные результаты будут использоваться для исследования долгопериодической эволюции элементов орбит наблюдавшихся объектов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (грант 06–02–16201).

НАБЛЮДЕНИЯ ЧАСТНЫХ ФАЗ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 01.08.2008 В АО УрГУ

В АО УрГУ во время частичного солнечного затмения (макс. фаза 0.829) проведены фотографические наблюдения частных фаз с целью определения моментов начала и конца затмения. Наблюдения проведены на солнечном телескопе АЦУ-5 в фокусе Кассегрена ($F = 60$ м, диаметр изображения Солнца на экране 560 мм). Использовался фотоаппарат Nikon D80, объектив Sigma AF 70–300 мм, f/4-5.6 АРО MACRO.

Частные фазы фотографировались с экспозицией 1/800 с, с интервалом между экспозициями 4–20 с. Время фиксировалось с точностью до 1 с. На полученных фотографиях были определены координаты центров солнечного и лунного дисков. Затем по составленной программе были вычислены величины сегментов перекрытия этих дисков. Полученные графики зависимостей «время — ширина сегмента перекрытия» были аппроксимированы полиномами третьей степени. Моменты 1-го и 4-го контактов были найдены из условия равенства нулю ширины сегмента перекрытия. Точность определения этих моментов времени, оцененная по статистике Стьюдента ($k = 95\%$), равна ± 36 с.

В результате для АО УрГУ было вычислено время 1-го контакта $T1 = 9h\ 20m\ 13s$ UT и время последнего контакта $T4 = 11h\ 33m\ 34s$ UT. Из сравнения с приведенными в справочных изданиях значениями для Екатеринбурга (О. С. Угольников в кн. «Небо начала XXI века»), получено, что начало и конец затмения наблюдались в АО УрГУ несколько раньше, чем в Екатеринбурге ($\Delta T1 = 1\ \text{мин}\ 02 \pm 37\ \text{с}$ ($\Delta T4 = 1\ \text{мин}\ 03 \pm 37\ \text{с}$). Частично это можно объяснить различием координат АО УрГУ (широта $57^\circ 02'$, долгота $3^h\ 58^m$) и Екатеринбурга (широта $56^\circ 50'$, долгота $4^h\ 03^m$).

ПРОБЛЕМА ОРБИТАЛЬНОГО МОМЕНТА

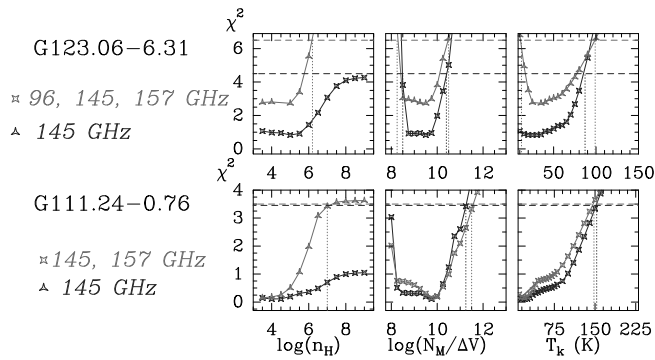
Общеизвестно, что имеются трудности при интерпретации орбитальных моментов, если их объединять с вращательными моментами отдельных космических тел. Предлагается возможный вариант явления, чтобы обойти эти трудности. Представим мысленный эксперимент: имеется вращающийся диск с угловой скоростью W вокруг оси, перпендикулярной к плоскости диска и проходящей через его центр инерции. Выделим из этого диска два диска меньшего размера, расположенных симметрично по диаметру начального диска и продолжающих вращаться с той же угловой скоростью. Диски удерживаются между собой с помощью какой-либо связи. Когда связь разрушается, центробежная сила инерции исчезает и центры масс дисков начинают двигаться прямолинейно и равномерно со скоростью $V = W \times R$, где R — радиус диска. Кроме того, диски продолжают вращаться с той же угловой скоростью вокруг собственных центров масс.

Представим теперь на месте дисков тяготеющие массы, также вращающиеся вокруг общего центра масс. При разрыве связи через посредство освобождения внутренней энергии происходит взаимное удаление этих масс друг от друга с одновременным вращением вокруг центра масс обоих тел. При разрыве связи массы продолжают вращаться и вокруг собственных осей, проходящих через центры масс тел. В зависимости от величины освободившейся внутренней энергии тела удаляются друг от друга на определенное расстояние, и в зависимости от тангенциальной скорости центров масс будет сформирована соответствующая орбита. Таков возможный вариант выхода на орбиту и соответственно приобретения орбитального момента в результате деления начального вращающегося тела. На формирование орбитального момента тратится внутренняя энергия первоначального тела, а вращательный момент передается через сохранение угловой скорости. Поэтому суммировать орбитальные моменты с вращательными, чтобы получить общий вращательный момент первоначального тела, некорректно.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЕРИИ ЛИНИЙ МЕТАНОЛА НА ЧАСТОТЕ ~ 145 ГГц

В июне 2006 г. на 12-метровом телескопе Аризонской Радио обсерватории (США) проведены наблюдения шести областей образования массивных звезд (G34.24+0.13, G34.26+0.15, G111.24-0.76, G123.06-6.31, G85.40-0.00 и G108.75-0.96) в излучении молекулы метанола на частоте ~ 145 ГГц. Из восьми линий серии ~ 145 ГГц во всех источниках превышают уровень 3σ одиночные линии: 145.093 ГГц 3_0-2_0E , 145.097 ГГц $3_{-1}-2_{-1}E$ и 145.103 ГГц $3_0-2_0A^+$.

По излучению в линиях серии на ~ 145 ГГц оценены физические параметры рассматриваемых объектов с использованием базы значений населенностей уровней метанола, полученной в приближении большого градиента скорости. Для четырех объектов оценены верхние границы удельной лучевой концентрации метанола, для трех из них оценены также верхние границы кинетической температуры газа (доверительный интервал 68 %). Объекты G111.24-0.76 и G123.06-6.31 наблюдались также в других сериях линий. Выявлено, что значения физических параметров, полученные только по серии линий на ~ 145 , близки к значениям, оцененным по всем наблюдавшимся линиям (см. рисунок).



Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ 07-0200628-а.

© С. В. Салий, А. М. Соболев, 2009

А. М. Соболев¹, А. П. Цивилёв², Г. Т. Смирнов²,
С. Ю. Ниязгулова¹, С. Ю. Парфёнов¹
¹Уральский государственный университет,
²ПРАО АКЦ ФИАН

НАБЛЮДЕНИЯ ВОДЯНЫХ МАЗЕРОВ В ОКРЕСТНОСТЯХ G173 НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТ-22 ФИАН

В июне 2008 г. на радиотелескопе РТ-22 ФИАН были проведены наблюдения мазерной линии водяного пара в окрестностях крупномасштабного структурного образования G173, имеющего вид гантелеобразного ионизованного пузыря размером $3^\circ \times 8^\circ$, находящегося в спиральном рукаве Персея. Наблюдения проводились в направлениях на точечные источники каталога IRAS. Отбор источников проводился по двум критериям: 1) новому критерию, основанному на присутствии образующихся скоплений звезд, обнаруживаемых по изображениям обзора 2MASS (23 источника), и 2) известному ранее критерию соотношения плотностей потоков на длинах волн 12, 25, 60 и 100 мкм по данным обзора IRAS (12 источников). Суммарный список включал 27 источников. В 5 из 8 источников, удовлетворяющих обоим критериям, было обнаружено мазерное излучение. При этом в одном из источников излучение в мазерной линии водяного пара обнаружено впервые. Из 15 источников, удовлетворяющих только критерию связи со скоплениями, мазерное излучение зарегистрировано в трех. Из четырех источников, удовлетворяющих только цветовому критерию, мазерное излучение зарегистрировано в одном. Результаты показывают высокий процент обнаружения мазеров при удовлетворении обоих использованных критериев, важность нового критерия связи со скоплениями, а также высокую эффективность РТ-22 для задач поиска водяных мазеров: несмотря на то что РТ-22 по эффективной площади значительно уступает зарубежным радиотелескопам, использованным для предыдущих поисков, проведенный обзор позволил не только обнаружить все известные ранее мазерные источники, но и обнаружить новый.

Работа поддержана грантами РФФИ 07-02-00628-а и 08-02-00933-а.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В МАЗЕРНОЙ ЛИНИИ МЕТАНОЛА НА 12 ГГц В ГАЛАКТИКЕ

На основе обзора 165 источников, проведенного в 2007 г. на радиотелескопе HartRAO (Республика Южная Африка), исследуется распределение источников излучения в мазерной линии метанола на 12 ГГц в плоскости Галактики. В этом обзоре зарегистрировано излучение от 67 источников, из них в 17 — в первый раз. Для определения положений мазеров использованы кинематические оценки расстояния.

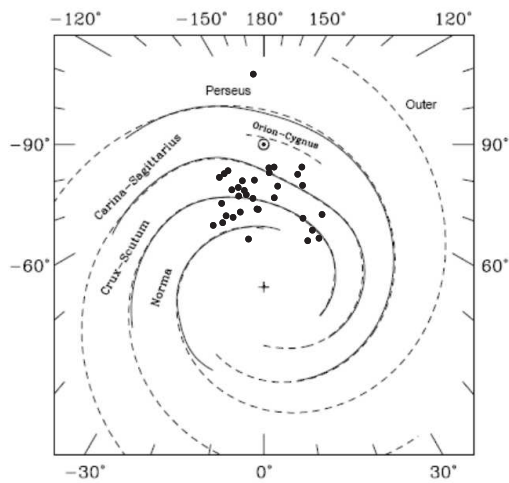


Рис. 1. Положение вновь обнаруженных мазеров на 12.2 ГГц в плоскости Галактики. Спиральная структура приведена в соответствие с Cordes, Lazio, <http://de.arxiv.org/abs/astro-ph/0207156v3>

Работа поддержана грантами РФФИ 07-02-00628-а и 08-02-00933-а.

© О. В. Шелемей, А. Б. Островский, М. J. Gaylard, А. М. Соболев, 2009

СКОПЛЕНИЕ АККРЕЦИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В РАЙОНЕ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S235A-B-C

В январе — феврале 2008 г. на 6-метровом телескопе БТА САО РАН с использованием интерферометра Фабри—Перо были проведены наблюдения двух площадок диаметром 6 угловых минут в области S235A-B-C. Наблюдения линии H_α позволили обнаружить скопление неизвестных ранее аккрецирующих объектов. В частности, обнаружена звезда с очень широкой эмиссией в водородной линии H_α . Ширина линии превышает 500 км/с, что свидетельствует о высоком темпе аккреции, $> 10^{-6} M_\odot/\text{год}$. Это на два порядка выше значений, характерных для аккрецирующих молодых звезд типа Т Тау.

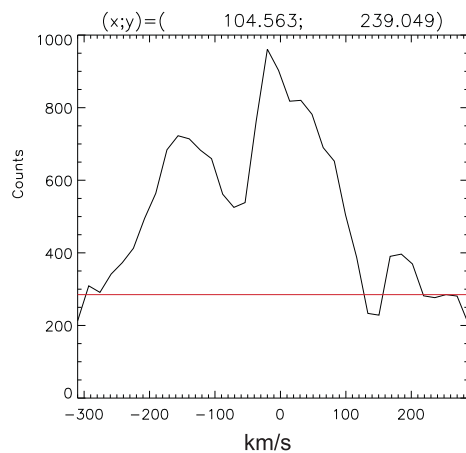
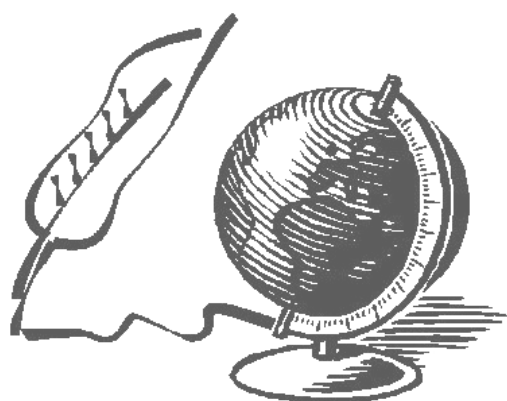


Рис. 1. Пример спектра аккрецирующей звезды, полученного на интерферометре Фабри—Перо в линии H_α

Из истории науки



Г. А. ФЕДОСЕЕВ — ГЕОДЕЗИСТ И ПИСАТЕЛЬ
(к 110-летию со дня рождения)

Карта... как просто на нее смотреть
и как не просто, порою мучительно трудно,
создавать ее!

Г. А. Федосеев

В этом году исполнилось 110 лет со дня рождения известного геодезиста и писателя Григория Анисимовича Федосеева. В его биографии удивительным образом сплелись воедино две линии жизни — геодезическая трудовая и творческая литературная, которые воплотились в его книгах, изданных миллионными тиражами в нашей стране и за рубежом.

Григорий Федосеев родился в 1899 г. в станице Кардоникской Ставропольского края. С раннего детства его окружали отроги Кавказских гор; в горы он убегал тайком от мамы и бабушки, чтобы половить рыбу в горном ручье, поохотиться, полюбоваться звездным небом, встретить рассвет. Горы станут для него на всю жизнь большой любовью и привязанностью, но его сердце покорит не Кавказ, а труднодоступный, далекий и потрясающе красивый Восточный Саян.

Свою трудовую деятельность Г. Федосеев начал техником-геодезистом на курорте Теберда. В 1925—1933 гг. он работал топографом, начальником топографической партии, принимал участие в топографических съемках Главного Кавказского хребта, Криворожского угольного бассейна. С 1934 г. Григорий Анисимович выполнял полевые геодезические работы в Забайкалье, а с 1937 г. стал работать в Новосибирском АГП (предприятие № 8). В 1938 г. Г. Федосеев, возглавляя геодезическую полевую партию, получил задание проникнуть в центральную, неисследованную и труднодоступную часть Восточных Саян с целью отрекогносцировать и закрепить пункты триангуляции 1 класса. Это был тяжелый поход, в котором погиб один из его участников. В последующие годы Г. Федосеев руководил топографическими работами по проложению триангуляционных рядов и нивелирных полигонов в бассейнах рек Ангары, Средней и

Нижней Тунгуски, исследовал Яблоновый и Становой хребты, побережье Охотского моря, Джугджурский хребет. Кроме того, Г. Федосеев принимал самое активное участие в создании топографических карт районов Братской, Усть-Илимской, Богучанской и Зейской ГЭС, а также трассы БАМа.

В 1948 г. Г. Федосеев после окончания Новосибирского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии был назначен начальником Нижне-Амурской геодезической экспедиции, которая располагалась в то время в городе Свободный Амурской области, а с 1950 г. — в городе Зее, в южном предгорье Станового хребта. Экспедиция выполняла работы по прокладыванию рядов триангуляции 1 класса, линий нивелирования различных классов в Амурской области, на севере Хабаровского края, в юго-восточных районах Якутии, в районах Яблонового и Станового хребтов по рекам Зее, Селемдже, Алдану, Мае, Уде и их притокам. Экспедиция завершила свои работы на побережье Охотского моря и Шантарских островах. Выход экспедиции к Тихому океану совпал по времени с завершением работ по созданию и развитию главной государственной плановой основы и созданию на этой базе топографических карт масштаба 1:100 000 на всю территорию страны. В 1956 г. Г. Федосеев выходит на пенсию по состоянию здоровья, переезжает в Краснодар и становится профессиональным писателем.

В 1950 г. в журнале «Сибирские огни» были опубликованы рассказы Г. Федосеева «Таежные встречи», а в 1951 г. в этом же журнале появилась его повесть «Мы идем по Восточному Саяну». В этих произведениях была правдиво показана мужественная, полная тяжелых испытаний жизнь и работа первопроходцев-геодезистов, спутников и товарищей писателя по ликвидации «белых пятен» на карте нашей страны. Появление этих первых литературных произведений вызвало небывалый интерес к творчеству Г. Федосеева. Начиная с 60-х гг. XX в. молодежь, да и вся читающая публика бывшего СССР, среди которой были геодезисты, астрономы, геофизики и прочий люд, с нетерпением ждали выхода новых работ Г. Федосеева. Читатели полюбили героев Федосеева, вместе с ними переживали все трудности их геодезической жизни, судьбы. Этот книжный бум можно было бы сравнить в то время лишь с обсуждением новостей космонавтики и с любовью к творчеству Владимира Высоцкого.

Сегодня радуется, что вновь появляется интерес к творчеству Г. Федосеева, к его жизненному пути, мужеству, неординарности, таланту, уникальным человеческим качествам. Осенью 2008 г. на доске

объявлений кафедры астрономии и геодезии УрГУ появилось сообщение студенческого научного общества, которое гласило, что все желающие приглашаются на просмотр фильма «Злой дух Ямбуя» по повести Г. Федосеева. Это было так неожиданно и так радостно за ребят, что они познакомятся с настоящим творчеством, которое обязательно найдет отклик в их сердцах. Думается, что после этого просмотра ребята прочтут все произведения, которыми в свое время зачитывались их преподаватели, сопереживали, восхищались мужеством федосеевских героев.

Семьдесят лет тому назад геодезические экспедиции, партии не были снабжены вездеходами, вертолетами, не проводилась сплошная аэрофотосъемка. Теодолит, кипрегель, планшет, штатив, рейка, да собственный жизненный опыт, острый глазомер, умелые руки, неустанные ноги первопроходца, рюкзак за плечами — вот, пожалуй, и все, чем создавалась государственная геодезическая сеть страны.

В своей едва ли не самой значительной книге «Смерть меня подождет» Г. Федосеев признается: «Труд исследователя всегда был тяжелым испытанием. Ему я посвятил всю свою жизнь. Но я не подозревал, что написать книгу куда труднее. Порою меня охватывало разочарование, я готов был бросить свою работу, и только долг перед своими мужественными спутниками заставлял меня снова и снова браться за перо». А их, этих действительно мужественных спутников, ставших затем героями его литературных произведений, было у Г. Федосеева много. Назовем некоторых из них, таких, как Василий Мищенко, Трофим Пугачев, Кирилл Лебедев и другие. В предисловии к первому изданию повести «Смерть меня подождет» Мариэтта Шагинян отмечает главную особенность произведений Г. Федосеева: «свойство вовлечения в свой мир, свойство, надо сказать, очень редкое и драгоценное у рассказчика», заставляющего читателя «незаметно впитывать одну идею, вернее — одно яркое ощущение, ощущение нравственной силы человека, нравственной закалки его при долгой жизни лицом к лицу с суровой и подчас грозной природой».

Действие этой повести разворачивается вокруг непродолжительной, но очень трудной, «ломаной» жизни и трагической гибели топографа Трофима Королева — бывшего беспризорника и «правонарушителя». Автор — начальник геодезической партии — сумел вытащить его из преступной среды, научить своему делу. Экспедиция по спасению Т. Королева проходила в сложных условиях с опасностью для жизни самих спасателей. Федосеев пишет: «Всех нас, участников похода, спаивала большая человеческая дружба. В тяжелые минуты,

когда люди оказывались перед лицом смерти, казалось, не оставалось надежды на спасение, каждый думал не о себе, а о своем долге перед товарищами, и, пожалуй, только это помогло нам, хотя с большими жертвами, добиться успеха».

В литературных произведениях Г. Федосеева, да и в самой жизни писателя есть еще один, пожалуй самый главный, герой, в образе которого наиболее ярко воплощены и выражены самые светлые свойства человеческого характера, которые писатель ставил превыше всего в жизни и в людях. Он создал незабываемый образ старика-проводника Улукиткана — один из лучших образов советской литературы. В истории геодезических экспедиций по картографированию малоисследованных районов Сибири и Дальнего Востока проводник-эвенк Улукиткан занял такое место и сыграл такую роль, что Г. Федосеев считал своим человеческим долгом не только литературно, но и зримо увековечить его имя и образ. На высоком берегу бурной полноводной Зеи, через которую они не раз вместе переправлялись и вплавь, и вброд, близ эвенкийского селения Бамнак и Зейской ГЭС, Г. Федосеев собственноручно соорудил на могиле Улукиткана памятник — железобетонный четырехгранный тур, возможно, единственный в мире памятник такого рода. На гранях высечены трогательные и благодарные слова: «С тобой, Улукиткан, геодезисты и топографы штурмовали последние белые пятна на карте нашей Родины», а на чугунной плите отлито одно из изречений эвенка: «Мать дает жизнь, годы — мудрость...» Однако сам Г. Федосеев считал, что у него не хватило способностей изобразить этого человека со всей полнотой.

Литературные произведения Г. Федосеева во многом автобиографичны, они вводят читателя в мир тайги и гор, бурных рек и топей, где землепроходцы, изыскатели-геодезисты, следопыты вели кочевой, бивачный образ жизни, полный испытаний, преодолений трудностей, открытий. Короткими вечерами, у таежного костра, готовя скромный ужин, или в противокомарном пологе они вели дневниковые записи, как это практически каждый день делал сам Федосеев, чинили одежду, утварь, ремонтировали инструменты, составляли задание на следующий день. От хорошего проводника зависели успех геодезических экспедиций, уверенность в выполнении важных работ. Судьба преподнесла Г. Федосееву подарок — встречу с местным жителем, эвенком Улукитканом, ставшим на долгие годы его другом и проводником. Улукиткан в самых критических положениях, на грани жизни и смерти находил выход из непредвиденных тяже-

лых ситуаций и спас не одну человеческую жизнь. Федосеев пишет: «Для меня прожитые вместе с ним годы были академией. Старик открыл мне огромный мир природы, которую очень любил, научил меня понимать ее. Но главным достоинством Улукиткана была человечность, которую он целомудренно пронес через девяностолетнюю жизнь». Человечность — вот главное достоинство, которое одинаково понимали Улукиткан и Федосеев. Человечность — это подлинное великодушие и честность, нравственная чистота и цельность, доброта и мужество, дружба и верность, способная сделать людей сильными, стойкими при любых испытаниях.

Перечитывая страницы одной из ранних книг Г. Федосеева «Тропою испытаний», где мы впервые встречаемся с Улукитканом, читатель узнает о том, что проводник внезапно ослеп во время большого и трудного перехода по тайге. Однако Улукиткан ощупью вывел русского инженера — больного, беспомощного, не знающего дороги — через дебри, мари, водные потоки, горы к людям, в обжитые места, движимый одним лишь желанием помочь, пониманием своего долга проводника и хозяина тайги.

В главе «Случай на Худоркане» романа «Последний костер» описан другой, еще более трагический эпизод, когда Улукиткан ценою нечеловеческих усилий спасает от гибели инженера Арсена Виноградова, упавшего во время пурги в расщелину скалы. Когда опасность миновала, между ними происходит такой разговор: «Только ты мог спасти меня! — с трудом произнес он. И другой на моем месте сделал бы то же. Так велит завет наших предков, так должны делать все, — просто ответил старик. Как тебе-то удалось спастись от стужи? — спросил Виноградов. — Ты помог. — При чем тут я? — Ты не мог идти. Я бросил тебя под сугробом, но шибко хотел спасти. От этого я стал сильнее стужи. Понял?..» В этом случае Улукиткану на выручку приходит сама природа и прирожденная находчивость. Полураздетого, обмороженного, голодного, смертельно усталого проводника спасает живым теплом жизни сокжой — дикий олень, которого одним выстрелом убивает изможденный старик. Горячей кровью и сырой печенью оленя Улукиткан утоляет голод, в распоротых внутренностях его отогревает ступни ног, заочневшие руки, а в снятой шкуре зверя коротает ночь. При трагедийной натуралистичности этого случая, он потрясает необычайной правдивостью, силой торжества жизни над смертью. «...Только Улукиткан мог сделать

такое, — заключает Федосеев, описывая один из подобных случаев, и продолжает: — Сколько беспокойства живет в этом старом эвенке, и как он не устает от вечных забот о людях! Пора уж пощадить свою старость, успокоиться. Так нет, иначе не может».

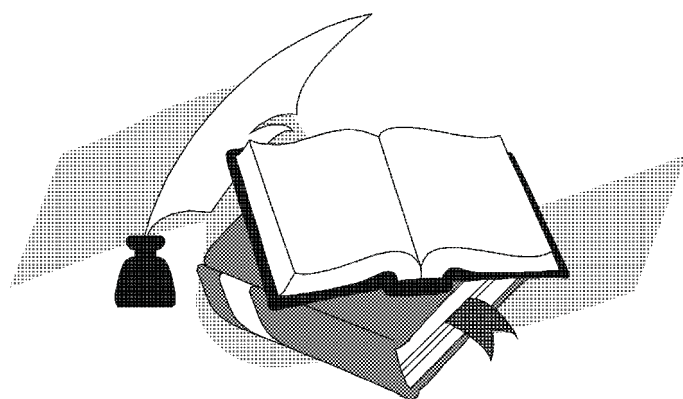
В предсмертные, трагические минуты жизни Улукиткан всем своим существом ощущает нерасторжимую близость к матери-природе. «Он припал к стоящей рядом лиственнице, обнял ее. "Только бы не упасть", — подумал он и на какое-то время потерял сознание. Огромный живой мир тайги, мир, без которого он не мог бы жить, отступил от него, земля, по которой он столько исходил, уплыла из-под ног». Эта великая привязанность к родной земле и всему живому, фанатическая вера Улукиткана в спасительную щедрость природы, передавшаяся и самому Г. Федосееву, обретает особую значимость и поэтический смысл.

В 1968 г. Г. Федосеев внезапно скончался в Москве от сердечного приступа. При жизни он завещал своим друзьям-геодезистам захоронить после кремации часть пепла в центре Восточного Саяна. Писателя всегда тянуло на Восточные Саяны, на белоголовые вершины пиков Грандиозный (абсолютная отметка 2922 м) и Поднебесный, на их крутые перевалы. Здесь Федосеев с товарищами и героями его будущих книг по Саянам, Заполярью и Дальнему Востоку проложили немало горных и таежных троп, преодолели суровые испытания дикой, но прекрасной природы. Все это нашло отражение в его творчестве. Так, в повести «Мы идем по Восточному Саяну» он описывает эпизод из своей личной жизни, когда он в 1936 г. на стволе старого кедра на откосе пика Грандиозного вырезал ножом надпись: «Последний лагерь Саянской экспедиции. Прощайте, горы!» В 1969 г. его последняя воля была исполнена: сотрудники предприятия № 8 установили в районе пика Грандиозный на перевале Иден памятник Г. Федосееву в виде железобетонного геодезического тура с мемориальной доской. На седьмом десятке лет своей жизни Г. Федосеев после смерти снова, но уже навсегда, вернулся на перевал Грандиозного, на его склоны. Через год постановлением Совета Министров РСФСР перевалу было присвоено новое наименование «перевал Федосеева».

За активную плодотворную деятельность в Новосибирском АГП Г. А. Федосеев был награжден двумя орденами Трудового Красного Знамени, многими медалями. Он стал (посмертно) лауреатом литературной премии имени А. А. Фадеева за повесть «Пашка из Медвежьего лога». В Новосибирске установлена мемориальная доска на

доме по Красному проспекту № 35 с надписью, которая гласит: «В этом здании с 1937 по 1956 год работал известный геодезист Григорий Анисимович Федосеев». Одна из улиц сибирского города названа улицей Федосеева. Туристы идут «по федосеевским местам», маршрутам на Кавказе, в Восточном Саяне, на Становом хребте, в Дальневосточной тайге. Можно с уверенностью сказать, что народная тропа к памятнику Г. Федосеева не зарастет, новые поколения геодезистов, туристов придут на склоны Грандиозного поклониться праху замечательного человека, инженера-геодезиста и талантливоего писателя.

Литературные страницы



К. В. Холшевников

О ПРЯМОХОЖДЕНИИ В ИСКРИВЛЕННОМ МИРЕ

Пьеса в двух действиях

Действующие лица:

студент **Владимир**

студентка **Ольга**

Действие первое

Глухой закоулок Европы, страшно далеко от Урала. Конец зимней сессии.
Два студента, Владимир и Ольга, после консультации перед последним экзаменом по релятивистской астрофизике.

Владимир

Я, знаешь, только счас уразумел:

Земля кругла, не плоскость и не блин!

Ольга

Да, рано ты прозрел!

Добавь: не куб, не клин и не рубин.

Владимир

Оставь! Чему учили нас в старинной песне?

Не ходите, дети, путями кривыми,

А ходите, дети, путями прямыми.

Кривая дорога ведет только в ад.

Приятно идти, а придешь — будешь рад?

Земля ж крива, и нет прямых дорог, хоть тресни!

Ольга

А тензор кривизны — тебе он внове?

Ты Римана читал, сдается, в переводе.

С Эйнштейном хоть знаком? Он жил при Иванове.

Составь же уравнения (поля, вроде).

Уходят писать уравнения.

Действие второе

Тот же закоулок через три дня. Те же студенты в компьютерной. На мониторе сетка координатных линий на чем-то вроде гиперболического параболоида. Красным цветом среди них выделена прямая линия.

Владимир

Какое счастье, просто Гран Шартрёз!
Асимптотическое вижу направление!
Вот путь ПРЯМОЙ! В страну чудес и грёз!
Во весь опор! Помчимся в упоенье!

Ольга

Да, но куда, куда мы удалимся?
Что путь грядущий нам готовит, Вова?

Владимир

В Коуровку немедля устремимся.
Там Школа Школ, маяк всех астрономов вспыхнет снова!

Ольга

А есть еще пути прямые в мире этом?

Владимир

Единственность решенья нам гласит:
Один лишь путь прямой, зимой и летом,
В Коуровку, никто там не хандрит,
Там каждый вмиг становится поэтом!

Убегают в Коуровку.

К. В. Холщевникову на 70-летие

Когда бы жизнь была как небо
Безмерна в блеске звездной шали —
Землянин не алкал бы хлеба
И зрелищ в поте и печали.

Тогда бы вдумчиво и строго
Иль беспшибашно, на авось,
Он познавал себя и Бога,
И смысл всего, что довелось

Узнать, услышать и увидеть,
Прочувствовать и ощутить,
Открыть, отдать и не обидеть,
Дождаться, встретить, полюбить!..

Когда бы жизнь нас баловала
И всякий раз, давая шансы,
Пусть к юбилеям, отличала,
Даря признание и стансы,

Сколь славен был бы род Адама! —
Речист, космичен, сановит:
Как Брахма, Константин и Рама,
Сварог, Перун и Святovit!

«Звезды страшно далеки от народа»*,
«Существуют для влюбленных и поэтов»**.

А для ВАЛЕНТИНА звезды — годы
Углубленного прочтения их света.

Вся судьба вплелась в историю Союза,
В освоение космических пространств.
— Юбилей грядет! — торопит Муза.
ВЕК без четверти! И это шанс

Высказать еще одно признание!
(Мы еще не съели пуда соли)!
И назначить вновь зимой свидание. . .
Да! В Коуровке! На Зимней Школе!

*, ** интервью В. Ф. Есипова «Московскому Комсомольцу» от 19.02.2005

КОСТЕ ХОЛШЕВНИКОВУ —
ПЛАНЕТЕ И ЧЕЛОВЕКУ

Дай, Боже, каждому из нас
Таких глубинных интуиций,
Таких бездонных эрудиций,
Годов и сил такой запас,
Таких научных инвестиций
Несокрушаемый каркас,
Чтобы суметь
 в свой звездный час,
Достигнуть
 Костиных кондиций!..
Отбросим заумь дефиниций:
Он от великих принял пас,
Держась заветов и традиций
Небесных сфер,
 где Пьер Лаплас
Не утаил своих амбиций
На роль Всевышнего...
Потряс
 Он Бонапарта* нешутейно...

Вот так и Костя нас идейно
На свой матмеховский Парнас
То воздвигает постатейно
(Статьи он пишет — первый класс!),
То, ударяя мордой в КВАС**,
Напоминает: не-ли-ней-но!
Вза-и-мо-дейст-вие!!
 двух масс!!!

Где каждый —
 Личность и Творец,
Герой, Любовник, Молодец,
Начальник, Дедушка, Отец...
Найти начало и конец
По Ляпунову невозможно —
В клубок запутана стезя,
Орбиту вычислить нельзя —

И наблюдать ее несложно:
В глуши коуровской, таежной,
Зимой, во снеге и во льду,
Во тесноте почти берложной,
Без исключений, непреложно,
У всей Вселенной на виду
Блится Костя раз в году
Своею скромностью неложной!

**КВАС — Клуб Веселых АСтряков, в котором Костя неизменно капитанствует вот уже $N + 1$ год.

НА ПУЛКОВСКОМ ХОЛМЕ

I

Жемчужны сумерки на пулковском холме,
Алмазны звезды в облачных просветах,
И купола, плывущие во тьме,
Таинственны, как пьесы без сюжетов,

Где только список действующих лиц
Объявлен для текущего сезона,
Фамильный перечень актеров и актрис,
Глядящих в синий сумрак небосклона

Сквозь прорезные щели куполов,
Как сквозь кулисы старого театра...
Ах, сколько сотрясателей основ,
Блеснув сегодня, отпылают завтра!..

Ничтожно коротка научная стезя
На миллиардолетиях Вселенной,
Так в океан упавшая слеза
В нем растворится капелькой мгновенной...

Так наша Мысль — лишь малый квант, фотон
В сумятице парсеков и столетий...
Но он — живой!.. Еще не поглощен,
Еще летит, еще свободен он,
Во мраке ночи жаркой искрой светит!

II

Еще летит судьбы моей звезда,
Пусть не много выше горизонта,
Невысоко, но это — не беда,
Я не нуждаюсь в карточках дисконта!

Я не ищу ни славы, ни фанфар,
Признание завистливых собратий
Мне не грозит. . . Я берегу свой дар
От слишком тесных дружеских объятий!

Вот потому на пулковском холме,
Жемчужном от закатного свечения,
Так одиноко, так пустынно мне
Перед лицом вселенского вращения.

Хрустальный звон пифагорейских сфер
Все отдаленней, призрачней, выше,
Холодный мир предвычисленных мер,
Не знающий ни страха, ни химер,
Печалей сердца моего не слышит!

2007—2008

О. К. Сильченко

ЗОВ НЕБА

Сказка о несбывшейся мечте —
не сбывшейся из-за неготовности к приходу Чуда

Действующие лица:

Михаил Петрович, астроном, доктор наук

Анна Ивановна, его жена

Маша, их дочь, 17 лет

Лаборант

Студентки-дипломницы

Аспирант

Председатель конференции

1-й докладчик

2-й докладчик

Гости конференции

Небесная Дева

1-Е ДЕЙСТВИЕ

Сцена 1-я. Пятница, на работе.

Михаил Петрович:

Пора! Начну рабочий день я!

Я верю, он сулит успех,

И в миг восторга и прозренья

Я стану вновь счастливей всех!

Решу глобальную задачу,

Весь мир ученый озадачу

И подтверждаю в который раз

Высокий свой научный класс.

Лаборант:

Я, Михаил Петрович, Вас

Здесь ожидаю целый час.

Просили Вы в читальном зале

Для Вас две книги отыскать. . .

© О. К. Сильченко, 2009

Михаил Петрович:

Прошло с тех пор уже дней пять.

Лаборант:

Вы авторов не указали!

Я перерыл весь каталог,

Но этих книг найти не смог.

Михаил Петрович:

Да Вы б давно меня спросили!

Лаборант:

Я эту ночь без сна провел

И лишь под утро, обессилев,

К такому ж выводу пришел.

Михаил Петрович:

Я отыщу их сам потом. *(Лаборант уходит.)*

И ведь имеет же диплом!

Однако ждет меня работа.

(Входит студентка Иванова.)

Студентка Иванова:

Михал Петрович! Помогите!

Михаил Петрович:

Кто Вы, прелестное дитя?

Студентка Иванова:

Меня в дипломницы возьмите!

Студентка Иванова я.

Михаил Петрович:

Найти Вам тему для диплома?

Ну что ж, пожалуй, помогу.

Работы много: дать любому

По вкусу тему я могу.

Студентка Иванова:

Работы много? Это хуже.

Мне капитальный труд не нужен,

Мне б скромный, маленький диплом.

Михаил Петрович:

Не понимаю — Вы о чем?

Студентка Иванова:

Я молода, умна, красива,
Широкий круг друзей и дел.
Я рассудила справедливо,
Что тяжкий труд — не мой удел.
Мне бы такой диплом, чтоб сразу,
Чтобы неделя — и готов!

Михаил Петрович:

Ах вот что! Вынужден отказом
Вас огорчить без лишних слов.

(Студентка Иванова уходит. Вбегает аспирант.)

Аспирант:

О шеф, смотрите! Я с Машины
Ответ сегодня получил.
ОНО равно двум с половиной!

Михаил Петрович:

Да что ж «оно»?

Аспирант:

Сейчас... Забыл!
Я слишком долго с ней боролся.
Быть может, максимум нашелся?

Михаил Петрович:

Да в чем же максимум?!

Аспирант:

Бог весть!
Нам функций всех не перечесать.
В конце концов, и важно ль это?
Ведь я добрался до ответа!
Саму Машину победил!
Чего ж Вам боле? Я решил,
Что в диссертацию свою
Все распечатки подошью,
Внесу весомый вклад в нее. *(Уходит.)*

Михаил Петрович:

Да лучше б сдал во вторсырье. . . *(Подходит к окну.)*
Ну вот, рабочий день окончен.
К воротам устремился люд.
Они навстречу мирной ночи,
Навстречу отдыху идут.
Но я, пожалуй, их богаче:
Ведь для меня момент сей значит,
Что час работы подошел!
И ждет меня рабочий стол. . .

Сцена 2-я. Суббота, дома.

Анна Ивановна:

Ты чем там занят, Михаил?
Три дня ведро не выносил.

Михаил Петрович:

Дай поработать хоть в субботу!

Анна Ивановна:

Пять дней в неделю на работу
Вполне достаточно. Теперь
Бери авоську — и за дверь!

Михаил Петрович:

Ну что тебе еще, мой друг?

Анна Ивановна:

Картошки в доме не осталось!
В конце концов, ты мой супруг
И мог бы мне помочь хоть малость.
Я все хозяйство волоку,
Ребенка. . .

Михаил Петрович:

Во! Пусть Машка сходит!

Маша:

Нет, па, мне это не подходит.
Я нынче занята — бегу!

Анна Ивановна:

Побудь хоть в выходные дома!

Маша:

Чего я не видала здесь?

Мне дома все до слез знакомо:

И мамы брань, и папы спесь.

Ну, чао, предки, я — в загул! *(Уходит.)*

Анна Ивановна:

Совсем дитя от рук отбилось!

Хоть ты бы ей мозги встряхнул!

Михаил Петрович:

Оставь девчонку, сделай милость!

Ну что ты, Анна, за сверло?!

Анна Ивановна:

Тебе со мною повезло!

Тебе всю жизнь я посвятила:

Ребенка нашего растила,

Уют в квартире создала. . .

Теперь Мария подросла —

Лишь о тебе мои заботы:

И одеваю, и кормлю.

Ты б без меня пропал в два счета,

Загнулся б над своей работой!

Ты только мой, и оттого-то

Тебя так сильно я люблю!

Михаил Петрович:

Все? Благодарен до седин.

Иду немедля в магазин!

2-Е ДЕЙСТВИЕ

Сцена 1-я. Научная конференция.

Председатель:

Открыть позвольте заседание —

Увы, последнее уже! —

Общесоюзного собрания

Ученых леди и мужей.

Но прежде, чем начать доклады,
Прошу участников учесть:
Ждет за труды всех нас награда —
Банкет сегодня ровно в шесть!
(1-му Докладчику) Итак, коллега, слово Вам!

1-й Докладчик:

Я вам отчет короткий дам,
Над чем работают сейчас
В обсерватории у нас.
Известно: в глубине Вселенной
Творится неизвестно что.
И астрофизик современный
Пред мирозданием — ничто.
Мы знаем физику земную,
Ей неподвластны небеса.
Быть может, физику иную
Таят галактик чудеса.
Их жизнь — загадочная штука,
Нам не дано ее понять.
Чтоб сделать личный вклад в науку,
Нам остается наблюдать.
Мы копим факты для потомков,
Их не пытаюсь объяснять.
Сей труд не даст нам славы громкой,
Зато столетий через пять
Родится физик гениальный,
Он эти факты обобщит
И в монографии глобальной
Разгадку тайны сообщит.
Но есть отдельные коллеги —
Имен не будем называть —
Не отличат Денеб от Веги,
Но все стремятся объяснить.
Из них теорий бьют фонтаны,
Они пред модой лебезят,
И им, как явным шарлатанам,
Науку доверять нельзя!

Председатель:

Спасибо! (2-му Докладчику) Вам, коллега, слово!

2-й Докладчик:

Мы тут услышали, друзья,
Немало истинно смешного.
Зачем же, спрашиваю я,
Так клеветать на всю науку?!
Вы лично не смогли понять,
Как нужно факты объяснять.
Но стоит ли, на скору руку,
В своей беде винить других
И оскорблять огульно их?
Жизнь с пораженцев строго спросит
За нанесенный ими вред!
Меж тем на многие вопросы
В науке есть уже ответ.
Мы знаем о Вселенной много:
Как родилась, когда умрет,
А также по каким дорогам
Вся эволюция идет!
Ничто ученого не выше,
Мы заработали престиж!
Мы всю Вселенную опишем
Тремя параметрами лишь!

*(Участники конференции расходятся после
заседания, переговариваясь.)*

1-й Участник (2-му):

Как Вам вчера доклад Петрова?

2-й Участник:

Заснул я с третьего же слова!

3-й Участник:

... Ей оппонент к защите нужен,
А он с нее не сводит глаз!

4-й участник:

А Вы слышали? С третьим мужем
Она недавно развелась!..

5-й Участник (*6-му*):

Доклад логичный, без запинки,
И в то же время — от души.
Но что важней всего — картинки
У Вас чертовски хороши!..

7-й Участник (*Михаилу Петровичу*):

А Вы идете на банкет?

Михаил Петрович:

Не знаю... Вероятно, нет.

7-й Участник:

Но почему же?

Михаил Петрович:

По-простому,
Я не люблю так много пить.

7-й Участник:

Вам, человеку молодому,
Нельзя так аскетично жить!
Там будут общество и танцы,
Наверняка хороший стол,
Среди гостей есть иностранцы...
На Вашем месте я б пошел!
Повеселиться раз в году...

Михаил Петрович:

Уговорили! Я приду.

Сцена 2-я. На банкете.

Михаил Петрович:

На кой я черт сюда пришел?!
Есть от чего прийти в унынье!
Толпа народу, полный стол,
Но одиноко, как в пустыне.
И чем бы разогнать тоску?
Вон ту красотку завлеку!
(*Подходит к одиноко сидящей Небесной Деве.*)
Вы так печальны! Отчего?
Кругом все пьют и веселятся!

Небесная Дева:

Я прибыла не для того.

Михаил Петрович:

Я обожаю объясняться!

Скажите мне, зачем Вы здесь?

Мы с Вами одиноки оба...

Небесная Дева (*в сторону*):

Мой бог! Он пошел до пятки, весь!

Ну просто негде ставить пробу!

Михаил Петрович:

Вы аскетичны, вся в науке,

Но есть другая жизнь вокруг!

Лишь протяните другу руки,

И Вам шагнет навстречу друг!

Небесная Дева:

Увы, далеко все друзья!

Михаил Петрович:

Тогда Вам другом буду я!

Вы мне безумно симпатичны...

Небесная Дева:

Я не хочу Вас утруждать!

Михаил Петрович:

Я развлекать Вас буду лично

И к новой жизни приобщать.

Небесная Дева:

Не стоит время зря терять.

Михаил Петрович (*не слушая*):

Сперва идемте танцевать.

Я быстрых танцев не танцую,

Но в вальсе как партнер — вполне...

Небесная Дева:

Вы время тратите впустую!

Веселье Ваше чуждо мне.

Михаил Петрович:

Ну, ради бога, как хотите...
Но чем же Вас тогда занять?
Вы так отчаянно грустите —
Нет сил спокойно наблюдать.
Найти б для разговора тему...
Хоть про научные проблемы!
Над чем работаете Вы?
Вы наблюдатель?

Небесная Дева:

Угадали!
Я — наблюдатель в этом зале.

Михаил Петрович:

И, верно, Вы не из Москвы?

Небесная Дева:

Я издалика прилетела.

Михаил Петрович:

Да, самолет — большое дело...
Так, значит, наблюдатель Вы.
А я творю из головы.
Я — теоретик.

Небесная Дева:

И не скучно
Сухие формулы писать?

Михаил Петрович:

Не так уж формулы бездушны,
В них можно много увидеть.
Когда пишу баланс для квантов
Или устойчивость ядра —
Мне кажется, судьба гигантов
Висит на кончике пера.
Я, мошка, — властелин Вселенной,
Подвластны мне и мир, и ад!
Проник я мыслью дерзновенной
На миллиарды лет назад!
За ровным строем тихих формул
Далекий гул манил и влек:

Аккреционный диск исторгнул
Из недр рентгеновский поток.
И неустойчивости волны
Барашки белые несли;
Звезды нейтронной сумрак полный
Уже маячил им вдали.
Над этим миром раскаленным,
Среди оранжевых светил,
Высокой властью наделенный,
Я в упоении парил!
Я дал закон слепой стихии,
Из тьмы гармонию извлек.
Одна-две формулы простые —
И я уже почти что Бог!

Небесная Дева:

О, Вы — художник! Иль поэт?

Михаил Петрович:

Вы льстите мне.

Небесная Дева:

Конечно, нет!
Увидеть то, что Вы смогли,
Почти невысказимо с Земли.
Тут нужно внутреннее зрение —
Ни логика, ни знаний груз
Не заменяют озаренья!

Михаил Петрович:

Но озареньям, к сожалению,
Не учит ни единый вуз.
Но Вам беседа интересна?

Небесная Дева:

О да!

Михаил Петрович:

Внимание Ваше лестно!
В ближайшую неделю Вы
Не покидаете Москвы?

Небесная Дева:

Нет, у меня в Москве дела.
Хоть график мой довольно плотен,
К Вам в институт я бы зашла,
Узнать побольше о работе... (*Уходит.*)

Михаил Петрович:

Иль я тупица и профан,
Или наклонился роман!

Сцена 3-я. В ресторане.

Михаил Петрович:

Как Вам понравилась столица?

Небесная Дева:

Цивилизована весьма.

Михаил Петрович:

Нам, москвичам, есть чем гордиться:
Метро, высотные дома...

Небесная Дева:

Их разглядела я едва ли —
Меня здесь люди привлекали.
Что испугало Вас сейчас?
Вы в мыслях абсолютно правы:
Ведь я в виду имела Вас.

Михаил Петрович (*в сторону*):

Бог мой! У них простые нравы!
(*К Небесной Деве*) Я очень рад, что заслужил
У Вас симпатию такую...

Небесная Дева:

Я рада больше! Столько сил
Пришлось потратить мне впустую!
Я собралась уже совсем
Обратно улетать ни с чем,
Но Вы явились и зажгли
Надежду на людей Земли.

Михаил Петрович (*немного в панике*):

За что же мне такая честь?

Небесная Дева:

За то, что Вы такой как есть.

За то, что Вы открыты свету,

За то, что в Вас живут миры,

Что покоряются Вам где-то

Светил косматые шары!

Михаил Петрович:

А, Вам понравился мой бред

Про иллюстрирование формул?

Решили Вы, что я поэт...

Но я немного передернул.

Небесная Дева:

Да знаю! Вы тогда хотели

Передо мной чуть-чуть блеснуть.

Я не сержусь — и в самом деле,

Не в мелочах же этих суть!

Того, что Вы мне рассказали,

Вы бы придумать не смогли,

Когда б и вправду не летали

Вы в снах далеко от Земли.

Михаил Петрович:

Но отчего Вам так важны

Мои несбыточные сны?

Небесная Дева:

Да оттого, что я сама

Во снах метаюсь по Вселенной,

От восхищения нема

Пред красотой ее нетленной!

А если двое, холодея,

Один восторг в груди лелеют,

И на двоих — единый сон...

Михаил Петрович:

Тогда один из них влюблен!

Небесная Дева:

Да нет! Все редкостней и выше!
Они друг друга мысли слышат,
Из них любой поймет без слов
То, что другой сказать готов.
Меж их сознанием нет преграды,
И на двоих — душа одна!
И ты моих познаний клады
Способен вычерпать до дна!

Михаил Петрович:

О ужас! Боже! Что со мною?
Пощады! Я схожу с ума!
Ворвались мысли диким роем,
И в миг взорвалась светом тьма!
Чужое все... Нет, не чужое!
Я узнаю свои мечты!
Да, ты — единое со мною,
Ты — это я, я — то ты!

*(Дальнейшее объяснение происходит
на телепатическом уровне.)*

Небесная Дева:

Я завтра утром улетаю:
Меня в родимом ждут краю,
Я — не землянка.

Михаил Петрович:

Да, я знаю,
Я вижу родину твою.
Какое горькое мгновенье!
Заря разлуки неземной...

Небесная Дева:

Я получила разрешение:
Ты можешь вылететь со мной.
Я не хочу тебя утратить,
Был слишком долгий поиск мой...

Михаил Петрович:

Но ты летишь к себе домой,
А я?

Небесная Дева:

Ты будешь наблюдатель.
Все то, что грезилось тебе,
Перед тобою явью встанет,
Благодаря твоей судьбе
Твой род в грядущее заглянет.
Когда ты вырвешься из тьмы,
Что ныне разум твой объемлет,
Узнаешь все, что знаем мы, —
Ты вновь, как бог, сойдешь на Землю.

Михаил Петрович:

Но кто потом поверит мне?
Нет, это слишком нереально.
Покинуть дом на столько дней...
К тому ж у Анны нрав скандальный!

Небесная Дева:

Тебе так страшен Анны гнев?!
Опомнись, это невозможно!

Михаил Петрович:

Вы ошибаетесь во мне.
Надежды Ваши были ложны.

Небесная Дева:

Нет, не ошиблась я в тебе —
Ведь мы с тобой одно и то же!

Михаил Петрович:

Ну, если так, тогда, быть может,
Вы ошибаетесь в себе?

Небесная Дева:

Постой! Помедли хоть мгновенье!
Не торопись принять решение!

Михаил Петрович:

Я не поэт и не герой,
На подвиг явно не способен,
Хвастун и бабник, а порой
К тому ж бываю мелко злобен.
Увы, далек от совершенства —
До Бога мне не дорасти.

Небесная Дева:

Но разве это не блаженство —
Мечту увидеть во плоти?
Ты столько лет мечтал о чуде,
И вот оно к тебе пришло!

Михаил Петрович:

Да, просто подали на блюде!
Да только время то прошло.
Я не юнец уже, поймите!
Давно не верю в чудеса,
И без прозрений и наитий
Я изучаю небеса.
Я все имею, всем доволен:
Работой, отдыхом, семьей,
Мне ничего не нужно боле!
Давно закончен поиск мой.

Небесная Дева:

Поверь, мне бесполезно лгать!
Силен твой страх перед судьбою.
Ах, если б можно было ждать,
Пока ты справишься с собою!
Так просто вымолвить: «Лечу!»

Михаил Петрович:

Оставьте Вы меня в покое!
Я знаю сам, чего хочу,
И с Вами мне не по пути!

Небесная Дева:

Тогда прощай, мой друг! (*Уходит.*)

Михаил Петрович:

Прости. . .

КАК В МУЗЫКЕ — ДА САРО, ИДЕМ НА НАЧАЛО

3-е действие строго равно 1-му, только фамилия студентки Сидорова, а аспирант нашел, похоже, минимум, который на этот раз равен трем с половиной. . .

Финальные монологи

Михаил Петрович:

Опять рабочий день окончен. . .
К воротам устремился люд,
Они навстречу мирной ночи,
Навстречу отдыху идут!
Я вновь наедине с собою.
О, как мне хочется покоя!
Как бесконечен этот путь!
И нет надежды отдохнуть. . .
Средь ежедневной суеты
Давно забытые мечты
Во мне воскресли с прежней силой,
Когда она про сны спросила. . .
Как будто десять солнц взошли!
И встало чудо предо мною,
И я, как гражданин Земли,
На подвиг призван был судьбою.
Но я не смог! Я испугался!
Я не поверил! Не признался,
Что это то, чего я ждал,
Чего так пламенно желал!
Ей это жалкое безгласье
И не понять, и не простить. . .
Довольно было в знак согласия
Ресницы молча опустить,
Но сил на это не хватило. . .
На что же я растратил силы,
Что свой великий, звездный миг
И не признал, и не постиг?
Свой век в тоске и укоризне
Мне остается коротать,
И до конца унылой жизни
Себя ничтожеством считать.

Небесная Дева:

Не верьте вечности печали!
Она пройдет, как страшный сон.
И озарятся снова дали,
И прояснится небосклон.
Ты будешь ждать, и ты дождешься!
Вновь чудо явится к тебе,
И ты уже не ошибешься,
Своей доверившись судьбе.
В свой звездный час, дыханья тише
Шепнешь: «Сбываются мечты!»
И я, мой друг, тебя услышу,
И буду знать, что счастлив ты.

1982

Список участников

ФИО	Организация	E-mail
Аввакумова Е. А.	УрГУ	Ekaterina.Avvakumova@usu.ru
Акберов А. Р.	КГУ	artakber@mail.ru
Алексеев С. О.	ГАИШ	alexeyev@sai.msu.ru
Алексеев П. С.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН	ppaasshhaa@hotmail.com
Алексейчук Р. А.	ВолГУ	investigation@list.ru
Антипин С. В.	ИНАСАН	antipin@sai.msu.ru
Анфилов В. Н.	Имин УрО РАН	Iminchf@ilmeny.ac.ru
Балуев Р. В.	СПбГУ	roman@astro.spbu.ru
Баранова О. Л.	РГПУ	redissa@mail.ru
Береснев С. А.	УрГУ	Sergey.Beresnev@usu.ru
Бирюкова Е. С.	СПбГУ	birukova-es@yandex.ru
Бисенгалиев Р. А.	КалмГУ	rinus5637@mail.ru
Бисярина А. П.	УрГУ	bisyarina_nastya@mail.ru
Боли П. Э.	УрГУ	pboley@gmail.com
Бурданов А. Ю.	ГОУ УрГУ	artburd@rambler.ru
Васькина А. М.	ГОУ УрГУ	vodolej3@rambler.ru
Верёвкин А. О.	СПбГУ	office@inform.pu.ru
Вибе Д. З.	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Вибе Ю. З.	УрГУ	Julia.Wibe@usu.ru
Гламазда Д. В.	УрГУ	Dmitriy.Glamazda@usu.ru
Горбовской Е. С.	ГАИШ МГУ	gorbovskoy@sai.msu.ru
Горда С. Ю.	АО УрГУ	Stanislav.gorda@usu.ru
Грибанов К. Г.	УрГУ	kgribanov@remotesensing.ru
Гринин В. П.	ГАО РАН	grinin@gao.spb.ru
Гунаев К. А.	КалмГУ	greenduck777@mail.ru
Додин А. В.	МГУ	dodin_nv@mail.ru
Дорогов А. А.	ГОУ УрГУ	al_himik@bk.ru
Дремова Г. Н.	РФЯЦ-ВНИИТФ	g.n.dryomova@mail.ru
Дубас О. М.	ТГУ	astrodep@niipmm.tsu.ru
Есипов В. Ф.	ГАИШ МГУ	esipov@sai.msu.ru
Жёлтышева О. Д.	УрГУ	clava-lunatic@mail.ru
Железнов Н. Б.	ИПА РАН	nickzhel@mail.ru
Захаров В. И.	УрГУ	vz@uraltc.ru
Захарова П. Е.	УрГУ	Polina.Zakharova@usu.ru
Зубарева А. М.	ИНАСАН	zubareva@inasan.ru
Иванов К. И.	ИГУ	ivorypalace@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Исакова П. Б.	ЧелГУ	Sandra_moi@mail.ru
Ишмухаметова М. Г.	КГУ	mig-ksu@mail.ru
Казанцев М. Б.	ЧелГУ	kazant@csu.ru
Кайгородов П. В.	ИНАСАН	pasha@inasan.ru
Кайзер Г. Т.	УрГУ	Galina.Kajzer@usu.ru
Калинин А. А.	АО УрГУ	kaaurgu@rambler.ru
Калинина Н. Д.	АО УрГУ	Nataliya.Kalinina@usu.ru
Кирсанова М. С.	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Коваленко И. Г.	ВолГУ	igk@vlink.ru
Кожевников В. П.	АО УрГУ	Valerij.Kozhevnikov@usu.ru
Кожевникова А. В.	АО УрГУ	Alla.Kozhevnikova@usu.ru
Колобов С. С.	ГОУ УрГУ	s-kolobov@mail.ru
Кондратьева Е. Д.	КГУ	mig@ksu.ru
Костюкова Л. В.	ЮФУ	ya_lubanka@mail.ru
Крушинский В. В.	УрГУ	krussh@gmail.com
Кузнецов Э. Д.	УрГУ	Eduard.Kuznetsov@usu.ru
Лаунхардт Р.	МПИА	rlau@mpia.de
Лебедев Д. Н.	ВолГУ	lebedev.astro@mail.ru
Лебедев Н. Г.	ВолГУ	nikolay.lebedev@volsu.ru
Левитская Т. И.	УрГУ	Tatuana.Levitskaya@usu.ru
Липунов В. М.	ГАИШ МГУ	lipunov@sai.msu.ru
Малков О. Ю.	ИНАСАН	malkov@inasan.ru
Мингалиев М. Г.	САО РАН	marat@sao.ru
Миронов А. В.	ГАИШ МГУ	almir@sai.msu.ru
Михаляев Б. Б.	КалмГУ	bbmikh@mail.ru
Млодик Г. Г.	УрГУ	mlodik_87@mail.ru
Моисеев А. В.	САО РАН	moisav@gmail.com
Моросеев Ф. В.	СПбГПУ	fred_lighting@mail.ru
Мусцовой В. В.	КалмГУ	vvmusts@mail.ru
Немченко Е. А.	ТГУ	katusha77@sibmail.com
Никифорова Т. П.	АО УрГУ	Tatuana.Nikiforova@usu.ru
Ниязгулова С. Ю.	УрГУ	snezhnaniya@mail.ru
Орлов В. В.	СПбГУ	vor@astro.spbu.ru
Островский А. Б.	УрГУ	Andrei.Ostrovskii@usu.ru
Павлюченков Я. Н.	ИНАСАН	pavyar@inasan.ru
Панфилов В. Е.	ТГУ	astrodep@niipmm.tsu.ru
Панчук В. Е.	САО	panchuk@sao.ru
Парфёнов С. Ю.	УрГУ	grey1105@yandex.ru
Перминов А. С.	УрГУ	perminov12@yandex.ru
Плахотский А. В.	ЧелГУ	artem74@is74.ru

ФИО	Организация	E-mail
Полушина Т. С.	ГОУ УрГУ	Tatyana.Polushina@usu.ru
Поляков А. М.	ГОУ УрГУ	coi@bk.ru
Попова М. Э.	УрГУ	Maria.Popova@usu.ru
Прохоров М. Е.	ГАИШ	mike@sai.msi.ru
Пуланова А. Ф.	УрГУ	pulanova_anna@mail.ru
Рамазанова Г. Р.	УрГУ	gyzialsneg@gmail.com
Ромашин Г. С.	УрГУ	Georgij.Romashin@usu.ru
Рябова М. В.	ЮФУ	rgyaf@yandex.ru
Рябчикова Т. А.	ИНАСАН	ryabchik@inasan.ru
Салий С. В.	АО УрГУ	Svetlana.SAlii@usu.ru
Сапронов А. Е.	КГУ	alexlybra@mail.ru
Сафутдинов Е. Р.	ГАИШ	Yegorsaf@mail.ru
Свечников М. А.	АО УрГУ	Marij.Svechnikov@usu.ru
Селезнев А. Ф.	АО УрГУ	Anton.Seleznev@usu.ru
Сильченко О. К.	ГАИШ МГУ	olga@sai.msu.su
Ситдикова Р. А.	КГУ	raida-s@yandex.ru
Смирнов А. А.	СПбГУ	alsmirn@gmail.com
Смирнов Г. Т.	ПРАО ФИАН	smirnov@prao.ru
Смирнова К. И.	УрГУ	arashu@rambler.ru
Соболев А. А.	УрГУ	fortrest@uralweb.ru
Соболев А. М.	УрГУ	andrej.sobolev@gmail.com
Старицин Е. И.	УрГУ	Eugenij.Staritsin@usu.ru
Стародубцева Д. А.	УрГУ	starodubceva.d@gmail.com
Старцева М. А.	ГАИШ	taktonado@gmail.com
Стрижова Д. А.	УрГУ	dasha_st@mail.ru
Судов Л. Н.	СПбГУ	l_sudov@mail.ru
Сытов А. Ю.	ИНАСАН	sytov@inasan.ru
Тутуков А. В.	ИНАСАН	atutukov@inasan.rssi.ru
Угольников О. С.	ИКИ РАН	ougolnikov@gmail.com
Усанин В. С.	КГУ	VUsanin@yandex.ru
Фатеева А. М.	ИНАСАН	fateeva@inasan.ru
Филинюк Я. Л.		banner_edge@mail.ru
Хайбрахманов С. А.	ЧелГУ	sergej.khajbrakhmanov@edu.csu.ru
Хайруллина А. И.	КГУ	alina-hairullina@mail.ru
Хачай Ю. В.	ИГФ УрО РАН	yu-khacay@yandex.ru
Холщевников К. В.	АИ СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Хоперсков А. В.	ВолГУ	khoperskov@rambler.ru
Хоперсков С. А.	ВолГУ	hoperskov@vlink.ru
Цивилёв А. П.	ПРАО ФИАН	tsivilev@prao.ru
Чувашов И. Н.	ТГУ	chuvashov@sibmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Чурюмов К. И.	КНУШ	klivch@mail.ru
Шагабутдинов А. И.	АО УрГУ	Andrej.Sobolev@usu.ru
Шагинян А. С.	ЮФУ	ashaginyan@rambler.ru
Шайдулин В. Ш.	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шелемей О. В.	УрГУ	oksana.shelemei@e1.ru
Шпекин М. И.	КазГУ	msh@ksu.ru
Шугаров А. С.	ИНАСАН	shugarov@inasan.ru
Шугарова В. В.	ОНУ	varyak@ukr.net
Шустов Б. М.	ИНАСАН	bshustov@inasan.ru
Эскин Б. Б.	СПбГУ	esk@astro.spbu.ru
Юшкин М. В.	САО	maks@sao.ru
Якопов М. В.	САО	mike@sao.ru
Gaylard M. J.	HARTRAO	mike@hartrao.ac.za

Содержание

Программа конференции	5
Обзорные лекции	19
Алексеев С. О. Общая теория относительности и ее современное развитие	19
Вибе Д. З. Космические окрестности Солнца	35
Гринин В. П. Фотополяриметрическая активность звезд с протопланетными дисками	52
Железнов Н. Б. Семейства и группы малых планет	53
Коваленко И. Г. Аккреция на черные дыры	64
Кузнецов Э. Д., Холщевников К. В. Запас устойчивости Солнечной системы по массам планет	78
Лебедев Н. Г. Применение методов квантовой химии для моделирования процессов газопылевой трансформации межзвездной среды	89
Липунов В. М. Малые телескопы-роботы и современная астрофизика	105
Малков О. Ю. Международный год астрономии в России	125
Моисеев А. В. Галактические кольца	129
Орлов В. В. Динамика групп галактик	144
Панчук В. Е., Юшкин М. В. Оптоволоконные спектрографы высокого разрешения	160
Прохоров М. Е., Захаров А. И., Миронов А. В., Николаев Ф. Н., Тучин М. С. Современные датчики звездной ориентации	170
Сильченко О. К. Далекие галактики	187
Соловьев А. А. Меридиональная циркуляция и солнечный магнитный цикл	203
Угольников О. С. Лунные затмения: история и наука	206
Харламов Г. Ю. Координатно-временное обеспечение современных астрономических наблюдений	227
Хоперсков А. В. Спиральные галактические структуры: механизмы генерации и поддержания	228
Чурюмов К. И. О природе комет после космических миссий «Стардаст» и «Дип Импект» и перед «Розеттой»	242
Шпекин М. И. Были ли люди на Луне, вращается ли Земля вокруг Солнца и еще несколько интересных вопросов...	262
Шустов Б. М. Введение в ультрафиолетовую астрономию	269
Тезисы студенческих докладов	298
Баранова О. Л. Курс дистанционного обучения «Практическая астрономия»	298

Верёвкин А. О. Поиск филаментов в каталоге SDSS DR6	299
Додин А. В. О природе ультрафиолетового континуума CTTS короче 2000 Å на примере звезды Т Тау	300
Иванов К. И. Иркутский сегмент системы телескопов-роботов «МАСТЕР»	301
Исакова П. Б. Моделирование аккреции в промежуточных по- лярах в дрейфовом приближении	302
Ишмухаметова М. Г., Кондратьева Е. Д., Усанин В. С. Критерии генетической общности малых тел применительно к метеорным роям	303
Костюкова Л. В. Моделирование разрушения межзвездной пы- ли в молекулярных облаках	304
Лебедев Д. Н., Лебедев Н. Г. Молекулярная модель процесса взаимодействия пылевых частиц с атомом водорода	305
Млодик Г. Г., Юшкин М. В., Соболев А. А., Горда С. Ю. Определение лучевых скоростей ОВ звезд в комплексах звздообразования S231—S235 и S254—S257	306
Моросеев Ф. В., Алексеев П. С. Симплектическая геометрия и сжатые состояния	307
Немченко Е. А. Тонкая структура профилей изгибного излу- чения пульсаров	308
Панфилов В. Е. Построение и исследование областей возмож- ных движений в обратных задачах орбитальной динамики ИСЗ	309
Парфёнов С. Ю., Поляков А. М., Цивилёв А. П., Собо- лев А. М. Влияние наличия 2S3 метастабильного уровня He на размеры и структуру зон ионизации H и He вокруг массивных звезд	310
Плахотский А. В. Моделирование аккреции в магнитных по- лярах в дрейфовом приближении	311
Сапронов А. Е. Оценка геодезического использования системы ГЛОНАСС	312
Сафутдинов Е. Р. Зондирование межзвездной плазмы сигналами радиопулсаров	313
Стародубцева Д. А. Черные дыры в моделях с некомпактными дополнительными измерениями	313
Старцева М. А. Фотометрия галактик трех массивных рентге- новских групп	314
Судов Л. Н. Кинематическое уравнение для близпараболиче- ского кеплерова движения	315
Хайбрахманов С. А. Ионизационное состояние аккреционных дисков молодых звезд	316

Хайруллина А. И., Ситдикова Р. А. Исследование топографии избранных участков лунной территории методами орбитальной цифровой фотограмметрии	317
Хоперсков С. А. Динамика сверхбыстрых звезд (HVS) с учетом триаксильности гало и балджа	318
Тезисы кратких сообщений	319
Алексейчук Р. А., Коваленко И. Г. Влияние турбулентности на характер течения межзвездного газа при пересечении галактической ударной волны	319
Балуев Р. В. О поиске периодических компонент в наблюдательных данных	320
Бисенгалиев Р. А., Мусцевой В. В. МГД-центробежная неустойчивость солнечной магнитной аркадной структуры	321
Гунаев К. А., Михальев Б. Б. Корональные магнитные аркады и корональные электрические токи	322
Дремова Г. Н., Тутуков А. В. Роль темного вещества в динамической эволюции скопления галактик в рамках задачи N тел	323
Дубас О. М. Особенности построения доверительных областей в нелинейных задачах оценивания	324
Зубарева А. М., Антипин С. В. Фотометрия MT Dra в 2008 г.	325
Кайгородов П. В. Механизм пополнения оболочки полуразделенной тесной двойной звезды	326
Кирсанова М. С., Вибе Д. З., Соболев А. М. Химико-динамическая эволюция газа вблизи расширяющейся зоны НII	327
Островский А. Б., Соболев А. М. Мазерные источники метанола на 12.178 ГГц	328
Павлюченков Я. Н., Лаунхардт Р. Открытие и моделирование вращающегося истечения у протопланетного диска CB26	329
Рябова М. В. Моделирование соотношения масса—металличность для карликовых сфероидальных галактик Местной группы	330
Соловьев А. А., Киричек Е. А., Шаповалов В. Н. Новая постановка магнитогидростатической задачи и проблема солнечных вспышек	331
Усанин В. С. Динамическая эволюция частиц, выброшенных из кометы Холмса	332
Фатеева А. М., Кайгородов П. В. Оболочки полуразделенных предконтактных двойных звезд	333
Чувашов И. Н. Численное моделирование движения систем ИСЗ в сфере параллельного вычисления	334

Шайдулин В. Ш., Холшевников К. В. Соотношения между нормами сферических функций в представлении геопотенциала	335
Шугаров А. С. Современные панорамные приемники излучения оптического и УФ-диапазона	336
Эскин Б. Б. Экзопланетные системы: некоторые особенности орбит	337
Стендовые доклады	338
Боли П. Э., Соболев А. М., Моисеев А. В., Юшкин М. В. Результаты спектроскопических наблюдений молодого звездного объекта S235B на 6-м телескопе БТА САО РАН	338
Балуев Р. В. Резонансные конфигурации планетной системы HD37124	339
Бирюкова Е. С. Новый численный метод решения ограниченной круговой задачи трех тел	340
Захаров В. И., Грибанов К. Г., Береснев С. А., Калинин А. А., Шагабутдинов А. И. Фурье-станция для спектрометрии атмосферы и Солнца в Коуровской астрономической обсерватории	341
Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кузнецов Э. Д. Наблюдения низкоорбитальных объектов на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории в 2008 г.	342
Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кайзер Г. Т., Кузнецов Э. Д. Результаты наблюдений геосинхронных спутников на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории в 2008 г.	343
Кирсанова М. С., Павлюченков Я. Н. Образование спектральных линий излучения атомов и молекул вокруг молодой массивной звезды	344
Кожевников В. П. Обнаружение когерентных колебаний блеска с периодом 769.6 секунды в катаклизмической переменной EI UMa	345
Кожевникова А. В., Свечников М. А., Кожевников В. П. Пятенная активность затменной переменной маломассивной системы CM Drg	346
Кузнецов Э. Д., Кайзер Г. Т., Гламазда Д. В., Вибе Ю. З. Результаты наблюдений избранных геосинхронных спутников на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории	347
Никифорова Т. П., Кожевникова А. В. Наблюдения частных фаз солнечного затмения 01.08.2008 в АО УрГУ	348
Ромашин Г. С. Проблема орбитального момента	349

Салий С. В., Соболев А. М. Исследование диагностических возможностей серии линий метанола на частоте ~ 145 ГГц .	350
Соболев А. М., Цивилёв А. П., Смирнов Г. Т., Ниязгулова С. Ю., Парфёнов С. Ю. Наблюдения водяных мазеров в окрестностях G173 на радиотелескопе РТ-22 ФИАН	351
Шелемей О. В., Островский А. Б., Gaylard M. J., Соболев А. М. Распределение источников излучения в мазерной линии метанола на 12 ГГц в Галактике	352
Шелемей О. В., Соболев А. М., Крушинский В. В., Моисеев А. В. Скопление аккрецирующих объектов в районе звездообразования S235A-B-C	353
Из истории науки	354
Левитская Т. И. Г. А. Федосеев — геодезист и писатель (к 110-летию со дня рождения)	355
Литературные страницы	362
Холшевников К. В. О прямохождении в искривленном мире .	363
Калинина Н. Д.	365
Соловьев А. А.	367
Сильченко О. К. Зов Неба	371
Список участников	389

Научное издание

Физика Космоса

Труды 38-й Международной
студенческой научной конференции
Екатеринбург, Россия,
2—6 февраля 2009 г.

Редактор Т. А. Федорова
Оригинал-макет — Е. А. Аввакумова, Э. Д. Кузнецов,
А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 20.01.09. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.
Уч.-изд. л. 25,5. Усл. печ. л. 23,0
Тираж 160 экз. Заказ .

Издательство Уральского университета
620083, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.
Отпечатано в ИПЦ «Издательство УрГУ»
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.
Тел. (343)350-56-64.

ISBN 5-7996-0405-9

