

# МИЛЛИМЕТРОВАЯ И СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ АСТРОНОМИЯ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

**И. И. Зинченко**

*Институт прикладной физики РАН, Нижегородский  
государственный университет им. Н. И. Лобачевского*

В данном обзоре обсуждаются недавние достижения и актуальные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии. Приводятся сведения о действующих, строящихся и проектируемых инструментах этого диапазона, как наземных, так и космических.

## MILLIMETER AND SUBMILLIMETER WAVE ASTRONOMY TODAY AND TOMORROW

**I. I. Zinchenko**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*

In this review, recent achievements and actual problems of millimeter and submillimeter astronomy are discussed. The article provides information on existing, under construction and projected instruments of this band, both ground-based and space ones.

## Введение

Астрономия в настоящее время стала не только всеволновой, охватывая весь спектр электромагнитных волн, но и научилась использовать неэлектромагнитные каналы получения информации о Вселенной. Давно и успешно изучаются космические лучи. Уже несколько десятилетий работают детекторы нейтрино. Совсем недавно впервые удалось зарегистрировать гравитационные волны. Среди этого потока информации далеко не последнюю роль занимают результаты наблюдений на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. В настоящем обзоре рассматриваются основные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии [1, 2], а также состояние и перспективы развития ее инструментальной базы. Описываются некоторые достижения последнего времени, подбор которых, конечно, отражает собственные интересы автора.

## Основные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

Один из основных объектов изучения миллиметровой и субмиллиметровой астрономии — это так называемая «холодная» Вселенная, в основном межзвездные газопылевые облака, как в нашей Галактике, так и в далеких объектах. Интересны они прежде всего тем, что в них происходит процесс звездообразования, многие аспекты которого до сих пор не вполне понятны. Температура областей звездообразования составляет от нескольких до десятков кельвинов. Пик их излучения при такой температуре лежит в субмиллиметровом диапазоне. Этот диапазон также чрезвычайно насыщен спектральными линиями, отвечающими в основном переходам между вращательными уровнями молекул с относительно низкой энергией возбуждения. В межзвездных облаках найдено очень много разнообразных молекул. Это важно, поскольку наблюдения молекулярных линий позволяют изучать физические условия и процессы в межзвездных облаках, а также их химический состав. Основной компонент плотных межзвездных облаков — молекулярный водород — в этих условиях ненаблюдаем.

Задачи исследования межзвездных облаков, в частности областей звездообразования, многообразны. Во-первых, это изучение общих характеристик межзвездной среды в нашей Галактике и в других галактиках. Примером такой работы является обзор плоскости Галактики в линии CO  $J = 1-0$  [3], который послужил основой для многих дальнейших исследований. Такой обзор дает общее представление о распределении и кинематике межзвездного вещества, однако имеет довольно низкое угловое разрешение и с трудом позволяет выделить и исследовать компактные области звездообразования. Для таких задач очень полезны обзоры значительных участков плоскости Галактики с существенно более высоким разрешением в континууме и в линиях некоторых молекул, выполненные при помощи наземных и космических инструментов. Среди них можно отметить наземные обзоры в континууме на волнах  $\sim 1$  мм ATLASGAL (The APEX telescope large area survey of the galaxy at  $870 \mu\text{m}$ ) [4, 5] и BOLOCAM [6], а также обзор в линии  $^{13}\text{CO } J = 1-0$  GRS (The Boston University-Five College Radio Astronomy Observatory Galactic Ring Survey) [7]. Очень много полезной информации дали космические аппараты, работавшие на волнах от дальнего ИК до ближнего ИК диапазонов (например, *Spitzer* Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire

— GLIMPSE [8], MIPS Inner Galactic Plane Survey — MIPS GAL [9], *Herschel* [10], Wide Field Infrared Survey Explorer — WISE [11]).

Одной из интересных задач являются исследования вариаций характеристик межзвездной среды и областей звездообразования, в частности, в зависимости от положения в Галактике. Имеются указания на то, что средняя плотность облаков и некоторые другие параметры меняются по радиусу Галактики [12–14]. Такие исследования лучше, конечно, проводить по наблюдениям соседних галактик. Довольно давно уже получены подробные карты распределения CO в M31 [15]. С появлением новых инструментов такие работы могут дать новые важные результаты.

Одним из ключевых вопросов астрофизики является исследование истории звездообразования во Вселенной. К настоящему времени проведены многочисленные исследования того, как менялась скорость звездообразования во Вселенной. Общая картина более или менее сложилась, но новые наблюдения далеких галактик с более высокой чувствительностью должны помочь с уточнением многих деталей [16].

Особенно интригующим является вопрос об образовании первых звезд и галактик. Здесь возникает проблема исследования «темных веков» Вселенной — промежутка времени между эпохой рекомбинации и рождением первых звезд. Пока нет никакой наблюдательной информации об этом периоде, и, как представляется, единственный способ получить такую информацию — это поиск искажений в спектре микроволнового реликтового фона, создаваемых простыми молекулами, которые могут уже присутствовать во Вселенной в это время [17]. Правда, ожидаемые искажения чрезвычайно малы. Одной из наиболее перспективных молекул является ион  $\text{HeH}^+$  [18–20]. Он пока не обнаружен в космосе, хотя теоретические модели предсказывают его заметное обилие при определенных условиях. Нами проведен поиск линии  $J = 1 - 0$   $\text{HeH}^+$  в спектре далекого квазара на красном смещении  $z = 6.42$  [21]. Зарегистрирована возможная линия излучения с отношением сигнал/шум  $\sim 3$ , что не позволяет говорить о ее достоверном обнаружении.

Сами процессы звездообразования также вызывают еще немало вопросов. Особенно это касается звезд большой массы, которые в процессе формирования сильно воздействуют на окружающее их вещество родительского облака [22]. Основной вопрос здесь: образуются ли они так же, как звезды меньшей массы, путем дисковой аккреции или в данном случае работают другие механизмы? В последние

годы, благодаря наблюдениям на антенной решетке ALMA, удалось увидеть диски вокруг молодых массивных (прото)звезд [23–25] и даже впервые зарегистрировать вспышку в ИК диапазоне, обусловленную аккрецией вещества из диска у массивного молодого звездного объекта S255 NIRS3 [26, 27], а также связанную с ней вспышку мазера метанола на частоте 6.7 ГГц [28, 29]. Таким образом, имеются веские свидетельства того, что дисковая аккреция работает до масс по крайней мере  $\sim 20 M_{\odot}$ . В то же время пока не удалось получить детальных изображений дисков вокруг массивных (прото)звезд, сравнимых с теми, которые уже получены для близких к нам звезд малой массы. Теоретические модели показывают, что эти диски могут быть очень неоднородны [30]. Требуются дальнейшие наблюдения таких дисков с более высоким угловым разрешением.

Помимо изучения «холодной» Вселенной миллиметровая и субмиллиметровая астрономия важна и в других областях астрофизических исследований [2]. В частности, в этом диапазоне можно реализовать угловое разрешение, которое позволит детально изучать процессы вблизи сверхмассивных черных дыр в центрах нашей Галактики и других галактик.

Одна из фундаментальнейших задач в исследованиях Вселенной — это поиск проявлений первичных гравитационных волн, которые возникают в инфляционных моделях. Единственным таким наблюдательным проявлением, как сейчас представляется, является В-мода поляризации реликтового микроволнового фона [31]. Недавнее сообщение о ее обнаружении в эксперименте BICEP2 не подтвердилось. Тем не менее эксперименты активно продолжают со все возрастающей чувствительностью. Помимо первичных гравитационных волн В-мода может возникать вследствие гравитационного линзирования. Эта компонента измерена в ряде экспериментов [32]. Но задача поиска такой поляризации, обусловленной первичными гравитационными волнами, остается одной из важнейших.

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия может помочь в решении и такой научной проблемы, как поиск возможных вариаций некоторых фундаментальных констант. Такие вариации возможны в принципе как во времени, так и в пространстве. Последние возникают в моделях так называемых «хамелеонных» скалярных полей, существование которых было предложено для объяснения ускоренного расширения Вселенной [33]. В этих моделях некоторые физические константы, в частности отношение массы электрона к массе протона  $\mu$ , зависят от локальной плотности барионной материи. По-

скольку эта плотность на Земле и в межзвездной среде отличается на много порядков величины, можно пытаться проверить эти модели сравнивая на Земле и в космосе частоты молекулярных переходов, которые по разному зависят от этого отношения. Один возможный вариант — это вращательные и инверсионные переходы разных молекул. Другой вариант — разные типы переходов в одной молекуле, например, в метаноле. К настоящему времени проведен ряд таких измерений в направлении холодных межзвездных облаков с узкими спектральными линиями. Эти измерения дали верхние пределы на возможные изменения отношения массы электрона к массе протона  $|\Delta\mu/\mu| \lesssim 3 \times 10^{-8}$  [34, 35].

## Существующие и перспективные инструменты

В одном из недавних сборников «Физика космоса» мной был представлен обзор существующих и проектируемых инструментов для миллиметровой и субмиллиметровой астрономии [36]. Ниже кратко повторяются основные моменты и отмечаются последние достижения.

Для наблюдений на миллиметровых и субмиллиметровых волнах используются как одиночные антенны, так и интерферометры (в основном это наземные инструменты, хотя есть и самолетная обсерватория SOFIA [37]), а также периодически проводятся измерения с аэростатов.

Из одиночных антенн, работающих на коротких миллиметровых волнах, одним из самых эффективных остается 30-м радиотелескоп Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM), который расположен на высоте 2920 м в горах Сьерра Невада, вблизи вершины Pico Veleta, в 50 км от Гранады (Испания). Он используется на частотах до  $\sim 350$  ГГц (0.8 мм).

На волнах до  $\sim 3$  мм активно используются 45-м радиотелескоп в Нобеяма (Япония), 20-м радиотелескоп радиообсерватории Онсала (Швеция), 22-м радиотелескоп MOPRA в Австралии, 22-м радиотелескоп Крымской астрофизической обсерватории, несколько 14-м радиотелескопов (в частности, в США, КНР и Финляндии), 12-м радиотелескоп на Китт Пик. В этом диапазоне может работать и 100-м радиотелескоп НРАО в Грин Бэнк, хотя его эффективность на волне 3 мм невелика. Вводятся в строй 64-м радиотелескоп на Сардинии [38] и 50-м Большой миллиметровый телескоп в Мекси-

ке [39]. Последний должен работать на волнах до  $\sim 1$  мм. Пока по-прежнему неясны перспективы завершения строительства 70-м радиотелескопа на плато Суффа в Узбекистане.

Есть несколько антенн диаметром 10–15 м, которые работают в субмиллиметровом диапазоне длин волн. К ним относятся, в частности, телескопы JCMT, APEX, CSO, NHT, SPO, ARO. Обсуждается возможность строительства 40-м субмиллиметрового телескопа в Чили.

Среди интерферометрических систем беспрецедентными возможностями обладает Большая миллиметровая/субмиллиметровая решетка в Атакаме (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array — ALMA), строительство которой было недавно завершено на высоте 5 000 м в пустыне Атакама в Чилийских Андах совместными усилиями ряда организаций США, Европы и Японии. Продолжает эффективно использоваться Субмиллиметровая антенная решетка на Гавайях. Успешно осуществляется проект NOEMA (NOthern Extended Millimeter Array) по удвоению числа антенн интерферометра на Плато де Бюр во французских Альпах.

Одиночные антенны и антенные решетки могут объединяться в глобальную интерферометрическую сеть. Такой сетью является Телескоп горизонта событий, основной целью которого является изучение сверхмассивных черных дыр в центре нашей Галактики и в центрах некоторых близких галактик.

После очень успешной работы субмиллиметровой космической обсерватории *Herschel* активно обсуждаются и готовятся новые космические проекты в этом диапазоне. Наиболее продвинутым из них является российский проект «Миллиметрон» [40], но изучаются и другие варианты.

## Заключение

В последние годы, в основном благодаря появлению новых инструментов, особенно ALMA, наблюдения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах дали ряд новых важных астрофизических результатов. Этот диапазон интересен для многих областей астрофизики. В настоящее время создаются и проектируются новые инструменты. В недалеком будущем можно ожидать новых достижений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда научных исследова-

дований (проект 17-12-01256, раздел «Основные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии») и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-02-06098, раздел «Существующие и перспективные инструменты»).

## Библиографические ссылки

1. *Зинченко И. И.* Современная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия // Изв. вузов. Радиофизика. — 2003. — Т. 46, № 8—9. — С. 641—659.
2. *Кардашев Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др.* Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // Успехи физ. наук. — 2014. — Т. 184, № 12.
3. *Dame T. M., Hartmann D., Thaddeus P.* The Milky Way in Molecular Clouds: A New Complete CO Survey // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 547. — P. 792—813. [astro-ph/0009217](#).
4. *Schuller F., Menten K. M., Contreras Y. et al.* ATLASGAL - The APEX telescope large area survey of the galaxy at 870  $\mu\text{m}$  // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 504. — P. 415—427. [0903.1369](#).
5. *Csengeri T., Urquhart J. S., Schuller F. et al.* The ATLASGAL survey: a catalog of dust condensations in the Galactic plane // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 565. — P. A75. [1312.0937](#).
6. *Aguirre J. E., Ginsburg A. G., Dunham M. K. et al.* The Bolocam Galactic Plane Survey: Survey Description and Data Reduction // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2011. — Vol. 192. — P. 4. [1011.0691](#).
7. *Jackson J. M., Rathborne J. M., Shah R. Y. et al.* The Boston University-Five College Radio Astronomy Observatory Galactic Ring Survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2006. — Vol. 163. — P. 145—159. [astro-ph/0602160](#).
8. *Benjamin R. A., Churchwell E., Babler B. L. et al.* GLIMPSE. I. An SIRTf Legacy Project to Map the Inner Galaxy // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2003. — Vol. 115. — P. 953—964. [astro-ph/0306274](#).
9. *Carey S. J., Noriega-Crespo A., Price S. D. et al.* MIPSGAL: A Survey of the Inner Galactic Plane at 24 and 70 microns, Survey Strategy and Early Results // *American Astronomical Society Meeting Abstracts : Bulletin of the American Astronomical Society.* — 2005. — Vol. 37. — P. 1252.
10. *Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al.* Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L1. [1005.5331](#).

11. *Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K. et al.* The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // *Astron. J.* — 2010. — Vol. 140. — P. 1868–1881. 1008.0031.
12. *Sakamoto S., Hasegawa T., Handa T. et al.* An Out-of-Plane CO ( $J = 2-1$ ) Survey of the Milky Way. II. Physical Conditions of Molecular Gas // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 486. — P. 276–+.
13. *Zinchenko I.* Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. III. Statistics of the core parameters // *Astron. Astrophys.* — 1995. — Vol. 303. — P. 554.
14. *Zinchenko I., Pirogov L., Toriseva M.* Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. VII. Core properties on the galactic scale // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1998. — Vol. 133. — P. 337–352.
15. *Nieten C., Neininger N., Guélin M. et al.* Molecular gas in the Andromeda galaxy // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 453. — P. 459–475. arXiv: astro-ph/0512563.
16. *Madau P., Dickinson M.* Cosmic Star-Formation History // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 52. — P. 415–486. 1403.0007.
17. *Dubrovich V. K.* Molecules of cosmological origin // *Soviet Astronomy Letters.* — 1977. — Vol. 3. — P. 128.
18. *Dubrovich V. K., Lipovka A. A.* Radio absorption by  $\text{HeH}^+$  molecules in the spectra of remote QSOs. // *Astron. Astrophys.* — 1995. — Vol. 296. — P. 307.
19. *Dubrovich V. K.* The huge enhancement of Spectral-Spatial Fluctuations (SSF) in the Cosmic Background Radiation (CBR) // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 324. — P. 27–31.
20. *Galli D., Palla F.* The Dawn of Chemistry // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 51. — P. 163–206. 1211.3319.
21. *Zinchenko I., Dubrovich V., Henkel C.* A search for  $\text{HeH}^+$  and CH in a high-redshift quasi-stellar object // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 415. — P. L78–L80.
22. *Tan J. C., Beltrán M. T., Caselli P. et al.* Massive Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 149–172. 1402.0919.
23. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 810. — P. 10. 1507.05642.
24. *Johnston K. G., Robitaille T. P., Beuther H. et al.* A Keplerian-like Disk around the Forming O-type Star AFGL 4176 // *Astrophys. J. Lett.* — 2015. — Vol. 813. — P. L19. 1509.08469.

25. *Ilee J. D., Cyganowski C. J., Nazari P. et al.* G11.92-0.61 MM1: a Keplerian disc around a massive young proto-O star // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462. — P. 4386–4401. 1608.05561.
26. *Stecklum B., Caratti o Garatti A., Cardenas M. C. et al.* The methanol maser flare of S255IR and an outburst from the high-mass YSO S255IR-NIRS3 — more than a coincidence? // *The Astronomer's Telegram.* — 2016. — Vol. 8732.
27. *Caratti o Garatti A., Stecklum B., Garcia Lopez R. et al.* Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object // *Nature Physics.* — 2017. — Vol. 13. — P. 276–279. 1704.02628.
28. *Fujisawa K., Yonekura Y., Sugiyama K. et al.* A flare of methanol maser in S255 // *The Astronomer's Telegram.* — 2015. — Vol. 8286.
29. *Moscadelli L., Sanna A., Goddi C. et al.* Extended CH<sub>3</sub>OH maser flare excited by a bursting massive YSO // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 600. — P. L8.
30. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Kuiper R., Kley W.* On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 464. — P. L90–L94. 1609.03402.
31. *Kamionkowski M., Kovetz E. D.* The Quest for B Modes from Inflationary Gravitational Waves // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 54. — P. 227–269. 1510.06042.
32. *The POLARBEAR Collaboration, Ade P. A. R., Aguilar M. et al.* A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-mode Polarization Power Spectrum at Subdegree Scales from Two Years of polarbear Data // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 848. — P. 121. 1705.02907.
33. *Khoury J., Weltman A.* Chameleon Fields: Awaiting Surprises for Tests of Gravity in Space // *Physical Review Letters.* — 2004. — Vol. 93, № 17. — P. 171104. astro-ph/0309300.
34. *Levshakov S. A., Lapinov A. V., Henkel C. et al.* Searching for chameleon-like scalar fields with the ammonia method. II. Mapping of cold molecular cores in NH<sub>3</sub> and HC<sub>3</sub>N lines // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 524. — P. A32. 1008.1160.
35. *Daprà M., Henkel C., Levshakov S. A. et al.* Testing the variability of the proton-to-electron mass ratio from observations of methanol in the dark cloud core L1498 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 472. — P. 4434–4443. 1709.03103.
36. *Зинченко И. И.* Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия на Земле и в космосе // *Физика космоса* : тр. 44-й Международ. студ. науч. конф. — 2015. — С. 37–45.

37. *Gehrz R. D., Becklin E. E., de Pater I. et al.* A new window on the cosmos: The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) // *Advances in Space Research.* — 2009. — Vol. 44. — P. 413–432.
38. *Prandoni I., Murgia M., Tarchi A. et al.* The Sardinia Radio Telescope: From a Technological Project to a Radio Observatory // *ArXiv e-prints.* — 2017. 1703.09673.
39. *Irvine W. M., Schloerb F. P.* The Large Millimeter Telescope- El Gran Telescopio Milimetrico // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 37. — P. 652.
40. *Smirnov A. V., Baryshev A. M., Pilipenko S. V. et al.* Space mission Millimetron for terahertz astronomy // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2012. — Vol. 8442.