Апрель 2021 г. *Том 191, № 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Задачи научной программы космической обсерватории Миллиметрон и технические возможности её реализации

И.Д. Новиков, С.Ф. Лихачёв, Ю.А. Щекинов, А.С. Андрианов, А.М. Барышев, А.И. Васюнин, Д.З. Вибе, Т. де Граау, А.Г. Дорошкевич, И.И. Зинченко, Н.С. Кардашёв, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, Л.Н. Лихачёва, А.О. Ляховец, Д.И. Новиков, С.В. Пилипенко, А.Ф. Пунанова, А.Г. Рудницкий, А.В. Смирнов, В.И. Шематович

Представлена научная программа проекта "Спектр-М", нацеленного на создание и эксплуатацию космической обсерватории Миллиметрон (КОМ), планируемой к запуску в конце 2020-х годов. Обсерватория будет обладать набором уникальных технических возможностей по наблюдению астрономических объектов в широком диапазоне длин волн от 50 мкм *до* 10 мм *с недостижимой ранее в этой области спектра чувствительностью (до* $\sim 0{,}1$ мкЯн*) в режиме одиночного зеркала и беспрецедентно высоким угловым разрешением (*$\sim 0{,}1$ мкс *дуги) в режиме наземно-космического радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (КРСДБ). Программа направлена на класс приоритетных фундаментальных проблем астрофизики и физики в целом, которые могут быть разрешены исключительно с помощью возможностей КОМ*: 1) *исследование физических процессов в ранней Вселенной вплоть до красных смещений* $z \sim 2 \times 10^6$ *с помощью регистрации μ-искажений частотного спектра реликтового излучения, изучение строения и эволюции Вселенной на красных смещениях* $z < 15$ *в наблюдениях y-искажений спектра микроволнового фона*; 2) *исследование геометрии пространства-времени вокруг свермассивных чёрных дыр (СМЧД) в центре нашей Галактики и галактики M87 с помощью построения изображения теней в их окрестности, исследование свойств плазмы в области формирования теней, а также выявление возможных наблюдательных проявлений кротовых нор*; 3) *исследование наблюдательных проявлений возникновения жизни во Вселенной — поиск воды и биомаркеров в межзвёздной среде нашей Галактики. Сюда же попадает и ряд родственных проблем, также требующих для своего решения технических возможностей обсерватории Миллиметрон*: *возникновение первых галактик и СМЧД* ($z \gtrsim 10$), *альтернативные подходы измерениия постоянной Хаббла, физики СМЧД в "затенённых" пылью ядрах галактик, исследование протопланетных дисков и транспорта воды в них, исследование "миров с океанами" в Солнечной системе.*

Ключевые слова: субмиллиметровая астрономия, обсерватория Миллиметрон, сверхмассивные чёрные дыры, кротовые норы, реликтовое излучение, ранняя Вселенная, происхождение галактик, межзвёздная среда, вода и биомаркеры в Галактике, Солнечная система

PACS numbers: **07.87.+v**, **96.30.–t**, **96.55.+z**, 97.60.Lf, 98.80.Es DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.12.038898

И.Д. Новиков [1,2,3,a], **С.Ф. Лихачёв** [1,b], **Ю. А. Щекинов** [1,4,c], **А.С. Андрианов** [1,d], **А.М. Барышев** [1,5,e], **А.И. Васюнин** [6,f], **Д.З. Вибе** [7,g], **Т. де Граау** [1,5,h], **А.Г. Дорошкевич** [1,i], **И.И. Зинченко** [8,j], **Н.С. Кардашёв** [1], **В.И. Костенко** [1,k], **Т.И. Ларченкова** [1,l], **Л.Н. Лихачёва** [1,m], **А.О. Ляховец** [1,n], **Д.И. Новиков** [1,o], **С.В. Пилипенко** [1,p], **А.Ф. Пунанова** [6,q], **А.Г. Рудницкий** [1,r], **А.В. Смирнов** [1,s], **В.И. Шематович** [7,t]

[1] Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация

[2] The Niels Bohr International Academy, The Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark

[3] Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", пл. Академика Курчатова 1, 123182 Москва, Российская Федерация

[4] Raman Research Institute, C.V. Raman Avenue, 560080 Sadashiva Nagar, Bangalore, India

[5] Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, PO Box 72, 9700 Groningen, The Netherlands

[6] Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира 19, 620002 Екатеринбург, Российская Федерация

[7] Институт астрономии РАН, ул. Пятницкая 48, 119017 Москва, Российская Федерация

[8] Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация

E-mail: [a] novikov@asc.rssi.ru, [b] slikhach@asc.rssi.ru, [c] yus@asc.rssi.ru, [d] andrianovas@lebedev.ru, [e] andrey@astro.rug.nl, [f] anton.vasyunin@urfu.ru, [g] dwiebe@inasan.ru, [h] tdegraau@alma.cl, [i] dorr@asc.rssi.ru, [j] zin@appl.sci-nnov.ru, [k] vkostenko@asc.rssi.ru, [l] ltanya@asc.rssi.ru, [m] larlikh@asc.rssi.ru, [n] lyahovecao@lebedev.ru, [o] novikovdi@lebedev.ru, [p] spilipenko@asc.rssi.ru, [q] anna.punanova@urfu.ru, [r] arud@asc.rssi.ru, [s] asmirn@asc.rssi.ru, [t] shematov@inasan.ru

Статья поступила 14 апреля 2020 г., после доработки 7 декабря 2020 г.

© И.Д. Новиков, С.Ф. Лихачёв, Ю.А. Щекинов, А.С. Андрианов, А.М. Барышев, А.И. Васюнин, Д.З. Вибе, Т. де Граау, А.Г. Дорошкевич, И.И. Зинченко, Н.С. Кардашев, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, Л.Н. Лихачёва, А.О. Ляховец, Д.И. Новиков, С.В. Пилипенко, А.Ф. Пунанова, А.Г. Рудницкий, А.В. Смирнов, В.И. Шематович 2021

Содержание

1. **Введение (405).**
1.1. Космическая обсерватория Миллиметрон для фундаментальной науки. 1.2. Принципы построения научной программы "Спектр-М". 1.3. Необходимость и значимость обсерватории Миллиметрон. 1.4. Технические характеристики космической обсерватории Миллиметрон.
2. **Космология (409).**
2.1. Искажения частотного спектра реликтового излучения. 2.2. Космология: задачи следующего уровня.
3. **Сверхмассивные объекты во Вселенной (421).**
3.1. Sgr A*. 3.2. M87. 3.3. Кротовые норы и Миллиметрон. 3.4. Поиск затенённых СМЧД в галактиках-мёрджерах: Arp220.
4. **H_2O, пребиотики, жизнь во Вселенной (429).**
4.1. Звездообразование. 4.2. Эволюция органических соединений. 4.3. Вода. 4.4. Солнечная система.
5. **Заключение (440).**

Список литературы (440).

1. Введение

Революционный прорыв в астрофизике, связанный с крупными космическими проектами, такими как COBE (COsmic Background Explorer), WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), "Хаббл", "Планк", "Чандра", Fermi-LAT (Large Area Telescope), существенно расширил наши представления о Вселенной, показав её во всём диапазоне электромагнитных волн от микроволновых до гамма-квантов с энергией в несколько ГэВ. Его главным результатом явилось достижение новой ступени в понимании того, из чего состоит Вселенная, как в ней сформировалась наблюдаемая крупномасштабная структура, как функционируют галактики в близкой и в совсем удалённой Вселенной (красные смещения $z = 1{,}5-3$) в период, когда скорость рождения звёзд в ней была максимальна и многое другое. Благодаря этим достижениям наблюдательная астрономия подошла к порогу, за которым начинается "новая физика", связанная с происхождением Вселенной и всего того, что она вмещает, с природой действующих в ней сил. Для преодоления этого порога необходимо увеличивать чувствительность инструментов, расширять их рабочий диапазон длин волн, многократно увеличивать пространственное (угловое) и спектральное разрешение. На решение этой задачи направлены усилия многих крупных научных организаций и отдельных групп в мире. Совсем недавно (13 июля 2019 г.) в России была запущена новая космическая обсерватория "Спектр-РГ" (Спектр-Рентген-Гамма)[1]. В настоящее время создаются две космические обсерватории, которым вместе с обсерваторией "Спектр-РГ" будет суждено добывать новые знания за пределами, ограниченными "порогом". Это "Всемирная космическая обсерватория — Ультрафиолет" (проект "Спектр-УФ", время запуска 2025 г.) и Космическая обсерватория Миллиметрон (далее КОМ, проект "Спектр-М", предполагаемый запуск 2029 г.). Космическая обсерватория Миллиметрон будет покрывать широкую (более двух порядков величины) спектральную полосу от 50 мкм до 10 мм (интервал частот от 30 ГГц до 6 ТГц) и иметь возможность работать в двух различных модах наблюдений: одиночная космическая обсерватория с 10-м телескопом и плечо КРСДБ — наземно-космического радиоинтерферометра со сверхдлинной базой [1–3]. В настоящей работе мы будем говорить о научных задачах КОМ.

1.1. Космическая обсерватория Миллиметрон для фундаментальной науки

Научная программа космической обсерватории Миллиметрон направлена на решение класса задач, которые позволят получить информацию принципиальной важности для решения следующих фундаментальных вопросов: 1) какие физические процессы происходили в ранней Вселенной в дорекомбинационную эпоху, чем определяются параметры крупномасштабной структуры Вселенной, когда и как возникли первые звёзды и галактики, как они соотносятся с наблюдаемыми в ближней Вселенной, 2) какова структура пространства-времени в окрестности сверхмассивных гравитирующих тел, какова их природа, когда и как они возникли, 3) как возникла жизнь во Вселенной, уникальна ли она или повсеместно распространена во Вселенной, каковы её формы и наблюдательные проявления.

Этот, на первый взгляд, ограниченный список задач предполагает исследование всего круга многообразных явлений, охватывающих чрезвычайно широкую шкалу пространственных и временны́х масштабов начиная от планетных систем и протопланетных дисков, от центральных относительно компактных областей галактик — нашей и ближайших к ней — до масштабов в миллиарды световых лет, к истокам возникновения нашей Вселенной и формирования её такой, какой мы её сейчас видим. Многие международные научные космические проекты ближайшего будущего нацелены на решение отдельных аспектов проблем, входящих в программу КОМ. Сюда можно отнести, например, космический телескоп им. Джеймса Уэбба (James Webb Space Telescope — JWST, 2021 г.), космический инфракрасный телескоп WFIRST (Wide Field Infra Red Space Telescope, предположительно 2025 г.) в ближней ИК области, космический телескоп PICO (Probe of Inflation and Cosmic Origin, предположительно 2030 г.), которые будут работать в диапазонах от 400 мкм до 1,5 см, дополняющих диапазон Миллиметрона. Космический телескоп Origins (Origins Space Telescope, OST), программа которого частично перекрывается с программой КОМ, планируется к запуску в 2037 г. Здесь же следует отметить и гравитационно-волновой космический проект LISA (Laser Interferometer Space Antenna), направленный на регистрацию гравитационных волн от слияний массивных чёрных дыр, от динамических явлений на инфляционной стадии эволюции Вселенной и от других явлений, связанных с действием сверхсильных гравитационных полей.

В решении указанного выше круга задач роль космической обсерватории Миллиметрон уникальна. Это определяется несколькими факторами: во-первых, широким интервалом длин волн, охватывающим почти два с половиной порядка величины, $\lambda = 50-10^4$ мкм; во-вторых, высокой чувствительностью телескопа, которая обеспечивается активным охлаждением зеркала до температур $T \leqslant 5$ К и его диаметром 10 м, бóльшим, чем у любого из перечисленных выше телескопов; в-третьих, возможностью проведения наблюдений в режиме КРСДБ с беспрецедентно высоким угловым разрешением $\sim 0{,}1$ мкс дуги.

[1] Первые результаты "Спектр-РГ" были представлены на конференции "Астрофизика высоких энергий-2019" — http://heaconf.cosmos.ru/2019/circ1_hea2019.html.

1.2. Принципы построения научной программы "Спектр-М"

Научная программа проекта сфокусирована на исследовании фундаментальных явлений и объектов, охватываемых указанными выше (раздел 1.1) тремя направлениями. Структура программы иерархична: у основания каждого направления лежит ключевой ("прорывной") проект, вокруг которого развиваются проекты следующих уровней, тематически связанные с ключевым. Такая узко сфокусированная иерархическая структура обусловлена ограниченным сроком работы телескопа в режиме активного охлаждения [1–3]. В связи с этим вся стратегия наблюдений, планирование последовательности наблюдательных сессий будут тесно связаны с этим режимом. На наш взгляд, это позволит наиболее полно раскрыть физику и эволюционные связи объектов и явлений в рамках каждого из ключевых проектов, максимально эффективно используя уникальные на сегодняшний день возможности КОМ. Схематично это выглядит следующим образом.

Основная направленность *ключевых проектов* — получение ответов на нерешённые вопросы, связанные с

• фундаментальными процессами в ранней Вселенной: *ключевым проектом* здесь является обнаружение y- и μ-искажений в частотном спектре реликтового излучения (далее РИ), т.е. специфических форм отклонений этого спектра от равновесного спектра чёрного тела;

• свойствами пространства-времени и вещества в сверхсильных гравитационных полях: *ключевой проект* — измерение геометрии пространства-времени в окрестности источника Sgr A* в центре Галактики, а также сверхмассивных чёрных дыр в ближайших к нам галактиках в режиме КРСДБ, выявление наблюдательных проявлений кротовых нор;

• происхождением жизни во Вселенной: *ключевой проект* — поиск предбиологических молекул в протозвёздных облаках и протопланетных дисках, поиск воды в зонах обитаемости протопланетных дисков, выявление природы хиральности сложных органических молекул.

Каждый из проектов *второго уровня* тематически связан с тем или иным *ключевым проектом*. Например, если говорить о первом ключевом проекте, направленном на измерение спектральных искажений реликтового излучения, то тесно связанными с ним являются исследования различных проявлений эффекта Сюняева–Зельдовича в скоплениях галактик и релятивистских поправок к этому эффекту. Таким образом, *проекты второго уровня* включают в себя решение следующих задач:

1. Космология: 1) альтернативный метод измерения постоянной Хаббла H_0, 2) исследование эффекта Сюняева–Зельдовича и релятивистских поправок к нему, 3) наблюдения первых галактик, 4) обнаружение и исследование сверхмассивных чёрных дыр во Вселенной на рубеже эпохи реионизации, 5) изучение свойств пылевых инфракрасных галактик, 6) исследование особенностей эволюции галактик в "полуденной" Вселенной, т.е. в эпоху глобальной вспышки звездообразования при $z \sim 2$.

2. Сверхсильные гравитационные поля: 1) многочастотные поляризационные наблюдения ближайшей окрестности чёрных дыр в Sgr A*, M87*, 2) исследование характера турбулентности аккреционного течения с помощью измерения возможных временны́х вариаций характеристик поляризации, измерение спектра по всему аккреционному полю, включая его временны́е вариации, 3) оценка параметров аккреционного потока на основе измерений многоволнового распределения яркости в окрестности чёрной дыры (ЧД) ($\sim 0{,}1$ мс дуги) в более широком поле Sgr A*, вплоть до радиуса Бонди $\sim 0{,}03-0{,}1$ пк, 4) многочастотные поляризационные наблюдения ближайшей окрестности чёрных дыр в Sgr A*, M87* для выявления топологии магнитного поля и измерения его величины в широкой области вплоть до радиуса Бонди, 5) исследование физических процессов в затенённых пылью (obscured) активных ядрах галактик, поиск наблюдательных проявлений сверхмассивных чёрных дыр в их недрах, 6) спектроскопия гигантских чёрных дыр в начале эпохи реионизации ($z \gtrsim 7{,}5$), исследование эволюционых особенностей растущих чёрных дыр в "тёмные" эпохи (dark ages) $z = 10-30$, 7) исследование наблюдательных проявлений взаимовлияния галактик и растущих массивных чёрных дыр в их центрах, выявление механизмов, определяющих их согласованную эволюцию.

3. Вода в космосе, происхождение жизни: 1) филаментарная структура межзвёздной среды, гигантские молекулярные облака и области звездообразования в ближайшей окрестности Солнца, 2) исследование транспорта воды во внутренние области протопланетных дисков на основе измерений их спектральных особенностей, 3) наблюдательные проявления процесса формирования планет земного типа, формирования зон обитаемости, влияние переменности и вспышечной активности центральных звёзд — красных карликов на физические свойства дисков в пределах предполагаемых зон обитаемости, 4) исследование резервуаров воды и измерение её запасов в Солнечной системе.

1.3. Необходимость и значимость обсерватории Миллиметрон

Наши представления о Вселенной претерпели за последние 30 лет драматические изменения. Они коснулись как начальных периодов эволюции Вселенной, так и современного состояния населяющих её объектов. За этот период построена "минимизированная" 6-параметрическая модель Вселенной (ΛCDM-модель с холодной тёмной материей и Λ-членом), основанная на измерениях угловых вариаций спектра реликтового излучения с беспрецедентной точностью [4–6]. Скрупулёзные измерения в рамках Supernova Cosmology Project, выполненные на телескопе "Хаббл", привели к открытию космологического ускорения [7, 8]. Глубокие и сверхглубокие обзоры космического телескопа "Хаббл" от ближнего инфракрасного до ультрафиолетового диапазона позволили обнаружить галактику на красном смещении $z = 11$ [9] (интересным является то, что звёздное население этой галактики имеет химический состав с массовой долей тяжёлых элементов лишь на полпорядка меньше солнечной). Обсерватории "Гершель" и "Спитцер" продемонстрировали, что пыль возникает во Вселенной с момента появления первых галактик (см., например, [10, 11]). Рентгеновские обсерватории "Эйнштейн", ROSAT (ROentgen SATellit), "Чандра" обнаружили гигантские резервуары горячего газа в скоплениях галактик, исследовали огромное количество высокоэнергичных источников во Вселенной. В частности, с помощью обсерватории "Чандра" было зарегистрировано рентгеновское излучение от сверхмассивной чёрной дыры в центре нашей Галактики (источник Sgr A*) [12], впервые обнаружено проявление взаимодействия тёмной материи с

барионами при слиянии скопления галактик Bullet cluster [13], обнаружено гало горячего газа вокруг близких галактик [14] и т.д. Гамма-телескоп Fermi-LAT обнаружил, кроме прочего, необычную и неожиданно энергичную активность центра нашей Галактики, которая проявляется в виде двух гигантских пузырей размером порядка 10 кпк, симметрично выходящих из центра. Самым ярким событием последних лет была регистрация гравитационных волн, заявленная группами гравитационно-волновых интерферометров LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) и Virgo в 2016 г. [15]. Это событие можно без преувеличения назвать революционным — с регистрацией гравитационных волн физика пересекла порог, за которым начинаются исследования свойств нашего пространства-времени. В определённом смысле к аналогичному порогу приблизился космический телескоп "Планк", показавший возможность измерения так называемой *B*-моды поляризации реликтового излучения, несущей информацию о рождении и самых начальных моментах эволюции Вселенной — начале инфляционной стадии [16]. Ещё одна "пороговая" задача, к решению которой современная экспериментальная астрономия приблизилась в последние годы, — исследования свойств пространства-времени в окрестности горизонта событий — тени чёрной дыры.

Совсем недавно коллаборация Телескопа горизонта событий (EHT — Event Horizon Telescope) заявила об успешном завершении программы получения изображения тени сверхмассивной чёрной дыры в галактике M87 [17]. Изображение было получено на длине волны 1,3 мм усилиями восьми обсерваторий в разных концах мира (см. [18]). Результат оказался на пределе существующих в настоящее время возможностей. А именно: в экспериментах EHT были использованы максимально достижимые базы РСДБ порядка диаметра Земли и минимальная длина волны 1,3 мм, которая была осуществима в рамках эксперимента EHT для оптимального заполнения (u, v)-плоскости. Поэтому с достигнутым угловым разрешением ~ 20 мкс дуги построение изображения тени с угловым диаметром $\simeq 42$ мкс потребовало чрезвычайно изощрённой технологии обработки полученных данных, включающей, в частности, статистический анализ более 60000 синтетических изображений [19, 20][2]. Для того чтобы получить более убедительные изображения тени чёрной дыры в M87 и, возможно, в Sgr A*, и детально исследовать *геометрию пространства-времени и физику явлений* в их окрестности, нужны инструменты, работающие в режиме КРСДБ на меньших длинах волн, способные достичь необходимого углового разрешения. Реальный прогресс в этом направлении будет достигнут в рамках проекта, объединяющего возможности космической обсерватории Миллиметрон, которая позволит проводить наблюдения в режиме КРСДБ с базой от $\simeq 400$ тыс. до 1,5 млн км и максимальным угловым разрешением не хуже $\sim 0{,}4$ и $\sim 0{,}1$ мкс дуги соответственно. Таким образом, КОМ — это единственный из разрабатываемых в настоящее время инструментов, способный выполнить эту задачу.

[2] По этой причине оценку размера тени 42 ± 3 мкс дуги с указанной точностью следует понимать в статистическом смысле. То же можно сказать и об оценке асимметрии тени $\Delta\theta \leqslant 2\,\%$ — одного из существенных параметров, который необходим для уверенного определения геометрии пространства-времени.

Ещё один круг задач фундаментальной значимости, ставших актуальными в последние несколько лет, связан с возникновением жизни в Солнечной системе и во Вселенной в целом. Всеобщий интерес к этой проблеме бесспорен — он тянется по меньшей мере со времён Джордано Бруно, и эта проблема, безусловно, может быть отнесена к классу "пороговых" задач. На момент написания настоящей статьи (8 апреля 2020 г.) известны 4189 подтверждённых планет вне Солнечной системы — экзопланет [3]. Они обращаются вокруг 3105 звёзд и звёздных объектов. Ближайшая к нам планета Proxima Centauri b находится от нас на расстоянии 1,3 пк (немногим больше 4 световых лет). Основная часть исследований экзопланет и их атмосфер приходится сейчас на наблюдения в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах. Однако для широкого круга проблем, связанных с особенностями формирования экзопланет, с их характеристиками в областях обитаемости, с транспортом необходимых для возникновения жизни химических элементов и воды в эти зоны, решающая роль принадлежит дальней инфракрасной и субмиллиметровой областям спектра. Исследования указанных проблем пока только начинаются, и Миллиметрон с его высокой чувствительностью, высоким спектральным и беспрецедентно высоким угловым разрешением будет играть в ближайшем будущем *критически* важную роль, особенно если учесть широкий интервал его рабочих частот.

Таким образом, проект "Спектр-М" по созданию космической обсерватории Миллиметрон с теми характеристиками, которые для неё планируются, необходим именно сейчас, когда развитие науки не может быть удовлетворено эксплуатацией инструментов прежнего поколения, но требует расширения их диапазонов, увеличения чувствительности и углового разрешения.

1.4. Технические характеристики космической обсерватории Миллиметрон

Как уже отмечалось выше, международный проект "Спектр-М", нацеленный на разработку, создание и эксплуатацию космической обсерватории Миллиметрон, занимает особое место среди космических проектов следующего десятилетия. Прежде всего это связано с уникальными техническими характеристиками обсерватории Миллиметрон: большая апертура главного зеркала (10 м), низкая температура входной оптики телескопа ($T \leqslant 5$ К) и высокая точность поверхности (среднеквадратичная ошибка оптической части $\leqslant 10$ мкм, согласно ТЗ (техническое задание), и $\leqslant 6$ мкм, согласно текущему состоянию разработки и изготовления оптических компонентов и систем). Суммарно это позволит инструменту достичь высокой чувствительности и высокого пространственного разрешения (рис. 1). Телескоп будет способен работать в беспрецедентно широком диапазоне длин волн — от 50 мкм до 10 мм. Кроме этого, КОМ сможет работать в двух различных режимах: как одиночный космический телескоп с уникальными характеристиками, обозначенными выше, и как космическое плечо наземно-космического радиоинтерферометра со сверхдлинной базой, что позволит ему в комбинации с наземным плечом, например антенной решёткой ALMA [4] (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)

[3] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

[4] https://www.almaobservatory.org/en/about-alma-at-first-glance/.

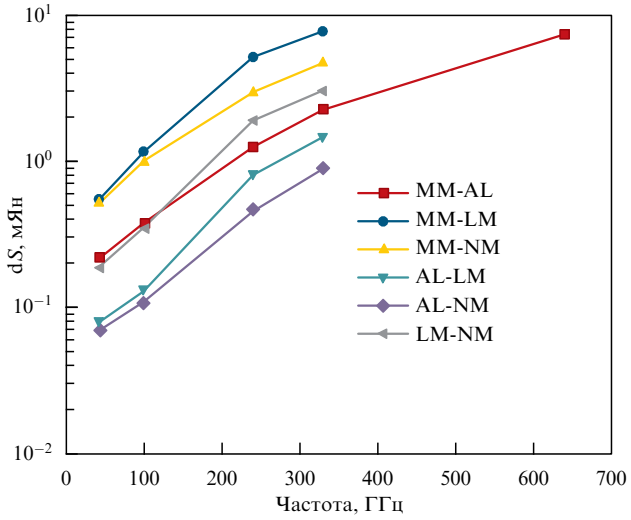


Рис. 1. Сравнительная чувствительность δS (ср. кв. отклонение) для некоторых интерферометров космос–Земля с обсерваторией Миллиметрон на частотах 43, 100, 240, 330 и 640 ГГц, $\Delta\nu = 4$ ГГц; сокращения MM — Миллиметрон, AL — ALMA, LM — LMT (Large Millimeter Telescope), NM — NOEMA (NOrthern Extended Millimeter Array).

или телескопами из проекта EHT [18], достичь беспрецедентного углового разрешения $\Delta\theta \sim 0{,}1$ мкс дуги. Научная аппаратура телескопа будет состоять из набора отдельных приёмников, каждый из которых оптимизирован для решения определённого круга научных вопросов и, соответственно, обладает своими техническими особенностями. Спектрометр высокого разрешения (СВР) — это прибор, состоящий из высокочувствительных матричных гетеродинных приёмников, оптимизированных для работы в диапазоне от 0,5 до 6 ТГц, который позволит обеспечить проведение наблюдений с высоким спектральным разрешением $R \geqslant 10^5$, эквивалентным ширине линии $\Delta v \leqslant 3$ км с$^{-1}$. Если принять во внимание, что отдельные полосы диапазона СВР полностью непрозрачны для атмосферы и лишь частично доступны для наблюдения на высокогорных обсерваториях (см. обсуждение в [1, 2, 21]), то это делает КОМ инструментом, способным решать уникальные задачи в области спектроскопии, недоступные другим астрономическим инструментам. Холодная и высокоточная оптика телескопа делает его перспективным с точки зрения установки на нём матричных приборов дальнего инфракрасного (ИК) диапазона (камер и спектрометров среднего разрешения) с чувствительностью детекторов, мощность, эквивалентная шуму, (МЭШ) которых не превосходит величины 10^{-19} Вт Гц$^{-0{,}5}$. Это позволит КОМ проводить картографирование и спектральный анализ самых слабых астрономических источников на уровне естественного фона вплоть до $\lambda \leqslant 3000$ мкм. В составе приёмного комплекса КОМ будет также несколько отдельных высокочувствительных гетеродинных приёмников, оптимизированных для работы в интерферометрическом режиме и покрывающих частотный диапазон от 33 до $\simeq 720$ ГГц. В совокупности с базой наземно-космического интерферометра $\geqslant 1{,}5$ млн км станет возможным исследование самых компактных объектов Вселенной, например, квазаров, а также чёрных дыр и их окрестностей.

Более детальный анализ возможностей обсерватории Миллиметрон в части реализации научных задач с учётом технических характеристик миссии представлен, например, в работах [22, 23].

1.4.1. Чувствительность обсерватории Миллиметрон в режиме КРСДБ. Как было указано выше, в лётной программе обсерватории Миллиметрон предусмотрены два режима работы бортовой 10-м антенны:

- режим одиночной антенны для решения обзорных и специализированных многочастотных задач фотометрии, спектроскопии и космологии,
- режим КРСДБ совместно с сетью наземных радиотелескопов, например, глобальной сетью EHT, которая в перспективе сможет включать в себя более 10 радиотелескопов с различными апертурами от 10 до 80 м [18] и совместимыми частотными диапазонами 43, 100, 240, 330 и 640 ГГц (соответствующие им длины волн 7,00, 3,33, 1,25, 0,91 и 0,47 мм). В первые три года эксплуатации обсерватории Миллиметрон предусматривается двухрежимная работа в окрестности точки L2. После трёх лет работы возможным, но не обязательным, этапом является переход на околоземную орбиту, на которой будут доступны только КРСДБ наблюдения. Приоритетной научной задачей КОМ в режиме КРСДБ является построение изображений (распределений интенсивности излучения в картинной плоскости небесной сферы) теней сверхмассивных чёрных дыр, таких как Sgr A*, M87*, а также других компактных объектов, предусмотренных научной программой.

Основным параметром, определяющим чувствительность антенны, является эквивалентная плотность потока (SEFD):

$$\mathrm{SEFD} = \frac{2760\, T_{\mathrm{sys}}}{A_{\mathrm{eff}}} \quad [\text{Ян}]\,, \tag{1}$$

где T_{sys} [К] — температура системы, A_{eff} [м^2] — эффективная площадь антенны. Меньшие значения SEFD соответствуют более эффективным антенным системам. Пример зависимости эффективности 10-м антенны Миллиметрона от длины волны приведён на рис. 2. Чувствительность 2-элементного интерферометра в единицах

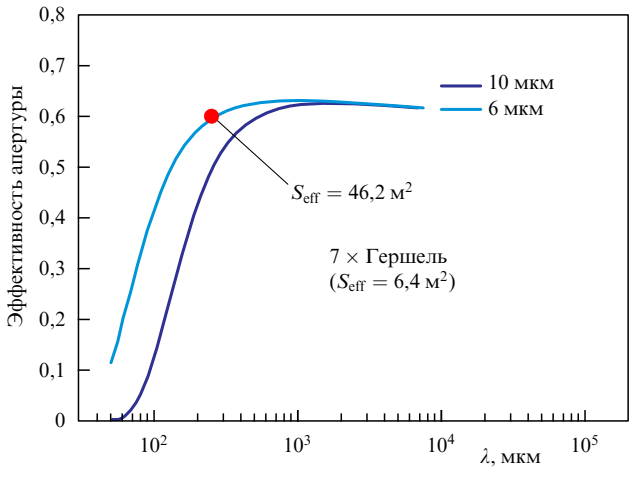


Рис. 2. Эффективность 10-м зеркала обсерватории Миллиметрон в зависимости от длины волны при среднеквадратичной погрешности поверхности 6 и 10 мкм.

Таблица 1. Показатели эффективности для гетеродинного приёма четырёх антенных систем на пяти частотах обсерватории Миллиметрон. Полоса регистрации сигнала $\Delta\nu = 4$ ГГц

Антенна/антенная система	SEFD, Ян				
	43 ГГц	100 ГГц	240 ГГц	330 ГГц	640 ГГц
Миллиметрон (ММ), $d = 10$ м	1172	2305	2551	3402	6805
ALMA (AL), 50×12 м, эквив. $d = 85$ м	24	29	62	122	159
LMT (LM), $d = 50$ м	151	281	1055	1444	0
NOEMA (NM), 12×15 м, эквив. $d = 52$ м	136	210	347	520	0
τ, с	150	120	25	20	5

плотности потока Ян определяется тепловым шумом (зависит от SEFD индивидуальных антенн), шириной полосы частот сигнала $\Delta\nu$ [Гц], временем интегрирования τ [с] и поправкой, учитывающей потери квантования P_q при цифровой регистрации сигнала [24]:

$$\delta S = \frac{1}{P_q}\sqrt{\frac{\mathrm{SEFD}_1\ \mathrm{SEFD}_2}{2\Delta\nu\tau}}\quad [\text{Ян}]\,. \tag{2}$$

В Миллиметроне может использоваться 1- и 2-битное квантование с поправочным коэффициентом P_q, равным 0,64 и 0,88 соответственно. Для оценки интегрального параметра SEFD и чувствительности δS для всей антенной решётки из N элементов можно воспользоваться приближённым выражением [18, 19]:

$$\mathrm{SEFD}_{\mathrm{array}} = \frac{1}{\rho_{\mathrm{ph}}}\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{\mathrm{SEFD}_i}\right)^{-1}, \tag{3}$$

где $\rho_{\mathrm{ph}}(\leqslant 1)$ — коэффициент потерь фазирования антенной решётки из N элементов.

Для задач реставрации изображений ближайших СМЧД предпочтительны наблюдения в высокочастотном субмиллиметровом диапазоне в окрестности 220 – 250 ГГц, 330 – 360 ГГц и выше ввиду снижения влияния на изображение эффектов рефракционного межзвёздного рассеяния [25] и тем самым улучшения точности определения угловых размеров теней СМЧД. Однако, в отличие от космической обсерватории Миллиметрон, на земных антеннах при переходе к более высоким частотам чувствительность ухудшается вследствие более высоких температур систем, больших потерь эффективности из-за качества зеркал и увеличения в наземных условиях влияния атмосферных фазовых флуктуаций, приводящих к снижению интервалов когерентного накопления корреляции (уравнения (1), (2)).

В таблице 1 представлены оценки SEFD 10-м антенны Миллиметрона и параметры четырёх наиболее эффективных наземных антенных систем глобальной сети EHT [18, 19], которые могут быть использованы в КРСДБ проекта. Сравнительную чувствительность δS для некоторых интерферометров космос – Земля с обсерваторией Миллиметрон можно оценить из рис. 1. Интегральная расчётная чувствительность (3) для всей антенной решётки из четырёх антенн (табл. 1) на пяти рассматриваемых частотах приведена в табл. 2.

Таблица 2. Интегральная чувствительность решётки из четырёх антенн (см. табл. 1) в зависимости от диапазона частот. Полоса регистрации $\Delta\nu = 4$ ГГц, интервалы интегрирования τ приведены в табл. 1

Частота, ГГц	δS, мЯн
43	0,18
100	0,30
240	1,12
330	1,84

1.4.2. Орбита космической обсерватории Миллиметрон. Космическая обсерватория Миллиметрон будет проводить наблюдения в окрестностях точки либрации L2 системы Солнце – Земля, находясь на гало-орбите. Такая орбита снижает нагрузку на систему активного охлаждения телескопа и поэтому является наиболее подходящей для режима одиночной антенны, для которого требуется наилучшая чувствительность. При работе обсерватории в режиме КРСДБ такая орбита обеспечивает беспрецедентное угловое разрешение. Гало-орбита расположена на расстоянии 1,5 млн км от Земли в направлении, противоположном Солнцу. Параметры гало-орбиты в точке L2 следующие: максимальное удаление космического корабля от плоскости эклиптики составляет 910 тыс. км, период такой орбиты — 180 дней.

В настоящее время рассматривается дополнительная конфигурация орбиты для обсерватории Миллиметрон. Предполагается возврат космического аппарата на околоземную орбиту после выполнения ключевой научной программы режима одиночной антенны в точке L2. Околоземная орбита предоставит больше возможностей для режима КРСДБ, в частности, для получения высококачественных двумерных изображений тени чёрной дыры. Оптимальной конфигурацией околоземной орбиты является протяжённая эллиптическая орбита. Переход с гало-орбиты, расположенной в окрестности точки L2, на протяжённую эллиптическую орбиту с апогеем до 340000 км и большим эксцентриситетом ($> 0,9$) может быть выполнен с использованием гравитационного маневра вблизи Луны [26] без значительных энергетических затрат ($\Delta v \sim 100$ м с$^{-1}$). Параметры такой конфигурации протяжённой эллиптической орбиты следующие: апогей — 320000 км, перигей — 10000 км, период — 10 дней.

2. Космология

2.1. Искажения частотного спектра реликтового излучения

Фундаментальной задачей современной наблюдательной космологии является обнаружение искажений в частотном спектре реликтового излучения, т.е. отклонений этого спектра от чернотельного. С момента первых исследований спектра РИ экспериментом COBE/FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer) [27] было установлено, что этот спектр с хорошей точностью совпадает со спектром чёрного тела. С тех пор не было сделано никаких попыток уточнить частотный спектр РИ и обна-

ружить какие-либо отклонения от чернотельного распределения фотонов по частоте. Тем не менее в дорекомбинационную эпоху во Вселенной происходили процессы, сопровождаемые энерговыделением [28–32], которые неизбежно должны были оставить след в РИ в виде характерных спектральных искажений. Такие искажения также возникают и в сравнительно поздней Вселенной после рекомбинации за счёт рассеяния фотонов на горячей плазме [33, 34]. Эти искажения содержат в себе уникальную информацию о физике процессов во Вселенной на разных этапах её эволюции, связанных с возможными отклонениями от условия термодинамического равновесия. Спектральные искажения возникают за счёт вброса энергии в плазму и могут нести в себе информацию о возможном существовании первичных чёрных дыр [35], частиц со временем жизни 10^9-10^{10} с [36], диссипации акустических волн, спектре мощности начальных возмущений на малых масштабах [37, 38]. Важно отметить, что первичные мелкомасштабные возмущения недоступны ни для каких других наблюдений, кроме наблюдений спектральных искажений реликта. Информация о таких возмущениях отсутствует и в анизотропии реликтового фона из-за диссипативных процессов, и в крупномасштабной структуре Вселенной за счёт сильной нелинейности на малых масштабах. В то же время искажения, возникшие в позднюю эпоху, несут информацию о возникновении крупномасштабной структуры Вселенной, межгалактической среде и структуре скоплений галактик.

Обнаружение искажений в частотном спектре реликта откроет совершенно новый и пока недоступный для нас канал информации о строении и эволюции Вселенной.

В этой главе мы рассматриваем некоторые процессы, которые могут приводить к частотным искажениям РИ, и проводим анализ возможностей обсерватории Миллиметрон по их наблюдению.

2.1.1. Возникновение и структура спектральных искажений. В процессе эволюции Вселенной взаимодействие излучения с материей проходило несколько качественно различных этапов. На самой ранней стадии при красных смещениях $z > 2\times 10^6$, когда эффекты двойного комптоновского рассеяния и тормозного излучения достаточно сильны, излучение и плазма находятся в тесном термодинамическом равновесии друг с другом. На этой стадии любой вброс энергии в плазму (процесс, сопровождающийся энерговыделением) приводит к быстрой термализации, т.е. к уравновешиванию состояния излучения с плазмой, в результате чего температура излучения поднимается, а его частотный спектр сохраняет форму чёрного тела, но с несколько бóльшей температурой. Эту эпоху в истории Вселенной называют Т-эрой (рис. 3). С течением времени эффективность двойного комптоновского рассеяния и тормозного излучения падает, и при $z < 2\times 10^6$ эти эффекты становятся пренебрежимо малы. Таким образом, начиная с этого момента общее число фотонов остаётся неизменным, и эволюция частотного спектра излучения в эту эпоху хорошо описывается уравнением Компанейца [39]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\sigma_{\rm T} N_{\rm e} h}{m_{\rm e} c}\,\frac{1}{v^2}\,\frac{\partial}{\partial v}\,v^4\left(n+n^2+\frac{kT_{\rm e}}{h}\,\frac{\partial n}{\partial v}\right), \qquad (4)$$

$$hv,\, kT_{\rm e} \ll m_{\rm e}c^2\,,$$

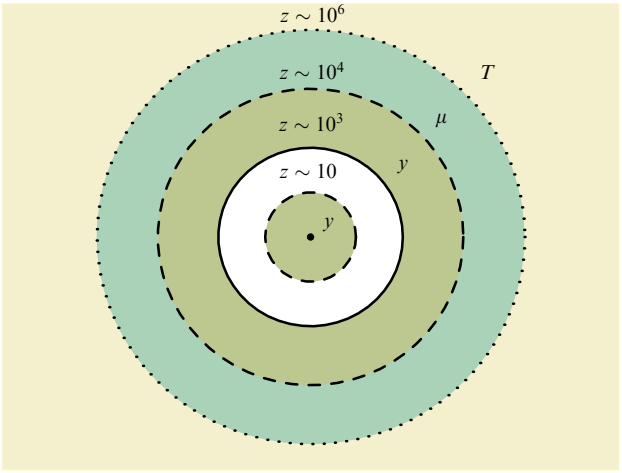


Рис. 3. Этапы эволюции частотного спектра РИ: T-эра при $z > 2\times 10^6$ (сохранение чернотельного спектра), μ-эра при $5\times 10^4 < z < 2\times 10^6$ (эра μ-отклонений) и Y-эра при $1{,}4\times 10^3 < z < 5\times 10^4$ и $z < 10$ (возникновение y-возмущений). Центр рисунка соответствует положению наблюдателя.

решение которого зависит от момента "вброса" энергии (либо фотонов) в плазму. Здесь $n(v)$ — число заполнения фотонов, h и k — постоянные Планка и Больцмана, c — скорость света, $m_{\rm e}$ — масса покоя электрона, $\sigma_{\rm T}$ — томсоновское сечение рассеяния, $N_{\rm e}$ — концентрация электронов и $T_{\rm e}$ — температура плазмы. Если такой вброс происходит на красных смещениях $10^5 < z < 2\times 10^6$, то стационарным решением уравнения Компанейца является спектр Бозе–Эйнштейна с ненулевым химическим потенциалом μ. Такие искажения носят название μ-искажений, а соответствующая эпоха в эволюции Вселенной называется μ-эрой. Вброс энергии в более позднюю эпоху от $z\sim 10^4$ до $z\sim 10^3$ приводит к тому, что равновесие между излучением и плазмой не успевает установиться до момента рекомбинации, и возникают так называемые y-искажения спектра (в соответствии с общепринятым названием параметра комптонизации фотонов в электронной плазме $y = (kT_{\rm e}/m_{\rm e}c^2)N_{\rm e}\sigma_{\rm T}ct$). Спектральная форма таких искажений фактически представляет собой эффект Сюняева–Зельдовича [40], а соответствующая эра в истории Вселенной носит название Y-эра. Искажения той же формы возникают и после рекомбинации на малых красных смещениях $z < 10$ в процессе формирования крупномасштабной структуры при рассеянии фотонов на горячей плазме.

Таким образом, с точки зрения эволюции частотного спектра, Вселенная проходит три этапа (рис. 3): 1 — при красных смещениях больше 2×10^6 любой вброс энергии в плазму приводит к быстрой термализации, в результате чего спектр остаётся чернотельным с несколько иной температурой; 2 — при красных смещениях $5\times 10^4 < z < 2\times 10^6$ возникают μ-искажения; 3 — при $z < 5\times 10^4$ наступает эпоха y-искажений.

μ- и y-искажения имеют следующий вид [41]:

$$\Delta I_\mu = I_{\rm CMB}\,\frac{xe^x}{e^x-1}\left(\frac{1}{\beta}-\frac{1}{x}\right)\mu\,,$$

$$\Delta I_y = I_{\rm CMB}\,\frac{xe^x}{e^x-1}\left(Y_0(x)+\Theta_{\rm e}Y_1(x)\right)y\,, \qquad (5)$$

$$I_{\rm CMB} = \frac{2hv^3}{c^2}\,\frac{1}{e^x-1}\,,\quad \Theta_{\rm e} = \frac{kT_{\rm e}}{m_{\rm e}c^2}\,,\quad x = \frac{hv}{kT_r}\,,$$

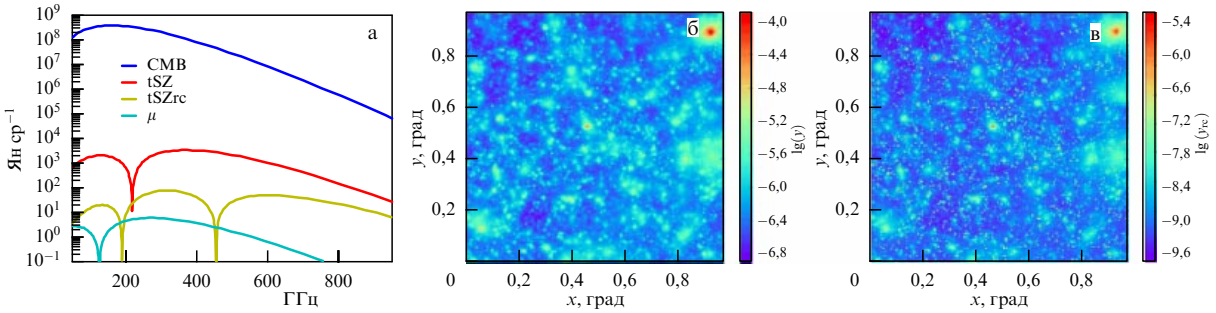


Рис. 4. (В цвете онлайн.) (а) Спектр РИ (синий), спектр y-искажений (красный), первая релятивистская поправка к y-искажениям (жёлтый) и μ-искажения (голубой). (б) Численная модель карты $1^\circ \times 1^\circ$ (100×100 пикселей) амплитуды y-искажений. (в) Та же карта для первой релятивистской поправки к y-искажениям. Результаты численного моделирования для этих карт были любезно предоставлены Klaus Doulag.

где $I_{\text{CMB}} = (2h\nu^3/c^2)n$ — интенсивность РИ, T_r — его температура, $\Theta_\text{e} = kT_\text{e}/m_\text{e}c^2$, μ и y — амплитуды μ- и y-искажений, $Y_0(x)$ и $Y_1(x)$ описывают соответственно тепловой эффект Сюняева – Зельдовича и первую релятивистскую поправку к этому эффекту. Необходимо отметить, что уравнение (4) представлено в данной статье в его оригинальном виде без учёта релятивистских поправок. С учётом поправок вплоть до Θ_e^5 такое уравнение было получено в работе [42]. В том случае, если в μ-эпоху не происходило никаких неизвестных нам процессов энерговыделения и ожидаемые искажения спектра реликта в эту эпоху определялись лишь диссипацией акустических волн, консервативная оценка для ожидаемой амплитуды μ в уравнении (5) 2×10^{-8}. Приблизительная оценка величины y равна $1{,}77 \times 10^{-6}$, в то время как средняя температура рассеивающей плазмы соответствует $\Theta_\text{e} \sim 2{,}5 \times 10^{-3}$. Спектральная форма ожидаемых в наблюдениях искажений реликта, соответствующих приведённым выше параметрам, представлена на рис. 4. Амплитуда y-искажений как функция положения на небесной сфере проявляет себя в виде непрерывного поля флуктуаций с характерным размером порядка одной угловой минуты с достаточно яркими пятнами от отдельных галактик и скоплений. Аналогичным образом ведёт себя и амплитуда первой релятивистской поправки к этим искажениям, но при этом мелкомасштабные флуктуации выражены более резко (рис. 4). Что касается μ-искажений, то в первом приближении с огромной точностью можно считать их монополем, то есть ожидаемая амплитуда μ является некоторой константой на всём небе.

2.1.2. Наблюдение спектральных искажений в присутствии шумов. При наблюдениях частотного спектра реликтового излучения большое значение имеет учёт присутствия в наблюдаемом сигнале всевозможных шумов галактического и внегалактического происхождения [43]. Источниками таких шумов в диапазоне от 0,1 до 1 ТГц будут являться галактическая тепловая пыль, синхротронное излучение, инфракрасный фон, свободно-свободные переходы, линии излучения монооксида углерода CO от далёких галактик и эмиссия от вращающейся пыли. В отличие от таких экспериментов, как PIXIE (Primordial Inflation Explorer) [44], Миллиметрон обладает сравнительно малым полем зрения $\sim 7' \times 7'$ и, таким образом, не сможет производить обзор всего неба либо значительной его части. Для такого широкого обзора у КОМ будет недостаточно наблюдательного времени для накопления сигнала. Вместо этого представляется целесообразным использовать глубокие наблюдения сравнительно малых участков неба порядка $1^\circ \times 1^\circ$ (рис. 4). Для наблюдений будут использоваться наиболее чистые участки небесной сферы. Для определения таких зон мы используем данные "Планк" [45, 46]. Наш предварительный анализ показывает, что весьма малые и наиболее чистые участки неба позволяют уменьшить влияние излучения пыли на результирующий сигнал по сравнению со средним по небу на 2 порядка (рис. 5). С учётом того, что на высоких частотах именно галактическая пыль вносит основной вклад в результирующий сигнал, мы тем самым значительно увеличиваем чувствительность эксперимента.

В рассматриваемом диапазоне частот основными источниками фотонных шумов, ограничивающих возможности Миллиметрона и любого другого эксперимента по измерению частотного спектра РИ, являются фотонный шум от реликтового излучения, фоновый шум от оптики телескопа (в основном от первичного зеркала), упомянутый выше фон от излучения пыли, а также шум от инфракрасного фона. Остальные фоны, такие как синхротрон и свободно-свободные переходы, вносят значительно меньший вклад в результирующий шум. Таким образом, при расчёте чувствительности эксперимента ими можно пренебречь. В то же время при анализе данных в процессе разделения компонент сигнала они, разумеется, должны быть приняты во внимание. Эквивалентная шуму мощность NEP для фурье-спектрометра в диапазоне частот от ν_1 до ν_2 вычисляется по следующей формуле [47]:

$$\begin{aligned} \text{NEP}^2 &= \text{NEP}_\text{d}^2 + \sum_{j=1}^{4} \text{NEP}_j^2\,, \\ \text{NEP}_j^2 &= 4\int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{A\Omega}{\lambda^2} \frac{h^2\nu^2\varepsilon_j(\nu)}{\exp\left(h\nu/kT_j\right) - 1} \times \\ &\times \left[1 + \frac{\varepsilon_j(\nu)}{\exp\left(h\nu/kT_j\right) - 1}\right] d\nu\,. \end{aligned} \tag{6}$$

Здесь $\text{NEP}_\text{d} \sim 10^{-18}$ Вт $/\sqrt{\text{Гц}}$ — мощность шума от приёмника, индекс суммирования $j = 1$ соответствует шуму от РИ, $j = 2$ — от пыли, $j = 3$ — от инфракрасного фона и $j = 4$ — от зеркала телескопа, A — эффективная площадь зеркала и Ω — угловое разрешение. Для первых трёх компонент температуры T_j и безразмерные модификационные функции $\varepsilon_j(\nu)$ (эквивалентные излучательным способностям) взяты нами из [41], а для зеркала Миллиметрона температура $T_4 = 5^\circ$ К и, по предварительным

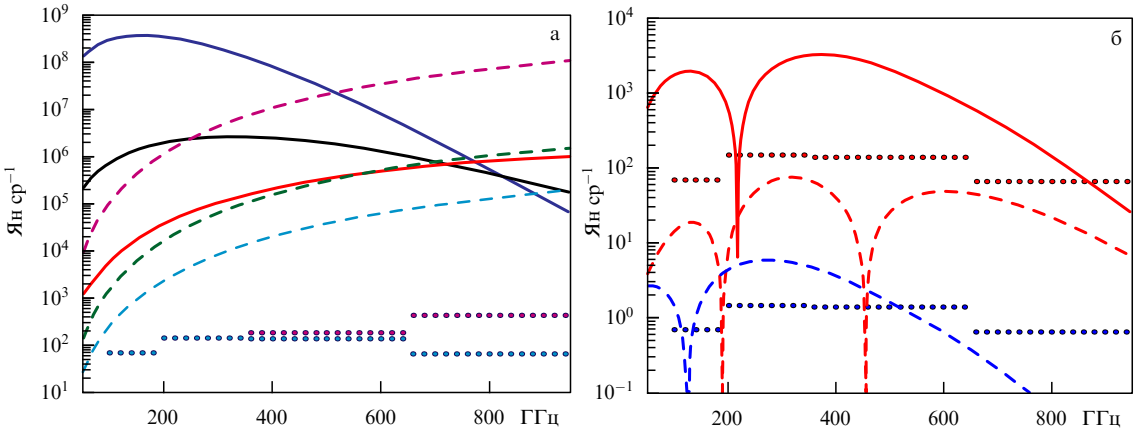


Рис. 5. (В цвете онлайн.) (а) Спектр РИ (синяя линия), вклад от зеркала (чёрная линия), спектр инфракрасного фона (красная линия). Штриховые линии обозначают спектр пыли: фиолетовая — средний спектр по всему небу, зелёная — средний спектр пыли для галактической широты более 30° и голубая линия — спектр пыли для наиболее чистого участка неба. Точками (пунктирными линиями) указана чувствительность Миллиметрона: усреднённая по всему небу — фиолетовый цвет и для наиболее чистого от пыли участка — голубой цвет. (б) y-возмущения — красная сплошная линия, первая релятивистская поправка — красная штриховая линия, μ-возмущения — синяя штриховая линия. Красная пунктирная линия представляет чувствительность по отношению к y-возмущениям (наблюдательное время 1 час соответствует времени накопления сигнала для каждого отдельного пикселя). Синяя пунктирная линия соответствует времени накопления сигнала для всей карты и представляет чувствительность по отношению к μ-возмущениям.

оценкам, $\varepsilon_4(\nu) = 0{,}001 \times [0{,}42 + 0{,}30(\nu/100\ \text{ГГц})]$. Чувствительность в частотном диапазоне $[\nu_1 : \nu_2]$ согласно [48]:

$$S = 0{,}61 \frac{\text{NEP}}{A\Omega\delta\nu\sqrt{t}\sqrt{N_b}}\,, \tag{7}$$

где t — время накопления сигнала, $\delta\nu$ — ширина частотного канала и N_b — число независимых приёмников. В нашем случае $\delta\nu = 20$ ГГц и числа N_b в зависимости от частотного диапазона приведены в следующей таблице:

Диапазон, ГГц	100:200	200:353	353:667	667:1000
N_b	6	9	16	25

На рисунке 5а изображена чувствительность Миллиметрона в единицах Ян ср$^{-1}$ с описанной выше конфигурацией спектрополяриметров при условии наблюдения в наиболее чистом от галактической пыли участке неба. Здесь предполагаемое время накопления сигнала для каждого пикселя на карте один на один угловой градус и 100×100 пикселей равно одному часу. Этого времени достаточно, чтобы с хорошей точностью воспроизвести карту y-искажений. Карта первой релятивистской поправки тоже воспроизводится, хотя и со значительно меньшей достоверностью. Возможным способом улучшения статистики здесь является некоторое огрубление карты для первой релятивистской поправки путём уменьшения разрешения (сглаживания карты). Что же касается μ-искажений, то, так как их амплитуда является константой по всей карте, время накопления сигнала возрастает в 10^4 раз по сравнению со временем, предназначенным для наблюдения одного пикселя. Это, соответственно, улучшает чувствительность эксперимента к μ-искажениям по сравнению с y-искажениями на два порядка.

2.1.3. Влияние зеркала на искажения наблюдаемого спектра. В процессе разделения различных компонент сигнала для выделения y- и μ-спектральных искажений необходимо кроме естественных небесных компонент учитывать также и дополнительный сигнал от оптики телескопа, и в первую очередь сигнал от первичного зеркала, средняя ожидаемая температура которого $T_m = 5$ К. Зеркало создаёт не только дополнительный белый шум в наших наблюдениях, но также рождает весьма характерные малые искажения наблюдаемого сигнала за счёт неоднородного охлаждения поверхности. Оно состоит из 96 панелей, каждая — с температурой, несколько отличной от средней температуры зеркала (рис. 6). Кроме того, существуют и другие части оптической системы телескопа, которые тоже имеют температуру, близкую к температуре первичного зеркала, и вносят вклад в результирующий сигнал. Для удобства и с целью оптимизации процесса отделения искажений сигнала, создаваемого оптикой, мы используем разложение в ряд Тейлора. Интенсивность, создаваемая каждым малым участком поверхности зеркала с температурой T, имеет вид:

$$\begin{aligned} I_m(\nu, T) = I_m(\nu, T_m) + \frac{\partial I_m(\nu, T)}{\partial T}\bigg|_{T=T_m} \Delta T + \\ + \frac{1}{2}\,\frac{\partial^2 I_m(\nu, T)}{\partial T^2}\bigg|_{T=T_m} (\Delta T)^2 + \ldots \\ + \frac{1}{n!}\,\frac{\partial^n I_m(\nu, T)}{\partial T^n}\bigg|_{T=T_m} (\Delta T)^n + \ldots\,, \\ \Delta T = T - T_m\,. \end{aligned} \tag{8}$$

Таким образом, вклад от зеркала в общий сигнал может быть записан в виде суммы всего нескольких аналитических функций $B_n(\nu, T_m)$:

$$\begin{aligned} I_m &= \sum_{n=0}^{N} \gamma_n B_n(\nu, T_m), \\ B_n(\nu, T_m) &= \frac{1}{n!}\left(T^n \frac{\partial^n I_m(\nu, T)}{\partial T^n}\right)\bigg|_{T=T_m}, \\ \gamma_n &= \left\langle \left(\frac{\Delta T}{T_m}\right)^n \right\rangle, \quad n = 2, \ldots, N, \quad \gamma_0 = 1\,, \quad \gamma_1 = 0\,. \end{aligned} \tag{9}$$

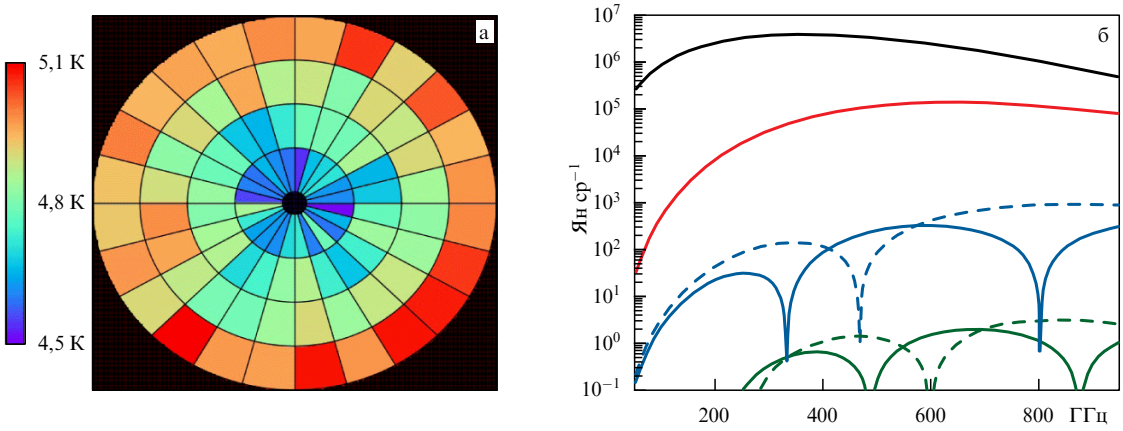


Рис. 6. (В цвете онлайн.) (а) Распределение температуры по поверхности первичного зеркала. 96 панелей имеют различную температуру, которая может увеличиваться от центра к краю на 0,5 K. (б) Вклад от излучения зеркала в общий сигнал. Моменты разложения сигнала $\gamma_n B_n$: чёрный $n = 0$, красный $n = 2$, голубой $n = 3, 4$, зелёный $n = 5, 6$. Штриховыми линиями указаны нечётные моменты ($n = 3, 5$).

Коэффициенты γ_n должны быть найдены в процессе наблюдений с последующим разделением компонент. Приблизительная их оценка получена нами из тех соображений, что температура панелей зеркала может изменяться от центра к краю примерно на 0,5 K:

$$\gamma_n = \frac{1}{2(n+1)} \left(\frac{0{,}5\ \text{K}}{T_m} \right)^n, \quad n = 2, 4, 6, \ldots$$
$$\gamma_n = \frac{1}{\sqrt{(4n+2)N_{\text{pan}}}} \left(\frac{0{,}5\ \text{K}}{T_m} \right)^n, \quad n = 3, 5, \ldots, \tag{10}$$

где $N_{\text{pan}} = 96$. Спектральная форма моментов разложения и их ожидаемые амплитуды показаны на рис. 6.

2.2. Космология: задачи следующего уровня

2.2.1. Определение постоянной Хаббла. Одной из важных задач в космологии является определение постоянной Хаббла — ключевого космологического параметра, который характеризует современный темп расширения Вселенной, а также её возраст, размер и критическую плотность. В последние несколько лет решение этой задачи представляет особенный интерес. Это связано с выявленным расхождением на уровне значимости $4{,}4\sigma$ значения постоянной Хаббла, полученного по данным космической обсерватории "Планк" [49], и значения, полученного в результате локальных измерений с помощью "лестницы расстояний" по данным наблюдений телескопа "Хаббл" [50]. В частности, значение H_0, экстраполированное из измеренного обсерваторией "Планк" космического микроволнового фона в предположении ΛCDM-модели, составляет $67{,}4 \pm 0{,}5$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ [49], а полученное в ходе реализации программы наблюдений SH0ES (The Supernovae, H0, for the Equation of State of Dark Energy) на телескопе "Хаббл" составляет $74{,}03 \pm 1{,}42$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ [50]. В то же время использование данных по звуковым барионным осцилляциям совместно с данными по сверхновым типа Ia дают значение постоянной Хаббла, близкое к значению, полученному обсерваторией "Планк", $H_0 = 67{,}3 \pm 1{,}0$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ [51]. Важно отметить, что эксперименты по измерению реликтового микроволнового излучения и барионных акустических осцилляций в настоящее время позволяют измерять эволюцию шкалы расстояний с точностью 1 %, однако нельзя забывать, что эти измерения являются модельно-зависимыми.

Локальное значение постоянной Хаббла, опубликованное в работе [50], измерено с точностью лучше 2 %. Такая высокая точность была достигнута благодаря наблюдениям долгопериодических цефеид и затменных двойных систем типа DEB (Detached Eclipsing Binary) в Большом Магеллановом Облаке. По ним проводилась калибровка расстояний до переменных цефеид, расположенных в галактиках, в которых обнаружены недавние взрывы сверхновых первого типа, а также наблюдениям мазеров в галактике NGC4258 и измерениям параллаксов цефеид Млечного Пути.

В программе наблюдений Carnegie-Chicago Hubble Program вместо цефеид для калибровки расстояний до сверхновых типа Ia были использованы наблюдения ярчайших звёзд ветви красных гигантов (TRGB) и получено значение $H_0 = 69{,}8 \pm 0{,}8(\pm 1{,}1\ \%\ \text{стат.}) \pm 1{,}7 \times \times (\pm 2{,}4\ \%\ \text{сис.})$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ [52], которое на уровне значимости $1{,}2\,\sigma$ согласуется с результатами обсерватории "Планк" и на уровне $1{,}7\,\sigma$ — с результатами программы SH0ES, т.е. находится между этими значениями.

Значения H_0, полученные из наблюдений мегамазеров, также близки к значению обсерватории "Планк", но имеют большие ошибки. Так, например, в работе [53] приводится величина $66{,}0 \pm 6{,}0$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$, в работе [54] — $68{,}9 \pm 7{,}1$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$, а в работе [55] — 73^{+26}_{-22} км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$.

Таким образом, результаты наблюдений указывают на то, что постоянная Хаббла для близкой и далекой Вселенной, скорее всего, различна. Чтобы подтвердить это, необходимо использовать независимые методы измерения H_0. Одним из таких методов, который был впервые предложен в работе [56], является измерение так называемого расстояния запаздывания между изображениями линзированного переменного во времени яркого источника, например, квазара или сверхновой. Для определения этого расстояния измеряется задержка между временем прихода фотонов для разных изображений источника. Расстояние запаздывания обратно пропорционально значению постоянной Хаббла, поэтому его можно использовать для ограничения как постоянной Хаббла, так и других космологических параметров. Однако только измеренного запаздывания между изоб-

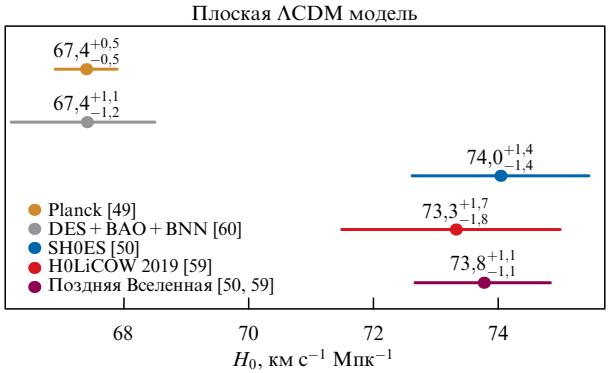


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Ограничения на значение постоянной Хаббла для ранней и поздней Вселенной в предположении ΛCDM модели. Для ранней Вселенной: оранжевым цветом показан результат обсерватории "Планк" [49] и серым цветом показана комбинация данных, полученных по результатам наблюдений скоплений галактик и слабого линзирования, анализа акустических барионных осцилляций и нуклеосинтеза [60]. Для поздней Вселенной: синим цветом показан результат программы SH0ES [50] и красным цветом — программы H0LiCOW (H0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring; COSMOGRAIL — COSmological MOnitoring of GRAvItational Lenses) [59]. Комбинация двух последних результатов показана малиновым цветом. (Рисунок из работы [59].)

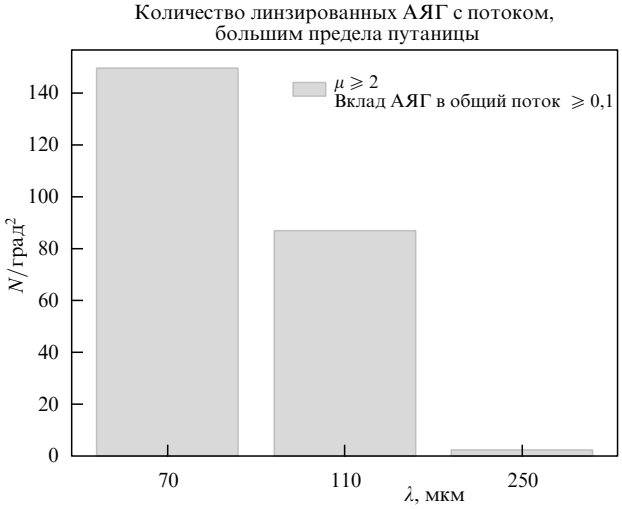


Рис. 8. Количество линзированных АЯГ с коэффициентами усиления $\mu \geqslant 2$ в квадратном градусе с потоками, превышающими предел "эффекта путаницы", на длинах волн 70–250 мкм. (Рисунок из работы [62].)

ражениями недостаточно, чтобы определить H_0 с хорошей точностью (см., например, [57]). В работе [58] было показано, что для одного события сильного линзирования, при наличии измеренного запаздывания и дополнительных наблюдательных данных, можно определить значение постоянной Хаббла с точностью примерно 7–8 %. На сегодняшний день, по данным анализа шести линзированных квазаров, постоянная Хаббла измерена с точностью 2,4 % и равна $73{,}3^{+1{,}7}_{-1{,}8}$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ [59], т.е. расхождение с результатами обсерватории "Планк" составляет $3{,}1\,\sigma$. Если использовать эти результаты совместно с результатами из работы [50], то расхождение между значениями H_0 для ранней и поздней Вселенной составляет $5{,}3\,\sigma$ (рис. 7).

Если причина расхождения значений H_0 не связана с систематическими ошибками измерений, то возникает необходимость в модификации ΛCDM модели, например, следует рассматривать динамическую тёмную энергию и тёмную материю, ненулевую кривизну, большее число эффективных релятивистских частиц и т.д. (см., например, обсуждение в [61]). Чтобы разрешить проблему расхождения значений постоянной Хаббла из разных экспериментов и получить значимую информацию о свойствах тёмной энергии, необходима точность на уровне 1%. Как было показано в ряде работ (см., например, [59] и ссылки в ней), для достижения такой точности необходимо иметь подробную информацию, в том числе временно́е запаздывание между изображениями, примерно для 40 гравитационных линз.

Данные, которые используются для определения постоянной Хаббла, получены либо в оптическом и ближнем ИК диапазонах, либо в радиодиапазоне. Дополнительную информацию для решения этой задачи возможно получить из наблюдений в далёком ИК и субмиллиметровом диапазонах длин волн с помощью обсерватории Миллиметрон. Угловое разрешение телескопа в самой коротковолновой части составит порядка 1–2 с дуги, а чувствительность широкополосной фотометрии может достигать 0,01 мЯн [3]. Основная задача — обнаружить новые гравитационно-линзированные системы со множественными изображениями, которые могут быть в дальнейшем использованы для определения постоянной Хаббла. Для этого необходимо оценить потенциально наблюдаемое количество таких систем с помощью обсерватории Миллиметрон. Этот вопрос подробно исследован в работе [62], там же приведены подсчёты линзированных источников, их распределение по красному смещению и коэффициентам усиления. Здесь же мы приведём некоторые оценки и выводы из этой работы.

Количество линзированных активных ядер галактик (АЯГ) с коэффициентом усиления $\mu \geqslant 2$ на длинах волн 70–250 мкм с потоками выше предела, определяемого "эффектом путаницы", показано в виде гистограммы на рис. 8. Из этого рисунка видно, что можно обнаружить примерно 140 линзированных АЯГ с $\mu \geqslant 2$, наблюдая область неба площадью квадратный градус в диапазоне длин волн 70–250 мкм. Однако не все из этих линзированных АЯГ будут иметь угловое расстояние между их изображениями, доступное для их разрешения коротковолновым матричным приёмником (КМП) обсерватории Миллиметрон. Как следует из работы [62], максимум распределения линз по массе приходится на $\sim 10^{11}\,M_\odot$. Для линзы с такой массой угловое расстояние между изображениями будет порядка угловой секунды, что сопоставимо с угловым разрешением КМП. Около 15 % зарегистрированных линзированных АЯГ будут иметь угловое расстояние между изображениями больше 2 с дуги и могут быть использованы для определения H_0. Чтобы зарегистрировать изображения примерно 40 таких АЯГ, необходимо просканировать область на небе площадью не менее 2 кв. градусов.

Благодаря высочайшей чувствительности инструментов обсерватории Миллиметрон ожидаемая скорость сканирования составит 0,005 кв. градуса в минуту на самой малой длине волны и на порядок выше на длинах волн 100–250 мкм. Это позволит провести обзор 2 кв. градусов примерно за 7 часов на самой короткой волне и на порядок быстрее на бóльших длинах волн.

Следует отметить, что помимо фотометрических данных необходимо получить спектроскопические данные, которые позволят не только выделить из обзора линзированные АЯГ, но и определить величину красного смещения их изображений, что является необходимым элементом для определения H_0. В силу ахроматичности эффекта гравитационного линзирования обнаруженные обсерваторией Миллиметрон в результате обзора и спектроскопически подтверждённые гравитационно-линзированные АЯГ с множественными изображениями в дальнейшем можно наблюдать на других длинах волн, в том числе с помощью наземных телескопов, обладающих высокой чувствительностью и разрешающей способностью, для определения временно́го запаздывания между изображениями. В случае обнаружения источников с малым угловым расстоянием между изображениями для некоторых из них возможно будет оценить запаздывание с помощью серии повторных фотометрических наблюдений в рамках программы обсерватории Миллиметрон. Тем не менее эта задача требует моделирования конкретного эксперимента, что целесообразно сделать на следующих этапах подготовки детализированной научной программы с учётом стратегии и тактики планирования работы миссии.

Помимо поиска гравитационно-линзированных АЯГ в обзорах небольших площадок, для целей рассматриваемой задачи перспективно проводить наблюдения уже обнаруженных в других диапазонах длин волн гравитационно-линзированных систем, для которых, в частности, измерены временны́е запаздывания между изображениями переменного источника. При этом отсутствует необходимая для определения постоянной Хаббла информация о галактике-линзе, основная энергия излучения которой приходится на дальний ИК диапазон. Для таких галактик-линз с помощью обсерватории Миллиметрон можно получить фотометрические изображения и определить величину красного смещения.

2.2.2. Ранние галактики: первые звёзды и галактики. Ключевой проблемой космологии пост-рекомбинационного периода является начало звёздного нуклеосинтеза — образование первых звёзд и галактик, реионизация Вселенной жёстким излучением первых звёзд, обогащение её тяжёлыми химическими элементами. Именно начало звёздного нуклеосинтеза определило лицо современной Вселенной.

Вероятно, ранние галактики осуществили реионизацию и разогрев межгалактического газа при красных смещениях $z \sim 7-12$ (см., например, обсуждение в работе [63]). Термодинамика газа в ранней Вселенной кардинально отличается от таковой в более поздние эпохи, начиная с умеренных красных смещений $z \leqslant 5$. Это связано с тем, что химический состав ранней Вселенной включал в себя только $\sim 75\,\%$ водорода и $\sim 25\,\%$ гелия с их изотопами и пренебрежимое количество лития. Остывание газа в этих условиях обусловлено образованием молекул водорода H_2, которое, в свою очередь, зависит от концентрации электронов.

Образование первых звёзд в галактиках непосредственно определяется двумя процессами: во-первых, процессом образования достаточно массивных гало тёмной материи, который зависит от амплитуды возмущений в соответствующих масштабах; во-вторых, процессом остывания барионов, сжатых в этих массивных гало тёмной материи. Остывание газа приводит к образованию первых звёзд, началу звёздного нуклеосинтеза и производству металлов, а далее — к реионизации и радиационному нагреву межгалактического газа на красных смещениях $z \sim 10-5$ (см., например, [64]).

Современные теоретические модели образования первых галактик, как и наблюдения наиболее далёких галактик [65–68], показывают, что эти галактики

а) обладают умеренной динамической массой $M_{\rm dyn} \sim (10^6-10^{10})M_\odot$;

б) обладают низкой концентрацией металлов ($Z \leqslant 10^{-3}Z_\odot$);

в) вероятно, содержат звёзды аномально большой массы $M_{\rm star} \sim (50-10^3)M_\odot$.

По значениям массы, светимости и концентрации металлов ранние галактики близки к спутникам галактик Млечный Путь и Андромеда. Известно, что активное образование металлов в галактиках локальной Вселенной возможно как сразу после образования галактики, так и на протяжении более поздних этапов эволюции [69]. Для галактик, находящихся на больших красных смещениях, на сегодняшний день такой информации нет. Тем не менее уверенно судить об образовании металлов в ранних галактиках можно только непосредственно из наблюдений.

Наблюдения телескопа "Гершель" [70, 71] позволили прояснить процесс образования массивных галактик при красных смещениях $z \leqslant 3$. Эти наблюдения продемонстрировали важную роль слияния галактик, которое ускорило образование звёзд, металлов и пыли. Несколько обнаруженных с помощью телескопа "Гершель" галактик были позднее изучены с помощью ALMA и идентифицированы как ранние галактики [69]. Например, для галактики T0346-52, линзированной скоплением галактик, удалось определить красное смещение $z = 5{,}7$ и светимость в далёком ИК диапазоне $L \sim 3{,}7\times \times 10^{13}L_\odot$ [72].

Возможными "мишенями" для исследования ранних эпизодов звездообразования во Вселенной в далёком ИК и субмиллиметровом диапазонах могут служить галактики ультраглубоких полей телескопа Хаббла. В частности, одной из таких галактик является галактика GN-z11, находящаяся на красном смещении $z = 11{,}1$ [9]. По-видимому, это одна из первых галактик. Она расположена на рубеже реоинизации (возраст Вселенной для $z = 11$ составляет всего 400 млн лет) и при этом имеет явно избыточную светимость для этой эпохи $L \sim 3 \times 10^{10}L_\odot$. Её светимость в 3 раза больше типичной светимости галактики, которая в более поздние эпохи на красных смещениях $z \sim 6-8$ составляет $\sim 10^{10}L_\odot$ [73]. Обнаружение такой галактики, как GN-z11, может свидетельствовать либо об исключительно счастливом случае, либо об отличии функции светимости галактик в начальный период их образования от стандартной функции Пресса–Шехтера. В настоящее время известно 13 галактик на красных смещениях $z > 8{,}5$ (см., например, [74, 75]). Вероятно, что $z = 11$ уже близко к порогу начала звёздного нуклеосинтеза, поскольку на временах ~ 200 млн лет от $z \simeq 12$ до $z \simeq 8$ эффективная скорость звездообразования увеличивается более чем на порядок величины от $\rho_{\rm SFR} \sim 2\times \times 10^{-4}M_\odot$ год$^{-1}$ Мпк$^{-3}$ до $\rho_{\rm SFR} \sim 3\times 10^{-3}M_\odot$ год$^{-1}$ Мпк$^{-3}$. Если экстраполировать эту зависимость на более ранние эпохи, то на красных смещениях $z \simeq 15$ скорость звездообразования может составить $\rho_{\rm SFR} \sim 10^{-5}M_\odot$ год$^{-1}$ Мпк$^{-3}$ (см. рис. 4 в [75]).

Отметим, что исследование периода начала звёздного нуклеосинтеза составляет одну из приоритетных задач космического телескопа Джеймса Уэбба (JWST). Ожидается, что JWST с инструментом MIRI (Mid-InfraRed Instrument, фотометрические полосы в пределах 5,6–25,5 мкм) будет способен обнаружить источники с потоками $F_\nu \sim 10^{-6}$ Ян [76], что соответствует светимости $L_{\mathrm{H}\alpha} \sim 10^{40}$ эрг с$^{-1}$ в линии[5] Hα галактики на красном смещении $z \sim 3$. Такая же галактика, отнесённая на красное смещение $z \sim 10$, будет излучать в линиях пашеновской и брекетовской серий (лабораторные длины волн $\lambda \leqslant 1{,}8556$ мкм и $\lambda \leqslant 4{,}0523$ мкм соответственно) примерно в 5 раз слабее, чем они излучают в линии Hα. На длинах волн ~ 30 мкм это даёт значение потока $F_\nu \sim 0{,}1$–$0{,}3$ мкЯн, что близко к пределу чувствительности обсерватории Миллиметрон. Таким образом, галактики со скоростями звездообразования $\sim 0{,}15 M_\odot$ год$^{-1}$ на красных смещениях $z \simeq 10$ будут доступны для обнаружения этой обсерваторией. Поэтому можно ожидать, что возможности обсерватории Миллиметрон в измерении скорости звездообразования в галактиках будут превосходить возможности JWST телескопа.

2.2.3. Ранние галактики: Ly-α эмиттеры (LAE). Это класс чрезвычайно ярких галактик, основная доля энергии которых излучается в линии Ly-α (Лайман-альфа) атомарного водорода из-за рассеяния УФ-излучения центрального источника (квазара, ядра галактики, области активного звездообразования) в оболочке нейтрального или слабо ионизированного водорода. При этом светимость может достигать величины $L_{\mathrm{Ly}\alpha} \sim 10^{11} L_\odot$. Ly-α эмиттеры рассматриваются как наиболее вероятный класс первых галактик. Они распределены в интервале красных смещений от $z \sim 2$ до $z \gtrsim 8$ [78] и поэтому являются важным фактором реионизации Вселенной и инструментом для диагностики режима реионизации Вселенной [79–81].

Количество LAE за пределами $z \simeq 6{,}6$ резко уменьшается. Пространственная плотность LAE изменяется как $\rho_{\mathrm{Ly}\alpha} \propto (1+z)^{-\beta}$, где $\beta \simeq 5$ в интервале $z = 5{,}5$–$6{,}6$ и $\beta \simeq 20$ при $z > 6{,}6$. При этом количество источников ультрафиолетового континуума вплоть до $z \simeq 8$ уменьшается медленнее, а именно с наклоном $\beta \simeq 3$, и только на $z \gtrsim 8$ начинает резко убывать с $\beta \simeq 9{,}6$ [82]. Это связано с увеличением средней концентрации атомарного водорода на бóльших красных смещениях и соответствующим поглощением в линии Ly-α. По результатам недавнего узкополосного обзора LAE [83] доля атомарного водорода во Вселенной при $z \sim 7$ составляет $\chi_{\mathrm{HI}} \sim 0{,}2$–$0{,}4$; для более ранних эпизодов, $z = 7$–8, оценки дают $\chi_{\mathrm{HI}} \sim 0{,}3$–$0{,}5$ [84, 85]. В таких условиях оптическая толщина в центре линии Ly-α достигает величины $\tau_\alpha \gtrsim 10^8$ на масштабе ~ 1 Мпк, что при $z \sim 7$ соответствует $\Delta z = 0{,}25$. Поэтому излучение галактики LAE в линии Ly-α будет сильно подавлено.

Можно предположить, что галактики с эффективным звездообразованием, которые в реионизованной Вселенной при $z < 7$ проявляют себя как LAE, могут существовать и за порогом реионизации, т.е. при $z > 7$ [74, 75]. Кроме отмеченного выше резкого уменьшения числа LAE за пределами порога реионизации, косвенным указанием их существования может служить близкий к первичному химический состав LAE, а также избыток массивных звёзд в распределении их звёзд по массам (см. ниже).

Такое предположение заставляет искать возможности обнаружения предшественников LAE в инфракрасной области спектра. Одна из таких возможностей, связанная с наблюдениями бальмеровской серии атома водорода, линии которой попадают в диапазон $\lambda \geqslant 6365 \times (1+z)$ Å, будет в ближайшем будущем реализована телескопом JWST [86–88]. Однако за пределами $z > 10$ чувствительность JWST по потоку в спектральном диапазоне $\lambda > 6$ мкм (~ 10 мкЯн за время накопления сигнала 10000 с) оказывается недостаточной для регистрации бальмеровской части спектра. Как уже было отмечено ранее, перспективными могут оказаться наблюдения в линиях водорода серий Пашена, Брекета и Пфунда, доступных (как по частотному интервалу — терагерцевая область, так и по потокам — десятки мкЯн) обсерватории Миллиметрон. Наблюдения таких областей звездообразования ("скрытых" Ly-α эмиттеров) могут быть особенно важны для решения двух задач фундаментального значения: исследования начальных эпизодов звёздного нуклеосинтеза во Вселенной и, поскольку LAE концентрируются преимущественно в филаментах космической структуры, исследования динамики формирования крупномасштабной структуры на начальных стадиях.

Число таких объектов на красных смещениях $z \gtrsim 8$ можно оценить из данных наблюдений CANDELS HST (Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey Hubble Space Telescope) совместно со "Спитцер"/IRAC (InfraRed Array Camera) [89, 90] (рис. 9). Так, на красном смещении $z = 8$ в поле с телесным углом $\Delta\Omega \sim (\theta = 2')^2$ можно ожидать обнаружения одного объекта со светимостью $L \sim 10^{10} L_\odot$. Для регистрации объекта с такой же светимостью, но на красном смещении $z = 10$ необходимо поле с $\Delta\Omega \sim (\theta = 2^\circ)^2$. Грубая оценка ожидаемых потоков в линиях Paα (1,875 мкм — длины волн указываются в собственной системе), Brα (4,05 мкм) и Pfα (7,46 мкм) составляет ~ 10–30 мкЯн,

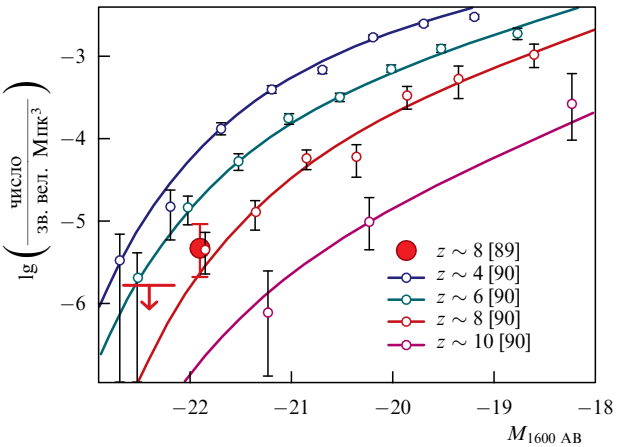


Рис. 9. Функция светимости наиболее ярких галактик программы CANDELS HST совместно с "Спитцер"/IRAC [89, 90]. По оси x указана звёздная величина в полосе HST F160W (средняя длина волны $\lambda = 15436{,}3$ Å) фотометрической системы AB [91]. (Рисунок из работы [89].)

[5] Эквивалентная скорость звездообразования при стандартных предположениях о начальной функции масс равна $\mathrm{SFR} = 0{,}055 M_\odot$ год$^{-1}$ [77].

Таблица 3. Свойства LAE, полученные из наблюдений ALMA в линиях CII и OIII

Объект	z	$M_{\rm dyn}/M_\odot$, 10^{10}	$M_{\rm star}/M_\odot$, 10^{10}	$M_{\rm dust}/M_\odot$, 10^9	Литература
MACS0647 – JD	11		$0{,}13 \pm 0{,}01$		[104]
MACS1149 – JD1	9,11	$0{,}4 \pm 0{,}3$	0,1	$5{,}3 \times 10^{-4}$	[106]
A2744 – YD4	8,382		0,2	6×10^{-3}	[114]
MACS0416,1 – 2403	8,312		0,3	4×10^{-3}	[115]
B14 – 65666	7,15	$8{,}8 \pm 2$		9×10^{-3}	[116]
SPT – SJ031132 – 5823,4W	6,9		$3{,}5 \pm 1{,}5$	$2{,}5 \pm 1{,}6$	[117]
SPT – SJ031132 – 5823,4E	6,9		$3{,}5 \pm 1{,}5$	$0{,}4 \pm 0{,}2$	[117]
COS – 3018555981	6,81	$1 \pm 0{,}2$			[118]
COS – 2987030247	6,85	$0{,}4 \pm 0{,}6$			[118]

что выше порога чувствительности обсерватории Миллиметрон для спектроскопии среднего разрешения. Поэтому глубокие обзоры с помощью КОМ могут сыграть важную роль в обнаружении первых LAE галактик и понимании их роли в динамике реионизации. Необходимо отметить, что в настоящее время проводится всестороннее изучение этих объектов в оптическом [90, 92, 93], инфракрасном диапазонах и радиодиапазоне [94, 95].

Существующие на сегодняшний день наблюдения показывают, что Ly-α эмиттеры представлены как минимум двумя разными классами объектов. С одной стороны, это яркие массивные объекты со светимостью $L \sim 10^{10} - 10^{12} L_\odot$ — квазары и массивные ядра галактик, окружённые протяжённой оболочкой нейтрального водорода [96]. С другой стороны, LAE представлены менее массивными и менее яркими галактиками с активным звездообразованием, которые можно рассматривать как прообразы галактик, подобных Магеллановым Облакам и другим спутникам Млечного Пути и Андромеды. В связи с этим особое внимание привлекают наблюдения протоскоплений галактик на больших красных смещениях $z \sim 6-7$ [97]. Интересно, что в конце периода реионизации $z \sim 10-7$ количество и плотность наиболее ярких галактик становятся сравнимы с плотностью скоплений галактик ($n \leqslant 10^{-6}$ Мпк$^{-3}$) [93]. Обзор наблюдаемых и моделированных свойств таких объектов — протоскоплений и скоплений — представлен в [96], свойства, динамика и излучение окружающего газа рассматривались в [98 – 100].

Присутствие металлов и пыли в оболочках HI ведёт к заметному излучению в инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях длин волн, в частности, в (смещённых) линиях углерода CII (158 ммк) и кислорода OIII (88 ммк). В последние годы такие наблюдения проводятся на телескопе ALMA (см., например, [90, 101 – 105]. Наблюдения галактик на бóльших красных смещениях $z \sim 9-15$ рассмотрены также в [106].

Перспективны для обнаружения далёких LAE наблюдения массивных скоплений галактик, которые являются гравитационной линзой для расположенных за ними LAE. Так, например, в работах [107 – 109] приведены обнаруженные в таких наблюдениях 452 кандидата LAE, у которых скорость звездообразования находится в диапазоне $1 \leqslant {\rm SFR} < 200\, M_\odot$ год$^{-1}$. Линзированные на скоплениях LAE также наблюдались, например, в скоплении $MS1358 + 62$ при $z = 4{,}92$ [110] и в скоплении $A1689-zD1$ при $z = 7{,}5$ [111]. Результаты наблюдений LAE на красных смещениях $z \sim 1-4$ в линиях CII, OIII и др. приведены также в работах [103, 112, 113]. Они позволили оценить звёздную массу как для 130 ярких объектов каталога "Спитцер"/IRAC, которая составляет $\langle M_{\rm star}\rangle = 3 \times 10^{11} M_\odot$, так и для менее ярких $\langle M_{\rm star}\rangle = 10^8 M_\odot$, а также оценить скорость звездообразования $\langle {\rm SFR}\rangle \simeq \simeq 1{,}4 M_\odot$ год$^{-1}$ и динамическую массу $\langle M_{\rm dyn}\rangle = (6 \pm 2) \times \times 10^{10} M_\odot$. Для нескольких LAE оценки массы звёзд, пыли и динамической массы, полученные по данным наблюдений ALMA, представлены в табл. 3.

Так, одним из объектов, представленных в табл. 3, является галактика $B14-65666$ [116] на красном смещении $z = 7{,}15$, у которой измерены полная светимость $L_{\rm tot} \approx 10^{12} L_\odot$, светимость в линии Ly$_\alpha$, $L_\alpha \approx (6{,}8 \pm 1{,}3) \times \times 10^8 L_\odot$, в линии OIII $L_{\rm OIII} = (34{,}4 \pm 4{,}1) \times 10^8 L_\odot$ и в линии CII $L_{\rm CII} = (11{,}0 \pm 1{,}4) \times 10^8 L_\odot$. При этом в линиях CII и OIII наблюдается излучение в двух компонентах, сдвинутых на ~ 200 км с$^{-1}$. Это свидетельствует о том, что наблюдаемое активное звездообразование в этой галактике обусловленно слиянием двух менее массивных галактик.

Таким образом, для обнаружения далёких LAE предлагается проводить наблюдения массивных скоплений галактик, которые являются гравитационными линзами для расположенных за ними LAE. Так, в работе [108] приведён список из нескольких десятков скоплений, которые могут быть использованы для наблюдений LAE обсерваторией Миллиметрон.

2.2.4. Пылевые галактики: DSFGs и LIRGs. Пылевые галактики с высокой скоростью звездообразования (английское Dusty Star Forming Galaxies — DSFGs) представляют собой класс чрезвычайно ярких инфракрасных галактик со скоростью звездообразования ${\rm SFR} \sim 10^3 M_\odot$ год$^{-1}$ кпк$^{-2}$ (см. рис. 44 в [119]) — в пересчёте на нашу Галактику это соответствует скорости звездообразования $10^5 M_\odot$ год$^{-1}$, на пять порядков превышающей действительное значение. Благодаря этому DSFGs наблюдаются на красных смещениях $z \gtrsim 7$ [119]. Бóльшая часть этих галактик содержит в своих недрах затенённые пылью активные галактические ядра со сверхмассивными чёрными дырами, которые часто являются дополнительными или даже основными источниками энергии. Тем не менее звездообразование в них играет принципиально важную роль поставщика пыли. К этому классу галактик относятся, по-видимому, и яркие инфракрасные галактики, сначала обнаруженные в локальной Вселенной ($z < 1$), а потом уже и на больших z.

Яркие инфракрасные галактики [6], в спектрах которых инфракрасная эмиссия превосходит оптическую [120], обнаружены в самом начале развития инфракрасной аст-

[6] Общеупотребительна англоязычная аббревиатура LIRG — Luminous Infra-Red Galaxies. Светимости таких галактик составляют $L = 10^{11} - 10^{12} L_\odot$. Галактики с ИК светимостью на 1, 2, 3 порядка больше, называются ULIRGs, HyLIRGs, ELIRGs — ультра-, гипер-, экстремально яркие галактики соответственно.

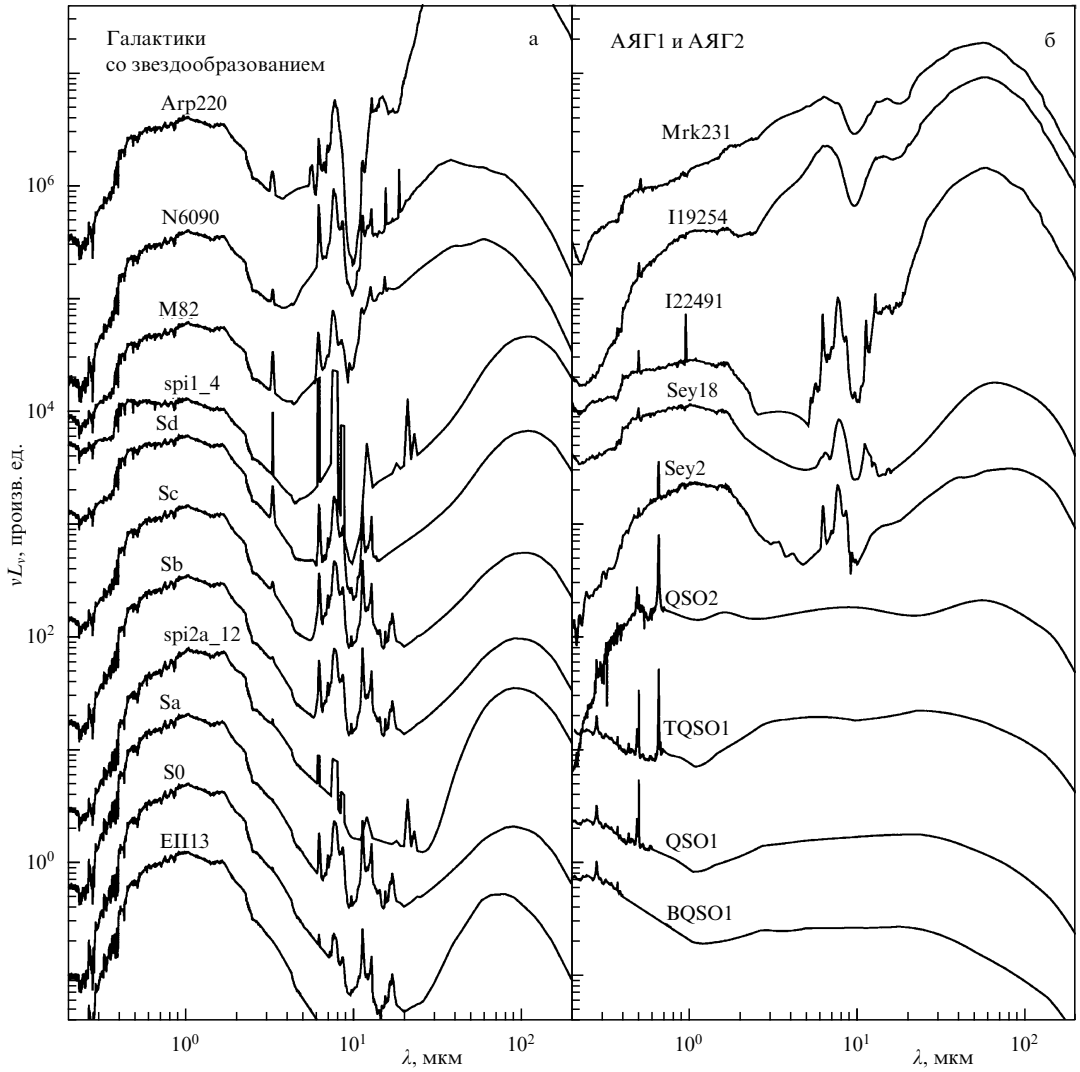


Рис. 10. Сравнение спектральных распределений энергии vL_v в зависимости от λ для галактик различных морфологических типов и галактик с избытком ИК излучения. (а) Снизу вверх: эллиптические, спиральные и галактики со вспышками звездообразования — последние проявляют себя избытком ИК эмиссии. (б) Активные ядра галактик, снизу вверх: АЯГ 1-го и 2-го типов. В АЯГ 2-го типа источники энергии закрыты пылевым слоем. Легко видеть, что при переходе от бедных газом и пылью эллиптических галактик к спиральным и иррегулярным галактикам, к активным ядрам галактик, закрытым пылью, ИК эмиссия всё более преобладает над оптической — последние представляют собой класс объектов LIRGs. (Рисунок взят из SWIRE (Sirtf Wide-area InfraRed Extragalactic survey) Template Library [121], (см. также http://www.iasf-milano.inaf.it/∼polletta/templates/swire_templates.html).)

рономии. Сравнение спектральных распределений энергии нормальных галактик и галактик с избытком ИК излучения (ULIRGs) показано на рис. 10. Преобладание в их спектрах инфракрасного излучения связано с большим количеством пыли, которая задерживает бóльшую часть оптического спектра и переизлучает его в ИК диапазоне. Многообразие свойств определяется в большой мере источниками нагрева пыли. При переходе от LIRGs к ELIRGs увеличивается, по-видимому, доля активного галактического ядра с большей частью энергии от сверхмассивной чёрной дыры в центре. Из-за избыточного количества пыли такие галактики (и в особенности их ядра) оказываются непрозрачны в оптической части спектра, поэтому они не регистрируются оптическими и ультрафиолетовыми телескопами. Типичным примером ULIRGs является галактика Arp220 в близкой к нам окрестности ($\simeq 87$ Мпк, см. более подробное обсуждение в разделе 3.4). Галактики класса ELIRGs достигают светимости $L \sim 3{,}5 \times 10^{14} L_\odot$ — галактика W2246-0526, красное смещение $z = 4{,}59$, $M_\bullet \sim 10^{10} M_\odot$ [122], здесь $M_\bullet$ — масса чёрной дыры. Большая (если не бóльшая) часть галактик класса LIRGs непрозрача к оптическому и, по-видимому, к рентгеновскому излучению с лучевой концентрацией газа выше комптоновского предела $N(\mathrm{H}) > 10^{25}$ см$^{-2}$ [122, 123].

Как DSFGs, так и LIRGs галактики представляют собой исключительно интересный класс объектов для проекта Миллиметрон. Большая оптическая толщина ($N(\mathrm{H}) > 10^{25}$ см$^{-2}$) делает их детальное исследование доступным только в далёкой ИК и субмиллиметровой областях спектра, которые Миллиметрон будет перекрывать полностью. Круг задач, который в настоящее время может решаться только с помощью обсерватории Миллиметрон, может включать исследования таких проблем, как: 1) природа сверхмассивных чёрных дыр с массами в миллиарды солнечной на красных смещениях $z > 4$, т.е. задолго до того, как во Вселенной начинается глобальная (охватывающая всю Вселенную) вспышка звездооб-

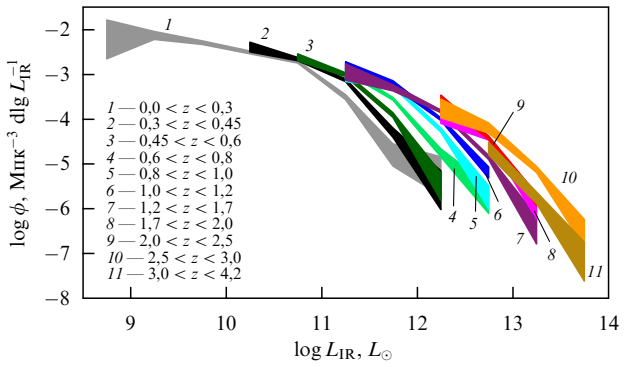


Рис. 11. (В цвете онлайн.) Функция светимости инфракрасных галактик (LIRGs) в интервале красных смещений $z = 0-4{,}2$ [124].

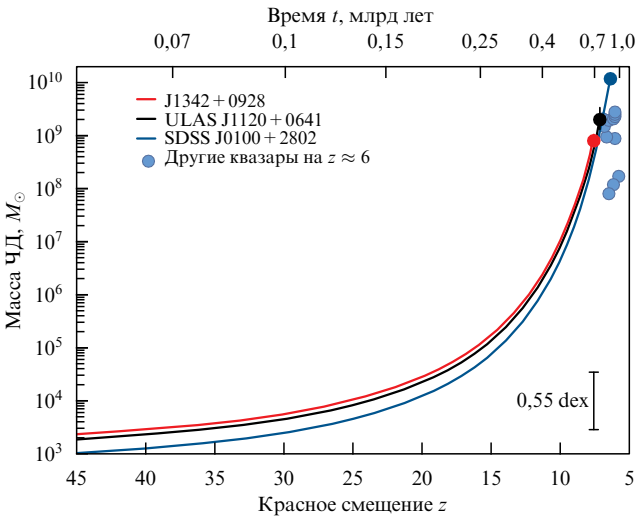


Рис. 12. Рост массы чёрной дыры со светимостью, поддерживаемой на уровне эддингтоновской, и радиационной эффективностью 10 % начиная от момента возникновения зародыша ЧД с массами $M_{\rm seed} = 1000M_\odot$ — нижняя линия, $M_{\rm seed} \simeq 2000M_\odot$ — средняя линия и $M_{\rm seed} = 2500M_\odot$ — верхняя линия, при $z_0 = 45$; массы зародышей при $z = 45$ были выбраны такими, чтобы массы ЧД были равны найденным из наблюдений J1342 + 0928 ($M_\bullet = 7{,}8 \times 10^8 M_\odot$ при $z = 7{,}54$) [131], ULAS (UKIDSS Large Area Survey, UKIDSS — UKIRT Infrared Deep Sky Survey, UKIRT — United Kingdom Infrared Telescope) J1120 + 0641 ($M_\bullet = 2{,}0 \times 10^9 M_\odot$ при $z = 7{,}09$) [130], SDSS (Sloan Digital Sky Survey), J0100 + 2802 ($M_\bullet = 1{,}2 \times 10^{10} M_\odot$ при $z = 6{,}33$) [142].

разования при $z \sim 2$, 2) взаимовлияние процессов роста массы чёрных дыр в центрах галактик и массы звёздного населения во всём объёме галактик, 3) возможное влияние процесса роста динамической массы галактик и чёрной дыры в центре, которое проявляется в корреляции масс центральных чёрных дыр и дисперсии скоростей звёзд в галактиках, 4) процесс возникновения пыли и роста её массы перед глобальной вспышкой звездообразования, и др.

Благодаря своей чрезвычайно высокой светимости LIRGs видны вплоть до красных смещений $z \gtrsim 4$ (рис. 11). Легко видеть, что в среднем LIRGs ярче на больших красных смещениях. Более того, как отмечается в [124], их число там занижено из-за эффектов селекции, связанных с доминированием галактик с фотометрическими красными смещениями.

2.2.5. Первые сверхмассивные чёрные дыры. Наблюдения последних лет демонстрируют большое количество СМЧД (более 200) с массами $M_\bullet \gtrsim 10^9 M_\odot$ на красных смещениях $z \gtrsim 6$ [125–129], из них четыре — с $z > 7$ [130–134]. Это означает, что в пределах первых ~ 700 млн лет во Вселенной уже существовали ЧД с массами $M_\bullet \sim 10^9 M_\odot$. Как много было таких объектов в эти ранние эпохи? Как далеко они простираются вглубь?

Большая часть галактик локальной Вселенной содержат в центральных областях сверхмассивные ЧД с массой, тем большей, чем больше масса звёздного балджа (см., например, [135–138]) и масса тёмного гало [139]. Естественно предположить, что в центральных частях галактик ранней Вселенной, которые в последние годы обнаруживаются вплоть до $z \simeq 11$ (возраст Вселенной около 400 млн лет) [9], также могут находиться сверхмассивные ЧД [7].

В настоящее время отсутствует непротиворечивое понимание сценария возникновения сверхмассивных чёрных дыр на больших ($z \gtrsim 7$) красных смещениях. Основная проблема в том, что необходимый для этого темп аккреции на СМЧД должен либо многократно превышать эддингтоновский предел, если её рост начинается с красных смещений $z \lesssim 10$, либо удерживаться близким к эддингтоновскому пределу, если относить начало роста дыры на бóльшие красные смещения $z \simeq 45-20$ [131] (рис. 12). При этом, однако, на протяжении последних 100–200 млн лет скорость аккреции должна составлять $\dot{M} \gtrsim 15 M_\odot$ в год, что требует исключительных условий для её поддержания (см., например, [130, 131]). Важным может оказаться и то обстоятельство, что отношение масса чёрной дыры/масса галактики для популяции СМЧД с красными смещениями $z = 6-6{,}7$ систематически на порядок-полтора выше, чем для чёрных дыр в более поздние эпохи (рис. 13). Впрочем, нельзя исключить и влияние эффектов наблюдательной селекции, обусловленной тем, что чёрные дыры с меньшей массой и меньшим отношением массы ЧД к массе галактики оказываются под порогом обнаружения.

Проблема с их обнаружением в оптическом диапазоне на красных смещениях $z > 7$ связана с тем, что Вселенная в этот период ионизована не полностью и фактор трансмиссии квантов лаймановской серии невелик (см. обзор проблемы в [143]). Об этом свидетельствуют, в частности, наблюдения квазара J1342 + 0928 с красным смещением 7,5 [131]. В таких условиях наиболее подходящим диапазоном для обнаружения растущих СМЧД и их свойств является ИК диапазон: бальмеровские линии, смещённые в область ближнего ИК телескопом JWST, а пашеновские и бреккетовские — в область далёкого ИК и субмиллиметров. Принимая для консервативной оценки долю полной светимости растущего квазара, которая идёт в линии этих серий, равной 0,1 % и относя квазар J1342 + 0928 на красное смещение $z = 20$ со светимостью на порядок меньше наблюдаемой, найдём наблюдаемый от него поток $F_\nu \sim 10^{-3}$ Ян в области частот ~ 5 ТГц — величина, вполне доступная для Миллиметрона.

[7] Для оценок можно принимать соотношение $M_\bullet = 0{,}002 M_{\rm dyn}$, где $M_{\rm dyn}$ — полная масса галактики (см. [138, 140, 141]). Исходя из существующих данных можно было бы оценить массу чёрной дыры в галактике GN-z11 [9] величиной $\sim 10^7 M_\odot$. При этом, впрочем, следует иметь в виду разброс $\Delta M_\bullet$ при заданной звёздной массе более чем в два порядка величины (см., например, рис. 9б в [140]).

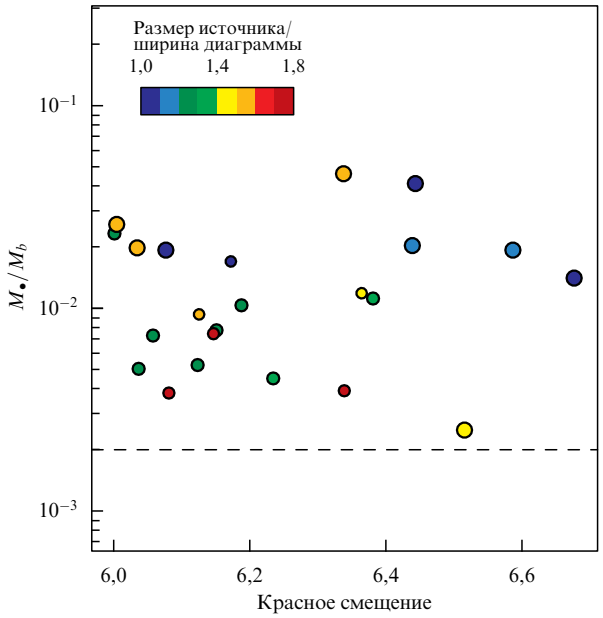


Рис. 13. Отношение массы СМЧД к массе барионов родительской галактики для СМЧД на красных смещениях $z \sim 6$; горизонтальной штриховой линией показано среднее отношение $M_\bullet/M_b$ в современную эпоху $z \sim 0$. (График взят из работы [141].)

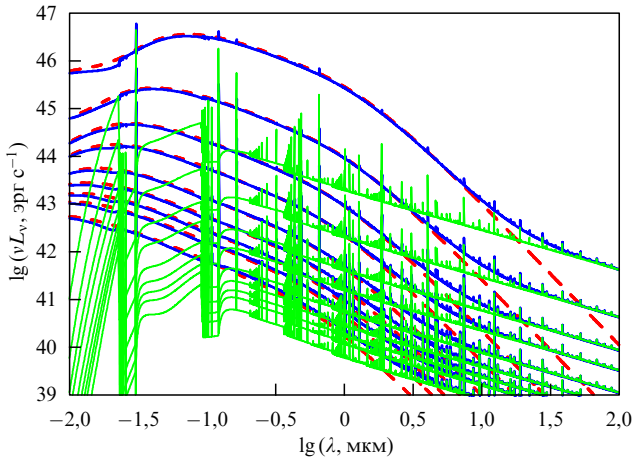


Рис. 14. (В цвете онлайн.) Суммарный спектр OBG: спектр (показан синими линиями), исходящий из аккреционного диска растущей чёрной дыры — красные штриховые линии, и из ионизованного окружающего газа галактики — показан зелёными линиями. Спектр приведён в системе, связанной с чёрной дырой. Масса чёрной дыры увеличивается во времени от $10^5 M_\odot$ при $z = 16$ до $9 \times 10^8 M_\odot$ при $z = 8$; кривые приведены для масс чёрных дыр красных смещений от $z = 16$ до $z = 8$ с интервалом $\Delta z = 1$ снизу вверх (что соответствует точкам на рис. 12). (График взят из работы [144].)

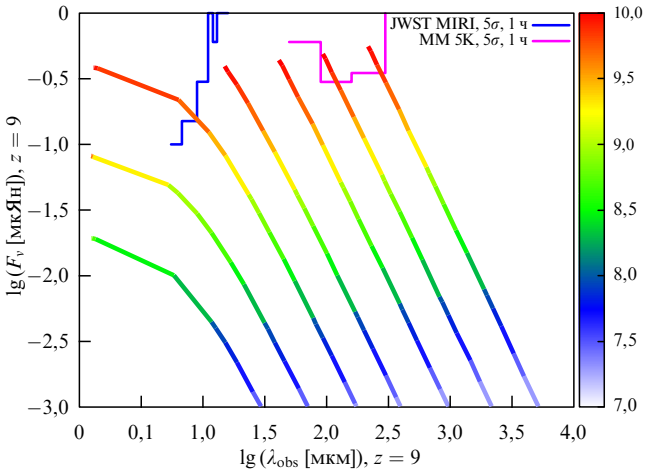


Рис. 15. (В цвете онлайн.) Ожидаемый спектральный поток от растущей чёрной дыры и ионизованного ею газа вблизи частоты излома спектра ν_k при измерениях с низким спектральным разрешением ($R = 100$), излучённый на $z = 9$, для нескольких значений массы чёрной дыры $M_\bullet$: 10^5, $10^{5,5}$, 10^6, $10^{6,5}$, 10^7, $10^{7,5}$, $10^8 M_\odot$ слева направо; цветом вдоль линий показана масса газа в родительской галактике OBG; синяя и фиолетовая линии показывают порог регистрации при времени интегрирования 1 час для телескопов JWST и Миллиметрон. (График из статьи [144].)

Существенным для этой задачи является возможность идентификации сигнала от такого объекта, т.е. уверенное заключение о том, что источником принятого сигнала действительно является растущая сверхмассивная чёрная дыра ("зародыш" квазара). С этой целью в [144] расчитан эмиссионный спектр для модели "тучной галактики" (OBG)[8] — галактики, содержащей растущую массивную чёрную дыру, большое количество газа (с первичным химическим составом), небольшое по массе или отсутствующее звёздное население. Модель OBG непротиворечиво описывает всю картину ранней эволюции галактик, в которых могут возникать сверхмассивные чёрные дыры на красных смещениях $z \gtrsim 8-10$, поэтому представляется в настоящее время наиболее правдоподобной [87, 146, 147]. Оказалось, что, в зависимости от соотношения массы чёрной дыры и массы газа в несущей её галактике, в инфракрасной области суммарного спектра чёрной дыры и горячего газа вокруг неё повляется излом наклона спектра — переход от релей-джинсовского квазичернотельного спектра $\propto \nu^2$ внешних частей аккреционного диска [148] к тормозному спектру $\propto \nu^{-0,118}$ горячего газа, как показано на рис. 14. Частота, на которой происходит этот переход, и соответствующая светимость определяются массой чёрной дыры и массой излучающего газа. При этом спектральные линии водорода и гелия дают возможность определить красное смещение источника.

Ожидаемые потоки от растущих чёрных дыр на красных смещениях $z = 10$ показаны на рис. 15. Легко видеть, что галактики с массами газа $M_g \gtrsim 10^{10} M_\odot$ на частоте излома спектра дают потоки, достижимые обсерваторией Миллиметрон. Оценки в [144] показывают, что количество таких источников с массами чёрных дыр $M_\bullet = 10^7 - 10^8 M_\odot$ на красных смещениях $z = 10-11$ может быть $N \sim 0{,}03-2$ на одну квадратную минуту. В апертуру телескопа Миллиметрон $6' \times 6'$ может попадать по меньшей мере (на нижнем пределе) один такой объект.

Это означает, что в рамках научной программы КОМ возможно прямое обнаружение СМЧД в более глубокой Вселенной. Однако, принимая во внимание чрезвычайно малую вероятность обнаружения даже при условии систематического сканирования неба, единственной возможностью остаётся поиск их проявлений в удалённых галактиках, обнаруженных в ультраглубоких обзорах хаббловского телескопа (см. [74, 75]). Светимость таких галактик в собственной системе $L \sim 10^{10} L_\odot$. На красных

[8] В английской транскрипции obese black hole galaxy, как описано впервые в [145].

смещениях $z > 7$ ожидаемая масса центральной сверхмассивной ЧД для них имеет порядок $M_\bullet \sim 3 \times 10^7 M_\odot$ с эддингтоновской светимостью $L_E \sim 10^{11} L_\odot$ и потоком в субмиллиметрах около 1 мкЯн, доступным для регистрации Миллиметроном при времени накопления сигнала около 3–10 часов. Принимая во внимание, что количество галактик за пределами $z > 9$ по данным обзора CANDELS [149] составляет около одной галактики на 47 квадратных угловых минут, т.е. примерно 0,8 в поле зрения Миллиметрона, вероятность обнаружения хотя бы одной сверхмассивной ЧД велика[9]. Обнаружение чёрных дыр среди галактик эпохи $z > 8$ и измерение их масс прольёт свет на одну из проблем современной космологии — возникновение сверхмассивных ЧД во Вселенной в эпоху реионизации, динамику их быстрого роста. Критически значимой ролью Миллиметрона в этом направлении является возможность измерения низкочастотных эмиссий из окрестности чёрных дыр, а именно, линий пашеновских и бреккетовских серий, для которых межгалактическая среда дореионизационной Вселенной прозрачна.

3. Сверхмассивные объекты во Вселенной

Одна из фундаментальных задач современной науки — исследование свойств пространства-времени и свойств вещества в ближайших окрестностях горизонта событий чёрных дыр — "микроскопия" чёрных дыр. Несмотря на то что о существовании во Вселенной чёрных дыр — компактных релятивистских объектов, предсказанных К. Шварцшильдом на основе точного решения уравнений Эйнштейна [150], известно уже почти полвека со времени обнаружения компактного рентгеновского источника Cygnus X-1, это знание было основано на косвенных данных о высокой рентгеновской светимости источника и его быстрой переменности (см. обсуждение в [151, 152]). Прямые наблюдения затруднены тем, что размеры чёрных дыр, т.е. радиусы их горизонтов событий, чрезвычайно малы. Поэтому "микроскопия" возможна только для сверхмассивных чёрных дыр с помощью интерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами (РСДБ) в субмиллиметровой области, которые способны обеспечить необходимое угловое разрешение. Такие наблюдения проводятся уже на протяжении нескольких лет, но лишь совсем недавно был получен первый обнадёживающий результат. В апреле 2019 г. был опубликован цикл статей с описанием прямых наблюдений, подтверждающих существование чёрной дыры в центре галактики M87, на основе полученного изображения тени вокруг сверхмассивной чёрной дыры — области, из которой к наблюдателю попадает пренебрежимое количество излучения [17, 18]. Тень вокруг чёрной дыры возникает вследствие захвата части квантов, испускаемых аккреционным диском с малым прицельным параметром, — для невращающейся (шварцшильдовской) чёрной дыры $q < 3\sqrt{3} r_g$, $r_g = GM/c^2$ — гравитационный радиус, M — масса чёрной дыры [153, 154], более поздние обсуждения см., например, в [155–162].

На протяжении последних десяти лет группа участников крупного проекта "Телескоп горизонта событий" (Event Horizon Telescope — EHT), работающего в субмиллиметровой части спектра, проводила измерения распределения яркости в ближайшей окрестности чёрных дыр в центре нашей Галактики и в центре галактики M87. Целью измерений было получение изображения тени с размером и формой, предсказываемой общей теорией относительности (см., впрочем, замечание в сноске к разделу 1.3). Результаты анализа измерений яркости вокруг кандидата в СМЧД в M87 позволили заявить об обнаружении ожидаемой тени вокруг чёрной дыры в M87 [17, 18] и тем самым подтвердили справедливость общей теории относительности.

Этот результат группы EHT продемонстрировал наблюдательную разрешимость событий в предельно близкой окрестности сверхмассивных чёрных дыр и поэтому сделал будущие исследования ближайших к нам сверхмассивных ЧД более актуальной и интересной (хотя в техническом исполнении исключительно сложной) задачей. Следующий за этим ряд задач включает в себя ответы на вопросы о детальных процессах в плазме, определяющих эмиссионные характеристики ореола вокруг тени, зависимость их от параметров чёрной дыры (массы, спина и, возможно, заряда), о геометрии и динамическом состоянии магнитного поля в окрестности тени, динамическом состоянии собственно аккреционного течения вблизи тени, о возможности и эффективности генерации космических лучей высоких энергий и др. Этот круг задач будет предметом одного из трёх ключевых проектов космической обсерватории Миллиметрон высшего уровня.

С точки зрения фундаментальной физики, кандидаты в сверхмассивные чёрные дыры интересны не только изображением контура тени вокруг горизонта, но и такими аспектами, как исследования свойств вещества в условиях экстремально высоких плотностей энергии вблизи горизонта событий с помощью спектральных и спектрополяриметрических измерений. Окрестность сверхмассивных чёрных дыр может быть интересна и для понимания происхождения космических лучей сверхвысоких энергий и других высокоэнергичных явлений (см. ниже). Однако, кроме исследования свойств вещества в таких условиях, эти измерения могут оказаться важными и для решения действительно фундаментальной задачи, затрагивающей свойства пространства-времени, — обнаружения наблюдательных проявлений необычных, пока чисто гипотетических, объектов — кротовых нор (см. раздел 3.3).

Из множества сверхмассивных чёрных дыр, детальное исследование структуры области тени которых будет доступно КОМ как в режиме одиночного зеркала, так и в КРСДБ моде, мы выделяем две, угловой размер тени которых и ожидаемые потоки не выходят за пределы углового разрешения и порога чувствительности телескопа: Sgr A* и M87*. Несколько других сравнительно близких галактик, содержащих сверхмассивные ЧД, приведены в табл. 4; более полные списки СМЧД [10], в том числе потенциально интересных для КОМ, могут быть найдены, например, в работах [173, 174]. Предположение о сверхмассивной ЧД в последней в списке таблицы

[9] В этом смысле необнаружение может быть важным результатом с точки зрения понимания ранней эволюции галактик и чёрных дыр в них.

[10] Наиболее полная информация о сверхмассивных чёрных дырах приведена в базе данных NASA: The NASA/IPAC (National Aeronautics and Space Administration/Infrared Processing and Analysis Center) Extragalactic Database (NED) — https://ned.ipac.caltech.edu/.

Таблица 4. СМЧД для Миллиметрона

	M, $M_\odot$	R_S, AU†	D, Мпк††	$\theta_S^\ddagger$	F_{300}, Ян	Литература
MW	4×10^6	8,6(−2)	8,5(−3)	$\simeq 10$	~ 3	[159, 163]
M31	$1{,}4\times10^8$	3	0,75	4	$\sim 1(-2)^*$	[164–166]
M87	6×10^9	124	16,4	8	1	[167–169]
NGC 1600	$\simeq 10^{10}$	$\simeq 200$	50,2	4	—	[170]
NGC 6166	$\simeq 3\times10^{10}$	$\simeq 600$	112	6	—	[170]
Holm15A*	$\sim 10^{11}$	$\simeq 200$	$\simeq 220$	0,9	—	[171, 172]

† AU $= 1{,}5\times10^{13}$ см — астрономическая единица, равная расстоянию от Земли до Солнца,
†† 1 Мпк $= 3\times10^{24}$ см — мегапарсек, 1 пк $= 3\times10^{18}$ см — парсек,
‡ угловой размер дан в микросекундах дуги,
* косвенные указания.

галактике основано на том, что галактика Holm15A является ярчайшей в скоплении A85 и содержит в центре яркий аморфный радиоисточник. Высокая дисперсия скоростей в самом скоплении $\sigma_{cl} \simeq 750$ км с$^{-1}$ может быть связанной именно с тем, что в центре галактики Holm15A находится сверхмассивная чёрная дыра с массой $M_\bullet \simeq 1{,}5\times10^{11} M_\odot$ (см. аргументы в [171]). Несмотря на то что угловые размеры приведённых в табл. 4 чёрных дыр сравнимы, ожидаемые от них потоки либо малы (как от чёрной дыры в галактике M31), либо неизвестны. Поэтому в настоящее время возможность детального исследования ближайшей окрестности теней вокруг них не определена, и они не рассматриваются в качестве основных кандидатов.

3.1. Sgr A*

Источник Sagittarius A* (Sgr A*) — ближайшая к нам сверхмассивная чёрная дыра — долгое время рассматривался как наиболее предпочтительная "мишень" как для получения "изображения" горизонта событий (тени) чёрной дыры [175], так и для исследования физических процессов в его окрестности [163, 176–178]. Благодаря близости эмиссионный спектр Sgr A* детально исследован в широкой полосе частот — от радиоволн ($\sim$ 100 МГц, см. [179]) до жёсткого рентгеновского излучения [180] (см. также обзоры [157, 159]). Поэтому были вполне понятны первые попытки получить изображение тени чёрной дыры именно в Sgr A*.

Выбор частотного диапазона для этой задачи естественно было связать с субмиллиметровым диапазоном, где наблюдается субмиллиметровый "избыток" спектра (bump) с пиком в области 0,3–1 мм [181] (более поздние результаты см. в [182, 183]). Излучение, приходящее от чёрной дыры, — это излучение, возникающее в аккреционном диске вокруг неё, и поэтому характеристики спектра полностью определяются тепловыми и гидродинамическими свойствами аккреционного течения, а также кинетикой излучающих частиц. Пик в субмиллиметровом диапазоне возникает из-за синхротронного самопоглощения на низких частотах при переходе из внутренних оптически толстых областей аккреционного потока к оптически тонким внешним областям. Отсюда следует, что для получения изображения тени наиболее подходят высокие частоты, близкие к частоте субмиллиметрового избытка [181, 184]. Необходимость высокого (в несколько мкс дуги) углового разрешения требует проведения радиоинтерферометрических наблюдений со сверхдлинной (для субмиллиметрового диапазона это порядка радиуса Земли и выше) базой (РСДБ). С этой целью был создан крупномасштабный международный проект "Телескоп горизонта событий" EHT, включающий в себя несколько телескопов миллиметрового диапазона, расположенных на различных континентах: в Европе, США, Мексике, Чили и на Южном полюсе [11]. Задачей EHT было определение формы контура тени чёрной дыры и распределения яркости области вокруг него — "полумесяца" [158]. Эти две взаимосвязанные характеристики определяют параметры метрики пространства-времени в окрестности чёрной дыры при достаточном угловом разрешении и с достаточной чувствительностью по потоку, хотя зависимость распределения яркости и спектра эмиссии "полумесяца" вокруг контура тени от магнитогидродинамического поля в аккреционном потоке безусловна. По этой причине определение параметров метрики остаётся трудноразрешимой проблемой [185–188]. Несмотря на усилия, изображение тени вокруг чёрной дыры в Sgr A* получить не удалось даже на самой высокой частоте EHT $\nu = 230$ ГГц (1,3 мм), формально обеспечивающей угловое разрешение почти в 2 раза меньше ожидаемого радиуса тени [189]. Причина этого может крыться в свойствах плазменной среды на луче зрения.

3.1.1. Эффекты рефракторного рассеяния на изображение тени. Существенным фактором, отягчающим построение изображения сверхмассивных чёрных дыр, является уширение углового размера изображения $\theta \propto \lambda^2$ за счёт рассеяния на турбулентных неоднородностях межзвёздной плазмы на луче зрения [190].

Сводная зависимость углового размера изображения от длины волны показана на рис. 16 [191] (детали могут быть найдены также в других работах [183, 192, 193]). Отсюда легко видеть, что при наблюдениях Sgr A* на длинах волн $\lambda \lesssim 1{,}3$ мм угловое разрешение оказывается уже под порогом размера тени ЧД ($\theta \simeq 50$ мкс дуги). Последние наблюдения Sgr A* с включением в конфигурацию EHT телескопа APEX в Чили позволили практически удвоить базу РСДБ и достичь на длине волны 1,3 мм размера трёх радиусов Шварцшильда ($\theta \simeq 30$ мкс дуги), что в $\sqrt{3}$ раз меньше размера тени, однако её изображение осталось неразличимым, по-видимому, именно из-за рефракторного рассеяния [189].

Таким образом, эффекты рефракторного рассеяния оказываются критически важными для получения изо-

[11] IRAM/NOEMA (Institut de Radioastronomie Millimétrique/Northern Extended Millimeter Array) в Европе, JCMT/SMA (James Clerk Maxwell Telescope/Submillimeter Array), SMTO/KPNO (Submillimeter Telescope Observatory/Kitt Peak National Observatory) в США, APEX (Atacama Pathfinder EXperiment), ALMA в Чили, LMT (Large Millimeter Telescope) в Мексике и South Pole Telescope на Южном полюсе, см. https://eventhorizontelescope.org.

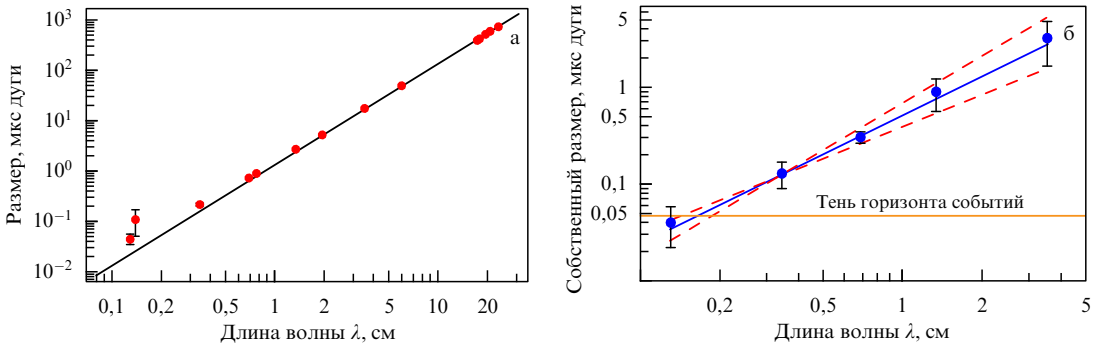


Рис. 16. Эффекты рассеяния при РСДБ наблюдениях источника Sgr A* (см. [157]). (а) Видимый угловой размер источника вдоль большой полуоси в зависимости от длины волны — легко видна зависимость $\theta \propto \lambda^2$, обусловленная рассеянием на турбулентных неоднородностях среды. (б) Зависимость видимого углового размера источника после вычитания из наблюдательных точек зависимости $\theta \propto \lambda^2 + \text{const}$, связанной с вкладом межзвёздной среды — это соответствует близкой окрестности чёрной дыры; горизонтальной линией показан угловой размер тени чёрной дыры. (Из работы [191].)

бражения с точностью, необходимой для уверенного заключения о метрике пространства-времени в окрестности чёрной дыры Sgr A* и, собственно, для решения основной задачи ЕНТ. Эффекты рассеяния, в свою очередь, определяются характером турбулентности плазмы на всём луче зрения и особенно в ближайшей окрестности чёрной дыры. В частности, рассеяние на неоднородностях электронной концентрации при прохождении сквозь турбулентную плазму приводит к отклонению луча на угол $\langle\theta\rangle \propto \langle\Delta n_e/\sqrt{a}\rangle$, Δn_e — амплитуда флуктуаций электронной плотности, a — характерный размер турбулентной ячейки (см. [194, 195]). Отсюда видно, что усиление в спектре флуктуаций высокочастотных гармоник будет приводить к увеличению роли рассеяния. Действительно, недавние расчёты показали, что даже сравнительно незначительное изменение спектра мощности $Q(\mathbf{q}) \propto |\mathbf{q}|^{-\beta}$ ($\mathbf{q}$ — волновой вектор, β — наклон спектра) турбулентности от колмогоровского ($\beta = 11/3$) к более плоскому спектру ($\beta = 3{,}38$) приводит к увеличению пятна рассеяния (т.е. уширению углового размера изображения) и других связанных с рассеянием характеристик, искажающих форму изображения, на порядок [196].

Это обстоятельство указывает на необходимость использования в КРСДБ наблюдениях приёмников с бóльшими частотами, для которых радиус пятна рефракторного рассеяния был бы меньше, чем на частоте 230 ГГц. Такая возможность появится с вводом в строй КОМ с последующей кооперацией с ЕНТ на самых коротких волнах. Её реализация позволит проникнуть в более глубокие слои окрестности тени вокруг чёрной дыры Sgr A* и, с одной стороны, получить её изображение, с другой — понять природу и пределы эффектов рассеяния в её окрестности. Примеры синтетических наблюдений в такой конфигурации выполнены в недавних вычислительных экспериментах групп проекта "Спектр-М" и ЕНТ [23].

Здесь следует отметить одно существенное обстоятельство, связанное с переменностью в центральных областях аккреционного потока и распределения его яркости, которая может проявляться, в частности, в переменности яркости вокруг контура тени — в области полумесяца, а также над тенью. Существующие исследования показывают переменность светимости чёрной дыры Sgr A* в ИК и субмиллиметровой областях спектра в широкой временно́й шкале: от долей минут до нескольких месяцев [197 – 199]. Синтетические динамические КРСДБ наблюдения Sgr A* в конфигурации Миллиметрон-ЕНТ с временны́м разрешением 221 с уверенно демонстрируют возможность построения изображений тени и окружающего её полумесяца с учётом возможных вариаций распределения яркости [23].

В последнее время обсуждаются альтернативные подходы, также включающие РСДБ проекты космос – космос с двумя-тремя космическими аппаратами на околоземной орбите [200].

3.1.2. Измерения темпа аккреции на чёрную дыру. Определение темпа аккреции $\dot{M}_{\rm acc}$ является приципиально важной задачей для понимания процессов, происходящих в самой близкой окрестности чёрной дыры, механизмов трансформации массы аккрецируемого вещества в излучение чёрной дыры, а также свойств плазмы в её окрестности, определяющих в конечном итоге возможность получения информации из областей, непосредственно прилегающих к её тени. Вместе с тем существующие в настоящее время оценки темпа аккреции крайне неопределённы — они могут различаться на порядки величины (см., например, [201 – 203]).

Рентгеновские наблюдения (0,5 – 10 кэВ) на телескопе "Чандра" с высоким ($\sim 1''$) разрешением дают оценку темпа аккреции $\dot{M}_{\rm acc} \sim 10^{-6} M_\odot$ в год, однако эта оценка относится к периферийным областям аккреционного потока размером 0,04 × 0,04 пк вокруг центра Галактики [204].

Определение $\dot{M}_{\rm acc}$ в более глубоких слоях основано на субмиллиметровых измерениях линейной поляризации и меры фарадеевского вращения RM. Изменение позиционного угла поляризации за счёт эффекта Фарадея определяется выражением $\chi(\lambda) = \chi_0 + \lambda^2 \mathrm{RM}$, где[12] $\mathrm{RM} = V \int n_e \mathbf{B}\,\mathrm{d}\mathbf{l}$. Измерение разности позиционных углов на двух соседних длинах волн позволяет найти меру вращения $\mathrm{RM} = [\chi(\lambda_1) - \chi(\lambda_2)]/(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)$, а это, в свою очередь, позволяет определить темп аккреции в рамках той или иной модели аккреционного течения. Как правило, в оценках предполагается сферически симметричное течение со степенны́м профилем плотности $n(r) \propto r^{-\beta}$, β при-

[12] $V = e^3/2\pi m_e^2 c^4 = 8{,}1 \times 10^5$ рад м$^{-2}$, если под интегралом n_e измеряется в см$^{-3}$, B — в микрогауссах, l — в парсеках [205].

нимает значения от $1/2$ в модели конвективно-доминированной аккреции (CDAF, [206]) до $3/2$ в моделях Бонди ([207], см. также обзор [208]) и модели адвективных дисков (ADAF, [209]). С учётом неопределённостей моделей, особенно неопределённости конфигурации магнитного поля, оценки сверху скорости аккреции варьируются от $\sim 10^{-7}$ (в измерениях на частоте 230 ГГц, [201]) до $\sim 10^{-6} M_\odot$ в год (340 ГГц, [202]).

Оценки скорости аккреции, основанные на измерениях яркостной температуры радиорекомбинационной линии H30α в окрестности Sgr A* $\sim 10^5 R_S$ [203], отягощены модельными предположениями ещё в большей степени — от $\sim 2{,}7 \times 10^{-10} M_\odot$ в год до $\sim 1{,}2 \times 10^{-7} M_\odot$ в год в зависимости от предположения о характере течения в аккреционной области. Более того, оценка $\dot{M}_{\rm acc}$ в этом случае может быть завышена из-за возможности мазерного эффекта в линии H30α.

В целом характер изменения темпа аккреции $\dot{M}_{\rm acc}$ при переходе к меньшим масштабам остаётся крайне неопределённым. С учётом принципиальной значимости зависимости $\dot{M}_{\rm acc}(r)$ для понимания физики процессов в окрестности горизонта чёрной дыры Sgr A*, в том числе для наблюдаемости тени вокруг неё, представляется важным проведение комплексных измерений спектра, поляризации и фарадеевского вращения на масштабах от R_S до $\sim 10^5 - 10^6 R_S$, включая РСДБ наблюдения на длинах волн $\lambda = 420 - 500$ мкм.

3.2. M87

Галактика M87 находится от нас на расстоянии $\simeq 17$ мегапарсек (Мпк), масса чёрной дыры в ней равна $M_{\rm BH} \simeq 6 \times 10^9 M_\odot$. Поэтому угловой размер, соответствующий гравитационному радиусу и размеру тени, равен $\theta_g \simeq 4$ и $\theta_s \simeq 40$ мкс дуги, что практически совпадает со значениями для чёрной дыры в центре нашей Галактики. Спектральный поток на частоте 300 ГГц от чёрной дыры в M87 $F_\nu \sim 1$ Ян также близок к спектральному потоку от чёрной дыры в Sgr A* $F_\nu \sim 3$ Ян (см. табл. 4). Поэтому с наблюдательной точки зрения они практически эквивалентны. Тем более разительным представляется успешное наблюдение тени вокруг СМЧД в M87 и неудачные попытки увидеть тень вокруг Sgr A*. Одна из очевидных причин — различие в величине рефракторного рассеяния. Из общих соображений, рефракторное рассеяние в галактике M87 должно быть меньше из-за низкой плотности и высокой температуры газа: $n_e \sim 0{,}2$ см$^{-3}$ и $T \sim 1$ кэВ в самой центральной области радиуса $r < 300$ пк [210] — следствием низкой плотности электронов является и меньшая амплитуда флуктуаций $|\Delta n_e|$, следствием высокой температуры и низкой электронной плотности является увеличение диссипативного масштаба и, соответственно, большее значение размера турбулентной ячейки a.

3.2.1. Субструктура ореола тени на высоких гармониках. Миллиметрон в рамках КРСДБ с базой в 1000 Гλ будет разрешать тонкую структуру яркого кольца вокруг тени ЧД [155]. Ореол вокруг тени чёрной дыры представляет собой суперпозицию колец, соответствующих числу "полуорбит" n квантов на их пути от источника — аккреционного диска вокруг чёрной дыры — до наблюдателя [155, 156, 211]. Профили последовательных колец с $n > 1$ "обостряются", т.е. становятся всё более (экспоненциально) крутыми, приближаясь к границе тени. На графике зависимости интерферометрической функции видности от длины базы каждое значение n проявляется в виде набора гармоник, как это показано на рис. 17. Амплитуда огибающих гармоник изменяется с длиной базы как $\propto u^{-3/2}$, хотя в пределах фиксированной гармоники амплитуда ведёт себя как $\propto u^{-1/2} \exp(-wu^\zeta)$, где $w = w(n)$ и $\zeta = \zeta(n)$ — параметры [155]. Легко видеть, что из-за экспоненциального обострения профиля амплитуд видности с увеличением n и размера базы современное максимально достижимое угловое разрешение $\theta \simeq 20$ угловых мкс явно недостаточно не только для разрешения тонкой структуры фотонных колец, но даже для асимптотики на больших базах $u \gtrsim 10^{12}\lambda$, где проявляются закономерности, отличающие поведение для различных n ($n = 1, 2, 3$). Как видно из рис. 17, это станет возможным только с обсерваторией Миллиметрон даже на высокоэллиптической орбите, а если говорить об орбите в точке L2 с бóльшими значениями базы $u > 300$ Гλ, то будет возможным измерять асимптотику $u^{-3/2}$ для $n > 1$.

3.2.2. Исследование физических процессов в окрестности горизонта событий. Безусловным преимуществом обсерватории Миллиметрон по сравнению с консорциумом EHT в его современных конфигурациях является возможность многочастотных (пóлосы ~ 100, 240, 310 и 640 ГГц) РСДБ наблюдений. Это позволит производить поляризационные наблюдения ближайшей окрестности чёрных дыр в Sgr A* и M87, что само по себе существенно уменьшит разброс статистически приемлемых моделей, осуществляемых сравнением результатов наблюдений с результатами численных экспериментов, и тем самым повысит достоверность количественных выводов. Принципиально важным результатом спектрополяриметрических наблюдений будет измерение фарадеевского вращения и магнитного поля на шварцшильдовских масштабах, в особенности их пространственных и временны́х вариаций. Эти данные дадут информацию о характере турбулентности плазмы вблизи окрестности тени, о механизмах генерации и условиях переноса излучения. Вопрос о турбулентности в окрестности тени далеко не праздный — характером турбулентности может определяться и степень искажения тени пятном рефракторного рассеяния. В самом деле, турбулентные пульсации на масштабах в несколько гравитационных радиусов с характерными временами от десятков секунд до нескольких минут при больших временах накопления сигнала в РСДБ наблюдениях могут накладываться и в совокупности увеличивать пятно рефракторного рассеяния. Такое наложение может проявляться в достаточно широком спектре эмиссии и препятствовать достижению радиуса тени ЧД даже на высоких частотах. Учитывая, что временны́е вариации интенсивности от чёрной дыры Sgr A* в далёкой ИК и субмиллиметровой области могут достигать одного порядка величины [163], эффект вряд ли может быть пренебрежим и его количественный наблюдательный анализ критически важен. Здесь необходимо отметить, что в этой же области спектра могут проявляться и более крупномасштабные структурные изменения аккреционного течения в области тени [212, 213], которые также могут давать вклад в уширение пятна рассеяния в режиме РСДБ.

Пожалуй, не менее значительными будут и результаты, которые можно будет извлечь из спектрополяриметрических наблюдений более широкой окрестности

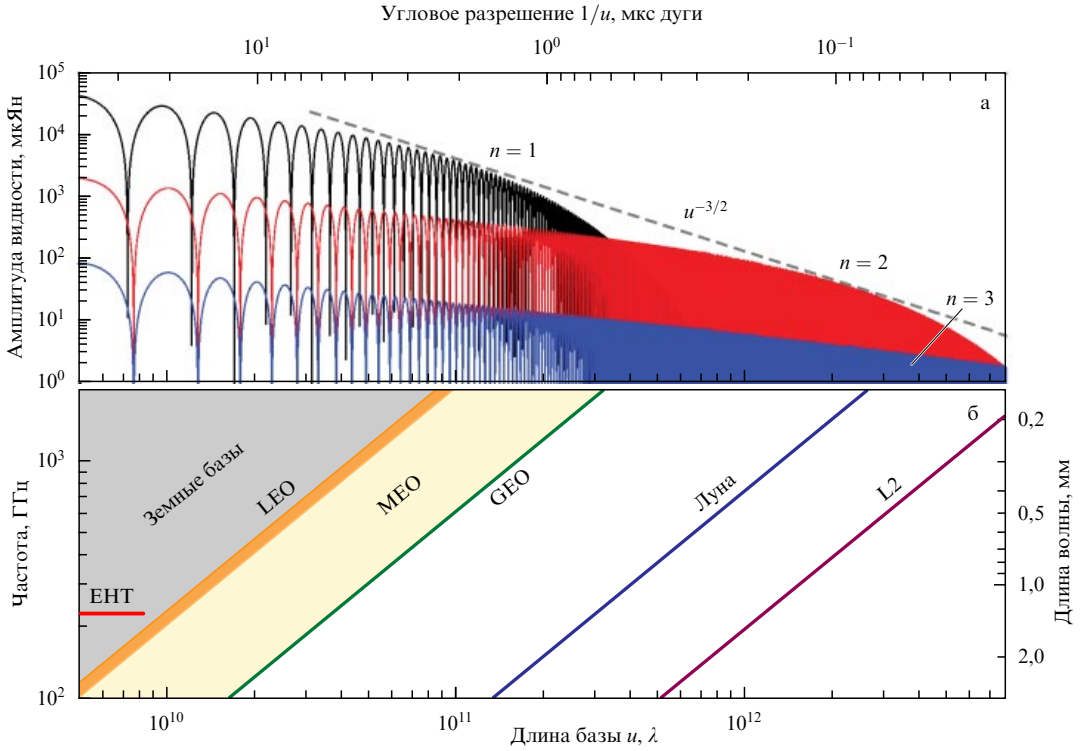


Рис. 17. (В цвете онлайн.) (а) Распределение амплитуды видности в зависимости от длины базы для фотонного кольца с угловым размером $\theta = 40$ угл. мкс для спектрального потока, сравнимого с потоком от M87. Чёрная, красная и синяя линии соответствуют $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$. (б) Приведены базы с размером Земли (соответствуют проекту EHT), с размером близкой (LEO), средней (MEO) околоземной и геостационарной (GEO) орбит, окололунной орбиты (Moon) и точке L2, слева направо. С увеличением размера базы амплитуда видимости уменьшается как $u^{-3/2}$. (График взят из работы [155].)

чёрных дыр Sgr A*, M87*, вплоть до радиуса Бонди $R_B \sim \sim 10^5 R_S$ (для СМЧД M87* это составляет около 0,1 пк). Здесь чрезвычайно информативными могут быть измерения многочастотных узоров перемежаемости (включая дифференциальные характеристики) и их пространственных профилей в широком поле. Целью этих измерений являются характеристики турбулентности (спектр мощности, диссипативный масштаб), предел рефракторного рассеяния, характеристики гипотетического джета, направленного вдоль луча зрения (см. обсуждение в [189]), характеристики аккреционного потока, механизмы "потери" темпа аккреции при переходе от периферии к меньшим радиусам. Измерения этого рода важны не только с точки зрения понимания физических процессов аккрецируемой плазмы, что само по себе важно для правильной интерпретации плазмы вблизи тени, но и для построения радиального усреднённого профиля плотности и скорости аккреционного потока и, как следствие, получения более обоснованной оценки темпа аккреции. Этой же цели будут служить и измерения магнитного поля – величины, топологии и радиальной зависимости в акреционном диске и вне его. Современные оценки темпа аккреции основаны на измерениях меры фарадеевского вращения RM с последующей (в большой мере произвольной) подгонкой параметров аккреционного потока к измеренному значению RM (см. обсуждения в [214, 215] и в разделе 3.1.2). Определение величины и радиального профиля магнитного поля имеет принципиально важное значение также и с точки зрения потенциальных наблюдательных проявлений кротовых нор.

3.3. Кротовые норы и Миллиметрон

Одним из важнейших исследовательских проектов для обсерватории Миллиметрон является поиск кротовых нор. Кротовая нора — теоретически предсказанный общей теорией относительности (ОТО) объект [216–218], состоящий из двух входов — трёхмерных отверстий в пространстве, соединённых тоннелем, лежащим вне нашего пространства-времени — в суперпространстве. Отверстия могут находиться в пространстве очень далеко друг от друга, длина тоннеля в суперпространстве может быть очень малой. Входы могут быть даже в разных вселенных. В отличие от чёрных дыр, кротовые норы до сих пор не открыты в наблюдательной астрофизике. Заметим, что в рамках ОТО был теоретически предсказан целый ряд объектов, которые вначале категорически отвергались как многими теоретиками, так и наблюдателями по причине их крайней необычности. Среди них можно назвать нейтронные звёзды, чёрные дыры, Λ-член в уравнениях ОТО. Лишь спустя десятилетия после кропотливой работы теоретиков и наблюдателей они были открыты во Вселенной. В ряду таких необычных объектов кротовые норы занимают особое место, потому что возможность их существования позволит исследовать вопрос о сложной топологии пространства и о существовании других вселенных, что имеет мировозренческое значение. Была предложена гипотеза [219], что ядра некоторых галактик могут быть входами в кротовые норы, а не сверхмассивными чёрными дырами. Проект предполагает проверку гипотезы о кротовых норах по характерным отличиям наблюда-

тельных свойств входов в кротовые норы от свойств чёрных дыр.

Кротовые норы бывают двух типов: с тоннелями, ориентированными в пространстве (пространственноподобные) и ориентированными во времени (времениподобные) [220]. Проект направлен на поиски кротовых нор первого типа, так как они обладают наиболее яркими наблюдательными отличиями и лучше изучены теоретически. Мы будем далее говорить о них, лишь в необходимых случаях упоминая кротовые норы второго типа.

Массы входов кротовых нор первого типа могут быть любыми, не равными друг другу в каждой паре и даже отрицательными. Входы (они же — выходы) не имеют, в отличие от чёрных дыр, горизонтов событий и вообще резких границ, в них можно входить и выходить. Кротовые норы, в принципе, могут быть статическими или квазистатическими. Они могут быть проходимыми в обоих направлениях для вещества и излучения. Сквозь них по тоннелю может проходить радиальное магнитное поле от одного входа до другого, сдерживаемое от расширения топологией пространства — тоннелями. Выходы тогда будут выглядеть как магнитные монополи противоположного знака. Заметим, что при отсутствии в природе элементарных магнитных монополей подобные поля в чёрных дырах существовать не могут [13].

Основными наблюдательными доказательствами того, что компактный объект является входом в кротовую нору, а не чёрной дырой, можно считать следующие:

• Магнитное поле у самого входа является монопольным. Оценка максимального значения магнитного поля составляет

$$H = 3\times 10^{10}\left(\frac{3\times 10^{14}\text{ см}}{R_{\rm th}}\right)\text{ Гс}\,, \qquad (11)$$

здесь $R_{\rm th}$ — радиус горловины кротовой норы.

• Возможность истечения материи из входа, т.е. наблюдение фиолетового смещения в излучении от такого течения вблизи входа, что невозможно для чёрной дыры. Величина фиолетового смещения зависит от интенсивности течения сквозь кротовую нору, которая заранее неизвестна.

• Возможность видеть сквозь тоннель кротовой норы другие области нашей Вселенной или даже области других вселенных. Это ведёт к тому, что тень в случае кротовой норы будет специфической — с видимыми структурами на её фоне, которые будут много меньше размеров тени.

• Принципиальная возможность видеть внутренность кротовой норы и пространство вне противоположного входа ведёт к тому, что интенсивность суммарного излучения, прошедшего сквозь кротовую нору, может варьироваться с характерным временем меньше размера выхода, делённого на скорость света. При этом необходимо учитывать изменение темпа течения времени при быстрых движениях и в сильных гравитационных полях.

Все перечисленные наблюдательные свойства являются достаточными, но не необходимыми.

[13] Теоретически вместо магнитного поля можно рассматривать электрическое. Однако в реальных астрофизических условиях электрический заряд быстро нейтрализуется заряженными частицами противоположного знака. Поэтому мы такую возможность не рассматриваем.

Гравитационный коллапс пространственноподобной кротовой норы при нарушении равновесия ведёт к возникновению двух чёрных дыр на месте входов [221]. Эти чёрные дыры соединены в суперпространстве сингулярностью, возникающей при коллапсе. При наличии в исходной кротовой норе пронизывающего её магнитного поля это поле будет сохраняться у выходов из чёрных дыр (детали см. в [221]).

Заметим в заключение, что строение тоннелей времениподобных кротовых нор много сложнее и содержит, в частности, коши-горизонты и бесконечные области пространства-времени, не принадлежащие к нашей Вселенной. Поэтому процессы, протекающие за горизонтами Коши, зависят не только от условий в нашей Вселенной, но и от процессов в этих добавочных структурах (см. [220]).

Значимость.

Открытие кротовых нор означало бы переворот в современной астрофизике, доказывающий существование принципиально новых объектов, сложную топологическую структуру пространства-времени и даже возможность существования других вселенных.

Результаты имеют не только фундаментальное значение для астрофизики, физики и науки в целом, но и носят мировоззренческий характер.

Реализуемость.

Исследование с помощью КОМ будет выполняться на основе прямых КРСДБ-наблюдений, включая поляризационные наблюдения с недостижимым ранее сверхвысоким угловым разрешением. Оценки показывают, что такие наблюдения возможны для центра нашей Галактики и ряда других галактик (см. обсуждение выше в разделах 3.1, 3.1.1 и 3.2). Важно подчеркнуть, что наблюдения по программе поиска кротовых нор включают только те исследования, которые нужны для изучения физических процессов и геометрии пространства-времени в окрестности горизонта событий возможных кандидатов в чёрные дыры. Следовательно, они не требуют дополнительных технических и временны́х ресурсов. В связи с этим выявление величины и пространственного профиля магнитого поля может иметь принципиально важное значение. Известно, что магнитное поле в аккреционных дисках вокруг сверхмассивных чёрных дыр описывается радиальным профилем $\propto r^{-1}$, а верхняя граница его величины имеет порядок $H\sim 10^3-10^4$ Гс (см., например, [222]). Поэтому обнаружение превышающего этот верхний предел поля или отличного от закона r^{-1} радиального распределения может указывать на возможность кротовой норы (краткое обсуждение этих аспектов приведено в [223]).

3.3.1. Исследование пространства-времени в окрестности горизонта событий. Важным преимуществом Миллиметрона по сравнению с существующими и планируемыми на ближайшее десятилетие проектами является потенциальная (зависящая от орбиты) возможность измерять пространственно-временные масштабы существенно меньше шварцшильдовских $2r_{\rm g}$ и $2r_{\rm g}/c$, соответствующих ближайшим к нам массивным чёрным дырам (МЧД) (см. табл. 4). Шварцшильдовский угловой радиус в Sgr A* и M87 имеет порядок ~ 10 мкс дуги. Даже для орбиты Миллиметрон с радиусом порядка радиуса орбиты Луны интерферометр "Земля – космос" на максимальной длине волны, общей для обсерватории Милли-

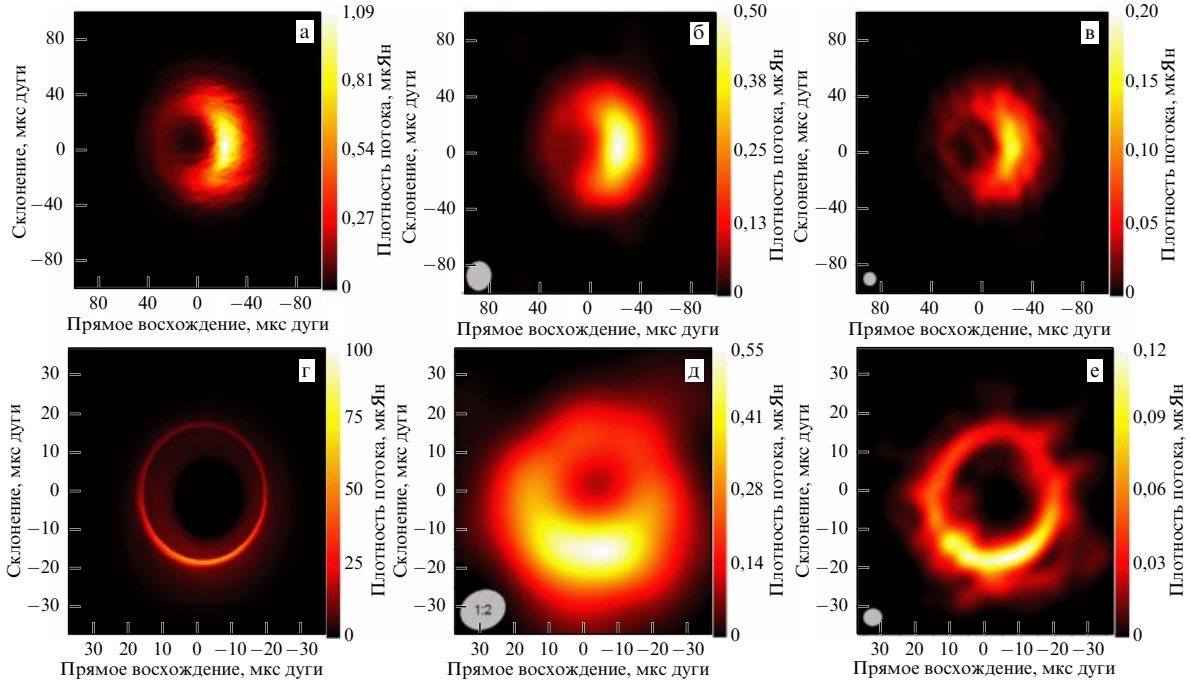


Рис. 18. (В цвете онлайн.) Восстановленные РСДБ изображения источников Sgr A* (а, б, в) и M87 (г, д, е) на частоте 230 ГГц. (а, г) Усреднённые МГД модели ((а) — изображение Sgr A* с учётом рассеяния, (г) — M87* с параметрами, соответствующими наблюдениям ЕНТ 2017 г. [20]). (б, д) Восстановленные РСДБ изображения с использованием наземных телескопов, входящих в ЕНТ. (в, е) Восстановленные РСДБ изображения с использованием наземных телескопов, входящих в ЕНТ, и космического телескопа Миллиметрон на околоземной эллиптической орбите. (Изображения взяты из статьи [23].)

метрон и ALMA, $\lambda = 3$ мм даст угловое разрешение $\theta \sim 2$ мкс дуги. Та же конфигурация для орбиты Миллиметрон в точке Лагранжа L2 даст $\theta \sim 0{,}4$ мкс дуги. В первом случае это в 5 раз меньше радиуса Шварцшильда, во втором — в 25 раз! Реализация этой возможности позволила бы не только измерять геометрию и физику тонкой структуры ореола вокруг теней чёрных дыр ближайшей к нам окрестности, но и решить немыслимую ранее задачу — регистрировать потенциально возможные события с масштабами меньше шварцшильдовских. Это позволило бы уже проверить существование (достаточных) признаков кротовой норы в источнике Sgr A* и в центре галактики M87 (см. выше в разделе 3.3), понимая под значением гравитационного радиуса r_g центрального объекта в источнике Sgr A* или в галактике M87 размер горловины кротовой норы.

Реализация орбиты КОМ в точке L2 позволит исследовать окрестности теней чёрных дыр и возможных признаков кротовых нор в других галактиках, приведённых в табл. 4, с заметно меньшими угловыми размерами шварцшильдовских радиусов, что принципиально расширит наши возможности исследования многообразия геометрии пространства-времени и физических процессов в условиях сильных гравитационных полей. При обсуждении возможности таких измерений в ближайших к нам сверхмассивных объектах Sgr A* и M87* речь может идти об угловых и временны́х разрешениях, меньших (и заметно меньших) $\Delta\theta \sim 5$ мкс дуги и $\Delta t \sim 20$ с и $\Delta t \sim 25$ мин соответственно.

В последние годы появились обсуждения расширения методов РСДБ для исследования объектов и явлений не только с предельно малыми угловыми размерами, но и с вариациями физических характеристик на соответствующих им малых временны́х масштабах [224–226]. Такой подход построения "динамических" изображений методами РСДБ основан на простом разделении изображений во времени с интервалами, достаточными для регистрации сигнала с заданным уровнем чувствительности. Пример синтетических "динамических" РСДБ-изображений ореола вокруг тени чёрной дыры в M87 приведён на рис. 18, где в качестве источника использована релятивистская магнитогидродинамическая модель свечения аккреционного диска вокруг чёрной дыры M87*.

Если говорить о наблюдениях Sgr A* на длине волны $\lambda = 3$ мм с базой $\sim 500\ \Gamma\lambda$, что соответствует точке L2, то разрешаться будут детали с угловым размером $\sim 0{,}6$ мкс дуги, т.е. с пространственными масштабами $\sim 0{,}15 r_g$, при этом амплитуда функции видности будет составлять $V \sim 30$ мЯн. Это означает, что с чувствительностью обсерватории Миллиметрон ~ 1 мЯн (рассчитанной на 1 час времени интегрирования) достаточно будет разделения во времени в несколько минут. Это заметно превышает характерное время $t_g = r_g/c \sim 20$ с для чёрной дыры или гипотетической кротовой норы в Sgr A*, однако сравнимо с характерным временем вблизи тени $t_{sh} \gtrsim 3\sqrt{3} r_g/c \sim 2$ мин. Если говорить о возможности наблюдения временны́х вариаций в окрестности входа в кротовую нору с радиусом, равным радиусу Шварцшильда для Sgr A* $r = r_g$, имея в виду, что эффективные массы у входов в кротовую нору и распределение гравитационного потенциала по тоннелю сильно зависят от выбранной модели, то можно предположить, что красное смещение в излучении наблюдаемого вещества будет достаточно большим и "динамические" РСДБ наблюдения средствами обсерватории Миллиметрон будут возможны.

3.3.2. "Микроскопия" СМЧД далёкой Вселенной. Разумеется, возможности КОМ в исследовании окрестности

горизонта чёрных дыр не ограничиваются только ближайшими к нам СМЧД в центре нашей Галактики и в M87. Один из таких объектов — квазар TON 618 с оптической светимостью $\lambda L_\lambda \sim 2 \times 10^{47}$ эрг с$^{-1}$ и массой чёрной дыры $M_{\rm BH} \simeq 6 \times 10^{10} M_\odot$ [227]. Несмотря на то что квазар находится на красном смещении $z = 2{,}2$, окрестность тени чёрной дыры может быть доступна детальному исследованию в рамках программы РСДБ на обсерватории Миллиметрон. Кроме отмеченных выше проблем, связанных с измерениями геометрии пространства-времени и динамики плазмы в близкой окрестности чёрных дыр, наблюдения далёких СМЧД могут представлять фундаментальной важности интерес с точки зрения понимания природы космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий. В последние несколько лет появилось много наблюдательных указаний на то, что происхождение КЛ со сверхвысокими энергиями (в том числе нейтрино) от сотен ТэВ до нескольких ПэВ может быть связано с квазарами, а именно с особым их классом — блазарами, ультрарелятивистские джеты которых направлены вдоль луча зрения, то есть "к нам". Здесь можно назвать один из таких блазаров TXS 0506+056, от которого зарегистрирован мощный поток нейтрино с энергиями до ПэВ и гамма-излучением [228], см. также дополнение при корректуре. Радионаблюдения TXS 0506+056 указывают на то, что генератор как гамма-излучения, так и высокоэнергичных нейтрино может находиться в самых внутренних (близких к горизонту) областях аккреционного диска [229], и подтверждение этому может быть получено с помощью обсерватории Миллиметрон. В настоящее время оценить уверенно такую возможность сложно из-за отсутствия уверенных наблюдательных данных о потоках ЭМ излучения от этих источников в субмиллиметровой области спектра.

3.4. Поиск затенённых СМЧД в галактиках-мёрджерах: Arp220

Галактики-мёрджеры (сливающиеся галактики) представляют собой основное элементарное событие в иерархическом сценарии построения спектра масс галактик во Вселенной. Принимая во внимание эффекты наблюдательной селекции, можно заключить, что подавляющая их часть содержит в своих центральных областях сверхмассивные чёрные дыры [230]. Это обусловлено стимулирующей ролью сходящихся в процессе мёрджинга течений, которые обеспечивают приток массы в центральные области и увеличивают темп аккреции на уже существующие в центральных областях СМЧД или их зародыши [231, 232]. Более того, по этой же причине наиболее яркие, $L \sim 10^{45} - 10^{47}$ эрг с$^{-1}$, СМЧД (активные галактические ядра) встречаются преимущественно в наиболее затенённых (закрытых сильным поглощением пыли и газа) мёрджингах [233]. Таким образом, галактики-мёрджинги скрывают в своих недрах одно из наиболее интригующих явлений физики и астрофизики — происхождение сверхмассивных чёрных дыр. Проникновение в их недра позволит понять физические процессы в условиях предельно высокой скорости аккреции на чёрные дыры, а также, возможно, свойства плазмы в окрестности экстремально высоких плотностей энергии в окрестности тесных двойных систем сверхмассивных чёрных дыр. Это задача чрезвычайной степени сложности, из-за того что лучевые концентрации вещества, как правило, существенно превышают комптоновский предел $N_{\rm CT} \sim 10^{24}$ см$^{-2}$ и поэтому закрыты поглощением больших масс газа и пыли. Прямые наблюдения возможны только в далёкой инфракрасной и субмиллиметровой области спектра, а также в жёстком ($E \geqslant 15$ кэВ) рентгеновском диапазоне [233].

Класс таких галактик в состоянии максимального сближения проявляет себя в виде сверхъярких инфракрасных галактик — в англоязычной литературе Ultra-Luminous Infra-Red Galaxies (ULIRGs) — со светимостью, превосходящей $L \sim 10^{12} L_\odot$ [119, 234]. Ближайшая к нам галактика этого класса Arp220 находится на расстоянии 77 Мпк и имеет светимость в ИК области $L \simeq 2 \times 10^{12} L_\odot$ [235, 236]. Из-за высокой концентрации пыли в Arp220, превосходящей массовую концентрацию пыли в нашей Галактике в 4 раза [120], бóльшая часть её звёздного излучения затенена (оптическая толщина в видимом диапазоне $\tau_v \sim 45$ [237]). Более того, центральные области галактики закрыты даже для далёкого ИК и субмиллиметрового излучения — оптическая толщина внутри $R \sim 100$ пк имеет порядок $\tau_{100} \simeq 5$ на длине волны $\lambda \sim 100$ мкм [238] и $\tau_{1000} \sim 1$ — на $\lambda \sim 1$ мм, поэтому детальное исследование процессов в ядерной области Arp220 чрезвычайно затруднено. Радионаблюдения центра Arp220 уверенно показывают, что он разделён на два ядра — восточное и западное, расстояние между которыми $\sim 1''$ (~ 400 пк). Ядра содержат противовращающиеся диски с близкими параметрами вращения. Диски погружены в гигантское (размером $\sim$ кпк) молекулярное облако. Частота вспышек сверхновых в западном ядре с радиусом $R \sim 100$ пк примерно в 100 раз превышает их частоту во всей нашей Галактике. Результатом этого являются необычно высокая яркость в радиодиапазоне и высокая скорость производства пыли в центре Arp220 (см., например, [239–241]).

3.4.1. Рентген. Возможность существования в центре Arp220 (в его западном ядре — WN) сверхмассивной чёрной дыры, скрытой от прямых наблюдений большой оптической толщиной пыли, активно обсуждается начиная с работы [242]. Первоначально аргументы в пользу чёрной дыры были основаны на чрезмерно высокой ИК светимости центрального пылевого ядра размером примерно в 70 пк, $L_{\rm IR} \sim 10^{12} L_\odot$, требовавшей несоразмерно высокой концентрации ОВ звёзд — около 10^6 в объёме с радиусом в 35 пк [242] (см. также обсуждение в [241]). Более поздние наблюдения в рентгеновском диапазоне ($E_{\rm x} = 2-10$ кэВ, по-видимому, преимущественно эмиссия в линии 6,7 кэВ FeXXV) показали наличие в центральной области Arp220 (как в западном, WN, так и в восточном, EN, ядрах) мощных источников со светимостями 2×10^{40} эрг с$^{-1}$ и 3×10^{40} эрг с$^{-1}$ соответственно. Пересчёт на болометрическую светимость, учитывающий поглощение оптического и ближнего ИК излучения пылью, даёт нижние оценки $8{,}3 \times 10^{43}$ эрг с$^{-1}$ (EN) и $2{,}5 \times 10^{43}$ эрг с$^{-1}$ (WN) с соответствующими оценками масс чёрных дыр $\sim 5 \times 10^5 M_\odot$ и $\sim 10^5 M_\odot$ в предположении эддингтоновской светимости с эффективностью $\eta = 0{,}1$ [243]. Следует, впрочем, иметь в виду, что наблюдения в ИК и в рентгеновском диапазонах могут одинаково указывать как на чёрную дыру, так и на вспышку звездообразования в качестве источника энергии.

3.4.2. Молекулярные линии. Дополнительные косвенные аргументы в пользу существования в Arp220 чёрных дыр

пришли из интерферометрических наблюдений молекулярных ($H^{13}CN$, $H^{13}CO^+$, $HN^{13}C$ и SiO) линий [244]. Отношение распространённостей $[H^{13}CN/H^{13}CO^+] = 11$ в западном ядре WN на два порядка больше его значения в восточном EN. Наиболее правдоподобной причиной столь большой разницы может быть присутствие в WN активного галактического ядра, как следует из эмпирических данных о молекулярном составе в активных галактических ядрах и областях со вспышками звездообразования [244 – 246]. Это качественный вывод, и он не даёт возможности оценить массу чёрной дыры.

Наблюдения кинематики молекул CO совместно с пылевой эмиссией в западном и восточном ядрах показывают, что газ и пыль распределены в высокой степени симметрично, с регулярным осесимметричным распределением скорости CO, соответствующим дискам. Это может быть следствием того, что время жизни дисков превышает несколько периодов их собственного вращения. Кинематика диска в западном ядре предполагает компактное центральное (неразрешённое) тело с общей массой $\sim 8 \times 10^8 M_\odot$ — предположительно чёрная дыра, окружённая чрезвычайно компактным молекулярно-пылевым облаком.

Одним из индикаторов сверхмассивных чёрных дыр являются мегамазеры H_2O. Это связано, в частности, с тем, что вода в условиях ударно-волнового нагрева газа, типичных для окружения чёрных дыр, оказывается одной из наиболее распространённых молекул благодаря активному испарению ледяных мантий пылинок [247]. Наблюдения H_2O-эмиссии в галактике Arp220 с высоким угловым разрешением на телескопе ALMA показывают, что бóльшая часть (2/3) эмиссии идёт из западного ядра [248]. Оценка концентрации молекул H_2O в области эмиссии $X(H_2O) \geqslant 10^{-6}$, что типично для водяных мазеров. В целом, наблюдаются три водяные линии 22, 183 и 325 ГГц, и хотя их низкие яркостные температуры — $T_b \lesssim 10$ К (см. табл. 2 в [248]) — нетипичны для водяных мазеров, это можно легко объяснить тем, что мазерные конденсации имеют размеры существенно (по крайней мере, на порядок) меньше углового размера диаграммы телескопа ALMA $\simeq 0{,}02''$. Соотношение между яркостными температурами T_b для разных частот исключает их тепловой характер в условиях молекулярных дисков Arp220, и причиной может быть различие в характерных размерах конденсаций, дающих мазерный эффект в линии 22 ГГц с одной стороны и в линиях 183 и 325 ГГц — с другой [248]. Решение этой задачи — природы мазерной H_2O-эмиссии в Arp220 — по силам обсерватории Миллиметрон в режиме КРСДБ. Его угловое разрешение на околоземной орбите на частоте 325 ГГц соответствовало бы пространственному разрешению на расстоянии галактики Arp220 ($\simeq 80$ Мпк) масштабам $\gtrsim 2 \times 10^{-3}$ пк (около 500 а.е.), на орбите в точке L2 — 4×10^{-5} пк (6 а.е.).

4. H_2O, пребиотики, жизнь во Вселенной

Одним из ключевых направлений развития современной астрофизики являются исследования, связанные с происхождением и эволюцией жизни во Вселенной. Интерес к этой тематике привёл к возникновению новой дисциплины — астробиологии, — в рамках которой объединяются усилия разных специалистов: астрономов, биологов, геологов и пр. Свои астробиологические подразделения есть в различных космических агентствах, включая NASA. В Европе для координации астробиологических исследований создана ассоциация EANA (European Astrobiology Network Association), в состав совета которой входит и представитель России. Есть несколько научных журналов, предназначенных для публикации астробиологических исследований.

У наблюдательной астрономии, астрофизики и астрохимии есть своя ниша в этих исследованиях: они призваны ответить на вопрос об астрономических предпосылках появления жизни во Вселенной. Поиски этих предпосылок охватывают различные направления: исследования эволюции органического вещества (химическая основа жизни) в межзвёздной среде, в протозвёздных конденсациях, в протопланетных и планетных системах, исследования синтеза и переноса воды — эффективного растворителя (в предположении, что жизнь во Вселенной имеет преимущественно углеродно-водную основу), поиски внесолнечных планетных систем, в которых сочетались бы источник энергии, условия и место зарождения жизни, выявление индикаторов существования экзобиосфер и т.д. Этапы звёздного нуклеосинтеза обогатили всю Вселенную тяжёлыми (тяжелее гелия) химическими элементами, из которых состоят, в частности, и живые организмы. На первый взгляд кажется неизбежным, что, коль скоро звёздные населения галактик в наблюдаемой части Вселенной во многом подобны, то и условия возникновения жизни должны быть повсеместно примерно одинаковыми. Однако не только детали эволюционной цепочки, приводящей к возникновению жизни, вся совокупность необходимых для этого условий, но даже более простые вопросы, связанные с описанием превращения части газа галактик в звёзды, понятны только в самых общих чертах и требуют дальнейшего исследования [21].

Помимо исследований, связанных с небиологической эволюцией органического вещества, интерес представляют также более общие вопросы, связанные с образованием звёзд и планет, особенно с образованием массивных звёзд, в которых термоядерные реакции начинаются до того, как звезда успевает набрать полную массу. Несмотря на многочисленные исследования, конкретный сценарий формирования подобных объектов пока неясен (скорее всего, сценариев несколько). Наблюдения в субмиллиметровом диапазоне с высокой чувствительностью позволят прояснить детали образования массивных молодых звёздных объектов и их взаимодействия с окружающим веществом. В частности, появится возможность исследовать строение так называемых горячих ядер вокруг массивных протозвёзд, областей ионизованного водорода, включая самые ранние этапы их эволюции, фотодиссоциационные области, высокоскоростные истечения вещества. Изучение подобных структур позволит рассмотреть активное взаимодействие между различными компонентами межзвёздной и околозвёздной среды, выявив возможную роль индуцированного звездообразования, когда процессы выделения энергии формирующимися и недавно сформировавшимися звёздами стимулируют формирование следующих поколений звёзд.

Возможность формирования планетных систем у массивных звёзд вызывает сомнения (хотя околозвёздные диски у них наблюдаются; см., например, [249, 250]), однако они определённо играют важную роль в эволюции органического вещества. Высокие температуры в окрестностях массивных (прото)звёзд стимулируют хи-

мические процессы синтеза сложных молекул как в газовой фазе, так и на поверхностях космических пылинок. Значительный интерес также представляет изучение самих космических пылинок в областях звездообразования: возможные изменения в составе и структуре пылинок, вариации отношения массы пыли к массе газа, разрушение пылинок. Миллиметрон позволит изучать эти явления на основе наблюдений пыли, высоковозбуждённых переходов различных молекул, а также атомов, ионов и молекул, наблюдение которых невозможно с поверхности Земли. В сочетании с данными наблюдений на наземных инструментах это даст существенно более полную картину процесса звездообразования.

4.1. Звездообразование

Жизнь во Вселенной началась с первой звезды. Начальные этапы звёздного нуклеосинтеза обогатили Вселенную тяжёлыми (тяжелее гелия) химическими элементами, из которых состоит всё живое. Отсюда следует возможность возникновения жизни повсеместно во Вселенной. По этой причине исследование процессов, связанных с рождением звёзд в Галактике, имеет прямой интерес с точки зрения происхождения жизни. При этом важным является следующее обстоятельство: как уже сказано выше, возможность существования планетных систем вокруг звёзд большой массы с чудовищным выделением энергии на всех стадиях эволюции, по-видимому, исключена. Более благоприятные условия для этого реализуются вокруг звёзд солнечного типа, на что и указывают современные наблюдения (см. обзор [251]). Таким образом, роль массивных звёзд — производить тяжёлые элементы, роль маломассивных — удерживать планеты в своей окрестности и обеспечивать их энергией. Поэтому существенным является и понимание механизмов переноса тяжёлых элементов в правильном соотношении от звёзд массивных к маломассивным (некоторые аспекты этого обсуждаются в [21]).

В настоящее время общепризнано, что звёзды образуются в плотных межзвёздных газопылевых облаках. Благодаря большому количеству пыли на луче зрения их внутренние области хорошо защищены от внешнего ультрафиолетового излучения. Основной компонент межзвёздной среды — водород — находится в таких облаках в молекулярной форме. Эти облака часто называются молекулярными. Характерные температуры облаков составляют 10–20 К. Молекула H_2 не имеет дипольного момента и поэтому не имеет вращательного спектра, который можно было бы наблюдать при таких низких температурах. Поэтому молекулярные облака регистрируются по линиям вращательных переходов молекулы CO — наиболее распространённой после H_2 молекулы в межзвёздной среде. В молекулярных облаках содержится множество разнообразных молекул — от самых простых до сложных органических. К настоящему времени в этих областях обнаружено около 200 различных молекул, не считая их изотопологов[14]. Именно наблюдение этих молекул, а также пыли и позволяет получать основную информацию о физических характеристиках этих объектов и о происходящих в них процессах.

Пик излучения пыли при указанных температурах приходится на субмиллиметровый диапазон длин волн. Спектральные линии молекул, находящихся в этих облаках, также попадают в основном в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн. Большинство этих линий возникает при переходах между различными колебательно-вращательными состояниями молекул. Наблюдаются также так называемые инверсионные переходы (например, в молекуле аммиака) и некоторые другие. Важную информацию дают наблюдения линий, возникающих при переходах между компонентами тонкой структуры спектров некоторых атомов и ионов (например, OI, CI, CII и др.). Наблюдения многих важных линий невозможны с поверхности Земли даже на высокогорных обсерваториях вследствие высокого поглощения в атмосфере на этих частотах. Для преодоления этого ограничения используется, в частности, самолётная обсерватория SOFIA (The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) [252]. Очень большой прогресс в исследованиях межзвёздных облаков был достигнут с помощью космической субмиллиметровой обсерватории "Гершель" [253], которая успешно работала в 2009–2013 гг. Возможности Миллиметрона будут значительно превосходить возможности этой обсерватории как по чувствительности, так и по угловому разрешению. Это позволяет рассчитывать на получение уникальной информации, которая может дать ответы на ключевые вопросы, касающиеся строения и эволюции межзвёздных облаков, включая процессы звездообразования.

Один из таких вопросов — это выяснение начальных условий и возможных триггерных механизмов, запускающих такой процесс. Недавно, благодаря наблюдениям на обсерватории "Гершель", появилась новая парадигма звездообразования, согласно которой активное звездообразование происходит главным образом в межзвёздных волокнах, которые известны уже довольно давно [254]. Большинство межзвёздных облаков, видимо, имеет волокнистую структуру. "Гершель" изучал волокна в сравнительно близких к нам (~ 200 пк) облаках. Были определены основные характеристики волокон. В частности, оказалось, что для них характерно универсальное значение толщины $\sim 0{,}1$ пк, причина чего не вполне понятна. В дальнейшем были проведены исследования и более далёких волокон (например, [255]). В целом изучение межзвёздных волокон — это очень перспективное направление исследований, и Миллиметрон сможет внести здесь очень важный вклад. Указанная характерная толщина волокон соответствует угловому размеру примерно $20''$ на расстоянии 1 кпк. С разрешением в несколько секунд дуги Миллиметрон сможет детально исследовать такие объекты, причём в недоступном с Земли диапазоне длин волн. Здесь будут важны как спектрополяриметрические наблюдения пыли в непрерывном спектре, так и наблюдения линейчатых спектров различных атомов и молекул.

Для исследований холодных облаков основную роль будут играть наблюдения излучения пыли. Во-первых, основной выигрыш в чувствительности у Миллиметрона будет именно в непрерывном спектре. Во-вторых, в холодных областях субмиллиметровые переходы большинства молекул будут слабо возбуждаться. Одним из наиболее важных трассеров различных компонент межзвёздной среды является линия иона углерода [CII] на волне 158 мкм. Обзор на обсерватории "Гершель" продемонстрировал, что эта линия наблюдается в самых разных областях [256]. Одним из важных результатов оказалось обнаружение большого количества молекулярного газа, в котором не наблюдается линий молекулы CO, которая считается основным трассером такого газа [257]. Также было показано, что излучение CII хорошо коррелирует со скоростью звездообразования [258], являясь, таким

[14] https://zeus.ph1.uni-koeln.de/cdms/molecules, http://www.astrochymist.org/astrochymist_ism.html.

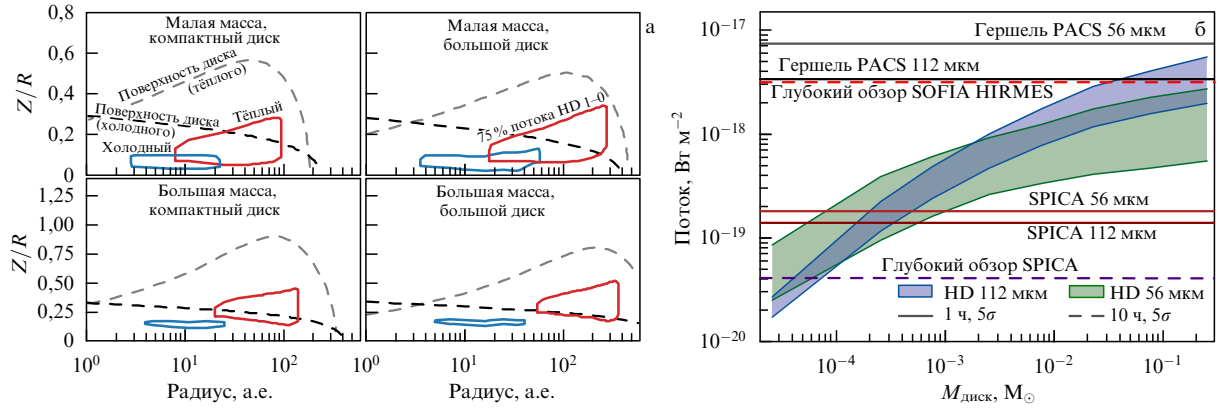


Рис. 19. (а) Модель распределения молекул HD в протопланетных дисках по линии HD $J = 1 - 0$. Сплошные контуры ограничивают области, включающие 75 % эмиссии в $J = 1 - 0$ от диска; синие контуры соответствуют тонким (холодным) дискам, красные — толстым (тёплым); штриховые контуры указывают изоконтуры равной концентрации газа в диске $n_g = 10^6$ см$^{-3}$. В верхнем/нижнем ряду представлены конфигурации для дисков малой/большой массы, левая/правая колонки различают компактные/протяжённые диски. (Рисунок заимствован из работы [262].) (б) Модельная зависимость потока в линиях HD $J = 1 - 0$ (синяя полоса) и HD $J = 2 - 1$ (зелёная полоса) от массы протопланетного диска, расположенного на расстоянии 140 пк. Линиями разного стиля показаны пределы чувствительности некоторых телескопов в дальнем ИК диапазоне: завершивший наблюдательную программу "Гершель" PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer), действующая стратосферная обсерватория SOFIA HIRMES (HIgh Resolution Mid-infrared Spectrometer) и планируемый внеатмосферный телескоп SPICA (SPace Infra-red telescope for Cosmology and Astrophysics), как указано. Чувствительность КОМ в диапазоне 100 – 300 мкм при охлаждении до 20 К будет почти на два порядка превосходить чувствительность SPICA. (Рисунок заимствован из работы [261].)

образом, полезным индикатором этого процесса. В наблюдениях на обсерватории SOFIA удалось также зарегистрировать линии изотопа ^{13}CII [259]. Это позволяет оценить оптическую толщу в линии основного изотопа и уточнить оценки его лучевой концентрации.

Наблюдения линий CII и ^{13}CII должны стать одной из основных задач обсерватории Миллиметрон в исследованиях межзвёздной среды. Они позволят изучать различные компоненты МЗС, включая области звездообразования, с угловым разрешением и чувствительностью, намного превосходящими достигнутые ранее.

Другим важным трассером молекулярного газа может стать молекула дейтерированного водорода HD. Содержание HD по отношению к H_2 составляет $\sim 3 \times 10^{-5}$. В отличие от основного изотополога молекулярного водорода, молекула HD имеет небольшой дипольный момент. В результате появляется вращательный спектр, нижний переход $J = 1 - 0$ наблюдается на длине волны примерно 112 мкм. Поскольку энергия возбуждения уровня $J = 1$ составляет примерно 130 К, его населённость в холодных облаках должна быть низка. Соответственно, интенсивность излучения HD тоже будет слаба. Тем не менее эта линия успешно наблюдалась на обсерватории "Гершель" с хорошим отношением сигнал/шум в диске звезды TW Hya, температура которого составляет примерно 30 К [260]. Исследования отдельных источников и обзоры в линии HD представляются очень важным средством изучения областей звездообразования. В частности, наряду с CO, молекулы HD играют роль инструмента измерения массы протопланетных дисков (см. [261 – 263]). Это обусловлено тем, что их распространённость определяется локальными значениями температуры и плотности в дисках и лишь в минимальной степени затрагивается деталями химии. Как следствие, пространственное распределение молекул HD и их полная масса в диске в большой мере определены массой H_2 в дисках и их морфологией (рис. 19). Наблюдения HD в принципе возможны на самолётной обсерватории SOFIA. Однако Миллиметрон сможет обеспечить значительно более высокую чувствительность и угловое разрешение.

В принципе, этапы образования звёзд сравнительно небольшой массы (порядка солнечной) сейчас неплохо изучены как наблюдательно, так и теоретически (например, [264]). Значительно больше вопросов вызывает процесс образования массивных звёзд, в которых ядерные реакции начинаются задолго до того, как они набирают полную массу [264, 265]. Эти звёзды очень сильно воздействуют на окружающее вещество. В частности, давление их излучения на стадии протозвезды может остановить аккрецию вещества, так что существует проблема объяснения формирования звёзд с очень большой массой.

Основные обсуждаемые сценарии образования массивных звёзд — это монолитный коллапс массивного плотного ядра и так называемая конкурентная аккреция. Предлагаются также довольно экзотические модели, в которых массивные звёзды образуются путём слияния звёзд меньшей массы [266].

Наблюдательные исследования областей образования массивных звёзд затрудняются тем обстоятельством, что они довольно редки и, как следствие, в среднем находятся далеко от нас. Модель монолитного коллапса предполагает наличие массивных дозвёздных ядер (с массой $\sim 30 M_\odot$ в радиусе 0,03 пк), которые могли бы сформировать массивную протозвезду. Однако к настоящему времени удалось обнаружить всего лишь несколько кандидатов в такие ядра [267]. При этом известно большое количество дозвёздных ядер небольшой массы. Угловое разрешение и чувствительность Миллиметрона позволяют вести поиск плотных дозвёздных ядер на расстояниях в несколько килопарсек. Обзор больших участков небесной сферы потребовал бы слишком много времени, но Миллиметрон мог бы провести поиск плотных дозвёздных и протозвёздных ядер на избранных площадках, что представляется весьма ценным для общего понимания процессов звездообразования.

Вокруг массивных протозвёзд образуются горячие ядра, области ионизованного водорода, области фотодиссоциации. Наблюдаются мощные высокоскоростные истечения вещества. Происходит активное взаимодействие между различными компонентами межзвёздной и околозвёздной среды. Возможен процесс индуцирован-

ного звездообразования. Воздействие массивных звёзд на окружающее вещество создаёт области высокой температуры и плотности, которые излучают преимущественно на субмиллиметровых волнах. Важным диагностическим инструментом для таких областей являются наблюдения высоковозбуждённых переходов различных молекул, прежде всего CO.

Одна из ключевых программ обсерватории "Гершель" (WISH — Water In Star-forming regions with Herschel) была посвящена исследованиям воды в областях звездообразования [268]. Результаты этой программы показали, что сильное излучение молекул воды наблюдается в протозвёздных объектах разных типов и позволяет получать о них уникальную информацию. Излучение воды часто связано с ударными волнами, поскольку повышенная температура в этих областях приводит к испарению молекул воды с поверхности пылинок. В частности, субмиллиметровые линии молекул воды позволяют изучать различные компоненты высокоскоростных биполярных истечений в областях звездообразования, которые с трудом могут быть исследованы другими методами [269]. Довольно неожиданным результатом оказалось обнаружение в направлении объектов разного типа линий поглощения H_2O^+, которые возникают в газе низкой плотности с низкой долей молекулярной компоненты. Миллиметрон сможет на новом уровне продолжить эти важные исследования.

Области ионизованного водорода вокруг массивных молодых звёзд и протозвёзд являются предметом активных исследований. Это нестационарные объекты, которые активно взаимодействуют с окружающим веществом и могут инициировать образование новых звёзд в окружающих их оболочках. Недавно на обсерватории SOFIA удалось впервые зарегистрировать линию $J = 1-0$ молекулы HeH^+ на частоте приблизительно 2 ТГц (149 мкм) [270] (рис. 20). Линия была зарегистрирована в планетарной туманности NGC7027. Эта молекула наиболее эффективно образуется при реакции иона гелия He^+ с атомарным водородом. Таким образом, её концентрация должна быть наиболее высока на границе ионизованных областей вокруг очень горячих звёзд, ультрафиолетовое излучение которых может ионизовать гелий в достаточном количестве. Наблюдения этой линии могут стать новым средством диагностики подобных объектов, и Миллиметрон здесь будет вне конкуренции. Важным дополнением для определения физических условий в областях излучения HeH^+ могли бы стать наблюдения перехода $J = 2-1$ этой молекулы на частоте 4 ТГц.

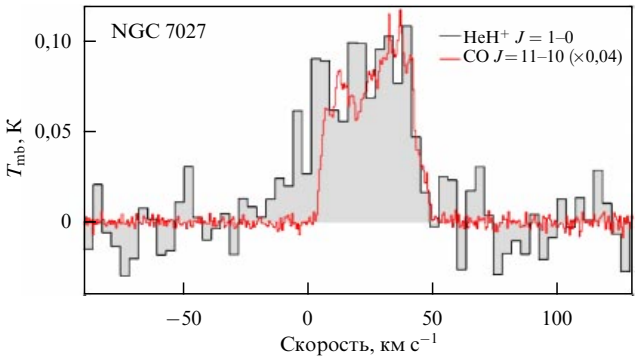


Рис. 20. Спектр вращательного перехода HeH^+ ($J = 1-0$), измеренный с помощью upGREAT (German REceiver for Astronomy at Teraherz frequencies с новой версией приёмников) на борту SOFIA в направлении NGC 7027. Для сравнения показана линия CO ($J = 11-10$), возникающая в плотной молекулярной оболочке вблизи фронта ионизации, откуда, как ожидается, исходит излучение HeH^+. (Рисунок заимствован из работы [270].)

Высокие температуры газа вокруг массивных протозвёзд стимулируют химические процессы, в которых происходит образование сложных органических молекул. Вопросы изучения таких молекул рассматриваются ниже.

4.2. Эволюция органических соединений

В последние годы наши познания об эволюции молекулярного состава межзвёздных облаков, протозвёздных и протопланетных объектов существенно углубились, и важнейшую роль в этом сыграли наблюдения в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах. Среди наземных проектов следует отметить проекты PRIMOS (Prebiotic Interstellar Molecule Survey), выполняемый на обсерватории Green Bank (см., например, [271]), и SOLIS (Seeds Of Life In Space), выполняемый на интерферометре IRAM NOEMA [272]. В последнем проекте исследуется пространственное распределение сложных органических молекул, наиболее характерных для химических процессов разных типов (газофазных, происходящих на поверхности и в толще ледяных мантий пылевых частиц, связанных с взаимодействием газовой и твёрдой фазы) в направлении на типичные объекты для каждой из стадий звездообразования: холодное дозвёздное ядро, горячее ядро, протозвёздные объекты классов 0 и I, протоскопления, фронты ударных волн в молекулярных истечениях [273–276]. Цель состоит в том, чтобы выделить наиболее эффективные и превалирующие пути синтеза сложных органических молекул в процессе образования и эволюции протозвёздных объектов различных масс. В астрохимии к сложным органическим молекулам (complex organic molecules, COM) относят соединения, состоящие более чем из пяти-шести атомов [277], что, конечно, сильно отличается от понятия сложной молекулы в биологии. Однако следует помнить, что речь идёт о химическом синтезе в условиях крайне низкой плотности и при криогенных температурах. Очевидно, что в таких условиях концентрация более сложных молекул может оказаться слишком низкой, и их обнаружение является чрезвычайно трудной задачей. Тем не менее даже в таких условиях в последнее время удаётся регистрировать эмиссию от COM с количеством атомов заметно больше 10 [278, 279]. При этом их концентрация оказывается выше ожидаемой на основе модельных расчётов (см. в [279]). Само по себе это обстоятельство позволяет всерьёз говорить о сложной "предбиологической" межзвёздной органике.

В субмиллиметровом диапазоне современные наблюдения молекулярных линий стали возможны, в первую очередь, благодаря космической обсерватории "Гершель" и наземному интерферометру ALMA. Наблюдения в этом диапазоне с высокой чувствительностью позволяют обнаруживать линии новых молекул или новые резервуары уже известных молекул, например, за счёт детектирования переходов с высоковозбуждённых уровней. В настоящее время полный список межзвёздных и околозвёздных молекул насчитывает более 200 позиций [278], и основные пути их синтеза предложены в теоретических работах.

Образование молекул (в том числе органических) происходит как в газовой фазе, так и на поверхности пылевых частиц. Предполагается, что в тёмных холодных облаках (на дозвёздной стадии) метанол синтезируется в диффузионной химии на поверхности межзвёздных пылевых частиц (см., например, [280]). Механизмы образо-

вания более сложных органических молекул известны хуже. Углеводороды (молекулы вида C_xH_y), по всей видимости, синтезируются в ион-молекулярных реакциях в газе. Что же касается кислород- и азотсодержащих СОМ, единого представления об их синтезе в настоящее время не существует. Можно отметить как минимум два обсуждаемых сценария. Первый предполагает синтез СОМ в холодных ледяных мантиях пылевых частиц в результате их взаимодействия с космическими лучами [281]. Во втором сценарии синтез СОМ происходит в нейтрально-нейтральных реакциях в газовой фазе, реактанты для которых производятся на поверхности пылевых частиц и затем выбрасываются в газ за счёт процесса химической (реактивной) десорбции [282].

На более поздних стадиях развития протозвёзд, когда в молекулярных облаках появляются погружённые источники ультрафиолетового излучения, общепризнанным в настоящее время является сценарий образования СОМ при постепенном разогреве газопылевой смеси (сценарий нагрева, или warm-up [283]). При этом важную роль начинают играть фотоиндуцированные процессы в ледяных мантиях космических пылинок [284]. Фотоны разрушают продукты первичного холодного синтеза, находящиеся в мантиях со времени холодной фазы развития протозвезды, а повышающаяся температура пылинок обеспечивает подвижность образующихся при этом радикалов, что приводит к формированию следующего поколения молекул. Наконец, дальнейшая эволюция близкой протозвезды практически полностью испаряет мантии, обогащая газовую фазу продуктами поверхностного синтеза, которые начинают реагировать друг с другом, формируя ещё более сложные соединения.

Несмотря на наличие детального теоретического описания различных сценариев образования СОМ в холодном газе, ни один из них не может считаться надёжным, поскольку наблюдательных данных очень мало, а данных о пространственном распределении СОМ практически нет (только сравнение содержаний СОМ в направлении на пик излучения пыли и пик излучения метанола в дозвёздном ядре L1544 [285]). Поэтому наиболее актуальной задачей сейчас является картирование сложных органических молекул в направлении областей звездообразования, поиск корреляций их пространственного распределения и проверка химических моделей. Построение карт распределения СОМ при помощи наземных телескопов требует большого количества наблюдательного времени. Высокая чувствительность Миллиметрона и отсутствие земной атмосферы должны сделать решаемой задачу картирования излучения СОМ в направлении холодных ядер. Карты позволят выяснить, какие физико-химические процессы ведут к образованию СОМ, и ограничить стремительно увеличивающееся число теорий их образования.

Важной задачей для космического проекта Миллиметрон может стать обнаружение транзиентных соединений — короткоживущих промежуточных продуктов газофазной химии, без которых невозможно образование других важных соединений. Как уже отмечалось, в межзвёздной и околозвёздной среде обнаружено около 200 соединений, однако в химические модели, помимо них, приходится включать ещё многие сотни нейтральных и ионизованных компонент. Транзиентные соединения быстро вступают в реакции, то есть быстро образуются и разрушаются, поэтому для них характерны очень малые содержания, и бóльшая их часть до сих пор не обнаружена. Наблюдательное обнаружение подобных соединений также помогло бы понять, какие реакции образования сложных органических молекул превалируют в областях звездообразования.

Пока не удаётся обозначить пределы сложности формирующейся органики. Наиболее сложным соединением, существование которого в молекулярных облаках считается достоверно установленным, является бензонитрил (C_6H_5CN), молекула которого состоит из 13 атомов [286]. Среди других примеров можно назвать оксид пропилена (CH_3CHCH_2O) [287], гликольнитрил ($HOCH_2CN$) [288], цианометанимин [289]. Оксид пропилена является первой открытой межзвёздной молекулой, обладающей свойством хиральности, а цианометанимин считается прекурсором аденина, одного из четырёх азотистых оснований, кодирующих информацию в молекуле ДНК. Уже неоднократно появлялись сообщения об открытии в областях звездообразования простейшей аминокислоты — глицина. Хотя это открытие пока считается неподтверждённым, понятно, что никаких принципиальных препятствий для синтеза аминокислот в молекулярных облаках нет. Об этом может свидетельствовать обнаружение глицина в комете 81P/Wild2 миссией "Стардаст" [290] и в комете 67P Чурюмова – Герасименко миссией "Розетта" [291].

Особый астробиологический интерес представляют исследования хиральных молекул, которые могут стать одним из прорывных направлений в программе исследований Миллиметрона. Хиральность — особенность пространственного строения молекул, при котором молекулу невозможно совместить в пространстве с её зеркальным отражением. Важность хиральности в вопросе возникновения жизни обусловлена тем, что на Земле в состав живых систем входит исключительно один из энантиомеров (вариантов пространственного строения хиральных молекул). Входящие в состав белков живых организмов аминокислоты являются энантиомерами L-конформации, а углеводы — энантиомерами D-конформации. Эта особенность живой природы получила название гомохиральности.

Сложные хиральные молекулы образуются из более простых соединений, не обладающих свойством хиральности (ахиральных молекул). При этом в общем случае в химических реакциях должен образовываться так называемый рацемат — смесь, в равных количествах содержащая L- и D-конформации молекулы-продукта. В настоящее время механизм селекции, приводящий к возникновению гомохиральности, остаётся невыясненным. Однако имеются основания полагать, что предпочтительное формирование энантиомеров одного типа начинается ещё в космосе. Одним из свидетельств этого является обнаруженная асимметрия содержания энантиомеров органических молекул в метеоритах. В частности, в метеорите Мурчисон было обнаружено преобладание L-конформации аминокислоты изовалина (такой же, как в живых белках) над D-конформацией [292].

Среди возможных причин возникновения преобладания одной конформации над другой в настоящее время рассматриваются как фундаментальные физические свойства Вселенной (нарушение чётности при электрослабом взаимодействии), так и различная скорость фотолиза (синтеза) хиральных молекул межзвёздным ультрафиолетовым излучением, содержащим компонент, обладающий левой или правой круговой поляризацией [293, 294].

Действительно, если асимметрия распространённости конформаций вызывается поляризованным межзвёздным ультрафиолетовым полем, логично предположить, что она проявляется уже на ранних стадиях эволюции протозвёздных облаков и может наблюдаться у находящихся там хиральных молекул. В настоящее вре-

мя в межзвёздной среде известна лишь одна хиральная молекула — оксид пропилена (CH_3CHCH_2O), обнаруженная в 2016 году [287]. Молекула обнаружена в направлении на комплекс Sgr B2, известный разнообразием содержащихся в нём сложных молекул. К сожалению, авторам открытия не удалось выполнить поляриметрию обнаруженного излучения оксида пропилена, в связи с чем вопрос о возможной асимметрии распространённости конформаций этой молекулы в межзвёздной среде остаётся открытым. Принимая во внимание беспрецедентные возможности Миллиметрона, вполне возможно ожидать прорыва в вопросе исследования зарождения монохиральности в Галактике благодаря наблюдениям на обсуждаемой космической обсерватории.

Проблема исследования эволюции содержания СОМ в процессе формирования звёзд и планетных систем вокруг них связана с тем, что для надёжной идентификации молекулы необходимо наблюдение максимального количества связанных с ней линий. Однако при наблюдениях с Земли бóльшая часть линий субмиллиметрового диапазона остаётся недоступной — наблюдения возможны лишь в нескольких окнах прозрачности. Другая проблема связана с недостатком чувствительности, которая позволяет проводить лишь точечные наблюдения СОМ в отдельных объектах, что затрудняет выявление закономерностей в их эволюции. Кроме того, чем сложнее в смысле количества атомов молекула, тем больше степеней свободы она содержит, и, следовательно, больше переходов, в которых может излучаться энергия. Поэтому линии более сложных молекул в среднем обладают меньшей интенсивностью, чем линии простых соединений. Этот факт ещё более затрудняет исследования сложных органических соединений в космосе.

Наблюдения на космической обсерватории Миллиметрон позволят решить обе эти проблемы. Внеатмосферное положение телескопа позволит наблюдать существенно большее количество линий, что сделает идентификацию СОМ более достоверной, а высокая чувствительность откроет путь к регистрации ещё более сложных молекул, как правило, характеризующихся невысоким содержанием (относительно наиболее распространённой молекулы H_2). Важной составной частью этих наблюдений станут исследования дейтерированных и других (содержащих изотопы C, N, O) изотопологов рассматриваемых молекул, что представляет как самостоятельный интерес, так и позволяет использовать дейтерированные молекулы в качестве индикаторов дальнейшего переноса молекулярного вещества из дозвёздных ядер в протопланетные диски [295]. Одной из интересных задач здесь может стать анализ эволюции различных изотопологов метанола (с замещением атомами D различных атомов H в молекуле), который позволит, в частности, объяснить отличия между наблюдаемыми и теоретическими содержаниями молекул CH_3OD и CH_2DOH [296 – 299].

Важной областью исследований для субмиллиметровой обсерватории могут стать наблюдения органических соединений не только в протозвёздных объектах, но и на более поздних стадиях — в протопланетных дисках. В настоящее время список органических соединений, обнаруженных в дисках, далеко не так обширен, как список межзвёздных молекул, однако он постоянно пополняется, и большую роль в этом играют наблюдения в субмиллиметровом диапазоне при помощи интерферометра ALMA. Достаточно упомянуть недавние открытия метилцианида (CH_3CN) [300], метанола [301] и муравьиной кислоты (HCOOH) [302].

Расчёты показывают, что в дисках органические соединения в основном сосредоточены в твёрдой фазе, т.е. в ледяных мантиях пылинок. Однако они могут становиться видимыми, если какой-то процесс нагревает пылинки и испаряет их мантии. Таким процессом могут быть вспышки светимости, наблюдаемые на объектах типа фуоров. Численные расчёты показывают, что прогрев диска увеличивает газофазные содержания ряда органических молекул на многие порядки величины [303, 304], и это предварительно подтверждается наблюдениями больших содержаний метанола, ацетона, ацетонитрила, ацетальдегида и метилформиата в фуоре V883 Ori [305].

4.3. Вода

Другое направление для наблюдений в субмиллиметровом диапазоне, также связанное с проблемой возникновения и распространённости жизни, но не затрагивающее органические соединения, состоит в наблюдении молекул воды в протопланетных дисках. Вода играет особую роль в развитии белковой жизни. Она не только выполняет функцию универсального растворителя; предполагается, что для развития и выживания жизни на Земле важны были также особые свойства водяного льда и жидкой воды.

По этим причинам поиски воды в межзвёздной среде на протяжении длительного времени составляют одну из основных задач молекулярной астрофизики. Сложность наблюдений воды обусловлена тем, что линии этой молекулы, возбуждаемые в холодном газе, излучают на частотах 500 – 1700 ГГц, недоступных для наземных наблюдений из-за блокирования водяным паром в земной атмосфере, поэтому исследования воды в холодных ядрах приходится проводить при помощи космических инструментов, главным образом, SWAS (Submillimeter Wave Astronomy Satellite) и "Гершель" [268, 306]. Следует отметить, что вода оказалась не только важным элементом процессов межзвёздной химии, но и хорошим диагностическим инструментом для изучения физики самих объектов. В частности, благодаря наблюдаемым профилям типа P Cyg линии воды было подтверждено начало коллапса в дозвёздном ядре L1544 [307], а также измерена примерная скорость аккреции вещества в горячих ядрах и оболочках протозвёзд [308].

Одна из ключевых проблем в эволюции Солнечной системы состоит в идентификации источника воды на Земле. Решение этой проблемы связано с поисками в Солнечной системе населения тел, у которых отношение содержания полутяжёлой и обычной воды совпадало бы с аналогичным отношением в воде земных океанов. В кометах, которые изначально считались основным кандидатом на роль источника земной воды, это отношение оказалось в несколько раз выше, чем в мировом океане (исключение составляют кометы Хартли-2 [309] и Виртанена [310]), и поэтому сейчас рассматривается возможность доставки воды на Землю в результате астероидной бомбардировки. С этой точки зрения было бы весьма интересно проследить отношение содержание HDO и H_2O в других формирующихся планетных системах. Пока такие наблюдения немногочисленны и иногда из-за недостаточной чувствительности дают лишь верхние оценки [311, 312]. Критическую роль в этих исследованиях уже сыграли существующие наземные и космические инструменты: SMA (Submillimeter Array, объединённый проект Смитсонианской астрофизической обсерватории и Института астрономии и астрофизики Академии наук Тайваня), JCMT (James Clerk Maxwell Telescope), "Гершель". Космическая обсерватория Миллиметрон,

способная осуществлять наблюдения с высокой чувствительностью в субмиллиметровом диапазоне, позволит определить отношение HDO/H_2O в большом количестве объектов и откроет возможность проводить статистические обобщения и устанавливать возможные связи содержания полутяжёлой воды с параметрами протопланетного диска и родительской звезды.

Поскольку угловое разрешение Миллиметрона не позволяет разрешить протопланетный диск ($\theta = (6-13)''$ на частотах основных линий воды), то проследить происхождение воды на Земле и планетах земного типа можно, наблюдая, во-первых, разные стадии планетообразования и, во-вторых, разные спектральные линии молекулы воды, возбуждённые в разных физических условиях. Ранние стадии эволюции — холодные дозвёздные и горячие протозвёздные ядра — можно будет разрешить пространственно и увидеть радиальное распределение отношения HDO/H_2O. В протопланетных дисках же распределение воды можно будет восстановить, наблюдая разные линии воды. Из общих соображений понятно, что поток излучения от центральной звезды сильнее нагревает внутренние области диска, чем его периферию. Следствием этого является более высокая температура возбуждения [15] вращательных уровней воды T_{ex} во внутреннем диске по сравнению с внешним. При этом ширина спектральных линий, формирующихся во внутреннем диске, также должна быть заметно выше. В пользу этого свидетельствуют наблюдения на обсерватории "Гершель" (см., например, [313]), а также результаты численного моделирования [314].

Наблюдения изотопологов воды важны также для диагностики физических условий на переходном этапе от дозвёздного ядра к протопланетному диску. Вода в молекулярном облаке начинает возникать ещё до формирования дозвёздного ядра и продолжает синтезироваться на всём протяжении эволюции протозвёздной системы. При этом соотношение HDO/H_2O зависит от отношения орто- к параводороду, которое, в свою очередь, зависит от физических условий в среде. Таким образом, изотопный состав воды может много рассказать о месте и моменте её формирования.

4.4. Солнечная система

Наблюдения космического телескопа (КТ) "Гершель" в дальнем инфракрасном диапазоне длин волн позволили продвинуться в исследованиях важных и фундаментальных проблем, связанных с формированием Солнечной системы, таких как водный цикл на Марсе, источники воды в стратосферах внешних планет-гигантов, изотопные соотношения в кометных и планетных атмосферах. Важными представляются новые наблюдения и подтверждения присутствия паров воды в торе вокруг Сатурна, образующемся за счёт выбросов паров воды и ледяных и пылевых частиц с южного полюса Энцелада; в атмосферах ледяных галилеевых спутников Юпитера; в атмосфере карликовой планеты Церера; в комах комет. Полученные результаты вызвали ряд новых вопросов и являются твёрдой основой для перспективных исследований Солнечной системы с помощью космической обсерватории Миллиметрон. Так как свечения многих сложных (пре- и биотических) молекул в газовых оболочках планет, их спутников и малых тел (комет и астероидов) во внешней холодной области Солнечной системы наблюдаются в инфракрасном и миллиметровом диапазонах, то основные направления научных исследований обсерватории Миллиметрон в режиме наблюдений одиночным телескопом (со сверхвысокой чувствительностью) включают следующие направления и задачи:

- Молекулярный состав и физические условия в атмосферах планет-гигантов и их спутников. Особое внимание будет уделено исследованию планеты Нептун, так как подобные Нептуну планеты (горячие нептуны, субнептуны и планеты-океаны) открыты в большом количестве во внесолнечных планетных системах.
- Миры с океанами: химический состав газовых оболочек и поверхности ледяных спутников в системах Юпитера и Сатурна и оценка химического обмена между подлёдным водным океаном и поверхностью.
- Астероиды и кометы: поиск новых объектов, определение спектра собственного излучения, отражательных свойств и других физических характеристик.
- Пылевая компонента межпланетной среды, изучение объектов пояса Койпера и облака Оорта, представляющих собой образцы первичного вещества при образовании Солнечной системы.

Таким образом, определение соотношения дейтерия к водороду, изотопного состава воды, изотопных соотношений для атомов O и N во множестве астероидов, комет и ледяных спутников в системах Юпитера и Сатурна, а также объектов пояса Койпера при помощи космической обсерватории Миллиметрон может рассматриваться в качестве ключевых измерений для понимания возникновения Солнечной системы.

4.4.1. Миры с океанами во внешних областях Солнечной системы. В холодных внешних областях Солнечной системы содержится большое разнообразие небесных тел: Европа с её причудливыми особенностями поверхности; крошечный, геологически активный Энцелад; Титан — единственный спутник, обладающий значительной атмосферой; Плутон с его азотными ледниками и многие другие. За последние 25 лет измерения космических аппаратов показали, что многие из этих небесных тел являются "мирами с океанами", обладающими большими объёмами жидкой воды, изолированной под ледяными оболочками. Эта новая группа небесных тел — миры с океанами — является важной для исследований по нескольким причинам, но наиболее убедительной и в то же время самой простой является следующая причина: они могут быть обитаемы. Жизнь, как мы её знаем, требует жидкой воды, химически разнообразной и устойчивой среды, а также источников энергии, способных поддерживать гомеостаз. Все эти требования могут быть удовлетворены на некоторых из названных выше небесных тел.

Существование подповерхностных океанов на спутниках Энцелад, Европа, Титан, Ганимед и Каллисто подтверждено с помощью измерений на космических аппаратах (КА) Galileo и Cassini. Европа и Энцелад выделяются как миры с океанами, для которых имеются доказательства связи между океаном и поверхностью, а также возможности взаимодействия между океанами и скалистым ядром спутника, что имеет важное значение для соображений об их потенциальной обитаемости. Ожидается, что подповерхностные океаны на Титане, Ганимеде и Каллисто покрыты относительно толстыми ледяными слоями, что затрудняет обменные процессы с поверхностью и не приводит к очевидным поверхностным признакам океанов.

Хотя Титан обладает большим подповерхностным океаном, на нём также присутствует поверхностный слой, состоящий из разнообразных органических соеди-

[15] Величина, характеризующая населённость уровней.

нений и жидкостей, которые легко доступны и могут быть средой обитания для более экзотических форм жизни. Кроме того, на поверхности Титана могут присутствовать переходные объёмы жидкой воды, такие как водные бассейны, растопленные в результате воздействия ударных процессов, и свежие криовулканические потоки, взаимодействующие как с твёрдой, так и с жидкой органикой. Эти среды представляют собой уникальные и важные места для исследования пребиотической химии и, возможно, первых шагов к возникновению жизни [315].

Такие небесные тела, как Тритон, Плутон, Церера и Диона, считаются кандидатами в миры с океанами исходя из ограниченного набора наблюдений при помощи космических аппаратов. Наши знания о других небесных телах (например, о некоторых спутниках Урана) ограничены, и присутствие океана установлено недостаточно надёжно, хотя они считаются возможными кандидатами на такие миры. В дальнейшем описании основных наблюдательных проявлений миров с океанами во внешних областях Солнечной системы будем придерживаться классификации, предложенной в недавних обзорах [316, 317].

Важнейшими целями наблюдений космической обсерватории Миллиметрон представляются спутники планет-гигантов, для которых в настоящее время установлены океаны, — это Европа, Ганимед, Титан и Энцелад:

• на ледяных спутниках Сатурна — Энцеладе и Титане — открыты подлёдные водные океаны с высоким уровнем потенциальной обитаемости. Так как на ближайшее время нет запланированных космических миссий в систему Сатурна, то наблюдения обсерватории Миллиметрон со сверхвысокой чувствительностью химического состава атмосфер и поверхности этих миров с океанами будут, несомненно, уникальными, позволят оценить химический обмен между океаном и поверхностью и, соответственно, их потенциальную обитаемость. В случае Титана такие наблюдения позволят впервые исследовать сложную органическую химию плотной атмосферы и открытых на поверхности Титана углеводородных озёр и морей;

• ледяные спутники Юпитера Европа и Ганимед в ближайшем будущем (после 2030 г.) будут непосредственно исследованы при помощи космических миссий Европейского космического агентства (ESA) JUICE (JUpiter ICy moons Explorer) и Национального аэрокосмического агентства США (NASA) Europa Clipper. Совместные ожидаемые результаты этих миссий и космической обсерватории Миллиметрон в наблюдениях химического обмена сложными молекулами между подлёдным океаном и поверхностью данных миров с океанами представляются несомненно важными для оценки их астробиологического потенциала.

Миры с океанами. Энцелад. Наиболее убедительным доказательством наличия подлёдного океана с жидкой водой в системе Сатурна, а возможно, и во всей Солнечной системе является океан на малом спутнике Сатурна Энцеладе. КА NASA Cassini, вскоре после его прибытия в систему Сатурна в 2004 г., открыл у этого спутника шлейфы газа и льда, исходящие из области южного полюса. Плотность спутника указывает на то, что это тело состоит из смеси скалистых пород и водяного льда с большим количеством камня. Учитывая его яркую ледяную поверхность, наиболее вероятно, что силикатное ядро отделено слоем жидкой воды от ледяной коры. КА Cassini открыл присутствие молекул водорода в шлейфе газа и ледяных частиц, выбрасываемых гейзерами на южном полюсе Энцелада, во время своего последнего и самого глубокого пролёта через шлейф 28 октября 2015 г. КА Cassini также удалось определить состав шлейфа во время пролёта в начале миссии. Из этих наблюдений определено, что почти 98 % газа в шлейфе — молекулы воды, около 1 % — это водород, а остальные — смесь других молекул, в том числе содержащих углерод [318, 319].

Измеренный масс-спектрометром INMS на КА Cassini химический состав (рис. 21) выбросов гейзеров на южном полюсе Энцелада (в особенности состав сложной углеродной органики, не разрешённой в наблюдениях КА Cassini) может быть определён в наблюдениях свечений в выбросах гейзеров при помощи космической обсерватории Миллиметрон.

Миры с океанами. Титан. Представляя собой почти равную смесь каменистых веществ и водного льда, Титан является единственным естественным спутником, обладающим плотной атмосферой, которая примерно в четыре раза плотнее у поверхности Титана, чем плотность воздуха на уровне моря на Земле. Атмосфера состоит в основном из молекулярного азота, как и земная атмосфера, но очень слабое солнечное излучение на удалённой орбите Сатурна способно поддерживать на поверхности низкую температуру — 94 К на экваторе даже при скромном парниковом эффекте, что, соответственно, означает, что вода вымерзает из атмосферы. Метан, в свою очередь, играет роль драйвера погоды — в измерениях и наблюдениях, полученных КА NASA Cassini и спускаемым на поверхность Титана зондом Huygens, на Титане были обнаружены облака, дождь, роса на поверхности, овраги и речные долины [321, 322].

КА NASA Cassini обнаружил озёра и моря в высоких широтах Титана, в основном вблизи северного полюса спутника, и данные, полученные при помощи радиолокационной системы на борту КА, показали, что эти водоёмы жидкости состоят в основном из метана с небольшим количеством этана и азота [322]. Вопрос о том, может ли в этих водоёмах поддерживаться экзотический тип жизни, который способен возникнуть и выжить в жидком метане, является открытым [315]. Но на основе измерений КА NASA Cassini и спускаемого зонда Huygens были найдены доказательства существования глубоко под холодной поверхностью гораздо более тёплого, жидкого водного океана [323]. Наблюдения сложного химического состава атмосферы и поверхности при помощи космической обсерватории Миллиметрон внесут уникальный вклад в исследование астробиологии Титана.

Галилеевы спутники Юпитера. Из четырёх больших галилеевых спутников, вращающихся вокруг Юпитера, для трёх существуют наблюдательные указания на наличие внутренних океанов жидкой воды. Самые детальные и убедительные свидетельства получены для Европы [324]. Внешний вид поверхности Европы, по данным КА NASA Voyager, позволяет предполагать существование жидкого водного слоя под ледяной корой спутника как преобладающей фазы воды ниже поверхности. Поверхность Европы, в отличие от многих других спутников Солнечной системы, включая спутник Земли Луну, показывает малое количество кратеров. На изображениях, полученных КА NASA Voyager и Galileo, видно, что большая часть поверхности из водного льда испещрена трещинами, и представляется, что в некоторых местах блоки ледяной коры отделялись и вращались в шуговой или жидкой среде. В настоящее время вся поверхность спутника заморожена, но геологические характеристики поверхности не исключают возможность существования слоя жидкой воды под слоем льда в настоящее время или в недавнем прошлом. Спектральные измерения поверх-

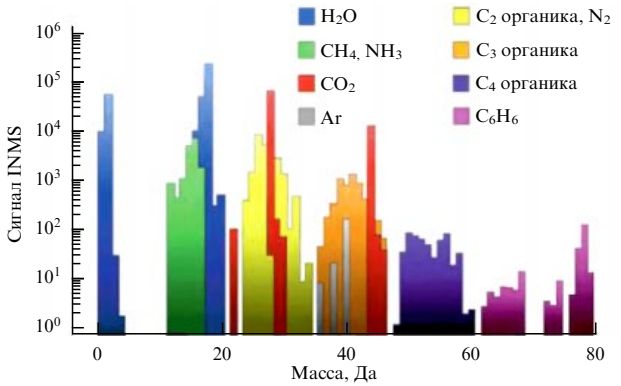


Рис. 21. (В цвете онлайн.) Спектр масс для шлейфа Энцелада, измеренный с помощью ионного и нейтрального масс-спектрометра (INMS) во время пролёта КА NASA Cassini 9 октября 2008 года. Цвета на рисунке показывают вклад от различных химических соединений и их возможных фрагментов. (Рисунок заимствован из работы [320].)

ности при помощи КА NASA Galileo были зашумлены из-за интенсивной радиационной среды, создаваемой магнитным полем Юпитера, но указания на соли в некоторых местах на поверхности [325] соответствуют недавним выбросам жидкой воды из недр спутника [326]. Для поддержания объёма океана, выведенного из данных КА NASA Galileo [327], энергия должна быть извлечена из орбитального движения Европы посредством приливной диссипации. Соразмерность орбитальных периодов Ио, Европы и Ганимеда при движении вокруг Юпитера позволяет заключить, что эксцентричность орбиты Европы будет поддерживаться в течение длительных периодов геологического времени, в то время как энергия приливного захвата приводит к круговой орбите спутника [328].

В отличие от Европы, для которой имеются два отдельных свидетельства присутствия океана под ледяной поверхностью, для спутников Ганимеда и Каллисто имеется лишь по одному виду наблюдений. Для Каллисто это измерения флуктуаций магнитного поля Юпитера магнитометром КА NASA Galileo, но они слабее возмущений, вызываемых Европой [329]. Для Ганимеда ситуация несколько сложнее, так как присутствует его собственное магнитное поле, создаваемое внутренним динамо в металлическом ядре. Это затрудняет уверенное измерение поля, индуцированного Ганимедом. Хотя доказательства флуктуаций магнитного поля Юпитера вблизи Ганимеда были измерены, но также возможны и другие объяснения [330]. Наличие океана на Ганимеде получило подтверждение с помощью космического телескопа им. Хаббла в наблюдениях слабых авроральных овалов в полярных областях Ганимеда, оказавшихся более устойчивыми в магнитном поле Юпитера, чем в случае отсутствия подповерхностного проводника, частично экранирующего внешнее поле [331]. Поверхности Ганимеда и Каллисто характеризуются преобладанием ударных кратеров. Учитывая, что для поддержания древних кратеров требуются толстые и холодные слои ледяной коры, можно заключить, что океаны Ганимеда и Каллисто, скорее всего, находятся глубоко под поверхностью — на глубине в 100 км и более. Поскольку оба объекта массивнее Европы и обладают сравнимым количеством льда и камня, некоторая часть льда должна быть в виде фазы высокого давления, плотнее жидкой воды. Таким образом, их океаны, вероятнее всего, зажаты между слоями льда сверху и снизу, что делает контакт с основным силикатным ядром (который считается важным для возникновения жизни) маловероятным.

Наблюдения на космическом телескопе Хаббл позволили обнаружить переходные шлейфы водяного пара вблизи южного полюса Европы [326], указывающие на криовулканическую активность или изменение поверхностных напряжений в зависимости от орбитальных фаз Европы. В наблюдениях на КТ "Гершель"/HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared) были обнаружены асимметричные атмосферы водяного пара на Ганимеде и Каллисто [332]. Их потенциальные источники могут включать процессы распыления, сублимации или неизвестные поверхностные процессы. Соответственно, наблюдения на космической обсерватории Миллиметрон предоставят возможность контролировать пространственно-временну́ю эволюцию этих водных атмосфер/шлейфов паров воды, более подробно соотнести их с орбитальными фазами и, возможно, определить их источники и поглотители.

Астробиологический потенциал миров с океанами. Во время близких пролётов КА NASA Cassini измерения с помощью ионного и нейтрального масс-спектрометра (INMS) позволили обнаружить присутствие органических и азотсодержащих молекул в парах шлейфа Энцелада [318, 320] (см. рис. 21), а на основе измерений анализатором космической пыли (CDA) был сделан вывод о присутствии солей в ледяных зёрнах шлейфа [333]. Результаты указанных измерений позволили заключить, что вода океана находится в контакте с каменным ядром [320, 334]. Этот вывод получил дополнительное подтверждение в недавнем сообщении об открытии в шлейфе Энцелада пылевых силикатных частиц с характерными размерами от 2 до 8 нм. Лабораторное моделирование показало, что такие наночастицы могли быть образованы только в гидротермальных реакциях при постоянной высокой температуре (> 90 °C) в океане [333]. Состав силикатных пылевых частиц из гейзеров Энцелада говорит о том, что его океан существует с момента рождения Солнечной системы или в его недрах постоянно образуется молекулярный водород, являющийся потенциальным источником энергии для водной среды океана [335]. Недавно было подтверждено [319], что наиболее вероятным источником молекулярного водорода являются активные гидротермальные реакции каменистых пород ядра Энцелада, содержащего минералы и органические соединения. Относительно высокая плотность водорода в шлейфе указывает на термодинамическое неравновесие в насыщенном солями океане, что, в частности, способствует образованию метана из углекислого газа в океане Энцелада. Поддержание неравновесной концентрации H_2 в океане подразумевает постоянный источник, например, вклад гидротермальных реакций.

Основными летучими веществами, испускаемыми гейзерами Энцелада, оказались: водяной пар H_2O — 96–99 %; углекислый газ CO_2 — 0,3–0,8 %; метан CH_4 — 0,1–0,3 %; аммиак NH_3 — 0,4–1,3 %; молекулярный водород H_2 — 0,4–1,4 % [318–320]. В пробах были обнаружены также угарный газ CO, ацетилен C_2H_2, этилен C_2H_4, этан C_2H_6, молекулярный азот N_2, синильная кислота HCN, формальдегид CH_2O, оксид азота NO. Содержание этих примесей колеблется от 0,2 % до 100 ppm [16] (0,01 %). В дополнение был приведён список из 33 веществ, содержание которых оказывается ниже 100 ppm и которые дали слишком слабый сигнал, чтобы считать их достоверно обнаруженными (так называемый "массовый шум"). Это, как правило, достаточно сложные органические соединения разнообразного состава, а также моле-

кулярный кислород O_2, аргон Ar, сероводород H_2S и фосфин PH_3. Если их наличие подтвердится, можно будет констатировать, что подлёдный океан Энцелада имеет все необходимые химические элементы для существования жизни.

Космическая обсерватория Миллиметрон позволит наблюдать существенно большее количество линий сложных молекул, что сделает их идентификацию более достоверной. Более того, высокая чувствительность Миллиметрона позволяет надеяться на открытие биотических молекул в газовых оболочках и на поверхности ледяных спутников — миров с океанами. Наблюдение дейтерированных изотопологов простых и сложных молекул во внешних холодных областях Солнечной системы также представляется важным направлением исследований, так как известно, что дейтерированные молекулы являются индикаторами переноса летучих веществ между внутренними и внешними областями планетной системы.

4.4.2. Астероиды, кометы и объекты пояса Койпера. Недавние наблюдения КТ "Гершель"/HIFI водяных шлейфов около поверхности карликовой планеты Церера в главном поясе астероидов со скоростью производства около 6 кг $с^{-1}$ указывают на криовулканизм [336]. Наличие и обилие воды в астероидах имеет отношение ко многим областям исследований Солнечной системы, начиная от происхождения воды и жизни на Земле и заканчивая крупномасштабной миграцией гигантских планет, таких как Юпитер. Длительное (~ 10 ч) наблюдение Цереры привело к обнаружению двух активных областей на поверхности Цереры. Чувствительность наблюдения составляла около 1 кг $с^{-1}$ скорости производства воды. Предлагаемые параметры приборов на космической обсерватории Миллиметрон приведут к увеличению чувствительности примерно до 100 г $с^{-1}$ или меньше, в зависимости от наблюдаемого перехода молекул воды. Такая высокая чувствительность открывает новое направление в исследованиях астероидов. Действительно, недавний анализ наблюдений космической миссии Dawn к карликовой планете Церера показывает [337], что глубоко под кратером Оккатор находится огромный резервуар солёной воды. Предполагается, что удар небесного тела, создавший кратер Оккатор, мог вызвать подъём солёных вод на его поверхность. Выбросы воды могут быть обнаружены и на других астероидах, например в углеродистых хондритах или кометах главного пояса астероидов. Сублимация паров воды может быть одной из причин, объясняющих наблюдаемые пылевые комы комет главного пояса астероидов, однако все попытки обнаружить воду до сих пор не увенчались успехом [338] из-за ограниченной чувствительности предыдущих наблюдений, включая КТ "Гершель"/HIFI.

Объекты пояса Койпера (ОПК) — это объекты, наиболее хорошо сохранившиеся со времени формирования нашей Солнечной системы. Они хранят информацию о химии протопланетного диска и физических процессах, которые привели к образованию планет. Фундаментальную характеристику ОПК — их размер — трудно измерить с Земли. Из-за огромного расстояния от Солнца большинство ОПК остаются неразрешёнными, а их видимая яркость вырождается в неизвестные размеры и альбедо. Распределение размеров ОПК будет полезно при изучении процессов, ответственных за образование и разрушение этих объектов. Очень мало известно о внутреннем строении этих небесных тел, которые варьируются в размерах от Плутона и Эриды (диаметром примерно 2300 км) до объектов диаметром меньше 100 км. В 2015 году КА New Horizons посетил Плутон и его спутник Харон и обнаружил на них разнообразные геологические особенности, свидетельствующие о внутренней активности этих тел. В случае Плутона различные молекулы, такие как окись углерода и азот, "выкачиваются" из недр и существуют в виде снежных отложений на поверхности [339]. Тепловые модели этих относительно богатых каменистыми породами тел в сочетании с доказательствами их геологической активности позволяют предположить, что в них могут присутствовать внутренние слои жидкой воды.

В астрономии Солнечной системы наиболее фундаментальным применением тепловых наблюдений является именно вычисление размеров и альбедо неразрешённых малых тел. Но гораздо большего можно достичь в миллиметровом диапазоне длин волн. Возможности космической обсерватории Миллиметрон позволят обнаружить и измерить тепловое излучение в пределе больших длин волн (длинноволновой хвост в распределении Рэлея – Джинса) для сотен ОПК. В этом режиме поток почти пропорционален мгновенному поперечному сечению объекта с очень слабой зависимостью от других плохо определённых параметров, таких как ИК-излучательная способность и распределение температуры по всей поверхности. Такие измерения КОМ обеспечат надёжную, непредвзятую оценку распределения ОПК по размерам. Точные альбедо также имеют решающее значение для спектрального моделирования поверхностей ОПК [340]. Космическая обсерватория Миллиметрон улучшит чувствительность по сравнению с КТ "Гершель" на два порядка. Это очень перспективная научная задача, учитывая успехи КТ "Гершель" в изучении ОПК (например, [341]). Возможности космической обсерватории Миллиметрон предлагают интересную перспективу обнаружения теплового излучения ото всех более чем 1000 известных в настоящее время ОПК и от тех, которые будут обнаружены до запуска. Полученные данные об альбедо и размерах для тысяч объектов обеспечат сравнительную планетологию большим объёмом наблюдательного материала. Кроме того, спектроскопические возможности космической обсерватории Миллиметрон будут включать получение распределений спектральной энергии для объектов пояса Койпера. Это можно сделать с помощью очень детальных теплофизических моделей, в которых учитываются эффекты спинового состояния, тепловой инерции и инфракрасного излучения. Например, высокая поверхностная тепловая инерция обычно подразумевает пористую, покрытую реголитом поверхность, а повышенный поток в дальнем ИК диапазоне указывает на покрытую кратерами поверхность [342]. Интересно посмотреть, как эти свойства меняются в зависимости от размера ОПК. Спектроскопические возможности космической обсерватории Миллиметрон позволят нам искать на поверхности ОПК длинноволновые особенности ледяных и минеральных структур, которые сильнее и менее неоднозначны, чем на более коротких длинах волн. В настоящее время только немногие самые яркие ОПК могут быть изучены с помощью видимой и ближней ИК-спектроскопии. То немногое, что известно о составах поверхностей ОПК, основано на широкополосной фотометрии. С помощью космической обсерватории Миллиметрон появится возможность составить карту состава поверхностей малых тел по всей внешней области Солнечной системы. Относительно неисследованный

[16] Для столь малых долей удобно использовать широко принятое обозначение "частица на миллион" — particle per million (ppm).

миллиметровый диапазон длин волн также может привести к новым открытиям.

Спутник Нептуна Тритон движется по ретроградной орбите. Это позволяет предположить, что он был захвачен из пояса Койпера в ранней Солнечной системе. На Тритоне, размер которого больше Плутона на несколько сотен километров, присутствуют гейзеры азота, обнаруженные на изображениях, полученных КА Voyager 2 в 1989 г. Пока их происхождение рассматривается как результат нагрева солнечным излучением относительно прозрачного льда [343], но также возможно, что они указывают на внутреннюю активность спутника. Следовательно, как и для Плутона, косвенные геологические доказательства в сочетании с моделями внутреннего строения [344] указывают на возможное присутствие подповерхностного океана. Наблюдения Миллиметрона предоставят уникальную возможность открыть и исследовать простые и сложные молекулы в газовых оболочках и на поверхности многих из этих объектов пояса Койпера, что позволит уточнить и продвинуть наше понимание образования и эволюции остаточного (осколочного) диска в Солнечной системе.

Исследования возбуждения паров воды при характерных для внешних областей Солнечной системы низких температурах 10 – 100 К могут быть успешно продолжены только с помощью космической обсерватории Миллиметрон. Изучение воды и её изотопологов в телах Солнечной системы [345 – 347] даёт ключевую информацию об их образовании и эволюции. Важнейшим параметром, в частности, является отношение дейтерий/водород (D/H) (рис. 22), измеренное для воды. Из лабораторных экспериментов, подтверждённых наблюдениями в межзвёздной среде, известно, что дейтерий обогащается во льдах за счёт газофазных ион-молекулярных реакций и реакций на поверхности пылевых частиц при низких температурах. Соотношение D/H для объектов Солнечной системы (см. рис. 22) даёт информацию о физико-химических условиях, при которых образовалась вода, и о процессах перемешивания воды в кометных льдах с увеличением D/H в зависимости от гелиоцентрического расстояния. Это соотношение также может дать информацию о процессах формирования внешних планет и о темпе теплового испарения атмосфер планет земной группы. Из наблюдений известно, что отношение D/H в 6 кометах из облака Оорта в среднем вдвое выше, чем изотопный состав глубинной воды Мирового океана VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), что исключает кометы как внешний источник земной воды. В наблюдениях КТ "Гершель"/HIFI впервые было определено соотношение D/H в комете из семейства Юпитера (103P/Hartley 2), согласующееся с величиной VSMOW [309]. Наблюдения, выполненные при помощи КТ "Гершель"/HIFI и приведённые в работе [348] для кометы семейства Юпитера 45P Honda-Mrkos-Pajdusakova, подтвердили низкие значения D/H (рис. 23). Соответственно, получение соотношения D/H для более крупной выборки комет имеет важное значение для лучшего понимания процессов формирования Солнечной системы. Определение соотношения дейтерия к водороду и других важнейших изотопных соотношений во множестве комет при помощи космической обсерватории Миллиметрон может рассматриваться в качестве ключевого измерения для понимания образования Солнечной системы. Наблюдения за выбросами воды в активных астероидах позволят получить информацию о содержании воды в главном поясе астероидов и имеют ключевое значение для будущих миссий к астероидам.

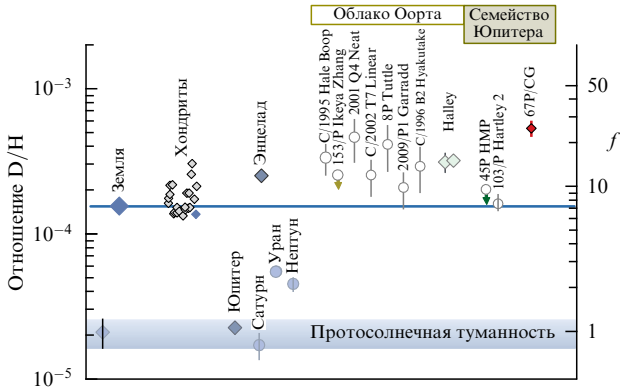


Рис. 22. (В цвете онлайн.) Отношение дейтерия к водороду для планет и малых тел в Солнечной системе. Ромбами показаны данные прямых измерений в различных космических миссиях, кружками — данные, полученные астрономическими методами. Горизонтальными линиями синего и голубого цвета показаны значения соотношения D/H в земном океане и в Солнечной прототуманности. (Рисунок заимствован из работы [346].)

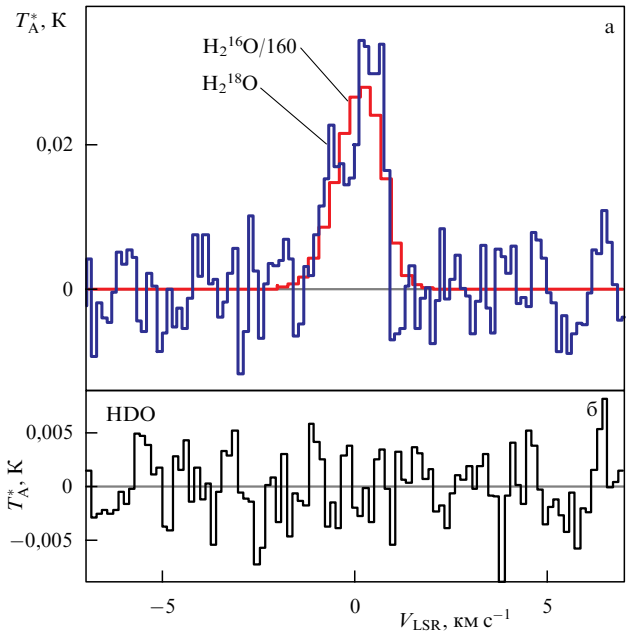


Рис. 23. (В цвете онлайн.) (а) Измеренные при помощи КТ "Гершель"/HIFI спектры перехода $1_{10}-1_{01}$ для изотопологов $H_2^{18}O$ (линия синего цвета) и $H_2^{16}O$ (линия красного цвета) молекулы воды в коме кометы 45P. (б) Спектр перехода $1_{10}-1_{01}$ для молекулы HDO. (Рисунок заимствован из работы [348].)

Измерения космических аппаратов показали, что многие из небесных тел во внешних областях Солнечной системы являются мирами с океанами, содержащими большие объёмы жидкой воды, изолированной под ледяными оболочками. Одной из важнейших является задача выявить характеристики и пути химического обмена между подлёдным океаном, ледяной поверхностью и газовой оболочкой исследуемых миров с океанами [349 – 351]. Уникальные наблюдения химического обмена сложными молекулами между подлёдным океаном и поверхностью данных миров с океанами, которые станут доступны с помощью космической обсерватории Миллиметрон, представляются критически важными для оценки их астробиологического потенциала и поисков жизни в Солнечной системе.

5. Заключение

• Уникальность космической обсерватории Миллиметрон определяется следующими тремя факторами: 1) он будет способен проводить исследования в широком диапазоне длин волн от 50 мкм до 10 мм, 2) с беспрецедентно высоким угловым разрешением и 3) недостижимой ранее чувствительностью в этой области спектра;

• с его помощью в режиме одиночного зеркала станет возможным регистрировать y- и μ-искажения спектра реликтового излучения, вызванные энерговыделением во Вселенной в очень ранние эпохи, начиная от $z \sim 2 \times 10^6$. Это откроет новый канал информации для космологов о физических явлениях в ранней Вселенной, которые до сих пор были недоступны для наблюдений;

• космической обсерваторией Миллиметрон в комплексе с обсерваторией ALMA и Телескопом горизонта событий (EHT) будет получена детальная информация фундаментальной важности о геометрии пространства-времени и свойствах плазмы в сильных гравитационных полях окрестностей чёрных дыр в Sgr A* и M87* с пространственным разрешением по меньшей мере на порядок выше угловых размеров их шварцшильдовских радиусов, а для чёрной дыры M87 — с временны́м разрешением, на порядок меньшим шварцшильдовского времени;

• с его помощью будут исследованы источники энергии и соответствующие физические процессы, скрытые пылью в недрах экстремально оптически плотных областей активных ядер галактик, а также в недрах ярких ИК галактик как в близкой, так и в ранней ($z \gtrsim 7$) Вселенной;

• космическая обсерватория Миллиметрон приоткроет завесу над загадкой возникновения гигантских ($M_\bullet \gtrsim 10^9 M_\odot$) сверхмассивных чёрных дыр в молодой (предреионизационной) Вселенной;

• возможности спектроскопии высокого разрешения ($R \gtrsim 10^5$) с высокой чувствительностью, которые будут релизованы на космической обсерватории Миллиметрон, сыграют принципиальную роль в молекулярной диагностике межзвездных облаков — гнёзд, в которых рождаются звёзды и планетные системы. Это позволит расширить пределы сложности органических молекул в межзвёздной среде и, возможно, понять происхождение хиральности жизни на Земле;

• спектральные и фотометрические наблюдения протопланетных дисков КОМ позволят выполнить детальный анализ динамики возникновения и роста планетезималей и протопланет и траспорта воды в зоны обитаемости;

• Миллиметрон откроет новые возможности для наблюдений химического обмена между различными фазами в мирах с океанами Солнечной системы.

Мы благодарны рецензентам за критические замечания. Работы выполнена при частичной поддержке проектом "Новые научные группы ФИАН" № 41-2020. АП благодарит за поддержку РНФ (код проекта 19-72-00064). Работа АВ поддержана грантом РНФ (код проекта 18-12-00351) и проектом Государственного задания FEUZ-2020-0038. Работа ИЗ (раздел 4) выполнялась при поддержке гранта РФФИ (код проекта 18-02-00660). ДВ признателен Правительству РФ и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (№ 13.1902.21.0039). Работа ВШ выполнялась в рамках проекта "Исследование звёзд с экзопланетами" по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных (соглашение 075-15-2019-1875).

Дополнение при корректуре

Совсем недавно появилась публикация [352], в которой на выборке из 1938 активных галактических ядер северной части небесной сферы с потоком на длине волны 8 ГГц, большим 0,33 Ян, убедительно продемонстрирована связь событий нейтрино с энергиями от ТэВ до нескольких ПэВ с блазарами.

Список литературы

1. Кардашев Н С и др. *Труды ФИАН* **228** 112 (2000)
2. Smirnov A V et al. *Proc. SPIE* **8442** 84424C (2012)
3. Кардашёв Н С и др. *УФН* **184** 1319 (2014); Kardashev N S et al. *Phys. Usp.* **57** 1199 (2014)
4. Spergel D N et al. *Astrophys. J. Suppl.* **170** 377 (2007)
5. Nolta M R et al. *Astrophys. J. Suppl.* **180** 296 (2009)
6. Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **594** A13 (2016)
7. Perlmutter S et al. *Astrophys. J.* **517** 565 (1999)
8. Goobar A et al. *Physica Scr.* (T85) 47 (2000)
9. Oesch P A et al. *Astrophys. J.* **819** 129 (2016)
10. Lo Faro B et al. *Astrophys. J.* **762** 108 (2013)
11. Thacker C et al. *Astrophys. J.* **811** 125 (2015)
12. Baganoff F K et al. *Nature* **413** 45 (2001)
13. Sun M et al. *Astrophys. J.* **565** 867 (2002)
14. Bregman J N et al. *Astrophys. J.* **699** 1765 (2009)
15. Abbott B P et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102 (2016)
16. Верходанов О В *УФН* **186** 3 (2016); Verkhodanov O V *Phys. Usp.* **59** 3 (2016)
17. Akiyama K et al. (Event Horizon Telescope Collab.) *Astrophys. J. Lett.* **875** L1 (2019)
18. Akiyama K et al. (Event Horizon Telescope Collab.) *Astrophys. J. Lett.* **875** L2 (2019)
19. Akiyama K et al. (Event Horizon Telescope Collab.) *Astrophys. J. Lett.* **875** L3 (2019)
20. Akiyama K et al. (Event Horizon Telescope Collab.) *Astrophys. J. Lett.* **875** L5 (2019)
21. Щекинов Ю А, Лукаш В Н, Михеева Е В, Пилипенко С В *УФН* **187** 1033 (2017); Shchekinov Yu A, Lukash V N, Mikheeva E V, Pilipenko S V *Phys. Usp.* **60** 961 (2017)
22. Шайхутдинов А Р, Костенко В И *Космические исследования* **58** 434 (2020); Shaykhutdinov A R, Kostenko V I *Cosmic Res.* **58** 393 (2020)
23. Andrianov A S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **500** 4866 (2021)
24. Thompson A R, Moran J M, Swenson G W (Jr.) *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy* 3rd ed. (Cham: Springer Intern. Publ., 2017)
25. Johnson M D *Astrophys. J.* **833** 74 (2016)
26. Коваленко И Д, Эйсмонт Н А *Письма в Астрон. журн.* **44** 307 (2018); Kovalenko I D, Eismont N A *Astron. Lett.* **44** 289 (2018)
27. Mather J C et al. *Astrophys. J. Lett.* **354** L37 (1990)
28. Zeldovich Ya B, Sunyaev R A *Astrophys. Space Sci.* **4** 301 (1969)
29. Илларионов А Ф, Сюняев Р А *Астрон. журн.* **51** 1162 (1974); Illarionov A F, Syunyaev R A *Sov. Astron.* **18** 691 (1975)
30. Burigana C, Danese L, de Zotti G *Astron. Astrophys.* **246** 49 (1991)
31. Hu W, Silk J *Phys. Rev. D* **48** 485 (1993)
32. Chluba J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **454** 4182 (2015)
33. Hu W, Scott D, Silk J *Phys. Rev. D* **49** 648 (1994)
34. Hill J C et al. *Phys. Rev. Lett.* **115** 261301 (2015)
35. Carr B J et al. *Phys. Rev. D* **81** 104019 (2010)
36. Hu W, Silk J *Phys. Rev. Lett.* **70** 2661 (1993)
37. Hu W, Scott D, Silk J *Astrophys. J. Lett.* **430** L5 (1994)
38. Daly R A *Astrophys. J.* **371** 14 (1991)
39. Компанеец А С *ЖЭТФ* **31** 876 (1956); Kompaneets A S *Sov. Phys. JETP* **4** 730 (1957)
40. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Astrophys. Space Sci.* **7** 20 (1970)
41. Abitbol M H et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **471** 1126 (2017)
42. Challinor A, Lasenby A *Astrophys. J.* **499** 1 (1998)
43. Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **594** A27 (2016)
44. Kogut A et al. *JCAP* **2011** (07) 025 (2011)
45. Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **576** A104 (2015)
46. Adam R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **594** A10 (2016)
47. Lamarre J M *Appl. Opt.* **25** 870 (1986)
48. de Bernardis P et al. *Astron. Astrophys.* **538** A86 (2012)

49. Aghanim N et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **641** A6 (2020)
50. Riess A G et al. *Astrophys. J.* **876** 85 (2019)
51. Alam S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **470** 2617 (2017)
52. Freedman W L et al. *Astrophys. J.* **882** 34 (2019)
53. Gao F et al. *Astrophys. J.* **817** 128 (2016)
54. Reid M J et al. *Astrophys. J.* **767** 154 (2013)
55. Kuo C Y et al. *Astrophys. J.* **800** 26 (2015)
56. Refsdal S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **128** 307 (1964)
57. Ларченкова Т И, Лыскова Н С, Лутовинов А А *Письма в Астрон. журн.* **37** 483 (2011); Larchenkova T I, Lyskova N S, Lutovinov A A *Astron. Lett.* **37** 441 (2011)
58. Suyu S H et al. *Astrophys. J. Lett.* **788** L35 (2014)
59. Wong K C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **498** 1420 (2020)
60. Abbott T M C et al. (The Dark Energy Survey and the South Pole Telescope Collab.) *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **480** 3879 (2018)
61. Di Valentino E, Melchiorri A, Silk J *Nat. Astron.* **4** 196 (2020)
62. Ларченкова Т И, Ермаш А А, Дорошкевич А Г *Письма в Астрон. журн.* **45** 866 (2019); Larchenkova T I, Ermash A A, Doroshkevich A G *Astron. Lett.* **45** 821 (2019)
63. Kakiichi K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **463** 4019 (2016)
64. Konno A et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **70** S16 (2018)
65. Naab T, Ostriker J P *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **55** 59 (2017)
66. McQuinn M *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **54** 313 (2016)
67. Bullock J S, Boylan-Kolchin M *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **55** 343 (2017)
68. Wechsler R H, Tinker J L *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **56** 435 (2018)
69. Weisz D R et al. *Astrophys. J.* **789** 148 (2014)
70. Vieira J D et al. *Nature* **495** 344 (2013)
71. Dowell C D et al. *Astrophys. J.* **780** 75 (2014)
72. Hezaveh Y D et al. *Astrophys. J.* **767** 132 (2013)
73. Bouwens R J et al. *Astrophys. J.* **670** 928 (2007)
74. Bouwens R J et al. *Nature* **469** 504 (2011)
75. Ellis R S et al. *Astrophys. J. Lett.* **763** L7 (2013)
76. Bouchet P et al. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127** 612 (2015)
77. Senarath M R et al. *Astrophys. J. Lett.* **869** L26 (2018)
78. Laursen P et al. *Astron. Astrophys.* **627** A84 (2019)
79. Stark D P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **464** 469 (2017)
80. Songaila A et al. *Astrophys. J.* **859** 91 (2018)
81. Matthee J et al. *Astron. Astrophys.* **619** A136 (2018)
82. Konno A et al. *Astrophys. J.* **797** 16 (2014)
83. Hu W et al. *Astrophys. J.* **886** 90 (2019)
84. Mesinger A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **446** 566 (2015)
85. Choudhury T R et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **452** 261 (2015)
86. Pacucci F et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **459** 1432 (2016)
87. Natarajan P et al. *Astrophys. J.* **838** 117 (2017)
88. Barrow K S S, Aykutalp A, Wise J H *Nat. Astron.* **2** 987 (2018)
89. Roberts-Borsani G W et al. *Astrophys. J.* **823** 143 (2016)
90. Bouwens R J et al. *Astrophys. J.* **803** 34 (2015)
91. Oke J B, Gunn J E *Astrophys. J.* **266** 713 (1983)
92. Robertson B E et al. *Astrophys. J. Lett.* **802** L19 (2015)
93. Bouwens R J et al. *Astrophys. J.* **830** 67 (2016)
94. Miley G, De Breuck C *Astron. Astrophys. Rev.* **15** 67 (2008)
95. Mellema G et al. *Exp. Astron.* **36** 235 (2013)
96. Overzier R A *Astron. Astrophys. Rev.* **24** 14 (2016)
97. Harikane Y et al. *Astrophys. J.* **883** 142 (2019)
98. Cantalupo S, in *Gas Accretion onto Galaxies* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 430, Eds A Fox, R Davé) (Cham: Springer, 2017) p. 195
99. Garel T et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **422** 310 (2012)
100. Sarkar A, Samui S *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131** 074101 (2019)
101. Geach J E et al. *Astrophys. J.* **832** 37 (2016)
102. Ono Y et al. *Astrophys. J.* **795** 5 (2014)
103. Decarli R et al. *Astrophys. J.* **882** 138 (2019)
104. Lam D et al., arXiv:1903.08177
105. Mahler G et al. *Astrophys. J.* **873** 96 (2019)
106. Hashimoto T et al. *Nature* **557** 392 (2018)
107. Shibuya T et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **70** S15 (2018)
108. Coe D et al. *Astrophys. J.* **884** 85 (2019)
109. Hao C-N et al. *Astrophys. J.* **864** 145 (2018)
110. Franx M et al. *Astrophys. J.* **486** L75 (1997)
111. Watson D et al. *Nature* **519** 327 (2015)
112. Boogaard L A et al. *Astrophys. J.* **882** 140 (2019)
113. Aravena M et al. *Astrophys. J.* **882** 136 (2019)
114. Laporte N et al. *Astrophys. J. Lett.* **837** L21 (2017)
115. Tamura Y et al. *Astrophys. J.* **874** 27 (2019)
116. Hashimoto T et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **71** 71 (2019)
117. Marrone D P et al. *Nature* **553** 51 (2018)
118. Smit R et al. *Nature* **553** 178 (2018)
119. Casey C M, Narayanan D, Cooray A *Phys. Rep.* **541** 45 (2014)
120. U V et al. *Astrophys. J. Suppl.* **203** 9 (2012)
121. Polletta M et al. *Astrophys. J.* **663** 81 (2007)
122. Tsai C-W et al. *Astrophys. J.* **805** 90 (2015)
123. Gilli R, Comastri A, Hasinger G *Astron. Astrophys.* **463** 79 (2007)
124. Gruppioni C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **432** 23 (2013)
125. Venemans B P et al. *Astrophys. J. Lett.* **801** L11 (2015)
126. Jiang L et al. *Astrophys. J.* **833** 222 (2016)
127. Bañados E et al. *Astrophys. J. Suppl.* **227** 11 (2016)
128. Reed S L et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **468** 4702 (2017)
129. Matsuoka Y et al. *Astrophys. J.* **869** 150 (2018)
130. Mortlock D J et al. *Nature* **474** 616 (2011)
131. Bañados E et al. *Nature* **553** 473 (2018)
132. Wang F et al. *Astrophys. J.* **884** 30 (2019)
133. Yang J et al. *Astron. J.* **157** 236 (2019)
134. Matsuoka Y et al. *Astrophys. J. Lett.* **872** L2 (2019)
135. Kormendy J, Richstone D *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **33** 581 (1995)
136. Marconi A, Hunt L K *Astrophys. J. Lett.* **589** L21 (2003)
137. Ferrarese L, Ford H *Space Sci. Rev.* **116** 523 (2005)
138. Kormendy J, Ho L C *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **51** 511 (2013)
139. Bullock J S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **321** 559 (2001)
140. Heckman T M, Best P N *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **52** 589 (2014)
141. Decarli R et al. *Astrophys. J.* **854** 97 (2018)
142. Wu X-B et al. *Nature* **518** 512 (2015)
143. Dijkstra M *Saas-Fee Adv. Course* **46** 1 (2019)
144. Vasiliev E O, Shchekinov Y A *Astrophys. J.* **887** 174 (2019)
145. Agarwal B et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **432** 3438 (2013)
146. Ferrara A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **443** 2410 (2014)
147. Alexander T, Natarajan P *Science* **345** 1330 (2014)
148. Novikov I D, Thorne K "Astrophysics of black holes", in *Black Holes* (Eds C de Witt, B S de Witt) (New York: Gordon and Breach, 1973) p. 343
149. Bouwens R J et al. *Astrophys. J.* **880** 25 (2019)
150. Schwarzschild K *Sitzungsber. Königlich Preuß. Akad. Wiss. Berlin* 189 (1916)
151. Бисноватый-Коган Г С, Блинников С И *Письма в Астрон. журн.* **2** 489 (1976); Bisnovatyi-Kogan G S, Blinnikov S I *Sov. Astron. Lett.* **2** 191 (1976)
152. Oda M *Space Sci. Rev.* **20** 757 (1977)
153. Bardeen J M, in *Black Holes* (Eds C de Witt, B S de Witt) (New York: Gordon and Breach, 1973) p. 215
154. Luminet J-P *Astron. Astrophys.* **75** 228 (1979)
155. Johnson M D et al. *Sci. Adv.* **6** eaaz1310 (2020)
156. Johannsen T, Psaltis D *Astrophys. J.* **718** 446 (2010)
157. Falcke H, Markoff S B *Class. Quantum Grav.* **30** 244003 (2013)
158. Kamruddin A B, Dexter J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **434** 765 (2013)
159. Goddi C et al. *Int. J. Mod. Phys. D* **26** 1730001 (2017)
160. Докучаев В И, Назарова Н О *УФН* **190** 627 (2020); Dokuchaev V I, Nazarova N O *Phys. Usp.* **63** 583 (2020)
161. Dokuchaev V I, Nazarova N O *Universe* **6** 154 (2020)
162. Gralla S E *Phys. Rev. D* **102** 044017 (2020)
163. Genzel R, Eisenhauer F, Gillessen S *Rev. Mod. Phys.* **82** 3121 (2010)
164. Kormendy J *Astrophys. J.* **325** 128 (1988)
165. Dressler A, Richstone D O *Astrophys. J.* **324** 701 (1988)
166. Garcia M R et al. *Astrophys. J.* **710** 755 (2010)
167. Gebhardt K et al. *Astrophys. J.* **729** 119 (2011)
168. Walsh J L et al. *Astrophys. J.* **770** 86 (2013)
169. Broderick A E et al. *Astrophys. J.* **805** 179 (2015)
170. Magorrian J et al. *Astrophys. J.* **115** 2285 (1998)
171. López-Cruz O et al. *Astrophys. J. Lett.* **795** L31 (2014)
172. Bonfini P, Dullo B T, Graham A W *Astrophys. J.* **807** 136 (2015)
173. Hogan M T et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **453** 1201 (2015)
174. Koss M et al. *Astrophys. J.* **850** 74 (2017)
175. Falcke H, Melia F, Agol E *Astrophys. J. Lett.* **528** L13 (2000)
176. Genzel R, Townes C H *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **25** 377 (1987)
177. Melia F, Falcke H *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **39** 309 (2001)
178. Ghez A M et al. *Astrophys. J.* **689** 1044 (2008)
179. Roy S, Pramesh Rao A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **349** L25 (2004)
180. Dibi S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441** 1005 (2014)

181. Falcke H et al. *Astrophys. J.* **499** 731 (1998)
182. Yuan F, Quataert E, Narayan R *Astrophys. J.* **606** 894 (2004)
183. Lu R-S et al. *Astron. Astrophys.* **525** A76 (2011)
184. Falcke H, in *Proc. of the 169th Symp. of the Intern. Astronomical Union, The Hague, The Netherlands, August 23–29, 1994* (Eds L Blitz, P Teuben) (Dordrecht: Kluwer, 1996) p. 169; astro-ph/9411065
185. Chan C-K t al. *Astrophys. J.* **799** 1 (2015)
186. Younsi Z, Wu K, Fuerst S V *Astron. Astrophys.* **545** A13 (2012)
187. Younsi Z, Wu K *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **454** 3283 (2015)
188. Yuan F, Narayan R *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **52** 529 (2014)
189. Lu R-S et al. *Astrophys. J.* **859** 60 (2018)
190. Davies R D, Walsh D, Booth R S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **177** 319 (1976)
191. Falcke H, Markoff S, Bower G C *Astron. Astrophys.* **496** 77 (2009)
192. Doeleman S S et al. *Nature* **455** 78 (2008)
193. Brinkerink C D et al. *Astron. Astrophys.* **621** A119 (2019)
194. Fejer J A *Proc. R. Soc. Lond. A* **220** 455 (1953)
195. Rickett B J *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **15** 479 (1977)
196. Zhu Z, Johnson M D, Narayan R *Astrophys. J.* **870** 6 (2019)
197. Dexter J et al. *Mon. Not. R. Astrophys. Soc.* **442** 2797 (2014)
198. Chen Z et al. *Astrophys. J. Lett.* **882** L28 (2019)
199. Iwata Y et al. *Astrophys. J. Lett.* **892** L30 (2020)
200. Roelofs F et al. *Astron. Astrophys.* **625** A124 (2019)
201. Bower G C et al. *Astrophys. J.* **588** 331 (2003)
202. Marrone D P et al. *Astrophys. J.* **640** 308 (2006)
203. Murchikova E M et al. *Nature* **570** 83 (2019)
204. Baganoff F K et al. *Astrophys. J.* **591** 891 (2003)
205. Gardner F F, Whiteoak J B *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **4** 245 (1966)
206. Quataert E, Gruzinov A *Astrophys. J.* **539** 809 (2000)
207. Bondi H *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **112** 195 (1952)
208. Edgar R *New Astron. Rev.* **48** 843 (2004)
209. Narayan R, Yi I *Astrophys. J. Lett.* **428** L13 (1994)
210. Di Matteo T et al. *Astrophys. J.* **582** 133 (2003)
211. Gralla S E, Holz D E, Wald R M *Phys. Rev. D* **100** 024018 (2019)
212. Mościbrodzka M et al. *Astrophys. J.* **706** 497 (2009)
213. Dexter J et al. *Astrophys. J.* **717** 1092 (2010)
214. Eatough R P et al. *Nature* **501** 391 (2013)
215. Bower G C et al. *Astrophys. J.* **868** 101 (2018)
216. Flamm L, Schumann R *Phys. Z.* **17** 448 (1916)
217. Einstein A, Rosen N *Phys. Rev.* **48** 73 (1935)
218. Wheeler J A *Phys. Rev.* **97** 511 (1955)
219. Kardashev N S, Novikov I D, Shatskiy A A *Int. J. Mod. Phys. D* **16** 909 (2007)
220. Новиков И Д *УФН* **188** 301 (2018); Novikov I D *Phys. Usp.* **61** 280 (2018)
221. Новиков И Д, Новиков Д И *ЖЭТФ* **156** 585 (2019); Novikov I D, Novikov D I *J. Exp. Theor. Phys.* **129** 495 (2019)
222. Field G B, Rogers R D *Astrophys. J.* **403** 94 (1993)
223. Lobanov A *Nat. Astron.* **1** 0069 (2017)
224. Johnson M D et al. *Astrophys. J.* **850** 172 (2017)
225. Bouman K L et al., arXiv:1711.01357
226. Palumbo D C M et al. *Astrophys. J.* **881** 62 (2019)
227. Shemmer O et al. *Astrophys. J.* **614** 547 (2004)
228. Liao N-H et al., arXiv:1807.05210
229. Ros E et al. *Astron. Astrophys.* **633** L1 (2020)
230. Ricci C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **468** 1273 (2017)
231. Sanders D B et al. *Astrophys. J.* **325** 74 (1988)
232. Di Matteo T, Springel V, Hernquist L *Nature* **433** 604 (2005)
233. Bär R E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **489** 3073 (2019)
234. Lagache G, Puget J L, Dole H *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **43** 727 (2005)
235. Persic M, Rephaeli Y *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **403** 1569 (2010)
236. Rephaeli Y, Persic M, in *Cosmic Rays in Star-Forming Environments* (Astrophysics and Space Science Proc., Vol. 34, Eds D Torres, O Reimer) (Berlin: Springer, 2013) p. 193; arXiv:1304.0416
237. Anantharamaiah K R et al. *Astrophys. J.* **537** 613 (2000)
238. Rangwala N et al. *Astrophys. J.* **743** 94 (2011)
239. Downes D, Solomon P M *Astrophys. J.* **507** 615 (1998)
240. Barcos-Muñoz L et al. *Astrophys. J.* **799** 10 (2015)
241. Щекинов Ю А, Васильев Е О *Астрофизика* **60** 487 (2017); Shchekinov Yu A, Vasiliev E O *Astrophysics* **60** 449 (2017)
242. Downes D, Eckart A *Astron. Astrophys.* **468** L57 (2007)
243. Paggi A et al. *Astrophys. J.* **841** 44 (2017)
244. Tunnard R et al. *Astrophys. J.* **800** 25 (2015)
245. Meijerink R et al. *Astron. Astrophys.* **525** A119 (2011)
246. García-Burillo S et al. *Astron. Astrophys.* **567** A125 (2014)
247. Liu L et al. *Astrophys. J.* **846** 5 (2017)
248. König S et al. *Astron. Astrophys.* **602** A42 (2017)
249. Chini R et al. *Astrophys. J.* **645** L61 (2006)
250. Zinchenko I et al. *Astrophys. J.* **810** 10 (2015)
251. Winn J N, Fabrycky D C *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **53** 409 (2015)
252. Gehrz R D et al. *Adv. Space Res.* **44** 413 (2009)
253. Pilbratt G L et al. *Astron. Astrophys.* **518** L1 (2010)
254. André P et al., in *Protostars and Planets VI* (Eds H Beuther et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2014) p. 27; arXiv:1312.6232
255. Li G-X et al. *Astron. Astrophys.* **591** A5 (2016)
256. Pineda J L et al. *Astron. Astrophys.* **554** A103 (2013)
257. Langer W D et al. *Astron. Astrophys.* **561** A122 (2014)
258. Pineda J L, Langer W D, Goldsmith P F *Astron. Astrophys.* **570** A121 (2014)
259. Graf U U et al. *Astron. Astrophys.* **542** L16 (2012)
260. Bergin E A et al. *Nature* **493** 644 (2013)
261. Trapman L et al. *Astron. Astrophys.* **605** A69 (2017)
262. Kama M et al. *Astron. Astrophys.* **634** A88 (2020)
263. Venturini J, Ronco M P, Guilera O M *Space Sci. Rev.* **216** 86 (2020)
264. McKee C F, Ostriker E C *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **45** 565 (2007)
265. Tan J C et al., in *Protostars and Planets VI* (Eds H Beuther et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2014) p. 149; arXiv:1402.0919
266. Bonnell I A, Bate M R, Zinnecker H *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **298** 93 (1998)
267. Louvet F, in *SF2A-2018*: *Proc. of the Annual Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics* (Eds P Di Matteo et al.) (2018) p. 311
268. van Dishoeck E F et al. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **123** 138 (2011)
269. Mottram J C et al. *Astron. Astrophys.* **572** A21 (2014)
270. Güsten R et al. *Nature* **568** 357 (2019)
271. Corby J F et al. *Astron. Astrophys.* **610** A10 (2018)
272. Ceccarelli C et al. *Astrophys. J.* **850** 176 (2017)
273. Fontani F et al. *Astron. Astrophys.* **605** A57 (2017)
274. Codella C et al. *Astron. Astrophys.* **605** L3 (2017)
275. Punanova A et al. *Astrophys. J.* **855** 112 (2018)
276. Favre C et al. *Astrophys. J.* **859** 136 (2018)
277. Herbst E, van Dishoeck E F *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **47** 427 (2009)
278. McGuire B A *Astrophys. J. Suppl.* **239** 17 (2018)
279. McCarthy M C et al. *Nat. Astron.* **5** 176 (2021)
280. Watanabe N, Kouchi A *Astrophys. J.* **571** L173 (2002)
281. Shingledecker C N et al. *Astrophys. J.* **861** 20 (2018)
282. Vasyunin A I et al. *Astrophys. J.* **842** 33 (2017)
283. Garrod R T, Herbst E *Astron. Astrophys.* **457** 927 (2006)
284. Мурга М С и др. *Усп. хим.* **89** 430 (2020); Murga M S et al. *Russ. Chem. Rev.* **89** 430 (2020)
285. Jiménez-Serra I et al. *Astrophys. J. Lett.* **830** L6 (2016)
286. McGuire B A et al. *Science* **359** 202 (2018)
287. McGuire B A et al. *Science* **352** 1449 (2016)
288. Zeng S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **484** L43 (2019)
289. Rivilla V M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **483** L114 (2019)
290. Elsila J E, Glavin D P, Dworkin J P *Meteorit. Planet. Sci.* **44** 1323 (2009)
291. Altwegg K et al. *Sci. Adv.* **2** e1600285 (2016)
292. Pizzarello S, Zolensky M, Turk K A *Geochim. Cosmochim. Acta* **67** 1589 (2003)
293. Bailey J et al. *Science* **281** 672 (1998)
294. Modica P et al. *Astrophys. J.* **788** 79 (2014)
295. Cleeves L I et al. *Astrophys. J.* **819** 13 (2016)
296. Osamura Y, Roberts H, Herbst E *Astron. Astrophys.* **421** 1101 (2004)
297. Parise B et al. *Astron. Astrophys.* **416** 159 (2004)
298. Parise B et al. *Astron. Astrophys.* **453** 949 (2006)
299. Faure A et al. *Astron. Astrophys.* **584** A98 (2015)
300. Öberg K I et al. *Nature* **520** 198 (2015)
301. Walsh C et al. *Astrophys. J. Lett.* **823** L10 (2016)
302. Favre C et al. *Astrophys. J. Lett.* **862** L2 (2018)
303. Molyarova T et al. *Astrophys. J.* **866** 46 (2018)
304. Wiebe D S et al. *Mon. Not. R. Astrophys. Soc.* **485** 1843 (2019)
305. Lee J-E et al. *Nat. Astron.* **3** 314 (2019)

306. Snell R L et al. *Astrophys. J.* **539** L101 (2000)
307. Caselli P et al. *Astron. Astrophys.* **521** L29 (2010)
308. van der Tak F F S et al. *Astron. Astrophys.* **625** A103 (2019)
309. Hartogh P et al. *Nature* **478** 218 (2011)
310. Lis D C et al. *Astron. Astrophys.* **625** L5 (2019)
311. Ceccarelli C et al. *Astrophys. J.* **631** L81 (2005)
312. Jørgensen J K, van Dishoeck E F *Astrophys. J. Lett.* **725** L172 (2010)
313. Riviere-Marichalar P et al. *Astron. Astrophys.* **538** L3 (2012)
314. Notsu S et al. *Astrophys. J.* **836** 118 (2017)
315. Neish C D, Somogyi Á, Smith M A *Astrobiology* **10** 337 (2010)
316. Nimmo F, Pappalardo R T *J. Geophys. Res.* **121** 1378 (2016)
317. Lunine J I *Acta Astronaut.* **131** 123 (2017)
318. Waite J H (Jr.) et al. *Science* **311** 1419 (2006)
319. Waite J H et al. *Science* **356** 155 (2017)
320. Waite J H (Jr.) et al. *Nature* **460** 487 (2009)
321. Lunine J I, Lorenz R D *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **37** 299 (2009)
322. Hayes A G *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **44** 57 (2016)
323. Iess L et al. *Science* **337** 457 (2012)
324. Teolis B D et al. *Icarus* **284** 18 (2017)
325. Dalton J B et al. *Icarus* **177** 472 (2005)
326. Roth L et al. *Science* **343** 171 (2014)
327. Schubert G, Sohl F, Hussmann H "Interior of Europa", in *Europa* (The University of Arizona Space Science Series, Eds R T Pappalardo, W B McKinnon, K K Khurana with the assistance of René Dotson with 85 collaborating authors) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2009) p. 353
328. Sotin C, Tobie G, Wahr J, McKinnon W B "Tides and tidal heating on Europa", in *Europa* (The University of Arizona Space Science Series, Eds R T Pappalardo, W B McKinnon, K K Khurana with the assistance of René Dotson with 85 collaborating authors) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2009) p. 85
329. Khurana K K et al. *Nature* **395** 777 (1998)
330. Kivelson M G, Khurana K K, Volwerk M *Icarus* **157** 507 (2002)
331. Saur J et al. *J. Geophys. Res.* **120** 1715 (2015)
332. Wirström E S et al. *Astron. Astrophys.* **637** A90 (2020)
333. Hsu H-W et al. *Nature* **519** 207 (2015)
334. Postberg F et al. *Nature* **474** 620 (2011)
335. Sekine Y et al. *Nat. Commun.* **6** 8604 (2015)
336. Küppers M et al. *Nature* **505** 525 (2014)
337. De Sanctis M C et al. *Nat. Astron.* **4** 786 (2020)
338. O'Rourke L et al. *Astrophys. J. Lett.* **774** L13 (2013)
339. Stern S A et al. *Science* **350** aad1815 (2015)
340. de Bergh C et al., in *The Science of Solar System Ices* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 356, Eds M S Gudipati, J Castillo-Rogez) (New York: Springer Science + Business Media, 2013) p. 107
341. Müller T G et al. *Astron. Astrophys.* **518** L146 (2010)
342. Lellouch E et al. *Astron. Astrophys.* **557** A60 (2013)
343. Soderblom L A et al. *Science* **250** 410 (1990)
344. Robuchon G, Nimmo F *Icarus* **216** 426 (2011)
345. Hartogh P et al. *Planet. Space Sci.* **57** 1596 (2009)
346. Altwegg K et al. *Science* **347** 1261952 (2015)
347. Altwegg K, Balsiger H, Fuselier S A *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **57** 113 (2019)
348. Lis D C et al. *Astrophys. J. Lett.* **774** L3 (2013)
349. Teolis B D et al. *Astrobiology* **17** 926 (2017)
350. Шематович В И *Астрон. вестн.* **52** 379 (2018); Shematovich V I *Solar Syst. Res.* **52** 371 (2018)
351. Plainaki C et al. *Space Sci. Rev.* **214** 40 (2018)
352. Plavin A V et al. *Astrophys. J.* **908** 157 (2021)

Objectives of the Millimetron Space Observatory science program and technical capabilities of its realization

I.D. Novikov [1,2,3,a], **S.F. Likhachev** [1,b], **Yu.A. Shchekinov** [1,4,c], **A.S. Andrianov** [1,d], **A.M. Baryshev** [1,5,e], **A.I. Vasyunin** [6,f], **D.Z. Wiebe** [7,g], **Th. de Graauw** [1,5,h], **A.G. Doroshkevich** [1,i], **I.I. Zinchenko** [8,j], **N.S. Kardashev** [1], **V.I. Kostenko** [1,k], **T.I. Larchenkova** [1,l], **L.N. Likhacheva** [1,m], **A.O. Lyakhovets** [1,n], **D.I. Novikov** [1,o], **S.V. Pilipenko** [1,p], **A.F. Punanova** [6,q], **A.G. Rudnitsky** [1,r], **A.V. Smirnov** [1,s], **V.I. Shematovich** [7,t]

[1] *Lebedev Physical Institute, Astrospace Center, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation*
[2] *The Niels Bohr International Academy, The Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark*
[3] *National Research Center 'Kurchatov Institute', pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation*
[4] *Raman Research Institute, C.V. Raman Avenue, 560080 Sadashiva Nagar, Bangalore, India*
[5] *Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, PO Box 72, 9700 Groningen, The Netherlands*
[6] *Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, ul. Mira 19, 620002 Ekaterinburg, Russian Federation*
[7] *Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, ul. Pyatnitskaya 48, 119017 Moscow, Russian Federation*
[8] *Federal Research Center Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation*

E-mail: [a] *novikov@asc.rssi.ru*, [b] *slikhach@asc.rssi.ru*, [c] *yus@asc.rssi.ru*, [d] *andrianovas@lebedev.ru*, [e] *andrey@astro.rug.nl*, [f] *anton.vasyunin@urfu.ru*, [g] *dwiebe@inasan.ru*, [h] *tdegraau@alma.cl*, [i] *dorr@asc.rssi.ru*, [j] *zin@appl.sci-nnov.ru*, [k] *vkostenko@asc.rssi.ru*, [l] *ltanya@asc.rssi.ru*, [m] *larlikh@asc.rssi.ru*, [n] *lyahovecao@lebedev.ru*, [o] *novikovdi@lebedev.ru*, [p] *spilipenko@asc.rssi.ru*, [q] *anna.punanova@urfu.ru*, [r] *arud@asc.rssi.ru*, [s] *asmirn@asc.rssi.ru*, [t] *shematov@inasan.ru*

We present the scientific program of the Spectr-M project aimed at the creation and operation of the Millimetron Space Observatory (MSO) planned for launch in the late 2020s. The unique technical capabilities of the observatory will enable broadband observations of astronomical objects from 50 μm to 10 mm wavelengths with a record sensitivity (up to ~ 0.1 μJy) in the single-dish mode and with an unprecedented high angular resolution (~ 0.1 μs) in the ground-space very long baseline interferometer (SVLBI) regime. The program addresses fundamental priority issues in of astrophysics and physics in general that can be solved only with the MSO capabilities: 1) the study of physical processes in the early Universe up to redshifts $z \sim 2 \times 10^6$ through measuring μ-distortions of the cosmic microwave background (CMB) spectrum, and investigation of the structure and evolution of the Universe at redshifts $z < 15$ by measuring y-distortions of the CMB spectrum; 2) the investigation of the geometry of space-time around supermassive black holes (SMBHs) in the center of our Galaxy and M87 by imaging surrounding shadows, the study of plasma properties in the shadow formation regions, and the search for observational appearances of wormholes; 3) the study of observational appearances of the origin of life in the Universe — the search for water and biomarkers in the Galactic interstellar medium. Moreover, the technical capabilities of the MSO can help solve related problems, including the birth of the first galaxies and SMBHs ($z \gtrsim 10$), alternative approaches to measuring the Hubble constant, the physics of SMBHs in 'dusty' galactic nuclei, the study of protoplanetary disks and water transport in them, and the study of 'worlds with oceans' in the Solar System.

Keywords: submillimeter astronomy, Millimetron Space Observatory, supermassive black holes, wormholes, cosmic microwave background, early Universe, origin of galaxies, interstellar medium, water and biomarkers in the Galaxy, Solar System

PACS numbers: **07.87.+v**, **96.30.–t**, **96.55.+z**, 97.60.Lf, 98.80.Es
Bibliography — 352 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **191** (4) 404 – 443 (2021)
DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.12.038898

Received 14 April 2020, revised 7 December 2020
Physics – Uspekhi **64** (4) (2021)
DOI: https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.12.038898