

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ф И З И К А К О С М О С А

Труды 43-й Международной
студенческой научной конференции

Екатеринбург

3—7 февраля 2014 г.

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2014

УДК 524.4
Ф503

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 федеральный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Физика Космоса : Тр. 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3—7 февр. 2014 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 282 с.

ISBN 978-5-7996-1081-4

В сборнике представлены доклады и сообщения студенческой научной конференции, которая ежегодно проводится в Астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Цель конференции — обобщить достижения в области астрономии и астрофизики и способствовать формированию навыков и способностей молодых исследователей.

Сборник предназначен для профессиональных астрономов и физиков, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 524.4

ISBN 978-5-7996-1081-4

© Уральский федеральный
университет, 2014

ФИЗИКА КОСМОСА
43-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Организаторы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра астрономии и геодезии
Астрономическая обсерватория

3—7 февраля 2014 г.

Екатеринбург, Россия

Научный организационный комитет:

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский федеральный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), В. Ф. Есипов (ГАИШ МГУ), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский федеральный университет), М. Г. Мингалиев (САО РАН), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), А. М. Соболев (Уральский федеральный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Жюри конкурса студенческих научных работ

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Э. Боли (Институт радиоастрономии общества Макса Планка (MPIfR), Германия), А. И. Васюнин (Университет г. Лидса, Великобритания), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (Институт прикладной физики РАН), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет)

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района г. Екатеринбурга

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Материалы конференции



Septem artes liberales.
Гравюра. XV в.

Обзорные лекции

П. Э. Боли

Институт радиоастрономии общества Макса Планка (MPIfR),
Германия

ИНФРАКРАСНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ И ИЗУЧЕНИЕ МАССИВНЫХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Излагаются введение в теорию и практику инфракрасной интерферометрии на примере изучения массивных молодых звездных объектов, основы интерферометрии, а также наблюдаемые параметры и критерии их выбора. Обсуждаются последние достижения в интерферометрических исследованиях массивных молодых звездных объектов.

An introduction to the theory and practical aspects of infrared interferometry is given in the context of the study of massive young stellar objects. Basic interferometric concepts, as well as observable quantities and their use, are presented. Recent advancements in interferometric studies of massive young stellar objects are discussed.

Введение

Звезды с массой $\gtrsim 8 M_{\odot}$ (такие звезды в данной обзорной лекции будут называться «массивными») составляют менее 0.4 % от общего числа всех звезд, сформированных в настоящую эпоху Вселенной. Несмотря на это, по разным оценкам, считается, что при рождении нового «населения» звезд примерно 17 % всеобщей звездной массы приходится именно на них [1]. Массивные звезды очень сильно влияют как на ближайшую окрестность, так и на содержащие их галактики.

Подавляющее число массивных звезд формируются в звездных скоплениях [2, 3], образовавшихся в плотных молекулярных облаках. Из-за своих высоких температур и светимостей массивные звезды способны ионизовать огромные объемы в окружающей межзвездной среде. Это сильное излучение может даже ионизовать плотные диски вокруг соседних звезд, результатом чего может служить частичное

или полное разрушение околозвездных дисков [4, 5]. В то же время расширение ионизованной зоны разгоняет окружающий газ, что может довести до рассеивания родительского молекулярного облака и, следовательно, приостановить дальнейшее образование звезд в районе.

Большую часть времени своего существования ($\sim 10\text{--}30$ млн лет) массивные звезды превращают водород в гелий в своих недрах за счет процесса нуклеосинтеза. После ухода звезды с главной последовательности образуются более тяжелые элементы вплоть до железа. Образование *еще* более тяжелых элементов происходит, когда исчерпываются запасы ядерного топлива и массивная звезда взрывается как сверхновая. Этот великолепный взрыв разбрасывает материал в межзвездную и межгалактическую среды, таким образом обогащая их тяжелыми элементами, которые очень важны для жизни и ряда физических процессов (в том числе и для радиативного охлаждения при коллапсе молекулярных облаков и протозвездных ядер).

Несмотря на важность роли, которую играют массивные звезды в звездных скоплениях и галактической эволюции в целом, о механизмах их образования и формирования известно довольно мало. Основным препятствием в образовании массивной звезды раньше считалось то, что (при сферической симметрии) давление излучения на падающее на звезду вещество должно превзойти силу тяготения довольно рано в процессе коллапса протозвездного ядра, таким образом приостановив коллапс и ограничив массу звезды [6, 7]. Однако эта проблема решается в теоретических расчетах, если коллапс имеет не сферический, а дискообразный вид [8–10]. Тем не менее эти диски наблюдаются вокруг массивных звезд с трудом (если они вообще наблюдаются, см. ниже), и сказать что-нибудь точно о них с точки зрения наблюдений пока крайне сложно (более подробное обсуждение теоретической стороны этой проблемы см. в работе R. Kuiper [11]).

В лекции речь пойдет о так называемых массивных молодых звездных объектах (MYSOs — Massive Young Stellar Objects — в англоязычной литературе). Данная классификация установлена наблюдательным путем и не имеет единого определения, но в ходе лекции ими будут условно считаться «глубоко погруженные объекты со светимостью $\gtrsim 10^4 L_{\odot}$ ». Примечательно, что масса в это определе-

ние напрямую не входит и что политкорректный термин «звездный объект» просто скрывает наше великое невежество, когда речь идет о таких объектах¹.

Наблюдения MYSOs осложняются двумя неизбежными фактами. Во-первых, из-за чрезмерно быстрой эволюции массивные звезды уже находятся на главной последовательности к тому моменту, когда они становятся видны в оптическом диапазоне (до этого они погружены в плотный газ молекулярного облака и/или околозвездной оболочки, где поглощение света большое — $A_V \approx 10\text{--}100$ звездных величин). Поэтому наблюдения MYSOs в оптическом диапазоне невозможны. Во-вторых, массивные звезды и так по существу своему редки, что, как уже сказано, ведет к тому, что они в среднем расположены на относительно больших расстояниях от нас ($\gtrsim 1$ кпк). Следовательно, в стандартных режимах наблюдений на единичных телескопах с диаметром вплоть до ~ 10 м MYSOs не разрешаются из-за дифракционного предела: они выглядят как точечные объекты.

Тем не менее в последнее десятилетие был осуществлен ряд работ, в которых тем или иным наблюдательным способом удается обойти дифракционный предел. Особое место занимает инфракрасная интерферометрия, в которой одновременно используются несколько телескопов. *Эффективный* диаметр таких интерферометров сегодня составляет десятки или сотни метров, что позволяет достигать пространственного разрешения до $\sim 0.001''$. В то же время эти интерферометры работают на длинах волн $\sim 1\text{--}13$ мкм (в зависимости от прибора), где поглощение света за счет оболочки гораздо слабее, чем в оптическом диапазоне.

Астрономическая интерферометрия

Интерферометрическая видность

Одним из важнейших характеристик любого астрономического измерения является его *угловое разрешение*, которое в общем случае зависит от длины волны, применяемых измерительных приборов, атмосферных условий и т. д.

¹ Например, каков спектральный класс объекта? Происходят ли в нем ядерные реакции? Не на главной последовательности ли он, и как это определить? И так далее.

В области астрономии интерферометрия — это режим наблюдения, при котором когерентно складываются вместе сигналы нескольких телескопов (или нескольких апертур одного телескопа). Достигнутое таким образом угловое разрешение зависит от расстояния между телескопами (так называемого базиса) и может на порядок превысить разрешение отдельных составляющих интерферометр телескопов. Первые интерферометрические астрономические наблюдения были проведены для измерения диаметров ближайших звезд Майкельсоном и Писом в 1921 г. [12].

Самой главной величиной любых интерферометрических наблюдений является интерферометрическая видность V . Эта величина включает в себя фазу и интенсивность интерференционной картины, и, согласно теореме Ван Циттерта—Цернике, равна преобразованию Фурье распределения интенсивности I :

$$V(u, v) = \frac{\int \int I(\alpha, \beta) e^{-2\pi i(u\alpha + v\beta)} d\alpha d\beta}{\int \int I(\alpha, \beta) d\alpha d\beta}, \quad (1)$$

где α, β — угловые координаты (например, в угловых секундах); u, v — угловые частоты (в обратных единицах). Таким образом, если при помощи интерферометра измерить V (или часть этой величины, например ее амплитуду или фазу) для конечной выборки пространственных частот, мы получим некую информацию о распределении интенсивности I (или, простыми словами, как выглядит наш астрономический объект). Распределение измерений V по uv -пространству называется uv -покрытием. Чем лучше uv -покрытие, тем вернее наши представления о распределении интенсивности I . Следует отметить, что в пределе бесконечно многих измерений видности V на всех пространственных частотах (u, v) функцию $I(\alpha, \beta)$ можно получить в полном виде посредством обратного преобразования Фурье.

Пример использования интерферометрической видности

Вышеизложенное соотношение интерферометрической видности с распределением интенсивности довольно абстрактное для первого ознакомления с интерферометрией. В этом разделе приводится пример использования наблюдений видности V для измерения диаметра звезды.

В первом приближении наблюдаемую плоскость звезды можно описать как однородный диск. Функция видности такого диска имеет

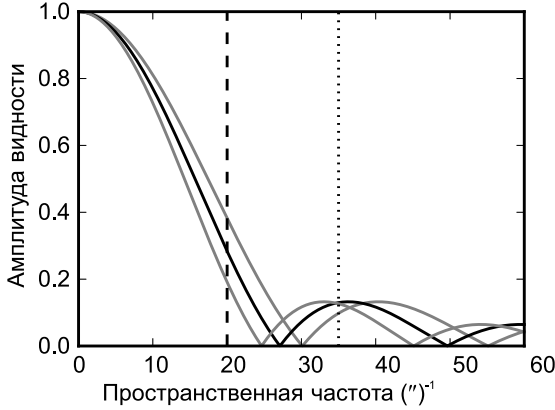


Рис. 1. Функция видности однородного диска с диаметром $0.047''$ (черная кривая) и аналогичные функции для диска с диаметром на 10 % меньше и больше (серые кривые). Штрихованной линией указана одна частота, на которой достаточно легко различить эти три кривые и соответственно определить диаметр звезды в данном примере. Точечной линией указана другая частота, на которой гораздо сложнее однозначно определить диаметр звезды

следующий вид [13]:

$$V(u, v) = 2 \frac{J_1(\pi\Theta\sqrt{u^2 + v^2})}{\pi\Theta\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (2)$$

где Θ — угловой диаметр диска; J_1 — функция Бесселя первого рода и первого порядка. Так как функция видности зависит от всего одного параметра (диаметра диска), измерение видности на одной лишь частоте *может быть* (в зависимости от частоты) достаточно, чтобы определить звездный диаметр. На рис. 1 показана функция видности диска с диаметром $0.047''$ (это диаметр Бетельгейзе, измеренный Майкельсоном и Писом в 1921 г. [12]) вместе с функциями видности для диска с диаметром на 10 % больше и меньше того значения. Очевидно, что эти кривые пересекаются в некоторых местах, и возможность их различить зависит от того, на какой пространственной частоте проводятся наблюдения (что зависит в первую очередь от базиса — расстояния между телескопами). Хотя, если хорошо подобрать пространственную частоту или проводить наблюдения на

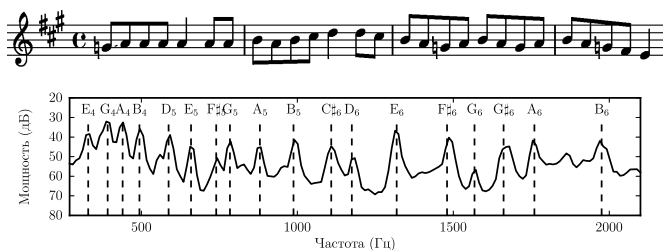


Рис. 2. Нотная запись открывающей фразы песни «Salt Creek» (сверху). Спектральное распределение мощности звуковой записи данной фразы, воспроизведенной на мандолине. Штриховыми линиями указаны частоты отдельных музыкальных звуков (снизу)

нескольких частотах, диаметр звезды можно определить с большой точностью (следует отметить, что *правильность* этого определения все-таки зависит от того, насколько справедливо предположение о том, что звезда выглядит как однородный диск).

Таким образом, если можно построить простую модель распределения интенсивности интересующего нас объекта, то достаточно «легко» найти параметры той модели. С другой стороны, если объект имеет более сложный вид или вообще невозможно заранее его предсказать, задача намного усложняется; ее решение обычно требует хорошего *uv*-покрытия.

Музыкальная аналогия

Чтобы почувствовать суть задачи, когда исходная форма распределения интенсивности I полностью нам неизвестна, рассмотрим музыкальную аналогию. На рис. 2 представлены нотная запись короткой фразы из песни «Salt Creek» (сверху) и спектральное распределение мощности (СПМ) звуковой записи той же фразы. СПМ равно амплитуде преобразования Фурье среднего по времени звукового сигнала, поэтому спектр мощности можно считать аналогом функции видности.

Сейчас представим, что мы умеем измерять СПМ только на отдельных (звуковых) частотах. На рис. 2 видно, что повышения мощности приходятся на соответствующие музыкальным тонам частоты, поэтому по дискретным измерениям спектра мощности достаточно легко судить об относительной важности различных нот. Если хо-

рошо подобрать 10—20 частот (что напоминает реальную ситуацию в инфракрасной интерферометрии), то заметим, что повышенная мощность наблюдается на частотах, соответствующих нотам А, В, С \sharp , D, E, F \sharp и G \sharp . Отсюда следует, что исходный «сигнал» воспроизводился в тональности или ля мажор, или фа-диез минор. Если постараться, то можно заметить маленький пик на частоте ноты G \flat , что говорит о том, что лад данного воспроизведения не мажорный и не минорный, а на самом деле миксолидийский.

Такой анализ спектра мощности дает очень тонкую информацию об исходной звуковой записи — даже при сравнительно небольшом количестве измерений. То, что исходный звуковой сигнал, в общем, музыкальный, позволяет сразу получить его тональность и лад. Имея опыт в анализе преобразования Фурье музыкальных произведений, нетрудно представить, что мы сможем в будущем различать, например, какие музыкальные инструменты использовались, в каком они состоянии, какого жанра композиция и какие этнические элементы в ней присутствуют. . . Но такой анализ, увы, нам никогда не скажет, как песня *звучит*. Так же как и в астрономической интерферометрии, наблюдения функции видности не дает нам *картину* (хотя существует несколько способов для «реконструкции» картин из интерферометрических наблюдений).

Применение инфракрасной интерферометрии для изучения массивных молодых звездных объектов

Сегодня (или в недавнем прошлом) в мире действуют несколько инфракрасных интерферометров, таких как ISI [14], CHARA [15], Keesk-I [16] (демонтирован). Но подавляющее большинство интерферометрических работ по массивным молодым звездным объектам на инфракрасных длинах волн было сделано на VLTI Европейской южной обсерватории на приборах AMBER (1—2.4 мкм, три телескопа) [17] и MIDI (8—13 мкм, два телескопа) [18].

Первые шаги

Работы по массивным молодым звездным объектам с использованием инфракрасных интерферометров начали публиковаться только в 2007 г. В одной из первых работ de Wit и др. [19] представили амплитуду видности в полосе N (8—13 мкм) для одной точки в

uv -пространстве для объекта W33A (расстояние 3.8 кпс, светимость $\sim 10^5 L_{\odot}$). В отличие от представленного выше примера со звездным диаметром, в котором предполагалось, что исходная форма распределения интенсивности имеет вид однородного диска, тут форма распределения интенсивности заранее неизвестна. Поэтому одинарная точка в uv -пространстве, кажется, не так уж показательна. Однако благодаря именно этим интерферометрическим наблюдениям впервые для молодой звезды были установлены наличие «теплого» (~ 300 К) вещества и его примерные размеры (100—200 а. е.).

Более сложное моделирование интерферометрических наблюдений объекта MWC 297 (расстояние 250 пк, светимость $\sim 10^4 L_{\odot}$) в полосах H (1.6—2.0 мкм), K (2.0—2.4 мкм) и N было сделано авторами Аске и др. [20]. В этой работе используется простая модель, составленная из гауссовых компонентов, которые излучают как черные тела. Данная модель хорошо описывает интерферометрические данные и спектральное распределение энергии (рис. 3) и указывает на наклоненную структуру с размером $\lesssim 1.5$ а. е., при этом с минимальным комплектом свободных параметров (их всего семь).

Интерферометрия и модели переноса излучения

Начиная с 2009 г. начали публиковаться работы с общей методикой использования сетки из 200 000 моделей переноса излучения от Robitaille и др. [21]. Такая тактика привлекательна тем, что она позволяет посчитать видность и спектральное распределение энергии для сложных распределений вещества, например в виде околозвездного диска и/или оболочки. В работах [22–27] эти относительно сложные модели использовались для подгонки спектрального распределения энергии; интерферометрические наблюдения в основном применялись только для того, чтобы исключить неподходящие модели. К сожалению, из-за большого количества свободных параметров и высокого вырождения в данном подходе остается место для сомнения в интерпретации интерферометрических наблюдений массивных молодых звездных объектов.

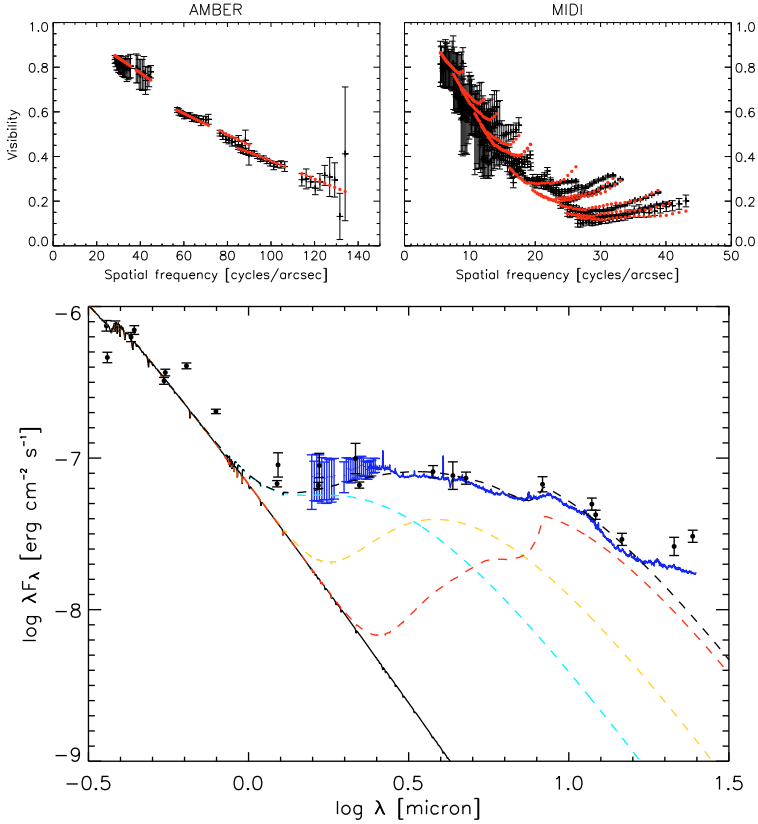


Рис. 3. Видность в ближнем (слева) и среднем (справа) инфракрасном диапазоне для объекта MWC 297. Наблюдения показаны с усами; модельные значения показаны точками (сверху). Спектральное распределение энергии. Верхняя точечная линия изображает суммарное излучение модели (снизу). Рисунок из работы [20]

Первое интерферометрическое изображение массивного молодого звездного объекта

Очень важное развитие в изучении массивных молодых звезд было сделано авторами Kraus и др. [25] в 2010 г. Благодаря превосходному заполнению uv -плоскости им удалось получить первое реконструированное изображение объекта IRAS 13481-6124 (расстояние 3.6 кпк, светимость $\sim 3-6 \times 10^4 L_\odot$) на длине волны 2.2 мкм.

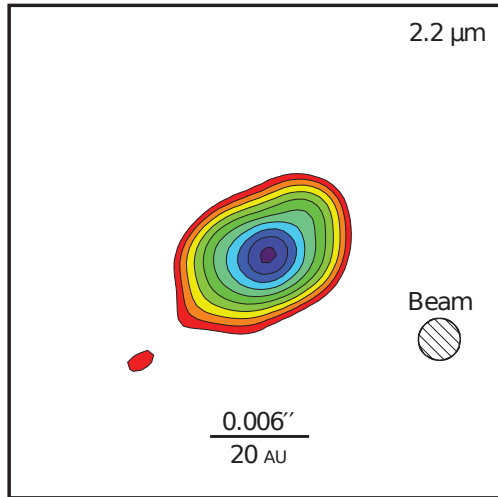


Рис. 4. Первое реконструированное интерферометрическое изображение массивного молодого звездного объекта IRAS 13481-6124. Рисунок из работы [25]

Методика реконструкции изображений очень хороша тем, что она дает независимое от моделей изображение (в отличие от использованных в предыдущих двух разделах приемов). Однако ее можно использовать только тогда, когда имеется отличное заполнение uv -плоскости, что требует много наблюдательного времени.

Полученное изображение (рис. 4) показывает вытянутую структуру, которая перпендикулярна крупномасштабному молекулярному истечению. Это пока единственное изображение массивного молодого звездного объекта, в котором разрешается излучение от теплой околозвездной пыли на масштабе десятков астрономических единиц. Авторы работы считают, что показанная на рис. 4 структура суть околозвездный диск. Однако эта гипотеза была сделана на основе подобранных моделей переноса излучения (см. выше), стоит рассмотреть другие возможности (Boley, Kraus и др., готовится к печати).

Интерферометрический обзор массивных молодых звездных объектов

Все вышеперечисленные работы были сосредоточены на изучении отдельных объектов. Общее количество рассмотренных таким образом объектов не превышает десяти, при этом в каждой работе формируются различные допущения и применяются различные подходы. В связи с этим авторами Voley и др. [28] был представлен интерферометрический обзор в полосе N для выборки из 25 объектов высокой и средней массы. Относительно простой геометрический анализ в этой работе избегает излишних сложностей, чтобы претендовать на более или менее однородное рассмотрение совокупности наблюдений.

На рис. 5 показаны результаты подгонки одномерных («1D», «1DOH») и двумерных («2DOH», «2D1D») гауссовых моделей к интерферометрическим наблюдениям вместе с направлением истечения или дисков (если есть о них информация в опубликованной литературе). Размерность использованной гауссовой модели зависит от uv -покрытия, когда возможно, используется двумерная модель.

Примечательно, что компактное излучение в среднем инфракрасном диапазоне разрешалось для 20 из 25 объектов, что говорит о широком распространении «теплого» околозвездного вещества на расстоянии десятков астрономических единиц вокруг молодых массивных звезд. Дальше, когда uv -покрытие допускает использование двумерной модели, как правило, наблюдается значительное отклонение от сферической симметрии. Чаще всего это компактное излучение вытянуто перпендикулярно направлению истечения или параллельно диску (например, AFGL 2136, IRAS 13481-6124, R Mon), хотя стоит подчеркнуть, что иногда получается совсем наоборот (например, Mon R2 IRS3A, M8E-IR).

Заключение

Лекция была посвящена основам астрономической интерферометрии в инфракрасном диапазоне. Особое внимание было уделено изучению массивных молодых звездных объектов, однако представленные методы также применимы и для изучения других

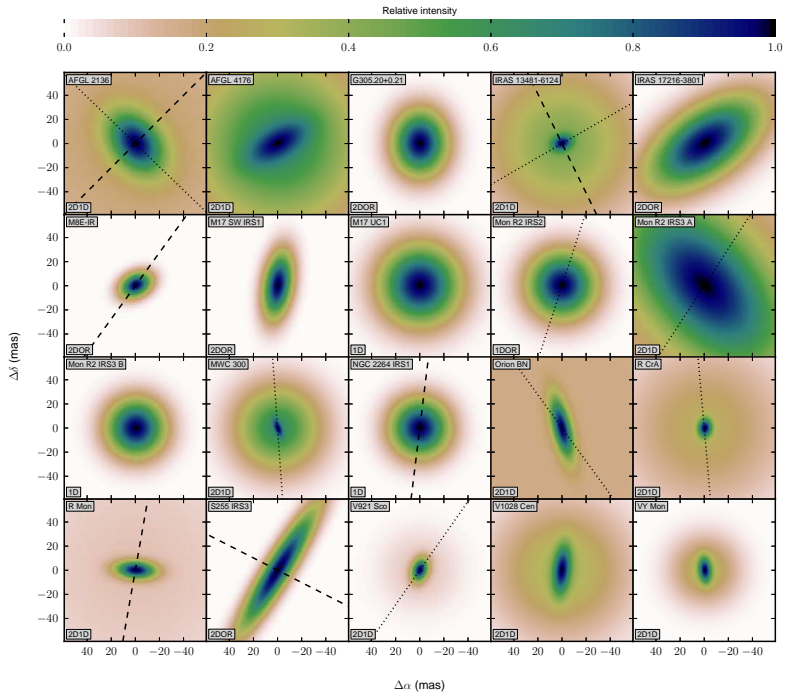


Рис. 5. Результаты подгонки гауссовых моделей к интерферометрическим наблюдениям для двадцати молодых звездных объектов высокой и средней массы. Точечными линиями показаны позиционный угол диска (если он есть), штрихованными — позиционный угол истечения (если он есть). Подписями снизу указано, какая модель использовалась — в зависимости от uv -покрытия — для подгонки. Рисунок взят из работы [28]

объектов (в том числе кратных систем, звезд типа Хербига и Т Тельца, проэволюционировавших звезд, галактик с активными ядрами, планетных систем и т. д.).

Благодаря инфракрасной интерферометрии впервые становится возможным разрешение околозвездного материала вокруг массивных звезд на актуальных для аккреционных процессов масштабах. Это означает, что именно сейчас открывается новая территория в области образования массивных звезд. Первые наблюдения, хотя и

сильно ограничены, уже доставляют нам уникальную информацию об этих объектах. Разумеется, в скором будущем можно ожидать развития как самих интерферометрических приборов, так и методов анализа интерферометрических данных.

Наконец, для заинтересованного читателя рекомендуются обзорные статьи [29] (по формированию массивных звезд) и [30] (по использованию инфракрасной интерферометрии для изучения молодых массивных звезд).

Библиографические ссылки

1. *Kroupa P.* On the variation of the initial mass function // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2001. — Vol. 322. — P. 231–246.
2. *de Wit W. J., Testi L., Palla F. et al.* The origin of massive O-type field stars. I. A search for clusters // Astron. Astrophys. — 2004. — Vol. 425. — P. 937–948.
3. *de Wit W. J., Testi L., Palla F., Zinnecker H.* The origin of massive O-type field stars: II. Field O stars as runaways // Astron. Astrophys. — 2005. — Vol. 437. — P. 247–255.
4. *O'Dell C. R., Wen Z., Hu X.* Discovery of new objects in the Orion nebula on HST images - Shocks, compact sources, and protoplanetary disks // Astrophys. J. — 1993. — Vol. 410. — P. 696–700.
5. *Fang M., van Boekel R., Wang W. et al.* Star and protoplanetary disk properties in Orion's suburbs // Astron. Astrophys. — 2009. — Vol. 504. — P. 461–489.
6. *Kahn F. D.* Cocoons around early-type stars // Astron. Astrophys. — 1974. — Vol. 37. — P. 149–162.
7. *Wolfire M. G., Cassinelli J. P.* Conditions for the formation of massive stars // Astrophys. J. — 1987. — Vol. 319. — P. 850–867.
8. *Yorke H. W., Sonnhalter C.* On the Formation of Massive Stars // Astrophys. J. — 2002. — Vol. 569. — P. 846–862.
9. *Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F.* Radiation-Hydrodynamic Simulations of Collapse and Fragmentation in Massive Protostellar Cores // Astrophys. J. — 2007. — Vol. 656. — P. 959–979.
10. *Kuiper R., Klahr H., Beuther H., Henning T.* A solution to the radiation pressure problem in the formation of massive stars // arXiv 1211.7064. — 2012.

11. *Kuiper R. G.* Modeling the formation of massive stars : Ph.D. thesis / Ruperto-Carola University of Heidelberg. — 2009.
12. *Michelson A. A., Pease F. G.* Measurement of the diameter of alpha Orionis with the interferometer // *Astrophys. J.* — 1921. — Vol. 53. — P. 249–259.
13. *Berger J. P., Segransan D.* An introduction to visibility modeling // *New Astron. Rev.* — 2007. — Vol. 51. — P. 576–582.
14. *Hale D. D. S., Bester M., Danchi W. C. et al.* The Berkeley Infrared Spatial Interferometer: A Heterodyne Stellar Interferometer for the Mid-Infrared // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 537. — P. 998–1012.
15. *ten Brummelaar T. A., McAlister H. A., Ridgway S. T. et al.* First Results from the CHARA Array. II. A Description of the Instrument // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 628. — P. 453–465.
16. *Tuthill P. G., Monnier J. D., Danchi W. C. et al.* Michelson Interferometry with the Keck I Telescope // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2000. — Vol. 112. — P. 555–565.
17. *Petrov R. G., Malbet F., Weigelt G. et al.* AMBER, the near-infrared spectro-interferometric three-telescope VLTI instrument // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 464. — P. 1–12.
18. *Leinert C., Graser U., Przygodda F. et al.* MIDI — the 10 μm instrument on the VLTI // *Astrophys. Space. Sci.* — 2003. — Vol. 286. — P. 73–83.
19. *de Wit W. J., Hoare M. G., Oudmaijer R. D., Mottram J. C.* VLTI/MIDI 10 μm Interferometry of the Forming Massive Star W33A // *Astrophys. J. Lett.* — 2007. — Vol. 671. — P. L169–L172.
20. *Acke B., Verhoelst T., van den Ancker M. E. et al.* MWC 297: a young high-mass star rotating at critical velocity // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 485. — P. 209–221.
21. *Robitaille T. P., Whitney B. A., Indebetouw R. et al.* Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. I. A Grid of 200,000 YSO Model SEDs // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2006. — Vol. 167. — P. 256–285.
22. *Linz H., Henning T., Feldt M. et al.* Mid-infrared interferometry of massive young stellar objects. I. VLTI and Subaru observations of the enigmatic object M8E-IR // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 505. — P. 655–661.

23. *de Wit W. J., Hoare M. G., Oudmaijer R. D., Lumsden S. L.* The origin of mid-infrared emission in massive young stellar objects: multi-baseline VLTI observations of W33A // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 515. — P. A45.
24. *Follert R., Linz H., Stecklum B. et al.* Mid-infrared interferometry of massive young stellar objects. II. Evidence for a circumstellar disk surrounding the Kleinmann-Wright object // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 522. — P. A17.
25. *Kraus S., Hofmann K.-H., Menten K. M. et al.* A hot compact dust disk around a massive young stellar object // *Nature.* — 2010. — Vol. 466. — P. 339–342.
26. *de Wit W. J., Hoare M. G., Oudmaijer R. D. et al.* Mid-infrared interferometry towards the massive young stellar object CRL 2136: inside the dust rim // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 526. — P. L5.
27. *Grellmann R., Ratzka T., Kraus S. et al.* Mid-infrared interferometry of the massive young stellar object NGC 2264 IRS 1 // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 532. — P. A109.
28. *Boley P. A., Linz H., van Boekel R. et al.* The VLTI/MIDI survey of massive young stellar objects. Sounding the inner regions around intermediate- and high-mass young stars using mid-infrared interferometry // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A24.
29. *Beuther H., Churchwell E. B., McKee C. F., Tan J. C.* The Formation of Massive Stars // *Protostars and Planets V.* — P. 165–180.
30. *de Wit W. J.* Advances in Understanding Young High-Mass Stars Using Optical Interferometry // *Circumstellar Dynamics at High Resolution* / ed. by A. C. Carciofi, T. Rivinius : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2012. — Vol. 464. — P. 329.

ОРГАНИЧЕСКИЕ МОЛЕКУЛЫ В РЕГИОНАХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

В лекции будут рассмотрены вопросы образования сложных органических молекул на различных стадиях звездообразования. Будут представлены имеющиеся наблюдательные данные о сложных молекулах, возможные химические процессы, ведущие к образованию и разрушению молекул, а также новые результаты численного моделирования химической эволюции регионов звездообразования. Также будет обсуждаться ожидаемый в ближайшие годы прогресс в понимании того, как далеко может зайти процесс образования сложных молекул в космосе.

In the lecture, formation of complex organic molecules on various stages of star formation will be discussed. I will review existing observational data on complex molecules, major chemical processes leading to their formation and destruction, and recent results of astrochemical modeling. Progress expected in near future in our understanding of how far can proceed build-up of complex organic molecules in space will also be discussed.

ПЫЛЬ В ЗОНАХ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

Наблюдения в инфракрасном диапазоне открыли путь к детальному исследованию свойств пыли в различных астрофизических объектах. Зоны ионизованного водорода оказались особенно привлекательными в этом отношении. Разнообразие условий позволяет использовать их в качестве природных лабораторий для исследования жизненного цикла межзвездных пылинок.

Observations in the infrared band pave the way to a detailed study of dust properties in a variety of astrophysical objects. Regions of ionized hydrogen proved to be especially rewarding in this respect. Diverse physical conditions allow using them as natural laboratories to investigate the lifecycle of interstellar dust grains.

Зоны ионизованного водорода

Водород — наиболее распространенный элемент в межзвездной среде (МЗС), и именно его состояние определяет физические условия в различных компонентах МЗС. Исторически изучение различных состояний водорода (ионы, нейтральные атомы, молекулы) применительно к МЗС началось с ионизованного водорода, то есть с водорода, атом которого в результате какого-то внешнего воздействия оказался разделен на свободный протон и свободный электрон.

В конце 30-х гг. XX в. были опубликованы результаты наблюдений бальмеровских линий водорода, в первую очередь линии $H\alpha$, как в отдельных туманностях, так и в более обширных областях Млечного Пути [1, 2]. Эти наблюдения, во-первых, показали, что именно водород, а не атомы и ионы металлов, наблюдавшиеся до этого, является основным элементом в МЗС; во-вторых, позволили высказать предположение о том, что значительная доля этого водорода ионизована.

Потенциал ионизации водорода высок — 13.6 эВ, а это означает, что для отрыва электрона от атома водорода требуется либо очень высокая температура, либо наличие поля излучения со значительным вкладом на длинах волн менее 912 Å. О том, что водород может ионизоваться в окрестностях горячих звезд, Эддингтон писал

еще в 1934 г. [3], однако он пришел к выводу, что в результате ионизации фотоны с нужной энергией будут настолько быстро «ликвидироваться» из полного спектра, что ионизацией будет охвачена лишь небольшая окрестность звезды, не играющая существенной роли в эволюции МЗС.

Эта точка зрения была пересмотрена в 1939 г. в классической работе Стрёмгрена [4], где он показал, что горячие звезды, и тем более их скопления, способны ионизовать водород в объеме, которым при рассмотрении эволюции МЗС пренебречь нельзя. Конкретно Стрёмгрен вывел радиус сферически-симметричной зоны вокруг горячей звезды, внутри которой водород практически полностью ионизован (она носит теперь имя зоны Стрёмгрена), и показал, что при плотности газа порядка 1 см^{-3} радиусы зон Стрёмгрена измеряются в десятках парсеков.

Стрёмгрен предполагал, что радиус зоны ионизованного водорода (для краткости зоны НП) определяется балансом процессов ионизации и рекомбинации, однако в реальности необходимо учитывать также динамические процессы. После формирования начальной зоны Стрёмгрена дальше область ионизованного водорода продолжает расширяться уже под воздействием давления ионизованного газа [5], который нагрет излучением центральной звезды до температуры 8 000—10 000 К. Поскольку горячие массивные звезды не рождаются в одиночестве, порожденные ими зоны НП постепенно сливаются. Клочковатое распределение вещества в областях звездообразования (ОЗО) заставляет зоны НП терять изначально правильную форму. В целом со временем область ионизованного водорода приобретает очень сложную структуру.

Области ионизованного водорода довольно легко поддаются наблюдениям. Их можно наблюдать и в радиодиапазоне (тормозное излучение ионизованного газа), и в инфракрасном (ИК) диапазоне (макромолекулы и пыль, нагретая центральной звездой или скоплением), и в эмиссионных линиях (как водорода, так и примесных элементов в оптическом, ИК и даже в радиодиапазоне). На оптических изображениях Млечного Пути и других галактик присутствие областей и комплексов ионизованного водорода выдается характерным розоватым свечением линии $\text{H}\alpha$.

Тип	Размер, пк	Плотность, см^{-3}
Гиперкомпактная	$\sim 3 \cdot 10^{-3}$	$\geq 10^6$
Ультракомпактная	$\leq 5 \cdot 10^{-2}$	$\geq 10^4$
Компактная	≤ 0.5	$\geq 5 \cdot 10^3$
Классическая	~ 10	$\sim 10^2$
Гигантская	≥ 50	~ 30

По размерам зоны НII разделяются на несколько категорий, перечисленных в таблице. Кажется логичным считать, что зоны НII различных размеров представляют собой различные эволюционные стадии этих объектов. Однако размер зоны НII зависит не только от ее возраста, но и от плотности окружающего вещества, и от температуры ионизирующей звезды (звезд), поэтому реальная ситуация, вероятно, сложнее.

Зоны НII относятся к числу объектов МЗС, пожалуй, наиболее хорошо изученных как теоретически, так и наблюдательно. Тому есть несколько причин. Во-первых, они связаны с одной из актуальных астрофизических проблем — ранней эволюцией массивных звезд. Во-вторых, на этапе гигантской области (комплекса) ионизованного водорода она начинает играть важную роль в общем энергетическом балансе МЗС. В-третьих, уплотнение газа расширяющимися зонами НII может приводить к индуцированию звездообразования [7].

В последние годы все больший интерес привлекает к себе еще один аспект исследований зон НII. Благодаря развитию наблюдательной техники инфракрасного диапазона появилась возможность использовать галактические и внегалактические зоны и комплексы НII в качестве лабораторий для исследования жизненного цикла космической пыли и макромолекул полициклических ароматических углеводородов [8].

Наблюдения пыли в галактических зонах НII

Первые указания на запыленность зон НII были получены по наблюдениям рассеянного излучения в туманности Ориона [9] и в ряде других известных зон НII [10]. Согласно этим наблюдениям концентрация пыли падает при приближении к ионизирующим звездам, по-

этому авторы указанных работ предположили, что из центральных частей зон ионизованного водорода пыль выдувается давлением излучения. С другой стороны, в работе [11] было отмечено, что в Туманности Ориона наряду с центральной «дырой» в распределении вещества наблюдается также аномальный закон покраснения, и если выдувание полости можно объяснить давлением излучения на пыль, то изменения в законе покраснения требуют предположения о разрушении пыли в этой области.

Развитие наблюдательного инструментария ИК-диапазона позволило изучать распределение пыли в зонах НП не только по рассеянному излучению, но и по собственному излучению пыли. Одним из основных результатов этих наблюдений также стало подтверждение существования в компактных и классических зонах НП внутренних полостей, где отношение газ—пыль превосходит среднее межзвездное значение (порядка 100) в десятки и сотни раз (см., например, [12]). Одно из основных теоретических объяснений происхождения этих полостей состояло в том, что они представляют собой развитие пылевых «коконов», изначально окружающих молодые массивные звезды [13–15], причем определяющую роль в этом процессе играет давление излучения.

Современное повышение интереса к исследованию распределения пыли в зонах ионизованного водорода связано с наблюдениями на космических телескопах ISO, «Спитцер», WISE и «Гершель». Эти наблюдения показали, что одним из распространенных объектов на инфракрасных картах Галактики являются «инфракрасные пузыри» — кольца или фрагменты колец, наблюдаемые на длине волны около 8 мкм [16, 17]. В пределах кольца также сосредоточена эмиссия на длинах волн порядка 100 мкм и более, тогда как эмиссия на длине волны 24 мкм видна не только в кольце, но и внутри него. При этом эмиссия на длине волны 24 мкм часто также имеет форму кольца меньших размеров (см., например, изображения в работе [18]).

Интерпретация наблюдений

Существуют три фактора, способных вызвать неоднородное распределение пылинок внутри зоны НП: давление излучения, разрушение пылинок и звездный ветер. Соответственно, исследуя пыль внутри зоны НП и на ее границе, мы получаем информацию не

только о физике самих пылинок, но и о процессах, определяющих эволюцию зоны. Однако для этого необходимо уметь анализировать ИК-излучение этих объектов.

Упрощенно пыль часто представляют, заменяя непрерывное распределение по размерам комбинацией трех дискретных населений [19]: крупных пылинок (КП), очень мелких пылинок (ОМП) и макромолекул полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). В первых моделях инфракрасного излучения галактических зон НП его связывали с равновесным тепловым излучением крупных пылинок (с радиусами порядка 10^{-5} см), сначала ледяных, затем графитовых и силикатных. Позже в модели стали включать дополнительные компоненты: ПАУ для объяснения эмиссионных полос в ближнем и среднем ИК-диапазонах и ОМП для объяснения непрерывного спектра на длинах волн порядка 20–30 мкм. Такое разделение, несмотря на простоту, позволяет схематично описать процессы, происходящие с пылью в зонах НП и в окружающих их фотодиссоциационных областях (ФДО).

Наиболее просто объясняется совпадение с плотной оболочкой на границе зоны НП эмиссии на длинах волн порядка 70–100 мкм и более. Это излучение генерируется относительно холодной пылью с температурой порядка 20–30 К [20], которая, очевидно, отсутствует во внутренней части зоны. Сложнее оказывается объяснить распределение эмиссии в среднем ИК-диапазоне (8–24 мкм). Для эмиссии вблизи 8 мкм, где предположительно доминируют полосы ПАУ, характерен довольно резкий обрыв при переходе из оболочки в ионизованный газ. Это свидетельствует, что отсутствие ПАУ связано с их разрушением ультрафиолетовым излучением звезды в ионизованной области. Однако в ряде «инфракрасных пузырей» эмиссия на длине волны 8 мкм наблюдается также в направлении на центр [18], причем ее интенсивность слишком велика, чтобы ее можно было объяснить излучением передней или задней части оболочки. В этом случае приходится допустить наличие в центральной части зоны НП либо ПАУ, либо крупных пылинок, нагретых до такой высокой температуры, что они становятся источником эмиссии на 8 мкм.

В туманности Конская Голова, «грива» которой также отмечает границу зоны НП, Компьен и др. [21], обнаружили, что при переходе из ФДО в ионизованную область ослабевают полосы, связанные с ионизованными ПАУ, однако относительно усиливается полоса на 11.3 мкм, предположительно принадлежащая нейтральным ПАУ. В этом случае падение интенсивности излучения на 8 мкм может

быть связано не с разрушением ПАУ, а с тем, что в зоне ионизованного водорода они становятся преимущественно нейтральными. Трудно предположить, что ПАУ нейтрализуются в ионизованном газе, поэтому возможно, что они не присутствовали там изначально, но появились в результате разрушения ОМП.

Еще сложнее ситуация с интерпретацией результатов наблюдений на длине волны 24 мкм. Моделирование спектров «обычной» МЗС и ФДО в данном диапазоне показывает, что основной вклад в этот диапазон вносит излучение очень мелких пылинок, испытывающих стохастический нагрев [19, 22–24]. Крупные пылинки в таких объектах не нагреваются до температуры, достаточной, чтобы стать источниками излучения на 24 мкм, но они могут достичь этой температуры в зонах НП. В частности, в работе Флэги и др. [25] показано, что при определенных предположениях о распределении пылинок по размерам в туманности М16 вклад КП в излучение на 24 мкм может оказаться сравнимым или даже превзойти вклад ОМП.

Эволюция пыли в галактических зонах НП

Суммируя результаты наблюдений пыли в зонах НП, можно сказать, что как внутри зон НП, так и в их оболочках присутствует пыль, которую можно условно разделить на три (как минимум) компонента. На присутствие крупных пылинок указывают эмиссия в дальнем ИК-диапазоне и рассеяние света в оптическом диапазоне. Признаком наличия ПАУ являются полосы в ближнем и среднем ИК-диапазоне, в том числе полоса на 8 мкм, предположительно принадлежащая ионизованным ПАУ, и полоса на 11.3 мкм, принадлежащая нейтральным ПАУ. На присутствие очень мелких пылинок указывают скорее косвенные признаки, в частности, свидетельства того, что они являются источником ПАУ, наблюдаемых внутри зон ионизованного водорода.

Согласно наблюдениям внутри многих зон НП (по крайней мере, развитых) имеются полости, практически свободные от пыли. В частности, признаком наличия этих полостей является отсутствие ИК-эмиссии из окрестностей центров многих зон НП. В последнее время в качестве основного фактора, очищающего внутреннее пространство зоны НП от пыли, называют звездный ветер. По крайней мере, в некоторых случаях это предположение оправданно, например, в случае зоны ионизованного водорода М17, где центральная полость является источником рентгеновского излучения [26].

С действием ветра связывают и кольцеобразную форму эмиссии на 24 мкм. С учетом этого предположения распределение пыли в зоне НП выглядит следующим образом. Внутри зоны имеется полость, из которой пылинки всех размеров выдуты звездным ветром. За пределами полости находится собственно зона ионизованного водорода, пыль в которой (стохастически нагреваемая мелкая или крупная с равновесной температурой) является источником эмиссии на 24 мкм. С внешней стороны зона НП ограничена плотной оболочкой, в которой рождаются ИК-полосы ПАУ в ближнем и среднем ИК-диапазонах, а также излучение в континууме дальнего ИК-диапазона, принадлежащее крупным холодным пылинкам.

Есть объекты, в которых наличие центральной полости, выдутой звездным ветром, неочевидно. Например, в туманности Трехдолная не видно признаков внутренней полости на длине волны 24 мкм. Вблизи скопления Трапеция, породившего зону НП в Туманности Ориона, наблюдается эмиссия в силикатной особенности на длине волны около 10 мкм, что говорит о наличии силикатных пылинок в непосредственной окрестности ионизирующих звезд. Здесь возможно как минимум два объяснения. Во-первых, центральная область, обедненная пылью, может возникать под действием давления излучения или разрушения — факторов, по-разному воздействующих на пылинки разных размеров. Во-вторых, высказывалось предположение, что внутри полости «запасы» пыли могут пополняться в результате фотоиспарения попавших в полость протопланетных дисков и глобул [27]. Этим же может объясняться и наличие центральной эмиссии на 8 мкм.

В целом приходится признать, что полученные на сегодняшний день данные наблюдений в инфракрасном диапазоне не позволяют пока построить целостную картину эволюции пыли в зонах ионизованного водорода. До сих пор остаются неисследованными такие факторы, как дрейф заряженных пылинок в зоне НП под действием давления излучения и магнитного поля или разрушение ОМП с превращением в ПАУ. Для всего этого требуются детальные численные модели, разработка которых только начинается [28].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-02-00642.

Библиографические ссылки

1. *Struve O., van Biesbroeck G., Elvey C. T.* The 150-foot nebular spectrograph of the McDonald Observatory // *Astrophys. J.* — 1938. — Vol. 87. — P. 559.
2. *Struve O., Elvey C. T.* Emission nebulosities in Cygnus and Cepheus. // *Astrophys. J.* — 1938. — Vol. 88. — P. 364.
3. *Eddington A. S.* The density of interstellar calcium and sodium // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1934. — Vol. 95. — P. 2.
4. *Strömgren B.* The physical state of interstellar hydrogen // *Astrophys. J.* — 1939. — Vol. 89. — P. 526.
5. *Franco J., Tenorio-Tagle G., Bodenheimer P.* On the formation and expansion of H II regions // *Astrophys. J.* — 1990. — Vol. 349. — P. 126–140.
6. *Tielens A. G. G. M.* The physics and chemistry of the interstellar medium. — 2005.
7. *Elmegreen B. G., Lada C. J.* Sequential formation of subgroups in OB associations // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.
8. *Вубе Д. З., Храмцова М. С., Павлюченков Я. Н.* Полициклические ароматические углеводороды // *Физика космоса : Тр. 41-й междунаро. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2012 г. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 43.*
9. *O'Dell C. R., Hubbard W. B.* Photoelectric spectrophotometry of gaseous nebulae. I. The Orion Nebula // *Astrophys. J.* — 1965. — Vol. 142. — P. 591.
10. *O'Dell C. R., Hubbard W. B., Peimbert M.* Photoelectric spectrophotometry of gaseous nebulae. III. Scattered Light in Three Bright H II Regions // *Astrophys. J.* — 1966. — Vol. 143. — P. 743.
11. *Krishna Swamy K. S., O'dell C. R.* Photoelectric spectrophotometry of gaseous nebulae. IV. Interaction of dust, gas, and radiation // *Astrophys. J.* — 1967. — Vol. 147. — P. 529.
12. *Chini R., Kruegel E., Wargau W.* Dust emission and star formation in compact H II regions // *Astron. Astrophys.* — 1987. — Vol. 181. — P. 378–382.
13. *Шустов Б. М.* Эволюция протозвездных оболочек. I. Стадии коконов // *Научные информации.* — 1979. — Т. 46. — С. 63.

14. *Шустов Б. М.* Эволюция протозвездных оболочек. II. Спектры выходящего излучения протозвезд и компактных зон III // Научные информации. — 1979. — Т. 46. — С. 93.
15. *Gail H. P., Sedlmayr E.* Dynamical evolution of a dusty H II-region // *Astron. Astrophys.* — 1979. — Vol. 77. — P. 165–177.
16. *Churchwell E., Povich M. S., Allen D. et al.* The bubbling galactic disk // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 649. — P. 759–778.
17. *Simpson R. J., Povich M. S., Kendrew S. et al.* The Milky Way Project first data release: a bubblier Galactic disc // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 424. — P. 2442–2460. 1201.6357.
18. *Watson C., Povich M. S., Churchwell E. B. et al.* Infrared Dust Bubbles: Probing the Detailed Structure and Young Massive Stellar Populations of Galactic H II Regions // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 681. — P. 1341–1355. 0806.0609.
19. *Desert F.-X., Boulanger F., Puget J. L.* Interstellar dust models for extinction and emission // *Astron. Astrophys.* — 1990. — Vol. 237. — P. 215–236.
20. *Anderson L. D., Zavagno A., Deharveng L. et al.* The dust properties of bubble H II regions as seen by Herschel // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 542. — P. A10. 1203.5721.
21. *Compiègne M., Abergel A., Verstraete L. et al.* Aromatic emission from the ionised mane of the Horsehead nebula // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 471. — P. 205–212. 0706.1510.
22. *Berné O., Joblin C., Deville Y. et al.* Analysis of the emission of very small dust particles from Spitzer spectro-imagery data using blind signal separation methods // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 469. — P. 575–586. astro-ph/0703072.
23. *Compiègne M., Abergel A., Verstraete L., Habart E.* Dust processing in photodissociation regions. Mid-IR emission modelling // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 491. — P. 797–807. 0809.5026.
24. *Compiègne M., Verstraete L., Jones A. et al.* The global dust SED: tracing the nature and evolution of dust with DustEM // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 525. — P. A103. 1010.2769.
25. *Flagey N., Boulanger F., Noriega-Crespo A. et al.* Tracing the energetics and evolution of dust with Spitzer: a chapter in the history of the Eagle Nebula // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 531. — P. A51. 1103.2495.

26. *Povich M. S., Stone J. M., Churchwell E. et al.* A Multiwavelength Study of M17: The Spectral Energy Distribution and PAH Emission Morphology of a Massive Star Formation Region // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 660. — P. 346–362.
27. *Everett J. E., Churchwell E.* Dusty Wind-blown Bubbles // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 713. — P. 592–602. 1003.0838.
28. *Павлюченков Я. Н., Кирсанова М. С., Вибе Д. З.* Инфракрасное излучение и разрушение пыли в зонах НП // *Астрон. журн.* — 2013. — Т. 90. — С. 625–638.

СПУТНИКИ АСТЕРОИДОВ

Данная работа посвящена исследованию спутников астероидов. Рассматриваются проблемы образования и эволюции двойных систем, даются их краткие характеристики и способы обнаружения.

This paper is devoted to research of asteroid satellites. The problems of their formation and evolution are considered. Their physical and orbital parameters are given. Methods of discovering of asteroid satellites are considered.

Введение

Еще задолго до первого достоверного открытия двойного астероида были найдены многочисленные свидетельства существования таких объектов. На поверхности планет и спутников, в том числе и на Земле, обнаружены близкорасположенные парные кратеры одинакового возраста, что может свидетельствовать об их совместном происхождении. Как показали исследования, маловероятно, что они образованы в результате разлома одиночного тела непосредственно перед падением под действием приливных сил и сопротивления атмосферы. Образование двойного кратера можно с большой долей уверенности объяснить падением двойного тела [1].

На Земле порядка нескольких процентов от общего числа ударных кратеров диаметром больше 1 км составляют двойные, а число двойных кратеров с диаметром одного из них больше 20 км составляет около 15 %. Подобные объекты обнаруживаются на Марсе, Венере, Луне и на других планетах и их спутниках [1].

Еще в 1901 г. Ш. Андрэ предположил, что обнаруженная переменность блеска астероида (433) Eros может быть вызвана взаимными затмениями двух тел сигарообразной формы, обращающихся вокруг общего центра масс [2]. К этому выводу Ш. Андрэ пришел, обнаружив схожесть световых кривых Эроса и β Лир. Таким образом, спустя ровно 100 лет после открытия Пиацци первого астероида впервые было высказано предположение о существовании спутников у некоторых астероидов. Идея о существовании спутника у астеро-

ида Эрос получила дальнейшее развитие в 30-е гг. прошлого века. Лишь в 70-е гг. с помощью радарных наблюдений было определено, что Эрос является одиночным астероидом.

В 60-е и 70-е гг. проблеме исследования двойных астероидов стали уделять большое внимание. Активный интерес к этой проблеме возник благодаря развитию современной астрономической техники, открытию большого числа астероидов и проведению их многочисленных фотометрических наблюдений. Основным средством поиска двойных астероидов в те годы являлось исследование кривых блеска.

На характер кривых блеска влияет большое число факторов. Это может быть вращение астероида несферичной формы, неоднородное альbedo поверхности, вынужденное прецессионное движение оси вращения, связанное с наличием спутника. Несомненным доказательством наличия спутника у астероида являются особенности световых кривых, которые могут быть объяснены только взаимными покрытиями и затмениями в системе двух тел.

Открытия двойных астероидов

В 1993 г. американский космический аппарат «Галилео», запущенный к Юпитеру, пересекал главный пояс астероидов. Пролетая на минимальном расстоянии порядка 10 000 км от астероида (243) Ida, он сделал серию снимков этого объекта. Как оказалось, этот астероид, имеющий форму <потатоида> (картофелины) с максимальным диаметром 56 км, обладает спутником диаметром в 1.5 км (рис. 1) [3]. Спутник, обращающийся вокруг Иды на расстоянии примерно в 80 км (рис. 2), получил имя Dactyl [4]. Это был первый случай достоверного открытия спутника астероида.

С целью поиска двойных астероидов применяются также средства адаптивной оптики (система линз и электронных средств, с помощью которых во время наблюдений удается минимизировать искажения, связанные с дрожанием земной атмосферы). К примеру, с помощью канадо-французско-гавайского телескопа (CFHT) в обсерватории Мауна Кеа и других обсерваториях удалось обнаружить двойственность астероида (90) Antiope и найти спутники у астероидов (45) Eugenia, (762) Pulcova, (87) Sylvia, (22) Kalliope, (3749) Balam и ряда других объектов.

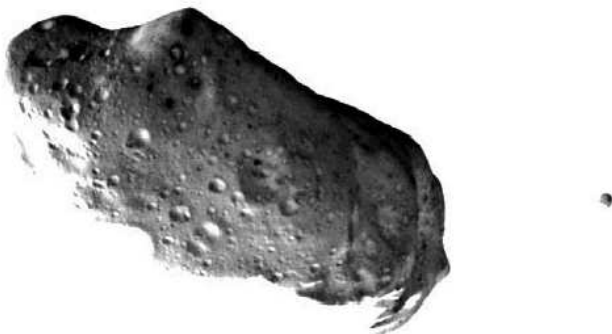


Рис. 1. Астероид (243) Ida со своим спутником Dactyl (NASA/JPL)



Рис. 2. Спутник S/1993 (243) 1 Dactyl (NASA/JPL)

В марте 2001 г. с помощью телескопа им. Хаббла (HST) был обнаружен спутник у астероида (107) Camilla. С этого времени в поиск спутников астероидов включился и один из самых эффективных телескопов в мире.

Астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), обладают скромными размерами — от нескольких сотен метров до нескольких километров. Поэтому обнаружить двойственность таких объектов стандартными визуальными средствами практически невозможно. Однако эта проблема может быть решена с помощью радарных наблюдений во время сближений с Землей или фотометрическим методом. Например, с помощью радарных измерений частоты (доплеровских наблюдений) была установлена форма астероида (4769) Castalia. Этот объект является контактным ДА, состоящим из двух жестко сцепленных между собой тел.

С помощью программы радарных наблюдений, организованных Лабораторией реактивного движения НАСА (NASA/JPL) и обсерваторией в Аресибо, была установлена двойственность многих АСЗ, к примеру, (363027) 1998 ST₂₇, (66391) 1999 KW₄, (185851) 2000 DP₁₀₇ и др.

Расстояние между компонентами в двойной системе всего лишь в несколько раз превышает их собственные размеры. Поэтому при наблюдениях с Земли двойные астероиды, в особенности АСЗ, компоненты которых обладают скромными размерами, не разлагаются на составляющие и видны как точечные объекты. Однако при определенных условиях в двойных системах можно наблюдать такие явления, как взаимные покрытия и затмения компонентов (взаимные явления). Когда один из компонентов закрывает от наблюдателя часть поверхности другого компонента или отбрасывает на своего компаньона тень, то в это время можно наблюдать падение суммарного блеска двойного астероида.

Световая кривая, или кривая блеска астероида, представляет собой ряд значений звездной величины объекта, полученных в определенные моменты времени. Примеры таких кривых приведены на рис. 3 и 4 [5, 6]. Обычно кривая блеска астероида, по которой определяют двойственность астероида, содержит два периода колебаний блеска. Короткий период объясняется вращением главного несферичного компонента, а долгопериодическая составляющая такой кривой имеет особенности, которые можно объяснить только происходящими в системе взаимными покрытиями и/или затмениями.

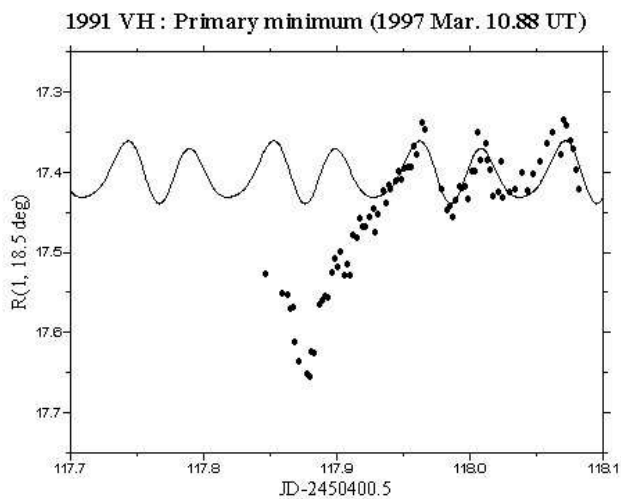


Рис. 3. Кривая блеска астероида (35107) 1991 VH (первичный минимум)
(Р. Pravec и др.)

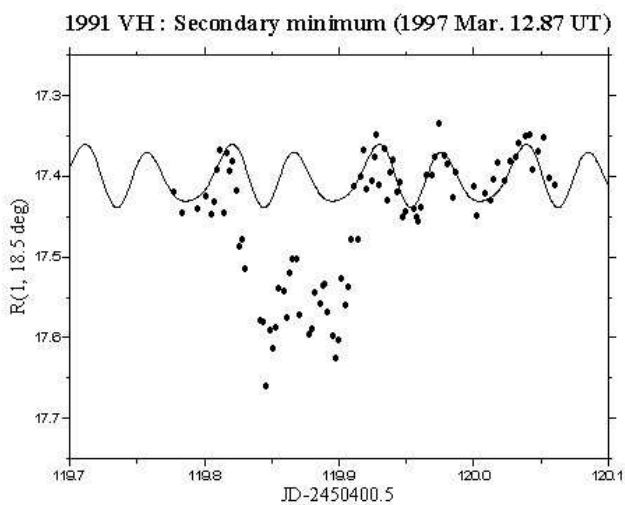


Рис. 4. Кривая блеска астероида (35107) 1991 VH (вторичный минимум)
(Р. Pravec и др.)

Первая особенность кривой блеска, связанная со взаимным явлением, имеет наибольшую амплитуду колебания. Она объясняется прохождением спутника и/или его тени по диску главного компонента и называется первичным минимумом. Вторая особенность объясняется покрытием и/или затмением более мелкого спутника главным компонентом и называется вторичным минимумом. Непрерывная кривая на этих рисунках построена с помощью частотного анализа колебаний блеска, вызванных вращением главного компонента. По характеру этой кривой можно сделать вывод о явно несимметричной форме главного компонента.

В настоящее время по кривым блеска обнаружены спутники у нескольких десятков астероидов.

Краткая характеристика двойных астероидов

По данным Р. Джонстона [7], на ноябрь 2013 г. открыта двойственность или кратность у 235 астероидов. Из них подавляющее большинство — двойные астероиды, но встречаются 9 тройных систем, а также система, состоящая из 6 компаньонов (система Плутона).

Из 235 систем 46 обнаружены среди АСЗ (2 тройные системы), 18 среди Марс-кроссеров, 88 в главном поясе (5 тройных систем), 4 троянца Юпитера и 79 среди транснептуновых объектов (2 тройные системы и система Плутона с 5 спутниками).

Физические характеристики, такие как отношение радиусов компонентов, отношение радиуса главного компонента к расстоянию между ним и спутником, зависят не только от устойчивости системы, но также и от эффекта наблюдательной селекции.

К примеру, двойные астероиды типа АСЗ, вследствие малой силы взаимной гравитации, представляют собой более тесные системы по сравнению с крупными объектами. Расстояние между компонентами ДА данной группы составляет всего от 1.5 до 8 диаметров главного компонента, а период обращения компонентов — порядка 1 сут. Среднее значение диаметров для главного компонента равно примерно 1 км, а диаметр спутника обычно меньше его в 2—6 раз.

Плотность компонентов АСЗ, как показывают исследования, немногим больше плотности воды. Предположительно все двойные АСЗ, или по крайней мере большинство из них, представляют со-

бой тела с рыхлым, пористым веществом, содержащие в себе большое число пустот. Астероид с такой внутренней структурой, которая могла образоваться при слипании разнородных обломков, называется «tumble pile» (груда булыжников).

Образование двойных астероидов

В настоящее время для объяснения образования двойных астероидов рассматриваются в основном процессы, при которых происходит столкновение и распад родительских тел. Другие механизмы, имеющие под собой теоретическую основу, например захват спутника при тройном сближении, не могли оказать серьезного влияния на формирование популяции двойных астероидов даже на стадии формирования пояса астероидов [8].

Гораздо более вероятно образование в то время двойных астероидов в результате малоэнергичных столкновений отдельных астероидов и образования из их обломков кратных систем. Если такие процессы происходили на ранней стадии формирования Солнечной системы, то не исключено существование остатков первичной популяции двойных астероидов, хотя и истощенной в результате последующей эволюции. Тогда современная популяция двойных астероидов может состоять как из древних, так и из недавно образованных пар.

Возраст двойного астероида можно определить по количеству кратеров на поверхности его компонентов. Например, система Ида—Дактиль, густо усыпанная кратерами, достаточно старая, ее возраст порядка 4.5 млрд лет [9]. Обнаружение как можно большего числа двойных астероидов позволит составить их возрастную статистику, которая будет иметь большое значение для понимания эволюционных процессов, происходивших в поясе астероидов.

При столкновении двух тел возможны три варианта образования двойного астероида:

- 1) ротационный распад крупного астероида, происходящий в результате касательного столкновения с небольшим телом;
- 2) выброс обломков на орбиту в результате некатастрофического касательного столкновения;
- 3) взаимный захват в гравитационно связанную пару обломков, образованных в результате катастрофического столкновения и распада на множество обломков двух тел [10].

Рассмотрим возможный механизм образования двойного астероида, связанный с ротационным распадом.

Соударение малого тела с большим астероидом при некотором соотношении диаметров и достаточной относительной скорости может привести к расколу последнего на множество кусков. При некоторой энергии удара астероид может не распасться на осколки, а образовать гравитационно связанный «rubble pile». При последующем касательном соударении с другим малым телом астероид может приобрести такой угловой момент, при котором может быть преодолен порог, за которым следует образование двойной системы [11].

Образование двойственности астероида более вероятно при наличии благоприятных обстоятельств, например, таких как невысокая относительная скорость ударяющего тела, или удар в направлении вращения быстровращающегося тела. Для больших астероидов эти условия менее значимы, но их участие в данных процессах в течение времени существования Солнечной системы не достигло таких масштабов, как для небольших тел. Процесс распада наиболее вероятен для тел средних размеров (радиусом от 100 до 140 км) [11].

Вращающийся «rubble pile» может распасться и без удара со стороны другого тела. Приливное воздействие планет, как показывают расчеты, во время сближения может разорвать астероид на несколько частей. При этом могут образоваться стабильные пары с небольшими расстояниями между компонентами [1].

Второй возможный способ образования двойного астероида может реализоваться в случае поверхностного касательного удара падающего тела, когда полного распада бомбардируемого тела не происходит. В этом случае удар падающего тела может вызвать выброс части вещества с поверхности «мишени». Спутник, сформированный в этом процессе, может представлять собой «rubble pile» с массой, много меньшей массы астероида-мишени, и изначально находится на близкой орбите.

Если астероид-мишень имеет сферическую форму, то траектория выброса будет представлять собой кеплеровскую орбиту и часть вещества, не достигшая параболической скорости, будет выпадать обратно на поверхность. Иррегулярная, вытянутая форма астероида может сделать движение выброшенной части вещества более сложным и продлить время ее жизни на орбите. Кроме того, орбиты с

большим эксцентриситетом могут быть подвержены значительным возмущениям со стороны Солнца, что также может продлить время их жизни. Однако вероятность образования стабильных орбит в этом случае остается крайне низкой.

Помимо касательных столкновений возможны также и центральные столкновения, приводящие к третьему сценарию образования двойных астероидов. Здесь выделяют пять возможных исходов такого события в зависимости от относительной скорости тел и их массы [12]:

- 1) отскок и удаление объектов (при малой относительной скорости);
- 2) отскок и повторное столкновение с образованием контактной структуры;
- 3) частичное раздробление тел с освобождением незначительной части вещества и образованием единого тела вытянутой формы;
- 4) распад тел с небольшой потерей энергии, приводящий к образованию «rubble pile» в форме сфероида;
- 5) при большой энергии столкновения полный распад тел и разлет обломков.

В последнем случае возможно образование двойной системы, когда два обломка приобретают близкие по значению и направлению скорости.

Спутники астероидов — это естественный результат катастрофического столкновения двух тел. При этом могут образовываться как контактные структуры, так и разделенные двойные астероиды.

Эволюция и устойчивость двойных астероидов

На систему могут воздействовать три основных фактора, которые могут дестабилизировать орбиту спутника. Первый фактор — гравитационные возмущения, второй связан со столкновениями, а третий — с приливной эволюцией [8].

Эволюция двойных астероидов может привести к образованию как контактных астероидов, так и двойных астероидов с широко разделенными компонентами. При этом двойные астероиды, особенно те, компоненты которых представляют собой «rubble pile», эволюционируют к устойчивому состоянию. В этом состоянии вращение компонентов синхронизировано с их орбитальным движением

вокруг общего центра инерции, большие полуоси компонентов ориентированы друг на друга, эксцентриситет орбиты спутника близок к нулю. Большая полуось орбиты спутника небольших размеров не превышает нескольких десятков диаметров главного компонента, а компоненты с размерами одного порядка образуют тесную двойную систему. Движение спутника, скорее всего, обратное, а наклон орбиты спутника относительно эклиптики находится в пределах от 180 до 150° .

Устойчивость ДА опреляется не только гравитационными возмущениями со стороны Солнца и планет, но и приливным взаимодействием самих компонентов двойной системы. Особенно сильно это взаимодействие сказывается на телах с невысокой степенью жесткости типа «rubble pile».

Естественно, что сразу после образования двойной пары ее компоненты вращаются хаотически. Однако в процессе приливной эволюции их вращение становится синхронизированным с их обращением вокруг общего центра инерции. Устойчивая синхронизированная орбита спутника на близком расстоянии от астероида может быть достигнута за относительно короткий промежуток времени только для крупных спутников, для них процесс эволюции может быть завершен за время порядка миллиона лет [13].

Влияние эксцентриситета на устойчивость двойной системы также важно, поскольку при его больших значениях область устойчивости уменьшается [14]. Согласно теории приливной эволюции современное значение эксцентриситета небольших спутников астероидов не должно превышать нескольких сотых [13]. Найденные значения эксцентриситетов большинства двойных астероидов подтверждают это предположение.

Астероиды, сближающиеся с планетами, подвергаются также их приливному воздействию. Например, для астероидов, проходящих на расстоянии от $18\,000$ до $36\,000$ км от центра Земли, последствия такой близкой встречи могут играть важную роль в их эволюции [15]. В ходе встречи с планетой энергия поступательного движения компонентов ДА вокруг общего центра инерции может сильно измениться, что приводит к увеличению расстояния между компонентами [16]. При увеличении расстояния между компонентами изменяется орбитальный угловой момент двойного астероида, что может привести к замедлению вращения его компонентов. Дальнейшее увеличение рас-

стояния между компонентами во время сближения с планетой может привести к распаду системы и образованию одиночных астероидов с большим периодом вращения, возможно, таких как (887) Alinda, (3288) Seleucus и (3102) 1981 QA и др.

Библиографические ссылки

1. *Bottke W. F., Melosh H. J.* Formation of asteroid satellites and doublet craters by planetary tidal forces // *Nature*. — 1996. — Vol. 281. — P. 51–53.
2. *André Ch.* Sur le système formé par la planète double (433) Eros // *Astron. Nach.* — 1901. — Vol. 155. — P. 27–30.
3. *Marsden B. G.* 1994c, 1993 (243) 1, 1994C // *International Astronomical Union Circular*. — 1994. — Vol. 5948. — P. 1.
4. *Green D. W. E.* 1993 (243) 1 = (243) Ida I (Dactyl) // *International Astronomical Union Circular*. — 1994. — Vol. 6082. — P. 2.
5. *Pravec P., Wolf M., Šarounová L.* Occultation/Eclipse Events in Binary Asteroid 1991 VH // *Icarus*. — 1998. — Vol. 133. — P. 79–88.
6. *Johnston W.* Asteroids with Satellites. — <http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>.
7. *Van Flandern T. C., Tedesco E. F., Binzel R. P.* Satellite of asteroids // *Asteroids*. — 1979. — P. 443–465.
8. *Рускол Е. Л.* Образование спутников астероидов путем фрагментации более крупных тел // *Астрон. вестн.* — 1996. — Т. 30, вып. 3. — С. 253–258.
9. *Farinella P., Paolicchi P., Zappalà V.* The formation of asteroidal satellites in catastrophic collisions // *Icarus*. — 1982. — Vol. 70. — P. 409–433.
10. *Hartmann W. K.* A special class of planetary collisions: Theory and evidence. — 1979. — Vol. 10. — P. 1897–1916.
11. *Chavineau B., Mignard F.* Dynamics of binary asteroids. II. Jovian perturbations // *Icarus*. — 1990. — Vol. 87, iss. 2. — P. 377–390.
12. *Weidenschilling S. J., Paolicchi P., Zappalà V.* Do asteroids have satellite? // *Asteroids II*. — 1987. — P. 643–660.
13. *Zhang S.-P., Innanen K. A.* The stable region of satellites of large asteroids // *Icarus*. — 1988. — Vol. 75. — P. 105–112.

14. *Chavineau B., Farinella P., Mignard F.* The lifetime of binary asteroid vs. gravitational encounters and collisions // *Icarus*. — 1991. — Vol. 94. — P. 299—310.
15. *Farinella P.* Evolution of earth-crossing binary asteroids due to gravitational encounters with the Earth // *Icarus*. — 1992. — Vol. 96, iss. 2. — P. 284—285.
16. *Farinella P., Chavineau B.* On the evolution of binary Earth-approaching asteroids // *Astron. Astrophys.* — 1993. — Vol. 297. — P. 251—259.

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ БИПОЛЯРНЫЕ ИСТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Высокоскоростные, обычно биполярные истечения являются повсеместным явлением при образовании звезд как большой, так и малой массы. Эти истечения наблюдаются как потоки молекулярного и ионизованного газа. Истечения, очевидно, формируются в аккреционных дисках вокруг протозвезд и молодых звезд, хотя механизмы их образования до конца не понятны. В настоящем обзоре описываются основные характеристики высокоскоростных истечений и модели их формирования.

High-velocity usually bipolar outflows are ubiquitous in high-mass star formation as well as in low-mass star formation process. They are observed as flows of molecular and ionized gas. Outflows are apparently formed in accretion disks around protostars and young stars, although their formation mechanisms are not quite clear yet. In this review we describe the basic properties of high velocity outflows and models of their formation.

Введение

Во многих астрофизических объектах наблюдаются коллимированные биполярные истечения вещества. Вскоре после первых наблюдений линии молекулы СО в межзвездных облаках, в 1976 г., были обнаружены протяженные негауссовы крылья линии излучения СО в направлении объекта Клейнманна—Лоу в туманности Ориона [1]. Авторы интерпретировали их как свидетельство дифференциального расширения оболочки. Через несколько лет были получены карты изофот излучения в крыльях линии СО в туманности L1551 [2]. Они ясно показывали два потока молекулярного вещества, текущих с большой скоростью в разные стороны от центрального объекта. Один из них ассоциировался с объектами Хербига—Аро. С тех пор подобные биполярные истечения наблюдались во множестве протозвездных объектов. Сейчас их известно несколько сотен. Стало ясно, что они являются повсеместным и необходимым явлением в процессе образования звезд. Были определены основные параметры

истечений, выявлены корреляции с характеристиками центральных источников, предложены модели формирования таких потоков. Тем не менее полной ясности в этих вопросах пока нет, продолжаются активные исследования биполярных истечений, как наблюдательные, так и теоретические.

Основные характеристики биполярных потоков

Обзоры основных наблюдательных характеристик высокоскоростных биполярных потоков представлены, например, в работах [3–5]. Такие потоки наблюдаются при формировании звезд как малой, так и большой массы. Морфология потоков меняется от хорошо коллимированных структур, наблюдаемых главным образом в областях образования звезд малой массы, до весьма нерегулярных образований, состоящих из множества отдельных струй, как в Орионе KL. Исследования потоков проводятся главным образом в линиях молекулы CO, хотя в высокоскоростном газе наблюдаются и некоторые другие молекулы. Скорости потоков достигают десятков километров в секунду, в некоторых случаях ~ 100 км/с. В большинстве случаев скорость растет с удалением от центрального объекта («хаббловские потоки»). Выявлен ряд эмпирических зависимостей между характеристиками биполярных потоков и параметрами протозвездных объектов, являющихся их источниками (например, [6, 7]). Примеры таких зависимостей представлены на рис. 1.

Видно, что характеристики потоков непрерывным образом зависят от светимости (и, следовательно, от массы) центральной (протозвезды). Найдено также, что с ростом массы центральной звезды увеличивается угол раскрытия — потоки становятся менее коллимированными. От звезд с наибольшей светимостью ($L > 10^5 L_{\odot}$) коллимированных истечений не обнаружено. Из полученных зависимостей следует, в частности, что радиационного давления центральной звезды недостаточно для ускорения наблюдаемых потоков — требуются другие механизмы.

Во многих случаях молекулярные потоки ассоциируются с узкими джетами, наблюдаемыми в оптическом и ИК диапазоне. Яркий пример такой ассоциации представлен на рис. 2. Эти джеты проявляются как объекты Хербига—Аро и состоят из сгустков ионизованного газа. Скорость джетов заметно выше, чем скорость молекулярных потоков, и достигает нескольких сотен километров в секунду.

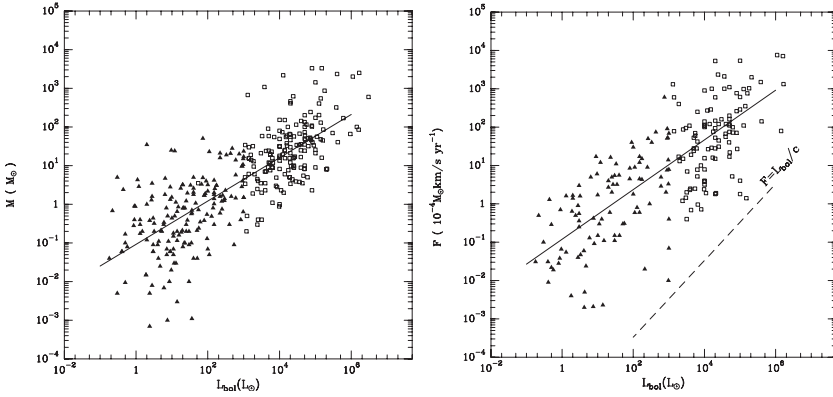


Рис. 1. Масса истечений (слева) и требуемая механическая сила (справа) в зависимости от светимости центрального источника [6]. Заполненные треугольники соответствуют объектам малой массы, а квадраты — массивным объектам. Штриховая линия на правом рисунке отвечает максимально возможному радиационному давлению

Биполярные потоки и джеты, вероятно, формируются в аккреционном диске вокруг молодой звезды (см. ниже) и должны вращаться, унося значительную часть углового момента аккрецирующего вещества. Вращение джетов действительно наблюдается (в оптических линиях — например, [10]).

Модели биполярных потоков

К настоящему времени предложено несколько моделей формирования биполярных молекулярных потоков. Их можно разделить на четыре основных вида [11]. В трех из них предполагается, что происходит увлечение вещества окружающего облака либо головной ударной волной джета, либо вязким турбулентным слоем, возникающим при движении джета за счет неустойчивости Кельвина—Гельмгольца, либо звездным ветром (обычно предполагается, что окружающее облако имеет тороидальную структуру). Четвертый класс моделей («циркуляционный») предполагает, что молекулярное истечение представляет собой вещество окружающего облака, падавшее на центральную протозвезду и отброшенное от нее магнитогидродинамическими силами. Разные модели предсказывают разную морфологию потоков и разные зависимости физических пара-

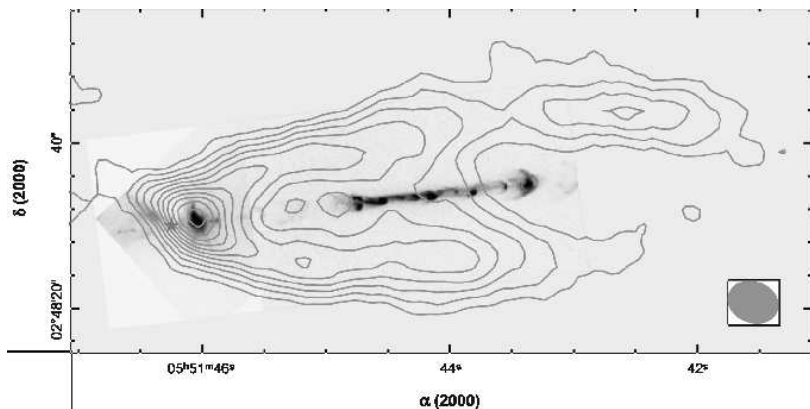


Рис. 2. Джет и молекулярный поток в направлении объекта HH111 [5]. Изофоты излучения в линии CO [8] (контуры) наложены на комбинированное оптическое и ИК изображение [9]. Звездочка отмечает положение центрального источника

метров от расстояния до центрального источника. Сравнение с наблюдениями показывает, что в разных случаях предпочтительными оказываются разные модели. Например, потоки от наиболее массивных протозвезд с большим углом раскрытия, по-видимому, лучше описываются моделью звездного ветра, а многие высококоллимированные потоки от протозвезд меньшей массы — моделями, где основную роль играет головная ударная волна джета. Они также хорошо согласуются с наблюдениями объектов Хербига—Аро и излучения молекулярного водорода в этих областях. Вообще, наиболее адекватными, видимо, являются комбинированные модели, которые включают в себя как компоненту, связанную с джетом, так и более медленный звездный ветер. Без такого ветра трудно объяснить и очень высокую степень коллимации джетов, давление в которых на несколько порядков превышает давление в среде окружающего облака.

Следующий вопрос: каким образом возникают быстрые узконаправленные джеты в этих объектах? По-видимому, они формируются в аккреционных дисках вокруг протозвезд. Существуют два основных вида моделей быстрого МГД ветра от замагниченных аккреционных дисков. В первом случае («Х-ветер») основную роль играет область взаимодействия между магнитосферой звезды и внутренней

частью аккреционного диска вблизи радиуса коротации [12]. Эта область находится довольно близко к звезде, скорость вращения велика, и возникающий ветер может иметь скорость в несколько сотен километров в секунду — в соответствии с наблюдениями джетов.

Другой вариант заключается в том, что гораздо большая часть диска пронизана открытыми силовыми линиями магнитного поля и участвует в формировании ветра («дисковый ветер» — например, [13]). В этом случае получается большой диапазон значений конечных скоростей ветра.

По наблюдениям вращения джета можно приблизительно определить область его возникновения в диске. В работе [14] таким образом найдено, что в DG Tau радиус формирования ветра составляет 0.3—4 а. е., что значительно больше радиуса коротации и указывает на дисковый ветер.

Биполярные потоки в области образования массивных звезд S255

S255 представляет собой область ионизованного водорода (H II) на расстоянии 2.5 кпк [15], вблизи которой наблюдается плотное газопылевое облако, в котором происходят активные процессы звездообразования. Облако состоит из двух основных компонент (S255IR и S255N), расстояние между которыми чуть больше 1'. Ранее нами проводились наблюдения этого объекта на одиночных антеннах (OSO-20m, IRAM-30m, NRAO-12m). С угловым разрешением от 1' до 10'' были получены оценки основных физических параметров: массы $M \sim 300 M_{\odot}$, концентрации газа $n \sim 2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, кинетической температуры $T_{\text{kin}} \sim 40 \text{ К}$ и дисперсии скоростей $\Delta V \sim 2 \text{ км/с}$ для обеих компонент [16]. Хотя физические характеристики компонент очень похожи, их эволюционный статус существенно различается. S255IR содержит скопление звезд раннего В-типа, наблюдаемых в ближнем ИК диапазоне [17], скопление компактных зон H II [18] и множество источников излучения H2 [19]. В отличие от этого S255N (также называемый Sh2-255 FIR1 и G192.60-MM1) содержит одиночную кометарную ультракомпактную зону H II (например, [20]) и не виден на волнах короче 21 мкм [21]. Наблюдения на VLA и SMA в континууме и в нескольких молекулярных линиях [22] указывают на присутствие массивного протоскопления в этой области. Химический

состав S255IR и S255N, по нашим данным, также сильно различается [16, 23]. В то время как обилия CS и HCN очень похожи, обилия NH_3 , N_2H^+ , HCO^+ и некоторых других молекул в этих компонентах сильно различаются.

Недавно обе компоненты изучались при помощи субмиллиметровой антенны решетки SMA на волне 1.3 мм в линиях CO, ^{13}CO , C^{18}O , CH_3OH , CH_3CN и некоторых других [24]. Обнаружены три сгустка в области S255IR и высокоскоростные коллимированные истечения в обеих областях. Звездное население в этом комплексе недавно исследовалось в работе [15] по данным оптических и ИК наблюдений. Обнаружено большое количество молодых звездных объектов с большим разбросом в возрасте, что указывает на сценарий индуцированного звездообразования. В целом этот комплекс представляет собой отличную лабораторию для исследования различных стадий процесса образования массивных звезд.

Нами [25] обнаружены новые протозвездные сгустки в этой области, а также по излучению в линии SiO выявлены высокоскоростные биполярные истечения из некоторых из этих сгустков (рис. 3) и получены оценки их параметров (массы, импульса, энергии, скорости потери массы, размеров и др.). Возраст истечений оценивается всего лишь в несколько сотен лет.

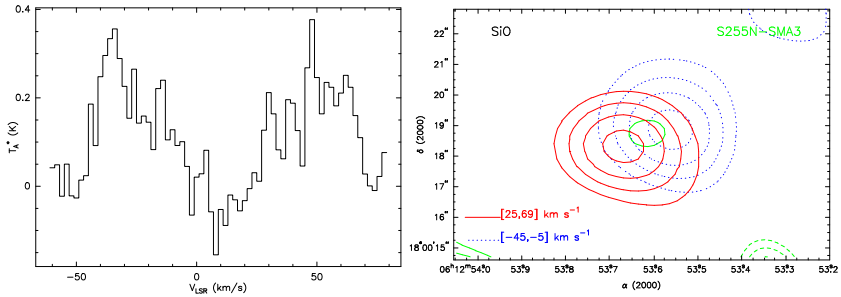


Рис. 3. Спектр излучения в линии SiO $J = 5-4$ в направлении источника континуума S255N-SMA3 (слева). Карта высокоскоростного излучения в этой линии (справа)

Наиболее заметный и протяженный биполярный поток наблюдается в области S255IR. В работе [24] были получены его карты в линии CO $J = 2-1$ на интерферометре SMA и на 30-м радиотелескопе IRAM. Нами проведены исследования этого потока в линии CO $J = 3-2$ и в линиях ряда других молекул (рис. 4).

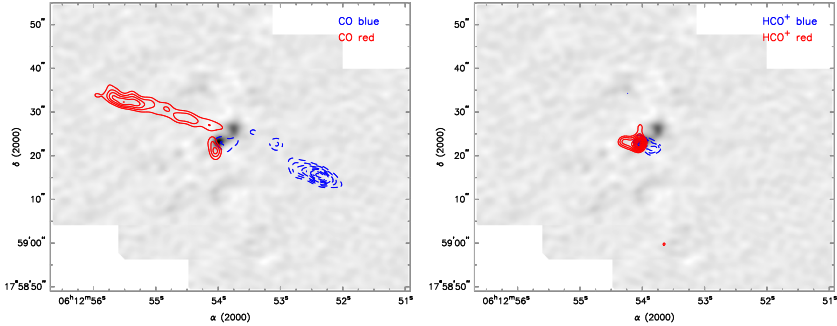


Рис. 4. Карта высокоскоростного излучения в крыльях линии CO(3-2) (сплошные и штриховые контуры) в области S255IR, наложенная на изображение в континууме на волне 0.8 мм (слева). Карта высокоскоростного излучения в крыльях линии HCO⁺(4-3) (справа)

Наблюдается довольно сильное излучение в крыльях линий HCO⁺, HCN, CS и др., что говорит о высокой плотности высокоскоростного газа. Сравнение данных наблюдений переходов $J = 3-2$ и $J = 2-1$ CO показывает, что возбуждение CO растет с ростом скорости, указывая на рост плотности и температуры.

Интересно, что излучение CO наблюдается в основном в протяженных лепестках, центр истечения которых представляется смещенным относительно горячего ядра, которое является источником наблюдаемого в ИК диапазоне джета, в то время как высокоскоростное излучение HCO⁺, HCN и CS сосредоточено вблизи этого ядра. Создается впечатление, что имеется два параллельных потока, но, скорее всего, это разные части одного и того же истечения.

Наблюдения самого ядра с высоким разрешением показывают, что оно вращается вокруг оси, совпадающей с направлением джета и молекулярного потока, и, вероятно, представляет собой аккреционный диск.

Заключение

Высокоскоростные биполярные истечения являются широко распространенным явлением в областях звездообразования и, очевидно, играют важную роль в процессе образования звезд, а также оказывают сильное влияние на окружающее облако. Механизмы образования этих истечений до конца непонятны и требуют дальнейшего изучения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 12-02-00861.

Библиографические ссылки

1. *Kwan J., Scoville N.* The nature of the broad molecular line emission at the Kleinmann-Low nebula // *Astrophys. J. Lett.* — 1976. — Vol. 210. — P. L39—L43.
2. *Snell R. L., Loren R. B., Plambeck R. L.* Observations of CO in L1551 — Evidence for stellar wind driven shocks // *Astrophys. J. Lett.* — 1980. — Vol. 239. — P. L17—L22.
3. *Richer J. S., Shepherd D. S., Cabrit S. et al.* Molecular Outflows from Young Stellar Objects // *Protostars and Planets IV.* — 2000. — P. 867. [astro-ph/9904097](#).
4. *Arce H. G., Shepherd D., Gueth F. et al.* Molecular Outflows in Low- and High-Mass Star-forming Regions // *Protostars and Planets V.* — 2007. — P. 245—260. [astro-ph/0603071](#).
5. *McKee C. F., Ostriker E. C.* Theory of Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 565—687. 0707.3514.
6. *Wu Y., Wei Y., Zhao M. et al.* A study of high velocity molecular outflows with an up-to-date sample // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 426. — P. 503—515. [astro-ph/0410727](#).
7. *Wu Y., Zhang Q., Chen H. et al.* CO J = 2-1 Maps of Bipolar Outflows in Massive Star-forming Regions // *Astron. J.* — 2005. — Vol. 129. — P. 330—347.
8. *Lee C.-F., Mundy L. G., Reipurth B. et al.* CO Outflows from Young Stars: Confronting the Jet and Wind Models // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 542. — P. 925—945.

9. *Reipurth B., Yu K. C., Rodríguez L. F. et al.* Multiplicity of the HH 111 jet source: it Hubble Space Telescope NICMOS images and VLA maps // *Astron. Astrophys.* — 1999. — Vol. 352. — P. L83–L86.
10. *Bacciotti F., Ray T. P., Mundt R. et al.* Hubble Space Telescope/STIS Spectroscopy of the Optical Outflow from DG Tauri: Indications for Rotation in the Initial Jet Channel // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 576. — P. 222–231. **astro-ph/0206175**.
11. *Cabrit S., Raga A., Gueth F.* Models of Bipolar Molecular Outflows // *Herbig-Haro Flows and the Birth of Stars* / ed. by B. Reipurth, C. Bertout : IAU Symposium. — 1997. — Vol. 182. — P. 163–180.
12. *Shu F., Najita J., Ostriker E. et al.* Magnetocentrifugally driven flows from young stars and disks. 1: A generalized model // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 429. — P. 781–796.
13. *Konigl A., Pudritz R. E.* Disk Winds and the Accretion-Outflow Connection // *Protostars and Planets IV.* — 2000. — P. 759. **astro-ph/9903168**.
14. *Anderson J. M., Li Z.-Y., Krasnopolsky R., Blandford R. D.* Locating the Launching Region of T Tauri Winds: The Case of DG Tauri // *Astrophys. J. Lett.* — 2003. — Vol. 590. — P. L107–L110. **astro-ph/0304127**.
15. *Ojha D. K., Samal M. R., Pandey A. K. et al.* Star Formation Activity in the Galactic H II Complex S255-S257 // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 738. — P. 156. **1106.1858**.
16. *Zinchenko I., Caselli P., Pirogov L.* Chemical differentiation in regions of high-mass star formation - II. Molecular multiline and dust continuum studies of selected objects // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 395. — P. 2234–2247. **0903.1209**.
17. *Howard E. M., Pipher J. L., Forrest W. J.* S255-2: The Formation of a Stellar Cluster // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 481. — P. 327.
18. *Snell R. L., Bally J.* Compact radio sources associated with molecular outflows // *Astrophys. J.* — 1986. — Vol. 303. — P. 683–701.
19. *Miralles M. P., Salas L., Cruz-Gonzalez I., Kurtz S.* Discovery of Jets and HH-like Objects near the S255 IR Complex // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 488. — P. 749.
20. *Kurtz S., Churchwell E., Wood D. O. S.* Ultracompact H II regions. 2: New high-resolution radio images // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1994. — Vol. 91. — P. 659–712.

21. *Crowther P. A., Conti P. S.* MSX mid-infrared imaging of massive star birth environments — I. Ultracompact HII regions // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — Vol. 343. — P. 143–163. [astro-ph/0302481](#).
22. *Cyganowski C. J., Brogan C. L., Hunter T. R.* Evidence for a Massive Protocluster in S255N // *Astron. J.* — 2007. — Vol. 134. — P. 346–358. [0704.0988](#).
23. *Lintott C. J., Viti S., Rawlings J. M. C. et al.* Molecular Abundance Ratios as a Tracer of Accelerated Collapse in Regions of High-Mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 620. — P. 795–799. [astro-ph/0410653](#).
24. *Wang Y., Beuther H., Bik A. et al.* Different evolutionary stages in the massive star-forming region S255 complex // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 527. — P. A32. [1011.3575](#).
25. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 755. — P. 177. [1206.5906](#).

СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Все оборудование, используемое человеком, может работать в ограниченном диапазоне температуры. Необходимая температура окружающей среды и интенсивный конвективный механизм помогают решать проблему терморегулирования на Земле. Но в космосе решение этой проблемы намного более трудное из-за чрезвычайных тепловых условий и вакуума. В настоящее время для обеспечения тепловых режимов космических аппаратов (КА) используют специальные системы терморегулирования, от нормального функционирования которых чрезвычайно зависит функционирование всего КА. Эти системы терморегулирования (СТР) зависят от типа космического аппарата, от его внутреннего тепловыделения, ориентации по отношению к внешним источникам тепла и других факторов. В лекции показано, что использование очень простых технических решений с использованием современных эффективных теплопроводов (тепловых труб) позволяет делать системы терморегулирования независимыми от других систем КА и от изменения космических тепловых факторов. Кроме того, показаны современные тенденции развития СТР КА, для которых могут использоваться тепловые системы с тепловыми трубами.

Machinery can work in the limited range of temperatures. Mild ambient temperature and intensive convection make thermal regulation problem on Earth easy to solve. But in the outer space this problem is much more difficult because of extreme thermal conditions and vacuum. To maintain proper thermal regimes of spacecrafts (SC) special systems of thermal regulation are utilized. They are critical for the normal operation of all SC. These systems of thermal regulation (STR) depend on spacecraft type, on its internal thermal emission, on its orientation against external sources of heat and other factors. In the lecture, it is shown that use of very simple technical solutions based on modern effective heat transfer devices (heat pipes) allows to make systems of thermal regulation in SC independent of another systems and from change of space thermal factors. In addition, current trends of development of STR SC for which thermal systems with heat pipes can be used are discussed.

Введение

Чтобы понять всю значимость систем терморегулирования (СТР) для космической отрасли, стоит вспомнить об одной важнейшей функции любого живого организма — биологической терморегуляции. Природа позаботилась о нас и подарила возможность поддерживать определенную температуру тела в меняющихся условиях среды. Растениям позволяет выживать в любых, самых экстремальных условиях принцип, положенный в основу работы биологических систем терморегулирования, — капиллярные силы. Внутри космического аппарата для нормальной работы всех его приборов также должен соблюдаться необходимый температурный режим, т. е. надо иметь своеобразное «лекарство» от температуры.

Под системами терморегулирования можно понимать технические системы для реализации теплопередачи и обеспечения тепловых режимов различных объектов. Трудно переоценить роль СТР в современных природных, биологических и техногенных средах. Достаточно привести несколько примеров. Во-первых, формирование приемлемых для биологической жизни условий на Земле напрямую связано с тремя основными циклами атмосферных процессов: теплообменом, массообменом и атмосферной циркуляцией [1]. Поток солнечной радиации, идущий от Солнца к Земле, частично отражается воздухом, облаками и примесями назад в мировое пространство, и эта энергия безвозвратно теряется для Земли. Другая часть проходит сквозь атмосферу. Атмосфера частично и в сравнительно небольшой степени поглощает солнечную радиацию, преобразуя ее в теплоту, частично рассеивает ее, изменяя спектральный состав. Значительная часть солнечного тепла, поступающего на земную поверхность, затрачивается на испарение воды, то есть переходит в скрытую теплоту фазового превращения. Затем при конденсации водяного пара в атмосфере и, как правило, за счет конвекции в районе, удаленном от места испарения, это тепло, выделяясь, нагревает воздух. Таким образом, мы имеем масштабную земную СТР, обеспечивающую приемлемую для биологической жизни температуру. К сожалению, а может быть и к счастью, человечество пока не может целенаправленно влиять на эту природную систему терморегулирования, которая очень сильно зависит от многих факторов.

Другой пример — терморегулирование в биологической среде, когда большая часть энергии, поступающей в биологический организм вместе с пищей, преобразуется за счет физико-химических процессов

в тепловую энергию, обеспечивающую очень точную и уникальную СТР, когда даже отличие температуры в несколько десятых долей градуса заметно сказывается на биологическом объекте. К сожалению, эти процессы еще мало изучены и механизм действия биологических СТР малоизвестен.

Гораздо более изучены и известны системы терморегулирования в техногенных средах, хотя и здесь идут постоянный поиск и оптимизация этих важных средств, обеспечивающих нормальное функционирование технических объектов. Часто это обусловлено вопросами безопасности или невозможностью работы некоторых элементов при превышении допустимой температуры. Достаточно сказать, что эффективность и надежность работы перспективных тепловых двигателей (ракетных, атомных, плазменных, МГД-генераторов и т. д.) существенным, а иногда и решающим образом зависит от того, насколько правильно организована система их охлаждения. Это же относится к радиоэлектронике и современной микропроцессорной технике, которая имеет устойчивую тенденцию к микроминиатюризации и также требует надежной системы терморегулирования. Решение многих задач космической техники (проблема тепловой защиты, системы жизнеобеспечения), авиационной техники (тепловой барьер), большой и малой энергетики неразрывно связано с успехами в развитии теории и практики СТР.

Основные системы космического аппарата

Космический аппарат (КА) — аппарат, предназначенный для полета в космос или в космосе, например, ракеты-носители, искусственные спутники Земли (ИСЗ), межпланетные КА и др. Наименование КА — общее, включает различные виды таких аппаратов, в том числе использующие и нереактивный принцип движения (например, солнечный парус и др.). Ракеты-носители являются средством достижения необходимой скорости для осуществления космического полета КА, которые можно разделить на две основные группы: а) околоземные орбитальные КА, движущиеся по геоцентрическим орбитам, не выходя за пределы сферы действия Земли (ИСЗ); б) межпланетные КА, которые в полете выходят за пределы сферы действия Земли и входят в сферу действия Солнца, планет или их естественных спутников. При этом различают автоматические КА (автоматические ИСЗ, искусственные спутники Луны — ИСЛ, Марса — ИСМ, Солнца — ИСС и т. п., автоматические межпланетные станции —

АМС) и пилотируемые (космические корабли-спутники, обитаемые орбитальные станции, межпланетные космические корабли). Большая часть указанных типов КА уже создана; ведется разработка межпланетных кораблей для полета и высадки на другие планеты, транспортных космических кораблей многократного использования и др.

Полет КА делится на следующие участки: выведения — КА сообщается необходимая космическая скорость в заданном направлении; орбитальный, на котором движение КА происходит в основном по инерции, по законам небесной механики; участок посадки. В ряде случаев КА снабжаются ракетными двигателями, позволяющими на орбитальном участке изменять (корректировать) траекторию движения или тормозить КА при посадке. Для современных КА, использующих химические ракетные двигатели, протяженность участков полета с работающими двигателями (выведение, коррекция, торможение) значительно меньше, чем участков орбитального полета.

В настоящее время ракета — единственное доступное средство для полетов в космическое пространство. Максимальная скорость ракеты зависит от скорости истечения реактивной струи, определяемой видом топлива и совершенством двигателя, и отношения массы топлива к общей (начальной) массе ракеты, то есть от совершенства конструкции ракеты, а также от массы полезного груза. Скорость истечения реактивной струи из двигателя при современных химических топливах составляет 3 000—4 500 м/с; при этом одноступенчатая ракета рациональной конструкции практически не способна развить скорость, необходимую для космического полета (около 8 км/с). Поэтому распространены составные ракеты, у которых в полете, по мере расходования топлива, отделяются части конструкции (топливные баки, двигатели). Основные ракеты, применяемые в космонавтике (ракеты-носители), имеют от 2 до 4 ступеней. Конструктивные схемы этих ракет весьма разнообразны; их отличительная особенность — малая относительная масса конструкции (вместе с двигательной установкой обычно не превышает 10—12 % от массы топлива). Создание такой конструкции с высокой жесткостью и прочностью — сложная техническая задача. Ракета работает в очень напряженных режимах статических и динамических нагрузок, поэтому необходимо максимальное использование прочности материалов, конструктивное совершенство отдельных узлов при значительных размерах конструкции в целом. В состав оборудования ракеты

входит ряд систем и агрегатов для управления в полете, разделения ступеней, наддува топливных баков, регулирования подачи топлива к двигателям и др. Двигательные установки космических ракет, как правило, состоят из нескольких двигателей, работа которых синхронизируется.

Полет ракеты по заданной траектории, стабилизацию ее относительно центра масс, управление двигателями (регулирование тяги, включение и выключение), выдачу команд на разделение ступеней обеспечивает система управления. Она представляет собой сложный комплекс приборов и агрегатов (гироскопических, электронных, электромеханических и др.) и в ряде случаев включает бортовую электронную вычислительную машину. Космические ракеты — одно из крупнейших достижений современной науки и техники; создание ракетно-космических комплексов требует высокого уровня развития многих отраслей науки и техники — металлургии, химии, радиоэлектроники, вычислительной техники и многого другого.

Отличительная особенность большинства КА — способность к длительному самостоятельному функционированию в условиях космического пространства. Во многих отношениях (законы движения, тепловой режим и др.) такие КА подобны самостоятельным небесным телам, на которых созданы необходимые условия для работы аппаратуры и существования людей. На КА имеются системы регулирования теплового режима, энергопитания бортовой аппаратуры, управления движением в полете, радиосвязи с Землей (рис. 1).

В КА с экипажем в герметичной кабине обеспечиваются необходимые условия для жизни и работы человека — осуществляются регенерация атмосферы с регулированием ее температуры и влажности, снабжение водой и пищей. Решение проблем жизнеобеспечения экипажа особенно сложно для обитаемых орбитальных станций и межпланетных кораблей. Многие КА имеют системы для ориентации в пространстве. При ориентации КА обычно выполняются определенные функции (научное наблюдение объекта, радиосвязь, освещение солнечных батарей и др.). В зависимости от задачи точность ориентации может составлять от $10\text{--}15^\circ$ до нескольких угловых секунд. Изменение траектории (ее коррекция, маневрирование КА, торможение перед спуском на Землю или другую планету и т. п.) необходимо для реализации любой достаточно сложной схемы космического полета. Поэтому все пилотируемые КА и большинство автоматических КА снабжены системой управления движением и бортовыми ракетными двигателями.

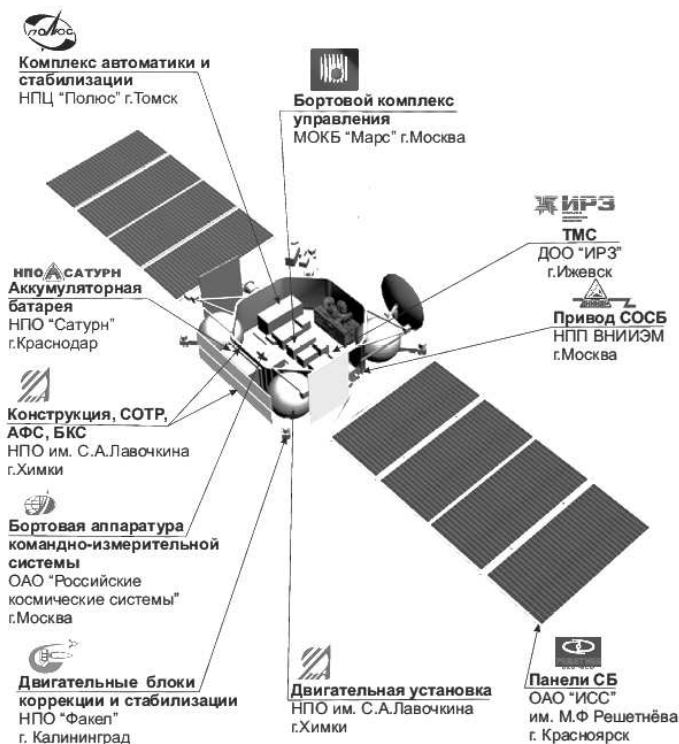


Рис. 1. Космическая платформа «Навигатор»: СОТР — система обеспечения тепловых режимов; АФС — антенно-фидерная система; БКС — бортовая кабельная сеть; СБ — солнечные батареи; СОСБ — система ориентации солнечных батарей; ТМС — телеметрическая система

Специфической задачей является поддержание на борту КА требуемой температуры. В отличие от наземных условий в космическом пространстве между отдельными телами осуществляется только лучистый теплообмен; на КА воздействуют внешние тепловые потоки — излучение Солнца, Земли или другой близкой планеты, обычно переменные (заход КА в тень Земли, полет на различных удалениях от Солнца). В свою очередь, КА должен излучать в окружающее пространство определенное количество тепла (зависящее от поглощения внешних тепловых потоков и внутреннего тепловыделения).

КА обычно имеют радиационную поверхность (часть его оболочки или отдельный радиатор-излучатель), которая за счет специальной обработки обладает большим собственным излучением тепла при малом поглощении его извне. Изменяя теплоподвод к радиационной поверхности и ее собственное излучение (например, с помощью специальных жалюзи), регулируют тепловой баланс КА, т. е. его температуру. Для тепловых процессов на борту КА характерно отсутствие конвективного теплообмена в связи с состоянием невесомости в полете; поэтому одна из функций системы терморегулирования — организация внутреннего теплового режима.

Проблема энергопитания бортовой аппаратуры КА решается в нескольких направлениях: а) использование солнечного излучения, преобразуемого в электроэнергию с помощью солнечных батарей, — способ энергопитания, наиболее широко применяемый на современных КА, — обеспечивает длительность работы аппаратуры до нескольких лет; б) установка новых источников тока с высокой энергоотдачей на единицу массы — топливных элементов, вырабатывающих электроэнергию в результате электрохимических процессов между двумя рабочими веществами, например, кислородом и водородом (полученная при этом вода может использоваться в системах жизнеобеспечения пилотируемых кораблей); в) применение бортовых ядерных энергетических установок с реакторами и изотопными генераторами. Химические источники тока (аккумуляторы) применяются только на КА с малым временем работы аппаратуры (до 1—3 недель) или в качестве буферных батарей в системах энергопитания (например, в сочетании с солнечными батареями). Полет автоматических и пилотируемых КА невозможен без радиосвязи с Землей, передачи на Землю телеметрической и телевизионной информации, приема радиокоманд, периодических измерений траектории движения КА, мобильной связи с космонавтами. Эти функции выполняют бортовые радиосистемы и наземные командно-измерительные пункты.

Одна из наиболее сложных проблем космических полетов — спуск КА на поверхность Земли и других небесных тел, когда космическая скорость КА должна быть уменьшена до нуля в момент посадки. Возможны два способа торможения КА: использование тормозящей реактивной силы; с помощью аэродинамических сил, возникающих при движении аппарата в атмосфере. Для реализации первого способа КА или его часть (спускаемый аппарат) должен быть снабжен тормозной ракетной двигательной установкой и большим запасом

топлива, поэтому спуск с ракетным торможением применяется только для посадки на небесные тела, лишённые атмосферы, например на Луну. Спуск с аэродинамическим торможением более выгоден в весовом отношении и является основным при осуществлении посадки КА на Землю. При спуске по баллистической траектории перегрузки достигают 8—10 g; спуск по планирующей траектории, когда на спускаемый аппарат кроме силы сопротивления действует и подъемная сила, позволяет уменьшить эти перегрузки в 1.5—2 раза. На участке спуска при движении в атмосфере имеет место интенсивный аэродинамический нагрев спускаемого аппарата. Поэтому он снабжается теплозащитным покрытием, создаваемым на основе керамических или органических материалов, обладающих высокой термостойкостью, малой теплопроводностью. В конце траектории спуска, на высотах в несколько километров, скорость движения снижается до 150—250 м/с. Дальнейшее снижение скорости перед приземлением осуществляется обычно с помощью парашютной системы. На советских кораблях «Восход» и «Союз» применялась система мягкой посадки, позволяющая уменьшить скорость приземления практически до нуля.

Конструкция КА отличается рядом особенностей, связанных со специфическими факторами космического пространства — глубоким вакуумом, наличием метеорных частиц, интенсивной радиации, невесомости. В вакууме изменяется характер процессов трения, возникает явление так называемой холодной сварки, что требует подбора соответствующих материалов для механизмов, герметизации отдельных узлов и др. Воздействие наиболее мелких метеорных частиц на поверхности КА при длительном полете может вызвать изменение оптических характеристик иллюминаторов, некоторых приборов, радиационных поверхностей и солнечных батарей, что требует специальных покрытий, особой обработки поверхности и др. Вероятность метеорного пробоя оболочки гермоотсеков современных КА невелика; для больших космических кораблей и орбитальных станций, совершающих длительный полет, должна предусматриваться противометеорная защита. Космическая радиация (потоки заряженных частиц в радиационном поясе Земли и при солнечных вспышках) может влиять на солнечные батареи, детали из органических соединений и другие элементы КА, поэтому в ряде случаев на них наносят защитные покрытия. Особые меры принимаются для защиты космонавтов от всплесков космической радиации. Высокая надежность существенна для всех видов КА, особенно при наличии

экипажа. Она обеспечивается комплексом мероприятий на всех этапах создания и подготовки к полету КА, включая повышение надежности его элементов, аппаратуры и оборудования, строгий технологический контроль на всех стадиях изготовления, тщательную отработку систем и агрегатов имитацией условий космического полета, проведение комплексных предполетных испытаний и др. Для повышения надежности на КА применяют дублирование, триплирование, резервирование отдельных агрегатов и приборов, а также автоматические схемы распознавания отказов приборов, а также элементов и их замены.

Основные задачи для систем терморегулирования космических аппаратов

Системы терморегулирования для летательных аппаратов [2] получили развитие сравнительно недавно. В 30-х гг. прошлого столетия, в связи с увеличением скорости и высоты полета, появляются первые обогревательные устройства. Для герметических кабин потребовались более сложные системы кондиционирования воздуха. В этот же период появляются и первые системы по поддержанию требуемого теплового режима в специальных приборных отсеках.

В 50-е гг. в связи с возникновением космической техники создаются первые СТР на искусственных спутниках Земли. В этот период происходит процесс интенсивного развития различных вариантов СТР для беспилотных летательных аппаратов.

С начала 60-х гг. для осуществления первых пилотируемых космических полетов потребовалось создание нового комплекса систем — систем обеспечения жизнедеятельности, составной частью которого стала и система обеспечения теплового режима, тесно связанная со всеми подсистемами этого комплекса.

Новый этап в развитии данных систем начинается с созданием долговременных орбитальных станций. За короткий период СТР космических аппаратов из простейших технических устройств, обеспечивающих тепловой режим отдельных агрегатов, превратились в сложный многозвенный и многосвязный комплекс функциональных подсистем, призванных поддерживать необходимые тепловые условия для жизнедеятельности и работы экипажа, функционирования оборудования, приборов и элементов конструкции. По существу СТР

современных КА обеспечивает организацию требуемого массоэнергетического обмена между всеми элементами корабля, включая экипаж, и вывод избыточной тепловой энергии в окружающую среду.

Система терморегулирования (СТР) является одной из основных систем космических аппаратов (КА), от работы которой зависит их нормальное функционирование. По роду выполняемых задач их можно сгруппировать следующим образом: 1) выравнивание температуры космического корабля, в результате которого градиенты температуры (между теневой и солнечной стороной) в конструкции могут быть сведены к минимуму и значительно снижены термические напряжения в этих элементах; 2) охлаждение тепловыделяющих элементов, например, элементов радиоэлектронного оборудования, энергетических блоков, специальной аппаратуры, выравнивание температуры радиатора; 3) поддержание необходимого диапазона терморегулирования в газонаполненных объемах: на обитаемых КА перепад температур $\Delta T = \pm 2.5$ K, на необитаемых он может достигать $\Delta T = 30$ K и более.

Основным способом терморегулирования, применяемым до настоящего времени на КА, являлся принудительный перенос теплоты с использованием однофазных теплоносителей. При умеренных тепловых нагрузках такие замкнутые системы с включенными в них насосами, приводящими в движение теплоноситель, и радиаторами, отводящими излучением (это единственный способ сброса тепла в безвоздушное пространство) избыточное тепло в космос, оказались вполне надежными [3]. Существенным недостатком этих систем является то, что температура теплоносителя значительно изменяется в пределах контура циркуляции. Разность температур можно уменьшить, повысив расход теплоносителя, однако для этого приходится увеличивать производительность насоса, что неизбежно ведет к увеличению энергопотребления, диаметров трубопроводов и массы системы в целом. А вывод в космос 1 кг массы КА обходится в миллионы рублей (например, доставка 1 кг массы «Аполлона» на Луну обошлась американцам в 1 млн \$). Здесь есть над чем задуматься.

Масса СТР весьма значительна и составляет на сегодняшних КА около 10 % от массы выводимого груза. Увеличение энерговооруженности КА и их линейных размеров (таковы тенденции) неизбежно ведет к увеличению доли массы СТР в суммарной массе КА.

По функциональным признакам систему терморегулирования можно разбить на три подсистемы. Первая — различные теплообменники (контактные теплообменники — термоплаты для отвода тепла

от электропотребляющего оборудования; газожидкостные теплообменники, обеспечивающие тепловой режим в газонаполненных объемах; корпусные теплообменники, термостабилизирующие элементы конструкции). Вторая подсистема — радиаторы-излучатели, сбрасывающие тепло в окружающее пространство. Третья подсистема — контур циркуляции теплоносителя, объединяющий первую и вторую подсистемы, обеспечивающий их нормальное функционирование, выполнение регулирующих и управляющих функций.

Что такое тепловая труба?

В современных космических аппаратах применяются сотовые панели со встроенными тепловыми трубами как несущий конструктивный элемент, используемый для размещения бортовой аппаратуры (см. рис. 2 и 3).

Тепловая труба (Heat Pipe) (рис. 2) была изобретена в 1963 г. в Лос-Аламосской Национальной Лаборатории для космического применения (G. Grower. Испарительно-конденсационное теплопередающее устройство), патент США № 3229759.

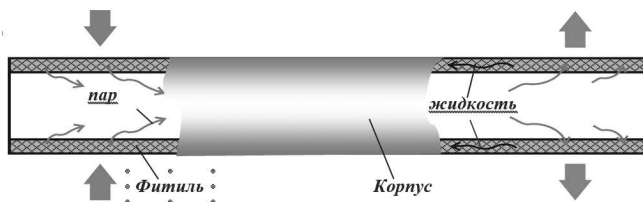


Рис. 2. Принципиальная схема тепловой трубы «классического» типа [4]

Естественные материалы, обладающие самой высокой теплопроводностью:

алюминий — 230 Вт/мК,

золото — 320 Вт/мК,

медь — 390 Вт/мК,

серебро — 430 Вт/мК,

алмаз — до 2600 Вт/мК,

графен — 5300 Вт/мК.



Рис. 3. Система терморегулирования на основе тепловых труб

Эквивалентная (эффективная) теплопроводность тепловых труб может достигать 10^5 – 10^6 Вт/мК!



Рис. 4. Сотовые панели со встроенными тепловыми трубами

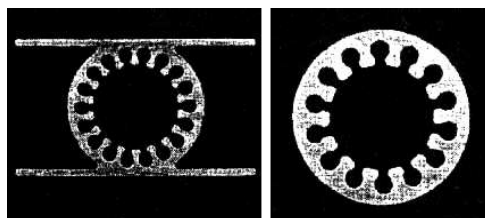


Рис. 5. Капиллярные структуры тепловых труб для космоса

Центр им. М. В. Келдыша совместно с РКК «Энергия» приступил к выпуску тепловых труб нового поколения с повышенным ресурсом работы (рис. 4). Для тепловых труб использованы профили

(рис. 5) с оптимизированной капиллярной структурой, в качестве теплоносителя применяется аммиак сверхвысокой чистоты. Отработанная на опытных партиях технология подготовки поверхностей, заправки и герметизации тепловой трубы позволяет достигнуть высокого ресурса работы тепловых труб и прекрасных теплофизических показателей.

Для космических аппаратов с высоким тепловыделением в Центре им. М. В. Келдыша совместно с РКК «Энергия», ЦНИИМАШ, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Харьковским авиационным институтом (Украина) разработаны двухфазные аммиачные системы терморегулирования, обладающие повышенной массовой и энергетической эффективностью. Такие системы применимы для целого ряда перспективных КА различного назначения — от КА дистанционного зондирования Земли до мощных телекоммуникационных платформ и орбитальных станций.

Рост тепловыделения на КА с одновременным увеличением его линейных размеров ставит задачу разработки систем терморегулирования, использующих двухфазный теплоноситель (системы с фазовым переходом теплоносителя). Скрытая теплота парообразования на несколько порядков превышает теплоемкость жидкости. Поэтому потребный расход теплоносителя намного меньше расхода теплоносителя в однофазной системе (перенос тепла за счет теплоемкости теплоносителя), следовательно, уменьшаются диаметры и масса трубопроводов и арматуры (рис. 6). Преимущества двухфазных теплопередающих контуров также определяются:

- более высокими коэффициентами теплоотдачи при кипении и конденсации и, как следствие, снижением массы СТР;
- простотой термостабилизации участков «сбора» и «сброса» теплоты, небольшим перепадом температур между ними;
- возможностью уменьшения массы теплоносителя за счет неполной заправки контура;
- простотой реализации пассивного способа терморегулирования.

Для сравнения СТР с одно- и двухфазным теплоносителем используется целый ряд количественных и качественных критериев: масса M и геометрические характеристики системы, потребляемая мощность насоса для прокачки теплоносителя при заданном тепловом потоке Q и расстоянии теплопереноса L , точность термостабилизации всех объектов и др. Часто используют объединенный крите-

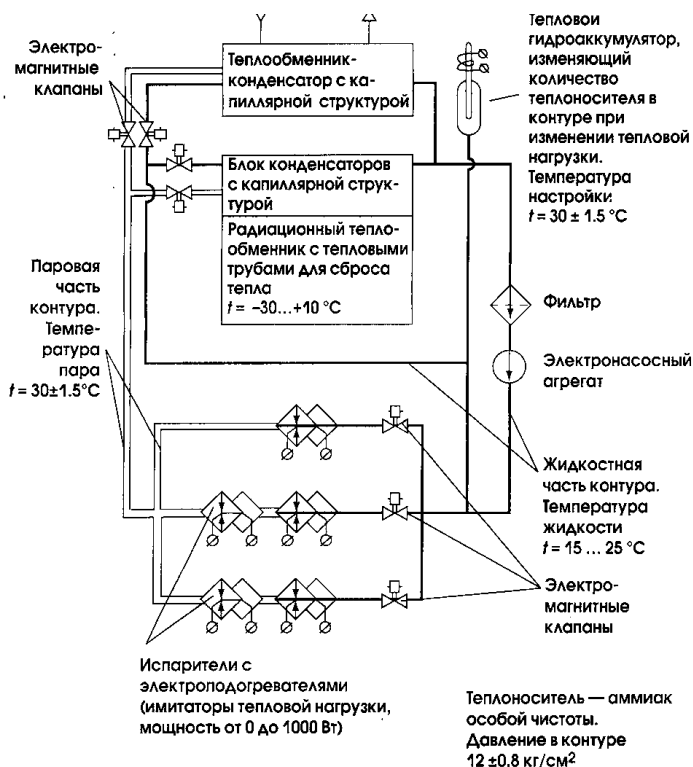


Рис. 6. Двухфазный контур с насосной прокачкой теплоносителя

рий — удельный коэффициент переноса теплоты $k_T = QL/M$. Очевидно чем выше значение этого критерия, тем более эффективна СТР. На рис. 7 приведено сравнение k_T для различных СТР космического базирования.

Как видно, при больших тепловыделениях и расстояниях теплопереноса неоспоримым преимуществом по массе СТР и мощности насоса обладает двухфазный контур (ДФК) с насосной прокачкой теплоносителя. При умеренных расстояниях конкурентоспособными становятся ДФК с капиллярной прокачкой (в частности, контурные тепловые трубы, рис. 8).

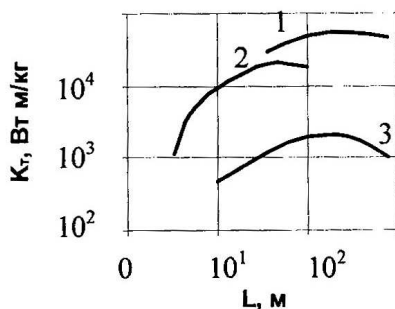


Рис. 7. Сравнение значений удельных коэффициентов переноса теплоты для разных СТР [3]: 1 — двухфазная СТР с насосной прокачкой теплоносителя, $\Delta T = 5^\circ\text{C}$; 2 — двухфазная СТР с капиллярной прокачкой, $\Delta T = 5^\circ\text{C}$; 3 — однофазная СТР, $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

Справедливо будет сказать и о дополнительных трудностях, связанных с переходом к двухфазным контурам теплопереноса. Так, гидравлика и теплоотдача двухфазного потока существенно зависят от наличия поля массовых сил, наличие в ДФК упругих объемов (пар) делают систему склонной к генерации колебаний и даже взрыву.

В настоящее время усиленно ведутся разработки, посвященные техническим решениям по нескольким типам ДФК, особенно по ДФК с капиллярными насосами (рис. 9). Требования, предъявляемые к ДФК СТР, вытекают прежде всего из назначения КА. Последние можно разделить на три типа: длительно функционирующие обитаемые (посещаемые) орбитальные платформы; автономные КА длительной эксплуатации (орбитальные и межпланетные); короткоживущие КА и космические самолеты. Для первых двух типов характерны очень большие сроки эксплуатации — от 5 до 25 лет и более. На обитаемых платформах допускаются техобслуживание и ремонт. Для этих КА утвердилась концепция построения СТР по-

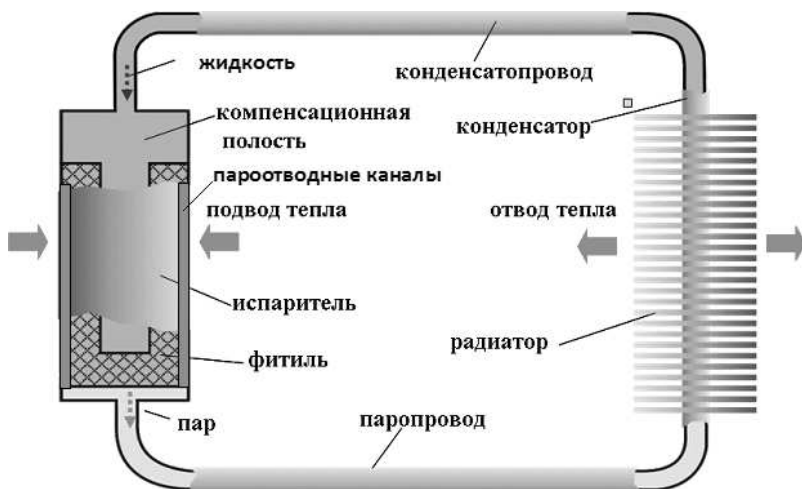


Рис. 8. Принципиальная схема контурной тепловой трубы, разработанной в УрФУ [5, 6]

добно теплоцентрали с использованием «тепловой шины» — автономной централизованной системы отвода тепла, к которой могут подсоединяться модули (пользователи) различного назначения и с различным тепловыделением. Каждый модуль при этом имеет свою СТР, взаимодействующую с тепловой шиной через гидравлический разъем или контактный теплообменник.

Выбор соответствующего теплоносителя осуществляется прежде всего, исходя из диапазона рабочих температур, при этом теплоноситель находится в жидком состоянии между тройной и критической точками фазовой диаграммы. Для однофазных СТР выбор теплоносителя осуществляется по большим значениям коэффициентов теплопроводности, теплоемкости, температуропроводности и малым значениям величины кинематической вязкости. Кроме того, теплоноситель должен быть инертен (химически стабилен) к материалам насоса и контура, а также к внешним воздействиям (в том числе к космическому излучению для СТР КА, воздействию нейтронов для СТР ЯЭУ и т. д.), должна быть минимальная растворимость воздуха и других газов. Для одно- и двухфазных контуров кроме пе-

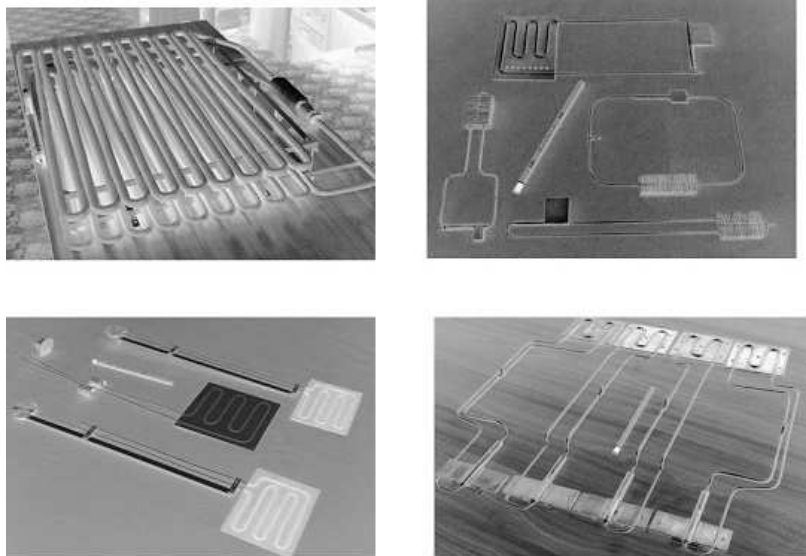


Рис. 9. Контурные тепловые трубы Института теплофизики УрО РАН [7]

речисленных требований коэффициент объемного расширения при кристаллизации не должен быть больше единицы, как это наблюдается для воды.

В ДФК большая часть теплоты подводится к теплоносителю и отводится от него при фазовом переходе — испарение (кипение) и конденсация. Давление, в отличие от однофазного теплоносителя, не может выбираться независимо от температуры, и этим определяется еще одно требование: не слишком высокое и не очень низкое давление насыщения P_s при рабочих температурах. Рациональный уровень давления должен быть несколько выше давления окружающей среды P_{env} . В противном случае снижается надежность СТР: при $P_s < P_{env}$ увеличивается возможность натекания в СТР внешней среды; при высоком давлении насыщения P_s увеличиваются масса СТР и сложности по обеспечению ее герметичности. Скрытая теплота парообразования H_{ev} является важнейшим показателем эффективности теплоносителя для ДФК, при этом она должна быть максимальной. Еще одна характеристика теплоносителя важна для ДФК с узким диапазоном температуры термостатирования. Так как тече-

ние теплоносителя через различные трубопроводы, дроссели, теплообменники и т. д. сопровождается падением давления, следовательно и температуры кипения, то должно быть высокое значение $(dP/dT)_T$ на линии насыщения теплоносителя (бинодали) при рабочей температуре. Для ДФК с капиллярными насосами (КН) преимущества имеют теплоносители с большим значением комплекса $K = \sigma H_{ev}/\nu$ (σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; ν — коэффициент кинематической вязкости пара теплоносителя), который характеризует производительность КН.

Эксплуатационными требованиями для любых типов теплоносителей СТР являются низкая токсичность, малая коррозионная активность по отношению к основным конструкционным материалам, пожаро- и взрывобезопасность, низкая стоимость, доступность.

Эпилог

Новый этап освоения систем терморегулирования... начался с появлением контурных тепловых труб... Разработка была инициирована работами исследователей из Екатеринбурга... Эти устройства могут передавать тепло в произвольном направлении в поле массовых сил, позволяют практически беспредельно увеличить мощность и протяженность теплопереноса, обеспечивают фантастические возможности для управления тепловыми потоками и температурами.

*Из доклада руководителя—главного конструктора
Центра тепловых труб РКА К. А. Гончарова по поводу
20-летнего юбилея коллектива Центра (27.11.2010)*

Все космические аппараты, создаваемые сегодня в НПО им. С. А. Лавочкина и на многих других космических предприятиях России, немислимы без этих уникальных устройств.

*Из доклада руководителя—главного конструктора
Центра тепловых труб РКА К. А. Гончарова по поводу
20-летнего юбилея коллектива Центра (27.11.2010)*

На рис. 10—14, показана хронология использования тепловых труб в космических аппаратах.



Рис. 10. Варианты исполнения КТТ для космической техники



Рис. 11. Первое применение КТТ на российской космической технике



Рис. 14. Примеры использования КТТ на космических аппаратах

Библиографические ссылки

1. *Хромов С. П., Петросяниц М. А.* Метеорология и климатология. — М. : Изд-во МГУ, 2001.
2. *Малоземов В. В.* Тепловой режим космических аппаратов. — М. : Машиностроение, 1980.
3. *Никонов А. А., Горбенко Г. А., Блинков В. Н.* Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. — М. : Поиск, 1991.
4. *Воронин В. Г., Ревякин А. В., Сасин В. Я., Тарасов В. С.* Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. — М. : Машиностроение, 1976.
5. *Faghri A.* Heat pipe science and technology. — Washington : Taylor & Francis, 1995.
6. *Кусеев В. М.* Физика теплопередающих систем. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2006.
7. <http://www.uran.ru>.

DARK MATTER — TRUTH OR MYTH?

The mysterious Dark Matter is currently being called the Saint Graal of science. The estimates of its mass give the values many times higher than that of the "traditional" baryonic matter. Such a huge mass must play a crucial role in all conceivable models of spiral galaxies and the Universe. However, all attempts to detect this material directly (not via its gravity but due to either absorption or emission of electromagnetic radiation) failed – this is why it is called "Dark". The crucial evidence of the Dark Matter follows flat rotation curves of spiral galaxies. In the case of our Milky Way this means constant orbital velocity of all objects outside the solar orbit. One of the main sources of uncertainty in construction of such a curve for our Milky Way system follows the distance measurements. The other follows uncertain radial velocities of the observed stars as the rotation curve depicts a relation between distance and radial velocity.

Basing on our huge collection of echelle spectra of OB stars we demonstrated that distances to OB stars can be reliably estimated using intensities of interstellar CaII H and K lines. The same lines allow also to measure Doppler velocities of the most distant clouds along any sightline with the precision much higher than in the case of stellar spectra as the latter are influenced by fast rotation and binarity of many OB stars. The talk will demonstrate that even the existing data create serious doubts as to the existence of Dark Matter: the rotation curves of young, disk population objects (interstellar clouds) clearly follow keplerian rather than flat rotation curve of the Milky Way. To avoid existing uncertainties it is necessary to collect a statistically significant sample of objects. The most interesting directions in the galactic disk are these at $l = 135, 180, 225^\circ$. Along these sightlines the expected effects are to be strongest. The first two directions are available for ground-based observatories located at the Northern Hemisphere; the latter requires using some Southern Hemisphere instruments.

КАК УВИДЕТЬ ГЕОМЕТРИЮ В ОБЛАКЕ ТОЧЕК?

В лекции обсуждаются подходы к «обучению многообразиям». Так называют круг задач, связанных с восстановлением геометрических форм из облака наблюдаемых точек. Точками могут служить скалярные поля, полученные в компьютерных экспериментах, сенсорные сети или данные измерений. Дано краткое введение в методы вычислительной топологии (персистентные гомологии, функция размера) и спектральную геометрию (спектр собственных значений дискретного оператора Лапласа). Приводятся методы статистической проверки гипотез при топологическом анализе данных. Они основаны на оценках гомологий случайных комплексов и усреднениях по Фреше. Теоретические концепции иллюстрируются примерами топологической диагностики реальных полей.

The lecture discusses approaches to the “manifold learning via homology”. This term is used for the range of problems of the TDA (Topological Data Analysis) related to the reconstruction of shapes from clouds of observed points. The points might be scalar fields obtained by computer simulations, sensor networks or measurement data. The lecture provides a brief introduction to the methods of computational topology (persistent homology, size function) and the spectral geometry (spectrum of the discrete Laplacian operator). There are also given the methods of statistical testing of hypotheses in the TDA. They are based on estimates of the homology of random complexes and the Fréchet mean. Theoretical concepts are illustrated by examples of topological testing of the real fields.

СОВРЕМЕННЫЕ ОБЗОРЫ, АТЛАСЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Определение атмосферных параметров звезд и параметров межзвездного поглощения необходимо для понимания строения и эволюции Галактики. В работе представлены результаты сравнительного анализа современных популярных больших фотометрических обзоров и атласов распределения энергии в спектрах звезд, которые могут быть использованы для параметризации звезд и межзвездной среды. Обсуждаются также инструменты для получения многоцветной фотометрии для миллионов объектов и построения карты межзвездного поглощения.

Determination of stellar atmospheric parameters and parameters on interstellar extinction is needed for study of the galactic structure and evolution. We present the results of the comparative analysis of the most known modern spectral atlases and large photometric surveys that can be used for parameterization of stars and interstellar medium. Tools for getting multicolor photometric data for millions of objects and for construction of an interstellar extinction map are also discussed.

Введение

Одной из важнейших задач астрофизики и звездной астрономии является исследование межзвездной среды, которая, в частности, вызывает поглощение света звезд и галактик, а также искажает распределение энергии в спектре. В большинстве областей оптического диапазона спектра длинноволновые лучи поглощаются в меньшей степени, чем коротковолновые, и это приводит к увеличению доли длинноволнового излучения, что обычно называется покраснением. Сравнивая спектральный состав регистрируемого излучения с исходным, оценивают количество межзвездного вещества, находящегося на луче зрения. Проведя подобные исследования во всех возможных направлениях в Галактике, получают трехмерную карту межзвездного поглощения.

Трехмерные карты межзвездного поглощения создаются уже около полувека. Для этого использовались различные методики, такие как звездные подсчеты, данные по рассеянным скоплениям, модели распределения пыли в Галактике, сравнение результатов популяционного синтеза с каталогизированными данными. Однако наиболее распространенным подходом является использование спектральных и фотометрических данных о звездах. При этом небесная сфера делилась на площадки, и из данных о звездах в каждой площадке определялось значение поглощения как функции расстояния. Размеры площадок варьировались от исследования к исследованию, хотя обычно эти размеры подбирались весьма большими, чтобы площадки содержали необходимое для статистики число звезд на различных расстояниях.

Как показал критический анализ ряда популярных карт межзвездного поглощения, разногласия между ними в большинстве направлений на небе довольно велики [1]. Таким образом, представляется целесообразным сконструировать карту межзвездного поглощения, базирующуюся на современных наблюдательных данных с привлечением современных инструментов работы с данными.

Как параметры звезды, так и значение межзвездного поглощения могут быть определены из спектра звезды. Однако для получения распределения энергии в спектре с достаточной точностью либо требуются большие инструменты, либо исследуемый объект должен быть сравнительно ярким. Эти обстоятельства сильно ограничивают количество объектов, для которых могут определяться параметры, и полученная таким образом карта межзвездного поглощения имела бы очень невысокое пространственное разрешение. Поэтому основным источником сведений об объектах для решения данной задачи остается фотометрия.

Двухцветные диаграммы

Покраснение ведет к изменению значений показателей цвета в разных фотометрических системах. В традиционной форме, когда показатель цвета представляет разность пары звездных величин «коротковолновая минус длинноволновая» (например, $B-V$), при наличии покраснения показатель цвета увеличивается. В первом приближении величина ослабления света межзвездной средой (в звездных величинах) в видимой области спектра пропорциональна обратной длине волны $1/\lambda$.

Важнейшим способом изучения межзвездного покраснения являются двухцветные диаграммы: если в фотометрической системе более двух полос, то можно составить более одного показателя цвета и представить на диаграмме зависимость одного показателя от другого. Наблюдаемые показатели цвета, искаженные межзвездной экстинкцией, называются «покрасненными». В противоположность этому собственные, присущие самим звездам показатели цвета называются «непокрасненными». Непокрасненные показатели цвета, усредненные для группы звезд определенного спектрального подкласса, называются нормальными. Линия, соединяющая положения на двухцветной диаграмме непокрасненных звезд различных спектральных классов одного класса светимости, называется линией нормальных показателей цвета (так называемая линия нормальных цветов). При наличии межзвездного поглощения звезда на двухцветной диаграмме смещается со своего места на линии нормальных показателей цвета по обеим координатам в сторону увеличения показателей цвета. Линии, по которым происходит это смещение, называют линиями покраснения или линиями нарастающего поглощения. В случае монохроматических величин или при относительно небольшом поглощении они являются прямыми, но при большем поглощении в случае гетерохромных полос линии покраснения искривляются, становятся параболами, угол наклона касательных к линиям покраснения становится функцией величины поглощения. Классическим способом определения покраснения является использование диаграмм ($U-B$, $B-V$) или ($W-B$, $B-V$).

Двухцветные диаграммы являются важнейшим инструментом изучения межзвездного поглощения. Однако определять величину поглощения по двухцветным диаграммам можно далеко не всегда. Во многих случаях линии нарастающего покраснения на диаграммах имеют практически тот же наклон, что и линии, представляющие основные последовательности непокрасненных звезд (линии нормальных цветов). Разделить на двухцветной диаграмме «экстинкционное» и «температурное» покраснение можно лишь в случае, если используемая фотометрическая полоса покрывает спектральный диапазон, в котором либо (i) закон межзвездного поглощения, либо (ii) распределение энергии в спектре звезды заметно отличается от монотонного. Первое условие выполняется в ультрафиолетовом диапазоне, где закон межзвездного поглощения имеет хорошо известный локальный максимум на $\lambda = 217$ нм. Второму условию удовлетво-

ряют, например, бальмеровский скачок в районе $\lambda = 365$ нм у А и F звезд, а также мощные линии окиси титана и других молекул начиная от $\lambda = 500$ нм у М звезд.

На последнее обстоятельство в процессе разработки фотометрической системы для космического эксперимента «Лира» обратили внимание в [2], показав, что на двухцветной диаграмме (B–V, V–I) линия гигантов спектральных классов М4–М8 проходит под значительным углом к линии нормальных показателей цвета других звезд. Следовательно, и линии нарастающего покраснения (экстинкционного покраснения) должны идти под значительным углом к последовательности гигантов (линии температурного покраснения).

Это обстоятельство делает М-гиганты незаменимым источником данных как о параметрах звезд, так и о межзвездном поглощении. Однако работа по выделению фотометрических систем, в которых проявляется этот эффект, выведению для этих фотометрических систем линии нормальных цветов М-гигантов и созданию методик параметризации М-гигантов по фотометрии (включая определение межзвездного поглощения) еще далека от завершения.

Необходимо добавить, что холодные звезды других классов светимости (М-карлики и М-сверхгиганты) представлены в наблюдательных обзорах значительно беднее, а звезды других температурных классов заметно менее пригодны для определения межзвездного поглощения. Эти обстоятельства вынуждают искать другие пути для определения как параметров звезд, так и параметров межзвездного поглощения.

Приемлемым решением задачи построения трехмерных карт поглощения может послужить использование *многоцветной* фотометрии звезд, с помощью которой параметризация стала бы гораздо более точной. Существующие трехмерные карты поглощения базировались на данных о десятках и сотнях тысяч звезд, тогда как современные большие обзоры содержат фотометрические (обычно — 3–5 полос) данные для десятков и сотен миллионов звезд. Однако при использовании этих данных для построения карты требуется корректно провести кросс-отождествление объектов в обзорах.

Кросс-отождествление больших обзоров

В работе [3] была поставлена задача провести кросс-отождествление объектов из больших фотометрических обзоров в избранных площадках на небесной сфере. Основной целью работы

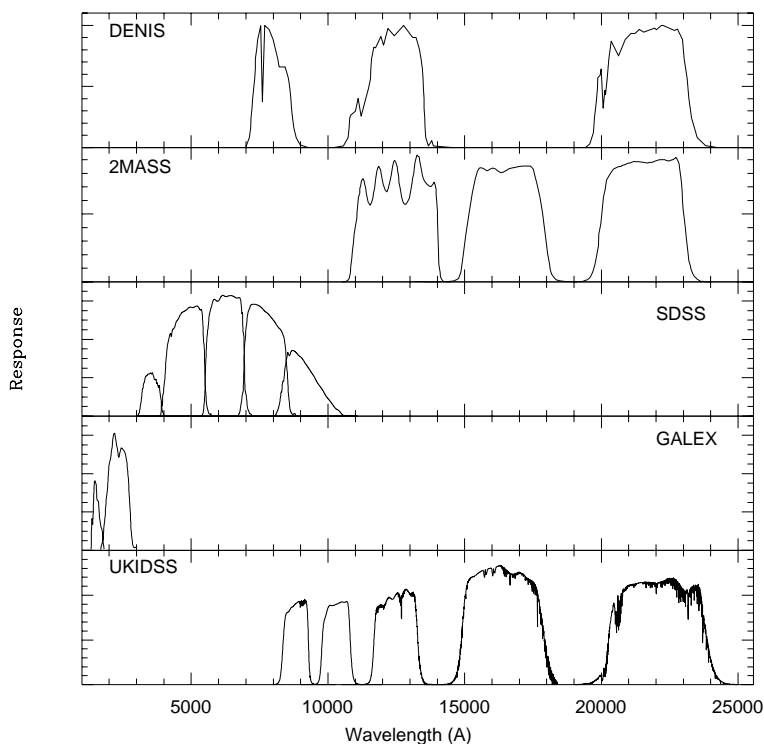


Рис. 1. Кривые реакции фотометрических полос больших фотометрических обзоров

являлось создание каталогов звезд в данных площадках, содержащих всю полученную из обзоров информацию, необходимую для определения параметров звезд, включая межзвездное поглощение. Кроме того, решалась проблема определения оптимального радиуса отождествления.

При выборе фотометрических обзоров принимались во внимание следующие критерии: обзор должен покрывать значительную часть неба и содержать фотометрические измерения для по крайней мере десятков миллионов объектов. Информация об использованных обзорах приведена в таблице и на рис. 1.

Большие фотометрические обзоры

Обзор	Число объектов, млн	Покрытие неба	Фотометри- ческие	Предельная величина полосы
DENIS	355	Южн. полусф.	Gunn-i, J, K _S	18.5, 16.5, 14.0
2MASS	300	Все небо	J, H, K _S	15.8, 15.1, 14.3
SDSS	500	25 % неба	u, g, r, i, z	g,r=22.5
GALEX (AIS)	90	90 % неба	FUV, NUV	~23
UKIDSS (LAS+GPS)	40	15 % неба	Z, Y, J, H, K	K=18.5

Обзоры семейства GSC (<http://archive.stsci.edu/gsc/>) и USNO-A,B (<http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/ua2.html>, <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/ub1.html>) не рассматривались в данном исследовании, поскольку представленные в них фотометрические данные обладают сравнительно невысокой точностью. Не рассматривались также яркие и сравнительно небольшие обзоры Tycho-2 [4] / ASCC [5] и WBVR [6], лишь незначительно пересекающиеся по количеству объектов с обзорами, приведенными в таблице. Впрочем, в некоторых из упомянутых обзоров содержится информация о наличии взаимных отождествлений. Так, 2MASS содержит информацию о наличии близких объектов из Tycho-2 или каталогов семейства USNO, расстояние до них, их количество и звездные величины. При этом радиус отождествления составлял $5''$, и на поле 0.1° большая часть однозначно отождествляется с ошибками не более $1.5\text{--}2''$. Каталог USNO-B1 содержит однозначные отождествления с Tycho-2, при этом координаты объектов практически (до десятой доли секунды) совпадают. Каталоги GALEX и UKIDSS не содержат информацию об оптических отождествлениях.

Работы по кросс-отождествлению каталогов начали проводиться астрономами практически сразу после появления электронных версий больших каталогов. Кросс-отождествление каталогов — мощный инструмент для решения целого ряда задач, поэтому различными коллективами, работающими в рамках Виртуальной Обсерватории, был разработан ряд специализированных программ. Среди них можно упомянуть американский сервис OpenSkyQuery (<http://www.openskyquery.net>), российский (ГАИШ МГУ) сервис SAI CAS Crossmatch (<http://vo.astronet.ru/cas/crossmatch.php>), немецкий проект Multi-Catalogue Multi-Cone Search (<http://www.gvo.org/mcmcs/>). Существует также ряд инструментов для работы с локальными данными. Так, программа Topcat (<http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>) имеет встроенный функционал для отождествления локальных данных, Aladin (<http://aladin.u-strasbg.fr/>) также позволяет проводить отождествление списка объектов с каталогом. SDSS SkyServer (<http://cas.sdss.org/>) позволяет проводить отождествление собственных списков объектов с общим каталогом SDSS.

Однако существующие публично доступные сервисы не подходят для решения данной задачи, поскольку не включают в рассмотрение ряд необходимых обзоров. Так, большая часть этих систем

не работает с данными GALEX, а OpenSkyQuery — вообще с неамериканскими обзорами. Потому использовалась собственная реализация алгоритма кросс-отождествления.

В целом задача кросс-отождествления объектов в разных каталогах состоит в поиске проявлений одного и того же источника в двух или более списках координат. При этом приходится иметь дело со следующими проблемами:

- плохая координатная точность, разные системы координат каталогов, разные эпохи наблюдений (для случаев большого собственного движения), что приводит к тому, что координаты одного и того же объекта в разных списках в общем случае не совпадают либо систематически, либо случайным образом;
- разные чувствительности и, следовательно, разные предельные величины в каталогах. В итоге объект может присутствовать только в одном из списков; с другой стороны, в более глубоких каталогах будут присутствовать объекты, которых нет в первом списке.

Для отождествления списков объектов могут применяться следующие способы.

- Структурный. Выделяются некоторые характерные множества объектов — геометрические конфигурации и сопоставляются такие конфигурации из разных списков. Основная область применения этого метода — первичная астрометрическая привязка при наблюдениях, сопоставление звезд с кадра (координаты на ПЗС-матрице) и из каталога (координаты на небе). Обычно используется метод треугольников (их углы или отношения сторон инвариантны относительно масштабирования и поворота), однако встречаются и алгоритмы, работающие с более сложными конфигурациями.
- Координатный. Сопоставляются все объекты разных каталогов, имеющие взаимные расстояния меньше некоторого предела. Это самый простой и часто используемый на практике вариант. Проблемы возникают, если в рассматриваемой окрестности объекта (задаваемой, скажем, точностью определения координат или величиной ожидаемого собственного движения) оказываются несколько объектов-кандидатов из второго каталога — получается неоднозначное сопоставление.

- Координатное сопоставление с фильтрацией объектов. Основная идея заключается в использовании дополнительной информации об объектах и введении основанного на ней критерия, позволяющего выбрать из всех возможных кандидатов наиболее подходящий. Так, если в каталогах имеются измерения в близких спектральных диапазонах, то величины объекта в них будут совпадать (в границах соответствующих погрешностей). Если полосы каталогов существенно различны, можно использовать информацию об ожидаемых показателях цвета объектов — вычислять эти показатели всех пар-кандидатов и отбирать физически разумные либо совпадающие с основной массой показателей цвета всех получаемых пар в исследуемой площадке после фильтрации отскоков (скажем, итеративный сигма-клиппинг на уровне трех выборочных стандартных отклонений). Отметим, что показатели цвета могут вычисляться не только как разности звездных величин в полосах одного и того же обзора, но и как разности звездных величин в полосах разных обзоров.

В данной работе использовался последний способ. После получения всех возможных пар звездных величин из всех каталогов проводится моделирование их спектров с определением межзвездного покраснения. Пары, которые дают заведомо неразумные либо существенно отличающиеся от соседних замеров значения, очевидно, соответствуют неверному (случайному) отождествлению и должны отбрасываться.

Некоторая дополнительная фильтрация, впрочем, проводится и непосредственно на стадии сопоставления объектов. Некоторые пары каталогов имеют близкие спектральные полосы, соответственно разумно ожидать, что в них будут близкие значения величин (с точностью до нуля-пункта и ошибок измерений). На рис. 2 приводится зависимость показателя цвета по полосам H обзора 2MASS и g обзора SDSS от взаимного расстояния между объектами. Хорошо выделяется локализованная по показателю цвета группа с взаимным расстоянием меньше $1''$ — более далекие пары дают существенно больший разброс показателя цвета, более того, заметен провал между этой группой и остальными объектами. Можно считать, что данная группа соответствует «правильным» отождествлениям, и это позволяет соответственно выбрать радиус отождествления. Впрочем, это все равно не избавляет от многозначных отождествлений; на верхней панели того же рисунка приведены зависимость полного числа

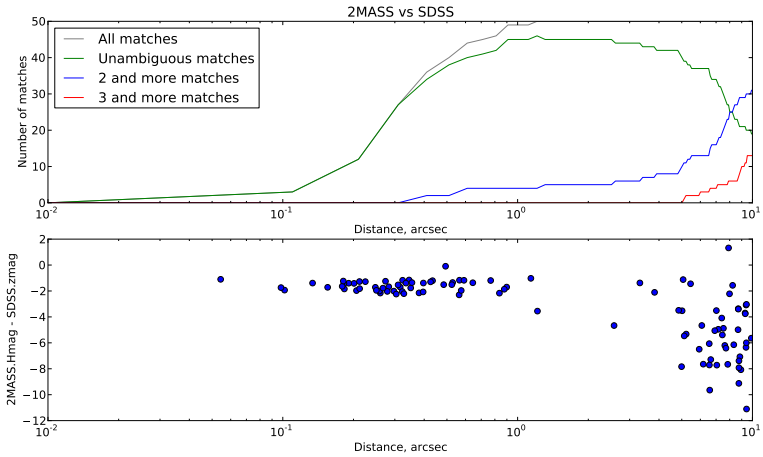


Рис. 2. Зависимость количества однократных и кратных отождествлений от радиуса отождествления (вверху). Зависимость показателя цвета $H_{2MASS} - g_{SDSS}$ от взаимного расстояния между объектами (внизу)

объектов, количества однозначных сопоставлений, сопоставлений с более чем одним кандидатом и т. д. Видно, что уже при радиусе в $\sim 0.3\text{--}0.5''$ появляются несколько неоднозначных отождествлений, которые по показателям цвета отбросить не получается. В этом случае необходимо привлекать данные иных каталогов либо отсеивать их на финальной стадии работы.

Отметим также, что при кросс-отождествлении каталогов существенного объема становятся принципиальными и чисто технические сложности. Действительно, проведение отождествления «в лоб» требует перебора всех возможных пар объектов из первого и второго каталогов, расчета их взаимных расстояний и отсеивания больших их значений, это требует по порядку величины $\sim N_1 \cdot N_2$ операций (где N_1 и N_2 — числа объектов), что делает такой подход практически непригодным для каталогов даже небольшого объема. Очевидным способом преодоления ограничения является использование позиционного индекса, существенно ускоряющего операции выборки объектов в заданных площадках. Это позволяет перебирать для каждого объекта первого каталога не все объекты из второго, а только нахо-

дящиеся в некоторой достаточно малой окрестности, что для основных типов индексов приводит к снижению числа операций до $\sim N_1 \cdot \ln N_2$. Это дает существенный выигрыш в скорости, даже с учетом времени, требуемого для построения индекса, и позволяет в принципе проводить за разумное время тотальные кросс-отождествления даже крупнейших современных каталогов между собой.

В данной работе использовались следующие технологии.

- Для поиска доступных каталогов были использованы средства Виртуальной Обсерватории — реестры ресурсов. Они позволили получить соответствующие сетевые адреса, предоставляющие доступ к данным в заданных площадках — интерфейсы радиальных запросов (conesearch). Был написан код, автоматически обращающийся по этим адресам, запрашивающий данные наших площадок и сохраняющий результаты в стандартном для Виртуальной Обсерватории формате таблиц — VOTable.
- Для проведения собственно сопоставления каталогов был применен подход, основанный на построении пространственного индекса для ускорения позиционного поиска. В работе использовался сферический индекс HTM — Hierarchical Triangular Mesh, разработанный в рамках проекта SDSS, а именно — его реализацию, взятую из программного пакета *esutil* (<http://code.google.com/p/esutil/>).
- Код кросс-отождествления, использующий этот сферический индекс, был написан на языке программирования высокого уровня Python. Скорость работы кода оказалась достаточной для отождествления каталогов в выбранных нами площадках не очень большого размера. Для доступа к каталогам в VOTable-формате применялась модифицированная версия пакета *ATPy*, для визуализации результатов — библиотека построения графиков *Matplotlib*. Также для визуальной проверки получающихся в результате отождествления таблиц использовался пакет *Topcat*.

По описанной выше методике нами было проведено кросс-отождествление объектов из пяти обзоров (см. таблицу) в нескольких площадках.

Для каждой площадки и каждой пары каталогов подбирался радиус отождествления (radius matching, RM) по принципам, изображенным на рис. 2. Результаты кросс-отождествления показали, что

если, например, для пары 2MASS-SDSS может быть достаточно радиуса отождествления около 1 (здесь и далее значение RM указано в угловых секундах), то для отождествления GALEX-SDSS задача существенно сложнее (прежде всего из-за не очень высокой позиционной точности каталога GALEX). Работы по отождествлению GALEX-SDSS проводились и ранее [7], однако опубликованные результаты не могут использоваться в данной задаче. Не только потому, что это отождествление предыдущих версий (GR2-3 для GALEX и DR6 для SDSS), а главным образом потому, что в [7] ставилась другая задача, а именно — найти *все* общие объекты. Для нашей же задачи (параметризация звезд и определение межзвездного поглощения в Галактике) важнее выбирать только надежные отождествления, чем пытаться найти все возможные кандидаты. Другими словами, пропуск нескольких подходящих объектов является гораздо менее серьезной оплошностью, чем, наоборот, включение в финальную выборку неверно отождествленного объекта. Поэтому наши критерии кросс-отождествления жестче, в частности, RM может быть уменьшен.

Очевидно, значение RM зависит не только от отождествляемых каталогов, но и от координат площадки: RM тем меньше, чем в более населенной звездами области (то есть в низкие галактические широты) мы работаем. Однако анализ показал, что в качестве первого приближения можно (для всех площадок) использовать $RM = 3$ при кросс-матчинге каталога GALEX с любым другим и $RM = 1$ для всех остальных пар каталогов. В дальнейшем для корректного отождествления в произвольной площадке необходимо будет эмпирически получить зависимость RM от галактической широты либо предвзято каждый процесс кросс-отождествления вычислением соответствующего RM .

В процессе кросс-отождествления целесообразно также использовать информацию о классе объектов, содержащуюся в оригинальных каталогах. Так, в исходном каталоге GALEX есть указание на класс объекта, и эту информацию необходимо учитывать: галактик в каталоге GALEX в 1.5 раза больше, чем звезд. Проблема неоднозначных отождествлений также подлежит дальнейшему исследованию.

Атласы спектральных распределений

Следующим этапом работы является исследование возможности одновременного определения по современной многоцветной фотометрии параметров звезд и межзвездного поглощения. Основная идея используемого метода заключается в дискретизации непрерывного множества звездных параметров и параметров закона межзвездного поглощения и в дальнейшем вычислении для каждого элемента дискретного множества соответствующего блеска в фотометрических полосах исследуемых обзоров. При этом для каждого уникального набора параметров звезды и закона межзвездного поглощения вычисляются (синтезируются) звездные величины для одного и того же набора фотометрических полос. Множество элементов, которые имеют одинаковые с заданной точностью звездные величины во всех соответствующих друг другу фотометрических полосах, дает возможность оценить точность параметризации. Для синтеза же звездных величин необходимо использовать атлас спектральных распределений.

Атласы распределений энергии в спектрах звезд делятся на три типа. Первый тип — эмпирические атласы, содержащие результаты наблюдений конкретных звезд. Второй — так называемые полуэмпирические (т. е. усредненные по типу звезд) атласы. Третий тип — это теоретические работы, в которых на основе физических моделей атмосфер звезд вычислены выходящие потоки излучения в зависимости от длины волны (синтетические спектры). Рассмотрим три этих типа более подробно.

Эмпирические атласы

Во второй половине XX в. фотоэлектрические измерения с целью создания спектрофотометрических каталогов велись в основном в Советском Союзе; появились такие работы, как Московский [8], Алма-Атинский [9] и Пулковский [10, 11] спектрофотометрические каталоги. Для своего времени это были самые объемные каталоги, в них были представлены практически все типы звезд. Лучшие 238 звезд Московского и Алма-Атинского каталогов были представлены в отдельной работе, которая называлась «Вторичные спектрофотометрические стандарты» [12]. Это 238 общих звезд двух каталогов, данные о которых наилучшим образом сходились друг с другом.

В [13] была опубликована библиотека атласов спектральных распределений (294 атласа в различных участках спектра, содержащих 16 тыс. звезд). Среди них выделяются 6 атласов, которые по объему и представительности занимают такое же место, что и спектрофотометрические атласы, рассмотренные в предыдущем абзаце. Объем и спектральные области, охваченные в этих атласах, показаны на рис. 3.

Дадим краткую сводку сведений об этих атласах.

- UVES-POP (<http://www.sc.eso.org/santiago/uvespop/>) Ultra Violet Eshelle Spectrograph проект обсерватории Маунт Паранал. Сделан на VLT с очень высоким спектральным разрешением, данные представлены с шагом в 0.04 Å. 400 звезд, в их числе большое количество звезд поля, 20 ярчайших звезд неба и звезды двух рассеянных скоплений. При наблюдениях использовался спектрограф, содержащий три дифракционные решетки, причем в каналах каждой из них светофильтрами выделялись две области, так что каждый объект — это компиляция из шести спектральных областей. К сожалению, для некоторых звезд не во всех шести областях представлен спектр. Заметим также, что данные на стыке зон, особенно когда зоны не перекрываются, могут быть не вполне корректно связаны друг с другом, есть также недостатки калибровок.
- NGSL 2 (<http://archive.stsci.edu/prepds/stisngsl/>) New Generation Stellar Library выполнена на космическом телескопе Хаббла со спектрометром STIS, охватывает от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области спектра. Для 380 звезд получены распределения энергии в спектре.
- STELIB 3.2 (<http://webast.ast.obs-mip.fr/stelib>) Stellar Library сделана на метровом телескопе имени Каптейна на Канарских островах и небольшая часть работы — на 2.3-м телескопе в обсерватории Сайдинг Спринг (Австралия), 255 звезд.
- Indo-US / CFLIB (<http://www.noao.edu/cflib/>) Индийско-американский проект Library of Coude Feed Stellar Spectra осуществлен на Национальной Астрономической Обсерватории на Китт Пике. По спектральному интервалу близок к атласам Глушневой и Харитоновой, но несколько дальше продлен в инфракрасную часть спектра, 1 495 звезд.

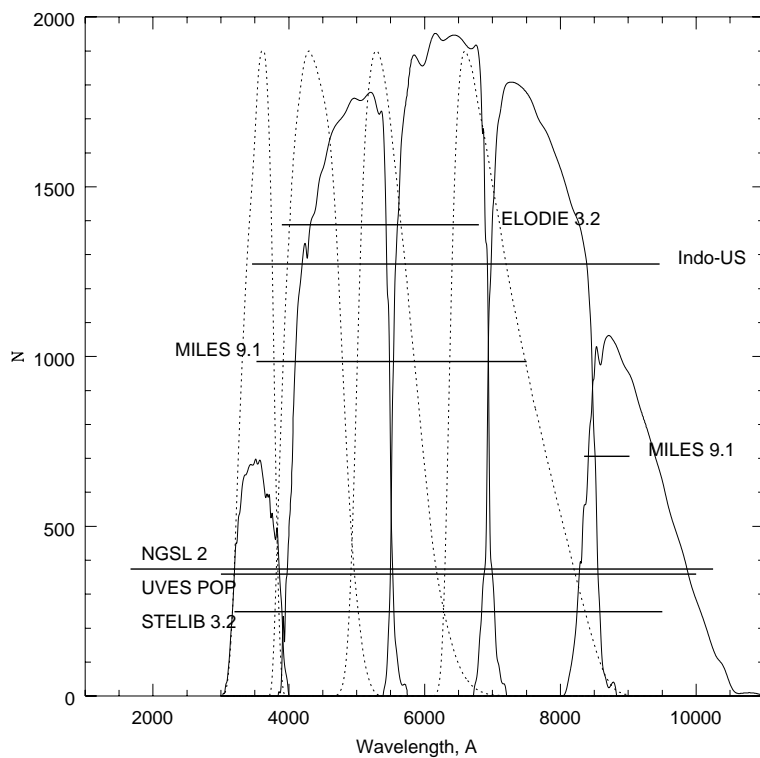


Рис. 3. Горизонтальные линии: распределение современных эмпирических спектральных атласов по количеству звезд в них и диапазонам длин волн. Также показаны кривые реакции систем WBVR (пунктир) и SDSS-ugriz (непрерывные кривые)

- MILES 9.1 (<http://miles.iac.es/>) Medium resolution Isaac Newton Telescope Library of Empirical Spectra выполнен на английском 2.5 м телескопе на Канарских островах. Совпадает по интервалам длин волн с работами Глушневой, Харитоновой и Пулковским каталогом, 709 звезд (985 спектров).
- ELODIE 3.2 (http://www.obs.u-bordeaux1.fr/m2a/soubiran/elodie_library.html, VizieR: III/251) Спектрограф Обсерватории Верхнего Прованса, наблюдения проводились в разных местах. К сожалению, у каталога недостаточно широкий интервал длин волн. Объем атласа — 1388 звезд (1959 спектров).

Как показывает сравнение спектров звезд, данные о которых представлены в нескольких атласах [14], согласие спектральных распределений в красной области довольно неплохое, в то время как в ультрафиолетовой области имеются существенные расхождения. Эти расхождения связаны, по-видимому, с трудностями калибровок и учета поглощения в ультрафиолете.

В ряду эмпирических атласов необходимо упомянуть также результаты, полученные на советском космическом аппарате Астрон, запущенном в 1983 г. и проработавшем шесть лет [15]. С ультрафиолетовым телескопом Спика на Астроне были получены спектры с низким разрешением в диапазоне 1500—3500 Å для 90 звезд (некоторые — по нескольку наблюдений). Однако практически все звезды, выбранные для научной программы Астрона, — переменные, что делает этот атлас малопригодным для определения параметров «нормальных» звезд. Кроме того, причиной найденных расхождений в спектральных распределениях для звезд, общих для программ Астрон и NGSL, являются еще и неточности в абсолютных потоках Астрона.

Атласы усредненных спектров

Довольно часто для работы требуется кривая распределения энергии в спектре не для конкретной звезды, а для того или иного типа звезд, например для звезд спектрального класса A0 главной последовательности. Первый атлас средних распределений в спектре был составлен В. Страйжисом для того, чтобы с его помощью методом синтетической фотометрии рассчитывать Вильнюсскую фото-

метрическую систему. Опубликовано несколько атласов таких усредненных распределений энергии, нормированных на интенсивность в некоторой длине волны.

Наиболее популярными среди последних являются:

- атлас Свицерскене [16], в котором представлены 98 типов спектров в спектральном интервале 120—1 050 нм, данные приведены через 5 нм и нормированы на длину волны 550 нм;
- атлас Silva and Cornell [17], включающий 72 типа спектров, спектральный диапазон 351—893 нм, шаг 0.5 нм;
- атлас Pickles [18], содержащий 131 тип спектров в спектральном диапазоне 115—2 500 нм, данные приведены через 0.5 нм и нормированы на длину волны 555 нм.

В настоящее время наиболее часто используется последний из них, так как [17] предоставляют данные для чересчур узкого (с обеих сторон оптической области спектра) диапазона, а данные Свицерскене были преимущественно включены в атлас Pickles.

Впрочем, как показывает сравнение синтетических цветов М-гигантов, полученных сверткой их спектрального распределения из атласов Свицерскене и Pickles с кривыми реакции WBVR, спектры двух атласов заметно расходятся. При этом ни Pickles, ни Свицерскене не описывают удовлетворительно положение красных гигантов на двухцветных диаграммах WBVR.

Теоретические атласы

Таким образом, для синтеза звездных величин и дальнейшей параметризации звезд целесообразно использовать теоретический атлас спектральных распределений.

Сводка современных синтетических атласов приведена в [19]. Подавляющее большинство из них — атласы спектров только определенного типа звезд: ОВ-звезды, Ар/Вр-звезды, углеродные звезды, холодные карлики, белые карлики и т. п. Такие атласы мало пригодны для массового определения параметров объектов из больших фотометрических обзоров. Одним из немногих исключений, в дальнейшем и использованный в данной работе, является атлас теоретических спектров [20]. С его помощью была исследована возможность одновременного определения по современной многоцветной фотометрии атмосферных параметров звезд: эффективной температуры (T_{eff}), ускорения силы тяжести ($\log g$) и металличности ($[M/H]$), а

также полного поглощения света (A_V) и отношения полного поглощения к селективному (R_V). Кроме того, требовалось оценить влияние точности фотометрических обзоров на точность определяемых величин. Атлас [20] определяет спектры для дискретного набора атмосферных параметров ($\log g$ от 0.0 до 5.0 с шагом 0.5, T_{eff} от 3500 до 13 000 К с шагом 250 К и от 13 000 до 50 000 К с шагом 1 000 К, а $[M/H]$ от -2 до 0 с шагом 2).

О точности параметризации звезд

Идея данного метода параметризации звезд может быть описана следующими словами: точке в 5-мерном пространстве физических параметров (T_{eff} , $\log g$, $[M/H]$, A_V , R_V) сопоставляется распределение энергии в спектре из какого-либо атласа теоретических спектров. Далее, используя кривые реакции N фотометрических полос (в данном случае $N = 10$, см. ниже) и теоретические спектры, вычисляется блеск в каждой фотометрической полосе. Следовательно, можно составить десять независимых значений блеска: m_1, m_2, \dots, m_{10} . Эти значения блеска вычисляются однозначно; их можно представить как элемент (точку) некоторого множества в 10-мерном пространстве. Может случиться, что некоторые элементы этого множества будут одинаковыми (или достаточно близкими) для более чем одного набора физических параметров. Данное исследование требуется для решения обратной задачи — параметризации по фотометрическим наблюдениям, когда точке из множества значений блеска в 10-мерном пространстве требуется сопоставить точку из множества физических параметров в 5-мерном пространстве.

В работе [21] вычислялся блеск для трех обзоров: 2MASS (3 полосы), SDSS (5 полос) и GALEX (2 полосы). Для «покраснения» теоретических спектров использовался закон межзвездного поглощения [22] (A_V от 0.0 до 2.0^m с шагом 0.25^m и R_V от 2.0 до 6.0 с шагом 0.5). Блеск в фотометрической полосе вычислялся из «покрасненного» теоретического спектра, используя соответствующую кривую реакции обзора и нуль-пункт.

Осуществлялся поиск таких наборов параметров атмосферы звезды и закона межзвездного поглощения, для которых вычисленные блески во всех фотометрических полосах используемых обзоров совпадали бы в пределах систематической ошибки обзоров. В качестве систематической ошибки для полос u, g, r, i, z обзора SDSS использовались значения 0.03, 0.01, 0.01, 0.01, 0.02 соответственно [23]. Для

полос FUV и NUV обзора GALEX — значения 0.05 и 0.03 соответственно [24]. Для обзора 2MASS в качестве систематической ошибки было принято значение 0.03, одинаковое для всех полос. Все значения систематической ошибки даны в звездных величинах.

В результате были получены значения блеска в фотометрических полосах для всех наборов дискретных значений параметров атмосферы звезды и закона межзвездного поглощения. Некоторые из этих наборов демонстрируют совпадающие (в пределах систематической ошибки) значения блеска, что позволяет оценить точность параметризации. По результатам работы можно сделать следующие выводы. Совместное использование фотометрии трех обзоров (GALEX, SDSS и 2MASS) позволяет определять атмосферные параметры звезды и закона межзвездного поглощения. Однако систематическая ошибка этих обзоров, которая определяется через повторные наблюдения одних и тех же объектов на протяжении длительного периода, ограничивает точность определяемых параметров. В значительной области пространства параметров параметризация возможна с точностью, оценка которой следующая: $\log g$ — 0.5, для T_{eff} меньше 13 000 K — 250 K, а для T_{eff} больше 13 000 K — 1 000 K, A_V — 0.25^m и R_V — 0.5. Полученная точность определяется шагом дискретизации параметров, поэтому использование более частой сетки целесообразно и позволило бы уточнить оценки точности параметризации. Необходимо отметить, что (за исключением некоторых областей в пространстве параметров) отсутствие фотометрии в дальнем ультрафиолете ухудшает точность параметризации. Это еще раз подчеркивает важность данного диапазона для изучения параметров звезд и межзвездной среды и актуальность космических миссий (в частности, WSO-UV [25]), работающих в ультрафиолете.

Заключение

Представленные в работе сведения о современных больших фотометрических обзорах, атласах распределения энергии в спектрах звезд и инструментах работы с большими объемами данных могут быть использованы для определения параметров звезд и построения карты межзвездного поглощения.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (грант 02.740.11.0247) и программы Президиума РАН «Поддержка ведущих научных школ» (грант НШ-3602.2012.2).

Библиографические ссылки

1. *Malkov O., Kilpio E.* A Synthetic Map of the Galactic Interstellar Extinction // *Astrophys. Space. Sci.* — 2002. — Vol. 280. — P. 115—118.
2. *Mironov A. V., Zakharov A. I., Prokhorov M. E. et al.* The Multicolor Lyra Photometric System for Variable Stars and Halo Studies // *Variable Stars, the Galactic halo and Galaxy Formation* / ed. by C. Sterken, N. Samus, L. Szabados. — 2010. — P. 185. 1002.4644.
3. *Karpov S. V., Malkov O. Y., Mironov A. V.* Cross-identification of large surveys for finding interstellar extinction // *Astrophysical Bull.* — 2012. — Vol. 67. — P. 82—89.
4. *Høg E., Fabricius C., Makarov V. V. et al.* The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 355. — P. L27—L30.
5. *Харченко Н. В.* Сводный каталог астрономических данных 2.5 млн звезд всего неба // *Кинематика и физика небесных тел.* — 2001. — Т. 17. — С. 409—423.
6. *Корнилов В. Г., Волков И. М., Захаров А. И. и др.* Каталог WBVR величин ярких звезд северного неба /под ред. В. Г. Корнилова. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1991.
7. *Budavári T., Heinis S., Szalay A. S. et al.* GALEX-SDSS Catalogs for Statistical Studies // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 694. — P. 1281—1292. 0904.1392.
8. *Волошина И. Б., Глушневa И. Н., Дорошенко В. Т. и др.* Спектрофотометрия ярких звезд /под ред. И. Н. Глушневой. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1982.
9. *Харитонов А. В., Терещенко В. М., Князева Л. Н.* Спектрофотометрический каталог звезд. — (3-е изд.) /под ред. В. М. Терещенко. — Алматы : Казак университеті, 2011.
10. *Alekseeva G. A., Arkharov A. A., Galkin V. D. et al.* The Pulkovo Spectrophotometric Catalog of Bright Stars in the Range from 320 TO 1080 NM // *Baltic Astronomy.* — 1996. — Vol. 5. — P. 603—838.
11. *Alekseeva G. A., Arkharov A. A., Galkin V. D. et al.* The Pulkovo spectrophotometric catalog of bright stars in the range from 320 to 1080 NM - A supplement // *Baltic Astronomy.* — 1997. — Vol. 6. — P. 481.

12. *Glushneva I. N., Kharitonov A. V., Kniazeva L. N., Shenavrin V. I.* Secondary spectrophotometric standards // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1992. — Vol. 92. — P. 1–29.
13. *Sordo R., Munari U.* The Asiago Database of Spectroscopic Databases (ADSD) // Astron. Astrophys. — 2006. — Vol. 452. — P. 735–737.
14. *Kilpio E. Y., Malkov O. Y., Mironov A. V.* Comparative analysis of modern empirical spectro-photometric atlases with multicolor photometric catalogues // Astronomical Society of India Conference Series / ed. by P. Prugniel, H. P. Singh. — Astronomical Society of India Conf. Ser. — 2012. — Vol. 6. — P. 31. 1208.1960.
15. *Боярчук А. А.* Астрофизические исследования на космической станции «Астрон» / под ред. А. А. Боярчука. — М. : Физматлит, 1994.
16. *Sviderskiene Z.* Energy Distribution in the Stellar Spectra of Different Spectral Types and Luminosities — Part Five — Normal Stars // Vilnius Astronomijos Observatorijos Biuletenis. — 1988. — Vol. 80. — P. 3.
17. *Silva D. R., Cornell M. E.* A new library of stellar optical spectra // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 1992. — Vol. 81. — P. 865–881.
18. *Pickles A. J.* A Stellar Spectral Flux Library: 1150–25000 Å // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1998. — Vol. 110. — P. 863–878.
19. *Sordo R., Vallenari A., Tantaló R. et al.* Synthetic stellar and SSP libraries as templates for Gaia simulations // Astrophys. Space. Sci. — 2010. — Vol. 328. — P. 331–335.
20. *Castelli F., Kurucz R. L.* New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres // ArXiv Astrophysics e-prints. — 2004. astro-ph/0405087.
21. *Сичевский С. Г., Миронов А. В., Малков О. Ю.* О точности определения параметров звезд по многоцветной фотометрии // Астрофиз. бюл. — 2014.
22. *Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S.* The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // Astrophys. J. — 1989. — Vol. 345. — P. 245–256.
23. *Ivezić Ž., Lupton R. H., Schlegel D. et al.* SDSS data management and photometric quality assessment // Astronomische Nachrichten. — 2004. — Vol. 325. — P. 583–589. astro-ph/0410195.

24. *Morrissey P., Conrow T., Barlow T. A. et al.* The Calibration and Data Products of GALEX // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 173. — P. 682–697.
25. *Shustov B., Sachkov M., Gómez de Castro A. I. et al.* World space observatory-ultraviolet among UV missions of the coming years // *Astrophys. Space. Sci.* — 2011. — Vol. 335. — P. 273–282.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

В докладе рассматривается краткая история «старой» низкотемпературной и «новой» высокотемпературной сверхпроводимости. Дан обзор основных экспериментальных фактов и микроскопических теорий.

In the talk I will briefly consider history of the “old”, low temperature superconductivity and the “new”, high temperature superconductivity. I will review major experimental facts and microscopic theories.

А. А. Соловьев, Е. А. Киричек
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОСНОВА МОДЕЛИ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОГО СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА С ТЕЧЕНИЯМИ ЭВЕРШЕДА

В работе дается точное аналитическое решение стационарной задачи идеальной МГД для скорости течений плазмы и температурно-плотностных распределений для магнитной конфигурации с двумя компонентами магнитного поля — вертикальной и радиальной. Магнитное поле не предполагается осесимметричным. В применении к солнечному пятну угловая зависимость величин в данной модели впервые позволяет моделировать не только отклонения формы пятна от круговой, но и тонкую волокнистую структуру полутени солнечного пятна. Альвеновское число Маха, определяемое как отношение скорости течений плазмы к альвеновской скорости, равняется нулю в центре пятна и нарастает к периферии, что соответствует характеру течений Эвершеда в солнечном пятне.

In this work, an exact analytical solution is given for plasma flows in idealized MHD for magnetic configurations with vertical and radial field components. The solution, valid for stationary states, provides the speed of the flows, as well as temperature and density distributions. The magnetic field is not assumed to be axially symmetric. In the application of sunspots, the angular dependence of quantities in the given model allows, for the first time, modeling of both the deviations from circular symmetry in the shape of the spot, and also the fine filamentary structure of the sunspot's penumbra. The Alfvén Mach number, defined as the relation between the speed of the plasma flow and the Alfvén speed, is equal to zero at the spot center, and grows towards the periphery, which corresponds to the character of Evershed flows in sunspots.

© Соловьев А. А., Киричек Е. А., 2014

Введение

Солнечные пятна — наиболее заметное проявление солнечной активности, и потому исследованию их свойств в солнечной физике традиционно уделялось очень большое внимание (см. монографии [1–4] и др.). В частности, множество работ было посвящено построению разнообразных теоретических моделей солнечных пятен (см. недавний обзор [5]), включая численное 3D-моделирование процесса образования пятна [6].

Обычно все теоретические модели пятен включали в себя два важных предположения, резко ограничивающих их возможности: осевую симметрию и пренебрежение течениями Эвершеда, то есть модели эти были строго статическими и аксиально симметричными. Данные ограничения казались всегда настолько неизбежными, что принимались практически без обсуждения. Наблюдения показывают, однако, что осевая симметрия в пятнах чаще всего отсутствует, а радиальные течения Эвершеда, напротив, являются неотъемлемым свойством всех развитых солнечных пятен. Поэтому на повестке дня явно стоит проблема разработки такой модели солнечного пятна, в которой оба указанных ограничения были бы сняты. В данной работе ставится именно такая задача. Исключением из существующих моделей пятен, свободным от указанных ограничений, является упомянутая выше численная модель [6], основанная на решении полной системы МГД-уравнений в среде с заданным уровнем конвективной неустойчивости. Однако надо учесть, что для ее расчета требуется несколько недель времени на суперкомпьютере, ее характеристики сильно зависят от специфики начальных и граничных условий численной задачи, и потому она не может быть представлена в виде табличных стационарных распределений физических параметров (давления, плотности, температуры и скорости течений), что делает невозможным ее практическое использование, например для расчетов спектра того или иного конкретного солнечного пятна с известной геометрической формой и заданной эффективной температурой.

Основное уравнение стационарной МГД и постановка задачи

Система уравнений идеальной МГД в стационарном случае имеет вид

$$\rho (\mathbf{V}\nabla) \mathbf{V} = -\nabla P + (4\pi)^{-1} [\text{rot}\mathbf{B} \times \mathbf{B}] + \rho \mathbf{g}, \quad (1)$$

$$\text{div} (\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (2)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

$$P = \rho \Re T \mu^{-1}. \quad (4)$$

Уравнение переноса энергии, которое в плазме обычно имеет очень сложную форму, мы здесь не записываем, оставляя систему недоопределенной. Для нас на первый план выходит задача нахождения таких стационарных распределений магнитного поля, скорости течений плазмы и температурно-плотностных характеристик, которые бы в максимальной степени отвечали наблюдаемым свойствам объекта. Если это удастся сделать, мы должны будем попытаться задним числом «оправдать» теоретически полученное (но близкое наблюдаемому!) температурное распределение теми или иными особенностями теплопереноса. Так, для солнечного пятна все сколь-либо подходящие статические и стационарные модели должны давать заметно более низкую температуру в тени пятна по сравнению с фотосферой. «Оправданием» этого эффекта служат соображения о торможении конвективного переноса в достаточно сильном вертикальном магнитном поле пятна. Аналогично, низкая температура газа внутри волокон-протуберанцев, получаемая из соответствующих моделей (и реально наблюдающаяся в этих образованиях), разумно объясняется с качественных позиций повышенным высвечиванием плотного газа в условиях солнечной короны. Точное решение задачи переноса энергии в солнечных активных образованиях в настоящее время практически невозможно не только по причине их достаточно сложной геометрии, чрезвычайной пространственной неоднородности и огромных трудностей расчета переноса излучения в континууме и в линиях, но и потому, в частности, что невозможно сколь-либо

надежно оценить вклад диссипации энергии звуковых и МГД волн, а также электрических токов (джоулев нагрев) в энергобаланс каждого элемента рассматриваемой сплошной среды.

Мы будем рассматривать задачу идеальной МГД, т. е. будем полагать, что течения плазмы происходят вдоль магнитных силовых линий:

$$\mathbf{V} = M_A \frac{\mathbf{B}}{\sqrt{4\pi\rho}}, \quad (5)$$

где M_A — альвеновское число Маха, задающее отношение скорости течений плазмы к скорости Альвена:

$$\frac{\mathbf{V}}{V_A} = M_A \frac{\mathbf{B}}{B}. \quad (6)$$

Из уравнений (2) и (3) следует, что

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(M_A \sqrt{4\pi\rho} \right) = 0, \quad (7)$$

то есть произведение $M_A \sqrt{\rho}$ не меняется вдоль магнитной силовой линии.

Преобразуем левую часть уравнения (1), используя связь (5):

$$\begin{aligned} \rho (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} &\equiv \rho \left(\frac{1}{2} \nabla V^2 + [\text{rot} \mathbf{V} \times \mathbf{V}] \right) = \\ &= \rho \left(\frac{1}{2} \nabla \left(\frac{M_A^2}{4\pi\rho} B^2 \right) + \frac{M_A^2}{4\pi\rho} [\text{rot} \mathbf{B} \times \mathbf{B}] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{M_A}{\sqrt{4\pi\rho}} \left[\left[\nabla \left(\frac{M_A}{\sqrt{4\pi\rho}} \right) \times \mathbf{B} \right] \times \mathbf{B} \right] \right). \quad (8) \end{aligned}$$

Отсюда, применяя известную формулу для двойного векторного произведения $[\mathbf{a} \times [\mathbf{b} \times \mathbf{c}]] = \mathbf{b} \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c} \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})$ и соотношение (7), получаем

$$\begin{aligned} \rho (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} &= \rho \left(\frac{M_A^2}{4\pi\rho} \left(\frac{1}{2} \nabla B^2 + [\text{rot} \mathbf{B} \times \mathbf{B}] \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{M_A}{\sqrt{4\pi\rho}} \mathbf{B} \cdot \left(\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{M_A}{\sqrt{4\pi\rho}} \right) \right) \right). \quad (9) \end{aligned}$$

Преобразуем последний член в правой части (9), используя еще раз свойство (7), и запишем уравнение движения (1) в следующем

виде:

$$M_A^2 (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot \nabla M_A^2) = -4\pi \nabla P + [\text{rot} \mathbf{B} \times \mathbf{B}] + 4\pi \rho \mathbf{g}. \quad (10)$$

Наконец, представив магнитную силу в форме

$$[\text{rot} \mathbf{B} \times \mathbf{B}] = -\frac{1}{2} \nabla B^2 + \mathbf{B} (\nabla \mathbf{B}), \quad (11)$$

перепишем (10) в виде уравнения, которое и послужит основой нашего исследования:

$$\begin{aligned} (M_A^2 - 1) (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot \nabla M_A^2) = \\ = -4\pi \left(\nabla P + \frac{\nabla B^2}{8\pi} \right) + 4\pi \rho \mathbf{g}. \end{aligned} \quad (12)$$

Идея нашего подхода состоит в том, чтобы, исходя из имеющихся наблюдательных данных о том или ином долгоживущем и достаточно стабильном элементе активности (солнечное пятно, корональная дыра, хромосферное волокно, магнитная аркада и пр.), задать его магнитную конфигурацию с точностью до некоторых свободных функций, а затем для этой магнитной структуры решить стационарную задачу идеальной МГД, найдя из трех компонент уравнения (12) пространственные распределения газового давления, плотности и альвеновского числа Маха. Затем по известным давлению и плотности из уравнения состояния идеального газа (4) мы сможем определить температурное распределение в рассматриваемой стационарной системе. Таким образом, для всякой заданной наперед структуры магнитного поля мы можем рассчитать все необходимые для ее стационарного существования пространственные распределения физических величин: \mathbf{V} , P , ρ , T и получим возможность в деталях сопоставить их с имеющимися наблюдательными данными. Благодаря тому что магнитное поле задается нами с точностью до некоторых свободных функций, остается возможность такого их подбора, чтобы добиться наилучшего совпадения теоретических моделей с наблюдениями. Такова постановка нашей задачи.

Магнитная структура стационарной конфигурации и универсальное решение для магнитного числа Маха

Будем полагать, что магнитное поле исследуемой нами стационарной конфигурации нескручено, то есть имеет только два компонента, но зависит от всех трех пространственных переменных в цилиндрической системе координат (r, φ, z) :

$$\mathbf{B} = \{B_r(r, \varphi, z), 0, B_z(r, \varphi, z)\}. \quad (13)$$

Ось z направим вертикально вверх, так что сила тяжести запишется в виде $\rho \mathbf{g} = -\rho g \mathbf{e}_z$. Для поля (13) азимутальная составляющая уравнения (12) примет очень простую форму:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(P + \frac{B^2}{8\pi} \right) = 0. \quad (14)$$

Отсюда мы сразу получаем формулу баланса давлений

$$P(r, \varphi, z) + \frac{B^2(r, \varphi, z)}{8\pi} = \frac{B_0^2}{8\pi} D(r, z). \quad (15)$$

Стоящая в правой части (15) функция $D(r, z)$ имеет, очевидно, смысл полного давления (газовое + магнитное), не зависящего от угла поворота; ее вид остается пока неизвестным. B_0 — единица измерения напряженности магнитного поля, постоянный коэффициент $(8\pi)^{-1} B_0^2$ введен только для удобства обезразмеривания. Если ввести понятие границы рассматриваемой конфигурации с окружающей ее средой на расстоянии $r = a(z)$ от оси, то граничное условие непрерывности полного давления на этой границе примет вид

$$B_0^2 D(a, z) = B_{ex}^2(a(z), z) + 8\pi P_{ex}(z), \quad (16)$$

где $B_{ex}(z)$ — напряженность внешнего по отношению к данной конфигурации магнитного поля на границе $r = a(z)$. Если внешнее магнитное поле отсутствует, то $B_0^2 D(a, z) = 8\pi P_{ex}(z)$, где $P_{ex}(z)$ — газовое давление внешней среды, которая, будем полагать, находится в состоянии гидростатического равновесия:

$$\frac{\partial P_{ex}(z)}{\partial z} = -g\rho_{ex}. \quad (17)$$

Запишем далее две другие составляющие уравнения (12), подставив предварительно выражение (15) в его правую часть:

$$\begin{aligned} (M_A^2 - 1) \left(B_z \frac{\partial B_z}{\partial z} + B_r \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) + B_z \left(B_z \frac{\partial M_A^2}{\partial z} + B_r \frac{\partial M_A^2}{\partial r} \right) &= \\ &= -4\pi \left(g \rho(r, \varphi, z) + \frac{B_0^2}{8\pi} \frac{\partial D(r, z)}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (M_A^2 - 1) \left(B_z \frac{\partial B_r}{\partial z} + B_r \frac{\partial B_r}{\partial r} \right) + B_r \left(B_z \frac{\partial M_A^2}{\partial z} + B_r \frac{\partial M_A^2}{\partial r} \right) &= \\ &= -B_0^2 \frac{\partial D(r, z)}{2\partial r}. \end{aligned} \quad (19)$$

Заметим сразу, что уравнение (19) имеет тривиальное решение: $M_A^2 = 1$, соответствующее случаю равномерного распределения магнитной и кинетической энергии в системе. Тогда $B_0^2 D(r, z) = 8\pi P_{ex}(z)$, $\rho_{in} = \rho_{ex}$. Этот простой случай служит не только в качестве контроля, но и описывает состояние системы вблизи точки перехода от доальевенских течений к сверхальевенским.

Для того чтобы продвинуться дальше, будем полагать, что компоненты магнитного поля заданы в виде функций с разделенными переменными. Из условия соленоидальности поля (3), которое для двухкомпонентного поля записывается в простой форме

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_r) = 0, \quad (20)$$

следует, что продольное и радиальное поле можно выразить через функцию магнитного потока $A(r, z)$ и некоторый множитель $F(A, \varphi)$, где $F(A, \varphi)$ — произвольная безразмерная функция угловой координаты:

$$\begin{aligned} B_z(r, \varphi, z) &\equiv B_0 F(A, \varphi) b_z(r, z), \quad b_z(r, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial r}, \\ B_r(r, \varphi, z) &\equiv B_0 F(A, \varphi) b_r(r, z), \quad b_r(r, z) = -\frac{1}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial z}. \end{aligned} \quad (21)$$

Прямой подстановкой этих выражений в (20) легко убедиться, что магнитное поле в форме (21) удовлетворяет условию соленоидальности. Будем искать решение для функции M_A^2 в следующей форме:

$$M_A^2 = 1 + \frac{K(r, z)}{F^2(A, \varphi)} + N(r, z), \quad (22)$$

где $K(r, z)$ и $N(r, z)$ — некоторые функции, подлежащие определению. Подставляя (22) в (19), мы автоматически получим два уравнения:

$$K(r, z) \left(b_z \frac{\partial b_r}{\partial z} + b_r \frac{\partial b_r}{\partial r} \right) + b_r \left(b_z \frac{\partial K}{\partial z} + b_r \frac{\partial K}{\partial r} \right) = - \frac{\partial D(r, z)}{2 \partial r}, \quad (23)$$

$$\left(b_z \frac{\partial b_r}{\partial z} + b_r \frac{\partial b_r}{\partial r} \right) + b_r \left(b_z \frac{\partial \ln N(r, z)}{\partial z} + b_r \frac{\partial \ln N(r, z)}{\partial r} \right) = 0. \quad (24)$$

Первое из них определяет $D(r, z)$ через $K(r, z)$ и функции b_z и b_r , описывающие магнитное поле, а второе служит для нахождения функции $N(r, z)$, определяющей вместе с $K(r, z)$ и $F(A, \varphi)$ альфеновское число Маха — M_A^2 . Перепишем (24) в виде

$$b_z \frac{\partial \ln b_r N(r, z)}{\partial z} + b_r \frac{\partial \ln b_r N(r, z)}{\partial r} = 0. \quad (25)$$

Учитывая, что $b_z(r, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial r}$ и $b_r(r, z) = -\frac{1}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial z}$, получим

$$\frac{\partial A(r, z)}{\partial r} \frac{\partial \ln b_r N(r, z)}{\partial z} - \frac{\partial A(r, z)}{\partial z} \frac{\partial \ln b_r N(r, z)}{\partial r} = 0. \quad (26)$$

Решение этого уравнения очевидно:

$$N(r, z) = \frac{S(A)}{b_r(r, z)}, \quad (27)$$

где $S(A)$ — произвольная безразмерная функция магнитного потока. Тогда

$$M_A^2 = 1 + \frac{K(r, z)}{F^2(A, \varphi)} + \frac{S(A)}{b_r(r, z)}. \quad (28)$$

В выборе функции $K(r, z)$ сохраняется определенная степень произвола. Этот выбор ограничен только тем, что $K(r, z)$ входит через $D(r, z)$ в уравнение поперечного баланса давлений (15). Из этого баланса следует, в частности, что высотная зависимость функции $D(r, z)$ должна быть близка к высотной зависимости $B^2(r, z)$, в противном случае на больших высотах газовое давление должно быть сравнимо с магнитным. Для солнечных пятен это условие явно не выполняется, поскольку атмосфера над пятном очень быстро приближается к корональному, очень разреженному состоянию, поэтому мы должны предположить, что функция $K(r, z)$ от вертикальной координаты не зависит: $K(r, z) \equiv K(r)$. Возьмем, как

простейший вариант, $K = -1$, а для $F^2(A, \varphi)$ примем $F^2(A, \varphi) = 1 + c^2 A^m \sin^2 \varphi$, где c — некоторый численный коэффициент; m — положительный показатель, определяющий, насколько быстро с ростом высоты уменьшаются отклонения от осевой симметрии. Выражение для M_A^2 в пятне запишем в следующем виде:

$$M_A^2 = \frac{c^2 A^m \sin^2 \varphi}{1 + c^2 A^m \sin^2 \varphi} + d \frac{A}{b_r} (A^n(r_m, 0) - A^n(r, z)), \quad (29)$$

где d, n — положительные константы. Первая из них определяет интенсивность прямых и обратных эвершедовых течений в пятне. Показатель $n > 1$, а r_m — расстояние от центра, на котором функция $A^n(r, z)$ достигает первого максимума. Выбором величины n определяется то, насколько быстро квадрат альвеновского числа, увеличиваясь с высотой как ρ^{-1} , достигнет максимального значения $d \frac{A(r, 0)}{b_r(r, 0)} A^n(r_m, z)$. Пример расчета по приведенным соотношениям показан на рисунке. Если $c^2 A^m \ll 1$, то есть отклонения от осевой симметрии невелики, то

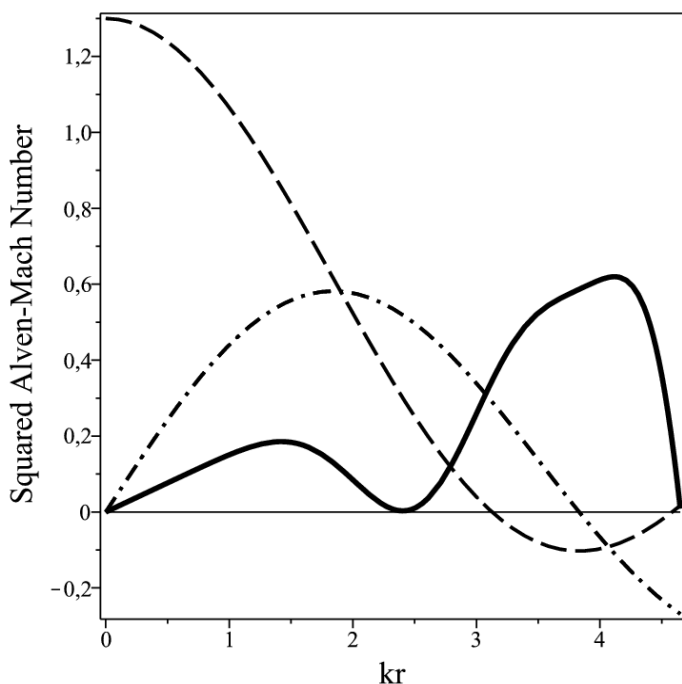
$$M_A^2 = c^2 A^m \sin^2 \varphi + d \frac{A}{b_r} (A^n(r_m, 0) - A^n(r, z)). \quad (30)$$

Соотношения (15)–(18) и (28), дополненные уравнением состояния идеального газа (4), полностью решают поставленную задачу определения скоростных и температурно-плотностных распределений в системе при заданной структуре магнитного поля, то есть при известных функциях $A(r, z)$ и $F(A, \varphi)$. Подчеркнем, что при выводе полученных решений никаких предположений о характере зависимостей $b_z(r, z)$ и $b_r(r, z)$ нами не делалось.

В этом смысле представленные результаты имеют универсальный характер, их можно применять к любым стационарным МГД системам с двумя компонентами поля, которые описываются в цилиндрической системе координат, но имеют произвольные отклонения от аксиальной симметрии.

Библиографические ссылки

1. *Bray R. J., Loughhead R. E.* Sunspots. — L. : Chapman & Hall, 1964.
2. *Stix M.* The Sun : an introduction. — B. : Springer, 2004.
3. *Priest E. R.* Solar magneto-hydrodynamics // Geophysics and Astrophysics Monographs. — 1982. — Vol. 21.



Пример расчета альвеновского числа Маха и распределения магнитного поля по радиусу пятна при $c = 0$, $n = 4$ на уровне $z = 0$. Сплошная толстая линия — M_A^2 ; пунктирная линия — $b_z = J_0 \exp(-kz) + 0.3$; штрихпунктирная — $b_r = J_1 \exp(-kz)$, причем $A = rJ_1 \exp(-kz)$

4. Обриджо В. Н. Солнечные пятна и комплексы активности. — М. : Наука, 1985.
5. Moradi H., Baldner C., Birch A. C. et al. Modeling the Subsurface Structure of Sunspots // Solar Phys. — 2010. — Vol. 267. — P. 1—62.
6. Rempel M. Numerical Sunspot Models: Robustness of Photospheric Velocity and Magnetic Field Structure // Astrophys. J. — 2012. — Vol. 750. — P. 62.

ВЕРХНЯЯ АТМОСФЕРА: ВСТРЕЧА ЗЕМЛИ И КОСМОСА

В лекции рассказывается о свойствах стратосферы и мезосферы — слоев атмосферы Земли, играющих основную роль в блокировании вредного воздействия окружающих факторов на нашу планету. Рассматривается связь строения верхней атмосферы и оптических свойств кислорода и озона, задерживающих коротковолновое излучение Солнца. Описывается температурное распределение средней и верхней атмосферы, особенно летний мезосферный температурный минимум. Оптические наблюдения, в том числе наземная поляриметрия сумеречного неба, позволяют проводить измерения температуры в мезосфере и регистрировать там частицы пыли метеорного происхождения.

The lecture describes the properties of stratosphere and mesosphere — the layers of the Earth's atmosphere that play the basic role in defending our planet from harmful factors of surrounding space. Upper atmosphere structure relates with optical properties of oxygen and ozone, absorbing the ultraviolet emission of the Sun. The temperature distribution of middle and upper atmosphere is described, focusing on summer mesosphere temperature minimum. Optical observations including the twilight sky polarimetry help to measure the temperature in the mesosphere and to detect the meteoric dust particles there.

Введение

Атмосфера Земли является наиболее изученной из планетных атмосфер и пока единственной известной нам атмосферой обитаемой планеты. Это предопределяет отличие нашей газовой оболочки от атмосфер других планет Солнечной системы. Возможность существования жизни на Земле накладывает на атмосферу жесткие требования. Приповерхностные слои должны иметь химический состав, оптимальный для дыхания и развития живых организмов. Кроме того, атмосфера должна защищать поверхность планеты от различных

факторов, угрожающих жизни, — солнечного ветра, коротковолнового излучения Солнца, потоков метеороидов различных размеров. Для обеспечения жизни данные функции должны выполнять более высокие слои атмосферы, при этом их физические и химические свойства могут отличаться от приземной среды. Хорошей иллюстрацией этого является озон — ядовитый газ, мало представленный в тропосфере, но присутствующий в стратосфере и блокирующий там большую часть солнечного ультрафиолетового излучения.

Изучение верхних слоев атмосферы в течение долгих лет и веков было затруднительно, так как множество необходимых наблюдательных данных не могли быть получены с поверхности Земли. Когда в XVIII в. триангуляционные измерения высот свечения метеоров дали результат 80—100 км, это вызвало удивление: вертикальные масштабы атмосферы представлялись значительно меньшими. Именно эти высоты, относящиеся сейчас к верхней мезосфере и нижней термосфере, можно назвать слоем «встречи Земли и космоса»: там тормозится большая часть метеорного вещества, до этих высот доходит ионизирующее излучение Солнца. Химический состав атмосферы, практически постоянный от поверхности Земли до высот 90 км, претерпевает существенные изменения выше — молекулы азота и кислорода постепенно уступают место атомам и ионам. Эти же высоты характеризуются самой низкой температурой, имеющей место где-либо на Земле и, вероятно, наиболее быстрыми климатическими изменениями, наблюдающимися в настоящее время.

Примерно там же (на высоте около 85 км) располагается слой полярных мезосферных или серебристых облаков — самых высоких в атмосфере Земли. Кроме крайне низкой температуры наличие таких облаков означает появление частиц пыли (очевидно, космической) и молекул водяного пара, поступающих из нижних слоев атмосферы либо синтезирующихся в мезосфере. Данные обстоятельства еще более подтверждают роль верхней мезосферы как границы плотных слоев атмосферы и окружающего, уже по сути космического, пространства.

Вторжение метеорного вещества образует слои металлов (натрия, магния, калия, железа и др.) на высотах порядка 90 км [1–3]. Большое количество ультрафиолетового излучения Солнца приводит к увеличению содержания свободных атомов и радикалов. Наряду с еще высокой плотностью (по сравнению с термосферой) это делает

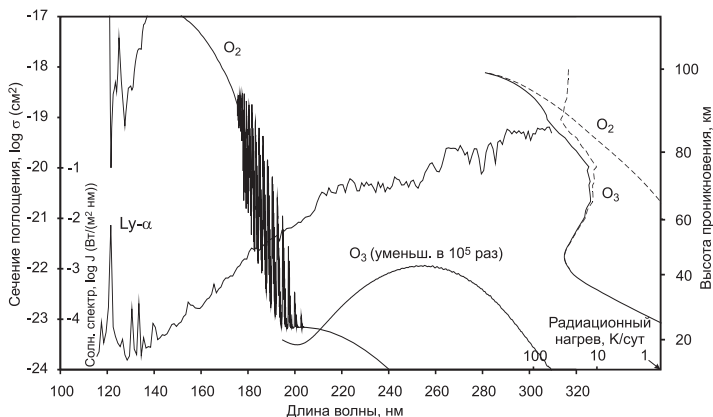


Рис. 1. Солнечный спектр, сечения поглощения O₂ и O₃, высота проникновения УФ-излучения и величина радиационного нагрева на разных высотах в стратосфере и мезосфере

область верхней мезосферы одним из самых сложных слоев с точки зрения химии, именно там наблюдаются нелинейные химические эффекты [4].

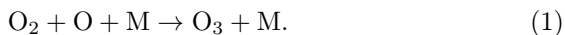
Основной атмосферной составляющей, во многом определяющей ее физические свойства и вертикальную структуру, является кислород O₂ — газ, обеспечивающий нам возможность жить. Хотя содержание кислорода в атмосфере по объему около 21 %, он значительно более химически активен, нежели азот N₂, в молекуле которого два атома прочно скреплены тройной электронной связью. Вместе со своей аллотропной модификацией — озоном O₃ — кислород берет на себя роль щита от коротковолнового излучения Солнца. Этот процесс будет подробно рассмотрен в следующей главе.

Строение средней и верхней атмосферы

Сложное температурное строение атмосферы Земли, ставшее основой ее разделения на пять основных слоев — от тропосферы до экзосферы, во многом определяется кислородом и его взаимодействием с солнечным излучением. Подавляющее большинство всего кислорода от поверхности Земли до высоты 100 км содержится в виде молекул O₂. На рис. 1 показана зависимость сечения поглощения молекулы кислорода от длины волны излучения на основе [5–8].

Из величины сечения можно определить характерную высоту проникновения данного излучения в атмосфере Земли. Значения этих высот для положения Солнца в зените указаны справа.

Поглощающие свойства кислорода появляются на длине волны 242 нм, соответствующей энергии диссоциации молекулы O_2 на два атома. В интервале от 200 до 242 нм — континууме Герцберга — сечение поглощения не столь велико, и это позволяет излучению проникать сквозь мезосферу и стратосферу до высот порядка 20 км. Плотность там достаточно высока, и тепловой эффект от поглощения этого излучения невелик. Гораздо большее значение имеют диссоциация и появление в этих слоях атомарного кислорода. Соединяясь с молекулой кислорода при участии третьей частицы, атом образует молекулу озона:



В реакции участвуют три частицы, и ее скорость на данных высотах значительна. Именно таким образом в стратосфере Земли формируется слой озона. Максимум его концентрации приходится на высоту 20—25 км, а максимум относительного содержания — на высоту 35 км. В стратосфере одна молекула озона приходится в среднем на 10^5 молекул кислорода. Несмотря на столь невысокое содержание, именно озон определяет тепловое состояние стратосферы. Причина этого состоит в большом сечении поглощения ультрафиолетового излучения Солнца в полосах Хартли и Хеггинса с длиной волны от 200 до 310 нм, то есть и там, где кислород прозрачен. Величины сечения поглощения озона (по данным [9]) также приведены на рис. 1, причем для наглядности они уменьшены там в те же 10^5 раз. Это дает возможность судить о высотах задержки УФ-лучей озоном. Видно, что данный газ является основным поглотителем ультрафиолета, начиная с 200 нм. Самое опасное излучение (260—280 нм), разрушающее молекулы ДНК, блокируется уже в верхней стратосфере — на высотах около 40 км.

Поток энергии от Солнца на длинах волн 240—310 нм уже значительно выше (солнечный спектр [10] также показан на рис. 1), и его поглощение вызывает значительный тепловой эффект, что видно на рисунке справа. Хотя в процессе поглощения фотона молекула озона разрушается, при этом освобождается атом кислорода, который вновь может войти в состав молекулы озона. Такой циклический процесс может происходить много раз, и один поглощенный молекулярным кислородом фотон в континууме Герцберга вызывает

массовое поглощение других УФ-фотонов озоном в полосах Хартли и Хеггинса. В реальной атмосфере циклический процесс прерывается газами, разрушающими озон и присоединяющими атомарный кислород, — окисями азота и галогенов. Они же являются основной причиной уменьшения общего содержания озона в атмосфере в последние десятилетия.

Высотный профиль темпа радиационного нагрева атмосферы до высоты 80 км имеет тот же вид, что и профиль относительного содержания озона, но с более высоким максимумом — на 40 км, за счет большего потока УФ-излучения. Этот нагрев и определяет рост температуры в слое от 15 до 50 км, который был назван стратосферой. Температура на ее верхней границе — стратопauзе — может превышать 0 градусов по Цельсию (рис. 2).

Выше 50 км начинается мезосфера Земли, где меньшая концентрация молекул замедляет темп образования озона в тройной реакции (1). Температура там начинает убывать с высотой. До этих слоев доходит небольшая часть УФ-лучей Солнца в диапазоне от 175 до 200 нм, соответствующих системе полос Шумана—Рунге молекулярного кислорода. Эти полосы имеют очень сложную структуру, сечение поглощения может меняться на три порядка в узком интервале длин волн. Поток энергии от Солнца в этом диапазоне не столь велик и мало сказывается на тепловом балансе нижней мезосферы. Лишь в более высоких разреженных слоях (80 км и более) он становится заметным.

Коротковолновый ультрафиолет (длина волны менее 175 нм) поглощается кислородом очень сильно в континууме Шумана—Рунге, задерживаясь на высотах более 90—100 км. Это вносит вклад в разогрев среды и начало роста температуры с высотой. Данная область относится уже к следующему слою — термосфере. На длинах волн менее 140 нм у молекулярного кислорода вновь начинается серия полос поглощения, разделенных узкими окнами относительной прозрачности. Из них наиболее интересно одно, показанное в левой части рис. 1. Его центр попадает на длину волны 121.6 нм, что в точности совпадает с линией атомарного водорода Ly_{α} . В отличие от окрестных спектральных областей, где излучение Солнца уже очень слабо, эта линия яркая, ее фотоны за счет относительной прозрачности кислорода достигают высот 75—80 км. Там они участвуют в

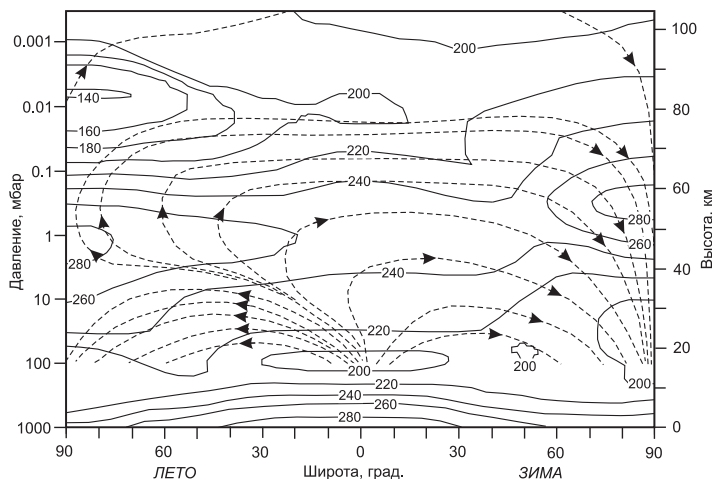


Рис. 2. Температура на разных высотах и широтах [11] и линии тока атмосферного воздуха [12] вблизи солнцестояния

диссоциации не только кислорода, но и других молекул, существенно влияя на химическое состояние мезосферы. При этом вклад линии Ly_{α} в радиационный нагрев мезосферы невелик.

Мы видим, что оптические свойства кислорода и озона качественно объясняют высотный ход температуры в атмосфере. Реальная ситуация, безусловно, более сложная: в ней принимают участие другие компоненты атмосферы, также картина существенно зависит от сезона года. Распределение температуры в зависимости от высоты и широты места на основе данных [11] показано на рис. 2. Видно, что минимум температуры — мезопауза — располагается на высоте 90 км, где уже заметен радиационный нагрев за счет поглощения УФ-лучей молекулярным кислородом. Но, что самое удивительное, абсолютный минимум температуры (ниже 140 K) фиксируется в полярной мезопаузе летом, когда этот слой атмосферы 24 ч в сутки освещен Солнцем. Столь низкая температура и дает возможность для кристаллизации воды даже при ничтожном давлении, что приводит к появлению серебристых облаков.

Это на первый взгляд странное свойство теплового режима мезосферы объясняется особенностями динамики атмосферы. Наша газовая оболочка вращается вместе с планетой, подвержена неравномерному нагреву со стороны Солнца. Кроме того, атмосфера — сре-

да, в которой могут распространяться волновые возмущения, возникающие у поверхности Земли и в тропосфере. Аналогично волнам на поверхности моря, амплитуда которых возрастает на мелководье, акустико-гравитационные волны в атмосфере «раскачиваются», поднимаясь в высокие разреженные слои. Так же, как и морские волны, они могут там «опрокидываться», их диссипация изменяет течение воздушных масс. Высота, где это происходит, зависит от сезона года. Летом волны, зарождающиеся в тропосферных циклонах, достигают верхней мезосферы, возбуждая некоторые атомы и молекулы (О, ОН, Na) и вызывая свечение неба в их линиях, которое часто имеет волнообразную структуру [13].

Итогом диссипации волн становятся нарушение структуры зонального (вдоль параллелей) переноса мезосферного воздуха, направленного летом с востока на запад, и усиление вертикального переноса снизу вверх [12] (рис. 2). Этот перенос достаточно быстрый, воздушные массы не успевают обмениваться теплом. А радиационный нагрев в полярной мезосфере, несмотря на постоянное освещение Солнцем, не столь велик из-за его малой высоты над горизонтом и невысокого потока энергии в полосах Шумана—Рунге. Поднимаясь на большую высоту, воздух охлаждается; с тем же эффектом мы сталкиваемся в тропосфере, где температура быстро уменьшается с высотой.

Попав в верхние слои летней мезосферы, воздух перемещается вдоль меридиана к экватору и далее — в зимнюю мезосферу. По мере этого движения его температура увеличивается — за счет радиационного нагрева вблизи экватора и химического нагрева — в зимнем полушарии. Последний фактор обусловлен экзотермическими реакциями, главная из которых



Озон также переносится в зимнюю полярную мезосферу из экваториальных областей, где он образуется за счет солнечного УФ-излучения. Атомарный водород образуется в результате фотодиссоциации водяного пара и метана. Таким образом, амплитуда годич-

ных изменений температуры в верхней мезосфере может достигать 100 К, причем максимум достигается зимой! Более того, самые быстрые вековые изменения температуры тоже могут наблюдаться в этом слое, однако сейчас об этом нельзя говорить со всей уверенностью, так как измерения ведутся не так давно.

Исследования мезосферы

До середины XX в. информация о высоких слоях атмосферы Земли была крайне скудной. Оценки температуры среды на высотах 60 км и более на основе наблюдений полетов метеоров [14] оказывались завышенными. Использовались и данные фотометрии сумеречного неба [15–17], но из-за недооценки вклада многократного рассеяния и отсутствия информации об аэрозоле на этих высотах результаты также были недостоверными. Первые контактные измерения начались только в 50-х гг. прошлого столетия с борта геофизических ракет.

В настоящее время состав и структура мезосферы измеряются как с поверхности Земли методами лазерной (лидарной) и радарной локации, микроволновыми и сумеречными измерениями, так и с борта космических аппаратов. В обоих случаях речь идет об удаленном зондировании, так как все наземные приборы находятся ниже, а орбиты спутников — выше мезосферы. Основой удаленного зондирования часто являются оптические измерения в различных диапазонах электромагнитного спектра. Цели исследований могут быть разными. Анализ спектральных линий различных газов позволяет определить их содержание на тех или иных высотах. Эти измерения будут особенно эффективными, если регистрировать спектр излучения или поглощения вдоль касательной траектории над лимбом Земли. Такая траектория имеет длинный участок пути луча практически на постоянной высоте.

Важным объектом измерений является температура атмосферного воздуха в зависимости от высоты, широты места и сезона наблюдения. Первые систематические измерения температуры в мезосфере из космоса начались в 1980-е гг. на борту американского спутника SME (Solar Mesosphere Explorer, [18]). Идея эксперимента была простой: фиксировался фон рассеяния солнечного света в мезосфере, которое носило преимущественно молекулярный (релеевский) характер. Его интенсивность пропорциональна плотности воздуха, что

позволяло вычислить температуру на основе закона Больцмана. Подобная методика может эффективно использоваться и для наземных измерений, о чем речь пойдет ниже.

Исследования верхней атмосферы продолжились на борту спутника UARS (Upper Atmosphere Research Satellite, [19]), который работал на орбите на рубеже веков, с 1991 по 2005 г. Этот аппарат выполнил множество задач, в том числе измерения содержания химических составляющих и температуры (различными методами). Одним из его важнейших результатов стало подтверждение ледяной структуры мельчайших частиц серебристых облаков.

В начале нового тысячелетия эстафету исследования мезосферы приняли два новых аппарата, созданных NASA — TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics) и EOS (Earth Observing System) Aura. Спутники были запущены в 2001 и 2004 гг. соответственно. Как и в случае предшественников, основой стали спектральные измерения свечения атмосферы на различных высотах над лимбом Земли. Среди многообразия физических и химических исследований особая роль вновь уделялась измерению температуры. Данная миссия была возложена на прибор SABER (Sounding of Atmosphere using Broadband Emission Radiometry, [20]) на борту аппарата TIMED и на прибор MLS (Microwave Limb Sounder, [21]) на борту аппарата EOS Aura. Температура определялась по линиям излучения CO_2 и O_2 соответственно в инфракрасном и микроволновом диапазоне. Полученные значения температур в целом были близки друг к другу, исключение составляла летняя мезопауза высоких широт — как раз место и время регистрации самых низких температур. Данный факт отражает важное свойство мезосферы: она не находится в состоянии термодинамического равновесия, и ее разные компоненты вполне могут иметь разные температуры.

Интерес к изучению тепловых свойств мезосферы обусловлен не только самими рекордно низкими значениями температур, но и их эволюцией. Первые работы, охватывающие длительные интервалы времени [22], указали на очень быстрое уменьшение температуры — до 1 К в год! Такое «глобальное похолодание» верхних слоев мезосферы несопоставимо ни с какими темпами «глобального потепления», наблюдаемого у поверхности Земли. И хотя по результатам более поздних работ (см. обзор [23]) величина тренда оказалась существенно меньше, вопрос не теряет своей актуальности, так как он, как это ни покажется странным, по своему происхождению мо-

жет оказаться родственным известному всем парниковому эффекту в тропосфере. Дело в том, что одним из механизмов отвода тепловой энергии в верхней атмосфере является радиационное выхолаживание: в процессе столкновений молекулы переводят часть кинетической энергии в энергию своих колебаний, которая затем высвечивается в инфракрасном диапазоне и покидает атмосферу. Основной вклад в радиационное выхолаживание вносят молекула CO_2 и ее полоса с длиной волны 15 мкм. Поглощение собственного излучения Земли в этой же полосе углекислого газа — основная составляющая парникового эффекта. Таким образом, рост выбросов CO_2 в атмосферу может быть основной причиной двух противоположных процессов в ее разных слоях.

Косвенным, но при этом весьма наглядным подтверждением векового охлаждения летней полярной мезосферы являются серебристые облака, которые весьма часто наблюдаются сейчас, но при этом не были видны до 1885 г. — по крайней мере, об их появлении до этого нет никаких упоминаний. Справедливости ради, многие отрицают подобное доказательство векового похолодания, считая основной причиной появления серебристых облаков рост содержания водяного пара в верхних слоях атмосферы.

Встречались и чисто астрономические объяснения данного феномена. Предполагалось, что главной причиной появления серебристых облаков является комета Энке, орбиту которой Земля пересекает в конце июня. Вместе с кометой по орбите движется рой метеорных частиц, которые становятся ядрами конденсации (а может, и источником воды) для облаков. Подтверждением этому мог стать вероятный осколок кометы — Тунгусский метеорит, имевший ту же орбиту и упавший в конце июня. Пылевой хвост этого тела стал причиной аномально светлых ночей над обширными территориями на Земле [24]. Повышенная яркость неба могла представлять собой не что иное, как необычно плотные серебристые облака, освещенные неглубоко зашедшим Солнцем. Отсутствие облаков до конца XIX в., по этой гипотезе, связывалось с эволюцией орбиты кометы Энке, ранее отстоявшей дальше от орбиты Земли.

Если объяснение светлых ночей в 1908 г. вполне правдоподобно, то связь серебристых облаков и кометы Энке в настоящее время не выдерживает проверки. Метеорный поток, порожденный кометой и достигающий пика активности в конце июня, известен: β -Тауриды. Хотя его радиант располагается рядом с Солнцем и метеоры не видны ночью, активность потока измерена радиометодами. Она суще-

ственно меньше спорадического фона и заметного увеличения числа ядер конденсации в мезосфере вызвать не может. Тем самым основной причиной формирования серебристых облаков с конца XIX в. все же считается вековое мезосферное похолодание.

Сумеречное зондирование

Трудность непосредственных измерений параметров мезосферной среды изнутри и отсутствие в ней термодинамического равновесия указывает на необходимость продолжения измерений разными методами, дополняя существующие спутниковые данные. Наряду с лидарным, радарным и микроволновым зондированием эффективным и при этом самым дешевым по стоимости оказывается анализ фона сумеречного неба. Более того, сумеречное зондирование обладает возможностями, недоступными для других методов. Прежде всего, можно одновременно проводить измерения в разных точках неба и получать характеристики рассеяния света под разными углами рассеяния и разными направлениями поляризации. Это важно для разделения молекулярного и аэрозольного рассеяния. Измерения на разных стадиях сумерек при разном положении тени Земли позволяют охватить широкий диапазон высот в атмосфере.

Долгие десятилетия основной проблемой сумеречного зондирования был учет многократного рассеяния. Это было связано не с недостатком идей и методов (их предлагалось много), а с трудностью их реализации. Теоретические модели учета рассеяния высших порядков стали посильными только современным ЭВМ, но и сейчас они зависят от постоянной изменчивости аэрозоля в нижних слоях атмосферы, трудно поддающейся учету. Наблюдательные методы требовали быстрых измерений в разных точках неба, в том числе в темную фазу сумерек. Максимальная эффективность достигается, если при этом успеть измерить и величину поляризации фона неба.

С 2011 г. под Москвой ($55.2^{\circ}N, 37.5^{\circ}E$) начала работу широкоугольная поляризационная камера с диаметром поля зрения 140° , способная проводить измерения от захода Солнца до глубокой ночи в широкой спектральной полосе с эффективной длиной волны 540 нм. Методика, изложенная в работе [25], позволяет выделить однократное рассеяние в мезосфере вплоть до 90 км, несмотря на его малый вклад в общую яркость неба, и построить зависимости интенсивности и поляризации от угла рассеяния θ . Для оценки вклада молекулярного (релеевского) и аэрозольного рассеяния определялась

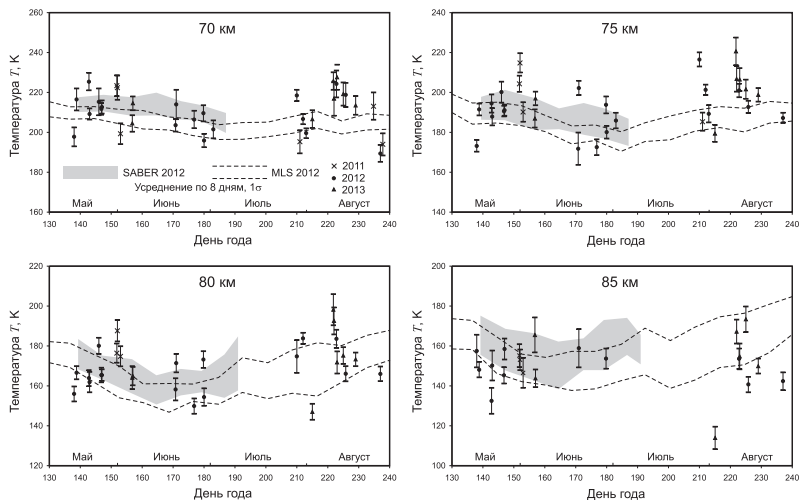


Рис. 3. Значения температуры на разных высотах на основе сумеречного зондирования в сравнении с данными SABER и MLS

поляризационная характеристика q :

$$p(h, \theta) = q(h)p_R(\theta) = q(h) \frac{\sin^2(\theta)}{1.06 + \cos^2(\theta)}. \quad (3)$$

Здесь $p(\theta)$ и $p_R(\theta)$ — наблюдаемая и релеевская зависимость поляризации рассеянного излучения от угла рассеяния, h — характерная нижняя граница освещенной части атмосферы, которая превышает геометрическую высоту тени Земли на 14–15 км за счет поглощения касательных солнечных лучей в нижней атмосфере. Как и при наблюдениях со спутника SME, работавшего примерно в той же спектральной полосе, было обнаружено, что значение параметра q в большинстве случаев близко к 1, то есть рассеяние носит преимущественно молекулярный характер. Это позволяет определить изменение атмосферного давления и плотности с высотой и построить профиль температуры в мезосфере. Результаты для четырех высот в мезосфере показаны на рис. 3. Видно, что они близки к спутниковым данным экспериментов SABER и MLS, усредненным по близлежащим точкам, датам и высотам.

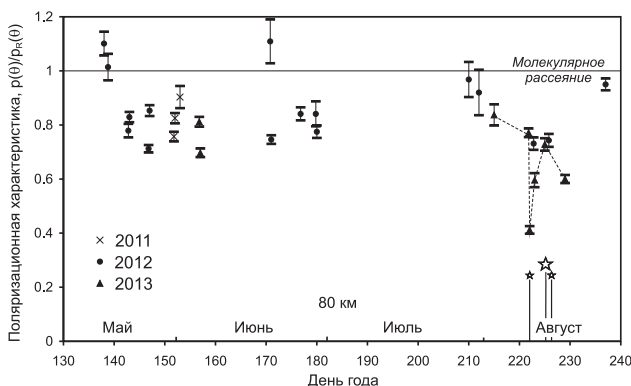


Рис. 4. Поляризационная характеристика однократного рассеяния в слое над высотой 80 км по данным сумеречного зондирования. Звездочки обозначают моменты максимумов крупных и мелких частиц Персеид

Значения температур вблизи летней мезопаузы (85 км) весьма малы как по спутниковым, так и по сумеречным измерениям. Можно обратить внимание на данные утренних сумерек 3 августа 2013 г. с аномально низкой температурой (114 К). Вероятно, эта оценка в силу каких-либо инструментальных причин была существенно заниженной, но необходимо отметить, что на следующий день, 4 августа, над значительной территорией Европы наблюдались яркие серебристые облака, не типичные для августа.

Поляризационные измерения фона неба позволяют также обнаружить присутствие пыли в мезосфере. Пыль должна ослаблять поляризацию рассеянного излучения, то есть уменьшать величину q . На рис. 4 показаны значения параметра q в слое над высотой 80 км в разные даты 2011—2013 гг. В большинстве дат величина составляет около 0.8, что, очевидно, соответствует деполяризации от спорадической метеорной пыли, всегда присутствующей в атмосфере. Более сильное падение поляризации однократного рассеяния происходит около 10 августа, причем наиболее заметным оно оказалось в утренние безлунные сумерки 2013 г. Наиболее вероятной причиной этого является метеорный поток Персеиды. И если суточный ход деполяризации хорошо согласуется с этим предположением (под

утро радиант поднимается выше над горизонтом, и частицы в большом количестве проникают в мезосферу), то дата требует отдельного объяснения: визуальный максимум Персеид наступает 12 августа и не совпадает с минимумами поляризации по наблюдениям 2013 г.

Для этого необходимо рассмотреть структуру метеорного роя Персеид, хорошо исследованного за много лет наблюдений. В этом рое крупные и мелкие частицы распределены по-разному: сказывается влияние негравитационных сил, прежде всего — светового давления Солнца, приводящего к уменьшению эффективной центральной массы и эффекту Пойнтинга—Робертсона. На движении мелких частиц эти эффекты сказываются сильнее, чем в случае крупных тел. Кроме того, разные частицы были выброшены с родительской кометы Свифта—Туттля не одновременно, и эволюция их орбит отличалась. В результате, как было показано в [26], максимум 12 августа относится только к ярким метеорам размером в миллиметр и более. Деполяризация создается существенно меньшими частицами с размером в несколько микрон или продуктами дробления субмиллиметровых метеороидов, оседающими в мезосфере.

Временный профиль темпа выпадения в атмосферу мелких частиц Персеид имеет бимодальную структуру с максимумами около 10 и 14 августа. Первый из них уверенно совпал с наблюдаемым падением поляризации однократного рассеяния в 2013 г., второй был пропущен из-за погодных условий, но проявил себя уменьшением поляризации утром 17 августа (рис. 4, где отмечены максимумы выпадения крупных и мелких частиц).

Анализ зависимостей величины q от высоты показал, что метеорная пыль образует слой с максимальной концентрацией на уровне 81—83 км. Это значение близко к характерной высоте серебристых облаков. На этих же высотах начинает увеличиваться поток коротковолновой радиации Солнца (в том числе в линии Ly_{α}). Лишь немногим выше располагается абсолютный минимум легких температур и слой металлов, вероятно, также имеющие метеорное происхождение. Эта область атмосферы Земли, изученная хуже других, действительно представляет собой сравнительно узкий слой «встречи Земли и космоса», что и предопределяет многообразие происходящих в ней физических явлений и интерес к ней для представителей разных наук — геофизики, химии, астрономии.

Автор выражает благодарность И. А. Маслову (Институт космических исследований РАН), совместно с которым ведется сумеречное зондирование атмосферы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 12-05-00501-а.

Библиографические ссылки

1. *She C. Y., Yu J. R., Latifi H., Bills R. E.* High spectral-resolution lidar for mesospheric sodium temperature measurements // Appl. Optics. — 1992. — Vol. 31. — P. 2095.
2. *von Zahn U., Hoffner J.* Mesopause temperature profiling by potassium lidar // Geophys. Res. Lett. — 1996. — Vol. 23. — P. 141.
3. *Plane J. M. C., Murray B. J., Chu X., Gardner C. S.* Removal of Meteoric Iron on Polar Mesospheric Clouds // Science. — 2004. — Vol. 304. — P. 426.
4. *Feigin A. M., Konovalov I. B., Molkov Y. I.* Toward an understanding of the nonlinear nature of atmospheric photochemistry: essential dynamic model of the mesospheric photochemical system // J. Geophys. Res. — 1998. — Vol. 103. — P. 25447.
5. *Yoshino K., Cheung A. S. C., Esmond J. R. et al.* Improved Absorption Cross Sections of Oxygen in the Wavelength Region 205-240 nm of the Herzberg Continuum // Planet. Space Sci. — 1988. — Vol. 36. — P. 1469.
6. *Minschwaner K.* Polynomial Coefficients for calculating O₂ Schumann-Runge cross sections at 0.5 cm⁻¹ resolution // J. Geophys. Res. — 1992. — Vol. 97. — P. 10103.
7. *Watanabe K., Inn E. C., Zelikoff M.* Absorption Coefficients of Oxygen in the Vacuum Ultraviolet // J. Chem. Phys. — 1953. — Vol. 21. — P. 1026.
8. *Lacoursiere J., Meyer S. A., Faris G. W., Slanger T. G.* The O(1D) yield from O₂ photodissociation near H Lyman- α (121.6 nm) // J. Chem. Phys. — 1999. — Vol. 110. — P. 1949.
9. *Damout D., Brion J., Charbonnier J., Malicet J.* Ozone UV Spectroscopy I: Absorption Cross-Sections at Room Temperature // J. Atmos. Chem. — 1992. — Vol. 15. — P. 145.
10. *Pankratz G. K., Knapp B. G., Reukauf R. A. et al.* The SORCE Science Data System // Solar Physics. — 2005. — Vol. 2303. — P. 389.

11. *Marsh D.* The Neutral Atmosphere // Space Weather : The National Center for Atmospheric Research Summer Colloquium. — 2005.
12. *Garcia R. R., Solomon S.* A Numerical Model of the Zonally Averaged Dynamical and Chemical Structure of the Middle Atmosphere // J. Geophys. Res. — 1983. — Vol. 88. — P. 1379.
13. *Taylor M. J., Hapgood M. A., Rothwell P.* Observations of Gravity Wave Propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the Near Infrared OH Nightglow Emissions // Planet. Space Sci. — 1987. — Vol. 35. — P. 413.
14. *Федынский В. В., Станюкович К. П.* Исследования верхней атмосферы по фотографиям метеоров // Астрон. журн. — 1935. — Т. 12. — С. 440.
15. *Фесенков В. Г.* О строении атмосферы (фотометрический анализ сумерек) // Тр. Главной рос. астрофиз. обсерватории. — 1923. — Т. 2. — С. 7.
16. *Розенберг Г. В.* Сумерки. — М. : Физ.-мат. лит., 1963.
17. *Лебединец В. Н.* Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль. — Л. : Гидрометеиздат, 1981.
18. *Clancy R. T., Rusch D. W.* Climatology and trends of mesospheric temperatures (58—90 km) based on 1982—1986 SME limb scattering profiles // J. Geophys. Res. — 1989. — Vol. 94. — P. 3377.
19. *Reber C. A., Trevathan C. E., McNeal R. J., Luther M. R.* The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) mission // J. Geophys. Res. — 1993. — Vol. 98. — P. 10643.
20. *Russell J. M., III, Mlynczak M. G., Gordley L. L. et al.* An overview of the SABER experiment and preliminary calibration results // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. — 1999. — Vol. 3756. — P. 277.
21. *Schwartz M. J., Lambert A., Manney G. L. et al.* Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // J. Geophys. Res. — 2008. — Vol. 113. — P. D15S11.
22. *Kokin G. A., Lysenko E. V.* On temperature trends of the atmosphere from rocket and radiosonde data // J. Atmos. Terr. Phys. — 1994. — Vol. 56. — P. 1035.
23. *Beig G., Keckhut P., Lowe R. P. et al.* Review of Mesospheric Temperature Trends // Rev. Geophys. — 2003. — Vol. 41. — P. 1015.
24. *Бронштэн В. А.* Тунгусский метеорит. — М. : Сельянов А. Д., 2000.

25. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Summer mesosphere temperature distribution from wide-angle polarization measurements of the twilight sky // J. Atmos. Terr. Phys. — 2013. — Vol. 105. — P. 8.
26. *Белькович О. И., Ишмухаметова М. Г.* Распределение метеороидов Персеид по массам // Астрон. вестн. — 2006. — Т. 40. — С. 230.

К. В. Холшевников^{1,2}, Т. Н. Санникова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет,

²Институт прикладной астрономии РАН

ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА ВОЗМУЩАЮЩИМ УСКОРЕНИЕМ

Рассмотрена задача о движении точки нулевой массы \mathcal{A} под действием притяжения к центральному телу \mathcal{S} и возмущающего ускорения \mathbf{P} . Вектор \mathbf{P} считается постоянным в одной из трех наиболее употребительных в астрономии систем отсчета с общим началом \mathcal{S} , но разными направлениями осей: основная инерциальная \mathcal{O} и две сопутствующие \mathcal{O}_s . Орты системы \mathcal{O}_1 направлены по радиус-вектору, трансверсали и бинормали. Орты системы \mathcal{O}_2 направлены по вектору скорости, главной нормали к оскулирующей орбите и бинормали. Составлены уравнения типа Эйлера и произведена осредняющая замена переменных в первом порядке по малому параметру, соответствующему отношению возмущающего ускорения $|\mathbf{P}|$ к основному κ^2/r^2 . Здесь $r = \mathcal{SA}$, κ^2 — произведение постоянной тяготения на массу тела \mathcal{S} . Описана схема решения осредненных уравнений. В качестве приложения показано, что орбиту опасного астероида можно изменить двигателем малой тяги для избежания столкновения за приемлемое время (несколько месяцев).

© Холшевников К. В., Санникова Т. Н., 2014

A problem of a motion of a zero-mass point \mathcal{A} under attraction to a central body \mathcal{S} and a disturbing acceleration \mathbf{P} is considered. The vector \mathbf{P} is constant in one of three mostly used in celestial mechanics reference frames. They have the common origin \mathcal{S} but diverse axes direction: the main inertial \mathcal{O} one, and two accompanying ones \mathcal{O}_s . Basis vectors of the system \mathcal{O}_1 are directed along the radius, the transversal, and the angular momentum vector. Basis vectors of the system \mathcal{O}_2 are directed along the velocity vector, the main normal to the osculating orbit, and the binormal. Euler type equations are written. Averaging transform was made up to the first order with respect to a small parameter corresponding to the ratio of the disturbing acceleration $|\mathbf{P}|$ to the main one κ^2/r^2 , κ^2 being the product of the gravitational constant and the mass of \mathcal{S} , $r = \mathcal{SA}$. A scheme of the averaging equations solution is described. As an application we show that we can change an hazardous asteroid orbit using a microthrust engine to avoid a collision within few months.

Введение

Пусть точка нулевой массы \mathcal{A} движется под действием притяжения к центральному телу \mathcal{S} и возмущающего ускорения \mathbf{P} . Введем три наиболее употребительные в астрономии системы отсчета с общим началом \mathcal{S} , но разными направлениями осей: основная инерциальная \mathcal{O} с оортами $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ и две сопутствующие \mathcal{O}_s с оортами $\mathbf{i}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{k}_s$. Оорты системы \mathcal{O}_1 направлены по радиусу-вектору, трансверсали (перпендикуляр к радиусу-вектору в плоскости оскулирующей орбиты в сторону движения) и бинормали (направленной по вектору площадей). Оорты системы \mathcal{O}_2 направлены по вектору скорости, главной нормали к оскулирующей орбите и бинормали. В качестве вспомогательной понадобится также система \mathcal{O}_3 с оортами, направленными в перицентр оскулирующей орбиты, по нормали к \mathbf{i}_3 в плоскости оскулирующей орбиты в сторону движения и бинормали.

Исследуем движение \mathcal{A} , считая компоненты вектора \mathbf{P} постоянными в одной из систем координат $\mathcal{O}, \mathcal{O}_1, \mathcal{O}_2$. Для этого составим уравнения типа Эйлера в оскулирующих элементах и применим к ним осредняющее преобразование, считая отношение возмущающего ускорения $|\mathbf{P}|$ к основному κ^2/r^2 малой величиной и ограничиваясь возмущениями первого порядка. Здесь $r = \mathcal{SA}$, κ^2 — произведение

постоянной тяготения на массу тела \mathcal{S} . Далее мы наметим схему решения осредненных уравнений, отложив подробное исследование на ближайшее будущее.

Поставленная модельная задача не имела приложений в докосмическую эру. Но теперь можно указать по меньшей мере два приложения.

Во-первых, движение космического аппарата с малой постоянной по модулю тягой. Для перевода ИСЗ на более высокую орбиту, например, проще всего (с точки зрения управления движением) считать \mathbf{P} постоянным в системе \mathcal{O}_1 .

Во-вторых, движение астероида, на котором установлен реактивный двигатель, обеспечивающий малую постоянную по модулю тягу с целью, например, предотвращения столкновения с Землей. Если астероид не вращается или двигатель установлен на одном из его полюсов, то \mathbf{P} постоянно в системе \mathcal{O} . Однако при установке двигателя на зависнувшем рядом с астероидом КА по схеме *гравитационный тягач* [1] легко осуществить постоянство \mathbf{P} и в системах $\mathcal{O}_1, \mathcal{O}_2$.

Наконец, отметим педагогическое значение рассматриваемой модели. До сих пор простейшей задачей небесной механики, разумеется не считая задачи двух тел, была задача о движении спутника осесимметричной планеты. Предложенная модель не сложнее. Ее аналитическое решение может быть получено (по крайней мере в первом порядке малости по возмущающему ускорению) без разложений по степеням эксцентриситета и наклона.

Инвариантная и полуинвариантная форма уравнений Эйлера для инвариантных и полуинвариантных элементов

Уравнения Эйлера изменения оскулирующих элементов приводятся в каждом учебнике по небесной механике — см., например, [2]. Они привязаны к системе отсчета \mathcal{O}_1 , что не всегда удобно. Полезно иметь уравнения, справедливые в любой системе координат. Естественно получить сначала соотношения в инвариантной, не зависящей от системы отсчета форме. Однако это возможно лишь частично, поскольку некоторые элементы сами зависят от ориентации системы координат. Это соображение диктует разбиение элементов на два класса: инвариантные (вектор площадей \mathbf{s} , его модуль s , фокальный параметр p , постоянная энергии h , большая полуось a , среднее

движение ω , эксцентриситет e , средняя аномалия M , истинная аномалия θ , эксцентрическая аномалия E , эпоха перицентра τ , средняя аномалия эпохи M_0) и зависящие от выбора основной плоскости (наклон i , долгота восходящего узла Ω , аргумент перицентра σ , аргумент широты u). Заметим, что вектор \mathbf{c} и его модуль c инвариантны, хотя компоненты \mathbf{c} зависят от ориентации системы координат.

Вывод уравнений не представляет труда. Достаточно последовательно дифференцировать соотношения задачи двух тел, начиная с интегралов движения, по разработанной в [2] схеме, не раскрывая значений появляющихся скалярных, векторных и смешанных произведений векторов, инвариантных относительно вращений систем координат.

Начнем с интеграла энергии [2, 3]:

$$\frac{\dot{\mathbf{r}}^2}{2} - \frac{\kappa^2}{r} = -\frac{\kappa^2}{2a}.$$

Дифференцируя с учетом уравнений движения

$$\ddot{\mathbf{r}} + \frac{\kappa^2}{r^3}\mathbf{r} = \mathbf{P}, \quad (1)$$

получим

$$\frac{\kappa^2}{2a^2}\dot{a} = \dot{\mathbf{r}}\ddot{\mathbf{r}} + \frac{\kappa^2}{r^2}\dot{r} = \dot{\mathbf{r}}\left(-\frac{\kappa^2}{r^3}\mathbf{r} + \mathbf{P}\right) + \frac{\kappa^2}{r^3}\mathbf{r}\dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{r}}\mathbf{P}.$$

Аналогично из интеграла площадей

$$\mathbf{c} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}$$

выводим

$$\dot{\mathbf{c}} = \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \quad \dot{c} = \frac{1}{c}(\mathbf{c}\mathbf{r}\mathbf{P}), \quad \dot{p} = \frac{2}{\kappa^2}(\mathbf{c}\mathbf{r}\mathbf{P}). \quad (2)$$

Уравнения эллипса в полярных координатах $p = r(1 + e \cos \theta)$ и $r = a(1 - e \cos E)$ позволяют найти $\dot{\theta}$ и \dot{E} , а уравнение Кеплера дает нам \dot{M} .

Переходим к неинвариантным элементам. Ясно, что правые части для скорости изменения i, u, σ будут зависеть, наряду с $\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \mathbf{c}, \mathbf{P}$, еще и от вектора \mathbf{k} . Казалось бы, правые части для скорости изменения Ω будут зависеть еще и от $\dot{\mathbf{i}}$, поскольку от направления оси x зависят

значения Ω . Однако поворот на постоянный угол не меняет скорости изменения Ω . Поэтому можно избежать зависимости от \mathbf{i}, \mathbf{j} . Иными словами, уравнения типа Эйлера для рассматриваемых элементов зависят от выбора основной плоскости, но не от выбора в ней начала отсчета углов. Поэтому мы говорим о полуинвариантности.

Запишем третью компоненту вектора площадей в виде $\mathbf{ck} = \varkappa\sqrt{p}\cos i$. Дифференцируя с учетом (2), найдем

$$\dot{i} = \frac{\operatorname{ctg} i}{\varkappa^2 p}(\mathbf{crP}) - \frac{1}{\varkappa\sqrt{p}\sin i}(\mathbf{rPk}), \quad (3)$$

где мы обозначили производную от i жирной точкой.

Дифференцируя равенство $z = r \sin i \sin u$ с учетом уже полученных соотношений, найдем \dot{u} , после чего равенство $\sigma = u - \theta$ даст $\dot{\sigma}$.

Более утомительны выкладки с долготой узла. Сначала преобразуем выражения для декартовых координат к виду

$$\begin{aligned} x \cos \Omega + y \sin \Omega &= r \cos u, \\ -x \sin \Omega + y \cos \Omega &= r \cos i \sin u. \end{aligned} \quad (4)$$

Дифференцируя первое из соотношений (4) с учетом второго, получим после преобразований

$$\dot{u} + \cos i \dot{\Omega} = \frac{\varkappa\sqrt{p}}{r^2}. \quad (5)$$

Интересно, что правая часть оказалась независимой от возмущающей силы, что можно показать без вычислений, пользуясь кинематическими и геометрическими соображениями [4, §16.6]. Но это не менее сложно, чем приведенный нами вывод (5). Выпишем окончательные формулы изменения оскулирующих элементов в инвариантной (полуинвариантной для элементов, связанных с ориентацией орбитальной плоскости) форме:

$$\begin{aligned}
\dot{a} &= \frac{2a^2}{\varkappa^2} \dot{\mathbf{r}}\mathbf{P}, \\
\dot{\omega} &= -3\sqrt[3]{\frac{\omega}{\varkappa^4}} \dot{\mathbf{r}}\mathbf{P}, \\
\dot{p} &= \frac{2}{\varkappa^2} (\mathbf{crP}), \\
\dot{e} &= \frac{p}{\varkappa^2 e} \dot{\mathbf{r}}\mathbf{P} - \frac{1}{\varkappa^2 a e} (\mathbf{crP}), \\
\dot{M} &= \omega + \frac{r\eta}{\varkappa^2 e^2 \sin \theta} (-2e + \cos \theta + e \cos^2 \theta) \dot{\mathbf{r}}\mathbf{P} - \frac{\text{ctg } \theta \eta}{\varkappa^2 a e^2} (\mathbf{crP}), \\
\dot{i} &= \frac{\text{ctg } i}{\varkappa^2 p} (\mathbf{crP}) - \frac{1}{\varkappa \sqrt{p} \sin i} (\mathbf{rPk}), \\
\dot{\sigma} &= \frac{1}{\varkappa^2 p} \left[\frac{2e + (1 + e^2) \cos \theta}{e^2 \sin \theta} - \text{ctg}^2 i \text{tg } u \right] (\mathbf{crP}) - \frac{p \text{ctg } \theta}{\varkappa^2 e^2} \dot{\mathbf{r}}\mathbf{P} + \\
&\quad + \frac{\cos i \text{tg } u}{\varkappa \sqrt{p} \sin^2 i} (\mathbf{rPk}), \\
\dot{\Omega} &= \frac{\text{tg } u}{\varkappa \sqrt{p} \sin^2 i} \left[\frac{\cos i}{\varkappa \sqrt{p}} (\mathbf{crP}) - (\mathbf{rPk}) \right], \\
\dot{u} + \cos i \dot{\Omega} &= \frac{\varkappa \sqrt{p}}{r^2}. \tag{6}
\end{aligned}$$

Здесь $\eta = \sqrt{1 - e^2}$.

Замечание 1. Как видим, скорости изменения инвариантных элементов линейно зависят от двух содержащих возмущающую силу величин: $\dot{\mathbf{r}}\mathbf{P}$ и (\mathbf{crP}) . Скорости изменения неинвариантных элементов зависят еще и от (\mathbf{rPk}) .

Замечание 2. Среди уравнений (6) только шесть независимых. Коэффициенты уравнений можно выразить не только через истинную, но и через эксцентрическую аномалию.

Уравнения Эйлера в системах \mathcal{O} , \mathcal{O}_1 , \mathcal{O}_2

Для практического применения уравнений (6) надо выразить скалярные и смешанные произведения векторов через компоненты вектора \mathbf{P} . Опуская утомительные выкладки, приведем окончательный результат. Коэффициенты уравнений выразим через эксцентрическую аномалию: так удобнее для решения поставленной задачи.

Только для наклона и узла сохраним аргумент широты, что сильно упрощает уравнения.

1. Система \mathcal{O} :

$$\begin{aligned}
 \dot{a} &= \frac{2a}{\omega r} [-\sin E \Phi_1 + \eta \cos E \Phi_2], \\
 \dot{\omega} &= -\frac{3}{r} [-\sin E \Phi_1 + \eta \cos E \Phi_2], \\
 \dot{p} &= \frac{2a\sqrt{p}}{\varkappa} [-\eta \sin E \Phi_1 + (\cos E - e)\Phi_2], \\
 \dot{e} &= \frac{a\sqrt{p}}{\varkappa r} [-\eta \cos E \sin E \Phi_1 + (1 - 2e \cos E + \cos^2 E)\Phi_2], \\
 \dot{M} &= \omega + \frac{1}{\omega r e} \left\{ [2 - e(3 + e^2) \cos E - (1 - 3e^2) \cos^2 E] \Phi_1 - \right. \\
 &\quad \left. - \eta [e + (1 - 2e^2) \cos E] \sin E \Phi_2 \right\}, \\
 \dot{i} &= \frac{r \cos u}{\varkappa \sqrt{p}} \Phi_3, \\
 \dot{\sigma} &= \frac{1}{\omega r e} \left\{ \eta [-2 + e \cos E + \cos^2 E] \Phi_1 + \right. \\
 &\quad \left. + (\cos E - e) \sin E \Phi_2 \right\} - \frac{r \operatorname{ctg} i \sin u}{\varkappa \sqrt{p}} \Phi_3, \\
 \dot{\Omega} &= \frac{r \sin u}{\varkappa \sqrt{p} \sin i} \Phi_3.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Здесь Φ_s — компоненты P во вспомогательной системе \mathcal{O}_3 , через которые, как ни удивительно, правые части (7) выражаются проще, чем через компоненты P_s в основной системе \mathcal{O} . Именно,

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \mathcal{B}(i, \Omega, \sigma) \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} = \mathcal{B}^*(i, \Omega, \sigma) \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix}, \tag{8}$$

где \mathcal{B}^* — транспонированная матрица \mathcal{B} [2, 3]:

$$\mathcal{B} = \begin{pmatrix} \cos \sigma \cos \Omega - \cos i \sin \sigma \sin \Omega & -\sin \sigma \cos \Omega - \cos i \cos \sigma \sin \Omega & \sin i \sin \Omega \\ \cos \sigma \sin \Omega + \cos i \sin \sigma \cos \Omega & -\sin \sigma \sin \Omega + \cos i \cos \sigma \cos \Omega & -\sin i \cos \Omega \\ \sin i \sin \sigma & \sin i \cos \sigma & \cos i \end{pmatrix}. \tag{9}$$

2. Система \mathcal{O}_1 :

$$\begin{aligned}
\dot{a} &= \frac{2a}{\omega r} (e \sin E S + \eta T), \\
\dot{\omega} &= -\frac{3}{r} (e \sin E S + \eta T), \\
\dot{p} &= \frac{2r\sqrt{p}}{\varkappa} T, \\
\dot{e} &= \frac{(1-e^2) \sin E}{\omega r} S + \frac{\sqrt{p}}{\varkappa e} \left(\frac{p}{r} - \frac{r}{a} \right) T, \\
\dot{M} &= \omega + \frac{-e(3-e^2) + (1+3e^2) \cos E - 2e^3 \cos^2 E}{\omega e r} S - \frac{\sqrt{p}(p+r) \sin E}{\varkappa e r} T, \\
\dot{i} &= \frac{r \cos u}{\varkappa \sqrt{p}} W, \\
\dot{\sigma} &= -\frac{(\cos E - e)\eta}{\omega e r} S + \frac{(p+r) \sin E}{\omega a e r} T - \frac{r \operatorname{ctg} i \sin u}{\varkappa \sqrt{p}} W, \\
\dot{\Omega} &= \frac{r \sin u}{\varkappa \sqrt{p} \sin i} W.
\end{aligned} \tag{10}$$

Здесь S, T, W — компоненты \mathbf{P} в системе \mathcal{O}_1 . Заметим, что

$$\frac{1}{e} \left(\frac{p}{r} - \frac{r}{a} \right) = -\frac{a}{r} (e - 2 \cos E + e \cos^2 E).$$

3. Система \mathcal{O}_2 :

$$\begin{aligned}
\dot{a} &= \frac{2}{\omega} \sqrt{\frac{1+e \cos E}{1-e \cos E}} \mathfrak{T}, \\
\dot{\omega} &= -\frac{3}{a} \sqrt{\frac{1+e \cos E}{1-e \cos E}} \mathfrak{T}, \\
\dot{p} &= \frac{2r\sqrt{p}}{\varkappa} \left(\frac{\eta}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 E}} \mathfrak{T} + \frac{e \sin E}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 E}} \mathfrak{N} \right), \\
\dot{e} &= \frac{2\eta\sqrt{p} \cos E}{\varkappa \sqrt{1-e^2 \cos^2 E}} \mathfrak{T} - \frac{r\eta \sin E}{\varkappa \sqrt{a(1-e^2 \cos^2 E)}} \mathfrak{N}, \\
\dot{M} &= \omega - \frac{2\sqrt{a}(1-e^3 \cos E) \sin E}{\varkappa e \sqrt{1-e^2 \cos^2 E}} \mathfrak{T} + \frac{\sqrt{p}(e - \cos E)}{\varkappa e} \sqrt{\frac{1-e \cos E}{1+e \cos E}} \mathfrak{N}, \\
\dot{i} &= \frac{r \cos u}{\varkappa \sqrt{p}} W,
\end{aligned}$$

$$\dot{\sigma} = \frac{2\sqrt{p} \sin E}{\kappa e \sqrt{1 - e^2 \cos^2 E}} \mathfrak{T} + \frac{\sqrt{a}(e + \cos E)}{\kappa e} \sqrt{\frac{1 - e \cos E}{1 + e \cos E}} \mathfrak{N} - \frac{r \operatorname{ctg} i \sin u}{\kappa \sqrt{p}} W,$$

$$\dot{\Omega} = \frac{r \sin u}{\kappa \sqrt{p} \sin i} W. \quad (11)$$

Здесь $\mathfrak{T}, \mathfrak{N}, W$ — компоненты \mathbf{P} в системе \mathcal{O}_2 .

Осредняющее преобразование уравнений движения

За шесть независимых переменных выберем кеплеровские элементы $\omega, e, i, \Omega, \sigma, M$. Выбор среднего движения вместо большой полуоси a сильно упрощает операции осреднения, поскольку скорость изменения M в невозмущенном движении линейно зависит от ω , но существенно нелинейно от a .

Принято различать вектор медленных переменных $\mathbf{x} = (\omega, e, i, \Omega, \sigma)$, постоянных в невозмущенном движении, и скалярную быструю переменную $y = M$, линейно зависящую от $x_1 = \omega$. Здесь и ниже компоненты трехмерного вектора \mathbf{P} и пятимерных векторов $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}, \mathbf{X}, \mathbf{F}$ обозначены теми же буквами с номером компоненты в виде нижнего индекса.

Все приведенные в предыдущем параграфе уравнения типа Эйлера имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mu \mathbf{f}(\mathbf{x}, y), \\ \dot{y} &= x_1 + \mu g(\mathbf{x}, y). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь μ — малый параметр, который мы вводим искусственно и считаем постоянным, а $\mathbf{f} = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5)$ и g — вещественно-аналитические функции в окрестности начальных данных. Более того, аналитичность гарантируется при всех вещественных $\omega, \Omega, \sigma, M$. Ограничимся эллиптическим оскулирующим движением. Особенности в этом случае возникают при $e = 0$ и $\sin i = 0$, но они устраняются переходом к переменным типа Лагранжа.

Совершим замену переменных

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{X} + \mu \mathbf{u}(\mathbf{X}, Y), \\ y &= Y + \mu v(\mathbf{X}, Y), \end{aligned} \quad (13)$$

в результате чего (12) перейдет в систему:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mu \mathbf{F}(\mathbf{X}, Y) + \dots, \\ \dot{Y} &= X_1 + \mu G(\mathbf{X}, Y) + \dots\end{aligned}\quad (14)$$

В дальнейшем мы ограничимся возмущениями первого порядка и не будем указывать на наличие членов более высокого порядка.

Согласно [5, 6] функции \mathbf{u} , v и \mathbf{F} , G связаны соотношениями

$$\begin{aligned}X_1 \frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{X}, Y)}{\partial Y} &= \mathbf{f}(\mathbf{X}, Y) - \mathbf{F}(\mathbf{X}, Y), \\ X_1 \frac{\partial v(\mathbf{X}, Y)}{\partial Y} &= u_1(\mathbf{X}, Y) + g(\mathbf{X}, Y) - G(\mathbf{X}, Y).\end{aligned}\quad (15)$$

Первые пять (в скалярной форме) уравнений независимы друг от друга и от последнего уравнения, и каждое содержит две неизвестные функции u_k , F_k ($k = 1, \dots, 5$). После определения u_1 в последнем уравнении (15) также остаются две подлежащие определению функции v , G .

Уравнения вида (15) хорошо изучены в небесной механике. В нашем случае лишь одна переменная M является быстрой, поэтому малые знаменатели не появляются и решение находится элементарно. Согласно методу осреднения за \mathbf{F} следует взять среднее значение \mathbf{f} :

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathcal{E} \mathbf{f}(\mathbf{X}, Y) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \mathbf{f}(\mathbf{X}, Y) dY. \quad (16)$$

После этого \mathbf{u} находится простой квадратурой

$$\mathbf{u}(\mathbf{X}, Y) = \mathcal{I} \mathbf{f}(\mathbf{X}, Y) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{X_1} \int [\mathbf{f}(\mathbf{X}, Y) - \mathcal{E} \mathbf{f}(\mathbf{X}, Y)] dY, \quad (17)$$

где первообразная выделяется однозначно условием нулевого среднего

$$\mathcal{E} \mathbf{u} = 0. \quad (18)$$

Теперь однозначно находятся G и v :

$$G(\mathbf{X}) = \mathcal{E} g(\mathbf{X}, Y), \quad v(\mathbf{X}, Y) = \mathcal{I} [u_1(\mathbf{X}, Y) + g(\mathbf{X}, Y)], \quad \mathcal{E} v = 0. \quad (19)$$

Таким образом, функции \mathbf{F} , G не зависят от Y , а функции \mathbf{u} , v периодичны по Y и обладают нулевым средним.

Основная система координат \mathcal{O}

Функции f_s и g даются формулами (7). Поскольку $dM = (r/a)dE$, все интегралы (16, 17) элементарны. Приведем окончательный результат:

$$F_1 = 0, \quad F_2 = \frac{3\eta}{2\omega a} \Phi_2, \quad F_3 = -\frac{3e}{2\omega a \eta} \cos \sigma \Phi_3, \quad F_4 = -\frac{3e \sin \sigma}{2\omega a \eta \sin i} \Phi_3,$$

$$F_5 = -\frac{3\eta}{2\omega a e} \Phi_1 + \frac{3e \operatorname{ctg} i}{2\omega a \eta} \sin \sigma \Phi_3, \quad G = \frac{3(1+e^2)}{2\omega a e} \Phi_1; \quad (20)$$

$$u_1 = -\frac{3}{2\omega a} [(e + 2 \cos E) \Phi_1 + 2\eta \sin E \Phi_2],$$

$$\mathcal{I}u_1 = \frac{3}{4\omega^2 a} \left\{ [-2(2 - e^2) \sin E + e \sin 2E] \Phi_1 + \eta [2e + 4 \cos E - e \cos 2E] \Phi_2 \right\},$$

$$u_2 = \frac{\eta}{4\omega^2 a} [\eta \cos 2E \Phi_1 + (-2e \sin E + \sin 2E) \Phi_2],$$

$$u_3 = \frac{1}{4\omega^2 a \eta} \left\{ [2(2 - e^2) \sin E - e \sin 2E] \cos \sigma + \eta [2e + 4 \cos E e \cos 2E] \sin \sigma \right\} \Phi_3,$$

$$u_4 = \frac{1}{4\omega^2 a \eta \sin i} \left\{ [2(2 - e^2) \sin E - e \sin 2E] \sin \sigma - \eta [2e + 4 \cos E e \cos 2E] \cos \sigma \right\} \Phi_3,$$

$$u_5 = \frac{1}{4\omega^2 a e} \left\{ \eta (-2e \sin E + \sin 2E) \Phi_1 + (2e^2 + 4e \cos E - \cos 2E) \Phi_2 \right\} - \cos i u_4,$$

$$\mathcal{I}g = \frac{1}{4\omega^2 a e} \left\{ [-2e(3 - e^2) \sin E - (1 - 3e^2) \sin 2E] \Phi_1 + \eta [2e^2 + 4e \cos E + (1 - 2e^2) \cos 2E] \Phi_2 \right\},$$

$$v = \frac{1}{4\omega^2 a e} \left\{ [-2e(9 - 4e^2) \sin E - (1 - 6e^2) \sin 2E] \Phi_1 + \eta [8e^2 + 16e \cos E + (1 - 5e^2) \cos 2E] \Phi_2 \right\}. \quad (21)$$

Сопутствующая система координат \mathcal{O}_1

Столь же элементарны интегралы и в этом случае. Приведем окончательный результат:

$$\begin{aligned} F_1 &= -\frac{3\eta}{a}T, & F_2 &= -\frac{3e\eta}{2\omega a}T, \\ F_5 &= \frac{\eta}{\omega a}S + \frac{3e \operatorname{ctg} i}{2\omega a\eta} \sin \sigma W, & G &= -\frac{3}{\omega a}S; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{3e}{2\omega a} [(e + 2 \cos E)S - 2\eta \sin ET], \\ \mathcal{I}u_1 &= \frac{3e}{4\omega^2 a} \left\{ [2(2 - e^2) \sin E - e \sin 2E]S + \eta[2e + 4 \cos E - e \cos 2E]T \right\}, \\ u_2 &= \frac{\eta}{4\omega^2 a} [-2\eta(e + 2 \cos E)S + [2(4 - 3e^2) \sin E - e \sin 2E]T], \\ u_5 &= -\frac{1}{4\omega^2 ae} \left\{ 4\eta^3 \sin ES + [2e(2 - e^2) + 4(2 - e^2) \cos E - e \cos 2E]T \right\} - \\ &\quad - \cos i u_4, \\ \mathcal{I}g &= \frac{1}{4\omega^2 ae} \left\{ 2(2 \sin E - e^3 \sin 2E)S + \right. \\ &\quad \left. + \eta[2e(2 - e^2) + 4(2 - e^2) \cos E - e \cos 2E]T \right\}, \\ v &= \frac{1}{4\omega^2 ae} \left\{ [2(2 + 6e^2 - 3e^4) \sin E - 5e^3 \sin 2E]S + \right. \\ &\quad \left. + \eta[4e(1 + e^2) + 8(1 + e^2) \cos E - e(1 + 3e^2) \cos 2E]T \right\}. \end{aligned} \quad (23)$$

Мы не выписали выражений для F_3, F_4, u_3, u_4 , поскольку они совпадают с прежними (20, 21) вследствие очевидного равенства $\Phi_3 = W$.

Сопутствующая система координат \mathcal{O}_2

Теперь функции \mathbf{f}, g содержат радикалы, так что в выражениях для \mathbf{F}, G появляются полные эллиптические интегралы. Их легко привести к форме Якоби:

$$\begin{aligned} F_1 &= -\frac{6}{\pi a} \mathbf{E} \mathfrak{I}, & F_2 &= -\frac{4e\eta^2}{\pi \omega a} \mathbf{D} \mathfrak{I}, \\ F_5 &= -\frac{2}{\pi \omega a} (2\eta^2 \mathbf{D} - \mathbf{E}) \mathfrak{N} + \frac{3e \operatorname{ctg} i}{2\omega a\eta} \sin \sigma W, \end{aligned}$$

$$G = \frac{2\eta}{\pi\omega a} [2(1 + e^2)\mathbf{D} + \mathbf{E}] \mathfrak{N}. \quad (24)$$

Здесь

$$\mathbf{K}(e) = \int_0^{\pi/2} \frac{dx}{h(x, e)}, \quad \mathbf{E}(e) = \int_0^{\pi/2} h(x, e) dx,$$

$$\mathbf{D}(e) = \frac{\mathbf{K}(e) - \mathbf{E}(e)}{e^2} = \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2 x dx}{h(x, e)},$$

где $h(x, e) = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 x}$. По-прежнему излишне выписывать F_3, F_4 .

Далее надо взять неопределенные интегралы от $\mathbf{f} - \mathbf{F}, g - G$, что приводит к неполным эллиптическим интегралам. Затем нужно выбрать первообразные, имеющие нулевое среднее, что опять-таки не выводит из класса элементарных функций с добавлением полных и неполных эллиптических интегралов Якоби первого и второго рода. Таким образом находится функция \mathbf{u} . Но, чтобы получить v , приходится брать интеграл от неполного эллиптического интеграла, что выводит нас из указанного класса функций. Однако в приложениях возмущающее ускорение P чрезвычайно мало по модулю, так что нет нужды в точном выражении v . Достаточно элементарной оценки интеграла от периодической функции с нулевым средним, что сводится к известному неравенству Норткотта [7].

О решении уравнений движения в средних элементах

Дифференциальные уравнения в средних элементах (14) имеют 6-й порядок. Но в правые части *не входит быстрая переменная* Y , поэтому последнее уравнение можно отбросить и получить систему 5-го порядка (4-го в системе \mathcal{O}). После ее решения Y находится простейшей квадратурой.

Решением мы займемся в ближайшем будущем. А пока заметим, что наиболее простые уравнения отвечают системе \mathcal{O}_1 . Уравнения для ω, e независимы от остальных. Перейдем к эксцентриситету и параметру e, p , несингулярным при переходе от эллипса к параболе

$$\dot{e} = -\frac{3e\sqrt{p}}{2\kappa}T, \quad \dot{p} = \frac{p^{3/2}(2 + e^2)}{\kappa(1 - e^2)}T. \quad (25)$$

1. Пусть начальное значение эксцентриситета e_0 равно нулю. Тогда

$$e \equiv 0, \quad \sqrt{p} = \frac{\sqrt{p_0}}{1 - (T\sqrt{p_0}/\varkappa)t}. \quad (26)$$

Если $T < 0$, то p убывает и $p \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Иными словами, точка A падает на \mathcal{S} по спирали.

Если $T > 0$, то p возрастает и уходит на бесконечность за конечное время t_1 :

$$t_1 = \frac{\varkappa}{T\sqrt{p_0}}.$$

Замечание. При нулевом эксцентриситете бесконечность p влечет бесконечность r . Предыдущий бессмысленный результат означает лишь неприменимость метода осреднения при больших t . Действительно, мы предполагали малость величин \mathbf{u}, v . Между тем правая часть (23) для u_2 , например, содержит множитель

$$\frac{1}{\omega^2 a} = \frac{a^2}{\varkappa^2}.$$

Но $a = p$ при $e = 0$, и этот множитель стремится к бесконечности. Поэтому формула (26) применима лишь при не слишком больших t . Следует ограничиться временем $t < t_1/2$. Критическое время асимптотически велико, именно, пропорционально μ^{-1} , как и должно быть по общей теории [5, 6].

2. Пусть $0 < e_0 < 1$. Из (25) следует линейное (и не зависящее ни от каких параметров) уравнение

$$\frac{dp}{de} = -\frac{2(2 + e^2)}{3e(1 - e^2)}p. \quad (27)$$

Его общее решение есть

$$p = \frac{e_0^{4/3}(1 - e^2)}{e^{4/3}(1 - e_0^2)}p_0. \quad (28)$$

Подставляя в первое соотношение (25), придем к уравнению с разделяющимися переменными

$$\dot{e} = Ae^{1/3}\sqrt{1 - e^2}, \quad A = -\frac{3Te_0^{2/3}\sqrt{p_0}}{2\varkappa\sqrt{1 - e_0^2}} = -\frac{3Te_0^{2/3}\sqrt{a_0}}{2\varkappa}.$$

Замена переменных

$$x = e^{2/3}, \quad e = x^{3/2}$$

приводит к простому уравнению

$$\frac{dx}{\sqrt{1-x^3}} = \frac{2A}{3} dt.$$

Интеграл от левой части сводится к неполному эллиптическому интегралу первого рода [8, п. 3.139]:

$$F(\beta, k) = F(\beta_0, k) - \frac{2A}{3^{3/4}} t, \quad (29)$$

где

$$k = \cos 15^\circ = \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} = 0.965926, \quad \beta = \arccos \frac{\sqrt{3}-1+x}{\sqrt{3}+1-x}.$$

Пусть $T < 0$, $A > 0$. Правая часть (29) убывает до нуля за конечное (по-прежнему асимптотически большое) время

$$t_2 = \frac{3^{3/4}}{2A} F(\beta_0, k).$$

При $t = t_2$, очевидно,

$$\beta = 0, \quad x = e = 1, \quad p = 0, \quad a = e_0^{4/3} a_0.$$

Иными словами, при $t = t_2$ траектория становится прямолинейно-эллиптической. Далее продолжать исследование не имеет смысла, так как в момент выпрямления направление осей системы \mathcal{O}_1 меняется скачком.

Итак, в течение времени $0 \leq t \leq t_2$ эксцентриситет возрастает от e_0 до 1, параметр убывает от p_0 до 0, большая полуось убывает от a_0 до $e_0^{4/3} a_0$.

Пусть $T > 0$, $A < 0$. Правая часть (29) возрастает. Левая часть (29) максимальна при

$$x = 0, \quad \beta = \beta_3 = \arccos \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{3}+1} = 74,4577^\circ.$$

Наибольшее возможное значение левой части (29) достигается при

$$t = t_3 = \frac{3^{3/4}}{2A} [F(\beta_0, k) - F(\beta_3, k)].$$

Итак, в течение времени $0 \leq t \leq t_3$ эксцентриситет убывает от e_0 до 0, параметр и большая полуось возрастают до бесконечности. Аналогично сказанному в п. 1 в замечании формула (29) применима лишь при $t < t_3/2$. Критическое время и здесь асимптотически велико.

Заключение

В заключение применим наши результаты для оценки возможности увода опасного астероида на безопасное расстояние.

Пусть астероид \mathcal{A} движется по круговой орбите. Двигатель малой тяги сообщает ему постоянное в системе \mathcal{O}_1 ускорение $\mathbf{P} = (0, T, 0)$. Заметим, что в данном случае в силу тождественно нулевого эксцентриситета это равносильно постоянному в системе \mathcal{O}_2 ускорению $\mathbf{P} = (\mathfrak{T}, 0, 0)$.

Согласно (26)

$$a = a_0(1 - Bt)^{-2}, \quad B = \frac{T\sqrt{a_0}}{\varkappa},$$

откуда

$$\omega = \omega_0(1 - Bt)^3. \quad (30)$$

Поскольку $G = 0$, из (30) следует

$$M = M_0 + \frac{\omega_0}{4B} [1 - (1 - Bt)^4]. \quad (31)$$

Оценим значения параметров, полагая

$$\begin{aligned} \varkappa &= 1.152 \cdot 10^{10} \text{ м}^{3/2}/\text{с}, & \text{диаметр астероида} &= 50 \text{ м}, \\ \text{плотность} &= 1 \text{ г/см}^3, & \text{масса} &= 6.5 \cdot 10^7 \text{ кг}, \\ \text{тяга} &= 1 \text{ Н}, & a_0 &= 1.1 \text{ а.е.} = 1.65 \cdot 10^{11} \text{ м}, \\ \omega_0 &= 1.72 \cdot 10^{-7} \text{ рад/с} = 5.43 \text{ рад/год}, \\ |T| &= 1.53 \cdot 10^{-8} \frac{\text{М}}{\text{с}^2}, & B &= 5.4 \cdot 10^{-13} \text{ с}^{-1} = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}, \end{aligned}$$

поэтому на временах в сотни и даже тысячи лет безразмерная величина Bt остается малой.

Разности возмущенной и невозмущенной большой полуоси и средней аномалии:

$$\frac{\Delta a}{a_0} = (1 - Bt)^{-2} - 1 \approx 2Bt,$$

$$\Delta M = - \left(\frac{3\omega_0 t}{2} \right) Bt \left(1 - \frac{2}{3}Bt + \frac{1}{6}B^2 t^2 \right) \approx - \left(\frac{3\omega_0 t}{2} \right) Bt.$$

Возмущения $\Delta a/a_0$ и ΔM совпадают при $t \approx 3$ месяца, а дальше вторая из них растет гораздо быстрее.

Разность возмущенного и невозмущенного положения в первом порядке малости:

$$\frac{|\Delta \mathbf{r}|}{a_0} \approx \sqrt{\frac{\Delta a^2}{a_0^2} + \Delta M^2} \approx \frac{3B\omega_0 t^2}{2} \sqrt{1 + \frac{16}{9\omega_0^2 t^2}}. \quad (32)$$

Итак, астероид удаляется на расстояние 10 Мм за 8 месяцев работы двигателя тягой в 1 Н. Зависимость уклонения от времени квадратична. При тяге в 0.1 и 10 Н время уклонения составит 31 и 3 месяца соответственно.

При малых e ситуация аналогична, особенно при разгонной тяге, когда эксцентриситет убывает. Случай больших e , особенно при тормозящей тяге, когда эксцентриситет возрастает, требует отдельного рассмотрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-02-00232-а).

Библиографические ссылки

1. *Lu E. T., Love S. G.* Gravitational tractor for towing asteroids // *Nature*. — 2005. — Vol. 438. — P. 177—178.
2. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. — М. : Наука, 1968.
3. *Холшевников К. В., Титов В. Б.* Задача двух тел : учеб. пособие. — СПб. : Изд-во СПбГУ, 2007.
4. *Херрик С.* Астродинамика. — М. : Мир, 1978. — Т. 3.

5. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. — М. : Физматгиз, 1963.
6. Холшевников К. В. Асимптотические методы небесной механики. — Л. : Изд-во ЛГУ, 1985.
7. Northcott D. G. Some Inequalities between Periodic Functions and Their Derivatives // J. London Math. Soc. — 1939. — Vol. 14, Pt. 3, № 55. — P. 198—202.
8. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М. : Физматгиз, 1963.

ГАЛО ГАЛАКТИК

В обзоре обсуждаются проблемы эволюции, происхождения и структуры различных компонент галактического гало. Также сформулировано современное состояние в понимании неопределенности свойств гало, существенных для галактической эволюции. Гало галактик является собой многокомпонентную систему, состоящую в основном из газа, звезд и темной материи. В рамках современной теории темная материя доминирует в больших масштабах, значительно превышающих оптические размеры центральных галактик. В то же время основным источником о темном гало являются наблюдения пространственного распределения и кинематики газа и звезд. Поскольку барионное гало сохраняет видимые следы аккреции и потери вещества, то анализ звездных и газовых структур, в свою очередь, позволяет изучать историю галактической эволюции на длительных промежутках времени.

This review discusses the problems of the evolution, origin and structures of the various components of the galactic halo. The current state of uncertainty in understanding of the halo properties essentially for galactic evolution process is formulated. Galactic halo is a multi-component system consisting mainly of gas, stars and dark matter. Within the framework of the modern theory the dark matter dominates at the large scales exceeding the optical size of the central galaxies. At the same time, observations of the spatial distribution and kinematics of gas and stars are the main sources of knowledges about the dark halo properties. Since the baryonic halo retains the visible traces of accretion and loss of the substance, then the analysis of the stellar and gaseous structures allows us to study the history of galactic evolution over the cosmic time.

Введение

Под галактическим гало понимается почти сферическая пространственная структура вокруг галактики, значительно превышающая размеры ее наиболее яркой (в оптическом диапазоне) компоненты. По современным представлениям, основная масса галактики сосредоточена в гало и состоит из темной материи. Параметры темной

компоненты гало являются довольно универсальными для широкой выборки галактик: профиль объемной плотности [1], соотношения Талли—Фишера (для дисковых галактик) или связь размера, светимости и дисперсии скоростей звезд для эллиптических галактик (фундаментальная плоскость) [2] и др. Однако внутренняя подструктура гало сейчас изучена не очень уверенно. Звездная составляющая гало является удобным инструментом в изучении истории образования галактических дисков. Благодаря анализу структуры и состава звездных потоков в гало галактик становится возможным определять параметры галактики в течение ее формирования и эволюции — галактическая археология. Благодаря наличию газовой подсистемы гало происходит активный обмен веществом диска с окружением, как приток, так и отток, второй процесс, по всей видимости, является определяющим для поддержания звездообразования в современную эпоху.

Темная материя вокруг галактик

Наличие темной материи предсказывается в рамках стандартной космологической Λ CDM теории, при этом она является основным материалом крупномасштабной структуры Вселенной. По данным космической обсерватории Планк, на темную материю приходится 26.8 %, количество барионов за последнее время «возросло» до 4.9 % (предыдущая оценка — 4.5 %). Оценка же массы темного вещества в отдельных галактиках зачастую не дает однозначного результата. Тем не менее, основываясь прежде всего на устойчивости галактических дисков, известно, что полная масса темной материи внутри оптического размера галактик лежит в интервале 0.5—4 масс диска. Темное вещество внутри гало движется в собственном гравитационном потенциале и для невзаимодействующих галактик вириализовано. Для большинства галактик можно считать размером гало вириальный радиус (для Галактики $r_{vir}^{MW} = 280$ кпк). При рассмотрении отдельных галактик часто оперируют параметрами гало внутри оптического размера галактики ($r_{opt}^{MW} = 15$ кпк).

Одним из наиболее ярких подтверждений современной космологической концепции является наличие стандартного профиля распределения плотности. Космологические симуляции темной материи демонстрируют универсальный профиль плотности гало, так называемый профиль NFW (по фамилиям авторов Navarro, Frenk, White) [1]. Универсальность этого решения является следствием осо-

бенностей спектра возмущений в ранней Вселенной. Характерным свойством распределения плотности гало является интегрируемая особенность в центре, общепринятым термином является касп плотности. В недавнее время детальное исследование кривых вращений галактик низкой поверхностной плотности обнаружило противоречие с этим универсальным законом. Оказалось, что в большинстве галактик профиль плотности темной материи в центре является плоским [3]. Большие усилия теоретиков были направлены на объяснения этого противоречия, решения которого, по всей видимости, сейчас очевидны. Идея состоит в том, что при учете в моделях барионной физики (звездообразование, взрывы сверхновых, звездный ветер) приводит к сглаживанию профиля NFW [4, 5]. Таким образом, универсальный закон распределения плотности был модифицирован на случай диссипативной барионной подсистемы.

Многочисленные космологические расчеты указывают на существование несферического распределение темной материи в гало [6]. Обычно объемная плотность темной материи $\varrho_h(x, y, z)$ в гало представляется в виде

$$\varrho_h(x, y, z) = \varrho_h(\xi), \quad \xi \equiv \sqrt{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}}, \quad (1)$$

где случай $a = b = c$ соответствует сферическому гало, а модель $a = b \neq c$ соответствует осесимметричному гало в плоскости диска. В космологических моделях обычно получаются соотношения $a \geq b \geq c$, при этом чаще всего нет привязки к пространственной ориентации галактического диска. В общем случае отношения $q = b/a$, $s = c/a$ описывают отклонения от сферической симметрии распределения плотности в гало. Даже чисто бесстолкновительные космологические расчеты позволяют оценить форму гало. Наиболее тонкий эффект в распределении темной материи — это возможность изменения характера сплюснутости/вытянутости гало темной материи с расстоянием от галактического центра R [7], то есть $a \equiv a(R)$. Совсем недавно сделаны предположения о том, что гало нашей галактики также имеет неоднородный характер формы [8], более того, может быть наклонено по отношению к плоскости диска [9].

Очевидно, что диссипативная, прежде всего газовая, подсистема должна оказывать существенное влияние на пространственное распределение темной материи. Поскольку, например, в нашей Галактике объемная плотность газа и звезд больше плотности темной материи: если плотность видимой материи в солнечной окрестности

$0.1 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$, а темной около $0.01 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$, то уже в галактическом центре эти величины соответственно равны 18 и $0.04 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$. В такой ситуации следует ожидать, что именно барионное вещество определяет свойства и изменения структур из темного вещества. Естественным откликом гало на эволюцию барионов при таких соотношениях являются «сплющивание» поперек галактического диска и симметризация в плоскости [10, 11]. К сожалению, форма гало в принципе определяется по анализу кинематики или распределению барионов, например, кинематика приливных потоков и спутников, сверхбыстрых звезд; анализ рентгеновских изотопов, спектры планетарных туманностей, анализ кинематики полярных колец и многое другое. Несмотря на значительное количество прямых и косвенных доказательств трехосного распределения плотности в гало, упомянутых выше, его форма и эллиптичность для конкретных галактик остаются плохо известны, более того, иногда оценки формы гало носят противоречивый характер.

Еще одним трудным вопросом современной космологической теории является вопрос о количестве карликовых галактик-спутников вокруг галактик и наличии темной массы в них [12]. Окончательно вопрос еще не закрыт, однако, вероятно, его решение лежит в той же плоскости, что и проблема каспа: необходим детальный учет подсеточной физики газа и звезд [13], происходящий на пространственных и временных масштабах, недоступных для прямого моделирования.

Звездное гало

Наличие звездной компоненты галактического гало является одним из доказательств формирования галактик в процессе слияний более мелких образований. Современная космологическая концепция предусматривает наличие большого количества карликовых галактик в раннюю эпоху. Основная часть этих галактик стала строительным материалом для крупных галактик в глубоких потенциальных ямах темной материи. Другую часть галактик, доживших до современной эпохи, мы можем наблюдать в виде разрушающихся приливным взаимодействием потоков в гало галактик. Современные глубокие изображения до 29-й звездной величины (см., например, проекты NGVS¹, MATLAS^{!!}) позволяют по-новому посмотреть на галактические звездные гало. Обнаруженные новые структуры

¹https://www.astrosoci.ca/NGVS/The_Next_Generation_Virgo_Cluster_Survey

^{!!}<http://irfu.cea.fr/Projets/matlas/MATLAS/MATLAS.html>

изменяют наше представление о некоторых массивных галактиках: голубые спиральные структуры вокруг галактик ранних типов, перемычки, потоки и оболочки говорят нам о прошедших мерджингах после $z = 1$.

Для нашей Галактики звездные потоки можно ассоциировать с протяженными структурами повышенной яркости на небе. При этом источник этих потоков может быть также непосредственно наблюдаем, например приливные остатки Sagittarius dwarf spheroidal galaxy [14]. Звездные потоки благодаря малой диссипативности, в отличие от газовых, способны продолжительное время в целом сохранять свою орбиту. Тем не менее при каждом прохождении карликового спутника, галактики или шарового скопления сквозь галактический диск (или другие неоднородности гравитационного потенциала) происходит размывание потока. Среди его звезд нарастает дисперсия скоростей, что приводит к его расширению. Этот процесс сопровождается обдираньем звезд с краев потока, которые заполняют гало и перестают быть связанными с родительским потоком.

Многочисленные акты аккреции карликовых галактик с различной исходной массой и угловым моментом приводят к смешиванию и замыванию свойств отдельных потоков и образованию «гладкого» гало [15]. Однако анализ металличности, возрастов звезд совместно с их кинематическими особенностями позволяет восстановить историю слияний и разрушений галактик в гало в рамках all-sky обзоров [16]. Для нашей системы такого рода галактическая археология обеспечивает наблюдательные доказательства существования и разрушения карликовых объектов в гало, а также эпизодов аккреции вещества. Эти данные также хорошо согласуются с нашими представлениями о процессе формирования галактик, звездообразования в них и взаимодействии барионов с темным веществом [17].

Газовое гало

Галактическое газовое гало можно считать приводным ремнем галактической эволюции, поскольку звездообразование и связанные с ним процессы на короткой временной шкале наиболее жестко связаны с количеством газа в галактике и его свойствами (химический состав, металличность, температура). При этом галактическое гало является средой для переноса пыли и тяжелых элементов в межгалактическую среду. Состав этой компоненты гало, как и диска галактики, крайне неоднороден. Можно выделить три выделяющиеся фазы:

нейтральный газ ($T < 10^4$ К), ионизованный газ ($10^4 < T < 10^6$ К) и горячий газ ($T > 10^6$ К). Естественно, эти компоненты перемешаны между собой и могут переходить из одного состояния в другое под действием динамических и тепловых процессов. Важной составляющей диффузной среды гало являются пыль, различные молекулы и металлы, определяющие оптические и термодинамические свойства среды.

Нейтральная часть гало представлена в виде высокоскоростных облаков (ВСО), движущихся по направлению к диску со скоростями в несколько сотен километров в секунду. Своим происхождением они обязаны процессу «обдирания» газа с карликовых спутников при их движении сквозь гало центральной галактики. В нашей Галактике основными источниками ВСО являются приливной лидирующий рукав и Магеллановый поток, которые образованы при взаимодействии Большого и Малого Магеллановых Облаков с Галактикой и друг с другом. Характерно то, что эти ВСО никак не отождествляются с особенностями распределения звезд в гало, то есть являются самостоятельным чисто газовым образованием. За счет взаимодействия с излучением Галактики эти облака частично ионизованы, однако лучше всего они отождествляются при наблюдениях в линии 21 см. Расстояния до них могут быть также определены с помощью поглощения в оптических линиях Ca(II), K или Na(II). Большинство из них находится на высотах до 15 кпк от диска. Частичная ионизация позволяет отождествить ВСО также в H α излучении на высотах до 40 кпк. Глубокие изображения Туманности Андромеды доказывают существование таких облаков на расстояниях до 50 кпк. Под действием гравитационного поля галактики эти облака выпадают на диск, подпитывая его газовую фазу. Оценки текущего темпа аккреции ВСО для ряда галактик находятся на уровне 0.1–0.3 M_{\odot} год $^{-1}$ [18].

Теплый ионизованный газ гало занимает большую часть объема гало и наблюдается в основном в линии H α или линиях поглощения Si(II), O(VI) и др. Модели поглощения в гало в линии Si(II) указывают на то, что этот газ производится ударными волнами при взаимодействии облаков с горячей средой галактики, в то же время он может поставляться напрямую из межгалактической среды или галактик-спутников. Корреляция между источниками H α и HI не является строгой и, по всей видимости, зависит от физических условий в конкретной области.

Основную массу газового гало галактик составляет горячий газ, который наблюдается в рентгеновском диапазоне и практически полностью заполняет объем гало вплоть до вириальных размеров гало. При этом основная его часть имеет космологическое происхождение. Для нашей Галактики масса такого газа порядка $10^{10} M_{\odot}$ внутри ближайших 100 кпк. В то же время наличие горячего газа на небольших расстояниях (3—4 кпк) от диска является следствием активных процессов звездной эволюции в галактике — взрывов сверхновых и звездного ветра. В галактиках с мощным звездообразованием, например М 82, такие истечения могут достигать размеров самого галактического диска и наблюдаются в широком спектральном диапазоне (см., например, [19]).

Вместе с газом из галактических дисков в галактическое гало должна выдуваться и межзвездная пыль. В гало галактик пыль детектируется в оптике благодаря экстинкции излучения от звездного населения галактики. В последнее время появились эмиссионные данные в ИК-диапазоне от протяженных пылевых гало галактик [20]. Судьба пылинок в горячей среде при этом не очень ясна. С одной стороны, процессы разрушения пыли происходят на короткой временной шкале [21]. С другой стороны, данные наблюдений указывают на наличие пыли в вертикальном направлении на расстояниях в 10—20 раз больших толщины звездного диска [22], а в радиальном — в 5—7 раз больше оптических размеров галактик [23], где источники пыли не могут быть эффективны. Естественным следствием наличия у галактик протяженных пылевых гало и дисков может быть перенос пыли в межгалактическую среду. Однако лишь в последние годы появились данные, указывающие на возможное присутствие пыли в межгалактической среде на красных смещениях $z = 1-2$ [24]. Структура распределения пыли и ионизованного газа в галактическом гало существенно взаимосвязана с магнитным полем. Современные данные о распределении пыли в гало получены на основе карт поляризации излучения [25]. Содержание мелких пылинок в гало в среднем по отношению к крупным в четыре раза больше, что соответствует параметрам галактических фонтанов, в условиях которых пыль эффективно разрушается и фрагментируется.

Заключение

Многочисленные нелинейные процессы протекают в галактиках и их окрестности под влиянием большого числа факторов в резуль-

тате сложных процессов. Большой проблемой для анализа является присутствие в задаче характерных временных и пространственных шкал, различающихся на порядки и даже на десятки порядков значений величины. Это приводит к необходимости параметризации многих процессов или, другими словами, введения подсчетной физики. В основном это касается физики межзвездной среды, звездообразования и feedback. Трудность и неоднозначность выбора этих параметров была продемонстрирована в рамках The Aquila comparison project [26]. Было проведено 13 численных экспериментов формирования галактик с идентичными начальными условиями с помощью 9 различных кодов. Несмотря на общую схожесть модельных галактик и процесса сборки галактик, в этих расчетах было найдено систематическое различие звездной массы, размеров, морфологии и количества газа в современную эпоху $z = 0$. Результатом численного, например N -body, расчета формирования галактики является набор масс, координат и скоростей пробных частиц. Для того чтобы построить кривую вращения этой галактики, нужно усреднить скорости частиц, которые образуют галактику. Возникает проблема принадлежности того или иного ансамбля частиц галактике, гало или пролетающему в малой окрестности карликовому спутнику. Критерии могут быть самыми разнообразными. Тем самым один и тот же численный эксперимент может иметь неоднозначную трактовку результатов в зависимости от способа обработки. В этом контексте хочется отметить серию работ, направленную на апробацию различных методов поиска структур (галактик, гало и субгало темной материи) в численных экспериментах (см., например, [27] и другие, связанные с данной темой работы). Современные методы довольно хорошо согласуются при отождествлении темного гало и звездных подсистем. Однако газовая фаза не всегда допускает однозначную идентификацию, поэтому прямое сравнение результатов численных расчетов с наблюдениями может быть затруднительно.

С точки зрения наблюдений в ближайшее время стоит ожидать данных космической миссии Gaia с большим количеством спектроскопических исследований. Результаты работы дадут возможность построить однозначную картину событий, которые имели место в Галактике начиная с $z \sim 2$ по наши дни. Для внегалактической астрономии наиболее интригующими должны стать наблюдения интерферометра ALMA, главной задачей которого являются исследования образования первых галактик. На космический телескоп СПЕКТР-УФ поставлена задача поиска скрытого барионного вещества в так

называемой «тепло-горячей» фазе, которая, как ожидается, находится в межгалактической среде и галактическом гало [28]. Результаты этой миссии, возможно, изменят соотношение между массой барионов и темной материей в галактиках и Вселенной.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-02-31452, 13-02-90767 и некоммерческого фонда «Династия».

Библиографические ссылки

1. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M.* A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 490. — P. 493. [astro-ph/9611107](#).
2. *Cappellari M., Bacon R., Bureau M. et al.* The SAURON project - IV. The mass-to-light ratio, the virial mass estimator and the Fundamental Plane of elliptical and lenticular galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 366. — P. 1126–1150. [astro-ph/0505042](#).
3. *de Blok W. J. G., Walter F., Brinks E. et al.* High-Resolution Rotation Curves and Galaxy Mass Models from THINGS // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136. — P. 2648–2719. [0810.2100](#).
4. *Governato F., Zolotov A., Pontzen A. et al.* Cuspy no more: how outflows affect the central dark matter and baryon distribution in Λ cold dark matter galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 422. — P. 1231–1240. [1202.0554](#).
5. *Macciò A. V., Stinson G., Brook C. B. et al.* Halo Expansion in Cosmological Hydro Simulations: Toward a Baryonic Solution of the Cusp/Core Problem in Massive Spirals // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 744. — P. L9. [1111.5620](#).
6. *Allgood B., Flores R. A., Primack J. R. et al.* The shape of dark matter haloes: dependence on mass, redshift, radius and formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 367. — P. 1781–1796. [astro-ph/0508497](#).
7. *Hayashi E., Navarro J. F., Springel V.* The shape of the gravitational potential in cold dark matter haloes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 377. — P. 50–62. [arXiv:astro-ph/0612327](#).
8. *Vera-Ciro C., Helmi A.* Constraints on the Shape of the Milky Way Dark Matter Halo from the Sagittarius Stream // *Astrophys. J. Lett.* — 2013. — Vol. 773. — P. L4. [1304.4646](#).

9. *Debattista V. P., Roškar R., Valluri M. et al.* What's up in the Milky Way? The orientation of the disc relative to the triaxial halo // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 434. — P. 2971–2981. 1301.2670.
10. *Abadi M. G., Navarro J. F., Fardal M. et al.* Galaxy-induced transformation of dark matter haloes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 407. — P. 435–446. 0902.2477.
11. *Khoperskov S. A., Shustov B. M., Khoperskov A. V.* Interaction of the dark-matter cusp with the baryonic component in disk galaxies // *Astronomy Reports.* — 2012. — Vol. 56. — P. 664–671. 1204.4917.
12. *Klypin A., Kravtsov A. V., Valenzuela O., Prada F.* Where Are the Missing Galactic Satellites? // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 522. — P. 82–92. [astro-ph/9901240](#).
13. *Peñarrubia J., Pontzen A., Walker M. G., Koposov S. E.* The Coupling between the Core/Cusp and Missing Satellite Problems // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 759. — P. L42. 1207.2772.
14. *Majewski S. R., Skrutskie M. F., Weinberg M. D., Ostheimer J. C.* A Two Micron All Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. I. Morphology of the Sagittarius Core and Tidal Arms // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 599. — P. 1082–1115. [astro-ph/0304198](#).
15. *Bell E. F., Zucker D. B., Belokurov V. et al.* The Accretion Origin of the Milky Way's Stellar Halo // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 680. — P. 295–311. 0706.0004.
16. *Belokurov V.* Galactic Archaeology: The dwarfs that survived and perished // *New Astronomy Review.* — 2013. — Vol. 57. — P. 100–121. 1307.0041.
17. *Helmi A., White S. D. M., de Zeeuw P. T., Zhao H.* Debris streams in the solar neighbourhood as relicts from the formation of the Milky Way // *Nature.* — 1999. — Vol. 402. — P. 53–55. [astro-ph/9911041](#).
18. *Rupke D. S., Veilleux S., Sanders D. B.* Outflows in Infrared-Luminous Starbursts at $z < 0.5$. II. Analysis and Discussion // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2005. — Vol. 160. — P. 115–148. [astro-ph/0506611](#).
19. *Engelbracht C. W., Kundurthy P., Gordon K. D. et al.* Extended Mid-Infrared Aromatic Feature Emission in M82 // *Astro-*

- phys. J. Lett. — 2006. — Vol. 642. — P. L127–L132. [astro-ph/0603551](#).
20. *Kamphuis P., Holwerda B. W., Allen R. J. et al.* A dust component ~2 kpc above the plane in NGC 891 // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 471. — P. L1–L4. 0706.2275.
 21. *Popescu C. C., Tuffs R. J., Fischera J., Völk H.* On the FIR emission from intracluster dust // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 354. — P. 480–496. [astro-ph/0001053](#).
 22. *Howk J. C., Savage B. D.* Extraplanar Dust in the Edge-On Spiral NGC 891 // *Astron. J.* — 1997. — Vol. 114. — P. 2463. [astro-ph/9709197](#).
 23. *Holwerda B. W., Keel W. C., Williams B. et al.* An Extended Dust Disk in a Spiral Galaxy: An Occulting Galaxy Pair in the ACS Nearby Galaxy Survey Treasury // *Astron. J.* — 2009. — Vol. 137. — P. 3000–3008.
 24. *Ménard B., Scranton R., Fukugita M., Richards G.* Measuring the galaxy-mass and galaxy-dust correlations through magnification and reddening // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 405. — P. 1025–1039. 0902.4240.
 25. *Planck Collaboration, Abergel A., Ade P. A. R. et al.* Planck early results. XXIV. Dust in the diffuse interstellar medium and the Galactic halo // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 536. — P. A24. 1101.2036.
 26. *Scannapieco C., Wadepuhl M., Parry O. H. et al.* The Aquila comparison project: the effects of feedback and numerical methods on simulations of galaxy formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 423. — P. 1726–1749. 1112.0315.
 27. *Knebe A., Knollmann S. R., Muldrew S. I. et al.* Haloes gone MAD: The Halo-Finder Comparison Project // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 415. — P. 2293–2318. 1104.0949.
 28. *Shustov B., Sachkov M., Gómez de Castro A. I. et al.* World space observatory-ultraviolet among UV missions of the coming years // *Astrophys. Space. Sci.* — 2011. — Vol. 335. — P. 273–282.

О БУДУЩЕМ АСТРОНОМИИ В РОССИИ

Лекция посвящена состоянию и перспективам развития астрономии в России. На данный момент это состояние характеризуется значительным отставанием от мирового уровня, прежде всего в части технологий наземных астрономических наблюдений. Обсуждаются перспективные направления астрономических исследований и соответствующие пути развития отечественной инструментальной базы. Основной вывод ясен. Для вывода российской астрономии на мировой уровень жизненно важно в ближайшее десятилетие успешно выполнить ключевые крупномасштабные проекты: вступление России в Европейскую Южную Обсерваторию и реализация научной космической программы.

The lecture deals with the state of art and prospects of development of astronomy in Russia. The current state is characterized by a considerable lag behind the world level, especially in the technology of the ground-based astronomical observations. The promising areas of astronomical research and appropriate ways of development of domestic instrumental base are discussed. The main conclusion is distinct. The successful implementation of the key large-scale projects: joining the European Southern Observatory and completion of national space astronomy program are vitally required for the Russian astronomy to achieve the world level in the next ten years.

Современное состояние наземной астрономии в мире и в России

Общепризнанно, что уровень развития страны в значительной степени определяется ее научным потенциалом, который, в свою очередь, определяется уровнем развития фундаментальной науки. Состояние астрономии как одной из важнейших фундаментальных наук — хороший индикатор общего развития страны.

© Шустов Б. М., 2014

В мире работает около 11 000 профессиональных астрономов с достаточно высоким международным рейтингом (членов Международного астрономического союза — МАС), примерно четверть из которых работает в США. Для развитых стран характерная пропорция — от 7 до 15 членов МАС на 1 млн жителей. Крайне мало профессиональных астрономов в большинстве стран Африки, Южной Америки, беднейших странах Азии.

По числу высокопрофессиональных астрономов современная Россия позиционируется несколько ниже европейского уровня: 3 члена МАС на 1 млн жителей. Общее число исследователей, занимающихся астрономией профессионально в институтах и вузах, равно примерно 1 400. Еще около 3 000 ученых-физиков, математиков, а в последние годы и представителей биологии, геологии и других наук занимаются исследованиями, близко примыкающими к астрономии (астрофизике). Таким образом, по числу исследователей астрономического профиля наша страна не так уж сильно уступает европейским государствам и США. Однако, как бы это ни было неприятно признавать, авторитет современной российской астрономии в мире не высок. Это вполне объяснимо. Кроме кадрового потенциала в настоящее время уровень развития любой науки определяется еще и уровнем технологий, а значит, объемом вкладываемых в новейшую технику средств. Главной тенденцией развития наблюдательной астрономии в мире в последние годы и на следующие десятилетия является получение важнейших достижений с помощью крупных инструментов. Созданы и успешно работают оптические телескопы с зеркалами диаметром 8—10 м, большие обзорные телескопы, крупные интерферометры миллиметрового диапазона и т. д. Перспективные прорывные достижения в наземной астрономии планируются с использованием новых мегаустановок. Среди них — проект 39-м европейского телескопа EELT (European Extremely Large Telescope), радиоинтерферометра ALMA (Atacama Large Millimeter Array), американского сверхширокоугольного 8-м телескопа LSST (Large Synoptic Survey Telescope) и др. Стоимость этих инструментов очень высока, более 1 млрд долларов каждый, и даже страны с развитой экономикой не в состоянии реализовать их в одиночку. Поэтому магистральным путем развития мировой астрономии является международная кооперация. Страны, не участвующие в такой кооперации, обречены оставаться «во втором эшелоне», несмотря на наличие развитой структуры астрономических исследований на национальном уровне.

Важно отметить, что даже при самой глубокой международной кооперации должен поддерживаться достаточный уровень астрономических исследований (и соответствующего образования) в рамках национальных программ, иначе невозможно обеспечить подготовку специалистов для полноценного использования возможностей международной кооперации в крупных проектах и программах. Высоко развитая инфраструктура для астрофизических исследований поддерживается по этой причине в странах, членах крупнейшего международного астрономического консорциума — Европейской южной обсерватории (ЕЮО).

В России в последние несколько десятков лет развитию наблюдательных средств астрономии внимание практически не уделялось. Последнее крупное вложение было сделано в 70-е гг. прошлого века: были построены самый большой на то время оптический 6-м телескоп БТА и кольцевой радиотелескоп РАТАН-600 диаметром 600 м. Сегодня наш крупнейший в ту эпоху оптический телескоп по размерам (и соответственно возможностям) уже замыкает вторую десятку работающих в мире инструментов. Начиная с 80-х гг. в России не реализован ни один крупный проект для задач наземных астрономических исследований. Строящийся под Кисловодском 2.5-м оптический телескоп МГУ должен стать важным средством для подготовки научных кадров, однако с точки зрения важнейших астрофизических наблюдательных программ его возможности будут весьма скромными. Это же относится и ко второму по величине на территории России 2-м оптическому телескопу российско-украинской обсерватории на пике Терскол в Кабардино-Балкарии.

Аналогичная картина и с наземными российскими радиотелескопами, предназначенными для астрономических исследований. И РАТАН-600 (в САО РАН), и РТ-22 (на станции ФИАН в Пущино), и другие инструменты в состоянии выполнять отдельные задачи, но не являются, и не могут быть конкурентоспособными в прорывных исследованиях в современную эпоху. Созданный в последние два десятилетия радиоинтерферометрический комплекс КВАЗАР используется главным образом для координатно-временного обеспечения страны. Показателем уровня развития радиоастрономических наблюдательных средств является тот факт, что в стране нет ни одного современного радиотелескопа миллиметрового диапазона, тем более интерферометра миллиметрового диапазона, а эти инструменты относятся к основным средствам наблюдательной астрономии в мире.

Финансирование российской наземной астрономии в последние годы не позволяет не только поддерживать современный технологический уровень отечественных средств, но и участвовать в серьезной международной кооперации. Бюджетное финансирование наземных астрономических исследований в России оценивается примерно в 2 млрд руб. в год. Из них примерно 1.2 млрд руб — это финансирование, выделяемое на специализированные астрономические научные учреждения РАН. Астрофизические исследования выполняются и отдельными лабораториями, и отделами академических институтов физического профиля. Кроме того, до 500 млн руб. в год составляет регулярное бюджетное финансирование вузовской астрономии.

Для сравнения приведем показатели годового финансирования лишь некоторых астрономических исследовательских центров в США: выделенный федеральными властями (только на текущее содержание) бюджет Национальной оптической астрономической обсерватории (НОАО) в 2012 г. составил 26.1 млн долларов, Национальной радиоастрономической обсерватории — 71.7 млн. долларов.

На одного исследователя-астронома в год в России тратится около 1 млн руб, что в десятки раз меньше, чем в США. Эта диспропорция обусловлена не столько разницей в зарплатах (несколько раз), сколько разницей в затратах на технологии и обеспечение исследований. В США это главная статья расходов, тогда как в России она составляют очень малую долю.

Отсутствие современной наблюдательной базы (и скромные зарплаты тоже!) не только снижает научный потенциал, но и приводит к существенному оттоку самых энергичных, молодых, талантливых исследователей за рубеж. В связи с этим в 90-е гг. прошлого и в первой декаде века нынешнего произошло значительное качественное истощение кадрового потенциала институтов. В последние годы ситуация несколько стабилизировалась, однако кадровый провал для наиболее продуктивного для научной работы возраста 35–50 лет по-прежнему остается.

Отметим сравнительно неплохой показатель российских астрономов по продуктивности научной работы, определяемый здесь как количество публикаций в рецензируемых изданиях на одного члена МАС в год: в России — 2.3, в США — 2.3, в Германии — 3.9, в Китае — 2.0, в Японии — 1.6 (по данным Web of Science по разделу Space Science). По этому показателю Россия не уступает другим странам.

Важный качественный показатель научных исследований — цитируемость научных работ российских астрономов — заметно хуже мирового. Согласно тому же источнику ссылаемость на работы российских астрономов — в среднем 8 ссылок на одну публикацию за 10 лет. Для сравнения: для работ авторов из США, Германии, Англии — 21, Японии — 17, Китая — 8. Низкая цитируемость связана и с традиционной обособленностью отечественной астрономии от мировой интеграции и с качеством публикаций, обусловленных сравнительно невысокими характеристиками ряда отечественных астрономических инструментов по сравнению, например, с инструментами ЕЮО.

В целом приходится констатировать, что за последние десятилетия наша страна серьезно отстала от мирового уровня в области астрономических исследований.

Приоритетные направления фундаментальных исследований в области астрономии на ближайшие два десятилетия

Понятно, что для достижения достойного уровня научных исследований необходимо ориентироваться на решение приоритетных, то есть важнейших, перспективных задач. По прогнозам на ближайшее десятилетие и далее, составленным в ходе многочисленных обсуждений российской астрономической и физической научной общественностью (в частности, Научным советом РАН по астрономии), список наиболее перспективных направлений исследований в области астрономии выглядит так:

1. Изучение происхождения и эволюции Вселенной — от стадии Большого взрыва и инфляции до современной эпохи;
2. Выяснение природы темной материи и темной энергии;
3. Изучение процессов формирования и эволюции галактик и звезд;
4. Исследования компактных и релятивистских объектов;
5. Изучение Солнца и солнечно-земных связей;
6. Исследование Солнечной системы;
7. Исследование планетных систем у других звезд, поиск проявлений жизни во Вселенной.

Кратко охарактеризуем научную значимость каждого направления, необходимые средства наблюдений (особое внимание средствам наземного базирования), а также потенциал российских ученых по обеспечению достойного вклада в исследования по направлению.

1. Изучение происхождения и эволюции Вселенной. Это основная задача космологии. В настоящее время космология является одним из передовых направлений астрономии и физики, в частности, физики элементарных частиц, физики процессов, протекающих при экстремально высоких энергиях и плотностях. В последние десятилетия благодаря существенному прогрессу наблюдательной астрономии космология стала «наблюдательной» наукой. Российские ученые внесли очень важный вклад в развитие теоретических исследований в космологии, но в наступившую эпоху наблюдательной космологии для поддержания высокого авторитета российской науки необходимо участие на новом уровне. Ожидается, что осуществление отечественных космических проектов (в первую очередь проекта «Спектр-РГ») отчасти обеспечит высокий уровень такого участия, но, что касается имеющихся в России наземных средств наблюдений как в оптическом, так и в радиодиапазонах, следует признать, что они не могут вполне соответствовать мировому уровню.

2. Объяснение природы темной материи и темной энергии. Феномен так называемого темного вещества — величайший вызов науке. По современным представлениям, темное вещество, не наблюдаемое никакими средствами, но проявляющее себя посредством гравитационных влияний, — гораздо более распространено во Вселенной, чем обычное (барионное). Проводятся многочисленные физические эксперименты, масштабные астрономические проекты, предложено множество гипотез о природе темного вещества, но вопрос остается открытым. Несомненно, усилия астрономов и физиков, направленные на решение этой проблемы, будут только нарастать, хотя решение может быть найдено еще нескоро. Для проведения таких наблюдений в оптическом диапазоне (например, наблюдения микролинзирования) нужны мощные инструменты, такие как 8-м широкоугольный телескоп LSST (строится в США). Что касается темной энергии, то хотя за открытие этого феномена уже присуждена Нобелевская премия, основная работа по его детальному изучению — дело ближайшего десятилетия. Ясно, что российская наука не может быть в стороне от этих магистральных направлений. Исследования

в этих направлениях возможны только с использованием новейших мегаинструментов, так как предельно далекие галактики, вспышки сверхновых на космологических расстояниях доступны только инструментам 10-м класса и выше.

3. Изучение процессов формирования и эволюции галактик и звезд. Это главное направление исследований в наиболее крупном разделе астрономии — астрофизике, так что уровень исследований здесь определяет состояние астрофизики. Для этого направления характерны многоплановость исследований, что определяет и довольно обширный список приоритетных задач (например, выяснение механизмов формирования первых звезд, галактик и их скоплений, исследование ядер галактик и высокоэнергичных выбросов из них; процессов рождения и эволюции звезд, а также всевозможных проявлений их нестационарности), и широкий спектр применяемых методов. В России имеются признанные в мире специалисты как теоретического, так и практического (наблюдательного) профиля, но инструменты для проведения этих астрофизических наблюдений на высоком уровне практически ограничиваются возможностями 6-м телескопа БТА и, до некоторой степени, существующих радиотелескопов.

4. Исследования компактных и релятивистских объектов. К таким объектам относятся, в частности, как уже давно изучаемые нейтронные звезды и черные дыры, так и, например, гипотетические кварковые звезды. Изучение этих астрономических объектов чрезвычайно важно в связи с тем, что в них реализуются абсолютно недостижимые в земных экспериментах условия: экстремальные гравитационные поля, плотности, температуры, магнитные поля, влияние сверхсильных релятивистских эффектов, необычные уравнения состояния вещества, возможно проявление квантово-гравитационных эффектов. Астрономические методы позволяют использовать эти «небесные лаборатории» для изучения поведения материи в экстремальных условиях. На Земле такие лаборатории создать либо принципиально невозможно, либо это требует нереально высоких затрат. В России создана прекрасная (одна из ведущих в мире) научная школа по изучению таких объектов. Это лидерство нужно удерживать, что возможно лишь при использовании самых современных инструментов как наземного, так и космического базирования.

5. Изучение Солнца и солнечно-земных связей. Исследования Солнца позволяют углубить понимание физических свойств и строения звезд — этих основных объектов Вселенной. Они также чрез-

вычайно важны для понимания процессов, оказывающих непосредственное и глубокое влияние на нашу жизнь на Земле. Хотя в последнее время большой объем новой информации об активных явлениях в атмосфере Солнца, особенно в корональной области, был получен с помощью космических аппаратов, по-прежнему крайне необходимыми остаются регулярные и длительные наблюдения на наземных солнечных телескопах. В России для таких наблюдений имеются большой опыт, некоторая экспериментальная база и существенные перспективы развития. В последнее время объявлено об очень серьезной государственной поддержке данного направления астрономических исследований, особенно в регионе Сибири. Приятное, но все-таки исключение.

6. Исследование Солнечной системы. Комплексное направление имеющее не только фундаментальное, но и огромное прикладное значение. Здесь нашли применение как астрономические науки (небесная механика, планетология и т. д.), так и физические (физика плазмы, физика космических лучей и т. д.). Россия (ранее СССР) всегда занимала здесь ведущие позиции. Утратить их недопустимо. Отметим, что роль астрономических методов в последние годы особенно возросла в связи с необходимостью решения проблемы астероидно-кометной опасности. Создание системы обнаружения и мониторинга опасных небесных тел (ОНТ), а также определения риска столкновений — важнейшая практическая задача, поставленная человечеством перед фундаментальной наукой астрономией. Эффективные астрономические средства обнаружения ОНТ — это сложные и дорогие инструменты. Но хотя бы несколько из них должно быть построено в России, если мы не хотим быть полностью зависимыми от зарубежных источников информации.

7. Исследование планетных систем у других звезд, поиск проявлений жизни во Вселенной. Экспериментальное подтверждение того факта, что Солнечная система не уникальна и за ее пределами существует множество планет, вращающихся вокруг своих звезд, изменило приоритеты в списке основных задач современной астрономии. На открытие и изучение планет вокруг других звезд (экзопланет) направлены огромные силы (и средства) мирового астрономического сообщества. Результатом этих усилий стало открытие к середине 2013 г. свыше 900 экзопланет в более чем 700 звездных системах. Десяток из них принадлежат к классу планет земного типа, что стимулирует их исследование на предмет поиска признаков внеземной жизни. Очевидно, что число открытий экзопланет будет расти воз-

растающими темпами. Отметим, что до сих пор российскими астрономами было открыто лишь два кандидата в экзопланеты. Хотя вклад российских теоретиков в решение обсуждаемых задач пока еще высок, но отсутствие необходимой экспериментальной базы приводит к тому, что основные идеи, выдвигаемые российскими учеными, реализуются на западе, главным образом в странах — членах Европейской Южной обсерватории и США.

Возможности России в решении актуальных задач астрономии

В России имеются специалисты, успешно работающих в области теории и интерпретации астрономических данных, но, как видно из представленного выше обсуждения основных перспективных направлений астрономических исследований, дальнейший прогресс обусловлен развитием средств наблюдений. Для обеспечения высокой эффективности перечисленных исследований необходимы мощные высокоинформационные инструменты наземного и космического базирования, работающие в широком спектральном диапазоне электромагнитного излучения. В последние годы государство уделяет возрастающее внимание поддержке космических исследований, в том числе и в области внеатмосферной астрономии. В наземной же наблюдательной астрономии ситуация, как мы видели, гораздо хуже. Поэтому наша страна не может реализовать собственные современные проекты в наземной наблюдательной астрономии по ряду причин.

- Объем средств на создание новых мегаинструментов, позволяющих осуществлять прорывные исследования в астрономии, заведомо превышает возможности России. Даже рядовой по нынешним временам 8-м телескоп с его инфраструктурой стоит около 150 млн евро. Стоимость же мегателескопа нового поколения, как уже отмечалось, может превышать 1 млрд евро.
- Недостаточна технологическая база для создания новых инструментов мегакласса.
- В силу географических причин в стране нет районов с хорошим астроклиматом для эффективной работы оптических и инфракрасных телескопов. Даже районы со сравнительно неплохими характеристиками — Северный Кавказ или Алтай — по числу ясных ночей и качеству изображений в 2—3 раза уступают

лучшим мировым астрономическим центрам, таким как высокогорные пустыни на севере Чили или вулканические вершины на Гавайских островах. По этой причине мы просто вынуждены кооперироваться с другими странами для создания новых современных обсерваторий.

Как уже отмечалось, ведущие государства мира в развитии научных исследований выбрали другой путь — все мегаустановки создаются в тесной международной кооперации. А их размещение проводится в наиболее подходящих точках нашей планеты на базе широкого международного сотрудничества.

Общая концепция перехода России на новый уровень участия в мировых астрономических исследованиях

Вопрос «что делать?», точнее адекватный ответ на него, конечно же является ключевым. Он неоднократно обсуждался на заседаниях Всероссийских астрономических конференций, Научного совета РАН по астрономии, в астрономических учреждениях, и, я уверен, серьезно волнует практически всех российских астрономов. Естественно, что в таких случаях полного единодушия быть не может и кому-то представленные ниже предложения покажутся слишком кардинальными. К сожалению, нормальный эволюционный путь развития астрономии (да и всей науки) в нашей стране в последние десятилетия оказался непройденным и, как следствие, ситуация стала критической (классики марксизма-ленинизма сказали бы «революционной»). Критичность ситуации требует принятия срочных мер. Я не касаюсь здесь обсуждений второго классического для России вопроса — «кто виноват?», а предлагаю сосредоточиться на конструктивном подходе, выработанном астрономическим сообществом России.

В соответствии с этим подходом для выхода России на мировой уровень в астрономических исследованиях необходима реорганизация системы этих исследований в стране и обеспечение активного участия в мировой кооперации. Основными задачами (шагами) в этом направлении являются:

- проведение аудита научного потенциала всех астрономических учреждений России, включая следующие мероприятия:

- полную аттестацию научных и научно-технических кадров;
- полную инвентаризацию научного оборудования;
- критический анализ научной направленности и результативности исследований;
- реформирование структуры астрономических исследований:
 - интеграция в систему европейской астрономии, прежде всего вступление в ЕЮО;
 - выделение и укрепление базовых астрономических научных центров РАН и университетов, необходимых для эффективной подготовки научных сотрудников к работе на новом уровне;
 - выделение и поддержка наиболее важных направлений астрономических исследований, имеющих прикладное значение общегосударственного характера;
 - реорганизация и ликвидация неэффективно работающих научных подразделений и учреждений, кадровые изменения;
 - вывод из эксплуатации устаревшего оборудования и соответствующих служб;
- решение проблемы подготовки высококвалифицированных кадров.

Разумеется, все это не есть нечто новое. Значительная часть такой работы уже выполнена. Так, например, для организации рационального проведения аудита астрономических учреждений и подразделений РАН можно и нужно использовать результаты комплексных проверок институтов РАН, проведенных в 2012 г. Возможно, что сначала нужно будет выработать единую для астрономических центров систему критериев, которая будет использоваться при аудите.

Наиболее сложным и требующим значительных усилий, в том числе и по принятию решений, является пункт, относящийся к реформированию. Выполнение задач, перечисленных в этом пункте, связано с решением следующих организационных и технических вопросов:

- вступление России в Европейскую Южную Обсерваторию — крупнейший и самый современный международный центр наземной астрономии, что позволит скачкообразно преодолеть углубляющийся разрыв между отечественным и мировым

уровнями астрономических исследований. Этот ключевой момент подробнее описан в следующем разделе;

- обновление кадров. Для стимулирования к выходу на пенсию возрастных ученых (в том числе и астрономов), потерявших высокую производительность, необходимо создать систему материальной и моральной поддержки, например, разработать и узаконить возможности материальной поддержки пенсионеров из специальных фондов РАН или университетов, а также сохранить возможность их дальнейшего участия в научной работе;
- организация программы целевой поддержки наиболее эффективных из существующих отечественных наземных инструментов;
- максимальное развитие работ по применению фундаментальных знаний и подходов для решения прикладных задач. Например, необходимо развитие астрономической поддержки отечественной координатно-временной системы обеспечения (в частности, развитие сети радиотелескопов КВАЗАР, имеющей также перспективы применения для прогнозирования сейсмических и геологических явлений); активное участие в создании федеральной системы противодействия космическим угрозам и т. д.

Вступление в ЕЮО как ключевой масштабный проект

ЕЮО — крупнейшая астрономическая организация, объединяющая 14 стран Европы и Бразилию, имеющая в своем распоряжении три обсерватории в высокогорных районах Чили с исключительными климатическими условиями. Высокий уровень и мощные темпы развития гарантируют, что ЕЮО есть и долгие годы будет оставаться лидером мировой астрономии. Обсерватория располагает четверкой 8-метровых оптических телескопов Very Large Telescope (VLT) и системой телескопов миллиметрового диапазона ALMA, состоящей из 66 антенн диаметром 12 и 7 м. Кроме того, в ЕЮО работает ряд инструментов 4-м класса, включая и широкоугольные системы для обзоров больших областей неба.

В 2009 г. руководство ЕЮО высказало заинтересованность в участии России в проектах ESO и предложило ей стать членом этой организации и включиться в работы по ее развитию. Присоединившись к ЕЮО в ближайшем будущем, Россия могла бы, в частности, участвовать в создании нового мегателескопа EELT с составным зеркалом диаметром 39 м и других инструментов.

Вступление в ESO означает, что с момента вступления в ЕЮО представители России войдут в Совет ЕЮО и будут участвовать в формировании научной и финансовой стратегии организации. Основные преимущества от вступления России в ЕЮО состоят в следующем:

- в получении отечественными учеными наблюдательного времени на всех инструментах ЕЮО. Квота времени составит около 10 %, пропорционально вложению средств;
- возможности для российских ученых участвовать в решении самых актуальных задач современной науки. Участие в Совете ЕЮО позволит на десятилетия вперед формировать научную стратегию в области мировых астрофизических исследований;
- доступе к новейшим инновационным технологиям: малошумящие усилители с предельными характеристиками, системы связи, детекторы излучения в инфракрасном диапазоне, методы обработки сигналов и др.;
- во включении нашей оптико-механической и электронной промышленности в работы по созданию крупнейших в мире инструментов. Важно отметить, что каждая из стран—членов ЕЮО имеет свою квоту (пропорционально взносам) на вклад внутри данной страны в промышленные проекты по созданию современной технической базы для наблюдений;
- позиции в ЕЮО для молодых ученых и аспирантов — основа для формирования научных кадров;
- в возможности для наших специалистов занять до 10 % научных и технических позиций в обсерваториях и технических центрах ЕЮО.

Вступительный взнос для нашей страны, рассчитанный по методике ЕЮО, составит около 120 млн евро. ЕЮО может предоставить России 10-летнюю рассрочку по оплате вступительного взноса, обсудить вопрос о замене уплаты части взносов участием России в строительстве телескопа EELT, а также снизить в два раза ежегодные взносы на период в несколько первых лет.

Для начала переговоров по вопросу вхождения в ЕЮО необходимо в ближайшее время создать рабочую группу из заинтересованных организаций и ведомств (Минобрнауки, РАН, Минэкономразвития, Минфин, МИД и др.) с целью выработки позиции России. Переговоры с руководством ЕЮО должны быть организованы не позднее 2014 г., так как наше возможное участие в мегапроектах ALMA и EELT актуально именно в данный период.

Вступление в ЕЮО будет способствовать научному росту молодых астрономов и физиков, за которыми стоит будущее отечественной науки. Понятно, что, как показывает опыт других стран, уже вступивших в ЕЮО, переходный (после вступления в ЕЮО) период будет непростым. Предполагается, что для ускорения и облегчения перехода на новый (мировой) уровень проведения исследований будет создан национальный комитет пользователей, который окажет профессиональную поддержку российским астрономам, в первую очередь молодым.

Вступление в ЕЮО позволит существенно повысить авторитет современной российской науки и России в целом, поскольку уровень развития наук физического профиля определяет инновационный потенциал страны и соответственно ее международный авторитет. Немаловажно, что вступление в ЕЮО будет серьезным шагом к интегрированию российских и европейских интересов.

Развитие астрономических исследований помимо рамок участия в ЕЮО

Вступление в международную организацию не должно означать закрытия всех «автономных» отечественных средств и соответствующих научных групп. Без активно работающих в стране институтов и кафедр университетов вступление в ЕЮО лишено смысла. В стране необходимо сохранить научно-технологическую среду и возможность подготовки национальных кадров высшей квалификации, которые будут соответствовать уровню работ в ЕЮО. В частности, Специальная астрофизическая обсерватория РАН могла бы стать базовой для подготовки отечественных астрономов к эффективному участию в крупнейших проектах ЕЮО в области наземной оптической астрономии.

Необходимы организация программы целевой поддержки наиболее эффективных из существующих отечественных наземных инструментов, чьи результаты востребованы мировой наукой и, закры-

тие устаревших установок. Конкретные списки — предмет очень серьезного обсуждения, откладывать которое уже нельзя.

Наряду с вступлением в ЕЮО обсуждались и обсуждаются также перспективы участия российских астрономов в других международных проектах, требующих вложения значительных материальных средств и организационных усилий. Прежде всего, к ним относятся затянувшийся на десятилетия российско-узбекский проект радиотелескопа РТ-70 на плато Суффа и радиоастрономический проект SKA в Южной Африке и Австралии. Для завершения строительства РТ-70 понадобится около 40—50 млн долларов. При плановом финансировании телескоп может вступить в строй не ранее 2017—2018 гг. Участие в проекте радиотелескопов SKA, строительство которого может начаться в 2016 г., предполагает долевое участие стран, сравнимое со вступительным взносом в ЕЮО, то есть порядка 100 млн евро. В настоящее время в консорциум SKA входит семь государств при общей стоимости проекта около 1.5 млрд долларов. Однако, несмотря на обсуждение подобных перспектив, на ближайшие десятилетия-два абсолютный приоритет имеет ключевой крупномасштабный проект, необходимый для осуществления представленной выше концепции развития отечественной астрономии. Это вступление в Европейскую Южную Обсерваторию и реализация намеченной научной космической программы.

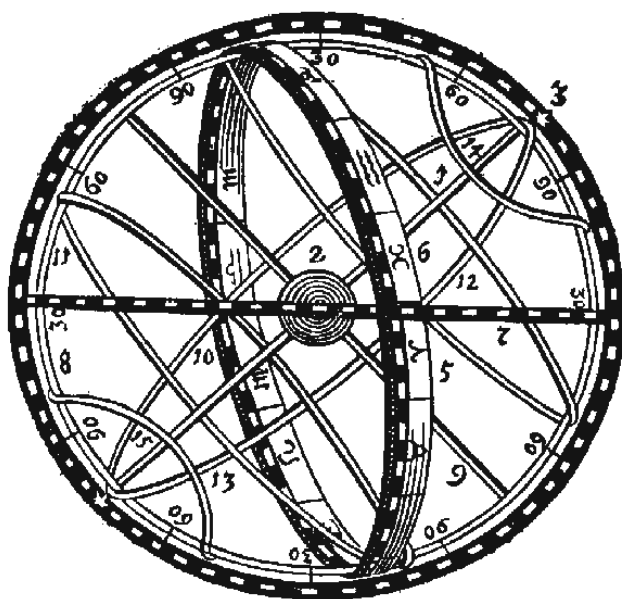
Работа выполнена при поддержке «ФЦП Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Я также выражаю глубокую благодарность Ю. Ю. Балеге и другим коллегам-астрономам за предоставление фактических сведений, за очень заинтересованное и профессиональное обсуждение затронутых вопросов и за совместную выработку конкретных предложений по выводу российской астрономии на мировой уровень.

**ПОЗДНИЕ СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ИНФРАКРАСНОМ
ДИАПАЗОНЕ (ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТОВ
SPITZER, HERSCHEL И РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ
НА ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ALMA)**

В моем докладе будут представлены наиболее важные результаты, которые были получены на основании данных с различных инструментов на борту Spitzer Space Telescope, Herschel Space Observatory, и свежие результаты, полученные на интерферометре ALMA.

During my talk I will present the most important results, which were obtained using data from different instruments on board of Spitzer Space Telescope, Herschel Space Observatory and most recently from ALMA.

Тезисы студенческих докладов



АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ТОЧЕК ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЙ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В работе приводится анализ методов определения областей возможных движений малых тел в линейной и нелинейной постановке. Особое внимание уделено алгоритмам определения граничных точек доверительных областей в нелинейной постановке. Такие задачи возникают как при определении показателей нелинейности, позволяющих правильно выбрать метод построения областей, так и при построении непосредственно самих областей в виде доверительных областей, задаваемых граничными поверхностями. Следует также отметить, что при построении вероятностных областей оценку качества модели возмущающих ускорений в уравнениях движения объекта можно также оценивать с помощью показателя, в котором используется граничная точка доверительной области.

Для нахождения точек граничной поверхности доверительной области в нелинейном случае нами исследовались численные итерационные методы Ньютона, продолжения по параметру, а также прямые методы поиска. Анализ свойств методов был выполнен на основе решения реальных и модельных задач. Проведенное исследование выявило особенности применения метода Ньютона и других итерационных схем. Показано, что начальные приближения (точки), лежащие в параметрическом пространстве в малой окрестности НК-оценки параметров орбит, а также в области, где целевая функция задачи НК резко возрастает, являются особыми. При отображении этих точек на граничную поверхность итерационный процесс метода Ньютона становится численно неустойчивым. Эффективным способом решения задачи в этом случае является комбинированный способ, включающий в себя метод половинного деления и метод Ньютона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

SOLARSUIT — СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДИНАМИКИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В работе рассмотрена Alpha версия разработанной нами системы визуализации динамики космических объектов — SolarSuit.

Данная система позволяет визуализировать движение различных космических объектов — планет, астероидов, комет, космических миссий и т. д. В программе доступно несколько методов расчета и отображения положения небесных тел:

- расчет по задаче двух тел (прямой и обратный переход);
- получение координат из заранее рассчитанного файла;
- чтение фондов эфемерид больших планет DE, распространяемых NASA;
- чтение каталога Боуэлла.

SolarSuit позволяет отображать движение объектов и их траектории в трехмерном пространстве. Для тел, добавленных по пользовательскому файлу, существует возможность отображения рассчитанной заранее доверительной области. В системе присутствует удобное управление скоростью визуализации и положением наблюдателя.

Для удобства управления объектами предназначен «Менеджер объектов». Он позволяет скрывать тела из визуализации, выключать отображение траектории, а также менять некоторые параметры объектов, такие как имя, описание, цвет визуализации и пр.

Работа SolarSuit рассмотрена на различных примерах и вариантах использования:

- визуализация вероятностной эволюции на примере потенциально опасных астероидов 2008 CK70, 2007 VK184 и 2012 DA14;
- работа задачи двух тел на примере прародителя Челябинского метеорита;
- добавление различных астероидов по каталогу Боуэлла.

Работа выполнена по заданию № 2.4024.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации.

ДИНАМИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Происхождение многих галактических течений, таких как, например, галактические ветры, связывается с действием вспышек сверхновых. При этом обычно предполагается, что энергии отдельных вспышек сверхновых складываются так, что они действуют как единый источник энергии с мощностью, равной частоте вспышек, умноженной на энергию отдельной вспышки. На основе двумерного и трехмерного численного моделирования множественных пересекающихся остатков вспышек сверхновых показывается, что такой режим возможен только при выполнении критерия когерентности вспышек, который соответствует тому, что объемный фактор заполнения остатками отдельных сверхновых начинает превышать некоторые критические значения. При меньших значениях фактора заполнения остатки отдельных вспышек эволюционируют независимо и коллективного эффекта не возникает.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-92704.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОЛЛОКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ НА СИММЕТРИЧНЫХ РАЗБИЕНИЯХ ГАУССА В ЗАДАЧАХ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

Почти все важные для современной практики дифференциальные уравнения, описывающие динамические системы, не интегрируются аналитически. Поэтому для их решения прибегают к приближенным методам интегрирования, которые условно делят на аналитические и численные. В последнее время главным образом за счет бурного развития компьютерных технологий все чаще прибегают к численным методам интегрирования. Среди них широко применяются методы Рунге—Кутты, в особенности неявные коллокационные методы на разбиениях Гаусса: Лобатто, Радо или Лежандра.

В работе представлены результаты численных экспериментов по исследованию эффективности коллокационных методов на симметричных разбиениях Лобатто и Лежандра применительно к решению дифференциальных уравнений орбитальной динамики. В частности, установлена зависимость эффективности численного интегрирования от порядка используемого коллокационного метода. Проведено сравнение возможностей методов на разбиении Лобатто и Лежандра. Показано, что разбиение Лобатто обеспечивает более высокую эффективность численного интегрирования. Исследовано, насколько значительно экстраполяция, предназначенная для получения начальных коллокационных приближений правых частей уравнений на каждом следующем шаге с их последующим итерационным уточнением, повышает точность численного интегрирования. Экспериментально показано, что отказ от экстраполяции настолько существенно ухудшает численные результаты, что использование коллокационного интегратора становится весьма сомнительным. Наконец, линейный характер поведения глобальной ошибки со временем позволил выявить геометрические свойства рассматриваемых коллокационных методов.

ЗАДАЧА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНЫХ РУКАВОВ ГАЛАКТИКИ ПО ИХ СЕГМЕНТАМ

Рассматривается задача восстановления параметров спирального рукава Галактики по его сегменту, причем в качестве параметров рассматриваются не только угол закрутки и позиционный угол рукава, но и расстояние до полюса спирали, то есть расстояние до центра Галактики.

На начальном этапе работы проводится исследование возможности применения такого подхода с учетом современной неопределенности расстояний до объектов в Галактике. Для целей такого исследования решена задача о минимальном числе точек, принадлежащих спиральному рукаву, по которым можно однозначно восстановить параметры спирали, в предположении, что направление на полюс спирали (центр Галактики) известно. Выведены и проанализированы соответствующие уравнения для этих параметров. Показано, что в случае, когда сегмент пересекает направление на центр Галактики, для однозначного определения параметров спирального рукава достаточно известных положений трех точек. В случае расположения сегмента по одну сторону от направления на полюс спирали по трем точкам получаются два набора параметров, каждый из которых соответствует своей спиральной линии, проходящей через данные точки. В этом случае однозначное решение существует только для четырех исходных точек, принадлежащих одному витку спирали.

Построенные алгоритмы будут применены для оценки неопределенности и систематического смещения формального решения при учете неопределенности гелиоцентрических расстояний.

В. В. Вильянен¹, В. Е. Чеботарёв²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. М. Ф. Решетнева,

²ОАО «Информационные спутниковые системы
им. М. Ф. Решетнева»

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЭВОЛЮЦИЮ ОРБИТЫ АСТЕРОИДА НЕСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО МИДЕЛЕВА СЕЧЕНИЯ

В настоящее время астероидно-кометная опасность является актуальной проблемой науки и общества. В феврале 2013 г. в районе города Челябинска в озеро Чебаркуль упал неизвестный до того дня метеорит. В связи с последним событием задача предотвращения угрозы из космоса руководством Роскосмоса была поставлена как приоритетная.

На сегодняшний день предложено множество способов предотвращения угрозы столкновения с Землей опасных объектов. Это импульсные (кинетическое, ядерное) и слабые воздействия (от сил солнечного давления, малая тяга, гравитационные воздействия и др.), основными характеристиками которых являются продолжительность воздействия, эффективность, точность воздействия, предсказуемость и управляемость.

В данном исследовании мы рассматриваем слабое воздействие, применимое для заблаговременного упреждения столкновения астероида с Землей, — изменение миделева сечения астероида несимметричной формы путем приложения к нему момента сил с целью изменения величины светового давления и последующей эволюции его орбиты. Проводятся анализ ориентации несимметричного астероида в пространстве в процессе его движения по орбите, оценка возможности изменения этой ориентации — изменения миделева сечения — и удержания астероида в определенном положении для создания дополнительного возмущающего воздействия от сил светового давления на его движение по орбите. Предложена схема приложения момента сил к одной и двум точкам поверхности астероида для изменения миделева сечения и произведена оценка суммарного импульса, достаточного для обеспечения минимального отклонения орбиты астероида до требуемого значения.

ПОИСК ПЕРЕМЕННЫХ В ОКРЕСТНОСТИ ЗВЕЗДЫ V523 CAS

Целью нашего исследования является поиск новых переменных звезд в окрестности уже известных переменных V520 Cyg и V523 Cas. В работе использовались наблюдения, выполненные в КрАО (2010), которые проводились на телескопе РК-800, куда была прикреплена связка из ПЗС-камеры ApogeeAlta (2048×2048 pix) с объективом МТО-1000. В области V523 Cas обнаружили три новые переменные звезды (USNO-B1.0 1399-0017624; USNO-B1.0 1400-0018424; USNO-B1.0 1402-001755). Определив координаты этих звезд, мы искали их в каталогах (ОКПЗ) и VSX (AAVSO). В них звезды USNO-B1.0 1399-0017624; USNO-B1.0 1400-0018424; USNO-B1.0 1402-001755 обнаружены не были. На основании чего был сделан вывод, что эти звезды являются новыми переменными. Однако недостаток данных не позволил получить надежную кривую блеска для данных звезд.

Для уточнения типа переменности из архива кафедры были привлечены BVR наблюдения той же области, выполненные в 2010 г. на телескопе Астротел-Кавказ (Ritchey-Chretien, $D = 300$ мм, $F = 1/8$) с ПЗС-камерой ApogeeAlta U9000 (3054×3054 pix), установленном на Кавказской астрономической станции КФУ.

По наибольшему числу наблюдений в фильтре V (377×5^s) удалось уверенно классифицировать USNO-B1.0 1399-0017624 как переменную типа W UMa с $P = 0.2830^d \pm 0.0002$, амплитуда изменения блеска: главный минимум — ($14.25\text{—}14.62^m$, V), вторичный минимум — ($14.25\text{—}14.51^m$, V). Звезды USNO-B1.0 1400-0018424; USNO-B1.0 1402-001755 по вышеупомянутым данным не удалось классифицировать. Таким образом, в ходе работы при помощи ПЗС-фотометрии нами открыты переменность блеска у трех звезд, а у звезды USNO-B1.0 1399-0017624 определены период, амплитуда, приближенный спектральный класс. Полученные данные о звезде USNO-B1.0 1399-0017624 внесены в каталог VSX (AAVSO), полученные результаты также могут быть использованы для построения физических моделей переменной звезды.

А. А. Дорогов¹, С. Ю. Горда², О. А. Давыдова¹

¹ Уральский федеральный университет,

² Астрономическая обсерватория УрФУ

СМЕНА ТИПА КРИВОЙ БЛЕСКА КОНТАКТНОЙ ЗАТМЕННОЙ AM Leo В 2012 г.

В течение семи лет (2007–2013) на телескопе АЗТ-3 ($D = 0.45$ м, $F = 2.0$ м) Коуровской астрономической обсерватории УрФУ проводился фотометрический мониторинг контактной затменной переменной AM Leo типа W UMa. Регистрация изображений осуществлялась с помощью ПЗС-камеры U6 фирмы Apogee (CCD KAF-1001, 1024×1024 , 24 мкм) в трех фильтрах BVR.

Практически за весь период наблюдений с 2007 по 2012 г. кривая блеска AM Leo имела более глубокий минимум, в котором происходило полное затмение, то есть относилась к типу W. За этот период наблюдались некоторые изменения на кривой блеска, которые вполне объяснялись наличием слабой пятенной активности на поверхности компонентов. Тем не менее параметры системы, определяемые из решений кривых блеска методом синтеза с использованием программы РНОЕВЕ, в пределах 1–2 % оставались постоянными.

Наблюдения, проведенные в январе–апреле 2013 г., показали, что форма кривой блеска сменилась с типа W на тип А. Более глубоким стал вторичный минимум, соответствующий прохождению. Смена типа произошла в промежуток времени с апреля по декабрь 2012 г. Из результатов решения кривой блеска 2013 г. следует уменьшение на 3.5 % радиуса главного компонента и на 10 % отношения масс компонентов q_{phot} . Новое значение $q_{phot} = 0.43$ соответствует значениям $q = 0.44 - 0.45$, найденным по кривым лучевых скоростей.

Изменения типа кривой блеска AM Leo отмечались и ранее (см., например, Е. Derman, О. Demircan, Н. Dundar, IBVS, № 3630, 1991, 1–4).

ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ РАДИОПУЛЬСАРОВ С ИЗЛУЧЕНИЕМ ВНЕ РАДИОДИАПАЗОНА

Из более чем 2000 радиопульсаров, представленных в каталоге [1], у 100 источников зарегистрировано излучение вне радиодиапазона. Анализ параметров этих объектов показал, что распределение их по периодам и по производным периода, как и у основной массы пульсаров, является бимодальным, но со значительно большим относительным количеством объектов, имеющих миллисекундные периоды и малые производные. Средние значения для них равны соответственно $\langle P \rangle = 20$ мс, $\langle \frac{dP}{dt} \rangle = 5.3 \cdot 10^{-17}$. Оказалось, что распределение пульсаров по магнитным полям на световом цилиндре для источников с высокоэнергичным излучением сдвинуто в сторону высоких значений поля относительно распределения объектов, излучающих только в радиодиапазоне. Средняя индукция поля на световом цилиндре для радиопульсаров с излучением вне радиодиапазона равна $\langle B_{lc} \rangle = 1.87 \cdot 10^4$ Гс, в то время как у основной массы радиопульсаров B_{lc} заключено в интервале от нескольких Гауссов до нескольких десятков. Это свидетельствует о генерации нетеплового излучения на высоких энергиях в радиопульсарах на периферии их магнитосфер.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-00661, а также программы Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной».

Библиографические ссылки

1. *Manchester R. N., Hobbs G. B., Teon A., Hobbs M.* The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 129. — P. 1993–2006.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ШКАЛ РАССТОЯНИЙ ДО ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

В работе реализован алгоритм кинематической калибровки шкал расстояний до планетарных туманностей (Nikiforov, Bobrova, 1999). В качестве кинематической модели для подсистемы планетарных туманностей использовалось разложение линейной скорости вращения центроидов планетарных туманностей в ряд по степеням $(R - R_0)$, где R — расстояние планетарной туманности от оси вращения Галактики, R_0 — расстояние от Солнца до центра Галактики. Подобное разложение наилучшим образом соответствует тому, что кривые вращения спиральных галактик являются почти плоскими. Оптимизация модели для данных о расстояниях и лучевых скоростях планетарных туманностей дает оценки кинематических параметров подсистемы туманностей и формальное расстояние до центра Галактики.

Сопоставление полученного формального расстояния с «наилучшей» оценкой $R_0 = 7.9 \pm 0.2$ кпк, найденной по всей совокупности измерений этого параметра (Nikiforov, 2004), дает поправочный коэффициент для рассматриваемых расстояний. Выполнено цензурирование выборок с целью добиться наибольшей их однородности. Это важно, так как алгоритм применим лишь к дисковым планетарным туманностям.

Результаты обработки данных для различных шкал расстояний позволяют построить новый синтетический каталог расстояний до планетарных туманностей.

ПРОФИЛИ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗГИБНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

Как было показано в работе [1], с применением характерного набора кинематических параметров изгибного излучения пульсаров можно с большой степенью точности построить профили ряда экспериментально наблюдаемых пульсаров. Идея этого метода состоит в том, что наблюдаемый профиль излучения пульсара соответствует линии пересечения вращающейся вместе с пульсаром мгновенной индикатрисы углового распределения мощности излучения пульсара с лучом зрения от наблюдателя.

В данной работе этот метод используется для получения профилей линейно поляризованного изгибного излучения пульсаров на основе соответствующих индикатрис поляризованного излучения. При этом используются свойства линейной поляризации излучения произвольно движущегося релятивистского заряда, исследованные ранее в работе [2]. Для сравнения построенных таким образом профилей линейно поляризованного излучения пульсаров с экспериментальными профилями необходимо вращать соответствующую траектории джета изгибного излучения плоскость поляризации с угловой скоростью наблюдаемого пульсара.

Библиографические ссылки

1. *Bordovitsyn V. A., Nemchenko E. A.* Construction of the curvature radiation profiles from pulsars // Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov : Proc. of 15th Lomonosov Conf. on Elementary Particle Physics (LomCon), Moscow, Russia, August 18–24, 2011, Singapore : World Scientific, 2013. — P. 275–276.
2. *Багров В. Г., Бордовитцын В. А., Копытов Г. Ф.* Индикатриса излучения произвольно движущегося заряда // Изв. вузов. Физика. — 1972. — Т. 15, вып. 5. — С. 37–425.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ АСТРОМЕТРИЧЕСКОГО И НЕБЕСНО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ПАКЕТЕ EROS

В работе представлены результаты разработки нескольких программных модулей, предназначенных для решения некоторых астрометрических и небесно-механических задач. Создание программного обеспечения ведется в рамках разработки пакета EROS (англ. Ephemeris Researches and Observation Services) [1].

Функциональными особенностями разработанных модулей являются возможность расчета продолжительности ночи в зависимости от высоты Солнца, вычисление эфемерид астероида или группы астероидов для одной или нескольких ночей, определение параметров видимости объекта для данной обсерватории и т. д. Важнейшее свойство разрабатываемого программного пакета — возможность автоматизации процедур поиска объектов, расчета эфемерид и пр., что реализуется за счет совместного использования созданных модулей.

В работе также представлены результаты позиционных наблюдений некоторых АСЗ, проведенных с целью тестирования созданного программного обеспечения на телескопе СБГ АО УрФУ.

Библиографические ссылки

1. *Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю.* Программный комплекс ЭРОС — новый инструмент астрометрической и небесно-механической поддержки позиционных наблюдений // Физика космоса : Тр. 43-й междунаро. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3—7 февр. 2014 г., Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014.

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТУНГУССКОГО ЯВЛЕНИЯ 1908 г. МЕТОДАМИ ДИНАМИКИ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

За более чем столетнюю историю изучения Тунгусского явления (ТЯ) не удалось найти удовлетворительного объяснения проблемы так называемых светлых ночей, наблюдавшихся на большой территории от Сибири до атлантического побережья Европы. Это явление объясняли рассеянием солнечного света космической пылью в высоких слоях атмосферы, и для объяснения появления космической пыли на таких высотах привлекали гипотезу о кометной природе ТЯ. Однако территория наблюдения светлых ночей в широтном направлении выходит за границу пылевой тени от кометного хвоста, и это Западная Европа, где явление светлых ночей было наиболее сильным. Необъясненным осталось и быстрое распространение анного явления на огромную территорию.

Возможность нового подхода к этой проблеме появилась, когда выяснилось, что разрушение тела началось на высотах более 1 тыс. километров. Подтверждается это образованием тени на Земле от запыленной области после падения метеорита утром 30 июня 1908 г. и определением ее высоты простыми геометрическими расчетами, без привлечения какого-либо механизма разрушения. Судя по показаниям очевидцев из Китая, Алтая и Восточного Казахстана, это разрушение имело взрывоподобный характер.

Используя методы динамики космического полета, нами была сделана оценка особенностей распространения вещества, образовавшегося при взрыве. Для этого были рассчитаны трассы роя фрагментов, образовавшихся в результате взрыва, и предпринята попытка сравнить координаты прохождения трасс с координатами наблюдавшихся на Земле явлений.

Сравнение результатов расчета с наблюдениями необычных оптических явлений после взрыва показывает, что при таком подходе хорошо объясняются распространенность аномальных явлений в Евразии и Северной Америке, а также большая скорость распространения этих явлений в западном направлении.

А. П. Ляпцев¹, С. Ю. Горда², А. М. Соболев²

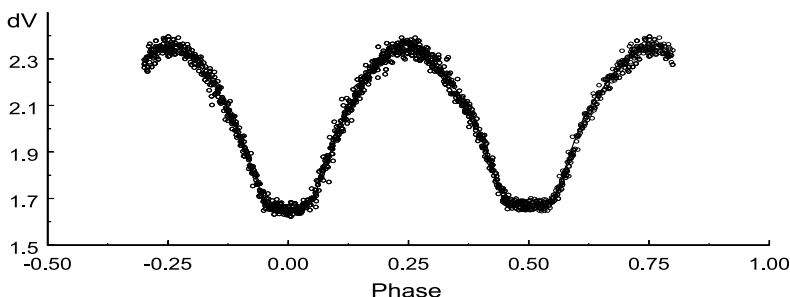
¹ Уральский федеральный университет,

² Астрономическая обсерватория УрФУ

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ТИПА W UMa

В процессе поиска молодых звездных объектов в ближайшей окрестности молодой аккрецирующей звезды V645 на основе фотометрической обработки ПЗС-кадров, полученных на телескопе АЗТ-3 ($D = 0.45$ м, $F = 2.0$ м) Коуровской обсерватории УрФУ, во время проведения 4-годичного мониторинга этой звезды, была обнаружена новая переменная типа W UMa ($V = 13.26^m$, 2MASS 21390399 + 5009368). По 25 моментам минимумов были найдены следующие световые элементы системы: $JD_{\odot min I} = 2454979.1586 + 0.4029112 \cdot E$.

Построенные в V и R фильтрах кривые блеска показывают наличие полного затмения во вторичном минимуме. В некоторые ночи наблюдаются смещения кривых блеска относительно средней кривой на величины порядка $\pm 0.03^m$. При этом среднеквадратическая ошибка за весь период наблюдений не превышала величины $\pm 0.006^m$. Смещения могут быть вызваны как наличием пятенной активности на поверхности компонентов, так и переменностью возможного третьего компонента в системе. На основе данных решения кривых блеска (см. рисунок), полученного с использованием пакета РНОЕВЕ, эту контактную систему типа W UMa следует отнести к подтипу А, поскольку при затмении звезды меньшей массы наблюдается менее глубокий минимум. Найденное значение $q = M_1/M_2 = 0.18$ также соответствует подтипу А.



Кривая блеска в цвете V и синтетическая кривая новой переменной

ДИСТАНЦИОННОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСТЕРОИДНОГО ДВИЖЕНИЯ

С развитием новых астрометрических средств наблюдений и проведением космических программ в последнее время ежегодно открывают тысячи новых астероидов. В связи с этим возникает актуальная проблема оперативной обработки наблюдательных данных для получения орбитальных параметров, а также последующего исследования астероидной орбиты на основе численного моделирования. Для решения этих задач в отделе небесной механики и астрометрии НИИ прикладной математики ТГУ В. А. Авдюшевым было разработано программное обеспечение Xciter [1].

Целью данной работы является создание серверного варианта интерфейса для работы с программой Xciter (<http://www.astro.tsu.ru>). Данный интерфейс формирует на основе введенной клиентом информации входной файл, запускает математическую модель Xciter и по окончании вычислений выводит численные результаты, характеризующие движение исследуемого астероида. Для формирования входного файла клиент вводит по мере требований различные данные, связанные с типом решаемой задачи, интегратором и выводом результатов. Результаты численного процесса по запросу пользователя могут выводиться непосредственно как на экран монитора, так и в файл. В качестве результатов пользователь может получить такие данные, как эфемерида астероида, геоцентрическое расстояние, показатель Ляпунова, оценка точности в сферических координатах.

Работа выполнена по заданию № 2.4024.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографические ссылки

1. *Авдюшев В. А.* Численное моделирование орбит. — Томск : НТЛ, 2010. — С. 284.

УСТОЙЧИВОСТЬ СФЕРИЧЕСКОЙ АККРЕЦИИ НА ЧЕРНУЮ ДЫРУ: УЧЕТ ЭФФЕКТОВ ОТО

Выполнен линейный анализ устойчивости сферического аккреционного течения на невращающуюся черную дыру (ЧД) относительно малых акустических возмущений в аккреционном потоке невязкого релятивистского газа. Невозмущенное течение предполагается сферически симметричным и стационарным. Масса аккрецируемого вещества предполагается пренебрежимо малой по сравнению с массой ЧД, поэтому течение допустимо описывать в рамках метрики Шварцшильда. Решения на плоскости «число Маха—радиус» задаются семейством кривых, имеющим единственную особую (седловую) точку, отвечающую состоянию, для которого возможен безударный переход через скорость звука, и подобны аналогичному семейству решений в нерелятивистской модели аккреции Бонди.

Известно, что сферическое аккреционное течение в нерелятивистском пределе неустойчиво относительно малых нерадиальных возмущений, которые неограниченно нарастают по амплитуде по мере приближения к ЧД [1]. Неустойчивость развивается вследствие тормозящего действия центробежных сил, возникающих при наличии нерадиальных скоростей. В то же время известно, что центробежный барьер в непосредственной окрестности горизонта имеет конечную высоту, если принять во внимание эффекты ОТО. В настоящей работе показано, что рост амплитуды при приближении к ЧД в самом деле ограничен, что справедливо как в модели с фиксированной метрикой, так и при учете колебаний кривизны пространства.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашение 14.B37.21.0915).

Библиографические ссылки

1. *Kovalenko I. G., Eremin M. A.* Instability of spherical accretion - I. Shock-free Bondi accretion // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — Vol. 298. — P. 861–870.

А. С. Шаповалова, С. Ю. Парфенов,
А. М. Соболев, С. Ю. Горда, Г. Г. Ахматханова
Уральский федеральный университет

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗДЫ AE AUR ПО СПЕКТРАМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Звезда AE Aur — это переменная звезда спектрального класса O9.5 V в созвездии Возничего. Предполагается, что это убегающая звезда, которая была выброшена из области Трапеции Ориона, находящейся в 25° от настоящего положения звезды AE Aur.

Целью работы было оценить основные параметры звезды AE Aur: эффективную температуру (T_{eff}), ускорение свободного падения ($\log g$), возраст и массу.

В ходе работы были исследованы спектры высокого разрешения, полученные на 1.2-м телескопе Коуровской АО. Оценки T_{eff} и $\log g$ были получены при сравнении профилей линий водорода и гелия в спектре, полученном из наблюдений, с профилями линий в синтетическом спектре. Синтетические спектры были получены на основе не-ЛТР моделей звездных атмосфер, вычисленных с помощью программного кода TLUSTY200. Степень соответствия синтетического спектра наблюдаемому оценивалась по значению величины суммы среднеквадратических отклонений профилей линий в синтетическом спектре от профилей линий в наблюдаемом спектре.

В результате были получены $T_{\text{eff}} = 32\,600 \pm 900$ К и $\log g = 4.10 \pm 0.19$ dex. Эти значения затем были использованы для оценки массы и возраста звезды. С помощью интерполяции эволюционных треков звезд было получено, что возраст звезды составляет 3.0 ± 1.5 млн лет, а масса звезды 19.9 ± 1.1 солнечных масс. Полученная оценка возраста хорошо согласуется с возрастом звезд Трапеции Ориона, равным 2–3 млн лет. Таким образом, данная оценка находится в согласии с гипотезой о том, что звезда AE Aur была выброшена в процессе эволюции звездного скопления в Трапеции Ориона.

Тезисы кратких сообщений



ТРЕХПЛАНЕТНЫЙ РЕЗОНАНС 1:2:5 В СИСТЕМЕ HD 82943?

Проведена обработка временного ряда опубликованных измерений лучевой скорости звезды HD 82943, обладающей многопланетной системой. В анализ включены недавние измерения Кеск/HIRES, а также хоть и старые, но значительно более многочисленные данные CORALIE. Нами обнаружено, что измерения CORALIE содержат годовичные систематические ошибки, которые значительно искажали предыдущие результаты обработки этих данных.

После удаления годовичного члена все еще остается дополнительное колебание с периодом около $\sim 1\,100$ сут., которое надежно выделяется в трех независимых подмножествах измерений: данные CORALIE, данные Кеск, полученные до апгрейда оборудования, и данные Кеск после этого апгрейда.

Мы считаем, что это колебание представляет собой признак наличия в системе третьей (ранее лишь подозревавшейся) планеты, хотя не исключаем и непланетные интерпретации, такие как звездная активность. Получается довольно легко найти устойчивую трехпланетную конфигурацию системы вблизи трехпланетного резонанса 1:2:5. При этом две главные (внутренние) планеты находятся в резонансе 1:2 и в сонаправленной апсидальной коротации, а динамика третьей планеты пока определяется неоднозначно: она может располагаться как в истинном динамическом резонансе 2:5, так и за его пределами. При этом трехпланетный резонанс удастся легко получить в ходе моделирования процесса миграции всех трех планет.

Для третьей планеты мы даем оценку орбитального периода $\sim 1\,075$ сут., и минимальной массы $\sim 0.3 M_{\text{Jup}}$, тогда как эксцентриситет и аргумент перицентра надежно не определяются.

Работа выполнена при поддержке следующих источников: РФФИ (проект 12-02-31119 мол_а), программы Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной», Argentinian Research Council -CONICET-, Universidad Nacional de Córdoba -UNC-.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МНОГОЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Рассмотрена задача выделения в зашумленном временном ряду сигнала, содержащего несколько периодических компонент. Данная задача осложнена не только наличием шума, но и тем, что периодичности могут вступать в интерференцию как друг с другом, так и с неравномерностью распределения наблюдений во времени. Количество компонент сигнала заранее обычно неизвестно.

Показано, что для решения данной задачи недостаточно лишь традиционных одночастотных периодограмм (таких как периодограмма Ломба—Скаргла). Чтобы доказать, что *все* n компонент, выделенных из многочастотного сигнала, действительно значимы, нужно применить $2^n - 1$ статистических критериев, из которых большинство основано на различных многочастотных периодограммах и лишь n — на одночастотных.

В многочастотных периодограммах сигнал моделируется суммой из n независимых синусоид разных частот. Нам удалось получить эффективные аналитические оценки статистической значимости пиков таких периодограмм, что необходимо для применения упомянутых выше многочастотных критериев. Оценка соответствующей вероятности ложной тревоги дается в виде $Ae^{-z}z^{3n/2}$, где z есть максимальный отсчет многочастотной периодограммы порядка n , а A — некий числовой коэффициент, зависящий от задаваемого частотного диапазона.

Описанная теория реализована нами в виде вычислительного алгоритма FREDEC — FREquency DEComposer, который доступен по адресу <http://sourceforge.net/projects/fredec/>.

Мы применили данный алгоритм к имеющимся в литературе доплеровским измерениям звезды 55 Рака, обладающей пятипланетной системой. Удалось найти следы неизвестного ранее колебания с периодом 9.8 сут., которое может означать наличие в этой системе шестой планеты в резонансе 3:2 с главной планетой 55 Сис b.

Работа поддержана РФФИ (проект 12-02-31119 мол_а) и программой Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной».

А. П. Бисярина¹, С. Ю. Горда²,
А. М. Соболев², С. Ю. Парфенов¹
¹Уральский федеральный университет,
²Астрономическая обсерватория УрФУ

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ HD 200775

Звезда HD 200775 — молодая массивная звезда Ве Хербига. Такие звезды отличаются переменностью профиля и интенсивности спектральных линий, в особенности линий бальмеровской серии водорода.

Для линии $H\alpha$ данной звезды наблюдаются повторяющиеся с периодом около 3.5—4 лет фазы максимума активности, которые характеризуются повышенными значениями эквивалентной ширины линии $H\alpha$ и возникновением дополнительных компонент в ее профиле. Подобное поведение связано с тем, что звезда является двойной системой. Рядом исследователей различными методами были измерены период обращения и параметры орбиты этой системы. При этом разные авторы получили различающиеся значения периода — от 1 180 до 1 412 дней.

В данной работе исследованы спектры высокого разрешения, полученные на 1.2-метровом телескопе АО УрФУ с мая 2012 г. по настоящее время, а также данные из электронных архивов обсерваторий ОНР (Франция) и САО РАН. Рассмотренный интервал времени охватывает около пяти периодов обращения (у других авторов не более 2.5 периода).

За время наблюдений были зафиксированы новая фаза максимума активности и последующий переход звезды в спокойное состояние. Были построены кривые лучевых скоростей по линии $He\ I\ 5876\ \text{\AA}$ для обеих компонент двойной системы. Для этого были подобраны синтетические спектры, реализующие хорошее согласие между наблюдательными и теоретическими профилями линии $He\ I\ 5876\ \text{\AA}$ в течение всего периода наблюдений. Большой временной интервал и малый разброс данных отдельных наблюдений относительно кривой лучевых скоростей позволили определить параметры двойной системы с высокой точностью.

НОВАЯ ВЫБОРКА ГАЛАКТИК С ПОЛИГОНАЛЬНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Наличие в некоторых галактиках длинных прямолинейных образований, которые обычно наблюдаются как спрямленные участки спиральных ветвей и существуют несмотря на дифференциальное вращение галактических дисков, представляет интересную проблему. Эти образования впервые описаны Б. А. Воронцовым-Вельяминовым.

Образование данных структур связывается с тем, что форма фронта сильной ударной волны, образующейся вдоль спиральной ветви, имеет тенденцию к спрямлению, поэтому очаги звездообразования, стимулируемого ударной волной, могут образовывать прямолинейные структуры. В связи с этим возникает вопрос о факторах, определяющих условия появления «верениц», а для выяснения этих условий необходим анализ данных о достаточно большом количестве галактик с интересующей нас особенностью спиральной структуры.

Около десяти лет назад Черниным и его коллегами был составлен каталог из двухсот галактик с вереницами [1]. Дополнительно к этому каталогу нами были выделены еще 102 спиральные галактики, у которых на изображениях прослеживаются достаточно типичные фрагменты полигональных структур. При построении новой выборки использовались данные LEDA, NED, SDSS, GALEX, Galaxy Zoo, 2MASS. У ряда галактик вереницы удается выделять даже по старым звездам (например, по данным 2MASS): NGC 2523, NGC 5653. Такие объекты редки, но у них полигональность обнаруживается по нескольким компонентам.

Подтверждены полученные ранее выводы о том, что длина «вереницы», как правило, близка к ее расстоянию от центра, а углы между смежными «вереницами» группируются к 120° .

Библиографические ссылки

1. *Chernin A. D., Kravtsova A. S., Zasov A. V., Arkhipova V. P. Galaxies with Rows* // *Astr. Rep.* — 2001. — Vol. 45. — P. 841.

СГЛАЖИВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА И СПЕКТРЫ КОЛЕБАНИЙ МОДЕЛИ РЗС

Сглаживание потенциала в численной динамической модели РЗС подразумевает введение параметра сглаживания ε в выражение для потенциала скопления: $U(r) = \sum_{i=1}^N Gm_i / \sqrt{(r - r_i)^2 + \varepsilon^2}$, где $N = 500$ — число звезд в модели скопления. Это позволяет при разумном выборе ε как сохранить «столкновительный» характер эволюции звездной системы (исключив лишь редкие наиболее тесные сближения), так и значительно облегчить численное интегрирование уравнений движения звезд. Пусть $\varepsilon_1 = 0.012\bar{r}_{ij}$ (\bar{r}_{ij} — среднее начальное расстояние между звездами скопления). Исследование влияния величины сглаживания при варьировании $\varepsilon/\varepsilon_1$ в пределах $[0.8-2.2]$ на результаты вычисления структурно-динамических характеристик ядра модели РЗС, а также частотных спектров S_ν и дисперсионных кривых для флуктуаций фазовой плотности (ФП) и потенциала позволило получить ряд результатов. Использование $\varepsilon < \varepsilon_1$ приводит к значительным изменениям в спектрах S_ν из-за погрешностей вычисления фазовых координат звезд (ФКЗ) и поэтому неприемлемо. При увеличении ε от ε_1 до $2\varepsilon_1$ степень нестационарности ядра модели РЗС практически не меняется, суммарная кинетическая энергия звезд, число звезд, концентрация звезд в ядре уменьшаются на 10–80 %. В спектрах S_ν меняется распределение энергии волн по частотам, что, согласно анализу дисперсионных кривых, связано с изменением направления распространения волн ФП и потенциала. Обнаружена значительная коррелированность спектров S_ν для ряда значений ε . Вид дисперсионных кривых сильно меняется при малых изменениях ε ($\Delta\varepsilon \sim 0.1\varepsilon_1$) вблизи некоторых значений ε . Причиной этого может быть квантовый (дискретный) характер формирующихся в моделях РЗС волн ФП и потенциала (длины бегущих и стоячих волн определяются размерами системы, фазы колебаний дискретны). Кроме того, малые изменения фаз колебаний ФП вблизи значений $0, \pm\pi/2$ при малом изменении ε могут менять направления движения волн и вид дисперсионных кривых.

Г. Н. Дремова¹, В. В. Дремов¹, А. В. Тутуков²

¹Российский федеральный ядерный центр,

²Институт астрономии РАН

СВЕРХСКОРОСТНЫЕ ЗВЕЗДЫ: ТЕОРИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

Сверхскоростные звезды (*hypervelocity stars*, СЗ) — термин еще не устоявшийся, введенный для нового класса звезд, пространственные скорости которых заметно превышают скорость освобождения для центра Галактики.

Среди десятка сценариев, объясняющих феномен СЗ, наибольшим вниманием пользуется сценарий динамического захвата тесной двойной системы (ТДС) гравитационным полем сверхмассивной черной дыры (СМЧД), предложенный в 1988 г. [1].

Представляет интерес оценка «гарантированного» выброса одного из компонентов ТДС, в результате которого звезда способна избежать фатальных разрушений вследствие приливной гравитации СМЧД, сохранив при этом высокую пространственную скорость. Для этого моделирование проводилось в постановке N -тел, рассматривающей компоненты ТДС как структурированные объекты, разбитые на N гравитирующих элементов, радиальное распределение по массе которых соответствует политропе с индексом $n = 3$ согласно решению уравнения Эмдена. Решение системы уравнений движения гравитирующих N элементов компонентов ТДС, записанных в ньютоновской форме, позволяет оценить потерю массы звездами на различных удалениях от СМЧД и сформулировать критерии выживаемости звезд.

Библиографические ссылки

1. *Hills J.* Hyper-velocity and tidal stars from binaries disrupted by a massive Galactic black hole // *Nature*. — 1988. — Vol. 331. — P. 687–689.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАГРЕВА АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 209458b

Одним из ключевых факторов, определяющих структуру и динамику верхних атмосфер «горячих юпитеров», является нагрев атмосферы излучением звезды. Известно, что энергия поглощенного излучения частично переизлучается, а частично переходит в тепло, то есть нагрев атмосферы излучением происходит с некоторой эффективностью, колеблющейся в диапазоне от 0 до 1. Для определения этого ключевого параметра необходимо рассчитать скорости процессов фотоионизации и фотодиссоциации, в ходе которых энергия излучения переходит в кинетическую энергию фотоэлектронов. Далее нужно определить, какая доля от начальной энергии фотоэлектронов в итоге переходит в тепло. В ранее опубликованных работах эффективность нагрева или не рассчитывалась в явном виде, или выбиралась произвольно. При этом не принималась во внимание зависимость эффективности нагрева от высоты, а вводилось одно значение для всей атмосферы. В работе с помощью модели термосферы, описанной в [1], определен высотный профиль эффективности нагрева и рассчитано, какая доля энергии надтепловых фотоэлектронов переходит в тепло. Приведены результаты, полученные для «горячего юпитера» HD 209458b — первой открытой транзитной экзопланеты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (пр. 11-02-00479а), программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы», гранта НШ-3602.2012.2, гранта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

Библиографические ссылки

1. *Shematovich V. I., Bisikalo D. V., Gérard J.-C. et al.* Monte Carlo model of electron transport for the calculation of Mars dayglow emissions // *Journal of Geophysical Research (Planets)*. — 2008. — Vol. 113. — P. 2011.

М. С. Кирсанова, В. В. Акимкин,
Я. Н. Павлюченков, Д. З. Вибе
Институт астрономии РАН

ДРЕЙФ ПЫЛИ В ЗОНАХ НП

Представлены результаты анализа механизмов выметания пыли из зон НП вокруг молодых звезд. Цель исследования — интерпретация изображений зон НП в инфракрасном диапазоне на основе детального радиационного химико-динамического моделирования. Рассмотрены два основных механизма выметания пыли — динамическое выдувание потоком газа в расширяющейся зоне НП и давление излучения центральной звезды. Показано, что мелкая пыль подвержена действию только первого механизма, будучи динамически замороженной в газ. На крупную пыль действуют оба механизма, что приводит к формированию двойного пылевого кольца вокруг центральной звезды. Высказано предположение, что именно крупная пыль ответственна за формирование двойных кольцевых структур на ИК-изображениях зон НП в диапазоне 22—70 мкм, а не очень маленькие пылинки (так называемые *very small grains*), как это часто считается. Показано, что при описании пространственной дифференциации пылинок различных размеров необходимо учитывать заряд пылинок.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-02-31248 мол_а и 13-02-00642 А.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАБЛЮДЕНИЙ
И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
В КОСМИЧЕСКОМ АСТРОМЕТРИЧЕСКОМ
ЭКСПЕРИМЕНТЕ ОЗИРИС**

Разработана приближенная к реальности модель проведения наблюдений и обработки результатов в космическом астрометрическом эксперименте «ОЗИРИС». Для проведения моделирования был создан численный код на языке Fortran, который позволяет автоматически моделировать распределение звезд, процесс наблюдений, выполнять формирование системы уравнений МНК для неизвестных поправок и ее решение. Численные эксперименты показали, что даже схема из 105 распределенных по сфере звезд, разбитая на подобласти, состоящие из четырех звезд каждая, позволяет одновременно с высокой точностью получать как значения технических параметров инструмента, так и поправки к координатам наблюдаемых звезд. В дальнейшем, при возможном возобновлении проекта космического астрометрического интерферометра, полученные результаты будут иметь важное значение и могут быть использованы как отправная точка в усложнении модели, еще большем приближении ее к реальности и возможном применении при обработке реальных данных.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00231, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт 02.740.11.0247).

О ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ МАЗЕРОВ МЕТАНОЛА II КЛАССА

Особый интерес представляет выяснение причины периодической переменности, которая обнаружена в ряде ярких метанольных мазеров II класса. Мы предполагаем, что периодическая переменность может быть объяснена вариациями температуры пыли в аккреционном диске вокруг молодой двойной звездной системы с, по крайней мере, одним массивным компонентом.

Целью данной работы было исследование влияния покрытия массивного компонента двойной системы горячим газом, нагретым спиральной ударной волной в центральной области диска, на яркость метанольных мазеров II класса в аккреционном диске.

Расчеты показали, что оптическая толщина мазерных переходов, τ значительно изменяется во время покрытия массивного компонента горячим газом. При этом можно выделить три области диска, которые отличаются поведением τ во время покрытия. Область 1 находится на расстояниях от 15 до 50 а. е. от центра диска. Вне покрытия τ переходов на 6.7 и 12.1 ГГц в области 1 отрицательна, то есть работает мазерное усиление (МУ). На 9.9 и 107 ГГц в этой области τ положительна, то есть МУ отсутствует. Во время покрытия поглощение на 107 ГГц сменяется МУ, а МУ на 6.7 и 12.1 ГГц возрастает, и тем сильнее, чем ниже вязкость вещества диска. При низкой вязкости на некоторых фазах покрытия МУ на 107 ГГц может сменяться поглощением. В случае высокой вязкости МУ на 107 ГГц во время покрытия только возрастает. Во время покрытия поглощение на 9.9 ГГц в области 1 возрастает тем сильнее, чем ниже вязкость вещества диска. Область 2 находится на 50—200 а. е. от центра диска. В этой области τ 6.7, 12.1 и 107 ГГц во время покрытия меняет свой знак с положительного на отрицательный, а на 9.9 ГГц — с отрицательного на положительный. Область 3 находится на 200—400 а. е. от центра диска. В ней τ перехода на 6.7 ГГц ведет себя так же, как и в области 2. Отличие состоит в том, что τ 12.1 и 107 ГГц во время и вне покрытия в области 3 в основном положительна. На 9.9 ГГц вне покрытия τ отрицательна и МУ возрастает во время покрытия.

РАЗЛОЖЕНИЕ ГАМИЛЬТониАНА ПЛАНЕТНОЙ ЗАДАЧИ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ЯКОБИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПУАНКАРЕ

Представлен алгоритм разложения гамильтониана планетной задачи в ряд Пуассона. Гамильтониан записан в системе координат Якоби, которая предпочтительна при исследовании динамической эволюции планетных систем. Используется вторая система элементов Пуанкаре, что позволяет упростить угловую часть разложения. В этом случае явно определена только одна угловая переменная — средняя долгота [1].

Разложение гамильтониана строится с использованием системы компьютерной алгебры Piranha [2]. Piranha — новая, развивающаяся специализированная система, предназначенная для аналитических вычислений, в том числе при решении задач небесной механики. Для уменьшения числа слагаемых разложения, а также для экономии оперативной памяти и дискового пространства компьютера построение разложения ведется с использованием специальных функций небесной механики. В разложении присутствуют функции Бесселя, коэффициенты Лапласа и операторы Ньюкома. Планируется представить первые члены разложения гамильтониана четырехпланетной задачи, полученные с использованием этого алгоритма.

Библиографические ссылки

1. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. — М. : Наука, 1968.
2. *Biscani F.* The Piranha algebraic manipulator. — 2009. — P. 24. arXiv:0907.2076v1.

**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ
НАБЛЮДЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД
ТИПА FK COMAE**

В работе представлены результаты фотометрических и спектральных наблюдений для двух звезд типа FK Com. Для звезды FK Comae получена кривая блеска, на основании которой построена карта поверхностных температурных неоднородностей. По карте определено положение активной долготы. Полученный результат согласуется с данными, опубликованными ранее, и, по-видимому, указывает на продолжение тренда перемещения активной долготы, обнаруженного ранее в работах других авторов. По спектральным наблюдениям получены профили линий бальмеровской серии для звезд FK Comae и V1794 Cygni

Г. Е. Самбаров, А. М. Черницов
Национальный исследовательский
Томский государственный университет

ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ УСКОРЕНИЙ В УРАВНЕНИЯХ ДВИЖЕНИЯ АСЗ НА ТОЧНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ

В работе приводится полное алгоритмическое описание способа, позволяющего анализировать модели движения астероидов при построении доверительных областей. Выбор модели этим способом, в отличие от традиционно применяемых способов, тесно связывается с размерами доверительных областей и смещениями НК-оценок параметров номинальных орбит, определяемых для разных (альтернативных) моделей движения исследуемого объекта. Рассмотрены варианты способа как в линейной, так и в нелинейной постановке. Основой способа является показатель, имеющий геометрически ясный и простой вид. Эффективность рассматриваемого способа показана для ряда астероидов, сближающихся с Землей. В проведенном исследовании модель движения включала в себя гравитационные возмущения от больших планет, Луны, Плутона, сжатия Земли и релятивистские эффекты от Солнца.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

П. В. Скрипниченко¹, Т. Ю. Галушина²

¹Уральский федеральный университет,

²Томский государственный университет

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ЭРОС — НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ АСТРОМЕТРИЧЕСКОЙ И НЕБЕСНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Процедура подготовки к проведению позиционных наблюдений — трудоемкая задача, требующая наличия многофункционального программного обеспечения. Начиная от выбора объектов для исследования и заканчивая формированием программы наблюдений — каждый этап требует времени и вдумчивого подхода.

Программный комплекс EROS (Ephemeris Researches and Observation Services) призван упростить и автоматизировать все этапы подготовки к позиционным наблюдениям. Модульная структура ЭРОСа позволяет пользователю решать как отдельные задачи, так и весь комплекс работ в целом. В данной работе описываются концепция программного продукта, а также реализация алгоритмов — основных структурных элементов ЭРОСа.

Программный комплекс ЭРОС позволит решать следующие задачи:

- вычисление продолжительности ночи (сумерек) по дате наблюдений;
- вычисление условий видимости конкретного объекта (поиск объекта);
- выдачу списка объектов, пригодных для наблюдений на заданную ночь;
- расчет эфемерид, в том числе обзорных эфемерид (для объектов с плохо определенной орбитой);
- составление программы наблюдений на основе пользовательских настроек (с учетом калибровочных снимков);
- синхронизацию базы данных наблюдений с базой МРС, улучшение элементов орбит и автоматическое обновление собственного каталога элементов орбит астероидов и пр.

О. С. Угольников¹, А. Ф. Пунанова^{2,3},
В. В. Крушинский³

¹Институт космических исследований РАН,

²Университет г. Лидс, Великобритания,

³Астрономическая обсерватория УрФУ

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЮЖНОЙ ПОЛЯРНОЙ СТРАТОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ В ТЕНИ ЗЕМЛИ

В работе обсуждаются результаты спектральных измерений с высоким разрешением элемента поверхности Луны во время полного лунного затмения 10 декабря 2011 г., проведенных с 1.2-м телескопом Коуровской обсерватории. Геометрия явления аналогична космическим лимбовым экспериментам, где роль измеряющего спутника играет Луна. Это позволяет выделять отдельные слои стратосферы над местностью, удаленной на тысячи километров от пункта наблюдения (над Антарктидой).

В полученных спектрах выделены линии и широкие полосы поглощения ряда атмосферных компонент. Линии газов с известным пространственным распределением — кислорода O_2 и тетракислорода O_4 — используются для определения эффективных траекторий распространения излучения, полосы других газов — O_3 , NO_2 , H_2O — для определения содержания этих газов вдоль траектории. Полное описание и результаты эксперимента описаны в [1].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-05-00501, а также ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» (контракт 16.518.11.7074).

Библиографические ссылки

1. *Ugolnikov O. S., Punanova A. F., Krushinsky V. V.* Trajectory retrieval and component investigations of the southern polar stratosphere based on high-resolution spectroscopy of the totally eclipsed moon surface // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* — 2013. — Vol. 116. — P. 67.

ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ (ПАУ) ВО ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ НН

ПАУ являются наименьшими компонентами пылевой составляющей межзвездной среды, однако, несмотря на малость размеров, играют большую роль в различных физических и химических процессах. Также ПАУ используются в качестве диагностического инструмента для оценки физических параметров различных объектов, к примеру комплексов НН. Статистический подход к изучению свойств излучения ПАУ и других характеристик комплексов НН может дать информацию о том, какие факторы влияют на содержание ПАУ. Одним из таких факторов является металличность среды: доля ПАУ в общей массе пыли растет с увеличением металличности. Исследования показывают, что такая корреляция носит локальный характер и обусловлена различием физических параметров в средах с разной металличностью. Данная работа направлена на изучение того, как жесткость ультрафиолетового поля может влиять на содержание ПАУ, а также как данная величина меняется в процессе эволюции НН комплексов. Для решения вопроса привлекаются данные наблюдений в оптическом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах для более ста внегалактических комплексов НН. На основе наблюдений проведен анализ полученных корреляций между жесткостью межзвездного поля излучения, отношением потоков на 8 и 24 мкм и возрастом областей. Сделан вывод о том, что жесткость поля является наиболее важным фактором, определяющим содержание ПАУ в среде: при жестком поле ПАУ, очевидно, разрушаются энергичными фотонами с энергиями более $\sim 5\text{--}10$ эВ. Также показано, что эволюционные эффекты могут оказывать влияние на содержание ПАУ: в процессе эволюции НН комплексов содержание ПАУ в целом уменьшается, при этом частично компенсируется разрушением более крупных пылинок, излучающих на 24 мкм.

ТОЧНОСТЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОПОТЕНЦИАЛА И ЕГО ГРАДИЕНТА В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

На сегодняшний день существует множество высокоточных численных моделей геопотенциала. Его представляют отрезком ряда Лапласа по шаровым функциям. Параметрами модели выступают гармонические коэффициенты ряда Лапласа. Численные модели используются для представления не только самого геопотенциала, но и его градиента.

При прогнозировании движения различных объектов в околоземном пространстве необходимо наиболее точное представление градиента геопотенциала. Любые расчеты на компьютерах ограничены точностью представления вещественных чисел. И отсюда возникает интересная задача оценить количество гармоник, влияющих на значение градиента геопотенциала в конкретной точке околоземного пространства при компьютерных расчетах.

Численные модели геопотенциала строятся на основе разнородных измерений. Естественно, что параметры модели, гармонические коэффициенты, известны лишь с какой-то точностью. Каждая модель представляет свои оценки погрешностей для гармонических коэффициентов. Интересно оценить внутреннюю точность представления геопотенциала и его градиента в околоземном пространстве для разных моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (грант 6.37.110.2011) и РФФИ (грант 11-02-00232-а).

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ОРБИТЫ В ОБЩЕЙ ЗАДАЧЕ ТРЕХ ТЕЛ

В общей задаче трех тел равных масс с нулевым угловым моментом известны четыре периодические орбиты [1]: орбита Шубарта, S -орбита, орбита Мура и орбита Брука. Для этих орбит в моменты времени, кратные периоду (в том числе в начальный момент времени), центральное тело находится в центре масс тройной системы, ровно посередине между крайними телами. В данной работе проводился поиск новых периодических орбит, которые обладают тем же свойством.

Поиск новых орбит выполнялся в пространстве параметров (k, φ) , где k — вириальный коэффициент (отношение кинетической энергии к модулю потенциальной энергии тройной системы), меняется в пределах $k \in (0; 1)$; φ — угол наклона вектора скорости центрального тела к отрезку прямой, проходящей через три тела, изменяется в пределах $\varphi \in (0; \pi/2)$. Параметры (k, φ) задаются в начальный момент времени. Поиск осуществлялся путем сканирования области возможных значений параметров (k, φ) . Алгоритм поиска заключался в минимизации функционала, равного сумме квадратов разностей начальных и текущих значений координат и скоростей тел тройной системы.

В результате исследования было найдено около двадцати периодических орбит, в том числе четыре известные орбиты, упомянутые выше. Были построены траектории движения тел для новых орбит. Среди найденных орбит присутствуют орбиты с периодами, кратными периодам известных ранее орбит.

Библиографические ссылки

1. Мартынова А. И., Орлов В. В., Рубинов А. В. Структура областей устойчивости неиерархических тройных систем // Астрон. журн. — 2009. — Т. 86. — С. 765—777.

Стеновые доклады



И. Ю. Алексеев¹, О. В. Козлова¹,
А. В. Кожевникова²

¹Научно-исследовательский институт
«Крымская астрофизическая обсерватория»,

²Уральский федеральный университет

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ IN COM НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Представлены результаты исследования фотометрической и спектральной активности звезды IN Com на основе наблюдений, полученных с 2003 по 2013 г. Расчеты запятненности показали, что фотометрическая переменность IN Com полностью описывается в рамках гипотезы среднеширотных пятен на широтах от 39 до 55°. Общая площадь пятен изменяется от 7 до 22 % полной поверхности звезды в разные годы. Разность температур спокойной фотосферы и пятен составляет 600 К. Анализ зависимости долговременной активности звезды от времени с 1983 по 2013 г. показал, что изменения среднего блеска, общей площади пятен и их средней широты показывают цикличность с характерными временами 7, 14 и 21 г. На интервалах времени 1986—1992 и 1994—2007 гг. наблюдается широтный дрейф пятен к экватору со скоростью от -1.0 до -1.3 °/г. При этом происходит рост площади пятен с уменьшением их широты, что аналогично солнечной диаграмме бабочек Маундера, обнаруженной ранее у ряда запятненных звезд.

Проведенные многолетние спектральные наблюдения IN Com с высоким разрешением ($R = 20\,000$) в области линий H_α , H_β и He I 5876 показали присутствие в линии H_α протяженной 2-компонентной эмиссии, границы которой могут достигать значений ± 400 км/с. Параметры эмиссии показывают как переменность, обусловленную вращательной модуляцией с периодом вращения звезды, так и масштабную переменность на многолетней временной шкале. Обнаруженная переменность параметров эмиссии H_α свидетельствует о тесной связи с фотополяриметрической активностью звезды, что позволяет нам связать многолетнюю спектральную переменность с циклами активности IN Com.

PlanetPack: ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ПАКЕТ ОБРАБОТКИ ДОПЛЕРОВСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОИСКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ

PlanetPack — это новый профессиональный программный пакет обработки временных рядов доплеровской лучевой скорости, разработанный нами для облегчения и стандартизации задач поиска экзопланетных систем, определения и уточнения их характеристик, а также для первичного исследования их динамики.

Некоторые из алгоритмов обработки, доступных в PlanetPack:

1. Улучшенная подгонка модели экзопланетной системы на основе метода максимального правдоподобия, учитывающего наличие дрожания лучевой скорости.
2. Возможность подгонки не только невозмущенной (кеплеровской) модели системы, но и ньютоновой модели, учитывающей планетные возмущения.
3. Периодограммы, учитывающие упомянутое дрожание лучевой скорости, а также вероятные неточности базовой модели данных (т. н. «рекурсивные» или «остаточные» периодограммы).
4. Подгонка планетной модели с учетом автокоррелированного дрожания лучевой скорости («красный шум»).
5. Различные аналитические и численные методы для решения задач по определению статистической значимости (шумовые уровни периодограмм, калибровка доверительных областей, сравнение альтернативных моделей).

PlanetPack написан практически на чистом языке C++ стандарта 1997/2003 гг. и может работать со всеми основными компьютерными платформами и операционными системами. Пакет регулярно обновляется. Доступен для загрузки по адресу <http://sourceforge.net/projects/planetpack>.

Работа поддержана РФФИ (проект 12-02-31119 мол_а) и программой Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной».

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ СПУТНИКОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСОВ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ

При движении искусственного спутника вокруг Земли может наблюдаться явление резонанса, обусловленное зональными и тессеральными гармониками гравитационного потенциала планеты.

Влияние диссипативных эффектов, например эффекта Пойнтинга—Робертсона, может приводить к захвату в резонанс или прохождению через него. При попадании в резонансные зоны происходит формирование стохастических траекторий.

Для получения численных оценок изменения позиционных элементов орбит (большой полуоси, эксцентриситета, наклона) при прохождении через зоны резонанса в данной работе используется «Численная модель движения ИСЗ». Дальнейшее изучение областей стохастического движения в окрестности резонансов высоких порядков будет выполняться на основе анализа высокоточных апостериорных эфемерид спутников глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS с помощью программного комплекса «Celestial Mechanics», разработанного в Бернском университете.

Для загрузки апостериорных эфемерид ГЛОНАСС и GPS были написаны скрипты на языке Python 3.3. Скрипты обеспечивают загрузку данных с серверов ИАЦ ЦНИИМАШ и IGS на заданную дату или для требуемого промежутка времени. Написанные сценарии являются независимыми от операционной системы и используют только стандартные библиотеки.

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ АМ ЛЕО НА 1.2-м ТЕЛЕСКОПЕ АО УрФУ

Затменная переменная звезда АМ Лео является достаточно трудным объектом для спектрального исследования на 1.2-м телескопе по трем причинам: она имеет достаточно малый блеск $9.3\text{--}9.8^m$, короткий период $P = 0.3658015^d$, что не позволяет долго копить сигнал из-за быстрого изменения вида спектра, и близкого оптического соседа 11^m на расстоянии в $11''$. Поэтому для получения в спектре достаточно большого отношения сигнал-шум наблюдения в разные ночи проводились строго на определенных фазах с последующим суммированием получившихся спектров. В течение апреля 2013 г. было получено 18 спектров АМ Лео для 12 фаз, равномерно распределенных по периоду. Для одной фазы суммированы три спектра, для трех — по два, для семи получено по одному спектру.

Из кривых лучевых скоростей, построенных по линии H_α , наиболее сильной в спектре АМ Лео, были получены значения полуамплитуд лучевых скоростей K_1 , K_2 , лучевой скорости системы относительно Солнца V_0 , отношения масс q , масс компонентов M_1 , M_2 и их больших полуосей a_1 , a_2 . Результаты приведены ниже и являются предварительными.

V_0 , км/с	K_1 , км/с	K_2 , км/с	$q = K_1/K_2 = M_2/M_1$
-19.2 ± 4.3	104.4 ± 2.5	239.5 ± 3.1	0.44 ± 0.02

M_1 , M_\odot	M_2 , M_\odot	a_1 , R_\odot	a_2 , R_\odot
1.08 ± 0.03	0.47 ± 0.05	0.76 ± 0.03	1.73 ± 0.04

ГОМОГЕНИЗИРОВАННЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЗВЕЗДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЛЯ ЗВЕЗД РАССЕЯННОГО СКОПЛЕНИЯ NGC 188

Рассеянное скопление NGC 188 является старым скоплением с большим числом звезд в нашей Галактике. Оно тщательно изучено и имеет хорошо известный возраст, расстояние, покраснение и металличность (основные данные представлены на сайте проекта WEBDA). Звезды из этого скопления могут быть использованы при изучении звездной эволюции и в качестве стандартов спектральной классификации, если их основные астрофизические параметры надежно определены. Эффективная температура T_{eff} и абсолютная звездная величина M_v являются одними из наиболее важных параметров, тесно связанных с массой, гравитацией и светимостью звезд.

В настоящей работе были отобраны и проанализированы независимые каталоги фотометрических данных рассеянного скопления NGC 188, содержащие показатели цвета и звездные величины V . Ошибки оценивались из взаимного сравнения данных. Результаты сравнения использовались для гомогенизации данных путем их усреднения с весами, обратно пропорциональными квадратам ошибок [1]. Для подготовки гомогенизированного каталога эффективных температур T_{eff} этих звезд на основе фотометрии использовалась недавняя калибровка Casagrande et al. (2010) [2] для F-G-K звезд главной последовательности и субгигантов. Получена и рассмотрена улучшенная HR-диаграмма (как отношение между эффективными температурами и абсолютными звездными величинами этих звезд) для NGC 188.

Библиографические ссылки

1. *Malyuto V., Shvelidze T.* Determination of Homogenized Effective Temperatures from Stellar Catalogs // *Baltic Astronomy*. — 2011. — Vol. 20. — P. 91–106.
2. *Casagrande L., Ramirez I., Melendez J. et al.* Teff and Fbol from Infrared Flux Method // *Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — Vol. 512. — P. 54.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ КОУРОВСКОЙ АО УрФУ В 2013 г.

На телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета регулярно проводятся позиционные ПЗС-наблюдения малых тел Солнечной системы. В программу наблюдений включены в основном слабые астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ); АСЗ, орбиты которых определены по малому числу наблюдений, и недавно открытые АСЗ и кометы.

В 2013 г. наблюдались 158 астероидов и 16 комет. Среди объектов наблюдений были астероид (27736) Ekaterinburg и АСЗ (21088) Chelyabinsk, открытые Э. Элстом и названные им в честь уральских городов. Особо следует отметить наблюдения АСЗ (99942) Apophis, АСЗ (367943) 2012 DA14 и кометы C/2012 S1 (ISON). (99942) Apophis наблюдался в феврале во время сеанса координированных наблюдений, организованного ИНАСАН, астероид (367943) 2012 DA14 — 17 февраля 2013 г. после сближения с Землей, а комета C/2012 S1 (ISON) — в феврале и ноябре 2013 г. перед сближением с Солнцем.

Обработка наблюдений выполнялась с помощью программ ЭПОС и Izmccd. Всего определено 1 050 положений. Из них 424 положения 65 астероидов, сближающихся с Землей (среди которых 23 потенциально опасных), и 357 положений комет. Помимо эфемеридных объектов определялись положения других астероидов, зарегистрированных на ПЗС-кадрах. Средняя ошибка одного наблюдения астероидов, имеющих блеск до 16.5^m , находится в пределах $0.01\text{--}0.3''$; ошибки наблюдений более слабых астероидов ($17.5\text{--}19^m$) достигают $0.5\text{--}0.7''$, а некоторых слабых быстро движущихся АСЗ — превышают $1''$. Средняя ошибка одного наблюдения комет $10\text{--}16.0^m$ составляет $0.32''$, ошибки комет слабее 17.5^m немного больше $1''$.

Результаты наблюдений всех объектов переданы в базу данных международного Центра малых планет, а результаты наблюдений АСЗ (99942) Apophis — также в ИНАСАН в материалы Экспертной группы по космическим угрозам.

Благодарим В. А. Шора и К. В. Холшевникова за информацию об астероиде (27736) Ekaterinburg.

А. А. Калинин
Уральский федеральный университет

**АНАЛИЗ ЗАТМЕННОГО СПЕКТРА
СОЛНЕЧНОГО ПРОТУБЕРАНЦА 29 МАРТА 2006 г.
С УЧЕТОМ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ
НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ**

Проведенное ранее моделирование спектра излучения солнечного протуберанца в линиях Н и К ионизованного кальция и Н ϵ водорода дополнено учетом излучения в непрерывном спектре за счет томсоновского рассеяния на свободных электронах. На основе полученных диагностических диаграмм предложена уточненная методика определения физических параметров в протуберанце 29 марта 2006 г.

**ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДЕР NGC 6334I и NGC 6334I(N)
ПО ОТДЕЛЬНЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ЛИНИЯМ
МОЛЕКУЛ**

Наблюдения молекулярных ядер NGC 6334I и NGC 6334I(N) были проведены в 1997—1999 гг. на 15-м радиотелескопе SEST (Swedish-Europe South Telescope) в LaSilla (Чили). Каталоги отождествленных спектральных линий молекул представлены в [1]. Нами получены оценки физических параметров данных источников по излучению молекул, имеющих всего от одного до шести переходов. Следуя модификации вращательных диаграмм для молекул с одним или двумя переходами [2], даны оценки вращательной температуры, лучевой концентрации и химического обилия для следующих молекул: $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$, ^{13}CO , $^{33}\text{SO}_2$, C^{13}CS , C^{18}O , C^{33}S , C^{34}S , $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$, CH_2CHCN , $\text{CH}_3^{13}\text{CN}$, CH_3CHO , $g\text{-CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, H^{13}CCCN , H^{15}NC , H_2^{13}CO , H_2CCO , HCCCN , HCN , HCO^+ , HDO , NH_2CHO , SO , SO_2 , $t\text{-HCOOH}$. Диапазон температур широкий (4—200 K), ярко отражающий наличие в данных источниках горячих областей, характерных для процесса звездообразования. Для молекул, излучение которых наблюдается только в NGC 6334I, оценки вращательных температур в среднем выше, чем для молекул, излучение которых зарегистрировано в обоих молекулярных ядрах. Это может свидетельствовать о более раннем эволюционном статусе молекулярного ядра NGC 6334I(N).

Библиографические ссылки

1. *Kalinina N. D., Sobolev A. M., Kalenskii S. V.* Spectral survey of molecular cores NGC 6334I and NGC 6334I(N) in the range 80.5–242.0 GHz // *New Astron.* — 2010. — Vol. 15. — P. 590—608.
2. *Hatchell J., Thompson M. A., Millar T. J., MacDonald G. H.* A survey of molecular line emission towards ultracompact HII regions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1998. — Vol. 133. — P. 29—49.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА АСТРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Работа с системой контроля облачности «Boltwood cloud sensor» показала ее существенные недостатки: сильную зависимость показаний от температуры воздуха, нестабильность нуля-пункта, возможность оценивать состояние облачности только в небольшой области вблизи зенита. Как следствие, возникла необходимость создания иного способа определения качества атмосферы, а именно, определение облачного покрова по изображениям в видимом диапазоне.

Для получения снимков неба была выбрана ПЗС-камера Prosilica GC1380 с широкоугольным объективом Micro Digital MDL-1634D. В системе предусмотрен мониторинг температуры внешнего и подкупольного пространства, а также наличия/отсутствия дождя. Для управления комплексом используется микроконтроллер Atmega168-20AU.

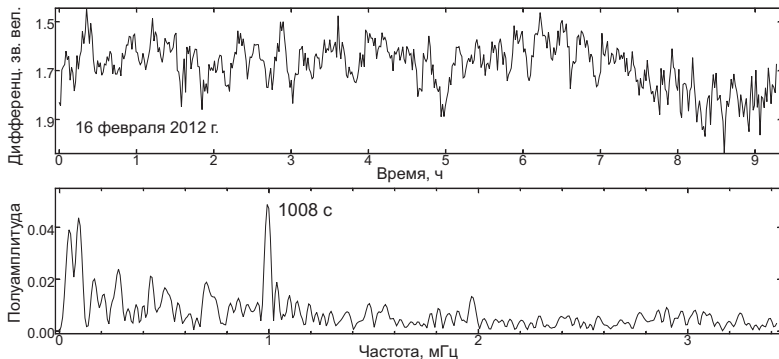
Для общения с аппаратной частью системы было разработано программное обеспечение, позволяющее получать непрерывный информационный поток, включая изображения неба и данные с датчиков погодных условий.

Изображения транслируются на объединенный сайт кафедры астрономии и геодезии и обсерватории <http://astro.ins.urfu.ru/> и на отдельный веб-ресурс <http://observ.astro.usu.ru/all-sky>, на котором имеется дополнительная возможность анализа данных (текущее состояние, заданный промежуток времени). Графическое представление данных осуществляется с помощью API Google Analytics «Google Charts».

В функционал программного обеспечения также входит последующая обработка изображений: автоматический поиск и отождествление звезд, видимых на кадре, и построение карт прозрачности неба над пунктом наблюдения.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОЛЯРА 1RXS J063631.9+353537

Колебание блеска с периодом 1008 с, наблюдавшееся в промежуточном поляре 1RXS J063631.9+353537, имеет значительную амплитуду и легкообнаружимо. Однако период этого колебания был определен с недостаточной точностью. С целью высокоточного определения периода на 70-см телескопе Коуровской обсерватории мы провели фотометрические наблюдения этого объекта продолжительностью 250 ч в 2012–2013 гг. (42 ночи). На рисунке показан пример кривой блеска и ее амплитудного спектра. Мы обнаружили два колебания с периодами $P_1 = 932.9127 \pm 0.0011$ и $P_2 = 1008.30797 \pm 0.00038$ с и полуамплитудами $A_1 = 0.012^m$ и $A_2 = 0.039^m$. Колебание с периодом P_1 может вызываться несинхронным вращением магнитного белого карлика, а колебание с периодом P_2 — переизлучением первого колебания структурами двойной системы. Относительная ошибка периода второго колебания 4×10^{-7} . Это позволяет получить эфемериду колебания с формальным сроком службы 85 лет и использовать ее в будущих наблюдениях для исследования процессов ускорения или замедления вращения белого карлика.



Пример кривой блеска (верхняя панель) и амплитудного спектра (нижняя панель)

Э. Д. Кузнецов, П. Е. Захарова,
Д. В. Гламазда, А. И. Шагабутдинов
Астрономическая обсерватория УрФУ

ПОИСК ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСОВ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ, ПО ПОЗИЦИОННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ АО УрФУ

На телескопе СБГ АО УрФУ проводятся регулярные позиционные наблюдения высокоорбитальных космических объектов. В течение 2013 г. определено свыше 1 300 точных положений для более чем 60 высокоорбитальных объектов. По результатам наблюдений построено более 80 улучшенных орбит. Уточнение орбит выполнялось с помощью программного комплекса «Celestial Mechanics» [1] (разработан в Астрономическом институте Бернского университета).

С помощью «Численной модели движения ИСЗ» [2] (разработана в НИИ ПММ Томского государственного университета) на основе улучшенных элементов орбит выполнено моделирование движения объектов на интервале времени до 2016 г. Выделены объекты, которые проходят через области резонансов $p : q$ высоких порядков ($6 \leq |p| \leq 50$, $6 \leq |q| \leq 50$). Получены оценки моментов времени входа в резонансные зоны или выхода из них. Наблюдения прохождений объектов через зоны резонансов позволят исследовать устойчивость движения и стохастические свойства динамической эволюции этих объектов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-02-00026-а) и Министерства образования и науки (проект 2.1343.2011).

Библиографические ссылки

1. *Beutler G.* Methods of Celestial Mechanics. — В.; Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. — Vol. 2.
2. *Бордовицына Т. В., Батулин А. П., Авдюшев В. А., Куликова П. В.* Численная модель движения ИСЗ. Новая версия // Изв. вузов. Физика. — 2007. — Т. 50, вып. 12/2. — С. 60—65.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Динамичное развитие геодезической отрасли, связанное с внедрением новых технологий получения пространственных данных, позволяет решать геодезические задачи на более высоком уровне по сравнению с традиционными технологиями.

Одной из таких технологий является лазерное сканирование — воздушное и мобильное. Применение лазерного сканирования позволяет выполнять геодезические полевые работы более эффективно, чем при использовании традиционных способов. Особенностью технологий мобильного и воздушного лазерного сканирования являются высокая точность и производительность. Технология воздушного лазерного сканирования позволяет создавать высокоточные цифровые модели местности, цифровые модели рельефа, ортофотопланы, топографические планы всего масштабного ряда. Мобильное лазерное сканирование позволяет выполнять топографическую съемку линейных объектов (автодороги, железные дороги, мосты, тоннели, ЛЭП), получать 3D модели объектов, продольные и поперечные профили автодорог, продольные и поперечные уклоны проезжей части, цифровую модель рельефа и цифровую модель дорожного покрытия.

В работе приведены примеры получения рельефа на участке местности по данным воздушного лазерного сканирования и структурных линий автодороги по данным мобильного лазерного сканирования.

Глобальные навигационные спутниковые системы позволяют определять точное местоположение объекта, что является одной из главных задач в геодезической деятельности. В список геодезических задач, решаемых при помощи ГНСС, входят построение государственных геодезических сетей, создание планово-высотного опорного обоснования, спутниковое нивелирование, создание топографических планов, отслеживание деформаций поверхности земли и инженерных сооружений. В данной работе возможности ГНСС продемонстрированы на основе создания топографического плана масштаба 1 : 500 с использованием спутниковых приемников Leica GS10, Leica GS15.

ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ В ПЕТЛЯХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ЛИНИЯХ КАЛЬЦИЯ Н И К CaII И ВОДОРОДА H ϵ

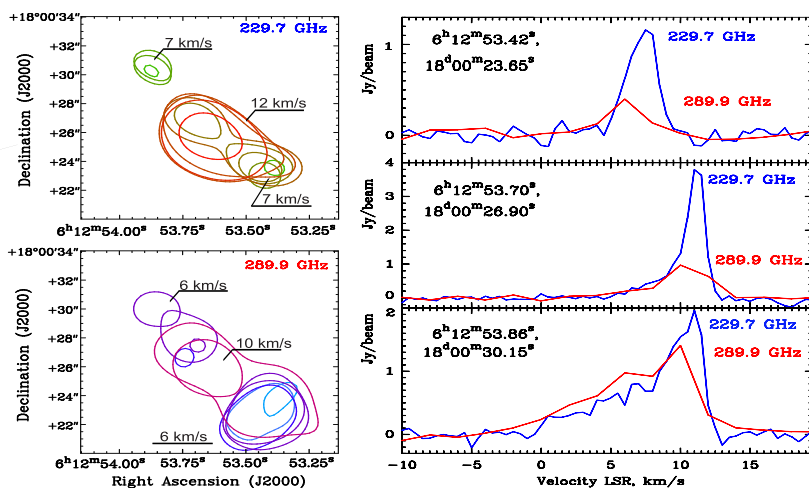
В работе исследован характер высвечивания плазмы в петельной системе над комплексом активности, состоявшем из двух взаимодействующих активных областей (ar1539 и ar1540), расположенных в южной полусфере Солнца на широте $\varphi = 20\text{--}25^\circ$. Эти области наблюдались нами 4 и 6 августа 2012 г. на юго-восточном лимбе Солнца, а 13, 14 и 15 августа — на юго-западном. Наблюдения были проведены в Коуровской обсерватории с помощью ПЗС-камеры SXV-H9 Starlight Xpress [1040 \times 1396 пк], спектрографа АСП-20 и телескопа АЦУ-5. Разрешение по спектру составляло 0.0306 Å/биниров пиксел, а разрешение по времени — от 0.5 до 2.0 мин. Показано, что плазма в петлях неоднородна по яркости и структуре и высвечивается дискретными участками. Плазменные структуры были систематизированы, составлен каталог и вычислены их доплеровские скорости в горизонтальной плоскости, параллельной лимбу Солнца. Выявлено несколько характерных структур в петлях, наблюдаемых в линиях Н и К CaII:

1. Яркие «линзовидные структуры» (по-видимому, это области наибольшего энерговыделения в петлях). Получено, что наиболее динамичными и связанными с последующими взрывными процессами являются не одиночные линзовидные структуры, а двойные или мультиплетные с различными взаимными лучевыми скоростями. Получены наблюдательные факты последовательного возникновения линзовидных структур рядом с уже имеющимися из неструктурированной плазмы на временных интервалах до нескольких минут.
2. Яркие дуги с плавным наклоном к дисперсии (это протяженные участки очень горячих петель).
3. «Штрихи» малой яркости иногда с наклоном к дисперсии и большими скоростями по лучу зрения (это части петель после взрывов).

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЯДРА S255 N В РАДИОЛИНИЯХ МЕТАНОЛА

В молекулярном ядре S255 N в линиях молекулы метанола (по наблюдениям на интерферометре SMA) выделяются пики излучения с V_{lsr} от 6 до 12 км/с (см. рисунок). В квазитепловых линиях метанола наиболее яркие пики излучения зарегистрированы на V_{lsr} 6 и 10 км/с, в мазерных линиях — на 12 км/с. Пик излучения метанола на 12 км/с совпадает с пиком излучения в континууме (Wang, 2011) и с группой мазерных пятен на частоте 44 ГГц (Kurtz, 2004). Профили линий имеют синее крыло, что свидетельствует о присутствии истечения.

Проведены предварительные оценки физических параметров по тепловым компонентам линий с V_{lsr} 6 и 10 км/с.



S255 N в линиях метанола на 229.7 ГГц (мазер класса I) и 289.9 ГГц (квазитепловая линия). Рензиграмма излучения (слева) и спектры в выделенных направлениях (справа)

ВНУТРЕННЯЯ КИНЕМАТИКА ГАЛАКТИКИ SPRC 27

Целью работы являлось определение наличия полярного кольца в галактике SPRC 27. Для этого была построена и проанализирована кривая вращения скоростей газа и звезд SPRC 27. В качестве данных были использованы спектры, полученные на шестиметровом телескопе БТА в CAO РАН с длиннощелевым спектрометром Scorpio2. Анализ кривой вращения показал совпадение системных скоростей и центров газовой (внешнее кольцо) и звездной (центральная галактика) компонент. Это является подтверждением наличия кинематически выделенного полярного кольца.

Работа частично поддерживалась Госконтрактом № 14.740.11.0800 в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

О. С. Угольников¹, А. Ф. Пунанова^{2,3},
В. В. Крушинский³

¹Институт космических исследований РАН,

²Университет г. Лидс, Великобритания,

³Астрономическая обсерватория УрФУ

ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА И ДИОКСИДА АЗОТА НАД КОУРОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИЕЙ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ ФОНА СУМЕРЕЧНОГО НЕБА

В работе обсуждаются результаты первых спектральных измерений фона сумеречного неба вблизи зенита, начавшихся в августе 2013 г. на 1.2-м телескопе Коуровской обсерватории. В период светлых сумерек, на заходе (восходе) Солнца, происходит изменение геометрии распространения излучения через атмосферу. В спектре фона неба усиливаются полосы газов с максимумом содержания в стратосфере — озона O_3 в интервале 450–700 нм и диоксида азота NO_2 в интервале 400–550 нм. Анализ таких полос позволяет судить о содержании и высотном распределении этих составляющих. Особенно эффективен анализ для диоксида азота [1].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-05-00501, а также ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» (контракт 16.518.11.7074).

Библиографические ссылки

1. *Елохов А. С., Груздев А. Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO_2 на Звенигородской научной станции // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. — 2000. — Т. 36. — С. 831.

Я. И. Хусанова¹, Д. А. Кононов², А. Ю. Сытов²

¹Уральский федеральный университет,

²Институт астрономии РАН

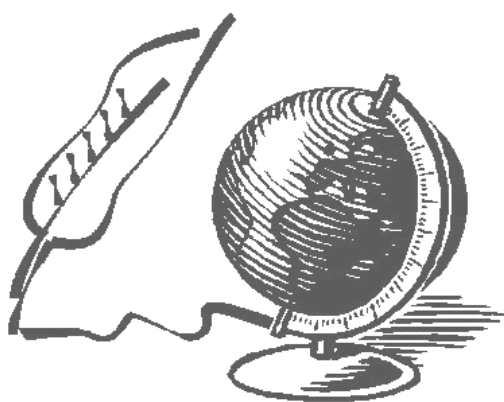
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛОДОЙ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ V 4046 Sgr

Проведены спектральные исследования молодой двойной системы V4046 Sgr. На основе спектральных данных из архива ESO (ID наблюдений 69.C-0481(A) [1]) построены доплеровские томограммы системы. Кроме того, проведено численное моделирование газовой динамики в исследуемом объекте. Сравнение результатов численного моделирования с наблюдательными доплеровскими томограммами позволили отождествить элементы картины течения, дающие основной вклад в профили эмиссионных линий бальмеровской серии. Показано, что основной вклад в излучение дают отошедшие ударные волны, образующиеся в результате движения компонентов системы в газе протопланетного диска.

Библиографические ссылки

1. *Stempels H. C., Gahm G. F.* The close T Tauri binary V 4046 Sagittarii // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 421. — P. 1159–1168.

Из истории науки



Т. Ю. Галушина¹,
П. В. Скрипниченко²

¹Томский государственный университет,

²Уральский федеральный университет

АСТЕРОИДНАЯ ОПАСНОСТЬ: ОТ ПЕРВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ДО НАШИХ ДНЕЙ

В работе рассматривается проблема астероидной опасности в историческом аспекте. Описываются основные этапы осознания человечеством реальности космической угрозы, приводятся примеры приведших к этому событий.

The asteroid hazard problem has been considered in historical perspective. The paper describes the main stages of understanding by mankind of the reality of space threat and contains the examples of events leading up to it.

Введение

С древнейших времен фантазмагорическое зрелище великих комет на небосводе внушало людям трепет и страх и предвещало беду. В представлениях многих народов мира кометы, яркие небесные гости, являлись спутниками катастрофических событий — войн, болезней, голода, а потому в мифах и легендах прошлого кометы, равно как и прочие значительные астрономические явления, неразрывно связаны с приближением неизбежного апокалипсиса. Однако первый астероид был открыт только в 1801 г. [1], и астероиды долгое время не предвещали никакой опасности.

Удивительным и любопытным моментом является тот факт, что в современном мире один из наиболее вероятных сценариев глобальной катастрофы связан с тем же источником, что и в древности, — с кометами и астероидами, сближающимися с Землей. Осознание этой проблемы произошло не одномоментно, но все же можно выделить 70—80-е гг. XX в. как некий ключевой этап в истории противодействия астероидно-кометной опасности [2], а именно как этап привлечения внимания научного сообщества к этой проблеме. Что предшествовало этому осознанию? Ряд открытий, лежащих в основе проблематики астероидно-кометной опасности (АКО).

Астероиды

Первым важнейшим событием в истории АКО стало открытие первого астероида, сближающегося с Землей (АСЗ); это был (433) Эрос, принадлежащий группе Амура, впервые замеченный представителем немецкой астрономии Карлом Виттом в 1898 г. Исследование элементов орбиты астероида выявило практически невероятную по тем временам вещь: в проекции на плоскость эклиптики астероид пересекал орбиту Марса и на достаточно близкое расстояние приближался к орбите Земли. Очевидно, что это оказало своего рода психологическое воздействие на ученое сообщество той эпохи. Правда, справедливости ради стоит отметить, что данный объект в XIX в. практически не рассматривался как потенциальная угроза для Земли, а измерения его параллакса использовались для уточнения расстояний до Земли и Солнца. Со своим «побратимом» по мифологическому происхождению имени, Амуром, Эрос является типичным представителем астероидов, сближающихся с Землей [3].

Совершенствование наблюдательной техники и методик обработки результатов наблюдений способствовало открытию все новых и новых астероидов, сближающихся с Землей, разделяемых впоследствии на четыре группы в зависимости от типа орбиты. Следующий яркий представитель АСЗ, астероид (1566) Икар [4], характеризующийся крайне вытянутой орбитой и отнесенный в дальнейшем к группе Аполлона, был открыт практически через полвека после Эроса вновь представителем немецкой астрономии Вальтером Бааде. Особенностью движения группы Аполлона стало фактическое скрещивание орбит астероидов с орбитой Земли, что само по себе привлекало внимание астрономов-наблюдателей к этим объектам. Открытие Икара в 1949 г. внесло имя Паломарской обсерватории США в летопись астероидно-кометной опасности, и дальнейшие события продемонстрировали, что это произошло не случайно.

Наблюдения, проведенные Элеонорой Хелин в Паломарской обсерватории в 1976 г., позволили совершить следующий шаг в понимании проблемы астероидной опасности, а именно — заставили искать опасные для Земли объекты в другой области пространства. Открытие астероида (2062) Атон убедило астрономов-наблюдателей того времени взглянуть внутрь орбиты Земли. Данный астероид, возглавивший впоследствии группу Атонов, самую малочисленную из групп «классических» АСЗ, продемонстрировал возможность сближения астероидов с Землей из внутренней области космического про-

странства. Стоит упомянуть, что наблюдения объектов, по конфигурациям схожих с внутренними планетами, значительно усложнены по сравнению с наблюдениями объектов с перигелийными расстояниями больше чем 1 а. е.

Открытие все большего числа астероидов, сближающихся с Землей, безусловно, формировало некоторые представления об опасности столкновения Земли с различного рода космическими объектами, но по-настоящему тень катастрофы коснулась планеты 4 января 1989 г., когда французский астроном Кристиан Полля обнаружил астероид (4179) Тутатис [5, 6], широко известный ныне в кругах ученых-специалистов по динамике малых тел Солнечной системы. Астероид Тутатис, впоследствии отнесенный к группе Аполлона и отмеченный как потенциально опасный объект (в 2004 г. астероид прошел от Земли на расстоянии четырех радиусов лунной орбиты, или 0.0104 а. е.), стал первым космическим телом, требующим особого внимания астрономов-наблюдателей и экспертов в области теории движения малых тел. Класс потенциально опасных объектов с тех пор приобрел уже свыше 1 400 представителей, и эта коллекция постоянно пополняется. Любопытным историческим фактом, а также важнейшим компонентом в исследованиях в области АКО, является тот момент, что астероид Тутатис первоначально был обнаружен в 1934 г., но впоследствии оказался потерян. Только из этого уже можно сделать вывод, что обнаружение новых объектов — половина дела, и только скрупулезный мониторинг опасных тел позволит не допустить подобных исторических «промахов».

Классификацию АСЗ по типам орбит завершает открытие астероида (163693) Атира 11 февраля 2004 г. в обсерватории Сокорро. Самая «молодая» и самая малочисленная на текущий момент группа включает в себя всего 20 объектов, но именно группа Атиры представляет наибольший интерес для наблюдателей. Причина такого интереса в сложности обнаружения подобных объектов и в загадках и тайнах, скрывающих их происхождение.

Невозможно говорить об истории АКО и ничего не сказать про астероид (99942) Апофис, принадлежащий группе Атонов, открытый в 2004 г. в обсерватории Кит-Пикк. Данный объект приобрел чрезвычайную популярность в среде мирового сообщества, как научного, так и светского, в связи с ненулевой и относительно высокой вероятностью столкновения астероида с Землей в 2036 г., причем столкновение это должно было оказаться следствием тесного сближения Апофиса и Земли в 2029 г. (Апофис первоначально получил

отметку 4 по Туринской шкале). Современный читатель осведомлен о судьбе Апофиса и о том, что столкновение в 2036 г. полностью исключено, причем в основе текущего анализа лежат наблюдения, полученные в 2013 г. [7]. Это значит, что с 2004 по 2013 г. Апофис являлся чуть ли не ключевой фигурой в проблематике АКО, и неудивительно, что именно этот объект оказался своего рода «подопытным кроликом» для многочисленных астрометрических и небесномеханических исследований [8–10]. Апофис — в числе лидеров по количеству позиционных, фотометрических, спектрометрических и радиотехнических наблюдений среди астероидов, сближающихся с Землей. Изучение теории движения Апофиса позволило выявить тонкие структуры в наборе возмущающих факторов в движении астероида, таких как влияние сжатия Солнца и Юпитера, необходимость учета светового давления и эффекта Ярковского, потребность в записи уравнений движения в релятивистской форме [11–13]. Различными научными группами во всем мире разработаны сценарии десятков космических миссий [14, 15], целью которых является Апофис. Часть из них ориентирована на предотвращение возможной катастрофы, часть — на изучение физических свойств и параметров движения астероида, часть — на тестирование потенциально возможных систем противодействия АКО. Так или иначе, даже если бы Апофиса не было, его нужно было бы придумать, поскольку история его изучения оказала колоссальное влияние на становление проблематики астероидно-кометной опасности в целом.

В период всеобщего увлечения Апофисом одно важное событие осталось почти незамеченным общественностью — это падение астероида 2008 TC₃ в районе северного Судана 7 октября 2008 г. [16]. Учитывая размеры объекта (порядка 4 м), данное столкновение можно было бы счесть вполне заурядным явлением, если бы не одно обстоятельство: впервые в истории изучения проблемы астероидной опасности падение небесного тела было предсказано заранее! Астероид 2008 TC₃ открыт в обсерватории Маунт Леммон (Аризона, США) за 19 часов до столкновения с нашей планетой, последующие наблюдения подтвердили первоначальные расчеты и позволили определить район падения, что существенно облегчило последующие поиски. Экспедиции Хартумского университета, отправленной в суданскую пустыню, удалось найти несколько обломков метеорита общей массой около 4 кг. Особо хочется отметить роль российских ученых: около трети наблюдений этого интересного объекта было выполнено в Главной астрономической обсерватории РАН [17] .

Еще одним примером заблаговременно предсказанного события является необычайно тесное сближение с Землей астероида 367943 2012 DA14 [18, 19], — 15 февраля 2013 г. он прошел на расстоянии 27 700 км от геоцентра (ближе, чем орбита геостационарных спутников). Данный объект был открыт 23 февраля 2012 г. на обсерватории Ла-Сагра и, благодаря сближению 2013 г., сыграл роль своего рода индикатора готовности человечества к решению проблем астероидно-кометной опасности. Тесное сближение с объектом диаметром порядка 30 м (падение такого объекта может привести к событию, пограничному между локальной и региональной катастрофами, в зависимости от параметров столкновения) само по себе событие нетривиальное и, случись оно на заре осознания проблематики АКО, вызвало бы серьезный интерес со стороны широких масс населения. В данном же случае астероид не представлял угрозы столкновения, но интерес был проявлен научным сообществом, так как подобное прохождение объекта вблизи Земли — отличный тренажер для тестирования систем наблюдения и противодействия для последующих, возможно, более впечатляющих случаев. Если говорить кратко, анализ данных, полученных на интервале времени вблизи тесного сближения, выявил ряд недостатков текущих методик наблюдения подобных явлений, а также некоторые особенности при изучении элементов орбит объекта и его орбитальной эволюции.

В заключение данного раздела необходимо упомянуть о совсем недавнем событии, а именно об открытии астероида 2013 TV135 украинским астрономом Геннадием Борисовым 12 октября 2013 г. На конец октября 2013 г. этот объект имел отметку 1 по Туринской шкале. Высказывались предположения, что он может повторить судьбу Апофиса, так как первоначально с ростом числа наблюдений и увеличением интервала наблюдений вероятность столкновения с Землей возрастала. Учитывая, что диаметр астероида составляет порядка 400 м, его падение грозило бы серьезной региональной катастрофой. Однако уже через несколько недель после открытия данных наблюдений оказалось достаточно, чтобы перевести 2013 TV135 в нулевую категорию по Туринской шкале.

Следует отметить, что в настоящее время, по оценкам NASA, только один объект имеет ненулевую отметку по Туринской шкале — это 130-метровый астероид 2007 VK184 [20, 21]. Но данное небесное тело имеет всего 102 наблюдения на интервале около двух месяцев, то есть его орбита недостаточно хорошо определена. Есть основания полагать, что с появлением новых наблюдений его постигнет судьба

Апофиса и 2013 TV135 — оценка снизится до нулевой. Таким образом, ни один из известных сейчас астероидов не представляет реальной угрозы для Земли. Однако, как показывает опыт, наиболее опасные для Земли небесные тела те, что еще не открыты. Истории падений таких объектов и будут посвящены следующие два раздела.

Астроблемы

На поверхности Земли, равно как и на других телах Солнечной системы, обнаружено множество кратеров различного размера, чье происхождение связано с падением космических тел. Подобные деформации поверхности названы астроблемами. Особенности климатического устройства Земли и наличие на ней биосферы, а также большого объема воды в жидкой форме значительно сглаживает астроблемы (в первую очередь изменение поверхности вследствие эрозии почвы от воды и ветров), что усложняет их обнаружение. Только падение относительно крупного объекта формирует ударный кратер, исследование которого позволяет оценить энергию столкновения, а значит, физические параметры упавшего космического тела. Стоит упомянуть, что изучение мест падения метеоритов важно как для проблематики астероидной опасности, так и для понимания картины происхождения и эволюции Солнечной системы. Кратеры метеоритного происхождения практически полностью покрывают тела Солнечной системы, лишённые атмосферы. К примеру, астроблемы на Луне сохраняются в течение миллиардов лет, но поверхность небесного тела снова и снова деформируется из-за падения новых объектов. Это говорит лишь о том, что столкновение различных тел в Солнечной системе — явление рядовое, причем подобные столкновения играли значительную роль в процессе формирования планет и их спутников. С течением времени вероятность столкновения Земли и планет с астероидами и кометами несколько снижается, в то время как на этапе формирования Солнечной системы большая часть вещества на поверхность планеты была притянута именно таким образом; 80 % железа на Земле и большая часть воды — космического происхождения [22]. Можно сказать, что человечеству повезло проэволюционировать в относительно спокойную с точки зрения космических угроз эпоху.

Такое явление, как массовое вымирание биоты на Земле, связывают с падением крупных астероидов. Например, массовое вымирание, произошедшее 65 млн лет назад и означавшее финал эры дино-

завров, по одной из версий связывают с падением объекта порядка 10 км. На возможность столкновения указывают так называемые иридиевые аномалии в слоях породы, соответствующей той эпохе. Стоит упомянуть, что иридий сам по себе — редкоземельный элемент, зато в составе некоторых астероидов его содержание в 300 раз превышает среднее содержание этого вещества в коре Земли. Открытие кратера Чиксулуб в Мексиканском заливе, который по времени происхождения соответствует эпохе 65 млн лет назад, является сильным аргументом в пользу подобной теории. На данный момент известно, что падение столь крупных объектов в нашу эпоху происходит не чаще, чем раз в 100 млн лет. Если посмотреть на эту статистику с другой стороны, можно предположить, что каждые 100 млн лет на поверхности Земли происходит практически повсеместное вымирание биосферы, и это событие связано с метеоритной угрозой.

Одним из самых известных кратеров на Земле является кратер Бэррингера в Аризоне (<http://barringercrater.com/>) диаметром 1200 м и глубиной 180 м. Кратер образован падением небесного тела размером порядка 50 м около 50 тыс. лет назад. Следует отметить, что размер столкнувшегося с Землей астероида был намного меньше Апофиса и незначительно превышал 367943 2012 DA14.

Метеориты

Вполне разумным кажется то, что на становление проблематики АКО повлияло еще и открытие значительного числа различных метеоритов — продуктов столкновения астероидов с Землей. Находки крупных фрагментов метеоритов говорят о том, что столкновения с опасными телами случались и ранее, причем последствия их варьировались от незначительных до глобально-катастрофических.

Порядка 80 тыс. лет назад в атмосферу Земли вошел космический объект, вещество которого выпало в районе юго-западной Африки. Данное столкновение не вызвало серьезных разрушений или катастрофических последствий, не образовался сколь-нибудь значительный ударный кратер. Метеорит, найденный впоследствии на месте падения этого объекта, на 84 % состоял из железа, обладал массой более 66 т и объемом более 9 м³. Метеорит Гоба — крупнейший из

ныне известных метеоритов, являющийся в дополнение самым большим куском железа природного происхождения на планете. Несмотря на большие размеры, метеорит был найден случайно при распашке земли на одной из ферм в Намибии.

Другой пример с выпадением большого количества метеоритного вещества приведет читателя в Россию, в Волгоградскую область, к поселку Царев в 1922 г. С территории порядка 15 км^2 собрано более полутонны метеоритного вещества, наиболее крупный кусок в данном случае обладал массой чуть меньше 300 кг. Физические свойства этого метеорита значительно отличались от тех, что были свойственны Гобе: вблизи поселка Царев пролился метеоритный дождь преимущественно хондритной природы.

Наиболее обильный метеоритный дождь XX в. также пролился над территорией России, это произошло 12 февраля 1947 г. в горах Сихотэ-Алинь на Дальнем Востоке. Всего было найдено около 300 осколков общей массой порядка 30 т. Площадь поражения составила 35 км^2 , глубина самой большой воронки достигала 6 м.

Масло в огонь в свое время добавило знаменитое Тунгусское событие [23], до сих пор вызывающее споры в кругах экспертов по проблематике АКО. 30 июня 1908 г. на территории России, близ местечка Ванавара, в районе реки Подкаменная Тунгуска, космическое тело, вероятно кометного происхождения, стало причиной мощного взрыва, изуродовавшего лес на территории свыше 2000 км^2 . Мощность взрыва в 1000 раз превосходила мощность бомбы, сброшенной на Хиросиму во время Второй мировой войны, а ударная волна от взрыва несколько раз обогнула Землю. Об этом событии в различных источниках может содержаться прямо противоположная информация, на текущий момент наиболее справедливо приписать этот феномен к проблематике АКО. Вполне очевидно, что данное событие вызвало бы более заметный резонанс, если бы произошло не в медвежьем углу на краю России, а вблизи крупного европейского города или иного населенного пункта. Данный довод привносит очередную идею в проблематику АКО: с ростом численности населения городов и расширением границ агломераций уровень опасности от астероидно-кометной угрозы лишь возрастает. В современных городах все больше технически сложных и опасных объектов, на которых любая нештатная ситуация может привести к техногенной катастрофе. Даже небольшой по своим размерам объект при условии падения вблизи городской агломерации может причинить серьезный ущерб в виде материальных потерь и человеческих жертв.

Событие, произошедшее 15 февраля 2013 г. над городом Челябинском [24], значительно уступает по силе взрыва Тунгусскому феномену, но даже это явление привело к экономическому ущербу в 1 млрд рублей и к ранениям более 1 500 человек. Это событие является знаменательным для проблематики АКО в целом по следующим причинам:

- данное явление фиксировалось множеством камер наружного видеонаблюдения и автомобильных видеорегистраторов, что позволило оценить силу взрыва и направление распространения осколков;
- большинство пострадавших получили ранения не в результате поражения осколками метеорита или от жара, излучаемого объектами при взрыве в атмосфере, а от последствия ударной волны, разрушившей уязвимые элементы инфраструктуры зданий — оконные стекла, плохо укрепленные стены, двери и проч.;
- данное событие, несмотря на развернутую систему слежения, созданную в западных странах, не было предсказано. Метеороид, упавший на Челябинск, оказался полной неожиданностью для мировой астрономии, несмотря на кажущуюся степень готовности к противостоянию угрозам АКО.

Заключение

Человечество задумалось о реальности астероидной опасности совсем недавно — всего несколько десятилетий назад. Этому способствовали ряд научных открытий — обнаружение астероидов в космосе и астроблем на Земле. В настоящее время уже известно более 10 000 астероидов, сближающихся с Землей, около 1 400 из них относят к классу потенциально опасных для Земли объектов. Эти небесные тела являются предметом постоянного внимания ученых, но, к сожалению, пока мы знакомы лишь с небольшой частью всей популяции астероидов, и именно неоткрытые пока объекты представляют наибольшую опасность.

Следует отметить, что только за XX век Россия испытала два значительных проявления астероидно-кометной опасности — Тунгусский феномен и Сихоте-Алиньский метеоритный дождь. Оба раза

благодаря счастливому стечению обстоятельств падения произошли в малонаселенной местности. Однако с ростом численности населения растет и космическая угроза, наглядным примером чему служит Челябинское событие.

Следует отметить, что астероидная опасность является глобальной, общемировой проблемой, и ее решение возможно только объединением усилий ведущих мировых держав. В настоящее время человечество находится только в начале этого трудного пути, и от осознания проблемы до ее решения пройдет еще не одно десятилетие.

Работа выполнена по заданию № 2.4024.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации и при частичной финансовой поддержке в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007—2013 гг. (государственный контракт № 14.518.11.7064).

Библиографические ссылки

1. Железнов Н. Б. История открытия Цереры // История науки и техники. — 2013. — Вып. 9. — С. 23—43.
2. Астероидно-кометная опасность, Ред. А. Г. Сокольский. — СПб : Изд. ИТА РАН, 1996.
3. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра, Ред. Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010.
4. Gehrels T., Roemer E., Taylor R. C., Zellner B. H. Minor planets and related objects. IV. Asteroid (1566) Icarus // Astron. J. — 1970. — Vol. 75, iss. 2. — P. 186—195.
5. Sitarski G. Motion of the Minor Planet 4179 Toutatis: Can We Predict Its Collision with the Earth // Acta Astronomica. — 1998. — Vol. 48. — P. 547—561.
6. Hudson R. S., Ostro S. J., Scheeres D. J. High-resolution model of Asteroid 4179 Toutatis // Icarus. — 2003. — Vol. 161, iss. 2. — P. 346—355.
7. Wlodearczyk I. The potentially dangerous asteroid (99942) Apophis // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — Vol. 434, iss. 4. — P. 3055—3060.

8. *Delbo M., Cellino A., Tedesco E. F.* Albedo and size determination of potentially hazardous asteroids: (99942) Apophis // *Icarus*. — 2007. — Vol. 188. — P. 266—269.
9. *Соколов Л. Л., Башиков А. А., Борисова Т. П. и др.* Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 4. — С. 311—320.
10. *Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю.* Исследование движения астероида (99942) Апофис с использованием многопроцессорной вычислительной системы СКИФ Cyberia // *Космич. исслед.* — 2010. — Т. 48, вып. 5. — С. 419—426.
11. *Farnocchia D., Chesley S. R., Chodasa P. W. et al.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // *Icarus*. — 2013. — Vol. 224, iss. 1. — P. 192—200.
12. *Шор В. А., Чернетенко Ю. А., Кочетова О. М., Железнов Н. Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 2. — С. 131—142.
13. *Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю.* Исследование структуры возмущений и вероятностной орбитальной эволюции на примере астероида 99942 Apophis // *Изв. вузов. Физика*. — 2013. — Т. 56, вып. 6/3. — С. 229—231.
14. *Ивашкин В. В., Крылов И. В., Лан А.* Оптимальные траектории для экспедиции КА к астероиду Апофис с возвращением к Земле // *Астрон. вестн.* — 2013. — Т. 47, вып. 4. — С. 361—372.
15. *Поль В. Г., Симонов А. В., Суханов К. Г.* О миссии разведки астероида Апофис // *Околоземная астрономия-2007 : материалы междунаро. конф., Терскол, 3—7 сент. 2007 г.* — Нальчик, 2008. — С. 200—213.
16. *Jenniskens P., Shaddad M. H., Numan D. et al.* The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 // *Nature*. — 2009. — Vol. 458, iss. 7237. — P. 485—488.
17. *Алешкина Е. Ю., Куприянов В. В., Десяткин А. В. и др.* Астрометрические и фотометрические исследования упавшего на Землю астероида 2008 TC3 // *Астрон. вестн.* — 2011. — Т. 45, вып. 1. — С. 36—44.
18. *Włodarczyk I.* The potentially dangerous asteroid 2012 DA14 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 427, iss. 2. — P. 1175—1181.

19. *Заусаев А. Ф., Денисов С. С., Деревянка А. Е.* Исследование эволюции астероида 2012 DA14 // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. — 2012. — Вып. 3(28). — С. 211—214.
20. *Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Васильев А. А., Петров Н. А.* Свойства траекторий соударения астероидов с Землей // Астрон. вестн. — 2013. — Т. 47, вып. 5. — С. 441—447.
21. *Галушина Т. Ю., Авдюшев В. А.* Исследование вероятностной орбитальной эволюции астероидов 2011 AG5 и 2007 VK184 // Изв. ГАО РАН. — 2013. — Вып. 220. — С. 201—206.
22. *Robert F.* The Origin of Water on Earth // Science. — 2001. — Vol. 293. — P. 1056—1058.
23. *Боголюбов Н. В.* Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. — М. : Русская панорама, 2004.
24. *Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др.* Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. вестн. — 2013. — Т. 47, вып. 4. — С. 262—277.

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ В ГЕОДЕЗИИ

Главной задачей геодезии, как известно, является не только определение фигуры и размеров Земли и параметров внешнего гравитационного поля Земли, но и определение в принятой системе координат положения пунктов на земной поверхности с приписанными им названиями и параметрами (атрибутами). Данная задача может решаться различно: для всей Земли в целом или в пределах одного государства, а может, и для небольшого локального участка земной поверхности, ограниченной рамками одной трапеции крупного масштаба. При этом во всех случаях, независимо от способа решения, на первом месте стоит выбор системы координат, который заключается в решении еще двух задач: в фиксировании начала системы координат и в способах определения в этой системе координат интересующих нас объектов. Известно, что инструменты для производства геодезических измерений (теодолиты, тахеометры, нивелиры и др.) ориентируются, как правило, по вектору силы тяжести. Поэтому нужно подобрать достаточно простую ортогональную систему, чтобы одна из ее поверхностей (отсчетная) была перпендикулярна вектору силы тяжести. Существует несколько систем координат, связанных с Землей. В зависимости от того, где находится начало той или иной системы координат, существующие координатные системы можно классифицировать следующим образом:

- общеземные системы координат, начало которых совмещено с центром масс Земли. Они получили название геоцентрических систем координат. Общеземную систему координат фиксируют координатами астрономических обсерваторий, например, как Пулково или Гринвич;
- референчные системы координат, начало которых находится на расстоянии десятков или сотен метров от центра масс Земли;
- топоцентрические системы координат, началом в которых является пункт наблюдений на поверхности Земли или на другой поверхности (плоскость, сфера, эллипсоид);

- плоские прямоугольные системы координат, в которых началом служит точка пересечения двух взаимно перпендикулярных осей (x и y) в выбранной картографической проекции.

Местоположение вновь создаваемых определяемых пунктов получают относительно исходных пунктов опорной геодезической сети, которые могут находиться в данном районе.

Любую координатную задачу можно решать в разных системах координат, однако ее выбор иногда является сложной проблемой. Как правило, выбирают наиболее удобную, единственную, простую систему координат, в которой аналитические соотношения имеют наиболее простой вид, а полученные координаты связаны с определяемым объектом.

История создания в нашей стране единой системы координат начинается с 1816 г., когда под руководством академика Петербургской академии наук, первого директора Пулковской обсерватории В. Я. Струве и генерала от инфантерии, почетного члена Петербургской академии наук К. И. Теннера начались работы по проложению триангуляционного ряда. Эта дуга протяженностью по широте $25^{\circ}20'$ прошла по территории России, а также Финляндии, Швеции и Норвегии от побережья Северного Ледовитого океана до устья Дуная. Это знаменитое градусное построение вошло в историю одних из первых коллективных геодезических работ как дуга Струве—Теннера, как Русско-Скандинавское градусное измерение.

В течение почти ста лет происходило совершенствование существующего геодезического обеспечения нашей страны. В середине XIX — начале XX в. в России под руководством шефа Корпуса Военных топографов генерала И. И. Померанцева была разработана первая программа построения единой государственной геодезической сети (ГГС) на всю территорию России. По этой программе планировалось построить в России систему замкнутых полигонов из звеньев триангуляции, расположенных вдоль меридианов и параллелей, периметром около 1.5 тыс. км. К 1910 г. была составлена первая инструкция по построению государственных геодезических сетей; к 1917 г. построено только 2 полигона, измерено 4 базиса, построено 152 геодезических знака и выполнены измерения на 129 пунктах.

На территорию России была создана 100-верстовая топографическая карта — 100 верст в одном дюйме (1 верста = 1066.8 м, 1 дюйм = 25.4 мм). Эта карта в метрической системе единиц соответствовала масштабу 1 : 4 200 000.

В 1898 г. Корпусом военных топографов под руководством генерала К. В. Шарнгорста было предпринято уравнивание разрозненных «губернских триангуляций», построенных на территории России от западных границ до Урала, включая Кавказ. Завершающим итогом этой работы было издание силами Военно-топографической службы в 1926 г. каталога Шарнгорста — каталога координат пунктов «губернских триангуляций». В качестве фигуры относимости был выбран эллипсоид Бесселя, а исходными пунктами являлись астрономическая обсерватория в Дерпте и пункты триангуляции дуги Струве–Теннера.

После Великой Октябрьской революции первая попытка создания опорной геодезической сети относится к 1924 г. Предполагалось построить на территории европейской части СССР 14 больших полигонов южнее 60-й параллели.

В 1928 г. была опубликована работа Ф. Н. Красовского «Схема и программа государственной триангуляции». Выход этой работы ознаменовал следующий этап построения единой системы координат на всю территорию страны. В этом же году Главным геодезическим управлением СССР были утверждены единая схема и программа развития государственной триангуляции страны, предложенная Ф. Н. Красовским.

По программе Красовского передача координат на большие расстояния должна была осуществляться построением вдоль меридианов и параллелей звеньев триангуляции 1 класса, образующих при взаимном пересечении полигоны 1 класса периметром порядка 800—1200 км. Длина сторон треугольников триангуляции 1 класса от 20 до 30 км. На концах звеньев триангуляции 1 класса измерялись базисные стороны прибором Едерина с использованием комплекта инварных проволок, позднее светодальномером. В вершинах полигонов, на обоих концах базисных сторон (на пунктах Лапласа), измерялись астрономическая широта, долгота и азимут. Применялась полигонометрия 1 класса (звено представляло ход примерно из 10 сторон длиной 20—25 км). На обоих концах крайних сторон звена определялись пункты Лапласа с целью исключения накопления ошибок от полигона к полигону и решения редуционных задач, для которых необходимо знать отклонения отвесных линий в плоскости меридиана и первого вертикала, они определялись проведением гравитационной съемки в этих же пунктах. Государственная геодезическая сеть подразделялась на сети 1, 2, 3, 4 классов, различающиеся техническими характеристиками и порядком последовательного развития.

В 1930 г. вычислительное бюро Главного геодезического управления под руководством Ф. Н. Красовского приступило к уравниванию восьми полигонов 1 класса европейской части страны, позднее к ним был присоединен Уральский полигон. При уравнивании были использованы эллипсоид Бесселя, метод развертывания, а за исходный пункт принимался пункт Саблино.

Сущность метода развертывания заключается в том, что результаты измерений, выполненные на земной поверхности и редуцированные к уровню моря, при дальнейшей обработке считались выполненными на поверхности референц-эллипсоида без каких-либо поправок за несовпадение поверхности эллипсоида и уровенной поверхности нулевой высоты. В этом и состоит главная особенность и главный недостаток метода развертывания.

В 1932 г. уравнивание было завершено, новая система координат получила название системы 1932 г. (СК-32). В те же годы в ЦНИИ-ГАиК под руководством Ф. Н. Красовского и А. А. Изотова начались работы по выводу параметров референц-эллипсоида, наилучшим образом подходящего для территории СССР. Одновременно под руководством М. С. Молоденского проводились работы по определению высот квазигеоида по данным астрономо-гравиметрического нивелирования.

В 1942 г. приступили к переуравниванию астрономо-геодезической сети (АГС). Решением Главного управления геодезии и картографии (ГУГК) и Военно-топографического управления Генерального штаба Министерства обороны (ВТУ ГШ МО) от 4 июня 1942 г. было рекомендовано в качестве референц-эллипсоида при уравнивании принять эллипсоид (позднее получивший имя Красовского) со следующими параметрами: большая полуось $a = 6\,378\,245.0$ м, экваториальное сжатие $\alpha = 1/298.3$. Эти параметры были определены Ф. Н. Красовским и другими сотрудниками ЦНИИГАиКа в 1940 г.

Установление системы координат 1942 г. было связано также с выводом значений исходных геодезических дат в исходном пункте геодезической сети Пулково. В значения исходных геодезических дат входят геодезическая широта и долгота исходного пункта на референц-эллипсоиде, геодезический азимут исходного направления, составляющие уклонения отвесной линии и высота квазигеоида над референц-эллипсоидом в исходном пункте. Эти данные определяют пространственную ориентировку осей референц-эллипсоида в теле Земли при выполнении следующих условий:

- малая ось эллипсоида параллельна направлению к положению среднего полюса;
- плоскость нулевого меридиана параллельна плоскости начального астрономического меридиана;
- поверхность референц-эллипсоида имеет в среднем наименьшие отклонения от поверхности геоида на всей территории, на которой расположена астрономо-геодезическая сеть.

Реальная строгость выполнения перечисленных условий определяется точностью всех использованных астрономо-геодезических данных и не зависит от конкретного выбора исходного пункта. Значения исходных геодезических дат устанавливают систему отсчета координат, но не определяют внутреннюю точность самой геодезической сети. Точность взаимного положения геодезических пунктов в сети также не зависит от местоположения исходного пункта и от значений геодезических дат.

При установлении системы координат 1942 г. в уравнивание вошли 87 полигонов АГС, расположенных на большей части европейской территории СССР, и узкой полосой пунктов распространяющих их координаты до Дальнего Востока. Обработка выполнялась на эллипсоиде Красовского с использованием метода проектирования. Метод проектирования отличается от метода развертывания тем, что редуцирование данных геодезических измерений с земной поверхности сначала происходит на поверхность уровня моря, а затем на поверхность референц-эллипсоида. Определение высот квазигеоида и составляющих уклонений отвесных линий, необходимых для такого редуцирования, выполнено с использованием результатов гравиметрической съемки.

Постановлением Совета министров СССР от 7 апреля 1946 г. № 760 на основе выполненного уравнивания была введена единая система координат и высот на территории СССР — система координат 1942 г. (СК-42).

Дальнейшее распространение системы координат 1942 г. на территорию СССР проводилось последовательно несколькими крупными блоками полигонов триангуляции и полигонометрии 1 класса. Для сгущения АГС полигоны 1 класса заполнялись сплошными сетями 2 класса. Уравнивание сетей 2 класса выполнялось в пределах отдельных полигонов с использованием уравненных координат пунктов триангуляции и полигонометрии 1 класса в качестве исходных.

Систему координат 1942 г. можно считать одним из главных достижений отечественной геодезии. Все последующие системы координат строились на ее основании путем поворотов и сдвигов. Каждая новая система координат была важным шагом в развитии геодезии и картографии, вносила свой вклад в совершенствование координатного обеспечения Российской Федерации.

Создание классической астрономо-геодезической сети на территории СССР было завершено к началу 80-х гг. XX в. Стала очевидной необходимость уравнивания полученной АГС без разделения на уравнивание сначала пунктов триангуляции 1 класса, а затем сплошных сетей 2 класса. Такое раздельное уравнивание полигонов 1 класса и вставка в них сплошных сетей 2 класса приводили к недопустимо большим ошибкам в самих пунктах 1 класса, а также к значительным деформациям сетей 2 класса вблизи рядов 1 класса, а особенно вблизи углов полигонов 1 класса. В период подготовки к сплошному уравниванию было опробовано несколько вариантов общего уравнивания АГС. Было выполнено уравнивание линий астрономо-гравиметрического нивелирования, в 1987 г. была составлена уточненная карта высот квазигеоида, которая использовалась затем в общем уравнивании АГС как свободная сеть.

В мае 1991 г. было завершено общее уравнивание АГС. Уравненная сеть включала в себя 164 306 пунктов триангуляции и полигонометрии 1—2 классов; 3,6 тысячи геодезических азимутов, 2,8 тыс. базисных сторон, расположенных через 170—200 км.

Точность уравнивания можно охарактеризовать величинами следующих ошибок:

- средняя квадратическая ошибка направления составила $0.7''$;
- средняя квадратическая ошибка измеренного азимута — $1.3''$;
- относительная ошибка базисных сторон — $1 : 260\,000$;
- средняя квадратическая ошибка взаимного положения смежных пунктов — 2—4 см;
- средняя квадратическая ошибка передачи координат от исходного пункта на пункты на краях АГС по каждой координате (x, y) — 1 м.

К началу 90-х гг. на территории нашей страны были созданы две спутниковые геодезические сети: космическая геодезическая сеть (КГС) ВТУ ГШ МО (Военно-топографическое управление Генераль-

ного штаба Вооруженных сил Министерства обороны Российской Федерации) и доплеровская геодезическая сеть (ДГС) ГУГК (Главное управление геодезии и картографии).

КГС ВТУ ГШ МО включала в себя 26 стационарных астрономо-геодезических пунктов. Расстояния между смежными пунктами составляли от 500 до 1 500 км. Координаты пунктов КГС были определены по фотографическим, доплеровским, дальномерным радиотехническим и лазерным наблюдениям ИСЗ системы ГЕО-ИК (геодезический измерительный комплекс). При построении КГС были использованы орбитальные методы космической геодезии, которые обеспечивали получение координат в геоцентрической системе с началом координат, теоретически совпадающей с центром масс Земли, и осью Z , направленной к положению среднего полюса.

Система координат КГС являлась составной частью более широкого набора фундаментальных геодезических параметров, получивших название «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90). Этот шифр получила и сама система координат.

ДГС ГУГК состояла из 131 пункта, координаты которых определялись по доплеровским наблюдениям ИСЗ системы TRANSIT. Средние расстояния между пунктами составляли 500–700 км, точность определения взаимного положения пунктов 0.4–0.6 м. ДГС строилась в системе координат WGS-84, не совпадающей с системой координат ПЗ-90.

В начале 90-х гг. XX в. было выполнено совместное уравнивание АГС, ДГС и КГС. В уравнивании участвовали все пункты КГС, ДГС и общие с ними (совмещенные или близко расположенные и привязанные) пункты АГС с целью распространения государственной системы координат на всю территорию нашей страны. Дополнительно в общее уравнивание были включены значения геоцентрических радиусов-векторов для 35 пунктов КГС или ДГС при среднем расстоянии друг от друга примерно 1 000 км, а также сеть из семи пунктов, построенная по наблюдениям спутников GPS для точной привязки острова Сахалин к АГС на материке.

Плановые координаты, полученные по результатам совместного уравнивания, были дополнены значениями геодезических высот пунктов над референц-эллипсоидом Красовского. В качестве опорной системы, в которой получались окончательные уравненные значения координат пунктов, была принята система координат КГС, то есть система ПЗ-90, а точнее ее частная реализация, представляющая совокупность координат всех пунктов КГС, участвующих

в уравнивании. В результате такого уравнивания была создана геодезическая сеть из 134 опорных пунктов ГГС, расположенных на всей территории страны при среднем расстоянии между смежными пунктами 400—500 км. Точность определения положения этих пунктов характеризуется средней квадратической ошибкой по каждой из трех пространственных координат, которая составляет 0.25—0.80 м при расстояниях от 500 до 9000 км. Абсолютные ошибки координат пунктов, характеризующие их положения относительно центра масс Земли, составляют величину порядка 1 м. Геодезическая сеть из 134 пунктов использовалась как исходная при заключительном общем уравнивании 164306 пунктов триангуляции и полигонометрии 1 и 2 классов АГС. Необходимо отметить, что предварительно уравненные координаты 134 пунктов переведены в референционную систему, близкую к СК-42. Был выбран следующий вариант формирования референционной системы: направление осей и масштаб референционной системы совпадают с таковыми в упомянутой ранее реализации системы координат ПЗ-90; положение начала системы координат совпадает с координатами начального пункта Пулково, который был также начальным и в СК-42. Новая референционная система получила название «Система координат 1995 года». В этой системе координат и были получены в заключительном уравнивании координаты всех пунктов АГС. Точность заключительного уравнивания АГС 1995 г. характеризуется следующими средними квадратическими ошибками, которые составляют:

- 0.02—0.04 м — для смежных пунктов при расстояниях до нескольких десятков километров;
- 0.2—0.5 м — при расстояниях от 1 до 9 тыс. километров.

Система координат 1995 г. была установлена постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. № 568. Она предназначалась для производства геодезических и картографических работ на территории России, начиная с 1 июля 2002 г. В СК-95 начало системы координат совпадает с координатами начального пункта Пулково, сохранены эллипсоид Красовского и проекция Гаусса—Крюгера, выполнены условия параллельности осей OZ и плоскостей нулевых меридианов относительно системы ПЗ-90. Начало системы СК-95 находится на расстоянии 156 м от начала системы координат ПЗ-90 и на расстоянии около 10 м от начала СК-42. Нормальные высоты пунктов ГГС определяются в Балтийской системе высот 1977 г. от нуля Кронштадского футштока.

В настоящее время в мире существует несколько общеземных систем координат: WGS-84 (США), ITRF (Международная система координат), ПЗ-90, ПЗ-90.02 (Россия).

Постановлением Правительства Российской Федерации № 568 от 28 июля 2000 г. геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» установлена в качестве единой государственной системы координат для применения в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач. Спутниковая система ГЛОНАСС работает в системе координат ПЗ-90 и более уточненной версии ПЗ-90.02.

Система координат ПЗ-90 включает в себя:

- фундаментальные геодезические постоянные;
- параметры общего земного эллипсоида;
- систему координат ПЗ, закрепленную координатами пунктов космической геодезической сети;
- характеристики модели гравитационного поля Земли;
- элементы трансформирования между системой координат ПЗ-90 и национальными референчными системами координат, действующими в России, СК-42 и СК-95.

Теоретическое определение системы координат ПЗ-90 базируется на следующих положениях:

- начало системы координат расположено в центре масс Земли;
- ось Z направлена в Международное условное начало (МУН);
- ось X лежит в плоскости начального астрономического меридиана, установленного Международным бюро времени (астрономический меридиан — линия на поверхности Земли с равными значениями долгот);
- ось Y дополняет систему до правой. Положения точек в системе координат ПЗ-90 могут быть получены в виде пространственных прямоугольных координат (X, Y, Z) или геодезических координат (B, L, H) , отнесенных к общему земному эллипсоиду.

Система координат ПЗ-90.02 принята Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 июня 2007 г. № 797-р в целях повышения тактико-технических характеристик глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, улучшения геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

За отсчетную поверхность в системах геодезических параметров ПЗ-90 и уточненной версии ПЗ-90.02 принят общеземной эллипсоид с большой полуосью $a = 6\,378\,136$ м и сжатием $\alpha = 1/298.257\,839\,303$, полученными по спутниковым измерениям на суше и в Мировом океане.

GPS работает в системе координат WGS-84 (World Geodetic System, 1984). WGS-84 включает в себя фундаментальные геодезические постоянные; систему координат WGS-84, закрепленную координатами пунктов космической геодезической сети; параметры общего земного эллипсоида; характеристики модели гравитационного поля Земли; элементы трансформирования между геоцентрической системой WGS-84 и различными национальными системами координат. Теоретические определения системы координат WGS-84 основываются на тех же положениях, что система координат ПЗ-90 и ПЗ-90.02. В настоящее время действует четвертая версия системы координат WGS-84, обозначаемая как WGS-84 (G1150) и введенная с 20 января 2002 г. Литер «G» означает «GPS», а «1150» указывает на номер GPS-недели, соответствующей дате, к которой отнесена эта версия системы координат WGS-84.

Основные параметры общеземного эллипсоида WGS-84 получены по спутниковым измерениям и имеют следующие значения: большая полуось $a = 6\,378\,137$ м, сжатие $\alpha = 1/298,257\,223\,563$.

Международная система координат ITRF (International Terrestrial Reference Frame — Международный наземный референсный каркас) — международная земная координатная система, являющаяся основой для построения различных координатных систем на поверхности Земли.

Система координат ITRF — это геоцентрическая прямоугольная пространственная система координат, включающая в себя набор фундаментальных астрономо-геодезических параметров и геофизических моделей.

Основная экваториальная плоскость системы перпендикулярна к геоцентрическому направлению на Международное условное начало (МУН), положение которого согласовано с координатами среднего полюса Земли на эпоху 1984.0 по данным Международной службы вращения Земли. Положение плоскости начального меридиана установлено в соответствии с рекомендациями Международного бюро времени.

Система координат ITRF в настоящее время реализуется примерно 190 пунктами, среди которых есть пункты радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) и пункты Международной службы вращения Земли. Геоцентрические координаты пунктов ITRF изменяются в результате непрерывного совершенствования сети и геодинамических процессов, связанных с движениями земной коры. В связи с этим каталоги координат постоянно обновляют и при этом указывают эпоху обновления.

Последняя версия ITRF-2005 содержит координаты и скорости их изменения более 500 опорных станций. Точность координат и скоростей их изменений в этой системе составляет от 1—5 см и 1—5 мм/год соответственно.

В настоящее время в соответствии с федеральной целевой программой (ФЦП) «Глобальная навигационная система» проводятся работы по созданию и развитию ГГС новой структуры. Согласно плану ФЦП такая сеть должна была быть создана в 2012 г., чтобы в полной мере реализовать тактико-технические характеристики системы ГЛОНАСС. По точностным параметрам новая система координат должна соответствовать Международной системе координат ITRF. Этим будет достигнута конкурентоспособность системы ГЛОНАСС на международном уровне.

Совершенствование систем координат, повышение точности координат пунктов с использованием современных геодезических технологий — концепция развития геодезии и картографии до 2020 г. Свидетельством этого является утверждение систем координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11 в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат».

Геодезическая система координат 2011 г. (ГСК-2011) будет предназначена для использования при осуществлении геодезических и картографических работ, общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) — для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

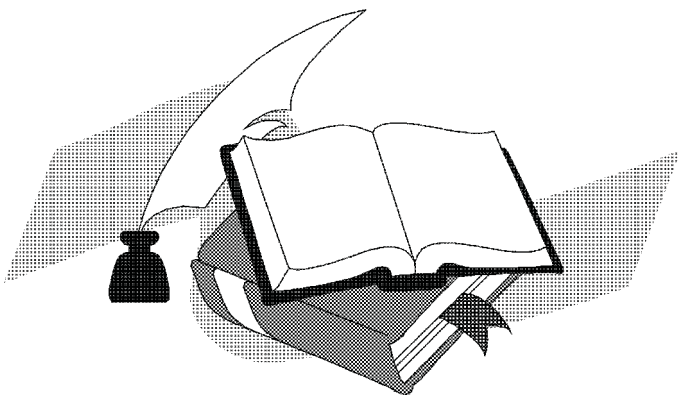
ПЗ-90.11 и ГСК-2011 являются геоцентрическими экваториальными пространственными системами координат. Они определяют положение точки относительно центра масс Земли, главной отсчетной плоскостью является плоскость экватора, счет координат выполняется в правосторонней пространственной декартовой системе координат.

ПЗ-90.11 является рабочей системой координат ГЛОНАСС, которая служит для решения задач глобальной навигации и находится в ведении Министерства обороны РФ. На поверхности Земли она закреплена глобально распределенными пунктами, включая пункты космической геодезической сети.

ГСК-2011 должна обслуживать сегмент потребителя ГЛОНАСС, обеспечивать единство представления пространственных данных в гражданском секторе экономики страны. ГСК-2011 на земной поверхности закреплена пунктами фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС). Пункты ФАГС должны создавать основу инфраструктуры высокоточной координатной привязки при выполнении массовых геодезических работ и картографировании территории.

Постановление ограничивает период применения действующих в настоящее время государственных систем координат СК-42 и СК-95 до 1 января 2017 г.

Литературные страницы



В. Б. Зинин

Остаются нам наши фантазии
Заглянуть ненадолго туда,
Где у края Европы и Азии
Рукотворная светит звезда,

Собирает скопления звездные
Под эгидой Коуровских школ.
В бесконечные ночи бессонные
Накрывает рождественский стол.

Навсегда оставайтесь на уровне,
Берегите таинственный свет.
С Днем Рождения, родная Коуровка!
Семь в квадрате промчавшихся лет.

12.01.2014

Н. Д. Калинина

ПРИЗЫВ К ПОДВИГУ

К. В. Холшевникову на 75-летие

Безвременье, предзимье в наступлении...
И, слава Богу, если не цейтнот!
MON GENERAL, отриньте все сомнения —
Решитесь на опасный поворот!

MON GENERAL, так стало неуютно —
Мир катится вновь в темные века,
Уж в n-ый раз Россия на распутье —
Спасеньем видится лишь твердая рука?

Лирическое отступление:
MON GENERAL, а помните мгновения,
Что заставляли сладостно летать,
И песенно-гитарные моления
О лошадях, не хочущих скакать?

Чиновный произвол пришел в науку.
Как жутко пожинать сии плоды!
Вперед, MON GENERAL, сквозь сплин и скуку —
Вас ждут еще Вселенские труды!

MON GENERAL, поэма на исходе.
Вы, ЧЕТВЕРТЬ ВЕКА ТРИЖДЫ покорив,
Во славу АСТРОНОМИИ в народе
Вольны рискнуть!

Вперед!

В прорыв!!!

Ноябрь 2013

Мой друг, весенние дороги
Давно заполонил бурьян...
Мечты?..

Какие недотроги(!) —
Отбушевали:
так... туман...

И нам с тобой, мой друг бесценный,
Слегка за сотню на двоих,
Уж смысл понятен сокровенный
Тех заблуждений роковых,

Что разнесли наш мир вчистую.
Отбросив стыд, лишь чистоган
Считает выручку.

Пустуют
Души... Бьет наган.

Ах, не забыть твои билеты
В театр Московский — для друзей (!), —
И ПЗС!

Твои приветы!
А «Есиповку»?
Ту — в музей!

Средь «неопознанной посуды»,
Мой друг, сияют нам всегда
Простые Космоса причуды?
Твоя звезда...
Моя звезда...

Плетут орбиты «Есипов», «Полина»,
«Коуровка»...
Сюита трех планет
Пленительна и беспричинна,
Как неоконченный сюжет...

Декабрь 2013

ГОДЫ

Годы клонятся к закату,
Как светило ввечеру,
А ведь думалось когда-то,
Что я вовсе не умру!

Годы голову, как ватой,
Обложили сединой,
А ведь думалось когда-то —
Буду вечно молодой!

От рассвета до заката
Круговая колея,
А ведь думалось когда-то:
Стану мудрым, как змея.

Буду трудные задачи
В уравнениях решать,
Свежим воздухом удачи
С упоением дышать.

Упоение чреватое:
Стелет мягко, снизу — жесть!
Так мне думалось когда-то...
А ведь так оно и есть!

МЕЧТАТЕЛИ

Житейский хаос: даты, лица. . .
Весь этот морок суеты
Нас заставляет примириться
С неуголенностью мечты.

Но все нам кажется, что где-то,
В ближайшем будущем, вот-вот,
Взлетит счастливая ракета,
Причалит белый теплоход!

. . . Мы в слепоте своей не знаем,
Как далеко размерен путь,
Лишь версты зыбкие считаем,
Боясь не вовремя свернуть.

. . . Ракета замерла на старте,
Застыл на рейде пароход,
И не планируем в азарте
Мы через Альпы переход!

Так наших целей приземленность,
Непритязательность высот
Страсть превращают во влюбленность,
Оранжерею — в огород!

А всё мы сетуем в обиде
На Жизнь, на Время, на Режим
И, как пингвины в Антарктиде,
Присев на хвостики, дрожим. . .

ОСЕНЬ

Дождь ветер — жарких два листа
Едва трепещут в чёрной кроне дуба.
Ещё рывок — и веточка пуста!
И дуб стоит, обижен тем, как грубо
С ним обошлись...

А снизу дым костра
Цыганского всплывает из оврага,
Где по корням ещё сочится влага,
Осока ещё держится, остра.
Багряно-жёлтым светится полянка,
С плеча берёзы кисти полушалка
Спускаются каскадами до пола...
И осень — вся! — как юная цыганка —
Раскована,

блестяща,

полугола,

Приподнимая краешек подола,
Не поправляя рваных рукавов,
В багрово-красных бусах из рябины,
Смеясь, выходит к людям из долины,
И пляшет в бубнах сухонький горох!

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Beaugé Cristian	ОА UNC	beauge@
Krelowski Jacek	NCU	Jacek.Kr
Аввакумова Екатерина Анатольевна	УрФУ	Ekaterin
Акимкин Виталий Викторович	ИНАСАН	akimkin
Акинъщиков Алексей Николаевич	ГАИШ МГУ	aan93@n
Алексеев Илья Юрьевич	КраО	ilya@cra
Ахматханова Галина Геннадьевна	УрФУ	mlodik_
Баан Виллем	ШАО	willem.b
Балануца Павел Владимирович	МГУ	
Балуев Роман Владимирович	ГАО РАН	roman@
Барабанов Сергей Иванович	ИНАСАН	sbaraban
Баранников Егор Андреевич	ТГУ	yegor-ba
Безгодов Константин Андреевич	УрФУ	kos.bez@
Белей Дмитрий Андреевич	ТГУ	dmitry.b
Белоусов Роман Андреевич	УрФУ	drow94r
Бисикало Дмитрий Валерьевич	ИНАСАН	bisikalo@
Бисярина Анастасия Павловна	УрФУ	bisyarina
Бокова Валентина Владимировна	УрФУ	Eduard.I
Боли Пол	МРIfR	pboleym@
Бондарев Роман Викторович	ЮФУ	rom-bon
Борисова Ксения Андреевна	УрФУ	Eduard.I
Бутенко Мария Анатольевна	ВолГУ	butenkon

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Васильева Мария Алексеевна	УрФУ	maxa190
Васькина Анна Михайловна	УрФУ	ya.vodol
Васюнин Антон Иванович	УрФУ	anton.va
Веселова Ангелина Владимировна	СПбГУ	linav93@
Вибе Дмитрий Зигфридович	ИНАСАН	dwiebe@
Вибе Юлия Зигфридовна	УрФУ	wjulia@n
Вильянен Валентина Валентиновна	СибГАУ	Vilyaner
Волков Константин Валерьевич	УрФУ	KVVolko
Галиуллин Ильхам Ирекович	КФУ	ilkham95
Галушина Татьяна Юрьевна	ТГУ	volna@si
Гармаев Саян Номолович	БГУ	mir@bsu
Гашев Артем Владимирович	УрФУ	solibrwa
Гильдин Евгений Юрьевич	УрФУ	yo-4uvak
Гламазда Дмитрий Васильевич	АО УрФУ	antimuor
Гомбоев Максим Баирович	БГУ	mir@bsu
Горда Станислав Юрьевич	АО УрФУ	stanislav
Давыдова Ольга Анатольевна	УрФУ	Stanislav
Данилов Владимир Михайлович	АО УрФУ	Vladimir
Дашадылыкова Аюна Дамдинжаповна	БГУ	mir@bsu
Дорогов Алексей Александрович	УрФУ	dorogov.
Премер Владимир Владимирович	РФЯН ВНИИТФ	vyd053@

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Есипов Валентин Федорович	ГАИШ МГУ	gmr8@y
Железнов Николай Борисович	ИПА РАН	nickzhel
Желонкин Евгений Олегович	УрФУ	noname@
Заложных Иван Сергеевич	УрФУ	ivan.zalo
Захарова Полина Евгеньевна	АО УрФУ	Polina.Z
Зинченко Игорь Иванович	ИПФ РАН	zin@app
Зубарев Сергей Николаевич	УрФУ	Sergey.cl
Ионов Геннадий Владимирович	РФЯЦ-ВНИИТФ	
Ионов Дмитрий Эрикович	ИНАСАН	ionovd@
Казанцев Максим Борисович	ЧелГУ	kazant@
Калинин Александр Александрович	АО УрФУ	alexande
Квашнина Альвира Васильевна	УрФУ	alvira.kv
Ким Виталий Юрьевич	ГАО РАН	ursa-ma
Киричек Елена Александровна	ГАО РАН	elenakiri
Кирсанова Мария Сергеевна	ИНАСАН	kirsanov
Кисеев Валерий Михайлович	УрФУ	Valery.K
Кискин Михаил Юрьевич	УрФУ	kiskin_r
Климова Екатерина Сергеевна	УрФУ	klimova.
Ковалев Юрий Юрьевич	АКЦ ФИАН	yuk@asc
Кожевников Валерий Петрович	УрФУ	valery.ko
Кожевникова Алла Валерьевна	АО УрФУ	kozhevni
Козлова Олеся Владимировна	КрАО	oles@cra

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Кононов Дмитрий Алексеевич	ИНАСАН	dkonono
Кочеткова Мария Андреевна	ПуцГЕНИ	nir_push
Кривошеин Сергей Борисович	СПбГУ	sir-chaos
Крушинский Вадим Владимирович	АО УрФУ	krussh@
Кузнецов Эдуард Дмитриевич	УрФУ	Eduard.I
Куликова Анастасия Витальевна	ТГУ	anasta-k
Кутовой Виталий Юрьевич	БГУ	mir@bsu
Кучина Анастасия Дмитриевна	УрФУ	namoves
Лагутов Сергей Петрович	УрФУ	Sereys12
Левитская Татьяна Иосифовна	УрФУ	Tatiana.
Логонова Мария Олеговна	УрФУ	pin-gvin
Лойченко Екатерина Сергеевна	ТГУ	ekaterina
Лукашевич Дмитрий Евгеньевич	УрФУ	lukashev
Любимов Виктор Николаевич	ИНАСАН	llook@y
Ляпцев Антон Павлович	УрФУ	anton.ly
Макаренко Николай Григорьевич	ГАО РАН	ng-maka
Малков Олег Юрьевич	ИНАСАН	malkov@
Матвеева Екатерина Алексеевна	УрФУ	avelon@
Машеева Ольга Олеговна	БГУ	mir@bsu
Медведев Иван Викторович	ТГУ	Fill0Soff
Микрюков Денис Викторович	СПбГУ	denastu

Список участников конференции

273

ФИО	Организация	E-mail
Москвин Александр Сергеевич	УрФУ	alexandr
Никифорова Татьяна Петровна	АО УрФУ	Tayana.L
Носова Мария Александровна	УрФУ	yourener
Облендер Владислав Андреевич	УрФУ	Oblende
Овчинников Александр Сергеевич	УрФУ	alexande
Овчинников Александр Игоревич	УрФУ	terbium
Огороднова Юлия Юрьевна	УрФУ	Ulia_Og
Островский Андрей Борисович	УрФУ	Andrei.C
Павлюченков Ярослав Николаевич	ИНАСАН	pavyar@
Парфенов Сергей Юрьевич	УрФУ	sergey.pa
Перминов Александр Сергеевич	УрФУ	permino
Петренко Анастасия Матвеевна	УрФУ	Nastya_
Петрофанова Ксения Владимировна	УрФУ	ksuff14@
Полушина Татьяна Сергеевна	АО УрФУ	tatyana.
Попков Александр Викторович	ГАИШ МГУ	av.popko
Попова Евгения Сергеевна	УрФУ	albalup@
Попова Мария Эриковна	АО УрФУ	maria.po
Пружинская Мария Викторовна	МГУ	
Пузин Василий Борисович	ИНАСАН	vpuzin@
Пунанова Анна Федоровна	Университет г. Лидс	Punanov
Путков Станислав Игоревич	АО УрФУ	Putkov_
Пшонка Иван Андреевич	УрФУ	forgotten

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Роздьяконова Юлия Игоревна	УрФУ	YuliaRoz
Рыбак Алексей Леонидович	ГАО РАН	solarfish
Салий Светлана Викторовна	АО УрФУ	svetlana
Самбаров Георгий Евгеньевич	ТГУ	detovelli
Санникова Татьяна Николаевна	СПбГУ	tnsannik
Сатонкин Николай Артемович	УрФУ	virus909
Селезнев Антон Федорович	АО УрФУ	anton.se
Семянников Александр Валерьевич	ВолГУ	avsemya
Симонова Наталья Владимировна	ТГУ	natalek5
Скокова Анастасия Сергеевна	УрФУ	supermo
Скрипниченко Павел Вадимович	УрФУ	savl-silve
Соболев Андрей Михайлович	АО УрФУ	Andrej.S
Соловьев Александр Анатольевич	ГАО РАН	solov@g
Тутуков Александр Васильевич	ИНАСАН	atutukov
Угольников Олег Станиславович	ИКИ РАН	ougolnik
Унковский Никита Алексеевич	ЮФУ	nii.ic434
Устинова Екатерина Андреевна	УрФУ	katerina
Фалалеева Анна Андреевна	УрФУ	Ann.Fal
Хачай Юрий Васильевич	ИГФ УрО РАН	yu-khack
Холшевников Константин Владиславович	СПбГУ	kvk@ast
Хонеров Сергей Александрович	ИНАСАН	khonero

Список участников конференции

275

ФИО	Организация	E-mail
Хремли Галина Павловна	УрФУ	galina.kl
Хусанова Яна Игоревна	УрФУ	janjo@lis
Царегородцева Полина Михайловна	УрФУ	polly_20
Цемдяйкин Данил Владимирович	УрФУ	danilts92
Чеботарёв Виктор Евдокимович	ОАО ИСС	chebotar
Черепанов Вениамин Михайлович	БГУ	mir@bsu
Чересельская Ирина Александровна	УрФУ	Cheresel
Шагабутдинов Альфат Исмагилович	АО УрФУ	Alfat.Sh
Шайдулин Вахит Шамильевич	СПбГУ	shvak@y
Шаповалова Анастасия Сергеевна	УрФУ	anastasia
Шематович Валерий Иванович	ИНАСАН	shemativ
Шестакова Елена Егоровна	БГУ	mir@bsu
Шустов Борис Михайлович	ИНАСАН	bshustov
Щерба Рышард Казимирович	АЦНК	szczerba
Элбакян Вардан Геворгович	НИИФ ЮФУ	vardan.g
Ясько Павел Петрович	СПбГУ	astromex

Содержание

Материалы конференции	5
ОБЗОРНЫЕ ЛЕКЦИИ	7
Боли П. Э. Инфракрасная интерферометрия и изучение массивных молодых звездных объектов	7
Васюнин А. И. Органические молекулы в регионах звездообразования	22
Вибе Д. З. Пыль в зонах ионизованного водорода	23
Железнов Н. Б. Спутники астероидов	33
Зинченко И. И. Высокоскоростные биполярные истечения в областях звездообразования	45
Кисеев В. М. Системы терморегулирования космических аппаратов	55
Krelowski J. Dark Matter — truth or myth?	77
Макаренко Н. Г. Как увидеть геометрию в облаке точек?	78
Малков О. Ю. Современные обзоры, атласы и инструменты для определения межзвездного поглощения	79
Москвин А. С. Высокотемпературная сверхпроводимость	101
Соловьев А. А., Киричек Е. А. Аналитическая основа модели неосесимметричного солнечного пятна с течениями Эвершеда	102
Угольников О. С. Верхняя атмосфера: встреча Земли и Космоса	112
Холщевников К. В., Санникова Т. Н. Движение с постоянным в различных системах отсчета возмущающим ускорением	129
Хоперсков С. А. Гало галактик	147
Шустов Б. М. О будущем астрономии в России	158
Щерба Р. Поздние стадии эволюции звезд по наблюдениям в инфракрасном диапазоне (основные результаты проектов Spitzer, Herschel и результаты, полученные на интерферометре ALMA)	173
ТЕЗИСЫ СТУДЕНЧЕСКИХ ДОКЛАДОВ	175
Баранников Е. А. Алгоритмы определения граничных точек доверительных областей в задачах исследования движения малых тел Солнечной системы	177
Белей Д. А. SolarSuit — система визуализации динамики космических объектов	178
Бондарев Р. В. Динамика крупномасштабных галактических течений	179

Булатова Н. В. Эффективность коллокационных методов на симметричных разбиениях Гаусса в задачах небесной механики	180
Веселова А. В. Задача восстановления параметров спиральных рукавов Галактики по их сегментам	181
Вильянен В. В., Чеботарёв В. Е. Воздействие на эволюцию орбиты астероида несимметричной формы путем изменения его миделева сечения	182
Галиуллин И. И. Поиск переменных в окрестности звезды V523 Cas	183
Дорогов А. А., Горда С. Ю., Давыдова О. А. Смена типа кривой блеска контактной затменной AM Leo в 2012 г. . . .	184
Кочеткова М. А. Особенности изучения радиопульсаров с излучением вне радиодиапазона	185
Кривошеин С. Б. Кинематическая калибровка шкал расстояний до планетарных туманностей	186
Куликова А. В. Профили линейно поляризованного изгибного излучения пульсаров	187
Логинова М. О. Разработка модулей астрометрического и небесно-механического программного обеспечения в пакете EROS	188
Лойченко Е. С. Анализ некоторых особенностей Тунгусского явления 1908 г. методами динамики космического полета . .	189
Ляпцев А. П., Горда С. Ю., Соболев А. М. Исследование новой переменной типа W UMa	190
Медведев И. В. Дистанционное численное моделирование астероидного движения	191
Семянников А. В. Устойчивость сферической аккреции на черную дыру: учет эффектов ОТО	192
Шаповалова А. С., Парфенов С. Ю., Соболев А. М., Горда С. Ю., Ахматханова Г. Г. Оценка основных физических параметров звезды AE Aur по спектрам высокого разрешения	193
ТЕЗИСЫ КРАТКИХ СООБЩЕНИЙ	194
Балуев Р. В., Beaugé С. Трехпланетный резонанс 1:2:5 в системе HD 82943?	196
Балуев Р. В. Некоторые вопросы многочастотного анализа временных рядов	197
Бисярина А. П., Горда С. Ю., Соболев А. М., Парфенов С. Ю. Спектральные исследования звезды HD 200775 .	198
Бутенко М. А. Новая выборка галактик с полигональными структурами	199

Данилов В. М., Путков С. И. Сглаживание потенциала и спектры колебаний модели РЗС	200
Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В. Сверхскоростные звезды: теория и наблюдения	201
Ионов Д. Э., Бисикало Д. В., Шематович В. И. Эффективность нагрева атмосферы экзопланеты HD 209458b . . .	202
Кирсанова М. С., Акимкин В. В., Павлюченков Я. Н., Вибе Д. З. Дрейф пыли в зонах НП	203
Кононов Д. А., Барабанов С. И. Моделирование процесса наблюдений и обработки данных в космическом астрометрическом эксперименте ОЗИРИС	204
Парфенов С. Ю., Соболев А. М. О периодической переменности мазеров метанола II класса	205
Перминов А. С., Кузнецов Э. Д. Разложение гамильтониана планетной задачи в системе координат Якоби с использованием второй системы элементов Пуанкаре	206
Пузин В. Б. Фотометрические и спектральные наблюдения переменных звезд типа FK Comae	207
Самбаров Г. Е., Черницов А. М. Оценивание влияния возмущающих ускорений в уравнениях движения АСЗ на точность построения доверительных областей	208
Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю. Программный комплекс ЭРОС — новый инструмент астрометрической и небесно-механической поддержки позиционных наблюдений	209
Угольников О. С., Пуанова А. Ф., Крушинский В. В. Исследования составляющих южной полярной стратосферы на основе спектроскопии высокого разрешения поверхности Луны в тени Земли	210
Храмцова М. С. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) во внегалактических комплексах НП	211
Шайдулин В. Ш. Точность представления геопотенциала и его градиента в околоземном пространстве	212
Ясько П. П. Периодические орбиты в общей задаче трех тел	213
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	215
Алексеев И. Ю., Козлова О. В., Кожевникова А. В. Пятенная активность системы IN COM на основе многолетних фотометрических и спектральных наблюдений	217
Балуев Р. В. PlanetPack: Профессиональный пакет обработки доплеровских временных рядов для задач поиска и исследования внесолнечных планет	218
Гильдин Е. Ю. Исследование орбитальной эволюции спутников глобальных навигационных систем в окрестности резонансов высоких порядков	219

Горда С. Ю. Спектрофотометрия высокого разрешения AM Leo на 1.2-м телескопе АО УрФУ	220
Зубарев С. Н. Гомогенизированные эффективные температуры и звездные величины для звезд рассеянного скопления NGC 188	221
Кайзер Г. Т., Вибе Ю. З. Результаты позиционных наблюдений астероидов и комет на телескопе СБГ Коуровской АО УрФУ в 2013 г.	222
Калинин А. А. Анализ затменного спектра солнечного протуберанца 29 марта 2006 г. с учетом томсоновского рассеяния на свободных электронах	223
Калинина Н. Д. Оценки физических параметров молекулярных ядер NGC 6334I и NGC 6334I(N) по отдельным спектральным линиям молекул	224
Квашнина А. В., Желонкин Е. О. Программно-аппаратный комплекс для мониторинга астроклиматических условий	225
Кожевников В. П. Продолжительные наблюдения промежуточного полюра 1RXS J063631.9+353537	226
Кузнецов Э. Д., Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Шагабудинов А. И. Поиск высокоорбитальных объектов, движущихся в окрестности резонансов высоких порядков, по позиционным наблюдениям на телескопе СБГ АО УрФУ	227
Лукашевич Д. Е., Цемдяйкин Д. В. Применение современных технологий при решении геодезических задач	228
Никифорова Т. П., Васькина А. М., Шагабудинов А. И. Плазменные структуры в петлях активных областей на Солнце по наблюдениям в линиях кальция H и K CaII и водорода H ϵ	229
Салий С. В., Соболев А. М., Зинченко И. И. Исследование молекулярного ядра S255 N в радиолиниях метанола	230
Смирнова К. И. Внутренняя кинематика галактики SPRC 27	231
Угольников О. С., Пуанова А. Ф., Крушинский В. В. Измерения содержания озона и диоксида азота над Коуровской обсерваторией на основе спектроскопии фона сумеречного неба	232
Хусанова Я. И., Кононов Д. А., Сытов А. Ю. Спектральные исследования молодой двойной звезды V 4046 Sgr	233
Из истории науки	235
Галушина Т. Ю., Скрипниченко П. В. Астероидная опасность: от первых представлений до наших дней	237
Левитская Т. И. Современные системы координат в геодезии	249

Литературные страницы	261
В. Б. Зинин	263
Н. Д. Калинина	264
А. А. Соловьев	266
Список участников конференции	269

Научное издание

Физика Космоса

Труды 43-й Международной
студенческой научной конференции
Екатеринбург,
3—7 февраля 2014 г.

Редактор Т. А. Федорова
Оригинал-макет — Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 14.01.14. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 18,2.
Тираж 160 экз. Заказ 32.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Отпечатано в ИПЦ УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.
Тел. (343) 350-56-64.

ISBN 978-5-7996-1081-4

