

## Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон

Н.С. Кардашёв, И.Д. Новиков, В.Н. Лукаш, С.В. Пилипенко, Е.В. Михеева, Д.В. Бисикало, Д.З. Вибе, А.Г. Дорошкевич, А.В. Засов, И.И. Зинченко, П.Б. Иванов, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, С.Ф. Лихачёв, И.Ф. Малов, В.М. Малофеев, А.С. Позаненко, А.В. Смирнов, А.М. Соболев, А.М. Черепашук, Ю.А. Щекинов

*Представлен обзор широкого круга научных задач астрофизики и космологии, которые могут быть решены на основе астрономических наблюдений в диапазоне длин волн от дальнего инфракрасного до миллиметрового. Представленные задачи, связанные с образованием и эволюцией звёзд и планет, галактик и межзвёздной среды, исследованиями чёрных дыр и развитием космологической модели, ориентированы на космическую обсерваторию Миллиметрон (проект "Спектр-М") с 10-метровым охлаждаемым зеркалом, которая будет работать как в режиме одиночного телескопа, так и в режиме наземно-космического интерферометра со сверхдлинной базой.*

PACS numbers: 07.87. + v, 95.55. – n, 97.10. – q, 98.62. – g, 98.80. – k

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201412c.1319

**Н.С. Кардашёв, В.Н. Лукаш, С.В. Пилипенко, Е.В. Михеева, А.Г. Дорошкевич, П.Б. Иванов, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, С.Ф. Лихачёв, А.В. Смирнов.** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация  
E-mail: nkardash@asc.rssi.ru, lukash@asc.rssi.ru, spilipenko@asc.rssi.ru, helen@asc.rssi.ru, dorr@asc.rssi.ru, pbi20@cam.ac.uk, vkostenko@asc.rssi.ru, ltanya@asc.rssi.ru, slikhach@asc.rssi.ru, asmirn@asc.rssi.ru

**И.Д. Новиков.** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация. E-mail: novikov@asc.rssi.ru  
The Niels Bohr International Academy, The Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark

**Д.В. Бисикало, Д.З. Вибе.** Институт астрономии РАН, ул. Пятницкая 48, 119017 Москва, Российская Федерация  
E-mail: bisikalo@inasan.ru, dwiebe@inasan.ru

**А.В. Засов, А.М. Черепашук.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Университетский просп. 13, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: zasov@sai.msu.ru, cher@sai.msu.ru

**И.И. Зинченко.** Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация; Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина 23, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: zin@appl.sci-nnov.ru

**И.Ф. Малов, В.М. Малофеев.** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Пушинская радиоастрономическая обсерватория, 142290 Пушкино, Московская обл., Российская Федерация  
E-mail: malov@prao.ru, malofeev@prao.ru

**А.С. Позаненко.** Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация  
E-mail: arozanen@iki.rssi.ru

**А.М. Соболев.** Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт естественных наук, Коуровская астрономическая обсерватория им. К.А. Бархатовой, ул. Ленина 51, 620000 Екатеринбург, Российская Федерация  
E-mail: Andrej.Sobolev@urfu.ru

**Ю.А. Щекинов.** Южный Федеральный университет, ул. Большая Садовая 105/42, 344006 Ростов-на-Дону, Российская Федерация  
E-mail: yus@srfedu.ru

Статья поступила 31 июля 2014 г.

## Содержание

1. Введение (1320).
  2. Межзвёздная среда и области звездообразования в Галактике (1323).
    - 2.1. Структура и кинематика межзвёздной среды.
    - 2.2. Области звездообразования в Галактике.
    - 2.3. Протопланетные диски и протозвёздные объекты.
    - 2.4. Источники мазерного излучения.
  3. Звёзды и планеты (1328).
    - 3.1. Прямые наблюдения экзопланет.
    - 3.2. Потеря массы на поздних стадиях эволюции звёзд.
    - 3.3. Поиск проявлений жизни во Вселенной.
  4. Звёздные остатки и вспышки звёзд (1331).
    - 4.1. Белые карлики.
    - 4.2. Радиоизлучение пульсаров.
    - 4.3. Релятивистские объекты в центрах шаровых скоплений.
    - 4.4. Природа ультраярких рентгеновских источников излучения.
    - 4.5. Сверхновые.
  5. Чёрные дыры и джеты (1335).
    - 5.1. Близкие чёрные дыры.
    - 5.2. Силуэты и тени чёрных дыр.
    - 5.3. Далёкие чёрные дыры.
    - 5.4. Физика джетов.
    - 5.5. Джеты космических гамма-всплесков.
  6. Галактики (1339).
    - 6.1. Эволюция галактик.
    - 6.2. Области с низкой скоростью звездообразования.
    - 6.3. Внегалактические области звездообразования.
    - 6.4. Динамика межзвёздной среды и химическая эволюция Вселенной.
    - 6.5. Гравитационное линзирование на больших красных смещениях.
  7. Космология (1346).
    - 7.1. Инфракрасный фон и обзоры галактик.
    - 7.2. Космологические расстояния по угловым размерам.
    - 7.3. Далёкие галактики и вторичная ионизация Вселенной.
    - 7.4. Скопления галактик.
    - 7.5. Послесвечения гамма-всплесков и родительские галактики.
    - 7.6. Первичные чёрные и белые дыры, кротовые норы и Мультивселенная.
  8. Заключение (1349).
- Список литературы (1350).

## 1. Введение

Космическая обсерватория Миллиметрон предназначена для проведения астрономических наблюдений с целью исследования различных объектов Вселенной в диапазоне электромагнитного спектра от 20 мкм до 20 мм. С начала 1990-х годов и до настоящего времени интерес учёных к работам по астрофизике и космологии в данном диапазоне длин волн только растёт. Этот диапазон чрезвычайно важен для проведения таких видов исследований астрономических объектов, как, например, исследования непрерывного спектра, спектральных линий, поляриметрии и переменности различных параметров.

Миллиметровый ( $1 \text{ мм} < \lambda < 1 \text{ см}$ ), субмиллиметровый ( $0,1 < \lambda < 1 \text{ мм}$ ) и дальний инфракрасный ( $50 < \lambda < 300 \text{ мкм}$ ) диапазоны уникальны для астрономических исследований по следующим причинам:

- в области длин волн около 1 мм расположен максимум реликтового излучения, или космического микроволнового фонового излучения (Cosmic Microwave Background, CMB), — единственного вида электромагнитного излучения, сохранившегося с самых ранних этапов возникновения Вселенной (Большого взрыва) и почти равномерно заполняющего её пространство. Детальное изучение пространственной структуры, спектра и поляризации CMB поможет в разрешении важнейших фундаментальных проблем астрофизики и космологии, таких как развитие космологической стандартной модели, вопросы появления и эволюции первых объектов во Вселенной, определение параметров тёмной материи и тёмной энергии и др.;

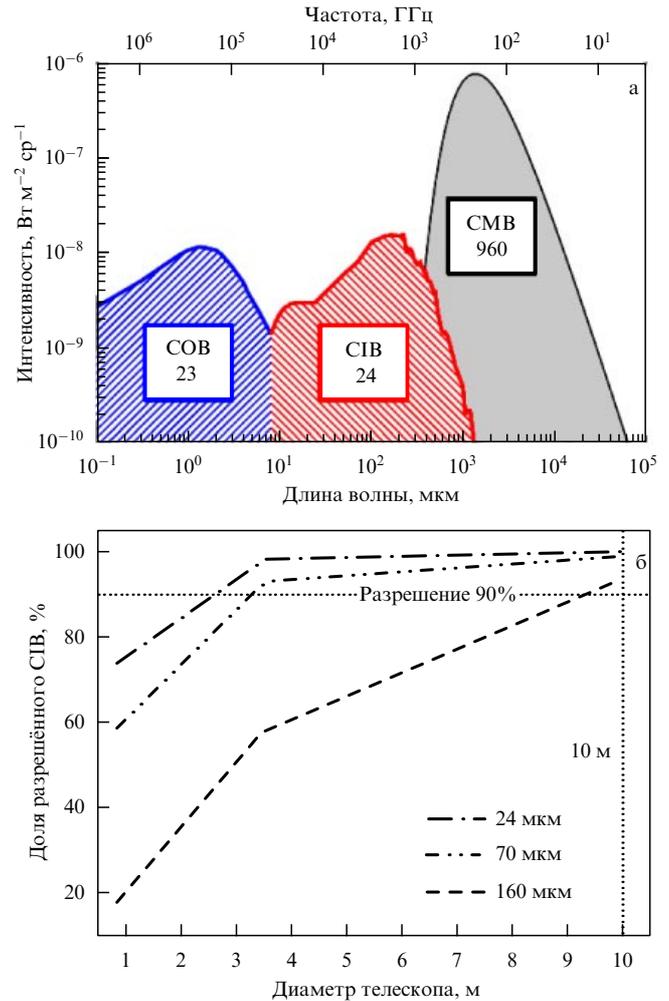
- в дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне находится максимум интенсивности излучения наиболее холодных объектов Вселенной, включая облака пыли и газа в нашей и других галактиках, астероиды, кометы и планеты, поэтому наблюдения в этой области позволяют исследовать эволюцию межзвёздной среды в процессе гравитационного сжатия, приводящего к образованию звёзд и планетных систем, а затем к возникновению жизни и цивилизаций;

- в области длин волн около 300 мкм находится минимум излучения фона неба, являющегося суммой излучений от различных источников, лежащих на луче зрения, и реликтового излучения (рис. 1а). Поэтому наблюдения в данной области позволяют исследовать очень слабые астрономические объекты — галактики, звёзды, чёрные дыры, экзопланеты и др. — с предельно высокой чувствительностью;

- в субмиллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах сосредоточено большое количество атомарных и молекулярных спектральных линий, что позволяет определять химический состав и физические свойства газа в различных объектах, от протопланетных дисков до галактик, в различные эпохи;

- работа в субмиллиметровом диапазоне длин волн позволит добиться существенного улучшения углового разрешения, используя методику наблюдения РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой) (Very Long Baseline Interferometry, VLBI), что необходимо для изучения структуры наиболее компактных объектов, например окрестностей чёрных дыр, некоторых пульсаров и гамма-всплесков;

- среда, окружающая многие интересные для исследований астрономические объекты, наиболее прозрачна



**Рис. 1.** (а) Спектр внегалактического фона. COB — космический оптический фон, CIB — космический инфракрасный фон, CMB — космический микроволновый фон. Числа указывают полную интенсивность компонента фона Вселенной в единицах  $\text{нВт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$  [1]. (б) Возможная доля разрешённого на отдельные источники космического ИК-фона в зависимости от диаметра телескопа для нескольких длин волн, указанных на рисунке [2].

в указанных диапазонах длин волн по сравнению с таковой в соседних областях, как коротковолновых (поглощение межзвёздной пылью), так и длинноволновых (синхротронное самопоглощение, тепловое поглощение плазмы, рассеяние на неоднородностях плазмы).

Одним из самых больших одиночных наземных телескопов, специально созданных для наблюдений в субмиллиметровом диапазоне длин волн, является телескоп Джеймса Клерка Максвелла (James Clerk Maxwell Telescope, JCMT) (<http://www.jach.hawaii.edu/JCMT/>) с диаметром зеркала 15 м, расположенный недалеко от вершины Мауна-Кеа (Гавайи) на высоте более 4000 м над уровнем моря. Гетеродинные приёмники JCMT покрывают все окна прозрачности атмосферы в частотном диапазоне 200–700 ГГц, а матричный болометрический приёмник из 10240 элементов работает в двух диапазонах длин волн: 450 и 850 мкм. JCMT используется для изучения Солнечной системы, межзвёздной пыли и газа, а также далёких галактик. Именно с помощью JCMT были открыты субмиллиметровые галактики, излучение которых в субмиллиметровой области

спектра значительно превосходит по мощности излучение в оптическом диапазоне.

Самым перспективным из наземных инструментов субмиллиметрового диапазона длин волн сейчас является антенная система ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) (<http://www.almaobservatory.org/>), находящаяся в настоящее время в стадии доработки. Она представляет собой компактный интерферометр с базой до 16 км, состоящий из 66 высокоточных антенн, из которых 54 — 12-метровые, а 12 — 7-метровые. Обсерватория ALMA, расположенная на высоте 5000 м над уровнем моря в пустыне Атакама (Чили), способна проводить астрономические наблюдения во всех окнах прозрачности атмосферы на длинах волн от 10 мм до 0,3 мм. Когда обсерватория ALMA заработает в полную силу, она обеспечит беспрецедентно высокую чувствительность, до 50 мкЯн при наблюдении в континууме, а угловое разрешение составит менее 0,1 с дуги, что позволит разрешать детали в протопланетных дисках и изучать морфологию далёких галактик. Одним из недостатков обсерватории ALMA является её малое поле зрения, что требует длительных сеансов наблюдений для проведения крупных обзоров дискретных источников, исследования протяжённых областей звездообразования в Галактике и картографирования больших участков небесной сферы.

Как отмечалось выше, проведение астрономических наблюдений на длинах волн  $\lambda \lesssim 300$  мкм с поверхности Земли является весьма проблематичным, поскольку оно в значительной мере определяется свойствами земной атмосферы: её собственным тепловым излучением и поглощением парами воды, кислорода, углекислого газа и озона. В связи с этим наблюдения на длинах волн короче 300 мкм целесообразно проводить на высотах не менее 10–30 км, где парциальное давление паров воды очень мало благодаря низкой температуре. Как известно, плотность водяного пара резко уменьшается с увеличением высоты и поглощение в его полосах практически сводится к нулю. Это уже успешно используется телескопами, находящимися на борту либо самолётов (SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) [3]), либо стратосферных зондов (BOOMERANG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics) [4], TELIS (TErahertz and submm Limb Sounder) [5], Olimpo и др.) Телескоп на борту космического аппарата имеет явные преимущества, поскольку отсутствует негативное влияние атмосферы Земли и появляется возможность глубокого охлаждения самого телескопа, что резко повышает его чувствительность.

Наиболее совершенным и близким предшественником обсерватории Миллиметрон является космическая обсерватория "Гершель" (Herschel), запущенная в 2009 г. и успешно работавшая до середины 2013 г. Основой обсерватории "Гершель" (<http://sci.esa.int/herschel/> [6]) являлся телескоп диаметром 3,5 м с пассивным охлаждением до температуры около 70 К. Обсерватория позволяла проводить астрономические наблюдения в диапазоне длин волн от 55 до 672 мкм. Приёмный комплекс обсерватории "Гершель" включал в себя матричные фотометрические приёмники, матричные спектрометры среднего разрешения и гетеродинный спектрометр высокого разрешения. Основными научными результатами космической миссии "Гершель" стали наблюдение областей звездообразования, пыли в нашей и других га-

лактиках, исследование субмиллиметровых галактик и тел Солнечной системы.

Миллиметрон представляет собой новый шаг в развитии космических обсерваторий благодаря своим уникальным характеристикам: высокому угловому разрешению и беспрецедентно высокой чувствительности в выбранном диапазоне длин волн — от дальнего инфракрасного до миллиметрового. Этот шаг, вероятно, позволит ответить на многие, в том числе фундаментальные, вопросы астрофизики и космологии. Уникальные прорывные научные задачи являются ключевым фактором при разработке требований к основным техническим характеристикам, которыми должна обладать обсерватория Миллиметрон для решения этих задач.

Для обсерватории Миллиметрон выбрана орбита в окрестностях точки Лагранжа L2, находящейся на расстоянии около 1,5 млн км от Земли с противосолнечной стороны, где реализуются наиболее благоприятные внешние условия для охлаждения телескопа. Для достижения беспрецедентно высокой чувствительности обсерватории необходимо глубокое охлаждение входных зеркал телескопа, до температуры менее 10 К. Такой режим можно реализовать только с помощью совместной эффективной работы двух систем охлаждения — пассивной и активной. Первая основана на солнцезащитных экранах, вторая — на криогенных рефрижераторах замкнутого цикла. Миллиметрон, находясь в окрестности точки Лагранжа L2, образует совместно с наземным телескопом или системой телескопов интерферометр с максимальной проекцией базы на картинную плоскость исследуемого источника более 1,5 млн км. Такой уникальный инструмент открывает новые горизонты в решении астрофизических задач, позволяя исследовать различные объекты с беспрецедентно высоким угловым разрешением.

Проект "Спектр-М" начинался в 1990-х годах. Описание различных вариантов конструкции обсерватории Миллиметрон по мере развития проекта и перечень её научных задач представлены в работах [2, 7, 8]. Основные характеристики Миллиметрона приведены в табл. 1.

Следует заметить, что в табл. 1 указаны желаемые характеристики, которые уже сегодня могут быть достигнуты при современном уровне развития технологий. Характеристики реальной обсерватории будут выработаны в результате тщательного поиска компромисса между этими пожеланиями, приоритетностью научных задач и стоимостью проекта.

Сравнение ожидаемых параметров обсерватории Миллиметрон с параметрами других существующих, создаваемых и планируемых обсерваторий (табл. 2), предназначенных для работы в близких или сходных диапазонах длин волн, например, таких как наземная система ALMA, космические обсерватории "Гершель" и SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) [10], позволяет выделить список *первоочередных* научных задач и сформулировать приоритеты для сеансов наблюдений.

Ожидаемая чувствительность обсерватории Миллиметрон, как минимум, на два порядка лучше, чем чувствительность телескопа "Гершель". Достигнутое на сегодня угловое разрешение в диапазоне длин волн от 20 до 300 мкм гораздо хуже, чем в других ближайших диапазонах (радиодиапазоне и ближнем ИК-диапазоне). Это связано с тем, что, как мы отмечали, диапазон 20–

Таблица 1. Основные характеристики обсерватории Миллиметрон

Режимы работы	Одиночная антенна	Интерферометр со сверхдлинной базой (Земля – космос)																			
Возможности	Низкое спектральное разрешение (фотометрия), $R = \lambda/\Delta\lambda \sim 3$ Среднее спектральное разрешение, $R \sim 10^3$ Высокое спектральное разрешение, $R \geq 10^6$ Поляриметрия	Оценка угловых размеров источников Получение одномерных сечений источников Построение модельных карт в рамках априорных представлений о структуре источника																			
Рабочий диапазон длин волн	20 мкм – 3 мм для $R \sim 3$ и $R \sim 10^3$ , 60 мкм – 1 мм для $R \geq 10^6$	0,3 – 17 мм																			
Угловое разрешение	6 угл. с при $\lambda = 300$ мкм	Для базы 1,5 млн км: $\sim 2$ угл. мкс при $\lambda = 13,5$ мм $\sim 50$ угл. нс при $\lambda = 0,345$ мм																			
Чувствительность	Среднеквадратичная величина шума $\sigma$ (при длине волны $\lambda = 300$ мкм, времени накопления 3600 с, эффективной площади телескопа 50 м <sup>2</sup> , чувствительности детекторов NEP $\leq 10^{-19}$ Вт Гц <sup>-1/2</sup> ): 20 нЯн при $R \sim 3$ 4 мкЯн (или $4 \times 10^{-23}$ Вт м <sup>-2</sup> ) при $R \sim 10^3$	$\sigma$ для ширины полосы 4 ГГц (две поляризации, двухбитное квантование)																			
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Частота, ГГц</th> <th>Время когерентного накопления [9], с</th> <th>Чувствительность, мЯн</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>22</td> <td>500</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>43</td> <td>500</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>500</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>240</td> <td>200</td> <td>1,5</td> </tr> <tr> <td>640</td> <td>80</td> <td>10,0</td> </tr> <tr> <td>870</td> <td>50</td> <td>15,0</td> </tr> </tbody> </table>	Частота, ГГц	Время когерентного накопления [9], с	Чувствительность, мЯн	22	500	0,2	43	500	0,3	100	500	0,5	240	200	1,5	640	80	10,0	870
Частота, ГГц	Время когерентного накопления [9], с	Чувствительность, мЯн																			
22	500	0,2																			
43	500	0,3																			
100	500	0,5																			
240	200	1,5																			
640	80	10,0																			
870	50	15,0																			
* NEP (Noise-equivalent power) — шумовая эквивалентная мощность.																					

Таблица 2. Ожидаемые параметры обсерватории Миллиметрон в одиночном режиме наблюдений и основные параметры других обсерваторий и телескопов

	"Гершель"	ALMA	SPICA	Миллиметрон
Диапазон, мкм	50–670	315–9680	5–210	20–3000
Разрешение, угл. с	3,5–40	0,01–5	0,3–14	5–60
Поле зрения	до 4' × 8'	до 25''	5' × 5'	6' × 6'
Чувствительность* $\sigma$ , время накопления 3600 с				
Фотометрия	1 мЯн	> 10 мкЯн	4 мкЯн	20 нЯн
Спектроскопия ( $R \sim 1000$ )	20 мЯн	60 мкЯн	200 мкЯн	4 мкЯн
Спектроскопия ( $R \geq 10^6$ )	2 Ян	50 мЯн		200 мЯн
* Чувствительность зависит от рабочей длины волны, приведено значение чувствительности для $\lambda \sim 200$ –300 мкм.				

300 мкм практически недоступен для проведения наблюдений с поверхности Земли, а все успешно запущенные космические миссии были оснащены небольшими, диаметром  $\leq 1$  м, телескопами. На сегодняшний день обсерватория "Гершель" продолжает оставаться космической миссией с самым крупным телескопом (диаметр зеркала 3,5 м), оптимизированным для работы в дальнем ИК-диапазоне. Для дальнейшего более глубокого изучения различных астрономических объектов необходимо лучшее угловое разрешение, и обсерватория Миллиметрон будет следующим шагом, обеспечивая трёхкратное улучшение разрешения в дальнем ИК-диапазоне.

Угловое разрешение телескопа связано также с хорошо известной в астрономии *проблемой путаницы* — при низком угловом разрешении далёкие источники сливаются в неоднородный фон, из которого трудно выделить одиночные более слабые объекты. В дальнем

ИК-диапазоне этот фон обычно называют космическим ИК-фоном (Cosmic Infrared Background, CIB). Предполагается, что CIB обусловлен в основном излучением далёких галактик. По предварительным оценкам Миллиметрон с апертурой главного зеркала 10 м сможет разрешить более 90 % плотности потока CIB на отдельные источники — галактики (рис. 16).

В диапазоне длин волн более 300 мкм ALMA обладает большим угловым разрешением, чем Миллиметрон в режиме одиночной антенны, и чувствительность системы ALMA в длинноволновой части спектра ( $\lambda > 1$  мм) благодаря огромной суммарной площади всех её антенн также превосходит чувствительность Миллиметрона. Однако на длинах волн менее 300 мкм, недоступных для ALMA, у обсерватории Миллиметрон не будет конкурентов по чувствительности. Ещё одним важным преимуществом телескопа Миллиметрон является его большое поле зрения, обеспечиваемое несколькими тысячами детекторов, что позволит ему строить карты обширных областей неба, а наличие решётчатого спектрометра предоставит возможность снимать спектры в широкой полосе частот, благодаря чему, например, определение красных смещений далёких галактик будет для него гораздо более лёгкой задачей, чем для обсерватории ALMA.

Очевидно, что для ряда задач наблюдения на обсерваториях ALMA и Миллиметрон могут и должны дополнять друг друга. Кроме того, интересным дополнением может стать другой перспективный проект — космический телескоп Джеймса Уэбба (James Webb Space Telescope, JWST) (<http://www.jwst.nasa.gov>), работающий в более коротком диапазоне длин волн. Например, для исследования галактик на больших красных смещениях Миллиметрон проведёт анализ относительно холодного молекулярного и атомарного газа в них, JWST изучит свойства более горячего атомарного газа, а ALMA восстановит детальные изображения этих галактик.

В режиме интерферометра обсерватория Миллиметрон сможет дополнить развивающийся сейчас проект субмиллиметрового наземного интерферометра — Телескопа горизонта событий (Event Horizon Telescope, ЕНТ) [11] (<http://www.eventhorizontelescope.org>), который в ближайшем будущем объединит в себе все самые крупные наземные телескопы и обсерватории, способные работать в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

Данная статья подготовлена в результате обсуждения актуальных научных задач для миссии Миллиметрон на семинарах и нескольких симпозиумах<sup>1</sup>.

Разделы статьи соответствуют различным направлениям астрофизики, в которые Миллиметрон сможет внести значительный вклад. Интерферометрический режим наблюдения предлагается использовать в задачах, сформулированных в разделах 2.4, 4.2, 4.5, 5.1–5.5, 7.2, для решения задач, представленных в других разделах статьи, необходим одиночный режим наблюдения. Следует заметить, что представленный в настоящей статье перечень научных задач является предварительным, и мы ждём от научного сообщества как предложений новых уникальных задач, так и более детальной и конкретной проработки существующих. В июне 2014 г. основные научные задачи для обсерватории Миллиметрон обсуждались на международном симпозиуме в Париже<sup>2</sup>. По результатам работы симпозиума и на основе предварительного списка научных задач, представленных в данной статье, будет подготовлена научная программа обсерватории Миллиметрон, включающая в себя наиболее приоритетные задачи и план их реализации.

## 2. Межзвёздная среда и области звездообразования в Галактике

### 2.1. Структура и кинематика межзвёздной среды

В настоящее время одной из актуальных астрофизических проблем является проблема звездообразования [12], а также её связь с общей эволюцией межзвёздной среды (МЗС). Благодаря накопленным наблюдательным данным становится ясно, что темп рождения новых звёздных и планетных систем и их параметры определяются основными свойствами МЗС: её структурой, кинематикой, давлением, температурой, магнитным полем, а также возвратом в МЗС вещества проэволюционировавшими звёздами. Важную роль могут также играть эффекты окружения галактики — аккреция и лобовое давление межгалактического вещества, взаимодействие с другими галактиками.

Глобальность процесса звездообразования означает, что его необходимо исследовать в общем контексте структуры, кинематики и эволюции МЗС на максимально разнообразной выборке объектов. Наиболее плотные области МЗС, в которых и происходит звездообразование, имеют низкую температуру и потому требуют наблюдений в дальнем инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах, которые могут быть проведены только

из космоса. Для получения более полной выборки необходима также высокая чувствительность, что обуславливает требование большого размера зеркала телескопа, его охлаждения, а также повышенные требования, предъявляемые к параметрам приборов. Этим требованиям удовлетворяет проект Миллиметрон.

Наиболее перспективными объектами исследования для Миллиметрона являются холодные (10–20 К) газопылевые сгустки, которые трудно обнаружить менее чувствительными инструментами, "горячие ядра" и высокоскоростные биполярные истечения, диффузные облака, субмиллиметровые мазеры, МЗС других галактик.

Будут изучены общие характеристики МЗС в различных галактиках, статистические свойства плотных конденсаций, структура и кинематика межзвёздных облаков, самые ранние стадии звездообразования, механизмы образования массивных звёзд, структура и свойства околозвёздных оболочек и планетарных туманностей, пути синтеза и распространения в МЗС различных молекул, в том числе молекул сложных органических соединений.

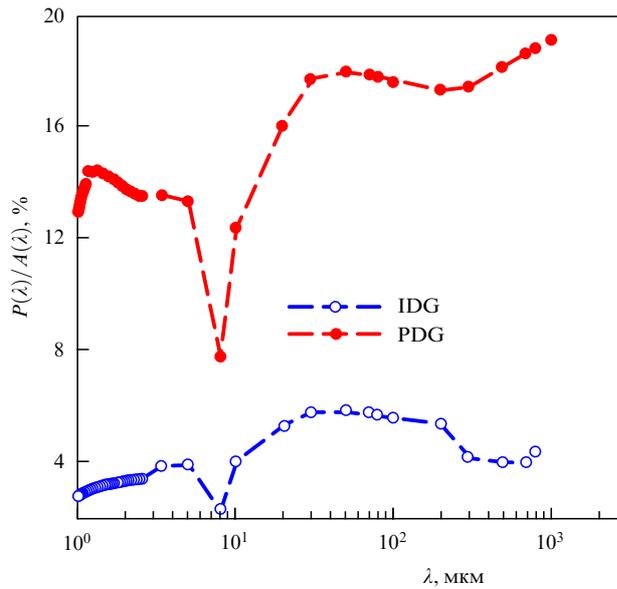
Высокая чувствительность Миллиметрона в режиме одиночного зеркала позволит наблюдать отдельные облака с характерной температурой порядка 20 К и массой от одной массы Солнца ( $M_{\odot}$ ) на расстоянии до 1 Мпк. Примером объектов для подобных исследований может служить комплекс молекулярных облаков Sgr B2, в котором обнаружено множество молекул, играющих важную роль в охлаждении и конденсации облаков, в том числе молекулярный ион  $\text{H}_3\text{O}^+$  [13]. Этот ион, который вследствие диссоциативной рекомбинации распадается на воду или гидроксил, весьма важен для общего понимания химии кислорода в МЗС. Наблюдения иона  $\text{H}_3\text{O}^+$  возможны только в дальнем ИК-диапазоне. Температура пыли в исследованном облаке составляет 30 К.

Излучение молекул и атомов в субмиллиметровом диапазоне возникает при гораздо более низких температурах, чем в оптическом и инфракрасном диапазонах. Это означает, что, анализируя данные, полученные на субмиллиметровых волнах, можно исследовать холодную МЗС, в частности изучать содержание в ней *скрытого водорода* [14]. Наиболее важными спектральными линиями для этих наблюдений являются переходы HD на длине волны 112 мкм и [СII] на длине волны 158 мкм. Очень интересной для исследований МЗС представляется молекула  $\text{HeN}^+$  (переход  $J=1-0$  на длине волны 149 мкм), которая пока не обнаружена в космосе. Условия образования и возбуждения этой молекулы существенно отличаются от таковых для большинства других межзвёздных молекул. Модели (например, [15, 16]) показывают, что содержание  $\text{HeN}^+$  должно быть особенно велико в окрестности источников экстремального ультрафиолетового (УФ) и рентгеновского излучения.

Важным направлением исследований МЗС является изучение её диффузного компонента по линиям поглощения различных молекул на субмиллиметровых волнах. "Гершель" уже продемонстрировал большие возможности таких исследований. В частности, они позволяют определять скорость ионизации космическими лучами в различных областях (по наблюдениям линий  $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$  и  $\text{H}_3\text{O}^+$ ), скорость диссипации турбулентности (по линиям  $\text{CH}^+$  и  $\text{SH}^+$ ), общее распределение молекулярного водорода (по линии HD). Проведение таких измерений требует наличия достаточно яркого фонового источника. Для Миллиметрона с его значительно большей

<sup>1</sup> См. доклад В.Н. Лукаша и И.Д. Новикова на совещании в Гронингене (2013 [http://www.sron.rug.nl/millimetron/MillimetronWorkshopGroningen2013?action=AttachFile&do=get&target=Millimetron\\_Workshop\\_SRON\\_2013\\_2\\_3.pdf](http://www.sron.rug.nl/millimetron/MillimetronWorkshopGroningen2013?action=AttachFile&do=get&target=Millimetron_Workshop_SRON_2013_2_3.pdf), [https://streaming1.service.rug.nl/p2gplayer/player.aspx?path=cit\\_mobiel/2013/04/12/3/video\\_post.wmv&mediatype=recordings](https://streaming1.service.rug.nl/p2gplayer/player.aspx?path=cit_mobiel/2013/04/12/3/video_post.wmv&mediatype=recordings)).

<sup>2</sup> <http://workshop.asc.rssi.ru/>.



**Рис. 2.** Кривая эффективности поляризации для идеально ориентированных (Perfect Davies Greenstein orientation, PDG) (верхняя кривая) и неидеально ориентированных (Imperfect Davies Greenstein orientation, IDG) (нижняя кривая) межзвёздных пылинок [17];  $P$  — степень поляризации на длине волны  $\lambda$  в процентах,  $A(\lambda)$  — межзвёздное ослабление света на длине волны  $\lambda$ .

собирающей поверхностью число таких источников будет намного выше, чем для телескопа "Гершель", что открывает возможность гораздо более полного покрытия плоскости Галактики.

Другим источником информации о структуре и кинематике МЗС являются измерения поляризации, которые помогают исследовать структуру магнитных полей в областях звездообразования.

Наземные наблюдения поляризации в дальнем инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах могут быть проведены лишь в определённых *окнах прозрачности*. Возможность построения так называемой кривой поляризации, т.е. зависимости эффективности поляризации от длины волны, позволила бы прояснить не только структуру магнитного поля в областях звездообразования, но и механизм ориентации пылинок (рис. 2).

Наблюдения излучения пыли в субмиллиметровом диапазоне являются важным источником информации об образовании звёзд. Современные данные, полученные с помощью космического телескопа "Гершель", показывают, что звездообразование происходит в тонких (толщиной  $< 0,1$  пк) газопылевых волокнах. Параметры этих волокон до конца не определены, и, в частности, не выяснена роль магнитного поля в их образовании. Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимы более высокое угловое разрешение, лучшая, чем у телескопа "Гершель", чувствительность и наличие возможности измерять поляризацию. Параметры космической обсерватории Миллиметрон удовлетворяют этим требованиям. Кроме того, вклад проекта Миллиметрон в исследование эволюции и формирования звёзд будет связан с наблюдением более далёких областей звездообразования, в том числе внегалактических.

В последние годы на основании наблюдательных данных телескопа "Гершель" и новых теоретических исследований разрабатывается новая парадигма, в которой первичная роль отводится формированию крупно-

масштабных комплексов звездообразования [18–22]. Эвристическая роль этой новой парадигмы чрезвычайно важна, поскольку она связывает между собой явления на широкой шкале масштабов — от спиральных рукавов и межрукавных течений в несколько килопарсеков до ядер молекулярных облаков и протозвёздных конденсаций в несколько астрономических единиц (а.е.). Однако многие аспекты самого явления звездообразования остаются невыясненными и плохо изученными. Как показывают наблюдения ИК-линии [СII] на длине волны 158 мкм, в диске Галактики содержится большое количество СО-тёмного молекулярного газа [23]. Теоретические исследования формирования газовых облаков в Галактике также показывают, что температуры и плотности молекулярных облаков имеют значительный разброс (см., например, фазовую диаграмму в работе [22]), что может означать существование значительных масс газа, состоящего в основном из молекулярного водорода и небогатого молекулами СО. Распределение и параметры этого газа исследовались только в узкой полосе плоскости Галактики, причём только в выборочных направлениях. Поэтому измерения относительных скоростей и положений облаков газа, излучающих в линиях [СII] длине волны на 158 мкм и СО, а также субмиллиметрового и миллиметрового излучения пыли необходимы для определения механизмов формирования комплексов звездообразования, поскольку такие измерения составляют основу исследований морфологии, кинематики и эволюции этих крупномасштабных объектов.

Другим практически неисследованным важным типом движений в областях звездообразования являются коллективные истечения вещества из формирующихся звёздных скоплений. Известно, что все звёздные скопления в конечном итоге избавляются от своего родительского газа. Сгустки молекулярного газа в направлении образующихся звёздных скоплений области звездообразования S235, вероятно, представляют собой пример таких коллективных истечений [24, 25]. Для полноты исследований коллективных истечений из образующихся скоплений требуются наблюдения СО-тёмного молекулярного газа в линиях [СII] на длине волны 158 мкм, которые могут быть эффективно проведены в рамках проекта Миллиметрон.

Исследования объектов, имеющих большие угловые размеры, желательно проводить поэтапно. На начальном этапе необходимо определить общее распределение излучения в исследуемой линии с помощью матричного спектрометра в режиме широкополосной спектроскопии со средним спектральным разрешением. Для исследования деталей кинематики предполагается использование спектрометра с высоким разрешением в ряде ключевых направлений, определённых на первом этапе наблюдений с помощью Миллиметрона или по данным, полученным ранее другими инструментами.

## 2.2. Области звездообразования в Галактике

Спектральные наблюдения с высоким разрешением позволят детально исследовать молекулярный состав протозвёздных объектов. Здесь также особенно важны исследования в коротковолновой части диапазона Миллиметрона, на длинах волн менее 300 мкм. Количество линий на этом участке спектра снижается по сравнению с таковым в его более длинноволновой части [26], что облегчает как идентификацию линий, так и их анализ

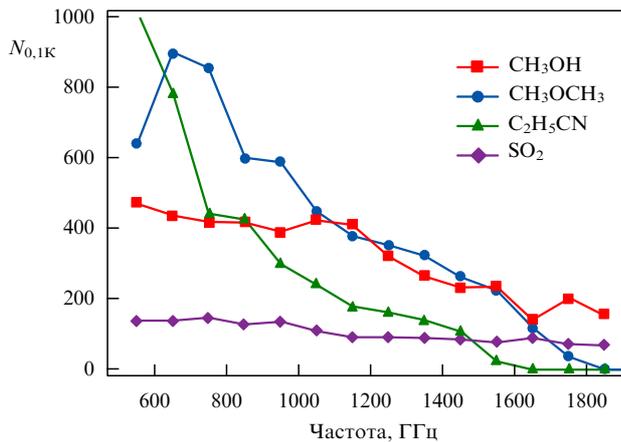


Рис. 3. Предсказанное число  $N_{0,1K}$  линий некоторых молекул с излучением в максимуме при температуре выше 0,1 К как функция частоты [26].

(рис. 3). При этом количество линий всё ещё очень велико, в том числе линий как простых соединений, так и сложных органических молекул, представляющих интерес с астробиологической точки зрения. Некоторые переходы, доступные для наблюдений на Миллиметроне, приведены в табл. 3.

Высокое спектральное разрешение ( $\sim 10^6$ ) и высокая чувствительность, достижимые в проекте Миллиметрон при наблюдениях молекулярных линий, позволят охарактеризовать физические параметры и движение газа в протозвёздных объектах.

Одна из наиболее интересных линий из представленных в табл. 3 принадлежит атомарному кислороду. Линия ОI на длине волны 63 мкм вносит существенный вклад в охлаждение тёплой МЗС и фотодиссоциационных областей с высокой плотностью и интенсивным УФ-излучением. Наблюдения этой линии необходимы для исследования энергетического баланса в МЗС, однако ни один из имеющихся инструментов не позволяет наблюдать эту линию. Наблюдения линии на длине

Таблица 3. Важные субмиллиметровые переходы в атомах и молекулах

Атом/молекула	Частота, ГГц
Cl	492, 809
OI	2060, 4745
HD	2675, 5332
OH	1835, 2510, 3789, ...
CH	537, 1477, 1657, 2007, 2011, 4056, 4071, ...
HF	1232, 2463
H <sub>2</sub> O	557, 988, 1113, 1670, 2774, 2969, ...
HDO	465, 894
CI	1901
NI	1461, 2459
OII	3393, 5787
NI	5230
HeH <sup>+</sup>	2010, 4009
OH <sup>+</sup>	972, 1033, 1960, ...
CH <sup>+</sup>	835, 1669, ...
SH <sup>+</sup>	526, 683, 893, 1050, ...
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1115, 1140, ...
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	985, 1656, ...
H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	3150
H <sub>2</sub> D <sup>+</sup>	1370, 2577
D <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	1477

волны 63 мкм на Миллиметроне дадут возможность получить информацию о содержании кислорода в МЗС, а также разрешить проблему отношения интенсивностей линий кислорода на длинах волн 63 и 145 мкм, обнаруженную по результатам наблюдений на ISO (Infrared Space Observatory) [27]. Совместное наблюдение линий кислорода, воды, молекулярного кислорода и гидроксила позволит прояснить химическую эволюцию соединений кислорода.

В исследовании протозвёздной эволюции одним из ключевых является вопрос о темпе аккреции на протозвёздные объекты. Поскольку непосредственно измерить скорость аккреции очень сложно, она обычно определяется косвенно, на основе оценки параметров молекулярных истечений [28], например, с помощью наблюдений CO. Однако для перехода от темпа истечения к темпу аккреции необходима дополнительная информация: скорость, размер истечения, наклонение системы, параметры окружающего вещества. Наблюдения линии [OI] на длине волны 63 мкм позволят оценивать темп аккреции более непосредственно, однако для этого также потребуется высокое угловое и высокое спектральное разрешение.

Ещё один способ исследования аккрецирующего вещества состоит в наблюдении линий поглощения, которые гарантировали бы, что поглощающее вещество находится перед растущей протозвездой. Недавно было показано [29], что в этом отношении перспективной является линия аммиака на длине волны 166 мкм. При наличии возможности спектральных наблюдений в дальнем ИК-диапазоне Миллиметрон позволит исследовать аккрецию на протозвёзды с пространственным разрешением, вчетверо лучшим, чем у телескопа SOFIA. Этот выигрыш в пространственном разрешении может оказаться критическим для исследований образования массивных звёзд.

Наблюдения линий нейтрального кислорода и ионизованного углерода с высоким угловым и высоким пространственным разрешением необходимы также для исследований эволюции зон ионизованного водорода. В частности, численное моделирование показывает, что ширина зоны ионизованного углерода вблизи молодой массивной звезды существенно зависит от параметров звезды и плотности окружающего газа [30].

Одним из направлений работы Миллиметрона станут спектральные обзоры с высоким спектральным разрешением, перекрывающие полосы частот в несколько десятков и сотен ГГц. Высокая чувствительность Миллиметрона и отсутствие атмосферного поглощения позволят провести обзоры слабых и поэтому малоизученных источников (например, "горячих ядрышек" — горячих областей вблизи протозвёзд малой массы). В результате, помимо определения основных физических параметров и молекулярного состава этих источников, могут быть обнаружены новые молекулы, в том числе важные с точки зрения астробиологии.

Одной из задач космической обсерватории Миллиметрон станет изучение космических мазеров в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн в режиме одиночного телескопа. Яркие мазеры возникают в линии водяного пара  $6_{1,6}-5_{2,3}$  на частоте 22 ГГц. Однако известны и другие мазерные линии H<sub>2</sub>O, находящиеся в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Субмиллиметровые линии водяного пара трудно или совсем

невозможно наблюдать с поверхности Земли из-за сильного поглощения в атмосфере, поэтому наблюдения мазеров  $H_2O$  проводятся почти исключительно только на частоте 22 ГГц. В результате не удаётся построить даже весьма приблизительные модели этих объектов. Некоторые успехи в наблюдениях субмиллиметровых мазерных линий были достигнуты на высокогорных обсерваториях и с помощью космических обсерваторий SWAS (Submillimeter Wave Astronomy Satellite), Odin и "Гершель". Дальнейший прогресс будет возможен после запуска Миллиметрона, который станет наилучшей обсерваторией для наблюдений субмиллиметровых мазеров среди космических обсерваторий, запуск которых планируется в ближайшие 10–15 лет.

### 2.3. Протопланетные диски и протозвёздные объекты

Один из ключевых вопросов в физике протопланетных дисков (ППД) — это вопрос о их массе. Сейчас для определения массы ППД используются главным образом наблюдения миллиметрового излучения пыли в предположении, что пыль хорошо перемешана с газом. Однако чувствительность современных телескопов недостаточна для детектирования маломассивных и далёких ППД. Есть много дисков, для которых установлены лишь верхние пределы потоков излучения ( $< 10$  мЯн). Между тем только точный ответ на вопрос о массе диска способен прояснить, может ли диск дать начало планетной системе. Было бы также крайне желательным найти прямой индикатор массы газа. Таким индикатором предположительно может стать излучение молекулы HD (рис. 4) на длинах волн 112 и 56 мкм [31].

Одной из важнейших задач для Миллиметрона могут стать наблюдения воды в ППД. В этих объектах возможно существование как "тёплого" (близкого к звезде), так и "холодного" (более далёкого) резервуаров воды. В настоящее время распространено представление о воде как об основном факторе, определяющем строение планетных систем ("снеговая линия"). В программу наблюдений линий воды на космическом телескопе

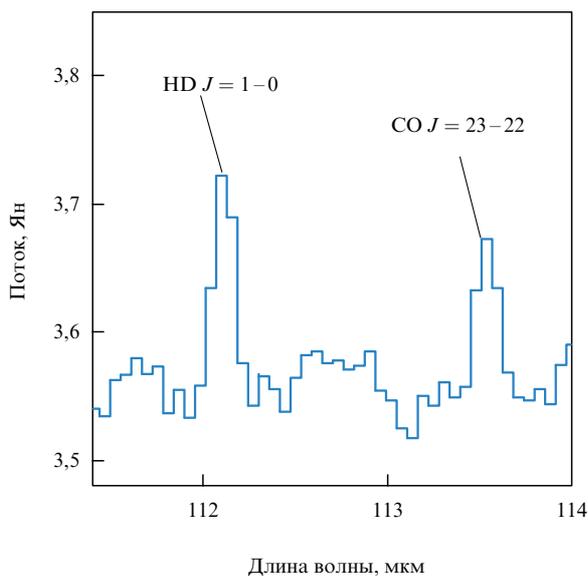


Рис. 4. Линия молекулы HD в спектре протопланетного диска звезды TW Гидры (<http://www.cosmos.esa.int/web/herschel/home>).

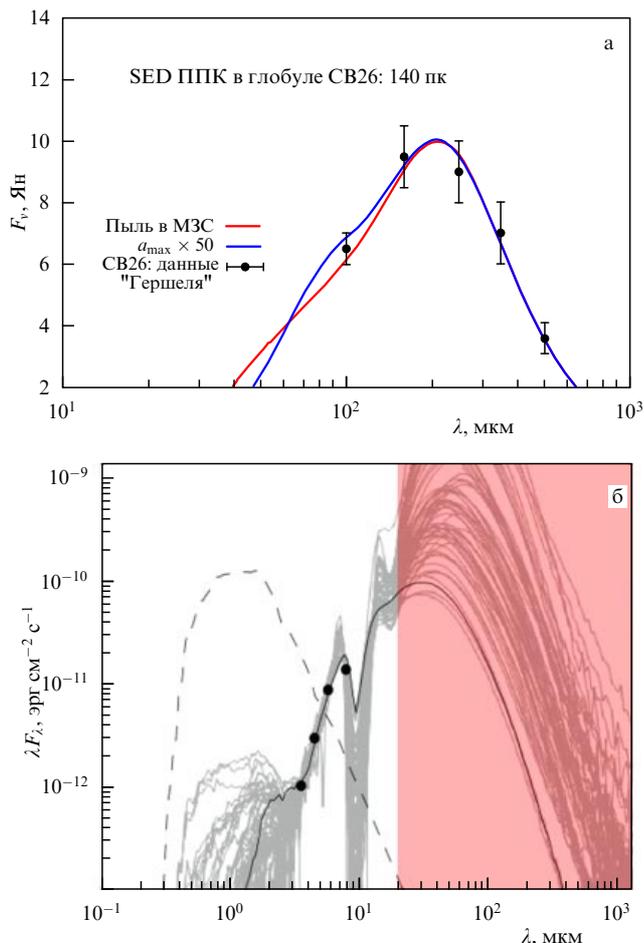
"Гершель" было включено лишь несколько ППД, и их наблюдения в отношении "холодной" воды дали противоречивые результаты [32, 33]. Очевидно, что для определённого ответа на вопрос о роли воды в формировании планетных систем требуется более значительная выборка, для чего необходим инструмент с большей чувствительностью и лучшим угловым разрешением. Сочетание линий воды в различных участках диапазона Миллиметрона позволит сделать выводы о пространственном распределении воды в диске, в частности о реальном расположении "снеговой линии".

Будут возможны также наблюдения в ППД молекулярного кислорода, колебательно-вращательных высоковозбуждённых линий органических и простых соединений в областях образования планет, наблюдения менее распространённых изотопов ранее обнаруженных молекул (или открытых с помощью ALMA). Высокие температуры (более 100 К) в областях образования планет, на расстояниях менее 5–20 а.е. от звезды, приводят к заселению высоких переходов, особенно у сложных молекул. В качестве примера можно указать обнаружение органических молекул во внутренних частях дисков с помощью телескопа "Спитцер" (см., например, [34]). Как показывают расчёты химической структуры ППД [35], в области образования планет больших значений достигают лучевые концентрации таких молекул, как метилцианид, муравьиная кислота и др., обладающих линиями в диапазоне Миллиметрона.

В субмиллиметровом (100 мкм) диапазоне возможны наблюдения формирующихся в ППД крупных частиц. При этом очень важно добиться правильной калибровки приёмников, имеющих широкое и непрерывное спектральное покрытие. На рисунке 5а показаны теоретические спектры для ППД в глобуле SV26 в сравнении с данными наблюдений на телескопе "Гершель". Интервалы ошибок указывают неопределённость, связанную с калибровкой потоков. Из рисунка видно, что для нахождения распределения масс и размеров пылинок необходимы высокоточные наблюдения дисков на длинах волн около 100 мкм. Для решения этой задачи достаточно использовать режим одиночного зеркала.

Спектроскопия в ближнем ИК-диапазоне со средним спектральным разрешением позволит увидеть яркие линии CO и воды, а также определить параметры внутренних областей ППД.

Помимо исследования ППД важной задачей являются также поиск и исследование холодных газопылевых облаков в Галактике. Один из основных источников информации о физических условиях в дозвёздных и протозвёздных объектах — их спектры в широком диапазоне длин волн (SED). Именно SED стали основой для принятой в настоящее время системы классификации этих объектов. Причём у объектов классов –1 (дозвёздные ядра) и 0 (самые ранние стадии эволюции при наличии центрального ИК-источника) максимум спектра приходится именно на дальний инфракрасный и субмиллиметровый диапазоны. Космическое базирование телескопа позволит строить SED дозвёздных ядер без разрывов, обусловленных атмосферными окнами пропускания. Детальная форма спектра даст ответ об эволюционном статусе конкретного ядра. До сих пор разделение ядер на дозвёздные и протозвёздные проводится на основании отсутствия или наличия в ядре компактного источника излучения. Относительное число дозвёздных и прото-



**Рис. 5.** (В цвете онлайн.) (а) Спектральное распределение энергии (Spectral Energy Distribution, SED) протопланетного диска в глобуле CV26 по данным телескопа "Гершель". Красная кривая — результат модели пыли с параметрами, типичными для межзвёздной среды (максимальный размер пылинок  $a_{\max} = 0,25$  мкм), синяя кривая — результат расчёта с  $a_{\max}$ , в 50 раз большим типичного (расчёты выполнены с помощью модели, представленной в работе [36]). (б) Результат подгонки наблюдаемого ближнего ИК-спектра (кружки) типичного протозвёздного объекта. Формально лучшее решение показано сплошной чёрной кривой. Серыми кривыми показаны спектры объектов с массами от  $M_{\odot}$  до  $10 M_{\odot}$ , одинаково хорошо описывающие наблюдательные данные в ближнем ИК-диапазоне, но существенно расходящиеся в дальнем ИК-диапазоне (<http://caravan.astro.wisc.edu/protostars/>). Штриховой кривой показано излучение фотосферы центрального источника для формально лучшего решения.

звёздных объектов составляет основу для оценки относительной продолжительности соответствующих эволюционных стадий. Однако, например, наблюдения мало-массивного ядра L1014 с помощью космического ИК-телескопа "Спитцер" выявили наличие слабого компактного внутреннего источника по избыточному излучению на длинах волн менее 70 мкм [37].

Павлюченковым и др. [38] показано наличие подобной проблемы и для массивных ядер. В [37] были проанализированы наблюдения двух массивных ядер тёмных инфракрасных облаков (InfraRed Dark Cloud, IRDC). По результатам исследований в ближнем инфракрасном и миллиметровом диапазонах эти ядра были классифицированы как беззвёздные. Однако анализ спектра на длине волны 70 мкм показал, что в обоих

случаях внутри ядер уже скрываются компактные источники излучения — протозвёзды.

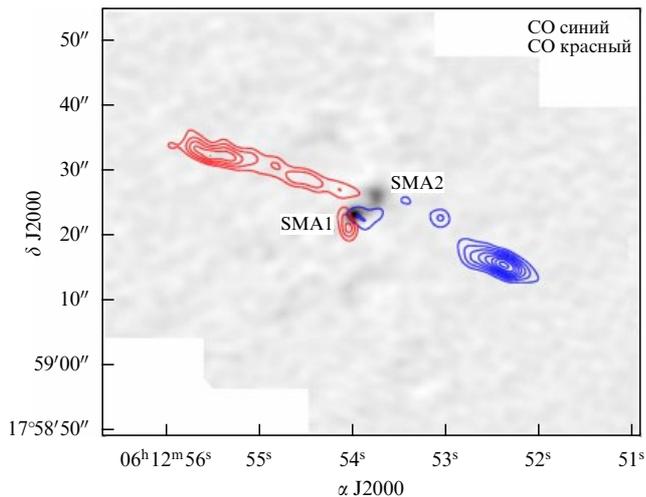
Причины важности диапазона 50–150 мкм иллюстрируются на рис. 5б, где показан результат подгонки ближнего ИК-спектра типичного протозвёздного объекта с помощью модели из [39, 40]. Результаты формально наилучшей модели показаны сплошной чёрной кривой. Однако ничуть не хуже спектр воспроизводится и другими моделями с разбросом масс объекта от  $M_{\odot}$  до  $10 M_{\odot}$ . Из рисунка 5 ясно видно, что максимум излучения типичного протозвёздного объекта приходится именно на дальний ИК-диапазон. Включение в модель объекта данных об излучении на длине волны 70 мкм втрое снижает неопределённость в вычислении массы.

Диапазон 50–150 мкм был доступен для наблюдений на космическом телескопе "Гершель". Однако недостаточное высокое угловое разрешение этого инструмента не позволило детально исследовать протозвёздные объекты на больших расстояниях, что существенно ограничивает их выборку. Более высокое угловое разрешение Миллиметрона позволит включить в рассмотрение большие длины волн. В частности, с помощью инструмента PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer) телескопа "Гершель" (70, 100 и 160 мкм) были обнаружены точечные объекты внутри многих IRDC [42]. Однако на более длинных волнах (250–350 мкм) такие точечные объекты не разрешаются. Между тем это необходимо для более точного определения температуры, массы и светимости данных источников. Высокая чувствительность Миллиметрона позволит обнаружить больше компактных протозвёздных источников, включив в статистику далёкие и (или) более плотные объекты.

Помимо холодных газопылевых облаков, в областях звездообразования обнаружены и более горячие объекты. В последних также наблюдаются пылевой континуум и многочисленные спектральные линии газопылевых молекул. Спектральное распределение энергии в таких объектах до сих пор остаётся малоисследованной, но крайне важной задачей.

Ещё одно важное направление исследований — изучение высокоскоростных биполярных потоков, формируемых аккреционными дисками у протозвёзд и молодых звёзд (в качестве примера можно привести объект S255IR, излучающий в континууме 1,1 мм) (рис. 6). По внешним проявлениям биполярный поток сходен с джетом у чёрных дыр, что означает, возможно, сходство и физических механизмов явлений. Пока нет ясности относительно происхождения таких биполярных потоков, а значит, требуется их исследование.

В качестве смежной задачи можно упомянуть также субмиллиметровые наблюдения астероидов и комет. Наблюдения астероидов в отражённом (рассеянном) свете не позволяют получить достоверную информацию о их размере, поскольку для этого требуется предположение о их альbedo. Наблюдения собственного излучения астероидов в этом отношении более надёжны. Кроме того, спектры излучения астероидов позволяют не только оценивать их размеры, но и получать информацию о химическом составе и структуре поверхности [43]. Однако температура астероидов, особенно астероидов, далёких от Солнца, невысока, потому их излучение приходится на инфракрасный и субмиллиметровый диапазоны, что требует проведения внеатмосферных наблюде-



**Рис. 6.** (В цвете онлайн.) Пример высокоскоростного биполярного потока. Синие и красные контуры показывают излучение соответственно в синем и красном крыльях линии CO(3–2) в небесных координатах  $\alpha$ ,  $\delta$  (эпоха J2000) [41].

ний. Спектральные наблюдения комет позволяют уточнять их молекулярный состав и получать информацию об эволюции вещества в ранней Солнечной системе.

#### 2.4. Источники мазерного излучения

Мазеры на квантовых переходах молекул являются мощным инструментом исследования астрофизических источников таких типов, как аккреционные диски вокруг сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик, протозвёздные/протопланетные диски и истечения из молодых звёзд в областях звездообразования, регионы взаимодействия расширяющихся областей НП и остатков сверхновых с плотными сгустками газа в их окружении, расширяющиеся оболочки и джеты, связанные с проэволюционировавшими звёздами [44, 45]. Наблюдения мазеров широко используются для обнаружения источников с уникальным физическим и эволюционным статусом, измерения расстояний до них, исследования их параметров, кинематики и структуры аккреционных дисков [46–48]. Современные научные проекты Радиоастрон, BeSSeL (Bar and Spiral Structure Legacy Survey), MCP (Megamaser Cosmology Project) и MMB (Methanol Multibeam Survey) наглядно демонстрируют высокие возможности наблюдений мазеров как инструмента исследования. Ценность этого инструмента определяется возможностью точных измерений положений объектов. Мазерные источники обладают малыми угловыми размерами, поэтому наиболее важными являются наблюдения в режиме интерферометрии.

В случае реализации наземно-космической РСДБ (КРСДБ) приёмная аппаратура Миллиметра позволит проводить наблюдения водяных мазеров на переходе с частотой 22235,08 МГц. Возможность проведения наблюдений таких мазеров в режиме КРСДБ была показана в ходе проекта Радиоастрон.

В рамках научной программы по исследованию космических мазеров с помощью наземно-космического интерферометра Радиоастрон были проведены наблюдения 19 мазерных источников на переходе молекулы воды. Эти мазеры являются очень компактными, часто не разрешаемыми даже на самых больших наземных базах,

обладающими высочайшей яркостной температурой, иногда превышающей  $10^{17}$  К [49]. Благодаря этим свойствам мазеров с их помощью можно с высокой точностью изучать кинематику и физические параметры объектов в нашей и других галактиках. Наблюдения на наземно-космическом интерферометре позволяют разрешить наиболее компактные детали и оценить яркостную температуру мазерного источника и его размеры, что необходимо для выяснения механизма накачки и построения модели излучающей области. В ходе проведённых исследований в линии воды на частоте 22 ГГц было зарегистрировано излучение от чрезвычайно компактных мазерных деталей в направлениях на четыре области звездообразования: Орион А, W3IRS5, W51M/S и Цефей А [50].

В некоторых источниках (Цефей А) имеются указания на очень компактную субструктуру мазерных деталей размерами порядка 10 мкс дуги (что соответствует 0,007 а.е.). Причём объекты движутся с большой относительной скоростью. Это означает, что мазерный источник имеет сложную пространственную и кинематическую сверхтонкую структуру на масштабах, сравнимых с размерами Солнца. Такая картина, возможно, является указанием на то, что мазерное излучение в данном случае возникает в протозвёздных/протопланетных дисках или ячейках турбулентности наименьшего размера, соответствующего масштабу диссипации. Для дисков всех типов важнейшим и до сих пор не решённым вопросом является вопрос о механизмах переноса в них углового момента [51]. Таким механизмом классически считается турбулентная вязкость, однако пока нет единого мнения о механизме возникновения турбулентности [51, 52].

Наблюдательная аппаратура Миллиметра позволяет проводить наблюдения мазеров в субмиллиметровом диапазоне, а также мазеров, образующихся в других галактиках и проэволюционировавших звёздах, для чего необходима лучшая чувствительность, чем у Радиоастрона. В данный момент возможность наблюдений в режиме КРСДБ подтверждена только для мазеров в областях звездообразования Галактики на сантиметровых переходах гидроксила и молекулы воды.

### 3. Звёзды и планеты

#### 3.1. Прямые наблюдения экзопланет

Одним из перспективных методов исследования экзопланет является их прямое наблюдение.

В одиночном режиме Миллиметр способен наблюдать планеты больших масс, сильно удалённые от своей звезды. Чем дальше находится система, тем больше должен быть орбитальный радиус планеты, для того чтобы телескоп мог разрешить звезду и планету. К сожалению, планеты земного типа на таких расстояниях дают слишком малую интенсивность излучения, поэтому среди доступных для наблюдения в этом режиме экзопланет оказались только газовые гиганты. В таблице 4 приведён список экзопланет (на конец 2013 г.), которые будут доступны Миллиметру для прямого наблюдения. Только три планеты из этого списка могли наблюдаться телескопом "Гершель", причём планета Фомальгаут b (Fomalhaut b) наблюдалась на пределе чувствительности. Две планеты, представленные в табл. 4, были открыты уже после завершения работы

**Таблица 4.** Наблюдающиеся непосредственно экзопланеты, доступные для Миллиметра

Название	Масса* $M/M_J$	Полуось, а.е.	Расстояние, пк	Звёздный тип	Возраст, млрд лет	Эффективная температура, К	"Гершель"
Fomalhaut b	3	115	7,704	A3 V	0,44	8590	Предел
HN Peg b	16	795	18,4	G0 V	0,2		да
WD 0806-661B	8	2500	19,2	DQ D	1,5		да
AB Pic b	13,5	275	47,3	K2 V	0,03	4875	нет
Ross 458 (AB)	8,5	1168	114	M2 V	0,475		нет
SR 12 AB c	13	1083	125	K4-M2	0,001		нет
FU Tau b	15	800	140	M7.25	0,001	2838	нет
U Sco CTIO 108	16	670	145	M7	0,011	2600	нет
HIP 78530 b	23	710	156,7	B9 V	0,011	10500	нет
GU Psc b	11	2000	48	M3	0,1	—	—
HD 106906b	11	654	92	F5V	0,013	6516	—

\*  $M$  — масса экзопланеты,  $M_J$  — масса Юпитера.

телескопа "Гершель". Отметим, что именно в том диапазоне, в котором будет проводить измерения Миллиметр, звезда и удалённый газовый гигант имеют самую низкую контрастность, что облегчит их наблюдение [53].

Особый интерес представляет наблюдение известных транзитных планет. При наблюдении транзитов и анти-транзитов планет можно определить орбитальные параметры планеты, её массу и радиус, а также получить спектры поглощения верхних слоёв её атмосферы. С 2003 г. был проведён целый ряд детальных спектральных наблюдений транзитов и антитранзитов экзопланет разных типов [54–58]. Высокая точность Миллиметра позволяет ему проводить спектральные наблюдения транзитов и антитранзитов, из результатов которых можно получить беспрецедентно полную информацию об исследуемых системах.

### 3.2. Потеря массы на поздних стадиях эволюции звёзд

На поздних этапах своей эволюции звёзды малых и промежуточных масс, к которым относится и Солнце, проходят через стадию интенсивной потери массы. Это выражается в набухании оболочки звезды и последующем её превращении в планетарную туманность. Исследования окружения звёзд во время и после стадии асимптотической ветви гигантов (АВГ) имеют также тесную связь с процессами обогащения МЗС тяжёлыми элементами.

Высокая информативность космических исследований звёзд малых и промежуточных масс в ИК-диапазоне была продемонстрирована при выполнении таких ключевых программ проекта "Гершель", как HIFISTARS, "The circumstellar environment in post-main-sequence objects" и других<sup>3</sup>. Более высокое угловое разрешение, чувствительность и широкий диапазон Миллиметра позволяют не только существенно повысить качественный уровень исследований проэволюционировавших звёзд, но и сформулировать ряд новых задач по исследованию этих объектов.

<sup>3</sup> <http://herschel.cf.ac.uk/mission/key-programmes/stars>.

Наблюдения со спектрометром высокого разрешения дадут возможность, в частности, провести следующие исследования.

- *Кинематика истечений из звёзд на стадии АВГ.* Миллиметр позволяет наблюдать наиболее высоко возбуждённые линии молекул CO, H<sub>2</sub>O и другие линии, образующиеся близко к звезде. Такие наблюдения, невозможные на других инструментах, включая "Гершель", помогут дать ответ на ряд важных вопросов, связанных с механизмами истечений. Например, по современным представлениям радиационное давление на пыль в кислородных звёздах недостаточно велико для того, чтобы объяснить наблюдаемые темпы потери массы.

- *Причина развития асимметрии оболочек звёзд, симметричных на стадии АВГ и асимметричных на стадии протопланетарных и планетарных туманностей.* В настоящее время существует ряд гипотез. Одна из них связана с двойственностью звезды [59]. Для подтверждения или опровержения этой гипотезы требуются наблюдения с высоким угловым разрешением, проведение которых возможно с помощью Миллиметра.

- *Состав и физические параметры областей взаимодействия оболочек движущихся проэволюционировавших звёзд с окружающей средой.* Наблюдения в рамках проекта "Гершель" показали наличие сложных структур и движений в таких объектах, позволяющих исследовать как оболочку звезды, окружающее её вещество, так и движения звёзд [59, 60] (см. рис. 7).

- *Образование молекул и пыли в оболочках проэволюционировавших звёзд* [61, 62].

Использование коротковолнового матричного спектрометра позволит, в частности, провести следующие исследования:

— наблюдения протяжённых планетарных туманностей в линиях [NIII], [OIII], [OII], [OI], [CII] и др. с целью изучения зависимости химического состава и физических параметров газа от расстояния до звезды. Соответствующая методика, которая была разработана в работе [63], впоследствии будет улучшена для анализа данных Мил-

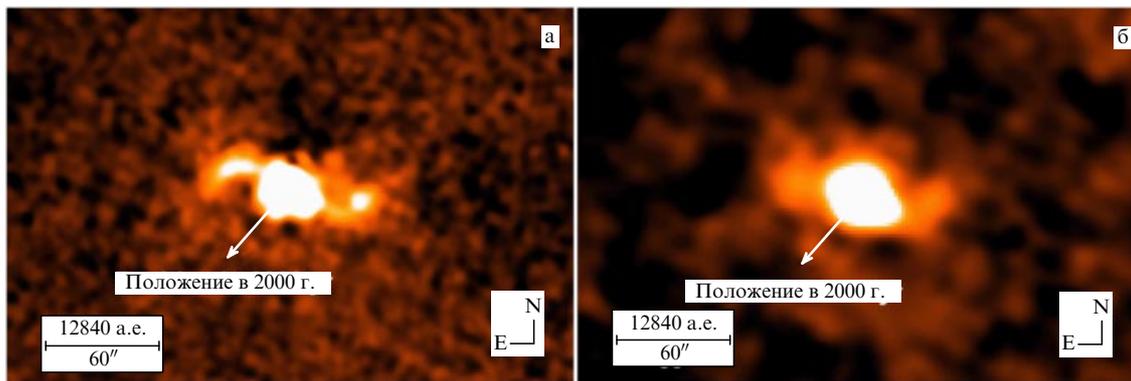


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Изображения звезды R Aqr в континууме на длинах волн (а) 70 мкм и (б) 160 мкм. Стрелками показано перемещение объекта [59].

лиметра, имеющих лучшую чувствительность. Эти исследования связаны, в частности, с вопросом о происхождении звёзд, бедных водородом;

— наблюдения сгустков и других неоднородностей структуры в протяжённых планетарных туманностях с целью изучения вариаций температуры и плотности, во многом определяющих химический состав и эволюцию объектов;

— исследования структуры оболочек звёзд, взаимодействующих с окружающей средой. Эти исследования также требуют наблюдений на матричных инструментах.

### 3.3. Поиск проявлений жизни во Вселенной

Благодаря отсутствию атмосферы, обсерватории Миллиметров будут доступны для исследования те многочисленные спектральные линии молекул воды и более сложных органических соединений, которые трудно или невозможно наблюдать с поверхности Земли. Исследование этих линий в Солнечной системе и ППД поможет установить происхождение и первичный молекулярный состав земных океанов, а также сделать выводы о распространённости планет, содержащих жидкую воду на поверхности, а значит, имеющих подходящие условия для возникновения жизни.

В течение многих лет поиск проявлений внеземных цивилизаций является одним из самых амбициозных проектов человечества. Основные усилия сейчас сосредоточены на перехвате сообщений внеземных цивилизаций, и миллиметровый диапазон является перспективным для этих целей. В работе [64] обоснованы преимущества этого диапазона для обеспечения направленных передач в области миделя реликтового фона. Характерным маркером этой области спектра может быть линия сверхтонкого расщепления позитрония 203 ГГц ( $\lambda = 1,5$  мм), аналог линии 21 см атома водорода. Предварительные наблюдения уже начаты [65]. Поиск позитрония с помощью Миллиметра представляет собой независимую важную задачу.

Наряду с поиском информационных сигналов внеземных цивилизаций ведутся поиски следов астроинженерной деятельности. В частности, достаточно развитая цивилизация способна окружить звезду системой конструкций, перехватывающих и использующих значительную часть энергии звезды, — так называемой сферой Дайсона [66], которая должна переизлучать всю энергию

или её часть на более низких частотах, чем частота излучения самой звезды. Для Солнца и сферы Дайсона радиусом в 1 а.е. температура сферы составит около 300 К. Можно ожидать, что использование более совершенных технологий будет связано с применением низких температур и положение максимума излучения сместится от 20 мкм в сторону более длинных волн. Поэтому поиск таких объектов эффективнее всего проводить в ИК-диапазоне вплоть до значения длины волны, соответствующей максимуму космического излучения (1,5 мм). Первый обзор неба с целью обнаружения астрономических объектов, излучающих в дальнем ИК-диапазоне, и определения их спектров проводился на спутнике IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) — было обнаружено 250 тыс. точечных источников. Результаты поиска объектов из этого обзора, похожих на сферы Дайсона, содержатся в работах [67, 68] (рис. 8) — было обнаружено несколько объектов, естественное происхождение которых до сих пор надёжно не доказано.

Важными критериями исследований являются параметры спектра и сравнение его со спектром чёрного тела. Максимум спектра определяет температуру. Показатель в длинноволновой части спектра при степенной зависимости от частоты равен  $-2$  для чёрного тела и  $-3$  и  $-4$  соответственно для аморфных и металлических пыли-

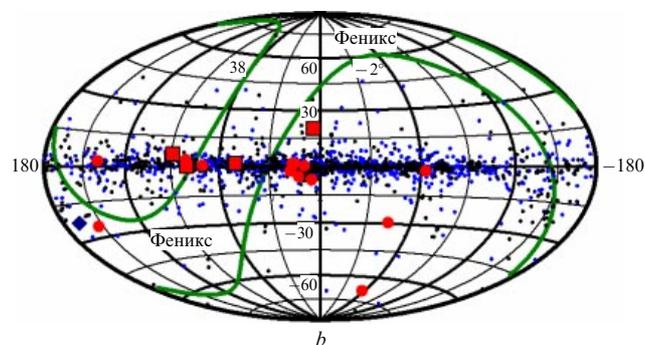


Рис. 8. (В цвете онлайн.) Расположение в галактических координатах на небесной сфере 16 возможных кандидатов в сферы Дайсона (показаны красными символами). Три из них (красные квадраты) имеют наименьшее отклонение от спектра чёрного тела. Синие символы — 2240 избранных источников из каталога спутника IRAS. Зелёные кривые ограничивают область, доступную крупнейшему радиотелескопу "Аресибо", участвующему в программе поиска внеземных цивилизаций [68].

нок, размеры которых много меньше длины волны. Сопоставление температуры, потока излучения, формы длинноволновой части спектра и расстояния до источника позволяют определить размеры источника и отличить его от облака пылинок или камней, обусловленных естественным источником в ИК-диапазоне (протозвёздные объекты, старые звёзды). С целью выработки надёжного критерия для поиска сфер Дайсона необходимо детально исследовать свойства естественных источников, что может быть осуществлено с помощью Миллиметра.

## 4. Звёздные остатки и вспышки звёзд

### 4.1. Белые карлики

Фотометрические наблюдения близких холодных белых карликов в дальнем ИК-диапазоне позволяют определить состав их атмосфер для последующего уточнения возраста исследуемых объектов и возраста Галактики.

Белые карлики представляют собой, по-видимому, самый многочисленный класс объектов на небе. Их можно разделить на две большие группы: горячие и холодные белые карлики. Поскольку холодные белые карлики являются наблюдаемым конечным этапом эволюции белых карликов, оценка возраста холодных белых карликов может быть использована для определения возраста Галактического диска и гало, а также возраста ближайших шаровых скоплений. Важнейшую роль в эволюции белых карликов играет процесс охлаждения, механизм которого до конца не ясен. В свою очередь скорость охлаждения белых карликов зависит от состава их атмосферы. Поэтому для определения температуры, светимости и возраста холодных белых карликов должен быть известен атмосферный состав этих объектов.

Анализ наблюдений в среднем ИК-диапазоне ближайших холодных карликов с эффективной температурой менее 6000 К показал, что излучение в исследуемом диапазоне несколько слабее, чем предсказывалось моделями, которые хорошо воспроизводили функцию светимости в диапазоне длин волн менее 1 мкм [69]. Описываемая ситуация представлена на рис. 9, где на примере холодного белого карлика LHS 1126 показано наблюдаемое спектральное распределение энергии в диапазоне от 0,1 до 10 мкм и соответствующие результаты, полученные с помощью модели этого карлика с разным составом атмосфер. Для решения вопроса об атмосферном составе холодных белых карликов необходимы измерения в дальнем ИК-диапазоне с высокой чувствительностью.

Ожидаемые потоки от белых карликов, находящихся на расстоянии менее 100 пк, составят, согласно закону Релея – Джинса, несколько мкЯн.

Интересной задачей представляется обнаружение вокруг белых карликов обломочных дисков, образующихся при столкновении комет и астероидов и состоящих из холодной пыли, посредством проведения наблюдений в моде одиночного зеркала в дальнем ИК-диапазоне. Так, белый карлик G29-38 показывает избыток ИК-излучения. Кроме того, в атмосфере этого объекта, как и в атмосфере двух других горячих белых карликов, обнаружены тяжёлые элементы, такие как кальций и железо, которые должны были бы уйти в глубь звезды из-за сильного гравитационного поля у её поверхности [70]. Возможным объяснением может являться наличие обло-

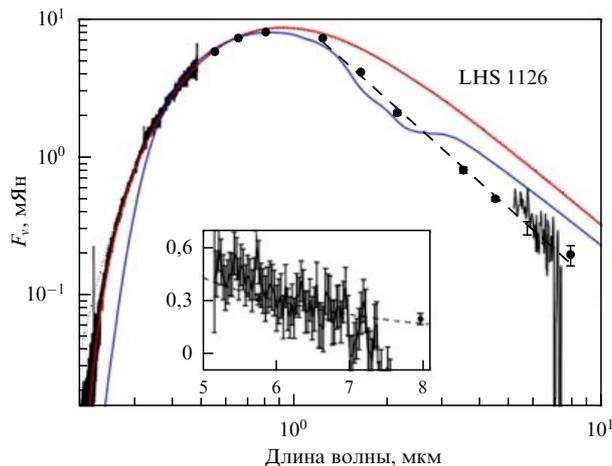


Рис. 9. (В цвете онлайн.) Спектральное распределение энергии холодного белого карлика LHS 1126 (модель) [69]. Красная и синяя кривые представляют результаты моделей с разным соотношением водорода и гелия в атмосфере. Кружками с интервалами ошибок показаны результаты наблюдений. Штриховая кривая, которая наилучшим образом описывает наблюдения, удовлетворяет наклону со спектральным индексом  $-1,99$ . На вставке приведён увеличенный фрагмент рисунка в области длин волн 5–8 мкм.

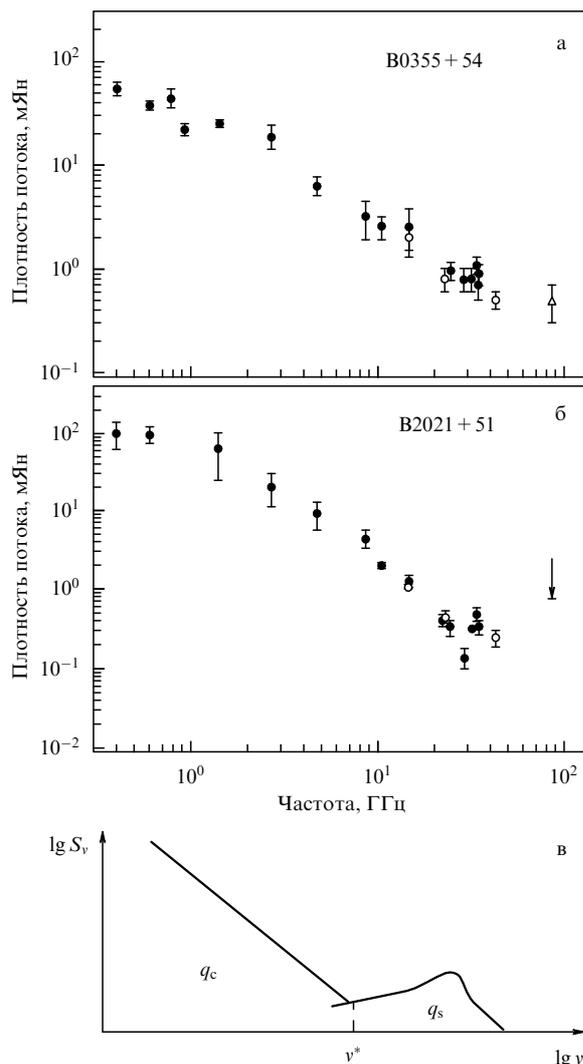
мочного диска, состоящего из холодной пыли, которая излучает под действием теплового излучения самой звезды. На сегодняшний день известно более 20 белых карликов, окружённых пылевыми дисками. Такие диски могут быть обнаружены при наблюдениях близких белых карликов в дальнем ИК-диапазоне. В настоящее время проводятся исследования белых карликов с "загрязнённой" тяжёлыми элементами атмосферой в среднем ИК-диапазоне; например, получены фотометрические данные WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer) [71]. Для некоторых из исследованных белых карликов обнаружен избыток излучения в этом диапазоне [72].

В последнее время широко обсуждается вопрос о существовании вокруг белого карлика экзопланет. В принципе белые карлики являются достаточно яркими объектами для того, чтобы поддерживать условия для нахождения на поверхности планет воды в жидком состоянии. Первая планета была обнаружена у звезды G186, входящей в состав двойной системы с белым карликом. Важной и интересной задачей являются как фотометрическое исследование белых карликов с тяжёлыми элементами в составе их атмосферы и белых карликов с пылевыми дисками, так и спектроскопические исследования с целью изучения свойств пыли, атмосферного состава и обнаружения планетных систем.

### 4.2. Радиоизлучение пульсаров

Большинство радиопульсаров имеет спектр, быстро спадающий с увеличением частоты [73]. Однако некоторые объекты наблюдаются и в гигагерцевом диапазоне [74–76]. В качестве новых интересных задач при исследовании пульсаров можно предложить следующие.

В четырёх радиопульсарах (B 0329 + 54, 0355 + 54, 1929 + 10 и 2021 + 51) и двух аномальных рентгеновских пульсарах (ХТЕ J 1810-197 и 1E 1547-5408) обнаружены уплощение спектра на частотах в несколько десятков ГГц (рис. 10а, б) или даже возрастание интенсивности при увеличении частоты до 87 ГГц [75]. В радиопульсарах на частоте 43 ГГц плотность потока заключена в диапазоне



**Рис. 10.** Спектры пульсаров V0355 + 54 (а) и V2021 + 51 (б). Измерения на частоте 87 МГц для V0355 + 54 показаны светлым треугольником, а для V2021 + 51 — стрелкой, указывающей верхний предел на уровне  $5\sigma$  [75]. (в) Теоретический спектр радиоизлучения пульсара:  $S_\nu$  — плотность потока,  $q_c$  — мощность излучения, генерируемого за счёт циклотронной неустойчивости,  $q_s$  — мощность синхротронного излучения.

от 0,15 до 0,50 мЯн [77], в аномальных рентгеновских пульсарах (Anomalous X-ray Pulsars, AXP) — в диапазоне от 1 до 5 мЯн [78, 79]. Оценки чувствительности болометра при наблюдении в широкой частотной полосе ( $\geq 10$  ГГц) в диапазоне частот 50–200 ГГц при накоплении в течение нескольких десятков минут дают величину около 0,1–0,5 мЯн, что вселяет надежду на возможность детектирования сигнала этих пульсаров.

Более того, оценки показывают, что в рассматриваемых объектах углы между осью вращения и магнитным моментом нейтронных звёзд малы (менее  $30^\circ$ ). В этом случае протяжённость магнитосферы оказывается значительно больше радиуса светового цилиндра, формируются заметные питч-углы (более 0,01) у релятивистских электронов и генерируется синхротронное излучение [80, 81]. При параметрах, характерных для рассматриваемых пульсаров, интенсивность излучения должна возрастать при увеличении частоты начиная с частот в несколько десятков ГГц. Оценка частоты максимума при

обычно принимаемых для пульсаров параметрах даёт  $\nu_{\max} \sim 3 \times 10^{11}$  Гц. Количественно увеличение интенсивности излучения в миллиметровом диапазоне зависит от модели. Если распределение релятивистских электронов является моноэнергетическим, то следует ожидать возрастания, пропорционального  $\nu^{1/3}$ , т.е. на частоте 275 ГГц плотность потока возрастает в два раза по сравнению с таковой на частоте 34 ГГц. Если распределение является степенным и мы находимся в области большой оптической толщи, то возрастание пропорционально  $\nu^{2,5}$  и на частоте 275 ГГц плотность потока увеличится почти в 200 раз (рис. 10в). Проверка этих предсказаний позволит уточнить модели магнитосфер как обычных радиопулсаров, так и АХР.

Важную роль в исследовании радиопулсаров с увеличением плотности потока на частотах порядка нескольких десятков ГГц играют поляризационные измерения. Степень поляризации нормальных пульсаров, как правило, уменьшается с увеличением частоты. Включение синхротронного механизма должно привести к возрастанию степени поляризации. Подтверждение этого было бы дополнительным аргументом в пользу синхротронной гипотезы. Кроме того, профиль импульса, формирующийся при синхротронном излучении, отличается от профиля, обусловленного другими механизмами. Следовательно, в миллиметровом диапазоне профиль импульса должен отличаться от его известных профилей на более низких частотах.

Параллельно с построением спектра необходимо измерить угловой размер излучающей области. Нетепловое излучение пульсара генерируется предположительно внутри светового цилиндра с радиусом

$$r_{LC} [\text{см}] = \frac{cP}{2\pi} = 4,8 \times 10^9 P [c],$$

где  $P$  — период вращения пульсара.

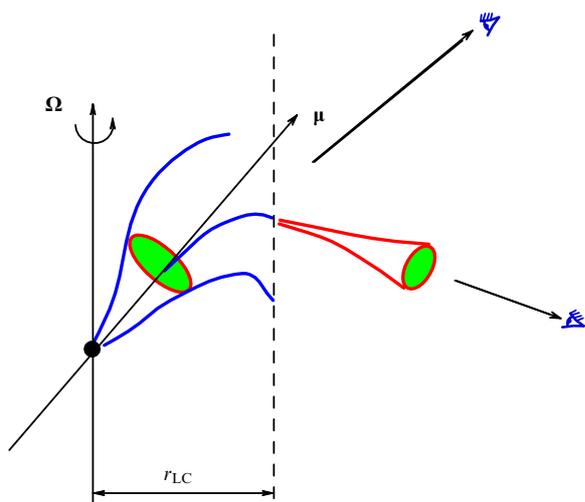
Потоки в миллиметровом диапазоне являются слабыми, менее 1 мЯн. Однако некоторые пульсары демонстрируют вспышки, в которых поток превышает 1 мЯн. Таким образом, обнаружение достаточно мощной вспышки позволит в режиме наземно-космического интерферометра впервые разрешить световой цилиндр пульсара (до расстояний в несколько десятков килопарсеков) и даст неоценимую информацию для выявления природы излучения этих объектов и локализации области электромагнитного излучения.

Угловой размер радиуса светового цилиндра выражается как

$$\theta [\text{угл. с}] = \frac{r_{LC}}{d} = 3,2 \times 10^{-7} \frac{P [c]}{d [\text{кпк}]},$$

где  $d$  — расстояние между наблюдателем и пульсаром. При разрешении в 40 нс радиус светового цилиндра пульсара с периодом в 1 с разрешается с расстояния в несколько килопарсеков. Если радиус области генерации излучения окажется сравнимым с радиусом светового цилиндра, то это явится дополнительным аргументом в пользу синхротронной модели.

На периферии магнитосферы силовые линии магнитного поля искривляются вследствие вращения плазмы и возможна ситуация, в которой излучение, выходящее с умеренных высот, не попадает к наблюдателю, однако синхротронное излучение вблизи светового цилиндра,



**Рис. 11.** (В цвете онлайн.) Пульсар, излучающий только на миллиметровых волнах. Синим цветом показаны магнитные силовые линии, штриховая линия — световой цилиндр, зелёным цветом показаны области излучения. Верхний наблюдатель увидит радиоизлучение в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах, а нижний — только в миллиметровом.

генерируемое, как упоминалось, на частотах Миллиметрона, может быть направлено на наблюдателя. В этом случае возможно существование пульсаров, излучающих только микроволновые импульсы (рис. 11).

Поиск и обнаружение пульсаров, излучающих только микроволновые импульсы, — это совершенно новое направление в исследовании пульсаров, которое может существенно расширить популяцию наблюдаемых нейтронных звёзд.

Результаты исследований пульсаров с наземно-космическим интерферометром Радиоастрон указывают на наличие интерференционных откликов при наблюдении с базами Земля – космос, превышающими размер дифракционного пятна, т.е. при условиях, когда разрешается кружок рассеяния радиоизлучения пульсара на неоднородностях межзвёздной плазмы. При этом амплитуда интерференционного отклика не убывает с увеличением базы интерферометра до максимального значения в 240 тыс. км, реализованного в проекте Радиоастрон для пульсара B0329 + 54 [82]. Структура отклика интерферометра на таких больших базах связана с параметрами спектра неоднородностей межзвёздной плазмы. Для далёких пульсаров дифракционные мерцания могут наблюдаться и в сантиметровом диапазоне радиоволн. Наблюдение таких пульсаров в интерферометрическом режиме с помощью обсерватории Миллиметрон, работающей совместно с крупнейшими наземными радиотелескопами, на базах интерферометра в 1 млн км позволят сделать заключения как о структуре неоднородностей межзвёздной плазмы, так и о строении области генерации радиоизлучения в магнитосфере нейтронной звезды.

### 4.3. Релятивистские объекты в центрах шаровых скоплений

Наблюдения центров наиболее массивных шаровых скоплений, в частности с большими радиусами ядра, в режиме одиночного зеркала ставят своей целью детектировать излучение в миллиметровом диапазоне длин волн от двойных систем с чёрными дырами звёздной массы. В

случае регистрации сигнала предполагается проведение исследования этих объектов в интерферометрической моде с высоким пространственным разрешением.

Чёрные дыры с массами (5–20)  $M_{\odot}$  являются конечной стадией эволюции звёзд главной последовательности с массами  $\geq 25 M_{\odot}$  [83]. Теоретические исследования последних лет показывают, что в настоящее время в старых шаровых скоплениях может находиться несколько сотен чёрных дыр звёздных масс [84]. Почти все они являются одиночными чёрными дырами, что согласуется с малым числом наблюдаемых рентгеновских двойных систем с чёрной дырой в шаровых скоплениях. Наличие чёрных дыр может вызвать разогрев центральной части скопления, что в свою очередь приведёт к значительному увеличению ядра скопления [85]. Поэтому наиболее подходящими объектами для поиска чёрных дыр звёздных масс являются старые шаровые скопления с большими радиусами ядер.

За последние годы с помощью наблюдений на Большой решётке (Very Large Array, VLA) удалось обнаружить в двух массивных шаровых скоплениях, M22 [86] и M62 [87], двух кандидатов в чёрные дыры звёздных масс. Оба этих скопления являются массивными, однако имеют разную структуру. Так, скопление M22, как и предсказывалось теорией, имеет протяжённое ядро, а скопление M62 обладает довольно компактным плотным ядром.

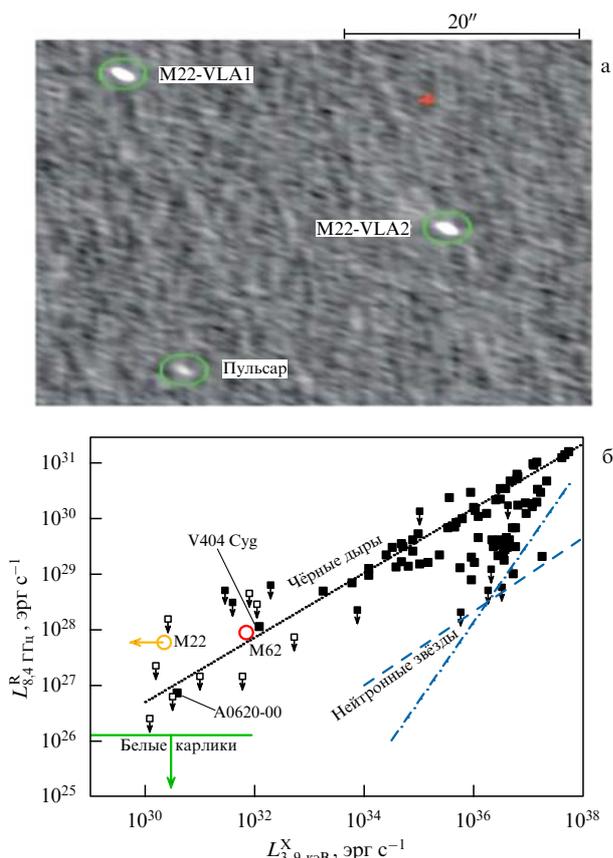
Наблюдения шарового скопления M22 с максимально возможным разрешением ( $\approx 1''$ ) на VLA показали, что наблюдаемый слабый источник является двойным источником (рис. 12a) со свойствами, сходными со свойствами чёрных дыр звёздных масс (рис. 12b).

Наблюдения шарового скопления M62 на VLA с максимальным временем накопления сигнала обнаружили наличие в центральной области скопления очень слабого источника M62-VLA1 с плоским спектром в радиодиапазоне и потоком  $18,7 \pm 1,9$  мкЯн на частоте 6,2 ГГц [87]. Наблюдаемые свойства этого источника в радиодиапазоне, рентгеновском и оптическом диапазонах сходны со свойствами хорошо изученного транзитного рентгеновского источника V404Cyg, который в настоящее время является находящейся в спокойном состоянии двойной системой с чёрной дырой звёздной массы.

Наблюдения в миллиметровом диапазоне длин волн с высокой чувствительностью и умеренным пространственным разрешением кандидатов в чёрные дыры, обнаруженных в шаровых скоплениях, могут оказаться чрезвычайно важными для подтверждения их природы. При наличии у источников плоского спектра ожидаемые потоки в миллиметровом диапазоне составят несколько гораздо ниже. Главной проблемой будет отделение этих источников от фона далёких галактик. Возможные объекты для наблюдений: M22, M14, M53, NGC2419, M62.

### 4.4. Природа ультраярких рентгеновских источников излучения

Другой интересной задачей может быть поиск чёрных дыр промежуточных масс. Наблюдения ультраярких рентгеновских источников (Ultra-Luminous X-ray sources, ULXs) и гиперярких рентгеновских источников (Hyper-Luminous X-ray sources, HLXs) в режиме одиночного зеркала с целью детектирования излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин



**Рис. 12.** (В цвете онлайн.) (а) Полученное на VLA радиоизображение шарового скопления M22 в континууме ядра. Два ярких овальных объекта — источники, идентифицированные как M22-VLA1 и M22-VLA2. Красным крестом обозначен фотометрический центр скопления [86]. (б) Соотношение между рентгеновским потоком и радиопотоком для чёрных дыр звёздных масс.  $L_{8,4 \text{ ГГц}}^R$  — светимость в радиодиапазоне на частоте 8,4 ГГц,  $L_{3-9 \text{ кэВ}}^X$  — светимость в рентгеновском диапазоне 3–9 кэВ. Источники в M22 и M62 обладают свойствами, которые делают их похожими скорее на чёрные дыры, чем на нейтронные звёзды или белые карлики [87].

волн и последующие наблюдения этих объектов в интерферометрической моде с высоким пространственным разрешением должны позволить ограничить возможные модели и установить природу объектов.

Ультраяркие рентгеновские объекты — это неядерные точечные объекты с наблюдаемой болометрической светимостью  $L$ , превышающей эддингтоновский предел для галактических чёрных дыр звёздных масс ( $20M_{\odot}$ ),  $L > 3 \times 10^{39}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  в диапазоне 0,3–10 кэВ. ULXs были открыты в ближайших галактиках с помощью обсерватории "Эйнштейн" [88]. Для сферической аккреции полностью ионизованного водорода эддингтоновский предел может быть выражен следующим образом [89]:

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi c G M m_p}{\sigma_T} \approx 1,3 \times 10^{38} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) [\text{эрг } \text{с}^{-1}],$$

где  $\sigma_T$  — сечение томсоновского рассеяния,  $c$  — скорость света,  $G$  — гравитационная постоянная,  $m_p$  — масса протона,  $M$  — масса чёрной дыры. Отсюда следует, что ULXs могут являться чёрными дырами промежуточных масс,  $M = 10^2 - 10^4 M_{\odot}$  (см., например [90]). Они также могут быть тесными двойными системами в той стадии эволюции, которая не наблюдается в Млечном Пути. Количество ULXs достаточно высоко: 230 [91]; кроме

того, обнаружено около 500 кандидатов в ULXs [92]. Такие объекты зарегистрированы примерно в четверти галактик [93], и они наблюдаются в галактиках любых типов: в галактиках с активным звездообразованием (в которых содержится порядка 60 % всех ULXs) [94]; в карликовых галактиках (Хомберг II); эллиптических галактиках с незначительным звездообразованием, а также в регионах, далёких от областей звездообразования (NGC 1313 X-2 и NGC 4559 X-10) [95].

Сразу после открытия ULXs были предложены разные модели, объясняющие их происхождение. Условно эти модели можно разделить на три основных класса: субкритическая аккреция на чёрную дыру промежуточной массы [96], сверхкритическая аккреция на чёрную дыру звёздной массы [97] и коллимированное излучение чёрной дыры звёздной массы, аккрецирующей примерно на эддингтоновском пределе [98]. Так как наблюдаются ULXs с разными свойствами, вполне возможно, что популяция ULXs состоит из объектов разных классов. Чёрные дыры звёздных масс являются наиболее вероятным объяснением наблюдаемых свойств ULXs, а чёрные дыры промежуточной массы имеют место в нескольких исключительных случаях [99].

Важно отметить, что вопрос о существовании чёрных дыр промежуточных масс остаётся одним из самых актуальных в современной астрофизике. До последнего времени не было не только прямых наблюдательных доказательств существования таких объектов, но и даже косвенных указаний на их наличие, несмотря на предсказания современной теории формирования структур во Вселенной. Таким образом, чёрные дыры промежуточных масс являются загадочным недостающим звеном между чёрными дырами звёздных масс и сверхмассивными чёрными дырами, находящимися в центрах галактик. Согласно современным моделям чёрные дыры промежуточных масс могли образовываться как при коллапсе первичных звёзд в ранней Вселенной, так и при коллапсе ядер молодых плотных звёздных скоплений [100], а также в процессе аккреции или слияния чёрных дыр звёздных масс. В последнее десятилетие стали появляться намёки на обнаружение чёрных дыр промежуточных масс в центрах шаровых звёздных скоплений и областях повышенного звездообразования.

Наиболее вероятными кандидатами в чёрные дыры промежуточных масс являются неразрешённые центральные области массивных шаровых звёздных скоплений как в нашей, так и в других галактиках, а также гиперяркие рентгеновские источники. У одного из наиболее вероятных кандидатов в чёрные дыры промежуточной массы, источника ESO 243-49 HLX-1, открытого обсерваторией XMM-Ньютон (XMM — X-ray Multi-Mirror Mission) в 2004 г. в спиральной галактике ESO 243-49 на расстоянии 8 угл. с от ядра [101], при наблюдениях на Австралийской компактной решётке (Australia Telescope Compact Array, ATCA) было обнаружено переменное радиоизлучение на частотах 5 и 9 ГГц [102].

В некоторых туманностях вокруг ULXs наблюдается радиоизлучение. Наиболее изученные примеры — источники Холмберг II X-1 [103] и NGC 5408 X-1 [104]. В обеих туманностях преобладает оптически тонкое синхротронное излучение, схожее с радиоизлучением от остатков сверхновых. Морфология различных радиоисточников варьируется, но в определённых случаях они выглядят как двойные [95].

Более детальную информацию о природе ULXs могут предоставить наблюдения наиболее близких ULXs и всех известных HLXs в миллиметровом диапазоне длин волн с чувствительностью  $\sim 1$  мкЯн для определения массы чёрной дыры.

Следует отметить неожиданный результат, полученный недавно с борта орбитальной рентгеновской обсерватории NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) [105]. Оказалось, что один из ULXs в галактике M82 является рентгеновским пульсаром ( $P_{\text{pulsar}} = 1,37$  с), входящим в двойную систему с орбитальным периодом 2,4 сут. Функция масс рентгеновского пульсара  $f(m) \sim \sim 2M$ . Скорее всего, это нейтронная звезда с высоким магнитным полем, на которую идёт сильно несферическая магнитно-коллимированная аккреция (на магнитные колонки нейтронной звезды).

#### 4.5. Сверхновые

В течение нескольких суток после взрыва сверхновой её остаток является чрезвычайно компактным. Одним из наиболее вероятных механизмов взрыва коллапсирующих сверхновых является магниторотационный механизм [106–108]. В рамках этого механизма анизотропия взрыва возникает вследствие нарушения зеркальной симметрии магнитного поля [109]. Вместе с тем наблюдение этого остатка в ранние моменты позволит измерить исходную анизотропию и асимметрию взрыва до того, как взаимодействие с окружающей средой значительно исказит траекторию разлёта вещества сверхновой. Космическая обсерватория Миллиметрон в режиме интерферометра будет способна разрешить оболочку сверхновой на расстоянии до 10 Мпк. Ожидаемое количество объектов составляет несколько десятков в год для сверхновых типа II и одну сверхновую типа I b/c в год.

Интересными объектами для наблюдений Миллиметрона могут оказаться взрывы сверхновых типа III. Этот тип сверхновых может быть обусловлен наличием стадии с общей оболочкой [110, 111], возникающей в процессе совместной эволюции в тесных двойных звёздных системах [112]. Стадия с общей оболочкой приводит к асимметричному истечению внешних слоёв красного гиганта. Наблюдение движения ударной волны по разлетающейся атмосфере красного гиганта возможно в миллиметровом диапазоне, причём асимметричность истечения можно будет детектировать начиная со вторых суток после взрыва сверхновой, находящейся на расстоянии более 30 Мпк.

### 5. Чёрные дыры и джеты

Чёрные дыры — одно из наиболее интересных предсказаний общей теории относительности, и задача доказать или опровергнуть их существование представляет собой одну из главных задач астрономии. Чёрные дыры являются чрезвычайно компактными образованиями, поэтому для их наблюдения необходимо очень высокое угловое разрешение. Для всех известных сейчас объектов угловой диаметр горизонта чёрной дыры не превышает 20 угл. мкс. Прогресс в этой области позволяет надеяться, что ответ будет получен в недалёком будущем. Так, наземно-космический интерферометр Радиоастрон с наилучшим разрешением 7,5 мкс дуги уже проводит наблюдения сверхмассивной чёрной дыры в галактике M87. Наземный ЕНТ, работающий в миллиметровом

диапазоне, возможно, разрешит центральную чёрную дыру в Галактике.

Космическая обсерватория Миллиметрон, работая совместно с наземными телескопами, позволит достичь сверхвысокого углового разрешения, а значит, сможет изучить меньшие физические масштабы и большее количество объектов, не ограниченное двумя чёрными дырами. Помимо сверхмассивных чёрных дыр будут наблюдаться чёрные дыры звёздных масс в двойных системах. Всё это позволит узнать, могут ли существующие там физические условия способствовать ускорению космических лучей сверхвысоких энергий, и разобраться с моделями формирования джета.

При планировании задач Миллиметрона нами учтена специфика режима РСДБ. Мы исходим из того, что подобный интерферометр может использоваться для оценки угловых размеров источников со сверхвысоким угловым разрешением на частотах субмиллиметрового диапазона, а при соответствующей чувствительности (см. табл. 1) — для построения модельных карт, в рамках априорных представлений о структуре источника. Интерферометр также может использоваться для построения одномерных карт распределения яркости.

Критически важная информация о магнитном поле и концентрации нерелятивистских частиц в ближайших окрестностях чёрных дыр может быть получена не только в режиме РСДБ, но и другим методом — посредством наблюдений спектра поляризации в режиме одиночной антенны. Наличие магнитного поля в плазме на пути фотонов, летящих к наблюдателю, вызывает эффект Фарадея — поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света. Количественную характеристику эффекта отражает мера вращения (Rotation Measure, RM), равная  $\varphi/\lambda^2$ , где  $\varphi$  — угол, на который повернулась плоскость поляризации,  $\lambda$  — длина волны.

Согласно теоретическим работам [113, 114] величина магнитного поля на масштабах аккреционного диска чёрной дыры может составлять  $\geq 10^4$  Гс. Как показали экспериментальные работы [115, 116], магнитное поле действительно возрастает по направлению к ядру источника. Следовательно, если в исследуемой околоядерной области присутствуют тепловые электроны, то можно ожидать экстремально больших значений RM.

При вполне разумных предположениях о величине магнитного поля и плотности тепловых электронов легко получить ожидаемые оценки:  $RM > 10^4 - 10^8$  рад м<sup>-2</sup>. Последние результаты подтверждают теоретические предсказания экстремальных мер вращений по наблюдениям как центра Галактики [117, 118], так и далёких активных галактик на миллиметровых волнах [119]. При линейно поляризованном синхротронном излучении из ядерной области и использовании узких частотных каналов приёмника Миллиметрона будут наблюдаться вариации наблюдаемой плотности потока в зависимости от длины волны по "синусоидальному" закону.

Обнаружение экстремальных фарадеевских вращений наземными телескопами или Миллиметроном в одиночном режиме позволит составить список источников с заведомо малыми угловыми размерами — кандидатов для наблюдений в интерферометрическом режиме на Миллиметроне.

Вопрос о происхождении сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик обсуждается в разделах 7.3 и 7.6.

### 5.1. Близкие чёрные дыры

Практически все ближайшие (на расстояниях менее 50 Мпк) сверхмассивные чёрные дыры являются объектами со светимостью много меньше эддингтоновской, что связано со сравнительно слабой аккрецией. В частности, к ним относятся такие знаменитые объекты, как чёрная дыра в центре Галактики (Стрелец А\*), М87, Центавр А.

При моделировании подобных источников излучения предполагается, что темп аккреции на много порядков меньше, чем его характерное эддингтоновское значение. Для таких малых темпов аккреции стандартная модель тонких аккреционных дисков неприменима и изучаются так называемые адвекционно-доминированные и радиационно-неэффективные модели. В рамках этих моделей диск вблизи чёрной дыры считается геометрически толстым, с характерным значением полутолщины порядка расстояния до чёрной дыры. Поскольку разрежённая плазма, составляющая диск, плохо излучает, вещество разогревается и расширяется в вертикальном направлении. Температура газа может достигать  $10^{11} - 10^{12}$  К, причём выделенная в результате аккреции энергия в основном сносится радиальным течением в чёрную дыру. Эффективность переработки выделенной энергии в излучение, следовательно, весьма мала — типичные значения порядка  $10^{-6} - 10^{-3}$ .

Ввиду того что аккрецирующая плазма весьма разрежена, считается, что оптическая толщина по отношению к свободно-свободным переходам и томсоновскому рассеянию мала. Более того, для субмиллиметрового диапазона можно пренебречь и синхротронным самопоглощением излучения. Это означает, что среда вблизи чёрной дыры в указанном диапазоне — оптически тонкая и должна существовать возможность увидеть чёрную дыру непосредственно. Следовательно, возникает принципиальная возможность определить массу чёрной дыры, её угловой момент, а также параметры потока, включая его геометрическую структуру. При условии достаточно высокого разрешения и высокой чувствительности измеряющего прибора в таких потоках можно непосредственно наблюдать формирование джета и оттоков вещества и тем самым прояснить до сих пор нерешённый вопрос о том, является ли джет следствием магнитогидродинамических процессов, протекающих в диске, или он возникает благодаря так называемому эффекту Бленфорда–Знаека, связанному с вращением чёрной дыры. Если доступны масштабы, меньшие гравитационного радиуса, то появляется принципиальная возможность судить о структуре турбулентности аккреционного потока, прояснить, по-видимому, связанную с ней квазипериодическую переменность светимости, которая может быть обусловлена, например, существованием так называемых горячих пятен в диске и/или возбуждением турбулентностью различных мод колебаний аккрецирующего потока.

Наиболее изученный пример объектов такого рода в Галактике — это Стрелец А\* (рис. 13). Расстояние до него  $R \approx 8$  кпк, масса объекта  $4 \times 10^6 M_\odot$ , гравитационный радиус  $r_g \approx 10^{12}$  см, болометрическая светимость  $3 \times 10^{36}$  эрг  $s^{-1}$ , угловой размер  $r_g/R \approx 10$  мкс дуги. Временной масштаб переменности варьируется от нескольких минут до нескольких часов в ближнем инфракрасном, рентгеновском, субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах.

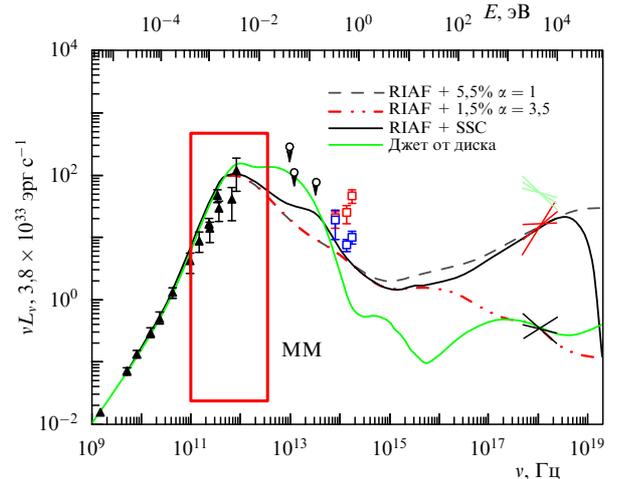


Рис. 13. (В цвете онлайн.) Спектр излучения от центра Галактики (<http://www.mpe.mpg.de/368843/Results>). RIAF — радиационно-неэффективный аккреционный поток (Radiative Inefficient Accretion Flow), в процентах указана доля нетепловых электронов со спектром, имеющим показатель  $q$ . SSC (Synchrotron self-Compton) — модель с учётом комптоновского рассеяния синхротронных фотонов. Символами показаны результаты измерений в радиодиапазоне и ИК-диапазоне, пересекающимися отрезками — измерения потока и наклона спектра в рентгеновском диапазоне. Красным прямоугольником показан диапазон работы Миллиметра.

В астрофизике чёрных дыр для обсерватории Миллиметра есть несколько прорывных задач. Первая из них — это возможность разрешить область на гравитационном радиусе практически для всех сверхмассивных чёрных дыр на расстояниях до 50 Мпк. Космическая обсерватория Миллиметр сможет в принципе разрешить структуры в аккреционных потоках около чёрных дыр на масштабах порядка гравитационного радиуса примерно для 40 сверхмассивных чёрных дыр. Для

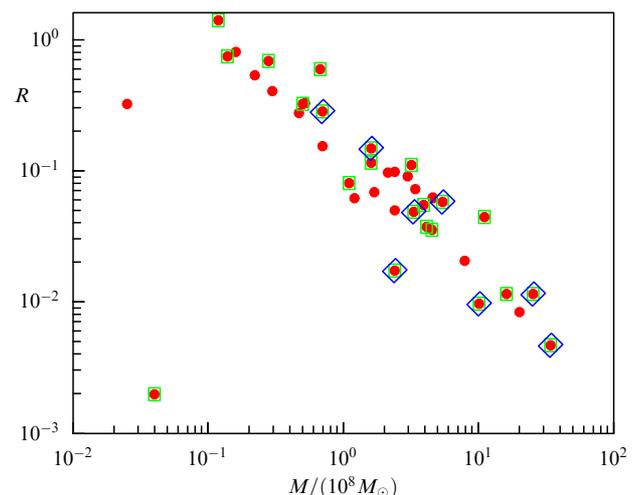


Рис. 14. (В цвете онлайн.) Отношение  $R$  минимального углового размера, который в принципе может разрешить Миллиметр, к угловому размеру, соответствующему гравитационному радиусу, для 38 сверхмассивных чёрных дыр на расстояниях менее 50 Мпк. Минимальный угловой размер принимался равным  $2 \times 10^{-3}$  рад. Кружки соответствуют порогу чувствительности в интерферометрической моде  $10^{-4}$  Ян, квадраты —  $10^{-2}$  Ян, ромбы —  $10^{-1}$  Ян. Квадрат в нижней левой части рисунка соответствует чёрной дыре в центре Галактики, а ромб в нижней правой части рисунка — М87 [120].

таких объектов, как чёрные дыры в центре Галактики и в М87, разрешающей способности Миллиметрона достаточно для того, чтобы исследовать детали, в несколько сотен раз меньшие гравитационного радиуса (рис. 14). Это позволит судить о природе переменности и свойствах турбулентности данных источников, что весьма важно не только для астрофизики чёрных дыр, но и для выяснения природы любых аккрецирующих космических тел.

### 5.2. Силуэты и тени чёрных дыр

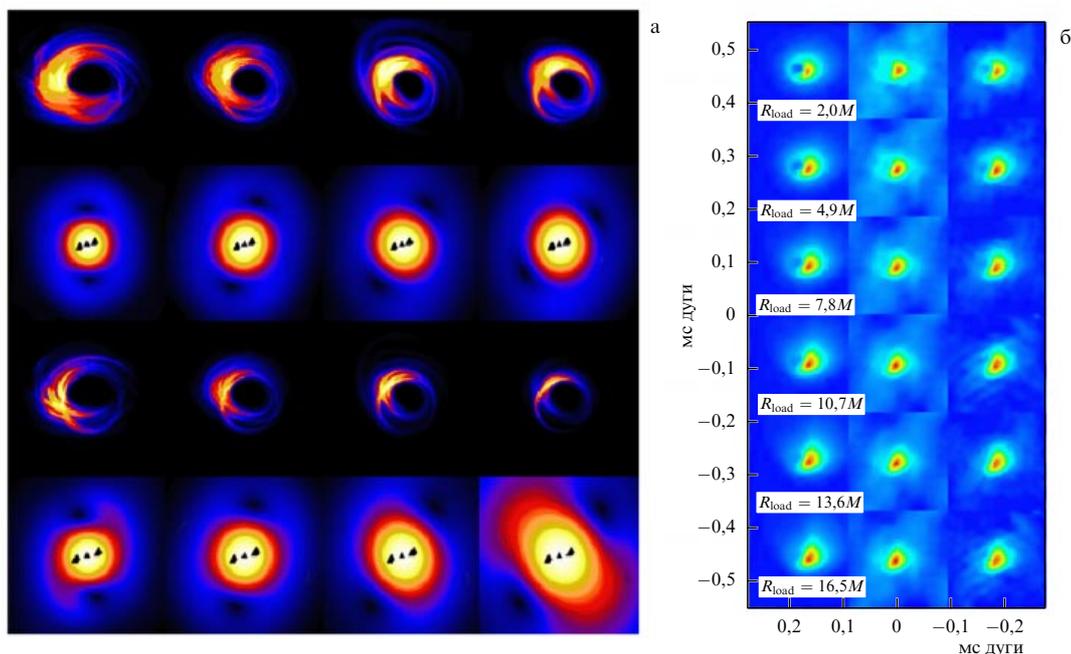
Как мы отмечали в разделе 5.1, если газ вблизи чёрной дыры является оптически тонким, то чёрную дыру можно увидеть непосредственно. В самом деле, часть излучения этого газа захватывается чёрной дырой, поэтому вид области около чёрной дыры на больших расстояниях должен иметь тёмное пятно, соответствующее захваченному излучению. Картина распределения яркости вокруг этого пятна будет очень сильно видоизменена из-за сильного искажения траекторий движения света вблизи чёрной дыры, гравитационного красного смещения и т.д. По форме распределения яркости в окрестности тёмного пятна можно судить об основных характеристиках излучающего газа, например определить, диск или джет дают основной вклад в светимость изучаемого объекта в данном диапазоне длин волн. Форма распределения яркости вблизи тёмного пятна существенно зависит также от того, насколько велик момент вращения чёрной дыры, и изучение данной области является, пожалуй, наиболее прямым методом

определения этого важнейшего параметра. Однако самым существенным обстоятельством является то, что обнаружение тени станет непосредственным доказательством того, что сверхплотный и сверхмассивный объект в центре изучаемой галактики представляет собой именно чёрную дыру. Разрешающая способность интерферометрических систем, базирующихся на Земле, ограничена размером земного шара и в общем достаточно только для попытки поиска теней для двух-трёх ближайших сверхмассивных чёрных дыр, тогда как наблюдения, использующие Миллиметрон в интерферометрической моде, предоставляют принципиальную возможность обнаружить тени для нескольких десятков объектов (см. рис. 14).

На рисунке 15 показаны ожидаемые тени от чёрных дыр в центре Галактики и М87, полученные в результате численного моделирования. В случае рис. 15а подсветка чёрной дыры осуществлялась радиационно-неэффективным диском, а в случае рис. 15б — джетом. Вычисления были проведены с учётом возможностей наземного телескопа ЕНТ. Крайне важно провести аналогичные расчёты с учётом возможностей, предоставляемых Миллиметроном.

### 5.3. Далёкие чёрные дыры

Миллиметрон предоставит возможность разрешить масштаб порядка гравитационного радиуса для чёрной дыры с массой 100 млн масс Солнца, находящейся на расстоянии 100 Мпк и для чёрной дыры с массой в 1 млрд масс Солнца на расстоянии 1000 Мпк. На таких расстоя-



**Рис. 15.** (В цвете онлайн.) (а) Модель изображения радиационно-неэффективного аккреционного диска и тени от чёрной дыры в центре Галактики. Показаны распределения интенсивности (1-й и 3-й горизонтальные ряды) и амплитуды функции видности (2-й и 4-й горизонтальные ряды) для разных моделей аккреционного потока, соответствующих разным колонкам. Модели различаются параметром вращения чёрной дыры, принимающим значения (слева направо): 0,50; 0,90; 0,92; 0,94. Верхние два ряда изображений рассчитаны для длины волны 1,3 мм, а два нижних — для длины волны 0,87 мм [121]. (б) Распределение яркости в модели центральной области галактики М87. Предполагается, что чёрная дыра "подсвечивается" джетом. Частота излучения принималась равной 345 ГГц. В левой колонке — начальные модельные распределения, в центральной и правой колонках — изображения, полученные после моделирования интерферометрических наблюдений разными методами.  $M$  — масса чёрной дыры. Используются геометрические единицы, в которых  $G = c = 1$ . Для перевода в физические единицы массу необходимо домножить на  $G/c^2$ . Снизу вверх расположены изображения, соответствующие уменьшению радиуса формирования джета от чёрной дыры [122].

ниях находятся многие яркие активные ядра галактик и квазары, в которых, как предполагается, находятся чёрные дыры в этом диапазоне масс и аккреция протекает через "стандартный" геометрически тонкий аккреционный диск. Наличие последнего можно диагностировать по наличию "большого голубого подъёма" (Big Blue Bump) в УФ-части спектра. Несмотря на то что такие диски являются оптически толстыми, в подобных системах также можно наблюдать тень от чёрной дыры (рис. 16), поскольку угловой размер таких дисков в направлении, перпендикулярном их плоскости, является весьма малым по сравнению с угловым размером горизонта событий.

На больших расстояниях можно также наблюдать интереснейшие нестационарные явления в центрах галактик и квазаров, не наблюдаемые из-за их небольшой вероятности в относительно близких объектах. Кратко обсудим только два из таких явлений, а именно: процессы, протекающие вблизи двойных сверхмассивных чёрных дыр (ДСЧД), а также акты приливного разрушения звёзд сверхмассивной чёрной дырой.

ДСЧД не только являются крайне интересными объектами сами по себе, но и могут произвести в процессе слияния компонентов самые мощные вспышки гравитационного излучения, которые в принципе могут наблюдаться планируемыми космическими гравитационными антеннами на больших расстояниях — вплоть до космологических. Пожалуй, самым известным кандидатом в ДСЧД является лацертида OJ 287, расположенная на расстоянии порядка 1 Гпк. Как считается, лацертида OJ 287 представляет собой ДСЧД с массой компонентов 10 млрд и 100 млн масс Солнца и орбитальным периодом порядка 12 лет (рис. 17). Миллиметронтрон с лёгкостью сможет наблюдать угловые размеры порядка угловой величины гравитационного радиуса более массивного компонента.

Акты приливного разрушения звёзд чёрной дырой проявляются обычно как вспышки излучения в рентгеновском диапазоне в неактивных галактиках. Характерное время убывания мощности излучения таких вспышек порядка нескольких лет.

При условии, что в субмиллиметровой области светимость указанных объектов является достаточной для наблюдений с помощью Миллиметронтрона в интерферометрической моде, оценки показывают, что Миллиметронтрон будет способен разрешить масштабы порядка гравитационного радиуса, по крайней мере, для нескольких таких объектов, как, например, NGC5905 [124]. Интереснейшим объектом является обнаруженный в 2011 году Swift J1644 + 57 [125], который представляет собой весьма

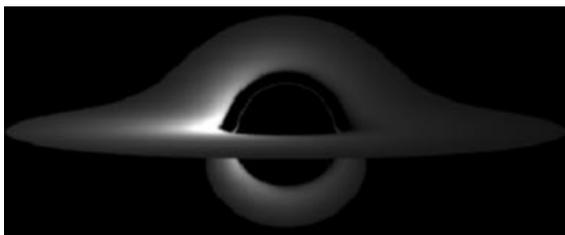


Рис. 16. Распределение болометрического потока излучения от аккреционного диска вокруг шварцшильдовской чёрной дыры. Угол наклона между нормалью к плоскости диска и лучом зрения  $84,5^\circ$  [123].

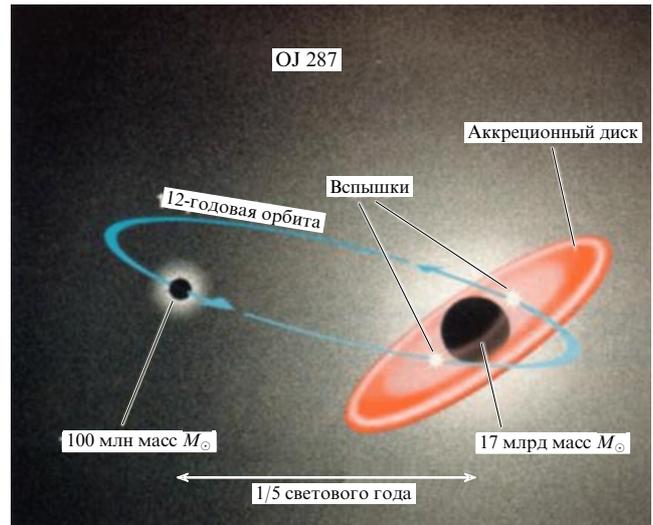


Рис. 17. Схема возможного устройства OJ 287 (<http://www.astro.utu.fi/news/080419.shtml>).

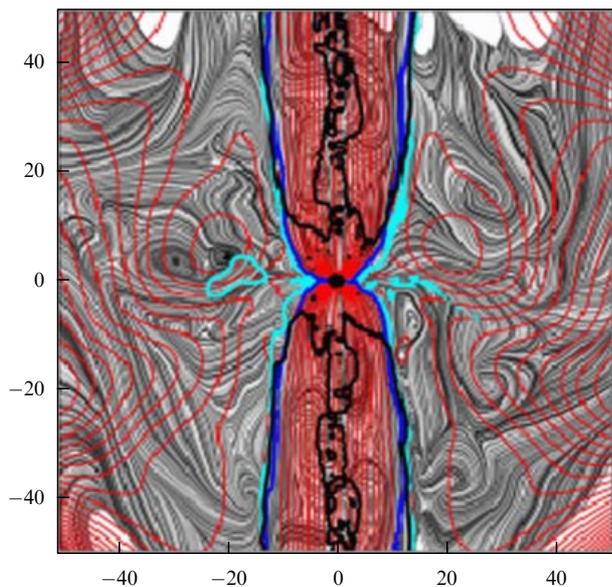
мощный источник излучения практически во всех волновых диапазонах, в том числе в миллиметровом, расположенный на расстоянии порядка 1 Гпк. Этот источник интерпретируется как излучение от джета, образовавшегося после приливного разрушения звезды чёрной дырой. Для объектов такого типа Миллиметронтрон позволит с достоверностью подтвердить или опровергнуть эту модель.

#### 5.4. Физика джетов

Многообразие теорий аккреционных дисков имеет своим отражением такое же многообразие теорий джетов. Как и в случае дисков, космическая обсерватория Миллиметронтрон благодаря своим параметрам даст недостающий наблюдательный материал для выбора среди многочисленных теорий правильной.

В случае аккреционных дисков вокруг чёрных дыр, пожалуй, основными вопросами являются следующие (см., например, [126]). Во-первых, необходимо прояснить, какой механизм образования джета: связанный с вращением чёрной дыры или обусловленный вращением самого диска — является основным. Во-вторых, для выяснения природы джетов крайне важен вопрос о структуре магнитного поля вблизи чёрной дыры. В-третьих, существуют принципиальные вопросы о составе плазмы, движущейся в джете (например, является ли плазма электрон-позитронной или электрон-протонной), её характерных скоростях движения как функции расстояния до чёрной дыры и от оси джета, о распределении в плазме нетепловых частиц. В-четвёртых, необходимо с достоверностью установить, являются ли "типичные" джеты двухсторонними или возможно формирование струйного выброса только в одну сторону [127]. В-пятых, важно получить наблюдательное подтверждение возможной смены со временем полярности магнитного поля джета [128, 129]. Все эти вопросы взаимосвязаны.

В различных численных моделях сама возможность возникновения джета зависит от структуры аккреционного диска и магнитного поля (рис. 18). Очевидно, что для выяснения природы джетов необходимы наблюдения на весьма малых масштабах, дающие информацию о потоках вещества и структуре магнитного поля вблизи



**Рис. 18.** (В цвете онлайн.) Распределения скорости и магнитного поля (показаны соответственно серым и красным цветом) согласно релятивистской модели формирования джета около чёрной дыры с параметром вращения  $a = 0,9375$  [130]. По осям — координаты в шварцшильдовских радиусах чёрной дыры.

чёрной дыры. Задача построения РСДБ-карт с учётом поляризации может быть осложнена, если в источнике наблюдаются экстремальные фарадеевские вращения. Возможные решения проблемы построения карт предложены в работах [131–134].

Исследование образования джетов теснейшим образом связано с исследованием самих аккреционных дисков, причём важным является исследование этих объектов в астрофизических системах разного типа, от чёрных дыр звёздных масс до квазаров. Миллиметрон, обладающий уникально высоким угловым разрешением в интерферометрической моде, возможно, позволит дать ответы на эти вопросы. Подчёркиём, что для исследования структуры магнитных полей важны поляризационные наблюдения.

Наконец, наблюдения в миллиметровом диапазоне могут оказаться решающими для выяснения природы ГЭВ- и ТЭВ-вспышек от активных ядер галактик [135]. Такие вспышки, происходящие в галактиках М87 и 3С454.3 каждые 2–3 года, длятся от нескольких дней до нескольких недель. Наблюдения со сверхвысоким разрешением позволяют не только определить положение вспышки в джете, но и проследить эволюцию излучающей области. Одновременные со вспышкой наблюдения центральных областей активных ядер галактик являются важными для выяснения природы природы вспышек [127, 136–138].

### 5.5. Джеты космических гамма-всплесков

Благодаря беспрецедентно высокой угловой разрешающей способности Миллиметрона в интерферометрической моде возможно непосредственное наблюдение джета космических гамма-всплесков в течение нескольких первых суток, когда расширение джета происходит в релятивистском режиме. Действительно, для гамма-всплеска GRB 030329, источник которого находился на красном смещении  $z = 0,1685$ , угловое разрешение 0,16 мкс дуги соответствует 0,0005 пк, что эквивалентно

световому времени менее 1 сут. Таким образом, появляется возможность наблюдать и исследовать расширение джета на ранней стадии его формирования, по-видимому, даже до момента *джет-брейка*, во время которого кривая блеска послесвечения испытывает излом степенного убывания.

Такие наблюдения существенно дополняют картину наземных РСДБ-наблюдений [139] и позволят определить несколько важных параметров, таких как время джет-брейка, время начала торможения джета, время перехода расширения джета от релятивистской фазы к нерелятивистской, а также возможное наличие двух джетов с разными параметрами [140–142]. Близкие гамма-всплески регистрируются достаточно редко, примерно один раз в 5–7 лет, следовательно, можно надеяться на одно такое наблюдение в течение миссии Миллиметрон.

## 6. Галактики

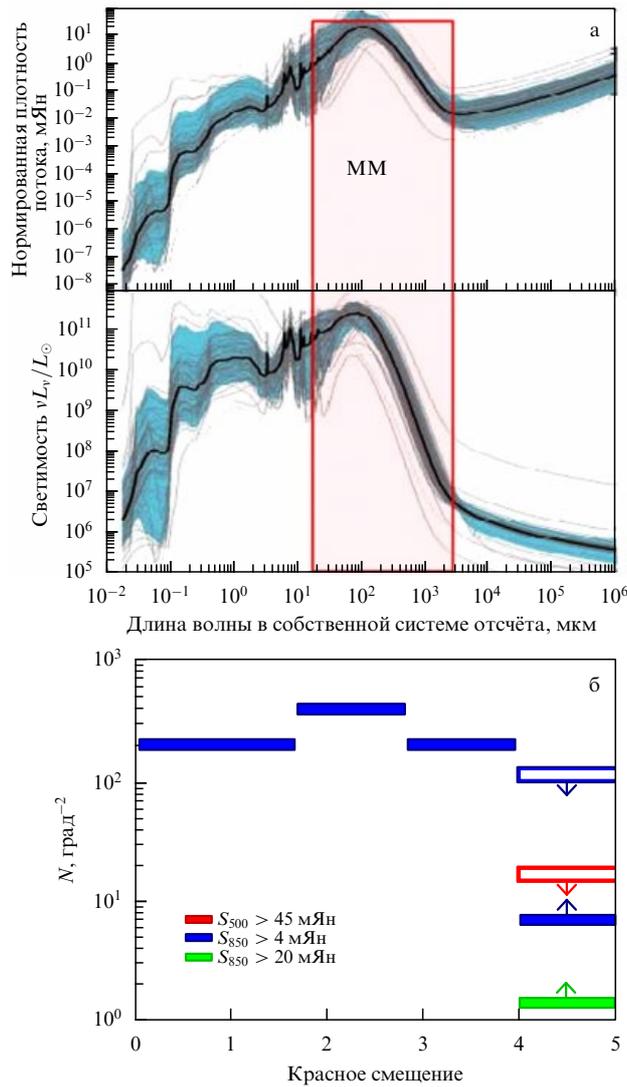
### 6.1. Эволюция галактик

Поскольку звездообразование приводит к появлению пыли, галактики с активным звездообразованием имеют большую светимость в субмиллиметровом диапазоне. С другой стороны, даже тёплая пыль ( $T_d = 30$  К) в ранних галактиках на красных смещениях  $z = 10$  будет видна в субмиллиметровой области. В миллиметровую область попадёт излучение от спектральной линии 158 мкм иона СII, в которой осуществляется отвод лишнего тепла межзвёздного газа в диапазоне температур от 30 К до нескольких тысяч кельвинов. Это позволит Миллиметрону, с его высокой чувствительностью, обнаруживать галактики на красных смещениях вплоть до  $z \sim 6–7$  и составить достаточно полную картину эволюции галактик. С этой целью необходимо проводить наблюдения как в континууме, измеряя спектральное распределение энергии, так и в спектральных линиях (СО, СII, OI и др). Ключевым параметром здесь является также угловое разрешение.

Галактик с активным звездообразованием на небе так много, что они сливаются при недостаточно высоком разрешении. Для обсерватории Миллиметрон с 10-метровым главным зеркалом этот эффект оказывается значительно слабее, чем для телескопа "Гершель" и проекта SPICA, диаметр зеркал которых составляет 3,5 м (рис. 16). По предварительным оценкам, Миллиметрон может получить спектры не менее 10000 галактик и провести наблюдения в континууме для нескольких десятков миллионов галактик. Таким образом, будет получено на три порядка больше научной информации по сравнению с собранной телескопом "Гершель". Миллиметрону будут доступны галактики на красных смещениях примерно до  $z = 6–7$  (рис. 19).

Другой крайне интересный аспект в изучении эволюции галактик — это исследование объектов, излучающих в основном в линии лайман-альфа. Источник излучения этих объектов и их место в общей эволюции галактик до сих пор не установлены. Вопросы, требующие дальнейшего исследования, следующие:

- каково содержание пыли в таких объектах;
- какую стадию эволюции галактики они представляют;
- каковы их источники энергии (аккреция на чёрную дыру? излучение звёзд? гравитационная энергия?)?

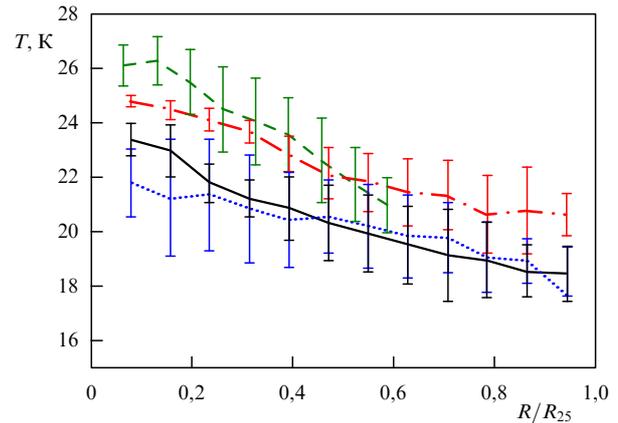


**Рис. 19.** (В цвете онлайн.) (а) Спектральное распределение энергии типичных субмиллиметровых галактик (в собственной системе отсчёта) с пиком на длине волны  $\lambda \approx 100$  мкм [143]. Красным прямоугольником выделен диапазон работы Миллиметрона в одиночном режиме. (б) Гистограмма, показывающая концентрацию субмиллиметровых галактик как функцию красного смещения [144].  $S_{500}$  и  $S_{850}$  — потоки на длинах волн 500 и 850 мкм соответственно.

Для ответов на эти вопросы необходимы фотометрические и спектральные наблюдения объектов, обнаруженных по оптическому излучению. Благодаря своей высокой чувствительности Миллиметрон сможет изучать типичные объекты, имеющие потоки предположительно на уровне нескольких десятков мкЯн [145].

## 6.2. Области с низкой скоростью звездообразования

Рекордно высокая чувствительность Миллиметрона позволит измерять температуру и массу пыли на луче зрения в разреженных областях галактик и межгалактической среде, где пыль находится в специфических условиях низкой плотности диффузной среды (на один-два порядка ниже, чем в окрестности Солнца), и выявить механизмы, ответственные за присутствие пыли и её нагрев. Исследование пыли на периферии галактических дисков, в эллиптических галактиках и скоплениях галактик, где затруднён процесс формирования пыли, позво-



**Рис. 20.** (В цвете онлайн.) Радиальные вариации температуры пыли в четырёх галактиках: NGC 4254 (красная кривая), NGC 4303 (зелёная кривая) и NGC 4321 (синяя кривая) и NGC 4501 (чёрная кривая) [151].  $R_{25}$  — радиус до изофоты 25-й звёздной величины.

лит изучить механизмы переноса газа и пыли из галактик в окологалактическую и межгалактическую среду, оценить вклад пыли в термодинамику газа, выяснить особенности молекуляризации газа и характера звездообразования в условиях низкой средней плотности межзвёздной среды.

Исследования последних нескольких лет позволили выявить два типа распределения пыли на периферии галактик. В одном случае отношение массы пыли к газу убывает с уменьшением радиуса пропорционально радиальному уменьшению металличности, как в случае галактик M99/M100 [146] или галактики M31 [147, 148]. В другом случае на фоне убывающей с уменьшением радиуса металличности отношение массы пыли к массе газа остаётся практически неизменным на расстояниях вплоть до полутора значений оптического радиуса [149, 150]. Первый случай соответствует производству пыли *in situ*, т.е. вместе с металлами, второй — радиальному селективному выносу пыли из галактического диска либо переоценке её относительного содержания. Эта дихотомия в пространственном распределении пыли на периферии галактик (если она будет подтверждена) отражает особенности динамических процессов в дисках галактик, и она может быть принципиально важна в эволюции дисков.

Потоки ИК-излучения от пыли в периферийных областях галактик свидетельствуют о том, что её температура там составляет  $\lesssim 20$  К (рис. 20). Интенсивность излучения пыли дисков за пределами их диаметра, обычно принимаемого фотометрическим, как правило, ниже чувствительности телескопа "Гершель", однако она должна быть вполне достаточной для регистрации Миллиметроном. Решение этой задачи на Миллиметроне позволит:

- выяснить источники нагрева пыли и МЗС в целом, на периферии и за пределами звёздных дисков;
- исследовать оптические свойства пыли на периферии галактик, что позволит прояснить особенности механизмов переноса (или производства) пыли вдали от основных поставщиков пыли;
- исследовать соотношение количества наблюдаемого газа и пыли в зависимости от локальной скорости звездообразования, поверхностной плотности газа и его

количества. Это в свою очередь даст новый способ оценки полной массы молекулярного газа и выяснения его роли в звездообразовании;

- оценить массу скрытого (не обнаружимого в линиях СО из-за фотодиссоциации этой молекулы) молекулярного газа, но проявляющего себя по гамма-излучению, наличию пыли, а также по излучению ионизованного углерода [23, 152]. В областях низкой плотности в скрытом виде может находиться основное количество молекулярного газа. Пример Галактики показывает, что доля СО-тёмного молекулярного газа возрастает с уменьшением плотности газа, достигая 80 % на расстоянии 10 кпк от центра [23];

- используя соотношение между содержанием пыли и газа, оценить плотность и пространственное распределение МЗС и их связь с наблюдаемым темпом звездообразования в областях низкой плотности газа: на далёкой периферии галактических дисков [153], в приливных структурах (хвосты и перемычки взаимодействующих галактик) и в окрестности взаимодействующих галактик в межгалактическом пространстве, где очаги звездообразования также встречаются [154]. Особый интерес представляет исследование слабого излучения пыли в спиральных галактиках с крайне низкой поверхностной яркостью (типа Малин-1, Малин-2) и очень низкой колонковой плотностью HI в диске, которые, тем не менее, обладают спиральной структурой, по крайней мере в некоторых случаях содержат молекулярный газ, обнаружимый в линиях СО [155]. Слабое излучение в дальней ИК-области зарегистрировано лишь для нескольких подобных объектов [156]. Оценка массы пыли позволит уточнить содержание молекулярного газа, не наблюдаемого в линии СО, и его пространственное распределение в этих объектах, что важно для объяснения спиральной структуры и происходящего, хотя и слабого, звездообразования в дисках этих галактик, а также особенностей их эволюции [157];

- провести, что представляется принципиально важным, детальное исследование в дальнем ИК-диапазоне областей звездообразования в окрестностях взаимодействующих галактик (в мостах и соединяющих перемычках, таких, например, как в окрестности системы галактик Усики (Antennae galaxies) или в группе М81/М82), где может содержаться большое количество пыли, способной, в частности, повлиять на термодинамику газа в перемычках, стимулируя вспышку звездообразования. В газовой перемычке в группе М81/М82 наблюдается пыль в экстинкции с отношением пыли к газу, в шесть раз превышающим стандартное значение для Галактики [158]. К сожалению, этот участок неба может быть подвержен заметному влиянию *Галактических Циррусов* (облаков со сравнительно низкой поверхностной плотностью над плоскостью Галактики), что затрудняет корректную интерпретацию измерений экстинкции. Ввиду того что температура газа и пыли в перемычках мала, наблюдения на Миллиметроне могли бы дать уверенный ответ на вопрос о количестве пыли в области М81/М82.

Важное значение для физики галактик имеет исследование содержания пыли: определение её массы, оптических свойств, пространственного распределения — для гигантских дисковых галактик с низкой поверхностной яркостью. Это позволит не только оценить количество "скрытого", т.е. невидимого в молекулярных линиях,

газа, что важно для построения корректной динамической модели таких галактик и исследования их тёмного гало, но и объяснить механизм звездообразования в условиях, когда стандартные критерии звездообразования не выполняются. Ожидаемые от галактик с низкой поверхностной яркостью ИК-поток меньше пределов чувствительности телескопа "Гершель", но они должны превышать пределы чувствительности Миллиметрона.

Другим примером интересных для исследования областей с низким содержанием пыли являются эллиптические галактики, практически лишённые холодного газа. Современные данные указывают на то, что пыль в них всё же присутствует, причём содержит компоненты с различной температурой (рис. 21). Вследствие низкой плотности газа пыль в эллиптических галактиках попадает сразу в горячую фазу и оказывается не защищённой от разрушительного влияния горячего газа. С этой точки зрения эллиптические галактики представляют собой уникальную лабораторию, в которой механизмы разрушения пыли должны наглядно проявляться. С другой

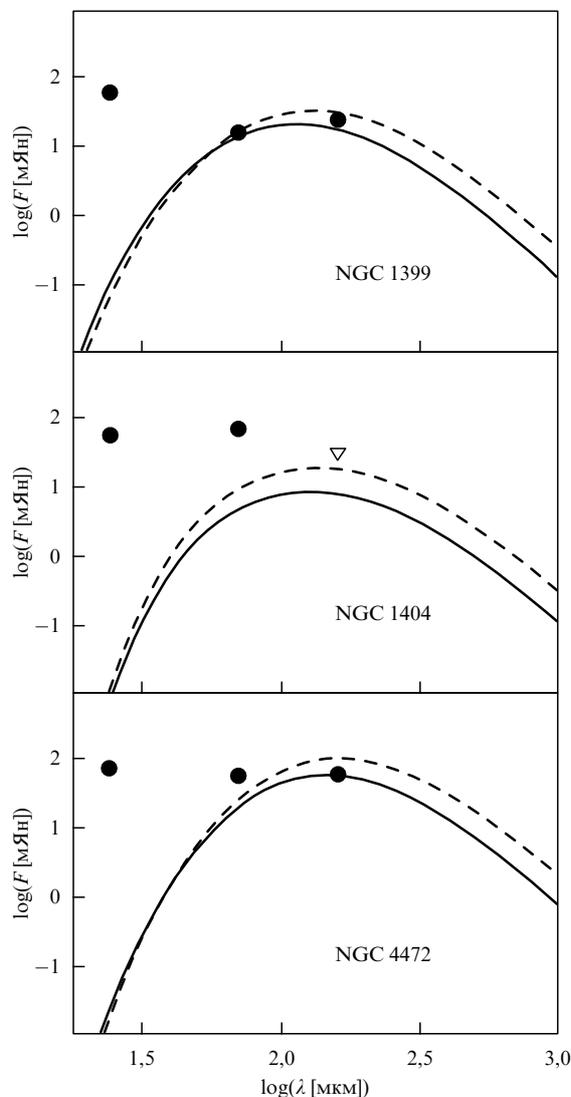


Рис. 21. Сравнение потоков  $F$  на длинах волн 24, 70 и 160 мкм (кружки) для трёх эллиптических галактик с модельными спектральными распределениями энергии [159]. Явно видно присутствие нескольких компонентов пыли с разной температурой.

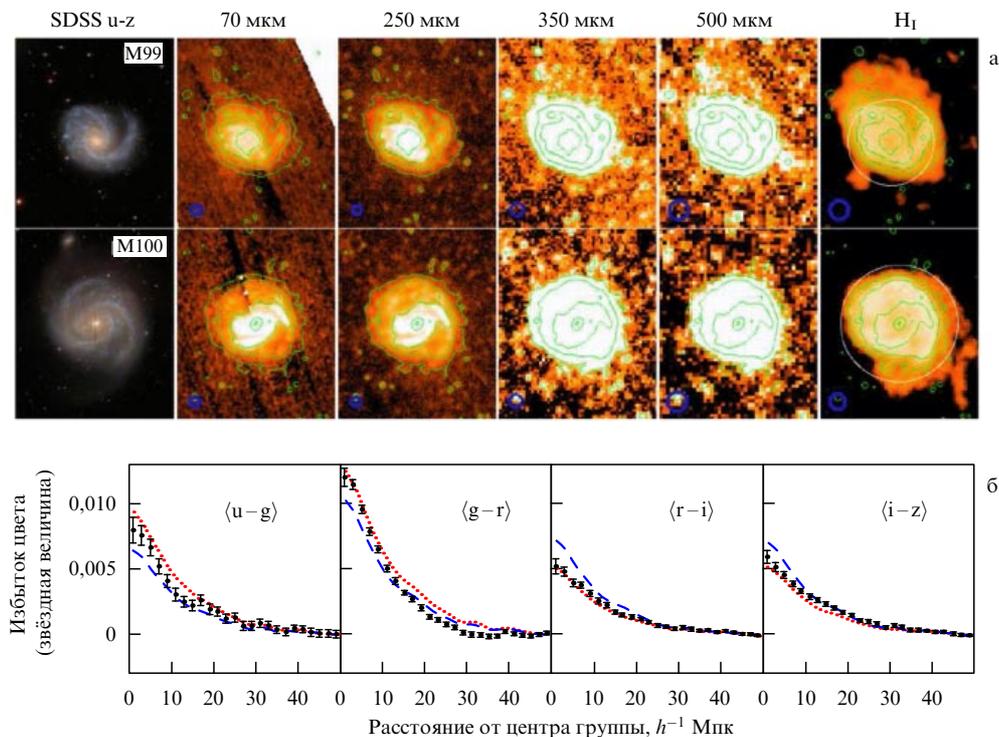
стороны, в условиях низкой плотности эллиптических галактик, при которых столкновительное трение ослаблено, транспорт пыли радиационным давлением проявляется в чистом виде, поэтому изучение пространственной структуры пыли в этих галактиках позволит понять механизм её перераспределения и её общий "бюджет" во Вселенной.

У задач, связанных с исследованием пыли, есть ещё один, чрезвычайно важный, аспект: пыль ответственна за поглощение в оптическом диапазоне, поэтому для правильной интерпретации многих оптических наблюдений необходимо хорошо изучить распределение пыли. Например, это принципиально важно для наблюдений и интерпретации далёких сверхновых в проектах определения космологической константы — тёмной энергии [160, 161]. Оценки, полученные разными методами, противоречивы — они различаются в несколько раз [162, 163]. Например, анализ около  $10^4$  скоплений галактик из обзора SDSS (Sloan Digital Sky Survey) на малых красных смещениях ( $0,1 - 0,2$ ) со всеми фоновыми квазарами в окрестности радиуса 1 Мпк вокруг центра скопления [164] показывает среднюю экстинкцию  $A_v = 0,003 \pm 0,01$ . Близкий результат даёт и анализ 90000 галактик из SDSS на фоне 458 скоплений галактик на красных смещениях вплоть до  $z \sim 0,5$  [165]. Соответствующая средняя массовая плотность пыли  $\rho(\text{пыли})/\rho(\text{барионов}) \sim 10^{-5} - 10^{-4}$ , т.е.  $0,1 - 1\%$  значения в Млечном Пути. В связи с этим примечательным (и интригующим) обстоятельством является измеренная оценка экстинкции, обусловленная присутствием пыли в межгалактической среде:  $0,03 < A_v < 0,1$  [166], т.е. на порядок больше, чем в газе скоплений галактик! Если это так, то отсюда следует, что либо пыль в межгалактическую среду поставляется

галактиками поля (т.е. галактиками, не входящими в состав скоплений и групп), либо заметная часть пыли в газе скоплений галактик не поддаётся обнаружению (являясь, по-видимому, связанной в плотных холодных облаках с малым геометрическим сечением). И первая, и вторая возможности заслуживают тщательного исследования.

С другой стороны, проанализировав [167] около 70000 скоплений и групп галактик из SDSS на малых красных смещениях ( $0 - 0,2$ ), нашли массовую плотность пыли:  $\rho(\text{пыли})/\rho(\text{барионов})$  от  $5\%$  до  $55\%$  для скоплений и групп соответственно по отношению к локальному (Галактическому) значению. Если для групп галактик столь высокое значение понятно, поскольку температура газа в группах меньше критического предела эффективного разрушения пыли, то более высокая концентрация пыли в скоплениях по сравнению с её измеренными значениями [164, 165] может свидетельствовать о том, что пыль в скоплениях защищена от разрушения плотными холодными оболочками газа фрагментов тех облаков, вместе с которыми пыль выбрасывается из галактик.

Ситуация не проясняется полностью и тогда, когда мы переходим к ИК-наблюдениям в эмиссии, хотя появляются некоторые указания на возможную разгадку: данные телескопа "Спитцер" на длинах волн  $\lambda = 24$  и  $160$  мкм в направлении скопления Кома не показывают, вопреки ожиданиям, эмиссии, превышающей шум [168]. Однако более поздние наблюдения обсерватории "Гершель" на длинах волн  $\lambda = 100, 160, 250, 350, 500$  мкм обнаружили следы пыли в окрестности нескольких карликовых галактик с протяжёнными гало в дальней ИК-области, уверенно демонстрируя уплощение градиента в области длинных волн. Протяжённое излуче-



**Рис. 22.** (В цвете онлайн.) (а) Инфракрасное и субмиллиметровое излучение от галактик М99/М100 [146]: явно видно увеличение размера дисков при уменьшении температуры пыли. (б) Протяжённые пылевые короны в группах галактик [167].  $h$  — здесь постоянная Хаббла в единицах  $70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ .

ние в дальней ИК-области с более "холодным" спектром на периферии эллиптической галактики М87, интерпретированное первоначально как излучение холодной пыли, впоследствии было отождествлено с синхротронным излучением [169]. Пример галактики М87 показывает, что дальний инфракрасный и миллиметровый спектр протяжённых дисков спиральных и эллиптических галактик может представлять собой суперпозицию теплового излучения холодной пыли и нетеплового излучения релятивистских электронов, диффундирующих в периферийные области таких дисков. С этой точки зрения наблюдения в субмиллиметровой и миллиметровой областях могли бы иметь критически важное значение, поскольку именно в этой части спектра может проявиться различие во вкладах джинсовского участка теплового спектра пыли и степенного спектра релятивистских электронов с отрицательным наклоном. В связи с этим уместно отметить последние результаты наблюдений холодной пыли в коронах и протяжённых дисках близких изолированных галактик М31 [147, 148], М99/М100 (рис. 22а) [146], в карликовых галактиках в скоплении Дева [169, 170]. Такого же типа пылевые короны вокруг групп галактик видны в оптике [167].

В последнее время появились многочисленные свидетельства существования на небольших красных смещениях (0,1–0,4) протяжённых (размером до 300 кпк) корон окологалактического газа, обогащённого тяжёлыми элементами до почти солнечных значений металличности [171, 172]. В той же пропорции, что и для металличности, следует ожидать в таких коронах и присутствия пыли. Учитывая, что температура газа в коронах не слишком высока, по-видимому около  $10^6$  К [173], заметная часть пыли может сохраняться. Поэтому наблюдения пыли в таких протяжённых коронах могли бы дать весьма ценные сведения об эволюции пыли в процессе её переноса в межгалактическую среду.

### 6.3. Внегалактические области звездообразования

Наблюдения областей звездообразования в карликовых галактиках, подобных галактикам Холмберг II и DDO 053, требуют более высокого углового разрешения, чем достигнутое на телескопе "Гершель", — по меньшей мере на уровне 10–12 угл. с на длинах волн более 200 мкм. При этом для наблюдения областей звездообразования с низкой металличностью уровень чувствительности должен быть лучше, чем 1 мкЯн на бин. Поскольку такие наблюдения с Миллиметроном будут беспрецедентными, можно ожидать прорыва в наших знаниях.

Высокое угловое разрешение в ближнем ИК-диапазоне было достигнуто на телескопе "Спитцер". Однако для полного описания пыли необходимо сходное угловое разрешение и в дальнем ИК-диапазоне. Одной из перспективных задач может стать изучение свойств полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), в частности исследование зависимости их содержания от параметров МЗС в галактике. Это позволит как прояснить надёжность использования излучения ПАУ в качестве индикатора скорости звездообразования, так и ответить на вопрос об эффективности выживания и эволюции органических соединений в МЗС.

На уровне целых галактик и отдельных областей звездообразования относительное содержание ПАУ коррелирует с металличностью (рис. 23а), однако природа этой корреляции до сих пор не установлена. В качестве

возможных объяснений привлекается зависимость от металличности как процессов образования ПАУ в звёздах или молекулярных облаках, так и процессов их разрушения в МЗС и областях звездообразования. Исследование проблемы существенно усложняется из-за отсутствия данных наблюдений с высоким угловым разрешением (не хуже 10 угл. с) на длинах волн более 200 мкм. Без этих данных невозможен количественный анализ содержания ПАУ, т.е. их вклада в полную массу пыли.

Для внегалактических областей звездообразования наиболее важны линии [CII] (158 мкм), HD (112 мкм),  $\text{HeH}^+$  (149 мкм, 74 мкм),  $\text{H}_3^+$  (95 мкм),  $\text{H}_2\text{D}^+$  (219 мкм, 207 мкм). В качестве примера на рис. 23б приведено изображение галактики М82 со вспышкой звездообразования в линии ионизованного углерода на длине волны 158 мкм, полученное телескопом "Гершель". Видно, что низкое угловое разрешение позволяет исследовать лишь общее распределение излучения по галактике, но не в отдельных областях звездообразования.

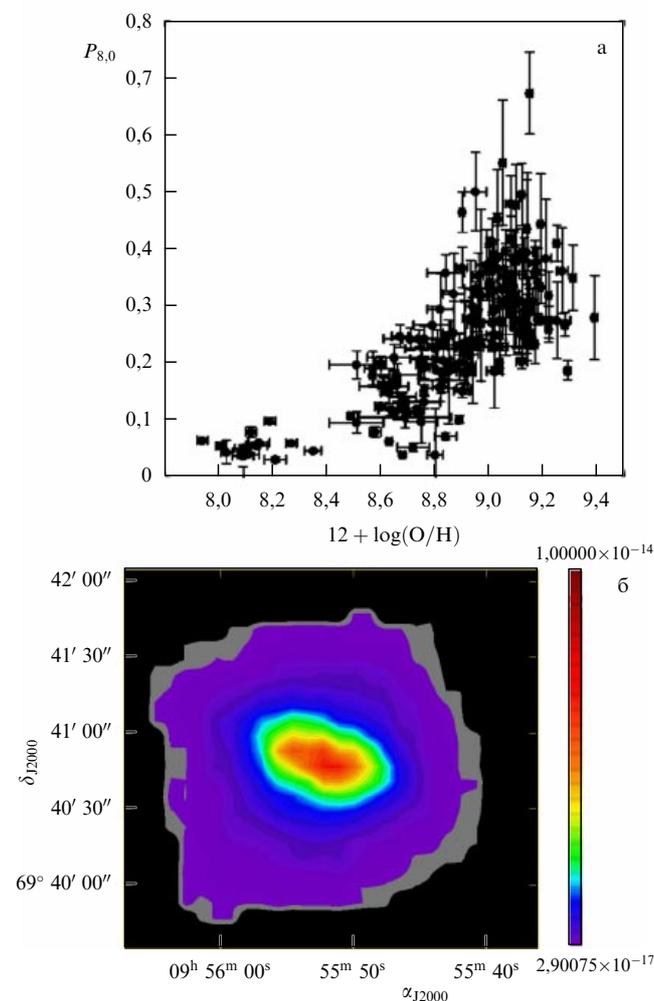


Рис. 23. (В цвете онлайн.) (а) Корреляция интенсивности излучения ПАУ с металличностью по наблюдениям внегалактических областей звездообразования. В качестве меры излучения ПАУ использован параметр  $P_{8,0}$ , представляющий собой отношение потока на длине волны 8 мкм к суммарному потоку на длинах волн выше 70 мкм. Для определения  $P_{8,0}$  необходима возможность проведения наблюдений в дальнем ИК-диапазоне с тем же угловым разрешением, что и в ближнем ИК-диапазоне [174]. (б) Изображение галактики М82 в линии ионизованного углерода на длине волны 158 мкм в небесных координатах  $\alpha$ ,  $\delta$  (эпоха J2000) [175].

Наблюдения на телескопе "Гершель" и других суб-миллиметровых обсерваториях показали, что пыль существует даже там, где её наличия ранее не предполагалось: в эллиптических галактиках, где пыль должна была бы разрушиться, на периферии дисковых галактик вдали от областей звездообразования. Эти открытия ставят новые вопросы о механизме возникновения и распространения пыли. Для ответов на эти вопросы необходимы новые высокочувствительные наблюдения как слабой пыли на периферии галактик, так и протозвёздных и протопланетных объектов. Основным методом исследования будет построение спектральных распределений энергии, причём ключевым требованием является высокая точность калибровки, обеспечивающая малость систематических ошибок.

#### 6.4. Динамика межзвёздной среды и химическая эволюция Вселенной

Исследования процессов химической эволюции Вселенной имеют большой познавательный и мировоззренческий интерес, так как Земля и каждое живое существо на ней состоят из атомов тяжёлых элементов, образовавшихся в недрах звёзд. Принципиально важным является вопрос не только о степени однородности химического состава обогащённого вещества [176, 177], но и об однородном распределении элементного состава. В частности, как с точки зрения определения фактора конверсии интенсивности линий CO в лучевую концентрацию  $H_2$ , так и с точки зрения возникновения жизни во Вселенной ключевой является информация о точном значении отношения обилий углерода и кислорода, пространственные вариации которого в процессе обогащения могут достигать порядка величины, в зависимости от начальной функции масс звёзд-предсверхновых [178]. Основной ряд наблюдений в рамках исследования химической эволюции Вселенной — это измерения элементного состава (относительных распространённостей тяжёлых элементов), концентрации (массовой доли) пыли и вариаций химического состава в связи с динамическими явлениями, такими, например, как звездообразование, галактический ветер.

Наблюдения на телескопе "Гершель" показали высокие возможности наблюдений в дальнем ИК-диапазоне для исследования процессов миграции тяжёлых элементов во Вселенной. Это относится к наблюдениям крупномасштабных галактических истечений вещества, таких как галактический ветер в M82 [175] и ярких инфракрасных галактиках [179], к миграции пыли в галактических дисках и на их периферии (см. обсуждение в разделе 6.2). Таким образом, исследования на телескопе "Гершель" не только позволили по-новому взглянуть на природу движущих механизмов таких истечений, но и поставили ряд новых вопросов о их роли в динамической и химической эволюции галактик и Вселенной в целом (см. обсуждение в [175, 180]).

Благодаря более высокому угловому разрешению Миллиметра становится возможным проводить измерения различий химического и элементного состава межзвёздного газа на масштабах начиная с приближающихся к масштабам истечений тяжёлых элементов из звёзд и сверхновых. Известны измерения в оптике вариаций относительных распространённостей в Крабовидной Туманности, где различные элементы показывают в целом качественно схожие, но количественно

сильно различающиеся пространственные распределения [181]. Угловое разрешение масштабов пространственных вариаций сравнительно низкое (около 10–15 с дуги), поэтому наблюдения Крабовидной Туманности в ИК-линиях [CII] на длине волны 158 мкм и [OI] на длине волны 145 мкм с угловым разрешением в 3–4 с дуги имеют принципиальное значение для оценки степени неоднородности элементного состава на масштабах впрыскивания тяжёлых элементов в МЗС. Аналогичные наблюдения с близким угловым разрешением возможны и интересны для других остатков сверхновых, например для туманности Кассиопея А, а также для ближайших к нам звёзд Вольфа–Райе. Существенными для исследования возможного пространственного разделения углерода и кислорода являются наблюдения линий 158 мкм и 145 мкм с высоким спектральным разрешением.

С помощью Миллиметра можно провести детальные исследования процессов обогащения межгалактической среды тяжёлыми элементами путём наблюдений в линиях молекулы CO с высокими значениями главного квантового числа, а также в линиях [CII] 158 мкм, [OI] 145 мкм и других линиях ионов и атомов. Наблюдения этих линий в направлениях предполагаемых *галактических фонтанов* нашей Галактики — локальных вертикальных течений, возбуждаемых коллективными вспышками сверхновых в достаточном массивных OB-ассоциациях [182], имеют также большое значение для исследования динамической и химической эволюции Галактики, поскольку могут дать принципиально новую информацию о том, как осуществляется вынос тяжёлых элементов из диска Галактики в околосгалактическую среду и их эффективное перераспределение в радиальном направлении [183]. В последние годы интерес к пространственному распределению тяжёлых элементов в Галактике заметно возрос, поскольку оно несёт информацию о динамической истории Галактики [184]. Среди важных недавних результатов можно назвать заметный (изменение в три раза на масштабах от 6 до 12 кпк галактоцентрического радиуса) отрицательный градиент отношения C/O [185], который может отражать особенности химико-динамической эволюции Галактики [186].

Значительная часть (половина по порядку величины) тяжёлых элементов заключена в твёрдой фазе — в пылевых частицах. Поэтому наблюдения пыли принципиально важны не только с точки зрения физики образования пыли, её оптических свойств, но и для выяснения химической эволюции Вселенной. Обнаружение пыли в спектрах квазаров на красных смещениях  $z > 6$  [187] показали, что пыль может формироваться в оболочках сверхновых II типа. Детали этого процесса и количество пыли, которое может быть произведено отдельной массивной сверхновой, до конца не понятны. Недавние наблюдения Крабовидной Туманности, а также ряда других исторических сверхновых Ia на обсерватории "Гершель" показали присутствие в них значительного количества пыли, произведённой и выброшенной при вспышках сверхновых [188, 189]. Однако уверенные наблюдательные подтверждения возможности производства пыли массивными сверхновыми пока отсутствуют (см. обсуждение в [190, 191]). Возможность обнаружения эмиссии частиц пыли и их зародышей в суб- и миллиметровой области от массивных сверхновых в локальной Вселенной, в частности в Галактике, имела бы фундаментальное значение.

### 6.5. Гравитационное линзирование на больших красных смещениях

Наблюдения на больших красных смещениях линзированных галактик с активным звездообразованием и значительным количеством пыли (Dusty Star-Forming Galaxies, DSFGs) будут проводиться с целью изучения их эволюции (определения красного смещения и светимости) по однородной выборке источников в моде одиночного зеркала (фотометрические и спектроскопические наблюдения в миллиметровом диапазоне длин волн).

Наблюдения последнего десятилетия существенно изменили наши представления об эволюции галактик, продемонстрировав, что ярких галактик с активным звездообразованием и большим количеством пыли в ранней Вселенной было примерно в 1000 раз больше, чем имеется в современной Вселенной (см., например, [192]). Исследования 47 источников из каталога галактик с большим красным смещением, полученного на Телескопе на Южном полюсе (South Pole Telescope, SPT) на длинах волн 1,4 и 2,0 мм [193], с помощью спектроскопических измерений, проведённых на телескопе ALMA в диапазоне частот 84,2–114,9 ГГц, показали, что исследованные наиболее яркие галактики класса DSFGs представляют собой гравитационно-линзовые системы [194]. Линзирование этих далёких галактик происходит на галактиках фона в режиме сильного гравитационного линзирования, приводящего к появлению множественных изображений линзируемой галактики. Последнее полностью подтверждает предположения о линзированной природе большинства DSFGs [195, 196].

Поскольку изучение свойств и эволюции галактик класса DSFGs основывается на наблюдении ярких линзированных источников, для определения собственной светимости источников должен быть известен коэффициент усиления светимости источника. Чтобы определить коэффициент усиления, требуется восстановить полную геометрию гравитационно-линзовой системы. Для этого необходимо измерить следующие параметры: красные смещения источника и линзы, относительные положения линзы и изображений источника, отношение потоков наблюдаемых изображений, а также свойства галактики-линзы. Последние требуются для выбора адекватной модели распределения плотности вещества галактики-линзы.

К моменту запуска обсерватории Миллиметрон будут завершены обзоры больших участков неба такими миллиметровыми и субмиллиметровыми телескопами, как SPT (220 ГГц, 150 ГГц) и "Гершель". Из полученных обзоров неба будут сформированы выборки источников для поиска линзированных галактик типа DSFGs. Отобранные источники должны удовлетворять следующим основным требованиям: 1) источники должны иметь тепловой спектр, так как излучение в диапазоне от инфракрасных до миллиметровых длин волн в окружённых пылью галактиках с активным звездообразованием возникает вследствие того, что коротковолновые фотоны, излучаемые звёздами, поглощаются пылинками и переизлучаются в более длинноволновом диапазоне; 2) из фотометрических данных следует отбирать источники с отрицательными К-поправками, которые являются поправками первого порядка для компенсации изменений длины волны, полосы частот и интенсивности, вызываемых красным смещением; 3) необходимо исключить

близкие ИК-источники с  $z \leq 0,03$  (по данным IRAS) и радиоквазары с плоским спектром, которые также излучают в миллиметровом диапазоне.

Наиболее общим индикатором наличия молекулярного газа на больших красных смещениях является излучение линий монооксида углерода (CO). Основными наблюдаемыми переходами CO являются переходы  $J = 1-0, 2-1, 3-2, 4-3, 5-4, 6-5$ . Например, частота излучения в системе покоя перехода CO  $J = 1-0$  составляет 115,27 ГГц, перехода CO  $J = 5-4$  — 576,3 ГГц, а перехода CO  $J = 6-5$  — 691,5 ГГц. Переход CO  $J = 6-5$  является наиболее яркой линией, указывающей на наличие плотных ядер звездообразования с компактной морфологией. Для источников на больших красных смещениях  $z$  наблюдаемая частота излучения линий CO смещается в длинноволновую область. Так, для источника с  $z \sim 5$  переход CO  $J = 6-5$  будет наблюдаться на частоте 111 ГГц. Для источников с такими красными смещениями линия излучения [CII] переместится с длины волны 158 мкм на длину волны 948 мкм.

Без сомнения, телескоп ALMA решит большую часть задач по построению функции распределения галактик класса DSFGs по красному смещению. Однако диапазон  $z = 1,74-2,00$  является для ALMA ненаблюдаемым [193]. Кроме того, телескоп ALMA способен работать только в окнах прозрачности атмосферы, что затрудняет получение широкополосных спектров. В этом отношении у обсерватории Миллиметрон есть несомненные преимущества в получении широкополосных спектров в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн.

Кроме того, возможно решение *проблемы спутников* в  $\Lambda$ CDM-модели (Lambda Cold Dark Matter model) посредством фотометрических наблюдений гравитационно-линзовых систем с аномальным отношением потоков изображений и спектральных наблюдений высокого разрешения DSFGs на больших красных смещениях в широкой полосе частот.

$\Lambda$ CDM-модель предсказывает, что крупные сгустки тёмной материи (гало), в которых расположены большие галактики, подобные Млечному Пути, должны быть окружены несколькими сотнями мелких сгустков тёмной материи (субгало), в которых, казалось бы, должны находиться карликовые галактики-спутники. Однако вокруг Млечного Пути известных спутников на самом деле не несколько сотен, а всего два-три десятка. Более того, распределены они не сферически-симметрично, а в виде протяжённого блина, наклонённого к плоскости Млечного Пути.

Одним из возможных путей решения сформулированной выше проблемы спутников может стать проведение наблюдений гравитационно-линзовых систем с аномальным соотношением потоков изображений [197], таких как MG0414+0534, MG2016+112, H1413+117 [198]. Важно отметить, что источник H1413+117 показывает значительный поток ( $\approx 0,1$  Ян) на частоте 1 ТГц (рис. 24). Кроме того, с помощью техники пиксельного линзового моделирования изображения гравитационной линзы JVAS (Jodrell/VLA Astrometric Survey) B1938+666 в ближнем ИК-диапазоне был обнаружен спутник с массой  $10^8 M_\odot$  [200]. У этой системы источником является яркая галактика, расположенная на  $z = 2,059$ , линзой — массивная эллиптическая галактика, расположенная на  $z = 0,881$ , и наблюдается почти полное кольцо Эйн-

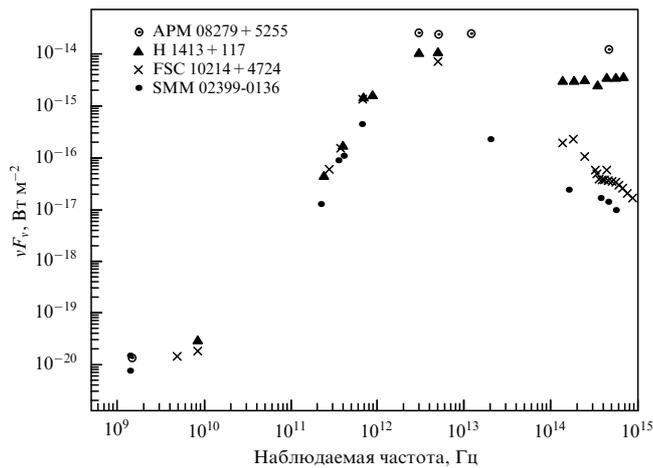


Рис. 24. Спектр гравитационных линз в широкой полосе частот [199].

штейна–Хвольсона с диаметром  $\approx 0,9'$ . Наличие мало-массивной субструктуры, т.е. светящегося или тёмного спутника в галактике-линзе, будет вызывать локализованное возмущение наблюдаемой поверхностной яркости протяжённых дуг кольца Эйнштейна–Хвольсона. Так как эти дуги формируются множественными изображениями гравитационно-линзовой системы, "аномалии поверхностной яркости" могут быть выявлены и проанализированы с помощью техники пиксельного моделирования и использованы для гравитационного обнаружения и подсчёта массы и положения субструктуры при массах вплоть до значений, составляющих 0,1 % от массы линзы внутри радиуса Эйнштейна–Хвольсона [200].

Другим возможным способом решения "проблемы спутников" могут быть спектральные наблюдения с высоким разрешением линзированных галактик класса DSFGs на больших красных смещениях в широкой полосе частот. Большие красные смещения наблюдаемых линзированных источников позволяют получить широкий диапазон возможных красных смещений линз, что в принципе может привести к получению ограничений на эволюцию популяции субгало по красным смещениям [201]. При решении поставленной проблемы наибольший интерес представляют наблюдения излучения линии перехода  $J = 6-5$  молекулы CO, которая является наиболее яркой и указывает на наличие плотных ядер звездообразования с компактной морфологией.

В моде космического интерферометра прорывной задачей может оказаться наблюдение кандидатов в гравитационные линзы на больших красных смещениях (до  $z \sim 5$ ) по данным субмиллиметровых/миллиметровых обсерваторий с целью подтверждения множественности изображений без картографирования (преимущество Миллиметрона), с использованием только функции видности при условии наличия источников с достаточно высокой яркостной температурой.

## 7. Космология

### 7.1. Инфракрасный фон и обзоры галактик

Галактики на красных смещениях  $z > 1$  имеют максимум плотности потока на длинах волн  $\lambda > 200$  мкм и производят космический ИК-фон (рис. 1а). Прорыв в иссле-

дованиях космического ИК-фона может обеспечить то, что космическая обсерватория Миллиметрон позволит отчётливо разрешить более 90 % космического ИК-фона как отдельные галактики (рис. 1б). Ожидаемая поверхностная плотность объектов для фотометрических обзоров составляет  $\sim 10^5$  на квадратный градус.

Получение спектров большого количества галактик впервые даст возможность построить трёхмерные каталоги субмиллиметровых галактик при красных смещениях  $z > 2$  и исследовать эволюцию крупномасштабного распределения тёмной материи в эпоху, когда Вселенной было менее 3 млрд лет. Миллиметрон может дополнить упомянутые выше трёхмерные каталоги, а именно частично восполнить отсутствие информации за период между эпохой рекомбинации (возраст Вселенной 300 тыс. лет) и более поздними эпохами, вплоть до современной (возраст Вселенной 3–13 млрд лет).

Изучение трёхмерного распределения галактик, в первую очередь, даст важную информацию о свойствах самих галактик: посредством сопоставления наблюдательных данных с результатами космологических численных моделей можно исследовать связь массы тёмного гало с наблюдаемыми характеристиками галактик [202]. Эта информация важна для планирования будущих космологических тестов по барионным акустическим осцилляциям, гравитационному линзированию и т.д.

### 7.2. Космологические расстояния по угловым размерам

Существует два основных способа измерения параметров космологической модели: геометрический и структурный [203, 204]. Первый состоит в изучении закона расширения вещества Вселенной, из которого можно определить её геометрию и уравнения состояния её компонентов (материи, излучения, тёмной энергии). Для реализации этого метода необходимо независимо измерять расстояния до далёких астрономических объектов и их красные смещения.

Многолетние наблюдения водяных мегамазеров на частоте 22 ГГц позволяют измерять физические размеры аккреционных дисков по движению в них отдельных мазерных пятен. Тогда расстояния до этих объектов могут быть определены по их угловому размеру с весьма высокой точностью [205]. Для интерферометров с базой на Земле максимальное расстояние, ограничивающее проведение таких измерений, порядка 300 Мпк.

Интерферометрия со сверхдлинной (космической) базой позволяет достичь разрешения, лучшего, чем 10 мкс дуги, поэтому источник, если он является достаточно ярким, будет наблюдаться при любых красных смещениях. Такие измерения расстояния в зависимости от красного смещения позволили бы с беспрецедентно высокой точностью установить закон разбегания галактик и изучить уравнение состояния тёмной энергии.

Однако данная задача требует многолетних измерений с чрезвычайно высокой точностью, таким образом, даже на Земле и для близких объектов её выполнение затруднительно. В настоящий момент нет достаточных сведений о далёких мегамазерах, чтобы можно было однозначно ответить, возможно ли проведение таких наблюдений на Миллиметроне.

То же самое относится и к другой подобной задаче. Размер чёрной дыры может быть вычислен по результатам косвенного измерения её массы. Тогда прямое

измерение углового размера чёрной дыры позволит определить космологическое расстояние. Пока не ясно, имеют ли далёкие сверхмассивные чёрные дыры в активных ядрах галактик подходящие параметры, чтобы Миллиметронтрон смог решить эту задачу. Этот вопрос должен проясниться после проведения наблюдений телескопом ЕНТ или Радиоастроном окрестностей чёрных дыр в ближайших галактиках и центре нашей Галактики.

### 7.3. Далёкие галактики и вторичная ионизация Вселенной

Первые звёзды (звёзды поколения III) и галактики должны были образоваться из первичного вещества, не обогащённого тяжёлыми элементами. Наблюдение таких объектов важно не только для проверки правильности наших представлений о формировании первых звёздных объектов во Вселенной — источников реионизации, о первых этапах обогащения Вселенной химическими элементами, деталях формирования первых галактик, особенностях образования звёзд в среде с первичным химическим составом, но и для ответа на вопрос о происхождении сверхмассивных чёрных дыр.

Галактика, обогащённая тяжёлыми элементами, должна излучать в спектральных линиях атомарного и ионизованного углерода, оксида углерода, кислорода и других элементов, а также в континууме вследствие наличия пыли. Соответственно, первичное вещество не должно излучать в субмиллиметровом диапазоне, за исключением нескольких спектральных линий простейших молекул: HD в линии  $112(1+z)$  мкм,  $H_2$  в линии  $28(1+z)$  мкм,  $HeN^+$  в линии  $149(1+z)$  мкм, где  $z$  — красное смещение галактики [15, 206, 207]. В то же время излучение атомарного водорода должно наблюдаться в ближнем и среднем ИК-диапазоне (благодаря большому красному смещению).

Одной из основных задач JWST является поиск первых галактик. Метод поиска состоит в изучении зависимости числа галактик от красного смещения  $z$ : убывание числа галактик до нуля с возрастом  $z$  будет означать наблюдение процесса образования галактик. Однако для подтверждения того, что будут найдены именно первые галактики, необходимы наблюдения в субмиллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах. Отсутствие детектирования излучения пыли и атомов тяжёлых элементов в субмиллиметровом диапазоне будет означать обнаружение возможного первичного объекта. Окончательное подтверждение может быть получено наблюдением линий молекул HD (56 и 112 мкм) и  $H_2$  (28, 17, 12 и 9,7 мкм) — это позволит установить, что остывание газа, участвующего в образовании звёзд, происходит без участия тяжёлых элементов.

Поскольку вращательные линии молекулярного водорода, а также его изотопного аналога HD обеспечивают основной отвод энергии, выделяющейся при гравитационном сжатии первых протозвёздных объектов, потоки в них могут достигать значений, заметно превышающих порог чувствительности Миллиметронтрона:  $\sim 0,1$  мЯн в линии  $112(1+z)$  мкм HD [207] и  $\sim 1$  мЯн в линии  $28(1+z)$  мкм  $H_2$  [207, 208], в зависимости от деталей сценария образования первых протозвёзд. Детектирование этих линий принципиально важно, по крайней мере, для датировки начала звёздного этапа эволюции Вселенной. Кроме того, измерение этих спектральных линий позволит определить или уточнить красное сме-

щение удалённых первых галактик и квазаров, что поможет построить модели эволюции данных объектов. Поскольку молекула водорода, как самая простейшая, очень хорошо изучена, она является хорошим индикатором физических условий в первичной МЗС. Условия, при которых возникает та или иная степень возбуждения уровней молекулы водорода, также хорошо изучены, что позволит более детально исследовать физические условия в первичном газе.

Главным преимуществом Миллиметронтрона при исследовании физических условий в первичном газе являются высокая чувствительность и доступность диапазона, содержащего излучение линий молекулярного водорода, сдвинутых в дальнюю ИК-область спектра вследствие красного смещения. Таким образом, только с помощью Миллиметронтрона в ближайшем будущем станет возможным исследование относительно холодной ( $T < 500$  К) МЗС, в частности процесса остывания первичного газа.

**7.3.1. Спектрально-пространственные возмущения реликтового излучения.** Эпоха "тёмных веков", в которую отсутствовали звёзды и галактики, заканчивается при  $z = 10-25$ , когда появляются первые источники ионизации: первые звёзды и галактики, а также чёрные дыры. Ионизация Вселенной в эту эпоху наблюдается как непосредственно, так и по поляризации реликтового излучения [209, 210]. Однако до сих пор неясно, каков вклад разных, перечисленных выше, источников в процесс ионизации. Изучение этого вопроса в наблюдениях позволит понять механизм образования первых звёзд, а также сверхмассивных чёрных дыр, масса которых достигает величины около  $10^9 M_\odot$  на  $z = 6$ , т.е. за первый миллиард лет жизни Вселенной.

Источники вторичной ионизации приводят к появлению ионизованных областей пространства, которые могут наблюдаться посредством кинематического эффекта Зельдовича–Сюняева (тепловой эффект Зельдовича–Сюняева для этих объектов меньше). Ожидаемый уровень спектрально-пространственных флуктуаций реликтового излучения  $\Delta T/T = 10^{-7} - 10^{-6}$  (для Миллиметронтрона соответствующий таким флуктуациям поток составляет 1–10 мкЯн). Размер области ионизации  $\sim 10$  Мпк, угловой масштаб  $\sim 1$  мин [211].

Кроме того, в диапазон СМВ попадает излучение молекулы  $HeN^+$  на красных смещениях  $z = 20-30$ , что может приводить к флуктуациям  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$  на участках спектра шириной  $\Delta\nu/\nu \sim 0,01$  [212].

Спектральные наблюдения низкого и среднего разрешения в частотном диапазоне 100–500 ГГц позволят проанализировать форму и эволюцию ионизованных облаков и сформулировать ограничения на сценарии ионизации: были ли основным ионизатором звёзды III поколения или сверхмассивные чёрные дыры.

**7.3.2. Поиск излучения молекулы  $HeN^+$ .** Поиск молекулы  $HeN^+$  поможет прояснить детали межзвёздной и межгалактической среды, ответственной за формирование первых ионизирующих источников в ранней Вселенной.

$HeN^+$  является одной из наиболее распространённых в эпоху вторичной ионизации молекул [213]. Эта молекула образуется в первичном газе вблизи мощных ионизирующих источников. Длина волны в лабораторной системе отсчёта составляет 149,1 и 74,6 мкм. Весьма интересными для поиска молекул  $HeN^+$  являются наблю-

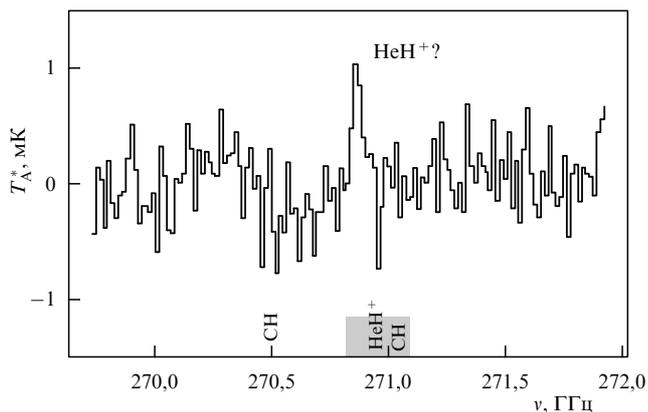


Рис. 25. Спектр далёкого квазара при  $z = 6,42$  [214]. Отношение сигнал/шум  $\approx 3,5$  не позволяет сделать вывод о достоверном обнаружении линии  $\text{HeH}^+$ .

дения квазара при  $z = 6,42$  (отношение сигнала к шуму 3,5) (рис. 25).

**7.4. Скопления галактик**

Реликтовое излучение, проходя через области, богатые достаточно горячей плазмой, испытывает спектральные искажения (рис. 26). В этом состоит эффект Зельдовича – Сюняева (ЗС) [216, 217]. Наиболее удобные объекты для наблюдений ЗС-эффекта — скопления галактик.

Наземные наблюдения ЗС-эффекта ограничены из-за наличия атмосферы частотами не выше 300 ГГц. При использовании космического телескопа возможен прорыв, связанный с разделением кинематического и теплового эффектов Зельдовича – Сюняева и других компонент искажения спектра с достаточной точностью (см. рис. 26), что позволит измерить, в частности, пекулярные скорости скоплений галактик (скорости относительно реликтового излучения). Измерения этих скоростей дадут важную информацию для проверки и уточнения космологической модели [203, 204].

Изучение скоплений галактик с помощью теплового и кинематического эффектов Зельдовича – Сюняева позволит определить амплитуду космологического спектра

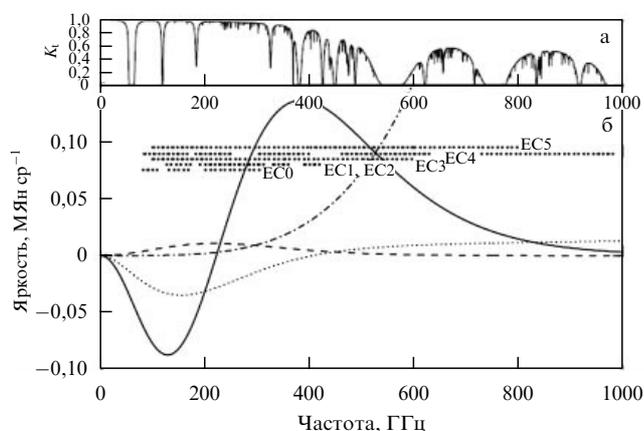


Рис. 26. (а) Коэффициент пропускания  $K_A$  атмосферы Земли при сухой атмосфере. (б) Спектр эффекта Зельдовича – Сюняева (отклонения от чернотельного спектра реликтового излучения). Сплошная кривая — тепловой эффект, штриховая кривая — кинематический, пунктирная кривая — эффект на нетепловых электронах, штрихпунктирная — излучение пыли [215].

мощности, количество тёмной энергии во Вселенной и исследовать скорость роста малых возмущений, получить ограничения на параметры космологической модели, в том числе ограничить эволюцию тёмной энергии. С помощью наблюдения поляризации ЗС-эффекта планируется также измерить квадрупольную компоненту анизотропии реликтового излучения с точки зрения наблюдателя, находящегося в скоплении, т.е. из разных областей Вселенной.

**7.5. Послесвечения гамма-всплесков и родительские галактики**

Несмотря на то что с момента открытия послесвечения гамма-всплесков в 1997 г. зарегистрировано более 500 таких событий в оптическом диапазоне и более 800 — в рентгеновском, наиболее интересная часть спектра послесвечения всё ещё остаётся малоисследованной. Действительно, максимум  $\nu_m$  в начальном энергетическом спектре послесвечения (рис. 27) приходится на частоты миллиметрового диапазона. Зарегистрированные на сегодня послесвечения в этом диапазоне [219] показаны на рис. 28а. Наблюдения ярких послесвечений в диапазонах Миллиметра позволяют ограничить, а в ряде случаев и определить положение характеристической частоты синхротронного излучения  $\nu_m$  и тем самым установить максимально точные ограничения на энергетические характеристики, параметры области излучения и релятивистский гамма-фактор направленного движения излучающих электронов.

В настоящее время около 10 % зарегистрированных гамма-всплесков имеют красные смещения  $z > 5$  [222]. Однако выборка гамма-всплесков с большим красным смещением не полна из-за селективных эффектов, связанных со сложностью наблюдения при  $z \gtrsim 5$  (максимальное красное смещение  $z = 9,4$  определено для GRB 090429B [223]), где оптическое излучение эффективно поглощается в Ly $\alpha$ -лесу (рис. 28а). Поэтому оценка в 10 % является минимальной оценкой количества далёких гамма-всплесков существующей выборки. Интригующую загадку в рассмотрении этой проблемы вносит расхождение в скорости звездообразования, полученной из данных по далёким галактикам и гамма-

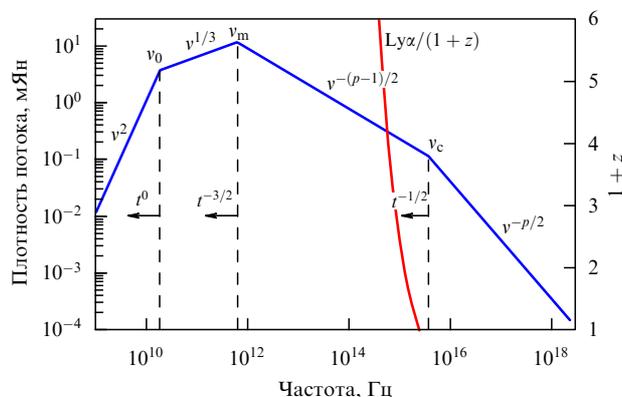
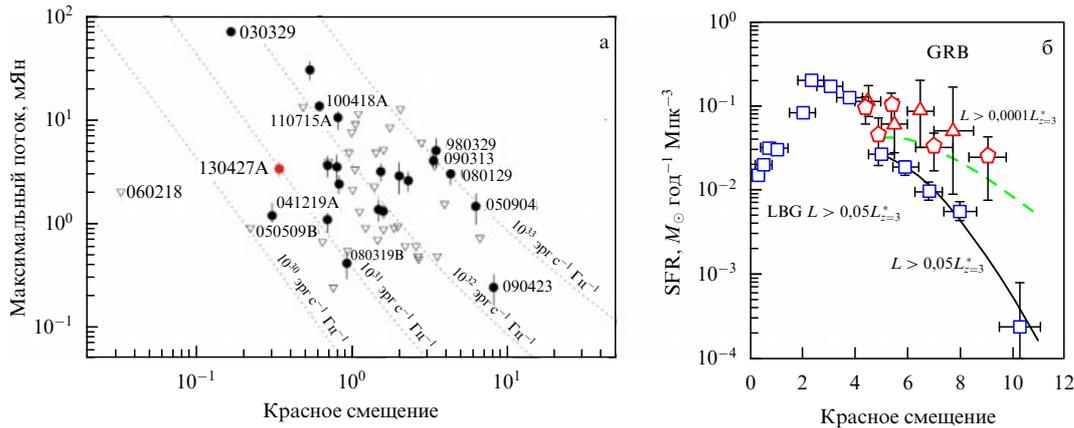


Рис. 27. (В цвете онлайн.) Теоретическое спектральное распределение энергии послесвечения гамма-всплеска [218]. Красная кривая показывает частоту Ly $\alpha$  в системе наблюдателя в зависимости от красного смещения  $z$  (правая ось ординат). Правее этой кривой оптическое излучение оказывается подавленным из-за поглощения в нейтральном водороде на луче зрения.



**Рис. 28.** (а) Наблюдения послесвечений гамма-всплесков в субмиллиметровом диапазоне [219]. Значения для GRB 130427A приведены из работы [220]. Тёмные символы соответствуют детектированию, светлые — верхнему пределу. Пунктирные кривые — значения потока для источников равной светимости, расположенных на разных красных смещениях. (б) Скорость звездообразования (Star-Formation Rate, SFR) как функция красного смещения  $z$  [221] (GRB — Gamma-Ray-Burst, LBG — Lyman-Break-Galaxy).

всплескам (рис. 28б). Наблюдения послесвечения гамма-всплесков в субмиллиметровом диапазоне позволят увеличить количество событий с большим красным смещением. С другой стороны, возможно, некоторые из уже наблюдаемых гамма-всплесков связаны со взрывом первичных звёзд (поколение III) [224, 225]. Оценка красного смещения  $z \geq 15$  хотя бы для одного гамма-всплеска, полученная с помощью наблюдений в субмиллиметровом диапазоне, может подтвердить наличие звёзд поколения III и коллапса таких звёзд, приводящего к гамма-всплескам.

Интересными являются оптически тёмные гамма-всплески, в которых отношение оптического потока послесвечения к потоку в рентгеновском диапазоне экстремально мало [226]. Однако определение красного смещения для таких всплесков затруднено из-за малого потока от источника в оптическом диапазоне (или его полного отсутствия). Наблюдение таких всплесков в субмиллиметровом диапазоне поможет выяснить их природу. Действительно, отсутствие родительской галактики на месте гамма-всплеска в оптических наблюдениях (самая далёкая родительская галактика, наблюдаемая в настоящее время, GRB 100219A, имеет  $z = 4,667$  [227]) и в то же время детектирование послесвечения в субмиллиметровом диапазоне однозначно укажут на большое красное смещение источника. Для близких тёмных гамма-всплесков, красное смещение для которых может быть установлено из спектроскопических или фотометрических наблюдений родительских галактик, обнаружение послесвечения в миллиметровом диапазоне позволит определить параметры поглощающей среды [228–231].

### 7.6. Первичные чёрные и белые дыры, кротовые норы и Мультивселенная

Самый интригующий вопрос современной космологии: как возникла Вселенная, существуют ли другие вселенные и возможно ли получить о них информацию? Сегодня эта область науки содержит лишь гипотезы, основанные на анализе уравнений общей теории относительности [203, 232–238].

Одно из наименее экзотических предположений состоит в возможности образования чёрных дыр в ранней Вселенной. Такие дыры, имеющие неастрофизическое происхождение, называют первичными. Для реализации

возможности их образования требуются сильные неоднородности в распределении плотности на ранних стадиях жизни Вселенной [239].

Первичные чёрные дыры могут иметь очень широкий спектр масс, и в зависимости от массы для их поиска применяются различные методы [240]. Миллиметрон сможет внести вклад, по крайней мере, в изучение объектов массой более  $10^4 M_{\odot}$  как в настоящую эпоху (см. раздел 4.5), так и в далёком прошлом, в эпоху вторичной ионизации Вселенной (см. раздел 7.3).

Наличие особенностей при прохождении Вселенной сингулярности в самом начале Большого взрыва может привести к образованию интересных гипотетических объектов: кротовых нор — релятивистских объектов, напоминающих чёрные дыры, но связывающих между собой разные области пространства-времени или даже разные вселенные (Мультивселенная). Возможные наблюдаемые различия чёрных дыр и кротовых нор состоят в наличии у последних радиального монополярного магнитного поля и излучения, позволяющего получить информацию (изображение, физические параметры и др.) из другой области нашей или иной вселенной [241–246]. Наблюдательная проверка этой гипотезы будет проводиться одновременно со всеми видами исследования чёрных дыр (см. раздел 5).

Общая теория относительности допускает также решения в виде белых дыр [247, 248]. Подобные объекты могут быть найдены по взрывам, которые должны наблюдаться как аномальные гамма-всплески, не имеющие хозяйских галактик [249]. Поиск родительских галактик гамма-всплесков на Миллиметроне (см. раздел 7.5) позволит пролить свет на эту гипотезу.

## 8. Заключение

Подводя итог, можно выделить три группы уникальных научных задач, в которых обсерватория Миллиметрон сыграет решающую роль и даст значимый вклад в объяснение астрофизических, астрохимических и космологических процессов.

1. Исследование ближайших окрестностей чёрных дыр и проверка общей теории относительности. Изучение аккреционных потоков и струйных выбросов (джетов) вблизи горизонта событий чёрных дыр.

2. Анализ свойств межзвёздной среды и звездообразования. Изучение протозвёзд, протопланет и протопланетных дисков, а также планетных систем, в частности Солнечной системы. Исследование условий звездообразования и процесса обогащения межзвёздной среды пылью и тяжёлыми элементами.

3. Образование и эволюция галактик, исследование космологических объектов и развитие космологической стандартной модели.

**Благодарности.** Авторы глубоко благодарны всем, чьи комментарии были использованы при подготовке статьи: В.В. Акимкину, А.В. Алакозу, А.А. Андрианову, Н.А. Архиповой, В.С. Бескину, М.В. Баркову, О.В. Верходанову, А.А. Вольновой, Ю.Н. Гнедину, Т. де Граау, В.К. Дубровичу, А.А. Ермашу, Д.Э. Ионову, Н.Р. Ихсанову, П.В. Кайгородову, С.В. Каленскому, А.В. Каспаровой, М.С. Кирсановой, Ю.Ю. Ковалеву, С.Г. Моисеенко, Я.Н. Павлюченкову, К.А. Постнову, М.В. Попову, О.К. Сильченко, В.Н. Руденко, А.В. Степанову, С.А. Тюльбашеву, М.С. Храпцовой, Н.Н. Шахворостовой, А.А. Шацкому, Б.М. Шустову, С.В. Чернову, а также сотрудникам Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Государственного института имени П.К. Штернберга (ГАИШ), Института астрономии РАН, Главной астрономической обсерватории РАН и Пушинской радиоастрономической обсерватории Астрономического центра (АКЦ) ФИАН, помогавшим в подготовке научной программы. Сотрудники АКЦ ФИАН (Н.С. Кардашёв, И.Д. Новиков, В.Н. Лукаш, С.В. Пилипенко, Е.В. Михеева, А.Г. Дорошкевич, П.Б. Иванов, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, С.Ф. Лихачёв, А.В. Смирнов) благодарны Л.Н. Лихачёвой за поддержку. А.Г. Дорошкевич, П.Б. Иванов, Т.И. Ларченкова, В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева, И.Д. Новиков, С.В. Пилипенко благодарят за поддержку грантом Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-4235.2014.2, программой ОФН РАН ОФН-17 "Активные процессы в галактических и внегалактических объектах" и программой Президиума РАН П-21 "Нестационарные явления в объектах Вселенной". Д.В. Бисикало и Д.З. Вие благодарят за поддержку грантом Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-3620.2014.2. Ю.А. Щекинов благодарит за поддержку РФФИ (проект 12-02-00917-а). И.Ф. Малов и В.М. Малофеев благодарят за поддержку РФФИ (проект 12-02-00661) и Президиум РАН (программа "Происхождение, структура и эволюция объектов Вселенной"). А.С. Позаненко благодарит за поддержку РФФИ (12-02-01336, 13-01-92204, 14-02-10015). Работа Н.Д. Новикова поддержана грантом РФФИ 12-02-00276а. Работа И.И. Зинченко частично поддержана грантом в рамках соглашения от 27 августа 2013 г. 02.В.49.21.0003 между Министерством образования и науки РФ и Нижегородским государственным университетом им. Н.И. Лобачевского, а также грантом РФФИ 13-02-12220-офи.м. Работа А.М. Соболева выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект 3.1781.2014/К). А.М. Черепашук благодарит за поддержку грантом Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-1675.2014.2 и грантом РФФИ 14-02-00825.

## Список литературы

- Dole H et al. *Astron. Astrophys.* **451** 417 (2006)
- Smirnov A V et al. *Proc. SPIE* **8442** 84424C (2012)
- Krabbe A, Röser H P, in *Astronomical Instruments and Methods at the Turn of the 21st Century* (Reviews in Modern Astronomy, Vol. 12, Ed. R E Schielicke) (Hamburg: Astronomische Gesellschaft, 1999) p. 107; Krabbe A, Titz R, Röser H-P *Sterne Weltraum* **38** 1052 (1999)
- Crill B P et al. *Astrophys. J. Suppl.* **148** 527 (2003)
- Hoogeveen R W M et al. *Proc. SPIE* **5152** 347 (2004)
- Pilbratt G L *Proc. SPIE* **4850** 586 (2003)
- Кардашев Н С и др. *Труды ФИАН* **228** 112 (2000)
- Wild W et al. *Exp. Astron.* **23** 221 (2009)
- Kiuchi H "ALMA Memo. Coherence estimation on the measured phase noise in Allan standard deviation" (2005), <http://legacy.nrao.edu/alma/memos/html-memos/alma530/memo530.pdf>
- Nakagawa T *Proc. SPIE* **7731** 77310O (2010)
- Doeleman S S et al. *Nature* **455** 78 (2008)
- McKee C F, Ostriker E C *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **45** 565 (2007)
- Goicoechea J R, Cernicharo J *Astrophys. J.* **554** L213 (2001)
- Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **536** A19 (2011)
- Roberge W, Dalgarno A *Astrophys. J.* **255** 489 (1982)
- Cecchi-Pestellini C, Dalgarno A *Astrophys. J.* **413** 611 (1993)
- Вошинников Н В, частное сообщение (2014)
- Efremov Yu N *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **405** 1531 (2010)
- Fukui Y, Kawamura A *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **48** 547 (2010)
- Fukui Y et al. *Astrophys. J.* **780** 36 (2014)
- Inutsuka S-I, Koyama H *Astrophys. Space Sci.* **281** 67 (2002)
- Khoperskov S A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **428** 2311 (2013)
- Pineda J L et al. *Astron. Astrophys.* **554** 103 (2013)
- Kirsanova M S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **388** 729 (2008)
- Kirsanova M S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **437** 1593 (2014)
- Crockett N R et al. *Astron. Astrophys.* **521** L21 (2010)
- <http://www.sron.rug.nl/millimetre/OxygenPuzzle>
- Walmsley M, van der Tak F, in *Proc. of the Dusty and Molecular Universe: a Prelude to Herschel and ALMA, 27–29 October 2004, Paris, France* (ESA SP-577, Ed. A Wilson) (Noordwijk: ESA Publ. Division, 2005) p. 55
- Wyrowski F et al. *Astron. Astrophys.* **542** L15 (2012)
- Кирсанова М С, Вие Д З, Соболев А М *Астрон. журн.* **86** 661 (2009); Kirsanova M S, Wiebe D S, Sobolev A M *Astron. Rep.* **53** 611 (2009)
- Bergin E A et al. *Nature* **493** 644 (2013)
- Bergin E A et al. *Astron. Astrophys.* **521** L33 (2010)
- Hogerheijde M R et al. *Science* **334** 338 (2011)
- Lahuis F et al. *Astrophys. J.* **636** L145 (2006)
- Akimkin V et al. *Astrophys. J.* **766** 8 (2013)
- Akimkin V et al. *Astrophys. Space Sci.* **335** 33 (2011)
- Young Ch H et al. *Astrophys. J. Suppl.* **154** 396 (2004)
- Павлюченков Я Н, Вие Д З, Фатеева А М, Васюнина Т С *Астрон. журн.* **88** 3 (2011); Pavlyuchenkov Ya N, Wiebe D S, Fateeva A M, Vasyunina T S *Astron. Rep.* **55** 1 (2011)
- Robitaille Th O et al. *Astrophys. J. Suppl.* **167** 256 (2006)
- Robitaille Th P et al. *Astrophys. J. Suppl.* **169** 328 (2007)
- Zinchenko I I, in preparation (2014)
- Henning Th et al. *Astron. Astrophys.* **518** L95 (2010)
- Müller T G et al. *Astron. Astrophys.* **566** A22 (2014); arXiv: 1404.5847
- Gray M *Maser Sources in Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2012)
- Sobolev A M et al. *Proc. Int. Astron. Union* **242** 81 (2007)
- Moran J M et al. *Proc. Int. Astron. Union* **242** 391 (2007)
- Parfenov S Yu, Sobolev A M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **444** 620 (2014)
- Жилкин А Г, Бисикало Д В, Боярчук А А *УФН* **182** 121 (2012); Zhilkin A G, Bisikalo D V, Boyarchuk A A *Phys. Usp.* **55** 115 (2012)
- Матвеев Л И и др. *Письма в Астрон. журн.* **30** 121 (2004); Matveyenko L I et al. *Astron. Lett.* **30** 100 (2004)
- Sobolev A M et al. *Science* (2014), in print
- Фридман А М, Бисикало Д В *УФН* **178** 577 (2008); Fridman A M, Bisikalo D V *Phys. Usp.* **51** 551 (2008)
- Курбатов Е П, Бисикало Д В, Кайгородов П В *УФН* **184** 851 (2014); Kurbatov E P, Bisikalo D V, Kaygorodov P V *Phys. Usp.* **57** 787 (2014)
- Seager S *Exoplanet Atmospheres: Physical Processes* (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 2010)
- Vidal-Madjar A et al. *Nature* **422** 143 (2003)
- Linsky J et al. *Astrophys. J.* **717** 1291 (2010)
- France K et al. *Astrophys. J.* **712** 1277 (2010)
- Fossati L et al. *Astrophys. J.* **714** L222 (2010)

58. Narita N et al. *Astrophys. J.* **773** 144 (2013)
59. Mayer A et al. *Astron. Astrophys.* **549** A69 (2013)
60. Decin L *Adv. Space Res.* **50** 843 (2012)
61. Justtanont K et al. *Astron. Astrophys.* **537** 144 (2012)
62. Cernicharo J et al. *ApJ* **778** L25 (2013)
63. Ueta T et al. *Astron. Astrophys.* **565** A36 (2014)
64. Kardashev N S *Nature* **278** 28 (1979)
65. Mauersberger R et al. *Astron. Astrophys.* **306** 141 (1996)
66. Dyson F *Science* **131** 1667 (1960)
67. Slysh V I, in *The Search for Extraterrestrial Life — Recent Developments: Proc. of the 112th Symp. of the Intern. Astronomical Union, Boston, Mass., USA, June 18–21, 1984* (Ed M D Papagian-nis) (Dordrecht: D. Reidel, 1985) p. 315
68. Carrigan R *Astrophys. J.* **698** 2075 (2009)
69. Kilic M et al. *Astrophys. J.* **678** 1298 (2008)
70. Farihi J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **432** 1955 (2013)
71. Cutri R M et al. "WISE All-sky Data Release", 2012yCat.2311....0C (2012)
72. Kawka A, Vennes S *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **439** L90 (2014)
73. Malofeev V et al. *Astron. Astrophys.* **285** 201 (1994)
74. Xilouris K M et al. *Astron. Astrophys.* **288** L17 (1994)
75. Morris D et al. *Astron. Astrophys.* **322** L17 (1997)
76. Löhmer O et al. *Astron. Astrophys.* **480** 623 (2008)
77. Kramer M et al. *Astrophys. J.* **488** 364 (1997)
78. Camilo F et al. *Astrophys. J.* **669** 561 (2007)
79. Camilo F et al. *Astrophys. J.* **679** 681 (2008)
80. Малов И Ф *Астрон. журн.* **76** 542 (1997); Malov I F *Astron. Rep.* **41** 617 (1997)
81. Малов И Ф *Астрон. журн.* **91** 194 (2014); Malov I F *Astron. Rep.* **58** 139 (2014)
82. Popov M V et al. *Astrophys. J. Lett.* (2014), in print
83. Heger A et al. *Astrophys. J.* **591** 288 (2003)
84. Marscher A P et al. *Astrophys. J.* **763** L15 (2013)
85. Mackey A D et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **386** 65 (2008)
86. Strader J et al. *Nature* **490** 71 (2012)
87. Chomiuk L et al. *Astrophys. J.* **777** 69 (2013); arXiv:1306.6624
88. Fabbiano G *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **27** 87 (1989)
89. Frank J, King A, Raine D J *Accretion Power in Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002)
90. Colbert E J M, Mushotzky R F *Astrophys. J.* **519** 89 (1999)
91. Liu J-F, Bregman J N *Astrophys. J. Suppl.* **157** 59 (2005)
92. Liu Q Z, Mirabel I F *Astron. Astrophys.* **429** 1125 (2005)
93. Colbert E J M, Ptak A F *Astrophys. J. Suppl.* **143** 25 (2002)
94. Swartz D A *ASP Conf. Ser.* **423** 277 (2010)
95. Mushotzky R *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **155** 27 (2004)
96. Miller J M et al. *Astrophys. J. Lett.* **585** L37 (2003)
97. Poutanen J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **377** 1187 (2007)
98. Kording E, Falcke H, Markoff S *Astron. Astrophys.* **382** L13 (2002)
99. Feng H, Soria R *New Astron. Rev.* **55** 166 (2011)
100. Miller M, Coleman H, Douglas P *Astrophys. J.* **576** 894 (2002)
101. Farrell S A et al. *Nature* **460** 73 (2009)
102. Webb N et al. *Science* **337** 554 (2012)
103. Miller N A, Mushotzky R F, Neff S G *Astrophys. J.* **623** L109 (2005)
104. Kaaret P et al. *Science* **299** 365 (2003)
105. Harrison F, in *Intern. Conf. ZELDOVICH-100, Moscow, Russia, 16–20 June 2014*
106. Бисноватый-Коган Г С *Астрон. журн.* **47** 813 (1970); Bisnovatyi-Kogan G S *Sov. Astron.* **14** 652 (1971)
107. Moiseenko S G, Bisnovatyi-Kogan G S, Ardeljan N V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **370** 501 (2006)
108. Бисноватый-Коган Г С, Моисеенко С Г, Арделян Н В *Астрон. журн.* **85** 1109 (2008); Bisnovatyi-Kogan G S, Moiseenko S G, Ardeljan N V *Astron. Rep.* **52** 997 (2008)
109. Бисноватый-Коган Г С, Моисеенко С Г *Астрон. журн.* **69** 563 (1992); Bisnovatyi-Kogan G S, Moiseenko S G, Ardeljan N V *Astron. Rep.* **36** 285 (1992)
110. Barkov M V, Komissarov S S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415** 944 (2011)
111. Chevalier R A *Astrophys. J. Lett.* **752** 2 (2012)
112. Taam R E, Sandquist E L *Astron. Astrophys.* **38** 113 (2000)
113. Field G B, Rogers R D *Astrophys. J.* **403** 94 (1993)
114. Kardashev N S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **276** 515 (1995)
115. Lobanov A P *Astron. Astrophys.* **330** 79 (1998)
116. Tyul'bashev S A *Astron. Astrophys.* **387** 818 (2002)
117. Eatough et al. *Nature* **501** 391 (2013)
118. Marrone et al. *Astrophys. J. Lett.* **654** 57 (2007)
119. Trippie et al. *Astron. Astrophys.* **540** A74 (2012)
120. Иванов П Б, частное сообщение (2013)
121. Dexter J et al. *Astrophys. J.* **717** 1092 (2010)
122. Lu Y et al. *Astrophys. J.* (2014), in print
123. Muller T, Fraundienner J *Eur. J. Phys.* **33** 955 (2012)
124. Komossa S, Bade N *Astron. Astrophys.* **343** 775 (1999)
125. Bloom J S et al. *GCN Circ.* (11847) 1 (2011)
126. Бескин В С *УФН* **180** 1241 (2010); Beskin V S *Phys. Usp.* **53** 1199 (2010)
127. Barkov M V, Komissarov S S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401** 1644 (2010)
128. Barkov M V, Baushev A N *New Astron.* **16** 45 (2011)
129. McKinney J C, Uzdensky D A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **419** 573 (2012)
130. McKinney J C, Tchekhovskoy A, Blandford R D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **423** 3083 (2012)
131. De Bruyn A G *NFRA Note* **655** 1 (1996)
132. Brentjens M A, de Bruyn A G, in *Proc. of the Riddle of Cooling Flows in Galaxies and Clusters of Galaxies, Charlottesville, VA, USA, May 31–June 4, 2003* (Eds T H Reiprich, J C Kempner, N Soker) (Charlottesville, VA: Univ. of Virginia, 2004)
133. Vogt C, Dolag K, Enslin T A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **358** 726 (2005)
134. Brentjens M A, de Bruyn A G *Astron. Astrophys.* **441** 1217 (2005)
135. Aharonian F et al. *Astrophys. J.* **664** L71 (2007)
136. Begelman M C, Fabian A C, Rees M J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **384** L19 (2008)
137. Giannios D, Uzdensky D A, Begelman M C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **395** L29 (2009)
138. Barkov M V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **749** 119 (2012)
139. Mesler R A, Pihlström Y M *Astrophys. J.* **774** 77 (2013)
140. Berger E et al. *Nature* **426** 154 (2003)
141. Frail D A et al. *Astrophys. J.* **619** 994 (2005)
142. Barkov M V, Pozanenko A S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **417** 2161 (2011)
143. Michalowski M, Hjorth J, Watson D *Astron. Astrophys.* **514** A67 (2010)
144. Pope A, Chary R R *Astrophys. J.* **715** L171 (2010)
145. Dayal P, Hirashita H, Ferrara A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **403** 620 (2010)
146. Pohlen M et al. *Astron. Astrophys.* **518** L72 (2010)
147. Fritz M et al. *Astron. Astrophys.* **516** 34 (2012)
148. Smith M W L et al. *Astrophys. J.* **756** 40 (2012)
149. Holwerda B W et al. *Astron. Astrophys.* **444** 101 (2005)
150. Holwerda B W et al. *Astron. Nachr.* **334** 268 (2013)
151. Magrini L et al. *Astron. Astrophys.* **535** 13 (2011)
152. Grenier I A, Casandjian J M, Terrier R *Science* **307** 1292 (2005)
153. Абрамова О В, А В Засов *Письма в Астрон. журн.* **38** 843 (2012); Abramova O V, Zasov A V *Astron. Lett.* **38** 755 (2012)
154. Karachentsev I et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415** L31 (2011)
155. Das M, Boone F, Viallefond F *Astron. Astrophys.* **523** 63 (2010)
156. Hinz J L et al. *Astrophys. J.* **663** 895 (2007)
157. Kasparova A V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **437** 3072 (2014)
158. Xilouris E et al. *Astrophys. J.* **651** L107 (2006)
159. Temi P, Brighenti F, Mathews W G *Astrophys. J.* **660** 1215 (2007)
160. Aguirre A, Haiman Z *Astrophys. J.* **532** 28 (2000)
161. Johansson J, Morstell E *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **426** 3360 (2012)
162. Nath B, Shchekinov Yu *Rep. Prog. Phys.* (2014), submitted
163. Поликарпова О Л, Щекинов Ю А *Астрон. журн.* (2014), в печати
164. Chelouche D, Koester B P, Bowen D V *Astrophys. J.* **671** L97 (2007)
165. Muller S et al. *Astrophys. J.* **680** 975 (2008)
166. Menard B, Kilbinger M, Scranton R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **406** 1815 (2010)
167. McGee S L, Balogh M L *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **405** 2069 (2010)
168. Kitayama T et al. *Astrophys. J.* **695** 1191 (2009)
169. Grossi M et al. *Astron. Astrophys.* **518** L52 (2010)
170. Baes M et al. *Astron. Astrophys.* **518** L53 (2010)
171. Simcoe R A et al. *Astrophys. J.* **637** 648 (2006)
172. Tumlinson J et al. *Science* **334** 948 (2011)
173. Vasiliev E O, Nath B V, Shchekinov Yu *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (2014), submitted; arXiv:1401.5070
174. Khramtsova M S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **431** 2006 (2013)
175. Contursi A et al. *Astron. Astrophys.* **549** 118 (2013)
176. Дедиков С Ю, Щекинов Ю А *Астрон. журн.* **81** 11 (2004); Dedikov S Yu, Shchekinov Yu A *Astron. Rep.* **48** 9 (2004)
177. Васильев Е О, Дедиков С Ю, Щекинов Ю А *Астрофиз. бюл.* **64** 333 (2009); Vasiliev E O, Dedikov S Yu, Shchekinov Yu A *Astrophys. Bull.* **64** 317 (2009)
178. Shchekinov Yu A, Vasiliev E O *Astrophys. Space Sci.* (2014), submitted
179. Diaz-Santos T et al. *Astrophys. J. Lett.* **788** L17 (2014)
180. Kreckel K et al. *Astrophys. J.* **790** 26 (2014)
181. Satterfield T J et al. *Astron. J.* **144** 27 (2012)
182. Heiles C, Reach W T, Koo B-C *Astrophys. J.* **466** 191 (1996)
183. Tenorio-Tagle G *Astron. J.* **111** 1641 (1996)
184. Lemasle B et al. *Astron. Astrophys.* **558** 31 (2013)
185. Esteban C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **433** 382 (2013)

186. Esteban C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **443** 624 (2014)
187. Maiolino R et al. *Nature* **431** 533 (2004)
188. Gomez H L et al. *Astrophys. J.* **760** 96 (2012)
189. Gomez H L et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **420** 3557 (2012)
190. Krause O et al. *Nature* **432** 596 (2004)
191. Barlow M J et al. *Astron. Astrophys.* **518** L138 (2010)
192. Lagache G, Puget J-L, Dole H *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **43** 727 (2005)
193. Vieira J D et al. *Astrophys. J.* **719** 763 (2010)
194. Vieira J D et al. *Nature* **495** 344 (2013); arXiv:1303.2723
195. Blain A W *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **283** 1340 (1996)
196. Negrello M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **377** 1557 (2007)
197. Mao S D, Kochanek C S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **268** 569 (1994)
198. McLeod K K, Bechtold J *Astrophys. J.* **704** 415 (2009)
199. Irwin M J et al. *Astrophys. J.* **505** 529 (1998)
200. Vegetti S et al. *Nature* **481** 341 (2012)
201. Hezaveh Y D et al. *Astrophys. J.* **761** 20 (2012)
202. Viero M P et al. *Astrophys. J.* **772** 77 (2013)
203. Лукаш В Н, Михеева Е В *Физическая космология* (М.: Физматлит, 2010)
204. Лукаш В Н, Михеева Е В, Малиновский А М *УФН* **181** 1017 (2011); Lukash V N, Mikheeva E V, Malinovsky A M *Phys. Usp.* **54** 983 (2011)
205. Braatz R et al. *Astrophys. J.* **767** 154 (2013)
206. Galli D, Palla F *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **51** 163 (2013)
207. Щекинов Ю А *Письма в Астрон. журн.* **12** 499 (1986); Shchekinov Yu A *Sov. Astron. Lett.* **12** 211 (1986)
208. Kamaya H, Silk J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **332** 251 (2009)
209. Becker R H et al. *Astron. J.* **122** 2850 (2001)
210. Dunkley J et al. *Astrophys. J. Suppl.* **180** 306 (2009)
211. Дорошкевич А Г, Пилипенко С В *Астрон. журн.* **88** 617 (2011); Doroshkevich A G, Pilipenko S V *Astron. Rep.* **55** 567 (2011)
212. Dubrovich V K, Bajkova A, Khaikin V B *New Astron.* **13** 28 (2008)
213. Dubrovich V K, Lipovka A A *Astron. Astrophys.* **296** 307 (1995)
214. Zinchenko I, Dubrovich V, Henkel C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415** L78 (2011)
215. de Bernardis P et al. *Astron. Astrophys.* **538** 86 (2012)
216. Zeldovich Ya B, Sunyaev R A *Astrophys. Space Sci.* **288** 4 (1969)
217. Zeldovich Ya B, Sunyaev R A *Astrophys. Space Sci.* **20** 9 (1969)
218. Sari R, Piran T, Narayan R *Astrophys. J.* **497** L17 (1998)
219. De Ugarte Postigo et al. *Astron. Astrophys.* **538** 44 (2012)
220. Perley D A et al. *Astrophys. J.* **781** 37 (2014)
221. Trenti M et al. *Astrophys. J. Lett.* **749** L38 (2012)
222. Tanvir N R et al. *Astrophys. J.* **754** 46 (2012)
223. Cucchiara A et al. *Astrophys. J.* **736** 7 (2011)
224. Bromm V, Coppi P S, Larson R B *Astron. J.* **564** 23 (2002)
225. Komissarov S S, Barkov M V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **402** L25 (2010)
226. Jakobsson P et al. *Astrophys. J.* **617** L21 (2004)
227. Thoene C C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **428** 3590 (2013)
228. Castro-Tirado A J et al. *Astron. Astrophys.* **475** 101 (2007)
229. Perley D A et al. *Astron. J.* **138** 1690 (2009)
230. Zauderer B A et al. *Astrophys. J.* **767** 161 (2013)
231. Volnova A A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **442** 2586 (2014)
232. Linde A *Particle Physics and Inflationary Cosmology* (Chur: Harwood Acad. Publ., 1990)
233. Linde A, in *Universe or Multiverse?* (Ed. B Carr) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007) p. 127
234. Mukhanov V F *Physical Foundations of Cosmology* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007)
235. Smolin L *The Life of the Cosmos* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1999)
236. Лукаш В Н, Михеева Е В, Строков В Н *УФН* **182** 894 (2012); Lukash V N, Mikheeva E V, Strokov V N *Phys. Usp.* **55** 831 (2012)
237. Лукаш В Н, Михеева Е В, Строков В Н *УФН* **182** 216 (2012); Lukash V N, Mikheeva E V, Strokov V N *Phys. Usp.* **55** 204 (2012)
238. Garay I, Robles-Pérez S *Int. J. Mod. Phys. D* **23** 1450043 (2014)
239. Надежин Д К, Новиков И Д, Полнарёв А Г *Астрон. журн.* **55** 216 (1978); Nadezhin D K, Novikov I D, Polnarev A G *Sov. Astron.* **22** 129 (1978)
240. Carr B J et al. *Phys. Rev. D* **81** 104019 (2010)
241. Кардашев Н С, Новиков И Д, Шацкий А А *Астрон. журн.* **83** 675 (2006); Kardashev N S, Novikov I D, Shatskii A A *Astron. Rep.* **50** 601 (2006)
242. Дорошкевич А Г, Кардашев Н С, Новиков Д И, Новиков И Д *Астрон. журн.* **85** 685 (2008); Doroshkevich A G, Kardashev N S, Novikov D I, Novikov I D *Astron. Rep.* **52** 616 (2008)
243. Pozanenko A, Shatskiy A *Gravit. Cosmol.* **16** 259 (2010); arXiv:1007.3620
244. Шацкий А А, Новиков И Д, Кардашев Н С *УФН* **178** 481 (2008); Shatskii A A, Novikov I D, Kardashev N S *Phys. Usp.* **51** 457 (2008)
245. Новиков И Д, Кардашев Н С, Шацкий А А *УФН* **177** 1017 (2007); Novikov I D, Kardashev N S, Shatskii A A *Phys. Usp.* **50** 965 (2007)
246. Шацкий А А *УФН* **179** 861 (2009); Shatskii A A *Phys. Usp.* **52** 811 (2009)
247. Новиков И Д *Астрон. журн.* **41** 1075 (1964); Novikov I D *Sov. Astron.* **8** 857 (1965)
248. Новиков И Д, Фролов В П *Физика черных дыр* (М.: Наука, 1986); Novikov I D, Frolov V P *Physics of Black Holes* (Dordrecht: Kluwer Acad., 1989)
249. Retter A, Heller S *New Astron.* **17** 73 (2012)

### Review of scientific topics for Millimetron space observatory

**N.S. Kardashev, V.N. Lukash, S.V. Pilipenko, E.V. Mikheeva, A.G. Doroshkevich, P.B. Ivanov, V.I. Kostenko, T.I. Larchenkova, S.F. Likhachev, A.V. Smirnov.** *Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation.* E-mail: nkardash@asc.rssi.ru, lukash@asc.rssi.ru, spilipenko@asc.rssi.ru, helen@asc.rssi.ru, dorr@asc.rssi.ru, pbi20@cam.ac.uk, vkostenko@asc.rssi.ru, ltanya@asc.rssi.ru, slikhach@asc.rssi.ru, asmirm@asc.rssi.ru

**I.D. Novikov.** *Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation.* E-mail: novikov@asc.rssi.ru

*The Niels Bohr International Academy, The Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark*

**D.V. Bisikalo, D.S. Wiebe.** *Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, ul. Pyatnitskaya 48, 119017 Moscow, Russian Federation* E-mail: bisikalo@inasan.ru, dwiebe@inasan.ru

**A.V. Zasov, A.M. Cherepashchuk.** *P.K. Sternberg State Astronomical Institute, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Universitetskii prosp. 13, 119991 Moscow, Russian Federation.* E-mail: zasov@sai.msu.ru, cher@sai.msu.ru

**I.I. Zinchenko.** *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, 603950 Nizhnii Novgorod, Russian Federation; N.I. Lobachevskii Nizhnii Novgorod State University, prosp. Gagarina 23, 603950 Nizhnii Novgorod, Russian Federation* E-mail: zin@appl.sci-nnov.ru

**I.F. Malov, V.M. Malofeev.** *Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Pushchino Radio, Astronomy Pushchino 142290 Observatory, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation.* E-mail: malov@prao.ru, malofeev@prao.ru

**A.S. Pozanenko.** *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation* E-mail: apozenan@iki.rssi.ru

**A.M. Sobolev.** *Ural Federal University, Institute of Natural Sciences, Astronomical Observatory, ul. Lenina 51, 620000 Ekaterinburg, Russian Federation.* E-mail: Andrej.Sobolev@urfu.ru

**Yu.A. Shchekinov.** *Southern Federal University, ul. Bol'shaya Sadovaya 105/42, 344006 Rostov-on-Don, Russian Federation* E-mail: yus@srfedu.ru

This paper reviews a wide range of problems in astrophysics and cosmology that can be solved by means of astronomical observations in the far-IR to millimeter wavelength range and which include the formation and evolution of stars and planets, galaxies and the interstellar medium, the study of black holes, and the development of the cosmological model. These problems are considered in relation to the Millimetron space observatory (project Spectr-M), which is equipped with a cooled 10-meter mirror and can potentially operate both as a single-dish telescope and as part of a space-ground very long baseline interferometer.