

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Межзвёздный и межгалактический газ в далёкой инфракрасной и субмиллиметровой области спектра

Ю.А. Щекинов, В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева, С.В. Пилипенко

Рассмотрены основные задачи физики межзвёздной и межгалактической среды, решаемые методами далёкой инфракрасной (ИК) и субмиллиметровой (СММ) астрономии, и наиболее яркие результаты последней четверти века. Обсуждаются характеристики некоторых наиболее результативных космических и наземных обсерваторий в ИК- и СММ-областях как ныне действующих или уже закончивших свою работу, так и перспективных планируемых проектов. Представлено краткое описание тех физических проблем, связанных с эволюцией газовой среды в галактиках, в их близкой (окологалактической) окрестности и в межгалактическом пространстве, в решении которых далёкая ИК- и СММ-области спектра могут дать критически важную, а иногда и единственно доступную информацию. К таким проблемам относятся вопросы о происхождении молекулярного газа в галактиках, превращении газа в звёзды, о выбросе газа и пыли в межгалактическую среду и возможности длительного выживания пыли в "агрессивном" окружении межгалактической среды, в особенности горячей среды скопления галактик, а также собственно проблема возникновения пыли во Вселенной. Результаты наблюдательной астрономии последних лет насыщены сюрпризами, затрагивающими основы наших представлений об эволюции галактик, химической истории Вселенной и др. Кратко обсуждаются некоторые из таких сюрпризов.

Ключевые слова: далёкая инфракрасная астрономия, субмиллиметровая астрономия, диагностика межзвёздной среды, диагностика межгалактической среды, происхождение космической пыли, ранние галактики

PACS numbers: 95.30. – k, 95.85.Fm, 95.85.Gn, 97.10.Bt, 98.58. – w

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.02.038059>

Содержание

1. Введение (1033).
2. Фундаментальные задачи субмиллиметровой астрономии (1035).
3. Субмиллиметровая астрономия вчера, сегодня и завтра (1036).
 - 3.1. Прорывные проекты 1990-х годов в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах.
 - 3.2. Действующие субмиллиметровые обсерватории.
 - 3.3. Планируемые космические обсерватории.

Ю.А. Щекинов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация; Raman Research Institute, Sadashiva Nagar, Bangalore 560080, India E-mail: yus@asc.rssi.ru

В.Н. Лукаш, С.В. Пилипенко. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация E-mail: lukash@asc.rssi.ru, spilipenko@asc.rssi.ru

Е.В. Михеева. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация; Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация E-mail: helen@asc.rssi.ru

Статья поступила 2 сентября 2016 г., после доработки 2 декабря 2016 г.

4. Пыль и газ в галактиках (1043).
 - 4.1. Холодная пыль в межзвёздных дисках галактик.
 - 4.2. Диагностика термодинамики космической плазмы.
 - 4.3. Циркулирующая пыль в галактиках: рождение и разрушение пыли.
 5. Холодная пыль в окрестностях галактик (1059).
 - 5.1. Пыль и газ в горячем гало Галактики.
 - 5.2. Наблюдения холодной пыли в промежуточных гало галактик.
 - 5.3. Холодная пыль в дальней окрестности галактик: окологалактический газ.
 - 5.4. Звездообразование в условиях низкой плотности.
 6. Пыль и газ в скоплениях галактик и межгалактической среде (1064).
 - 6.1. Пыль и газ в группах галактик.
 - 6.2. Пыль и газ в скоплениях галактик.
 7. Газ и пыль в галактических ветрах (1066).
 8. Пыль в ранних галактиках (1067).
 9. Заключение (1067).
- Список литературы (1068).

1. Введение

По естественным причинам астрономия развивалась на основе наблюдений в оптической области спектра, охватывающей длины волн 3900–7000 Å (рис. 1). В 1930 г. Карл Янский, исследуя особенности распространения высокочастотного сигнала над Атлантикой, случайно обнаружил фоновое радиоизлучение нашей Галактики и вышел тем самым за пределы оптического диапазона [1, 2]. Это событие И.С. Шкловский [3] определил как начало

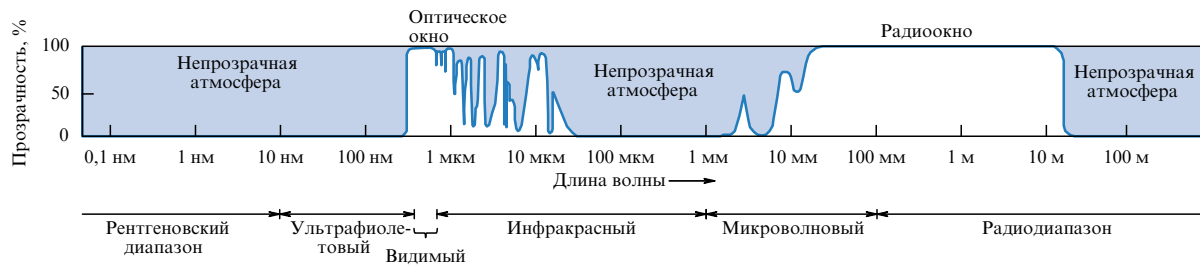


Рис. 1. Прозрачность земной атмосферы на уровне моря в диапазоне длин волн от 1 \AA до 100 м . Сильные полосы поглощения в области от $\lambda > 7000 \text{ \AA}$ вплоть до $\lambda \approx 5,5 \text{ мкм}$ определяются молекулами воды H_2O , углекислого газа CO_2 , метана CH_4 , кислорода O_2 и озона O_3 . На больших длинах волн, от $\lambda \gtrsim 30 \text{ мкм}$ и вплоть до нескольких миллиметров, широкие мощные полосы молекул воды и примесей CO , CH , NH_3 , HCl делают атмосферу на уровне моря практически непрозрачной (см. [9]). Отметим, что многие слабые детали зависимости прозрачности здесь не видны. Это замечание относится, в частности, к известным окнам прозрачности в СММ-области на длинах волн около 350 , 450 и 850 мкм , на которых прозрачность на уровне моря менее 1% . На высоте более 2000 м прозрачность на этих длинах волн заметно выше (см. рис. 3 и обсуждение в разделе 3.2.2).

второй революции в астрономии — первая была связана с созданием оптического телескопа.

Определение нового этапа развития астрономии, связанного с выходом в радиодиапазон, как революционного не является преувеличением, а отражает кардинально новое понимание физических процессов во Вселенной и её эволюции в целом (см. [4–9]). Благодаря радиоастрономическим методам развита принципиально новая фундаментальная концепция горячей Вселенной и создана стандартная космологическая модель, обнаружены релятивистские объекты — пульсары и радиогалактики, источники мазерного излучения, детектирована линия сверхтонкой структуры 21 см атомарного водорода, используемая в настоящее время в качестве одного из наиболее эффективных методов измерения массы газа во Вселенной, обнаружены сложные молекулы в разреженной межзвёздной среде и открыто новое явление — нетепловое синхротронное излучение от релятивистских электронов в межзвёздной среде галактик — и всё это далеко не полный список того, чего удалось достичь с помощью радиоастрономических методов. Сейчас уже трудно вообразить себе адекватное описание Вселенной без радиоастрономии.

Очень важным обстоятельством, связанным с развитием радиоастрономии, явилось также принципиально новое понимание необходимости развития наблюдательных инструментов в тех диапазонах электромагнитного спектра, где излучение полностью поглощается земной атмосферой: с одной стороны, это высокоэнергетичное ионизирующее ультрафиолетовое (УФ), рентгеновское и гамма-излучение, а с другой — низкочастотное излучение в далёкой инфракрасной (ИК) и субмиллиметровой¹ (СММ) области, простирающейся по длинам волн от 30 мкм до 1 мм . Это свойство земной атмосферы иллюстрирует рис. 1, на котором показан схематический график её прозрачности. Как видно, сильные молекулярные полосы практически полностью поглощают приходящее в атмосферу излучение в диапазоне длин волн от нескольких микрометров до нескольких миллиметров². Непрозрачность атмосферы делает эти

области спектра принципиально отличными от оптического диапазона и радиодиапазона с точки зрения реализации наблюдений: телескопы должны быть вынесены за пределы атмосферы или по крайней мере размещены достаточно высоко, где поглощение существенно слабее³.

На страницах журнала *Успехи физических наук* впервые об особенностях астрономических исследований в СММ-области, в том числе о необходимости проведения внеатмосферных наблюдений, было указано в статье Саломоновича [10] (см. также статью Кислякова [11]). Однако стремление учесть особенности взаимодействия как высокоэнергичных (ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма-квантов), так и низкочастотных (терагерцевых) квантов с веществом приводит к тому, что приёмники излучения становятся технологически чрезвычайно сложными и дорогостоящими. Если говорить о СММ-диапазоне, то высокочувствительные приёмники, рассчитанные на астрофизические задачи, требуют сверхпроводниковых смесителей, охлаждаемых до температур 4 К и ниже, что само по себе представляет проблему, особенно в условиях внеатмосферного использования (см. [12–14]). По этой причине область длин волн от 30 мкм до 1 мм остаётся пока наименее исследованной — своего рода *terra incognita*. Вместе с тем простейшие оценки указывают на то, что в СММ-области может быть "закодирована" критически важная информация о большей части холодного вещества Вселенной и многих физических процессах.

В настоящем обзоре мы обсуждаем круг задач физики космической плазмы⁴ — межзвёздной и межгалактической сред, в которых наблюдательные проявления в далёкой инфракрасной и субмиллиметровой областях спектра наиболее ярко характеризуют систему или явление. В разделах 2, 3 даны общая характеристика задач СММ-астрономии, а также описание предшествующих,

¹ Часто субмиллиметровый диапазон определяется как терагерцевый.

² Таблицы прозрачности земной атмосферы в оптической и ближней и средней инфракрасной областях длин волн приведены С. Лордом (S. Lord) на сайте Обсерватории Джемми (Gemini) <http://www.gemini.edu/sciops/telescopes-and-sites>.

³ Например, на высоте 4200 м (пик Мауна-Кеа, о. Гавайи), где находится Обсерватория Кека, поглощение на длине волны около 450 мкм уменьшается почти на порядок по сравнению с поглощением на уровне моря.

⁴ Под космической плазмой мы понимаем межзвёздный, окологалактический и межгалактический газ, в котором степень ионизации варьируется от $x \sim 10^{-5}$ до $x \approx 1$, хотя, строго говоря, далеко не всегда космический газ является плазмой в классическом понимании, определяемом условием $n_e \lambda_D^3 \gg 1$, где n_e — концентрация электронов, λ_D — радиус Дебая.

действующих и планируемых обсерваторий и их сравнительных характеристик. В разделе 4 мы затрагиваем круг явлений и нерешённых проблем, связанных с пылью и газом в галактиках, описываем их с точки зрения новых результатов, полученных в последние годы внеатмосферными обсерваториями, и достигнутого на их основе понимания этих проблем. В разделах 5–8 речь пойдёт о физическом состоянии пыли и газа в горячем газе скоплениях и групп галактик, в межгалактической среде и самых ранних галактиках, относящихся к эпохе начала звёздного нуклеосинтеза во Вселенной. В заключении кратко формулируются основные аспекты, определяющие важность СММ-исследований для задач физики космической плазмы и её пылевой составляющей.

2. Фундаментальные задачи субмиллиметровой астрономии

Проблемы происхождения и эволюции звёзд, планет и жизни на Земле являются наиболее фундаментальными проблемами мировоззренческого значения и поэтому представляют общий интерес. В этом ряду проблема звёздного нуклеосинтеза и химической эволюции Вселенной в целом является ключевой. Звёзды в процессе своей эволюции производят химические элементы и излучают электромагнитные волны, необходимые для возникновения живых организмов. С другой стороны, особенности звёздного нуклеосинтеза таковы, что элементный состав, т.е. относительные концентрации различных элементов, тесно связан с массой произведённой их звезды, и поэтому они представляют собой реликты физических процессов, управлявших некогда формированием звёзд и определявших их распределение по массам [15–17]. Таким образом, исследование пространственного и временного распространения химических элементов может дать ключевую информацию о всех эволюционных процессах в галактиках и Вселенной в целом.

Несмотря на прилагаемые усилия, химическая эволюция Вселенной остаётся плохо изученной. Среди многих факторов, препятствующих её исследованию, одним из определяющих является влияние пыли, порождаемой термоядерными реакциями в звёздах.

Во-первых, значительная часть информации о процессах обогащения Вселенной химическими элементами оказывается недоступной из-за непрозрачности космической среды. Действительно, если принять для оценок среднюю относительную концентрацию пылевых частиц в межзвёздной плазме $n_d/n \sim 10^{-11}$, где n_d — плотность числа частиц пыли, n — плотность газа, а средний размер пылинок $a \sim 10^{-5}$ см, то среднее сечение ослабления (экстинкции) оптического излучения пылью в расчёте на один протон межзвёздной плазмы составит $\sigma_d \sim 10^{-21}$ см² (детальный анализ можно найти, например, в [18]). Последнее значение на четыре порядка больше томсоновского сечения, что для типичного молекулярного облака, в недрах которого рождаются звёзды (с лучевой концентрацией плазмы $N_H \sim 10^{22}$ см⁻²), даёт оптическую толщину $\tau_v \sim 10$. Проблема непрозрачности может быть преодолена переносом наблюдений в ИК-область спектра, где обусловленная пылью оптическая толщина среды существенно меньше. В самом деле, в ИК-области длина волны $\lambda \gtrsim 1$ мкм превышает типичный размер межзвёздных пылинок и поэтому сечение

экстинкции уменьшается как $\sigma_d \propto a/\lambda$ (см. [18]), что для квантов с длинами волн $\lambda > 10$ мкм делает молекулярные облака почти прозрачными.

Во-вторых, другая трудность определяется самим сценарием обогащения Вселенной химическими элементами, который включает в себя перенос обогащённого вещества от источников — звёзд — на расстояния, многократно превышающие их размеры. Прямые наблюдения абсорбционных линий в спектрах квазаров на красных смещениях $z \simeq 2-3$ показывают наличие тяжёлых элементов с массовой концентрацией $Z \sim (10^{-3}-0,3) Z_\odot$ в межгалактической среде (МГС) на расстояниях порядка 0,5–1 Мпк от ближайших галактик⁵ [19–21]. Недавно появились наблюдательные свидетельства присутствия космической пыли⁶ в МГС на $z \lesssim 0,3-2$ и расстояниях от галактик вплоть до 10 Мпк [23]. Измеренная массовая концентрация пыли в МГС составляет около $0,1 Z_\odot$ — всего в три раза меньше полной массовой концентрации пыли, произведённой в галактиках (см. рис. 7 в [23]).

Важной особенностью этих наблюдений, основанных на ослаблении света от далёких источников, является всегда присутствующая наблюдательная селекция, обусловленная тем, что на луч зрения в направлении на источник излучения попадает только часть поглощающих или рассеивающих свет газовых конденсаций. Определённая, возможно существенная, часть не даёт вклада в абсорбцию и экстинкцию. Наблюдения эмиссий от газа и пыли не отягощены такого рода селекцией и более подходят для уверенной оценки массы тяжёлых элементов и пыли в МГС.

Транспорт газа (в том числе тяжёлых элементов и пыли) всегда осуществляется мощными динамическими явлениями: звёздным ветром и вспышками сверхновых, при которых скорости достигают нескольких тысяч километров в секунду, а в галактических масштабах — крупномасштабными течениями из центральных областей галактик (галактическими ветрами). Пыль, будучи вынесённой на большие расстояния от звёздных источников, остывает, и её эмиссионный спектр смещается в сторону больших длин волн, в результате пыль становится трудно наблюдаемой в эмиссии в ближнем ($\lambda = 0,74-2,5$ мкм) и среднем ($\lambda = 2,5-50$ мкм) ИК-диапазонах.

Таким образом, наиболее информативный участок спектра для исследования широкого класса задач, связанных с химической эволюцией галактик, энерго- и массообменом между галактиками и окружающим их газом, производством и транспортом пыли, с балансом её массы в галактиках и Вселенной в целом, смещается в сторону далёкой ($\lambda = 50-2000$ мкм) ИК-области и СММ-области волн.

Наблюдения в ИК-диапазоне, выполненные на космических обсерваториях в последние два десятилетия, привели к революционно новому пониманию многих астрофизических явлений и качественно изменили наши

⁵ $Z_\odot \sim 0,01$ — массовая концентрация тяжёлых элементов на Солнце. Эта же величина типична для звёзд населения I — сравнительно молодого населения тонкого диска Галактики, к которому принадлежит и Солнце, а также для межзвёздной среды.

⁶ Космическая пыль представляет собой микроскопические твёрдые частицы с размерами от нескольких ангстрем до 1 мкм. Пылевые частицы имеют различный химический состав и разные химические и оптические свойства (см. [22]).

представления о Вселенной. Многие космические объекты и явления стали нам известными только благодаря ИК-наблюдениям. В качестве примера можно привести обнаружение объектов нового типа — ярких ИК-галактик (Luminous InfraRed Galaxies — LIRGs) со светимостями в ИК-диапазоне, превышающими $10^{11} L_{\odot}$, где $L_{\odot} \simeq 4 \times 10^{33}$ эрг с^{-1} — светимость Солнца. К этому можно добавить выявление особенностей процессов звездообразования (ЗО) и возникновения протопланетных дисков, открытие "тёмных" молекулярных облаков, не излучающих в линиях молекул CO, и многое другое. Об этом речь пойдёт в разделах 3.2, 3.3, 4.1.1, 4.1.2 и 5–7.

Космический телескоп "Гершель" (Herschel Space Observatory) (диаметр зеркала 3,5 м, активный период 2009–2013 гг.) значительно расширил класс доступных для исследования объектов далёкой ИК-области и СММ-области. Однако его результаты были ограничены низкой чувствительностью по потоку, что является ахиллесовой пятой всех современных ИК-телескопов. Причина этого — недостаточное охлаждение зеркал, поскольку чувствительность по потоку определяется их температурой⁷. В частности, у телескопа "Гершель" зеркало охлаждалось до температуры $T_a = 70$ К, что обусловило его сравнительно скромное по сравнению с таковой в предшествующих проектах повышение чувствительности в диапазоне 55–670 мкм.

Вместе с тем не вызывающим сомнения результатом телескопа "Гершель" является выяснение того, что в далёкой ИК- и СММ-частях спектра за пределами доступного предела чувствительности скрыта важная информация о многих фундаментальных явлениях Вселенной. По этой причине в наши дни обсуждается несколько проектов обсерваторий в ИК- и СММ-областях с высокой чувствительностью по потоку, которые предусматривают обязательное охлаждение зеркала до низких температур, $T < 10$ К. К таким проектам относятся SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics), CALISTO (Cryogenic-Aperture Large Infrared-Submillimeter Telescope Observatory) и "Миллиметр" (ММ). Первый проект (SPICA), который будет оснащён 2,5-метровым зеркалом, охлаждаемым до $T < 8$ К, предназначен для исследований в среднем и дальнем ИК-диапазонах (≈ 30 –210 мкм). Запуск миссии SPICA планируется в конце 2020-х годов⁸. CALISTO планируется оснастить охлаждаемым до $T < 4,5$ К зеркалом диаметром 5 м. Диапазон длин волн CALISTO — от 30 до 300 мкм. В проекте российской космической обсерватории "Миллиметр" предусмотрены установка охлаждаемого до $T = 5$ К 10-метрового зеркала и возможность работы как части космического интерферометра со сверхдлинной базой. "Миллиметр" будет охватывать волновой диапазон от 20 до 3000 мкм.

В самом общем виде класс астрофизических объектов, исследование которых в далёкой инфракрасной и субмиллиметровой областях может принести новые фундаментальные знания, выглядит следующим образом:

- 1) газ во Вселенной; 2) галактики и скопления галактик; 3) релятивистские объекты; 4) излучение во Вселенной; 5) жизнь во Вселенной.

В этом ряду принципиально важное место занимает исследование газового компонента галактик и Вселенной в целом. Это определяется тем, что: а) значительное количество (если не подавляющее большинство) барионов во Вселенной сосредоточено в газе; б) газ и его важная составляющая — пыль — переизлучают часть энергии высокоэнергетичного излучения и космических лучей (пронизывающих межзвёздную и межгалактическую среду и определяющих термодинамическое состояние газа) и поэтому могут служить "радиометром" Вселенной; в) газ при определённых условиях конденсируется в холодное и плотное состояние и обеспечивает под действием гравитации такой фундаментальный астрофизический процесс, как звездообразование, определяющий основные свойства барионной части Вселенной, а именно производство излучения в ходе звёздного нуклеосинтеза, наблюдаемые свойства галактик и химический состав Вселенной; г) газ и присутствующая в нём пыль определяют непрозрачность Вселенной во всех диапазонах электромагнитного излучения и связанные с ней возможности наблюдательного исследования удалённых объектов.

Таким образом, исследование газа во Вселенной является ключевой задачей для большинства космических проектов в ИК-области спектра.

3. Субмиллиметровая астрономия вчера, сегодня и завтра

Первые эксперименты по наблюдениям в далёком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах были проведены в середине 1960-х годов. Это были баллонные обзоры неба в области длин волн 300–360 мкм с угловым разрешением 2° [25, 26] и ракетные наблюдения фона ночного неба в СММ-диапазоне [27]. Стимулировала эти исследования не только "интригующая" притягательность неведомого (см. обзор Саломоновича [10] 1969 года), но и ожидание обнаружить теоретически предсказанное микроволновое фоновое излучение Вселенной [28], которое вскоре и было обнаружено.

Первые наблюдения в СММ-диапазоне более активно проводились для самых ярких дискретных источников: Солнца и Луны [29–31] (в работе [31] описаны результаты СММ-наблюдений Солнца, выполненных в 1969 г.), центра Галактики [32], квазаров [33]. Первые активные исследования пропускной способности атмосферы Земли в далёкой ИК- и СММ-области начались ещё в 1957 г., хотя их результаты были опубликованы позднее [34, 35]. Одно из свидетельств осознания важности СММ-волн для астрофизики было отражено в заключении Комитета по астрономии Научного совета Великобритании о необходимости развития исследований в области СММ-волн во второй половине 1960-х годов.

В целом, за этот почти полувековой период СММ-астрономия успела продемонстрировать чрезвычайно интересные результаты, что позволяет говорить о субмиллиметровой Вселенной. В разделах 3.1–3.3 мы приведём краткое описание наиболее значимых наблюдательных проектов, осуществлённых за последние 25 лет, а также проектов, планируемых на грядущее десятилетие.

⁷ Асимптотическое значение температуры приёмника излучения — зеркала — устанавливается на уровне $T_b = T_s + P\tau/C$, где T_s — его невозмущённая температура, определяемая термостатом, P — мощность падающего излучения, τ — постоянная времени, C — теплоёмкость зеркала (см. [24]).

⁸ См. <http://research.uleth.ca/spica/>.

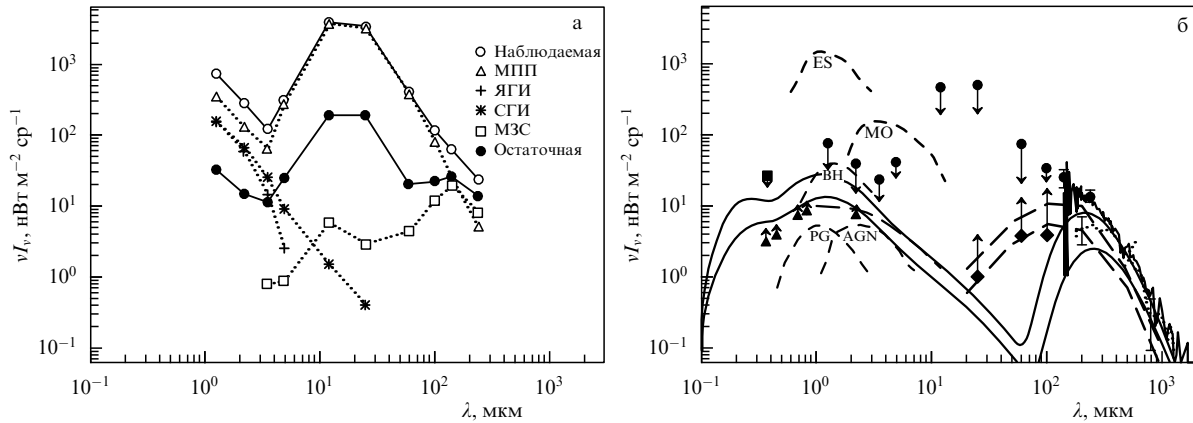


Рис. 2. (а) Вклады различных источников излучения в фоновую эмиссию по данным DIRBE (1,25–240 мкм) в направлении на полость Локмана [46]. Наблюдаемая яркость — светлые кружки, вклады: межпланетной пыли (МП) — треугольники, ярких галактических источников (ЯГИ) — кресты, слабых галактических источников (СГИ) — звёздочки, МЗС — квадраты; тёмными кружками показана остаточная яркость после вычитания всех перечисленных вкладов. (б) Сравнение результатов модельных расчётов внегалактического фона излучения [47] с наблюдаемым на COBE. ES (Exploding Stars) — взрывающиеся звёзды, MO (Massive Objects) — массивные объекты, BH (Black Holes) — чёрные дыры, AGN (Active Galactic Nuclei) — активные ядра галактик, PG (Primeval Galaxies) — первичные галактики. Показаны верхние пределы DIRBE с уровнем достоверности 2σ в диапазоне длин волн 1,25–60 мкм, измерения на длинах волн 140 и 240 мкм, доверительный (95 %) интервал интенсивности на длине волны 100 мкм $5-34 \text{ нВт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$ [46], тонкой ломаной линией показана интенсивность (величина νI_ν) по данным FIRAS в интервале 125–1000 мкм [48]. Две сплошные кривые — теоретические предсказания спектра эволюционирующих галактик в рамках закрытой (нижняя кривая) и открытой (верхняя кривая) моделей химической эволюции галактик [47]. Короткими штриховыми линиями показаны ожидаемые вклады в ИК-спектр от различных известных и предполагаемых источников [46]. Длинные штриховые кривые соответствуют предсказаниям фотометрических моделей галактик с двумя разными значениями непрозрачности, обусловленной пылью [46].

3.1. Прорывные проекты 1990-х годов в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах

3.1.1. COBE. На спутнике COBE (Cosmic Background Explorer) (ноябрь 1989 г. – декабрь 1993 г.) было установлено три инструмента: дифференциальный микроволновый радиометр DMR (Differential Microwave Radiometer), предназначенный для измерения анизотропии космического микроволнового фона (Cosmic Microwave Background — CMB)⁹, многоволновый детектор ИК-излучения пыли DIRBE (Diffuse InfraRed Background Experiment) и спектрофотометр для измерения спектра космического микроволнового фона FIRAS (Far Infra-Red Absolute Spectrophotometer).

Каждый из этих трёх приборов решал в проекте COBE свою фундаментальную задачу. Задачей DMR являлось измерение угловых вариаций температуры реликтового излучения, характеризующих уровень первичных флуктуаций плотности во Вселенной. Имевшиеся к тому времени ограничения на уровень угловых вариаций $|\Delta T|/T \sim 10^{-4} \text{ К}$ (см. [36, 37]) требовали от DMR более высокой точности. С этой целью использовалось по два радиометра на трёх частотах с точностью $1,5 \times 10^{-4} \text{ К}$ (на частотах 53 и 90 ГГц) и $3 \times 10^{-4} \text{ К}$ на частоте 31,5 ГГц (частоты выбраны вблизи минимума галактической эмиссии) с угловым разрешением 7° после года наблюдений [38]. Это позволило измерить амплитуду квадруполья $|\Delta T|/T = (4,8 \pm 1,5) \times 10^{-6}$ [39], а на угловом масштабе усреднения 10° получить величину анизотропии $|\Delta T|/T \sim 10^{-5}$ [40]. Следует заметить, что такая же величина анизотропии была получена несколько ранее по результатам советского спутника "Реликт-1" [41].

Задача DIRBE состояла в исследовании космического (фоновое) ИК-излучения. Космический ИК-фон

является продуктом термоядерной активности барионов в постреионизационной Вселенной с доминирующим вкладом локализованных источников: звёзд и межзвёздной пыли Галактики, инфракрасных и первичных галактик [42, 43]). Приёмник DIRBE работал практически во всём ИК-диапазоне, охватывая длины волн 1,25–240 мкм в нескольких полосах, центрированных на длины волн 1,25, 2,2, 3,5, 4,9, 12, 25, 60, 100, 140 и 240 мкм, с чувствительностью в каждой полосе $\nu I_\nu = 10^{-9} \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$ (где I_ν — интенсивность космического ИК-излучения на частоте ν) и включал в себя линейный поляриметр на длинах волн 1,25, 2,2 и 3,5 мкм (рис. 2). Поляриметр в ближней ИК-области использовался главным образом для отделения эмиссии межпланетной пыли — зодиакального излучения. Его порог чувствительности был заметно ниже яркости неба в этом диапазоне. На протяжении периода с 11.12.1989 до 21.09.1990 приёмник поддерживался на уровне охлаждения $< 2 \text{ К}$, а позднее — на уровне $\approx 50 \text{ К}$, что привело к снижению чувствительности до уровня 20 % от первоначального при $T = 5 \text{ К}$ (см. [44]).

Основными задачами инструмента FIRAS были измерение спектра реликтового излучения, установление его соответствия чернотельному спектру и поиск возможных отклонений от последнего во всей области доминирования реликтового излучения: 0,1–10 мм [42]. В соответствии с этими задачами FIRAS являлся широкоугольным инструментом с диаграммой 7° . Приёмник FIRAS с рабочим интервалом длин волн от 100 мкм до 1 см поддерживался при температуре 1,5 К, эквивалентная мощность электромагнитного шума составляла $4 \times 10^{-15} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$, усреднённая по 10-месячному интервалу наблюдений чувствительность в области длин волн 500 мкм–3 мм — $0,8 \times 10^{-9} \text{ Вт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$ [45].

По результатам наблюдений, проведённых COBE, было доказано, что спектр реликтового излучения Вселенной

⁹ В русскоязычной литературе закрепился предложенный И.С. Шкловским термин "реликтовое излучение".

является чернотельным с температурой $(2,726 \pm 0,01)$ К. Другим важным результатом, полученным с помощью этого спутника, стало долгожданное детектирование космологической анизотропии реликтового излучения, относительная амплитуда квадрупольной компоненты которой оказалась равной $4,8 \times 10^{-6}$.

Помимо того, был определён спектр космического фонового ИК-излучения — его яркость составила $(1,5 \pm 0,2) \times 10^{-8}$ Вт м⁻² ср⁻¹, а также проведена идентификация источников космического ИК-фона в широком интервале длин волн (140–1000 мкм). При этом, как показано в [46], ошибка определения вклада в поток фонового ИК-излучения от звёздных и галактических источников в далёкой инфракрасной и субмиллиметровой областях (длины волн 300–1000 мкм), связанная с необходимостью вычитать существенно более мощное в этой области длин волн реликтовое излучение, может достигать порядка величины этого вклада.

3.1.2. Космическая обсерватория "Спитцер". Научные задачи для космического ИК-телескопа впервые были кратко представлены в 1946 г. Л. Спитцером [49] в докладе для аэрокосмической корпорации RAND (Research ANd Development). Техническое обсуждение проекта телескопа SIRTf (Space InfraRed Telescope Facility) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA) началось в 1988 г., а на орбиту он был выведен 25 августа 2003 г. Спустя три месяца телескоп был переименован в честь Спитцера.

Обсерватория "Спитцер" закончила свою миссию в 2009 г. В спектроскопической моде телескоп работал в нескольких перекрывающихся полосах (с высоким и низким спектральным разрешением) в диапазоне длин волн от 5,3 до 40 мкм (InfraRed Spectrograph — IRS) с трёхполосным фотометром в диапазоне длин волн от 21,5 до 174,5 мкм, частично захватывая дальний ИК-диапазон (Multiband Infrared Photometer for Spitzer — MIPS), и с комплексом четырёхполосных фотометров на длинах волн 3,2–9,3 мкм (InfraRed Array Camera — IRAC) [50]. Диаметр главного зеркала составлял всего 0,85 м, поэтому угловое разрешение изображений в полосах 70, 100 и 160 мкм было сравнительно невысоким — около одной угловой минуты (на длине волны 160 мкм). Температура зеркала поддерживалась на уровне 5,5 К, поэтому, несмотря на сравнительно скромное по размерам зеркало, "Спитцер" в ближней ИК-области обладал достаточно высокой чувствительностью по потоку, которая давала возможность наблюдать на уровне 10σ "стандартную" галактику со светимостью $L^* = 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ на красном смещении $z = 3$, что соответствует 8 мкЯн в полосе 8 мкм [51]. Активный период "Спитцера" закончился в связи с истощением жидкого гелия, хотя следует отметить, что первоначально планируемая длительность проекта была всего два с половиной года.

Наряду с другими задачами обсерватория выполнила обзор объектов межзвёздной среды (МЗС) нашей и ряда других галактик в близкой к нам окрестности: Большого и Малого Магеллановых Облаков, М31 (Туманность Андромеды) и др. (см. [52]). Это позволило, в частности, впервые получить изображения структуры многих областей ЗО в ближнем и среднем ИК-диапазоне, определить свойства пыли в областях ионизированного водорода в окрестности молодых массивных звёзд.

Что касается основных целей обсерватории "Спитцер", то изначально для неё был определён класс объектов, недоступных для наблюдений в других диапазонах: 1) протопланетные диски и их фрагменты, практически лишённые газа и доступные наблюдениям только в эмиссии пыли; 2) коричневые карлики, находящиеся вблизи границы горения термоядерных реакций; 3) ИК-галактики и активные галактические ядра, большая часть оптической эмиссии которых затенена пылью; 4) очень далёкие ранние галактики, оптические и ультрафиолетовые спектры которых смещены в ближний и средний ИК-диапазоны [51]¹⁰. Данные, полученные "Спитцером", находятся в открытом доступе в архиве IRSA (InfraRed Science Archive) NASA¹¹ и продолжают активно использоваться астрономическим сообществом.

3.1.3. Космическая обсерватория "Гершель". Проект космического телескопа для далёкой инфракрасной и субмиллиметровой областей (Far InfraRed Space Telescope — FIRSt) был представлен в Европейское космическое агентство (European Space Agency — ESA) в 1988 году¹². В конце 1990-х годов проект был переформулирован для запуска в лагранжеву точку L2, а в 2000 г. был переименован в обсерваторию "Гершель" (Herschel, ESA). Обсерватория была выведена на орбиту в 2009 г. и проработала до 2013 г. — до времени, когда на борту закончился гелий для охлаждения детекторов научных инструментов.

Обсерватория была оснащена 3,5-метровым главным зеркалом, охлаждаемым до температуры около 70 К, и тремя научными инструментами. Коротковолновый матричный решёточный спектрометр, служивший одновременно камерой (Photodetector Array Camera and Spectrometer — PACS), в режиме камеры получал изображения на длинах волн 70 и 160 мкм, а в режиме спектрометра — спектры (в диапазоне длин волн 51–220 мкм) со спектральным разрешением $R = 1000–4000$. Матричный фурье-спектрометр SPIRE (Spectral and Photometric Imaging REceiver) получал изображения в диапазонах 250, 350 и 500 мкм, а также спектры со средним разрешением $R = 40–1000$ в диапазоне 194–671 мкм. Третий прибор — гетеродинный спектрометр NIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared) — с диапазонами 157–213 и 240–625 мкм позволял регистрировать спектры высокого разрешения.

Общая направленность проекта — это "холодная Вселенная", чему соответствовали следующие ключевые задачи: 1) происхождение и эволюция галактик и объектов ранней Вселенной¹³; 2) морфология и динамика межзвёздного газа в областях ЗО в нашей и других галактиках; 3) наблюдательная астрохимия, т.е. исследование молекул во Вселенной; 4) спектродиффузия и

¹⁰ Разработчики обсерватории говорили, что "Спитцер" будет "изучать всё старое, холодное и грязное во Вселенной", имея в виду старые (ранние) галактики, холодные коричневые карлики, эмиссию пыли и затенённые ею звёзды (см. <http://www.spitzer.caltech.edu>).

¹¹ <http://irsa.ipac.caltech.edu/about.html>.

¹² Несколько годами ранее в Институте космических исследований АН СССР началось обсуждение аналогичного проекта [53, 54]. К сожалению, его разработка была прервана из-за недостатка финансирования.

¹³ Под ранней Вселенной мы понимаем здесь Вселенную с красными смещениями $1 < z \leq z_1$, с верхней границей $z_1 \lesssim 20$, соответствующей началу эпохи реионизации.

химия атмосфер внешних планет и малых тел Солнечной системы, включая транснептуновые объекты [55].

Обработка данных, полученных обсерваторией "Гершель", не закончена. В частности, данные по внегалактическим объектам, охватывающие телесный угол 1000 квадратных градусов, собраны в рамках проекта HELP (Herschel Extragalactic Legacy Project)¹⁴. Замечательной особенностью этого проекта является то, что он формирует многоволновой обзор неба в поле обсерватории "Гершель", дополняя его обзорами неба в других диапазонах [56]. К основным полученным на сегодня результатам следует отнести: обнаружение того, что всё современное ЗО происходит в тонких газопылевых волокнах; построение распределения скрытого водорода в нашей Галактике с помощью картографирования линии излучения ионизованного углерода; создание глубокого фотометрического обзора галактик, излучающих в СММ-диапазоне; измерение их спектров в среднем и далёком ИК-диапазонах; измерение функции светимости этих объектов на красных смещениях до $z \simeq 4$; коррекция плотности ЗО во Вселенной [57] и обнаружение большого числа линзированных галактик; наблюдательные подтверждения существования механизмов, обеспечивающих совместную эволюцию активных галактических ядер и их родительских галактик [58–60], в том числе обзор пылевой эмиссии из центральной области размером около 1 Мпк в нескольких скоплениях галактик [61]; измерение масс нескольких протопланетных дисков с помощью наблюдения молекулы HD; исследование воды в атмосферах малых тел Солнечной системы и др.

3.1.4. Космическая обсерватория "Планк". Обсуждения научных задач и технической реализации космического проекта "Планк" (Planck) относятся к 1994 и 1995 годам соответственно. Первоначальное название проекта COBRAS/SAMBA возникло при слиянии названий двух проектов ESA 1993 г.: COsmic Background Radiation Anisotropy Satellite (COBRAS) и SAteellite for Measurement of Background Anisotropies (SAMBA). В 1997 г. обсерватория была переименована в Planck (ESA). На "Планке" установлены телескоп системы Грегори с эллиптическими зеркалами, охлаждёнными до температуры 40 К (первичное зеркало диаметром $1,9 \times 1,5$ м и вторичное с диаметром $1,1 \times 1,0$ м) и два приёмника: высокочастотный (субмиллиметровый) с частотами от 100 до 857 ГГц (от 350 мкм до 0,3 мм) и низкочастотный (микроволновый) с частотами 30–70 ГГц (0,3–3 мм). Лишь две из девяти частотных полос: 545 и 857 ГГц — не допускали поляриметрических наблюдений.

Основные направления исследований обсерватории "Планк" включают в себя: 1) измерение с высокой чувствительностью ($\Delta T/T \sim 10^{-6}$) и высоким разрешением ($< 1'$) интенсивности и поляризации реликтового излучения; 2) проверку космологических моделей и моделей происхождения Вселенной, измерение наклона спектра начальных флуктуаций плотности, исследование гипотетических топологических дефектов, определение космологических параметров; 3) измерение эффекта Сюняева–Зельдовича, определение пекулярных скоростей скоплений галактик и составление каталога скоплений; 4) исследование радиогалактик и активных галактических ядер; 5) исследование межзвёздной пыли; 6) исследова-

дование межзвёздного магнитного поля и свойств релятивистских электронов; 7) исследование Солнечной системы и зодиакального света.

Задачи, которые стояли перед проектом "Планк", в целом решены — в 2015 г. завершилась работа над архивом "Наследие Планка"¹⁵, и в настоящее время проводится интерпретация результатов проекта. По-видимому, их полный анализ потребует длительного времени, однако многие из поставленных научных задач уже достигнуты: уже опубликованы параметры космологических моделей [62] (см. также обзор основных космологических результатов в [63]), каталог источников эффекта Сюняева–Зельдовича [64] и результаты исследований относительной ориентации межзвёздного магнитного поля и пылевых структур [65].

3.1.5. SCUBA/SCUBA-2. К концу 1990-х годов относится и начало проекта SCUBA (Submillimetre Common-User Bolometer Array) — болометрического приёмника, установленного на наземном СММ-телескопе Джеймса Клерка Максвелла (James Clerk Maxwell Telescope — JCMT)¹⁶ (Мауна-Кеа, Гавай). Болометр SCUBA работал в окнах прозрачности атмосферы на длинах волн 450 и 850 мкм — прозрачность в полосе вблизи длин волн 450 и 850 мкм на высоте Мауна-Кеа (4084 м) составляет около 40 и 80 % соответственно¹⁷ [66, 67].

С помощью SCUBA были выполнены первые большие ($\sim 10^4$ объектов) систематические СММ-обзоры галактик в локальной Вселенной ($z < 0,1$) и построены первые функции светимости галактик на длине волны 850 мкм [68, 69]. Существенным оказалось то, что функция светимости галактик, измеренная по данным обсерватории IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) с рабочими длинами волн 12, 25, 60 и 100 мкм, демонстрирует явный дефицит в области высоких светимостей по сравнению с данными SCUBA. Этот дефицит естественным образом объясняется тем, что в первом случае наблюдениями не охватывается заметная часть холодной ($T < 30$ К) пыли, пик эмиссии которой смещён в СММ-диапазон. Особенно хорошо это видно в области $L \gtrsim 3 \times 10^{11} L_{\odot}$ [70].

В рамках проекта обзора галактик в локальной Вселенной с помощью SCUBA и VLA (Very Large Array) был проведён совместный обзор на длинах волн 850 мкм и 21 см соответственно. Результатом явился, в частности, важный вывод о том, что профиль яркости в линии 21 см часто имеет в центральных областях галактик минимум (иногда значительный) в противоположность максимуму на длине волны 850 мкм. В радиальном направлении HI простирается на большие расстояния, чем пылевая эмиссия на длине волны 850 мкм, — различие радиальных масштабов составляет около 50–100 % [71], что, по-видимому, соответствует радиальному градиенту концентрации тяжёлых элементов.

Измерения поляризации эмиссии на длине волны 850 мкм в ядрах молекулярных облаков (например,

¹⁵ <http://sci.esa.int/planck/56288-planck-legacy-archive-is-complete/>.

¹⁶ JCMT — один из крупнейших наземных телескопов в далёкой инфракрасной и субмиллиметровой области, диаметр его зеркала 15 м. Начало эксплуатации относится к 1987 г.

¹⁷ Этому отвечает лучевая концентрация H_2O в направлении на зенит $2 \times (10^{21} - 10^{22}) \text{ см}^{-2}$ [66], что на два порядка меньше значения на уровне моря.

¹⁴ См. <http://herschel.sussex.ac.uk>.

L183) имели принципиально важное значение для выяснения роли магнитного поля и турбулентности в образовании звёзд, а именно удалось показать, что в пределах плотного протозвёздного ядра турбулентные движения не оказывают существенного влияния на структуру магнитного поля, поэтому оно достаточно однородно в пределах углового разрешения $21''$ поляриметра SCUBAPOL, которое существенно меньше характерного углового размера $\sim 10'$ самого плотного ядра [72–74]. Этот вывод вскоре был подтверждён измерениями поляризации в ряде других областей звездообразования (например, в области ОМС-2 в Туманности Ориона [75]).

В общей сложности с 1997 г. по 2005 г. были выполнены поляриметрические измерения более чем для 100 областей звездообразования, треть из них детально описана в [76]. Более поздние наблюдения обсерваториями "Гершель" и "Планк" в целом подтвердили выводы о структуре магнитного поля в ядрах молекулярных облаков, полученные в рамках проекта SCUBAPOL [77, 78].

В 2012 г. SCUBA был заменён более мощным (около 10 000 пикселей) болометром SCUBA-2, работающим на тех же, 450 и 850 мкм, длинах волн [79], но картирующим равные участки неба на два порядка быстрее, чем его предшественник.

SCUBA-2 продолжает уникальные обзоры неба телескопа JCMT¹⁸:

1) обзор неба в двух полосах шириной 10° каждая, одна из них направлена вдоль плоскости Галактики (Galactic Plane — GP) (обзор GP-wide), а другая — перпендикулярно плоскости Галактики с центром на Северный полюс эклиптики (обзор P2P — Pole to Pole);

2) космологический обзор с использованием SCUBA-2 (SCUBA-2 Cosmology Legacy Survey — S2CLS), задачей которого является создание первой большой выборки внегалактических источников на длинах волн 450 и 850 мкм, в которую попадают, в частности, яркие ИК-галактики на больших красных смещениях;

3) обзор 155 галактик ближней (в пределах 25 Мпк) Вселенной на длинах волн 450 и 850 мкм и в линиях CO ($J = 3-2$) с использованием инструмента HARP (Heterodyne Array Receiver Program);

4) обзор Галактической плоскости (JPS — James Clerk Maxwell Telescope Galactic Plane Survey) с целью выделения эволюционных последовательностей областей образования массивных звёзд и областей стимулированного ЗО в молекулярных облаках, а также обнаружения холодных тёмных молекулярных облаков и установления их распределения в Галактике;

5) обзор пояса Гулда (Gould Belt Survey — GBS) — обзор областей ЗО ближайшей ($D < 500$ пк) окрестности Солнца, в которую входят и молекулярные облака пояса Гулда: Orion, Taurus, Perseus, Serpens и Ophiuchus, основанный на совместном использовании SCUBA-2, HARP и поляриметра POL-2. Этот обзор даст ответы на многие фундаментальные вопросы физики звездообразования;

6) обзор остатков протопланетных дисков с целью создания базы данных, определения масс этих дисков и возможности их детектирования другими ИК-обсерваториями, измерения спектрального индекса пылевой эмиссии и др.

В настоящее время SCUBA-2 продолжает обзорные программы. Перечисленные обзоры во многом дополняют обзоры "Гершеля", которые охватывают более широкие поля, однако с меньшей глубиной.

3.2. Действующие субмиллиметровые обсерватории

3.2.1. ALMA. Обсерватория ALMA (Atacama Large Millimeter Array), расположенная на плато Чакхантор на высоте 5050 м над уровнем моря¹⁹, состоит из 50 отдельных 12-метровых антенн, работающих в диапазоне длин волн от 315 мкм до 9,7 мм. Излучение регистрируется с помощью гетеродинных приёмников с шириной полосы пропускания, доходящей до 16 ГГц, всего диапазонов — десять. Угловое разрешение достигает $0,01''$. Возможности обсерватории в СММ-диапазоне ограничены главным образом непрозрачностью земной атмосферы (рис. 3). Для снижения шумовой температуры приёмники поддерживаются при низких температурах: от $T = 17$ К (в полосе 31–45 ГГц) до $T = 230$ К (в полосе 787–950 ГГц), в зависимости от частоты канала [81].

Научные наблюдения на ALMA начались во второй половине 2011 г. Первым объектом была галактика "Антенна", представляющая собой две тесные сливающиеся галактики NGC 4038/4039 (Antenna galaxies), в области слияния которых во вращательных линиях молекулы

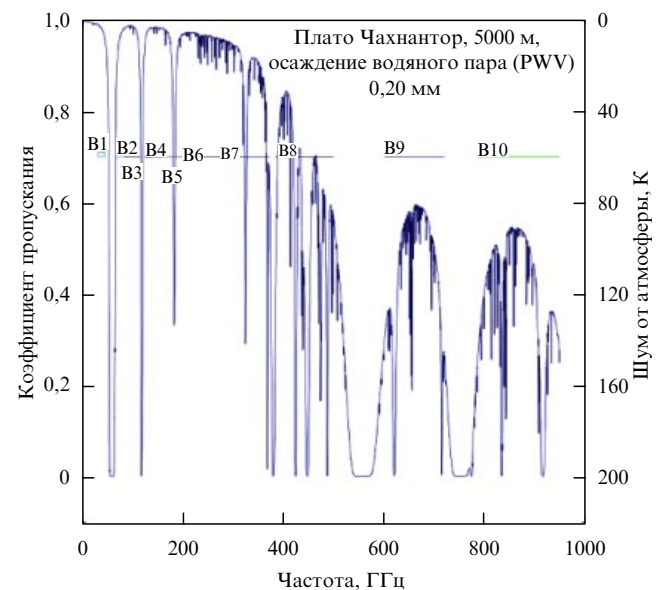


Рис. 3. Коэффициент пропускания земной атмосферы для месторасположения обсерватории ALMA при наилучших условиях. Горизонтальными отрезками B1–B10 показаны диапазоны работы обсерватории (источник www.almaobservatory.org/component/content/article/166-newsletter-no-2).

¹⁹ Среднегодовое количество воды в атмосферном столбе на плато Чакхантор составляет всего 1,1 мм, поэтому его иногда называют раем для инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой астрономии. По инициативе Национальной комиссии по научным и технологическим исследованиям республики Чили (Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica — CONICYT) при правительстве Чили здесь создан Астрономический парк Атакамы (Atacama Astronomical Park), в котором сосредоточено более десяти телескопов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона [80].

¹⁸ <http://www.eaobservatory.org/jcmt/science/legacy-survey/>.

СО(3-2) с угловым разрешением около $1''$ наблюдались молекулярные облака [82].

С момента начала работы в 2011 г. получены детальные изображения и спектры протопланетных дисков, детектировано образование планет в очень молодых протопланетных системах (100 тыс. – 1 млн лет). Помимо того, на обсерватории построены изображения удалённых галактик, областей ЗО в близких галактиках и Галактике, впервые были изучены распределения молекул HCN, H₂CO и пыли в кометных комах. Появились сообщения о возможности экзотических цепочек химических реакций в предельно плотных частях ядер молекулярных облаков, которые могут потребовать развития лабораторной молекулярной спектроскопии высокого разрешения [83].

Чрезвычайно впечатляющими представляются результаты ALMA в изучении класса субмиллиметровых галактик (SMG) с высокой светимостью, среди которых заметную часть представляют двойные и множественные с ультраяркими инфракрасными галактиками (UltraLuminous InfaRed Galaxies — ULIRGs) в качестве вторичного компонента [84, 85]. В тех случаях, когда спектроскопические измерения красных смещений возможны, последние оказываются близки к $z \simeq 2,5$ [85]. Исследования эмиссий близких галактик класса ULIRGs с активными галактическими ядрами (АГЯ) в континууме и молекулярных линиях (HCN/HCO⁺) [86] позволяют судить о свойствах молекулярного газа в АГЯ и обещают новые возможности оценки вкладов АГЯ и вспышек звездообразования в эмиссии центральных областей галактик.

В связи с этим имеет смысл отметить наблюдения обсерваторией ALMA ярких галактик с большим количеством пыли и высокой скоростью ЗО (Dusty StarForming Galaxies — DSFGs), представленных на больших красных смещениях, $z \sim 4$ [87]. О высокой скорости ЗО в этих галактиках свидетельствует высокая средняя по выборке температура пыли $T_d \simeq 40$ К. Их полная светимость в далёкой инфракрасной (Far InfaRed — FIR) области, по грубым оценкам, может достигать $L_{\text{FIR}} \sim 10^{11} - 10^{13} L_{\odot}$, поэтому если допустить, что среди них присутствуют и галактики класса LIRGs/ULIRGs²⁰, то от их последующего исследования в линиях HCN/HCO⁺ можно ожидать интересных результатов о соотношении между центральными вспышками ЗО и АГЯ в ранней Вселенной и в целом об эволюции галактик на стадиях, близких к моменту их зарождения во Вселенной.

Не менее впечатляющи и результаты недавно выполненного глубокого обзора в поле хаббловского сверхглубокого обзора (Hubble Ultra Deep Field) с размером площадки в 4,5 квадратных угловых минут [89], на основе которого сделан предварительный вывод о том, что наибольшая часть ЗО на красных смещениях $z \simeq 2$ происходит в массивных галактиках со звёздной массой $M_* > 2 \times 10^{10} M_{\odot}$, причём практически все области ЗО закрыты пылью. Это обстоятельство может указывать на то, что объекты класса DSFGs, начиная свою эволюцию на красных смещениях $z \sim 4$ или ранее, продолжают её на временах по меньшей мере в 1 млрд лет. Такой вывод может иметь критические последствия для нашего

представления о всей истории звездообразования во Вселенной.

3.2.2. SOFIA. Обсерватория SOFIA (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy)²¹ разработана для проведения исследований в стратосфере на борту самолёта. Она оснащена 2,5-метровым главным зеркалом и рядом научных приборов: EXES (Echelon Cross Echelle Spectrograph) — спектрометром высокого, среднего и низкого разрешения для измерений в диапазоне 4,5–28,3 мкм; FIFI-LS (Field Imaging Far Infrared Line Spectrometer) — спектрометром низкого разрешения, работающим на длинах волн 51–203 мкм; FLITECAM (First Light Infrared Test Experiment CAMera) — камерой с 1024 × 1024 пикселей для диапазона длин волн 1,0–5,5 мкм; FORCAST (Faint Object infraRed CAMera for the Sofia Telescope) — камерой и спектрографом низкого разрешения, предназначенными для диапазона длин волн 5–40 мкм; GREAT (German REceiver for Astronomy at Terahertz frequencies) — двухканальным гетеродинным инструментом высокого спектрального разрешения (до $R = 10^8$) для волнового диапазона 60–200 мкм; HAWC+ (High resolution Airborne Wideband Camera) — камерой и поляриметром, работающими на длинах волн 40–300 мкм.

3.3. Планируемые космические обсерватории

3.3.1. SPICA. Планируемая космическая обсерватория SPICA (SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics), разрабатываемая Японским аэрокосмическим агентством, предназначена для работы в диапазоне длин волн 5–210 мкм. SPICA будет иметь главное зеркало диаметром 2,5 м и охлаждаться до температуры 6–8 К. Планируемые инструменты: матричные камеры и спектрометры среднего разрешения [90]. Научные задачи обсерватории включают в себя проведение детальных спектроскопических обзоров с целью изучения эволюции галактик, а также наблюдение линий воды, льда и молекулы HD в протопланетных дисках.

3.3.2. Космический телескоп Джеймса Уэбба. Создаваемый НАСА космический телескоп им. Джеймса Уэбба (James Webb Space Telescope — JWST)²² будет работать в ближнем и среднем ИК-диапазонах: от 0,6 до 28 мкм; его 6-метровое главное зеркало будет охлаждаться до температуры ниже 50 К.

3.3.3. Космическая обсерватория "Миллиметр" ("Спектр-М"). В таблице приведены основные параметры космической обсерватории "Миллиметр" [91–93] при работе в режиме одиночного зеркала в сравнении с параметрами других обсерваторий²³. Данные по фотометрии и спект-

²¹ <https://www.sofia.usra.edu/>.

²² www.jwst.nasa.gov/.

²³ В таблице приведены характеристики обсерваторий, сопоставимых с "Миллиметром". В частности, в неё не попал телескоп "Планк" — специализированная миссия, нацеленная на построение обзора всего неба с относительно низким угловым разрешением, не превышающим $45''$ на самых коротких длинах волн. Кроме того, "Планк" проводил наблюдения исключительно в режиме сканирования неба, и у него отсутствовала возможность наводиться на заданные источники. Информации о других планируемых обсерваториях, например CALISTO, пока недостаточно для включения в данную таблицу.

²⁰ Вопрос о том, являются ли DSFGs и LIRGs/ULIRGs родственными или пересекающимися классами объектов, пока остаётся дискуссионным [88].

Таблица. Планируемые параметры обсерватории "Миллиметрон" (ММ) в сравнении с параметрами других обсерваторий

Параметр	"Гершель", 2009–2013 гг.	ALMA, 2011 г.	SPICA, 2029 г.	ММ, 2015 г.
Диапазон, мкм	50–670	315–9680	5–210	20–3000
Разрешение, угл. с	3,5–40	0,01–5	0,4–20	3–60
Поле зрения	до 4' × 8'	до 25"	5' × 5'	6' × 6'
Фотометрия	1 мЯн	> 10 мкЯн	30 мкЯн	20 нЯн
Спектроскопия, разрешение $R \sim 10^3$	20 мЯн	60 мкЯн	200 мкЯн	4 мкЯн
Спектроскопия, разрешение $R \geq 10^6$	2 Ян	50 мЯн	—	200 мЯн

роскопии оценены для чувствительности 1σ ($\lambda \sim 200$ – 300 мкм) и времени накопления 3600 с.

Характеристики чувствительности по потоку телескопов в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах приведены на рис. 4.

В целом, как легко увидеть из таблицы и рис. 4, в сравнительно близком будущем с введением в эксплуатацию новых ИК- и СММ-обсерваторий можно ожидать получения прорывных результатов в астрофизике и космологии. Среди планируемых в ближайшее время инструментов лидирующей в области длин волн 20–3000 мкм может оказаться обсерватория "Миллиметрон", поскольку:

1) обсерватория "Миллиметрон" заполнит важную широкую полосу длин волн в среднем ИК-диапазоне 28–55 мкм, не входящую в рабочий диапазон "Гершеля" и телескопа Джеймса Уэбба, с лучшей, чем у SPICA, чувствительностью по потоку;

2) в интервале 50–500 мкм угловое разрешение "Миллиметрона" будет в четыре раза лучше, чем у SPICA;

3) благодаря своей беспрецедентно высокой чувствительности "Миллиметрон" позволит получать фотометрические изображения с высоким угловым разрешением значительно быстрее, чем другие инструменты, работающие в той же области спектра (например, SPICA);

4) аналогичный вывод может быть сделан и относительно спектральных измерений, в том числе в режиме спектроскопии с высоким разрешением, что позволит наблюдать удалённые галактики с красными смещениями вплоть до $z = 1$ – 2 с относительно малым временем накопления;

5) 10-метровая апертура "Миллиметрона" позволит достичь прорывных результатов в таких направлениях, как эволюция галактик и скорости ЗО в них, в том числе позволит исследовать особенности эволюции галактик с активными ядрами и центральными вспышками ЗО и решить вопрос о наличии возможной связи между ними и ИК-галактиками сверхвысокой светимости (LIRGs и ULIRGs).

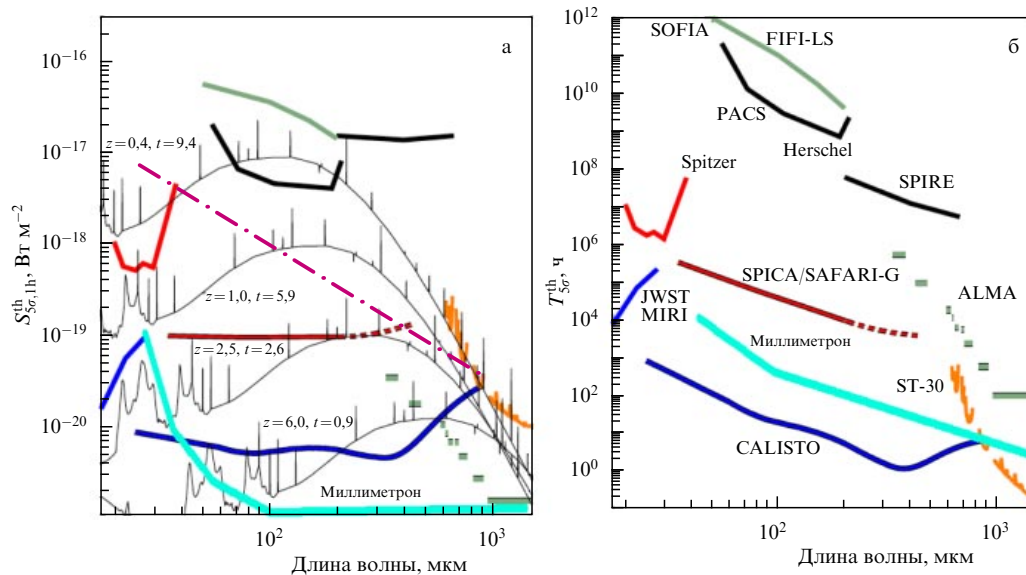


Рис. 4. (В цвете онлайн.) Сравнение характеристик спектральной чувствительности по потоку "Миллиметрона" и других телескопов в ИК- и СММ-диапазонах. (а) Порог чувствительности $S_{Sr,1h}^{th}$, при времени накопления сигнала 1 ч и спектральном разрешении $R = 500$. Тонкими кривыми показаны характерные спектры галактики со светимостью $10^{12} L_{\odot}$ при разных красных смещениях z , рядом со значением z указан соответствующий возраст t Вселенной в миллиардах лет. Кривые разного цвета относятся к различным космическим аппаратам, названия которых указаны на рис. б около кривых тех же цветов, что и на рис. а. Лиловой штрихпунктирной линией показана чувствительность идеального гетеродинного спектрометра, ограниченного квантовым пределом ($T_{sys} = hv/k$), с шириной полосы 10 км с^{-1} . (б) Время накопления T_{Sr}^{th} , необходимое для построения "слепого" спектрального обзора с чувствительностью $10^{-19} \text{ Вт м}^{-2}$ и спектральным разрешением $R = 500$ с учётом количества пространственных лучей спектрометра и мгновенно наблюдаемой ширины полосы. Ближайшие конкуренты "Миллиметрона": SPICA, американский проект 5-метрового телескопа CALISTO, гипотетический наземный высокогорный субмиллиметровый телескоп ST-30 с 30-метровым зеркалом [94]. SAFARI-G (SPICA Far Infrared Instrument) — приёмник в далёкой ИК-области на SPICA, MIRI (Mid-InfraRed Instrument) — прибор для работы в среднем ИК-диапазоне на JWST. (Расшифровку остальных аббревиатур см. выше в тексте.)

4. Пыль и газ в галактиках

В последние годы представления о распределении газа в галактиках претерпели существенные изменения: появились данные о том, что межзвёздные (газовые) диски галактик простираются на гораздо большие расстояния как в радиальном направлении, так и вдоль нормали к плоскости звёздного диска, а недавно получены данные о том, что промежуточные гало за пределами расстояния в 30 кпк от диска переходят в протяжённые короны окологалактического газа, представляющего собой, по-видимому, смесь выброшенного из межзвёздных дисков вещества и упавшего на галактику газа из внегалактического пространства. Радиусы таких корон могут достигать 150–300 кпк, т.е. величны порядка вириального радиуса гало галактик, определяемого соотношением $M_{200} = (4\pi/3) 200\rho_{\text{cr}}(z) R_{200}^3$, где $\rho_{\text{cr}}(z) = 3H^2(z)/(8\pi G)$ — критическая плотность Вселенной, $H(z)$ — постоянная Хаббла, R_{200} — вириальный радиус, G — гравитационная постоянная; в пределах области радиусом R_{200} полная средняя плотность (под полной понимается вся плотность: и барионная, и тёмная) примерно в 200 раз превосходит критическую плотность во Вселенной [95].

Эволюция галактик определяется сложной системой обратных связей между звёздной и газовой составляющими. Обязательным звеном является пыль — обеспечивает энергообмен в газе, его способность переходить в молекулярную форму и его непрозрачность. Наблюдения собственного ИК-излучения пыли даёт информацию о нагревающих её источниках энергии, т.е. о том, как работают галактики. С другой стороны, источники излучения, оптическая и ультрафиолетовая часть спектра которых затмевается пылью, могут быть видны в ИК-области (в особенности в далёкой инфракрасной и субмиллиметровой областях), где определяемый пылью коэффициент непрозрачности существенно меньше. Это даёт возможность детально рассмотреть, как устроены галактики. Хорошую иллюстрацию возможностей, которые открываются в СММ-области для исследования "работы" галактик, можно найти в [96, 97].

Пыль является основным агентом, определяющим термодинамику межзвёздного газа, — она обеспечивает превращение энергии излучения в тепловую энергию газа, стимулирует переход атомарного газа в молекулярный и в итоге превращение газа в звёзды. Само существование молекулярного газа в МЗС обязано присутствию в ней пыли: молекулярная кинетика в МЗС начинается с молекул H_2 , которые, вследствие того что их дипольный момент равен нулю, могут рождаться только при сближении $\text{H} + \text{H}$ в присутствии третьего тела, каковым в условиях МЗС является пыль: $2\text{H} + \text{частица пыли} \rightarrow \text{H}_2 + \text{частица пыли}$ — молекулы H_2 далее стимулируют все химические реакции.

В целом, рассмотрение практически любого явления в МЗС так или иначе требует, чтобы были известны характеристики пыли. Поэтому объяснение превращений пыли в Галактике — одна из главных задач физики МЗС и астрофизики в целом. В полном объёме она может быть решена только с использованием наблюдательных данных в ИК- и СММ-диапазоне, поскольку наблюдения экстинкции и покраснения в оптической области не дают информации о её тепловом состоянии. Более того, наблюдения экстинкции и покраснения внешних источников излучения в той или иной степени отягощены

наблюдательной селекцией, поскольку часть структур, содержащих пыль, может не попадать на луч зрения к источнику.

4.1. Холодная пыль

в межзвёздных дисках галактик

4.1.1. Молекулярные облака и области звездообразования. Одна из центральных задач физики галактик, которая требует для своего решения наблюдательных данных в далёкой инфракрасной и миллиметровой областях спектра, — это звездообразование. Сам по себе процесс ЗО интересен и важен тем, что именно им определяются свойства звёзд во Вселенной, производство ими света и химических элементов, бурное выделение энергии в результате взрывных процессов. По существу, сама возможность наблюдать Вселенную определяется процессом ЗО в ней. Поэтому выяснение всей цепочки явлений, приводящих к возникновению звёзд, принципиально важно.

Этапом, непосредственно предшествующим началу ЗО, является конденсация разрежённого (диффузного) атомарного межзвёздного газа в молекулярные облака. В последние годы сформировалось понимание того, что ЗО определяется сложным каскадом нелинейных процессов, охватывающих масштабы от нескольких десятков килопарсек до 0,1–1 пк в конце каскада, где начинают формироваться уже протозвёздные конденсации.

Иерархический процесс начинается с аккреции окологалактического газа и спутников на галактический диск, его радиационного остывания и рекомбинации. На масштабах в несколько килопарсек аккрецированный газ перемешивается с межзвёздным газом HI, приводя к развитию неустойчивостей и возникновению молекулярных облаков (масштабы в несколько десятков-сотен парсек), происходит фрагментация молекулярных облаков и выделение в них протозвёздных ядер (масштабы 0,1–1 пк) [98].

В какой-то мере могут быть объяснены лишь начальная и конечная стадии этой цепочки, а вся промежуточная последовательность явлений — характерные времена, масштабы, характер неустойчивостей и т.д. — не определена даже в общих чертах. Вполне естественно полагать, что каждое из этих явлений генерирует типичные эмиссионные характеристики: например, образование молекулярных облаков сопровождается сжатием диффузного атомарного газа и переходом $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$ — при этом отвод энергии осуществляется главным образом возбуждением и последующим высвечиванием в линиях тонкой структуры ионизованного CII (158 мкм) и атомарного углерода CI (370 и 609 мкм).

Дальнейшее сжатие и фрагментация молекулярных облаков контролируются гравитацией и отводом тепла во вращательных линиях молекул, в частности линии $\lambda = 2,6$ мм молекулы $\text{CO}(1-0)$. По этой причине во всех случаях, когда речь идёт о СММ-астрономии, одним из ключевых направлений всегда является диагностика процесса ЗО. Даже начальные элементы этого каскада проявляют себя в далёкой инфракрасной и субмиллиметровой областях. В самом деле, охлаждение газа аккреционного потока в процессе его взаимодействия с межзвёздным диском определяется эмиссией в линиях тонкой структуры кислорода $[\text{OIII}]$ 88 мкм и азота $[\text{NII}]$ 122 и 205 мкм. Соотношение между ними может быть исполь-

зовано для диагностики переходных процессов в газе с температурой $T = 10^4 - 10^5$ К [99].

Дальнейшая эволюция молекулярного газа: гравитационное сжатие ранних протозвёздных объектов (класс 0)²⁴, начальные стадии формирования протопланетного диска, динамика перераспределения вращательного момента и другие детали трансформации облака в протопланетную систему должны проявляться в деформировании спектра, возникновении в нём коротковолновой части в среднем ИК-диапазоне, обусловленной процессами нагрева формирующегося протопланетного диска, с последующим "нагревом" спектра на более поздних эволюционных стадиях, т.е. проявлением в нём ближнего ИК-излучения от сформировавшегося протозвёздного объекта [101]. Поэтому, возможно, самая интригующая часть формирования звёзд и околзвёздных дисков — превращение коллапсирующего молекулярного облака в протозвезду — может быть детально "сканирована" во времени именно средствами СММ-астрономии.

Кроме изучения СММ-континуума существенную роль может играть здесь и спектроскопия молекулярных линий (СН, ОН, Н₂O и др.) [102] (см. также [91]), хорошо представленных в далёкой инфракрасной и миллиметровой области. В пользу этого свидетельствуют "синтетические" наблюдения²⁵ кеплеровских протозвёздных объектов класса 0 на обсерватории ALMA в спектральных линиях ¹³CO, C¹⁸O, HCO⁺ и др. [103]. Основной вывод состоит в том, что при оптимальных условиях наблюдений ALMA позволяет детектировать протопланетный диск на самых ранних стадиях его формирования. К сожалению, стандартное угловое разрешение ALMA $\sim 0,1''$ допускает сканирование дисков только за пределами области радиусом 50 астрономических единиц (а.е.)²⁶ вокруг центральной протозвезды, в то время как именно в этой внутренней области в действительности сосредоточена основная эмиссия в начальный период формирования диска. Впрочем, информативной может оказаться и эмиссия холодной пыли с температурой $T_d \leq 20$ К.

Первые результаты в этом направлении пока скромны: даже для одной из ближайших к нам областей активного ЗО в молекулярном облаке Саm I (содержащем протозвёздные объекты на начальных стадиях) в пределах углового разрешения ALMA $r \simeq 300$ а.е. эмиссия пыли на длине волны около 3 мм оказывается ниже порога 5σ чувствительности по потоку [104]. В других близких областях ЗО предварительные данные показывают эволюционное увеличение протопланетного диска около формирующихся протозвёздных объектов с малой массой [105].

Если идти вверх по каскаду от плотных ядер молекулярных облаков, уже содержащих формирующиеся протозвёздные объекты и диски, к большим масштабам, на которых, по-видимому, возникают условия для образо-

вания таких ядер, то первые же результаты, полученные в далёкой ИК-области спектра обсерваторией "Гершель", удивили: оказалось, что собственно "подготовка" молекулярного газа к ЗО начинается с формирования гигантских филаментных структур — жгутов, в некоторых случаях демонстрирующих признаки фрагментации в продольном направлении — разбиение на последующие зародыши протозвёздных объектов [106].

Функция распределения таких зародышей по массам $\Delta N/\Delta(\log M)$ качественно подобна начальной функции масс звёзд, хотя и смещена по массам почти на порядок, причём в некоторых случаях (молекулярное облако Aquila) — в сторону больших масс, а в других (молекулярное облако Polaris) — в сторону меньших (см. рис. 2 в [107], а также [108]).

Наблюдения филаментов в молекулярных линиях C¹⁸O(1–0), C¹⁸O(2–1), N₂H⁺(1–0) показали существование двух режимов, характеризующих динамическое состояние филаментов: гравитационно-несвязанный и гравитационно-связанный (рис. 5в) [109]. Наклонная прямая на рис. 5д соответствует соотношению $D_J = 2\sigma_T^2/(G\Sigma_0)$, где $\sigma_T = (\sigma_{nT}^2 + \sigma_T^2)^{1/2}$ — полная дисперсия скорости, включающая в себя нетепловую ("турбулентную") и тепловую компоненты, $\Sigma_0 = \mu m_H N_{H_2}^0$ — поверхностная плотность поперёк филамента, μ — молекулярный вес, $N_{H_2}^0$ — лучевая концентрация водорода вдоль диаметра [110–112].

Филаменты погружены очень глубоко в недра молекулярных облаков. На рисунке 6а–в показаны многоцветные распределения газа в молекулярном облаке Vela, в самой центральной части которого виден ранний протозвёздный объект, подсвечивающий всю туманность. На рисунках 6б, в показаны выделенные в этой туманности структуры с филаментами, соответствующими определённым значениям экстинкции: $A_V = 25, 50, 100$, которые обозначены светло-голубым, синим и тёмно-фиолетовым цветами соответственно. В областях максимальной экстинкции с лучевой концентрацией, явно превышающей критическое джинсовское значение, локализованы протозвёздные источники, заметные по более высокой температуре пыли. На рисунке 6г приведены функции распределения температуры пыли, соответствующие разным областям в облаке, начиная от северной области (в крайней правой части рис. 6а). Естественно, что распределения температуры являются более широкими или близкими к двухпиковым именно в тех областях, где есть протозвёздные источники. В удалённых от них областях пыль является холодной.

Таким образом, даже очаги активного ЗО содержат много холодной, со средней температурой $\langle T_d \rangle \leq 20$ К, пыли. Причём, как видно на примере облака Vela, наиболее холодная пыль ($T_d \simeq 10$ К) присутствует во всём объёме областей ЗО, как в протяжённых филаментах, так и в недрах с предзвёздными конденсациями [113]. С этой точки зрения области ЗО в нашей и других галактиках представляют чрезвычайный интерес как объекты СММ-астрономии. Более того, не вызывает сомнений то, что холодная пыль ($T_d \simeq 10$ К) присутствует и в плотных ядрах молекулярных облаков с плотностью $n \geq 10^5$ см⁻³ и температурой $T \leq 10$ К, где формируются протозвёздные конденсации и окружающие их протопланетные диски. Существенным преимуществом наблюдений таких областей в далёком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах над наблюдениями в ближнем и среднем ИК-диапазонах является

²⁴ В 1987 г. Ч. Лада ввёл спектральную классификацию протозвёздных источников по наклону ИК-спектра ($\lambda = 1-20$ мкм) $\alpha \equiv \log \lambda F_\lambda / d \log \lambda$: $0 < \alpha < +3$ — Class I, $-2 \lesssim \alpha \lesssim 0$ — Class II, $-3 < \alpha \lesssim -2$ — Class III. Класс 0 включает в себя холодные объекты, у которых континуум в диапазоне $\lambda = 1-20$ мкм отсутствует [100].

²⁵ То есть численное моделирование наблюдений, согласованное с техническими характеристиками обсерватории.

²⁶ 1 а.е. — расстояние, равное среднему расстоянию от Земли до Солнца.

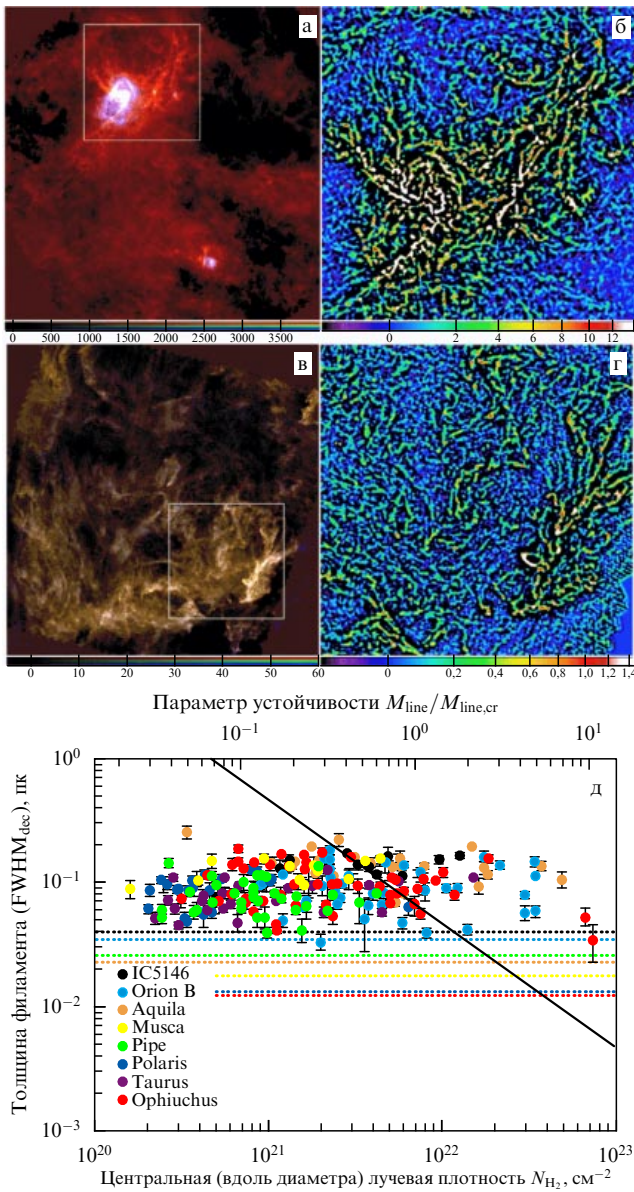


Рис. 5. (В цвете онлайн.) (а) Композитное трёхцветное изображение облака Aquila, размер поля $3^\circ \times 3^\circ$ (физический размер 15 пк для расстояния 260 пк до облака); красный цвет соответствует излучению в полосе 350 мкм, зелёный и синий соответствуют более горячим областям, излучающим в полосах 160 и 70 мкм (см. цветовую шкалу под рис. б). (б) Высококонтрастная декомпозиция распределения газа [106], излучающего в полосе 350 мкм, в области облака, выделенной на рис. а белым квадратом; цветовая шкала в нижней части изображения показывает величину интенсивности в единицах МЯн sr^{-1} . (в, г) То же, что и на рис. а, б, для облака Polaris (физический размер 9 пк для расстояния до облака 150 пк). (д) Соотношение между лучевой плотностью вдоль диаметра филамента и его джинсовским диаметром, соответствующим переходу к гравитационной неустойчивости, $\lambda_J = c_s^2 / (G\Sigma_0)$, где c_s — скорость звука в филаменте, Σ_0 — центральная поверхностная (лучевая) плотность. Символами различного цвета показаны наблюдательные значения соотношения между поперечным размером филамента и лучевой плотностью вдоль его диаметра для разных облаков, в левой нижней части рисунка указано, к какому облаку относятся символы определённого цвета. Наклонная прямая показывает соотношение для гравитационной устойчивости тонких цилиндров — наблюдательные точки, лежащие справа от этой прямой, соответствуют гравитационной неустойчивости (из работы [109]).

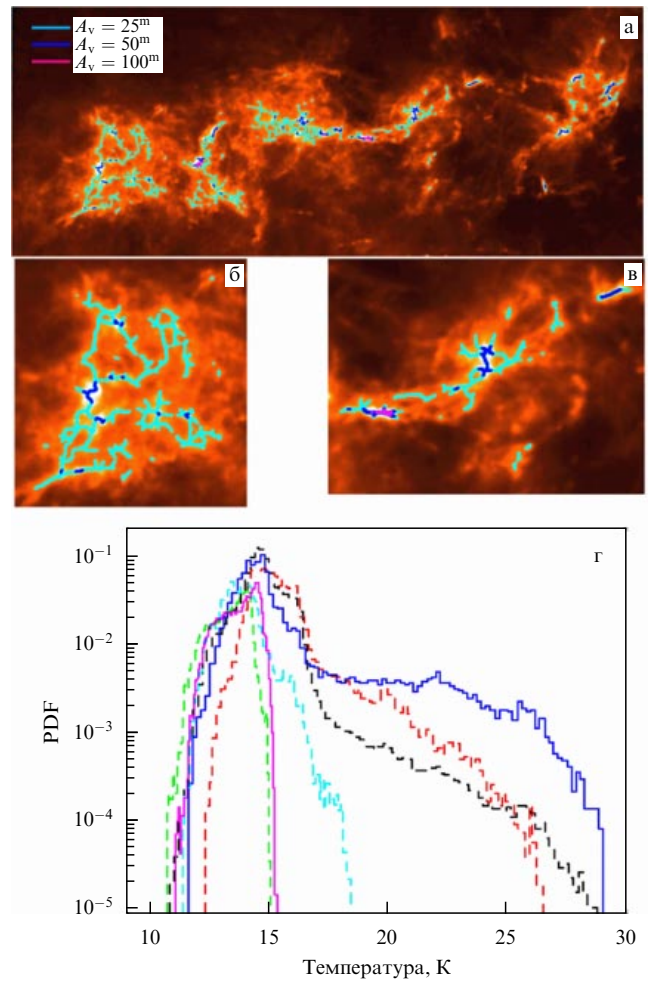


Рис. 6. (В цвете онлайн.) (а) Трёхцветное изображение распределения плотности в области ЗО в туманности Vela, включая филаментарную структуру, показанную голубым, синим и светло-фиолетовым цветами по возрастанию плотности: $A_v > 25, 50, 100$ звёздных величин. Явно выделяются пять областей (справа налево): северная (N), центральная гряда с включением яркого протозвёздного источника (CR), центральная гряда — слева от протозвёздного источника (CN), южная гряда (SR), южное гнездо (SN). Отдельно показаны наиболее яркие южная (б) и центральная (в) области туманности. (г) Нормированная функция распределения температуры (функция плотности вероятности — Probability Density Function, PDF). Красная кривая соответствует области N, синяя — области CR, голубая — CN, зелёная — SR, фиолетовая — SN, чёрная кривая — всей области ЗО, показанной на рис. а. Центральная часть облака, представленная синей кривой, имеет в целом более пологое бимодальное распределение (бимодальность обусловлена нагревом пыли в зоне ионизованного газа). Южная часть облака (красная штриховая кривая) показывает более узкое (более однородное) распределение [113].

возможность более надёжно установить профили плотности и температуры, а также коэффициент непрозрачности в самых глубоких частях протозвёздных ядер [114].

Чрезвычайно интересна с этой точки зрения, в том числе для выяснения последующих этапов формирования протопланетных дисков и их химии, молекулярная спектроскопия ядер молекулярных облаков и областей ЗО — диапазон длин волн от 850 мкм до 3 мм в избытке насыщен молекулярными линиями и поэтому весьма информативен. Однако молекулярная спектроскопия областей ЗО представляет собой отдельную область и её рассмотрение выходит за рамки настоящего обзора.

Новая концепция ЗО, вытекающая из результатов обсерватории "Гершеля", на первый взгляд кажется альтернативой широко известному сценарию триггерного ЗО и, безусловно, требует дальнейшего детального наблюдательного исследования начальных стадий формирования филаментных структур и их последующей динамики, вплоть до выделения протозвёзд и протопланетных дисков. Однако здесь имеет смысл отметить ещё один обнаруженный телескопом "Гершель" факт, который позволяет в новом аспекте рассмотреть триггерное ЗО. А именно, при изучении холодной и тёплой пыли в окрестности областей ионизованного газа НII M16, RCW 120, а также в облаках Rosetta и Vela C были обнаружены широкие негауссовы функции распределения пылевых структур по лучевой концентрации водорода $f(N_{\text{H}_2})$, обладающие иногда двумя пиками, причём имеющие, как правило, явный крутой завал функции распределения — её резкое уменьшение — в области низких лучевых концентраций $N_{\text{H}_2} < (0,3-3) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и широкие более пологие распределения на больших $N_{\text{H}_2} > (1-10) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ [115]. Это может быть объяснено действием ионизационного фронта D-типа: с одной стороны, области газа с низкой плотностью легко ионизируются под действием лаймановского континуума центральных звёзд, а с другой — длина пробега $L_{\text{Ly}\alpha}$ -квантов в более плотных областях меньше и ударная волна, опережающая D-фронт, вызывает последующее сжатие более плотных областей. Таким образом, здесь получает подтверждение классический сценарий триггерного ЗО [116–122]. Дополнительным элементом в сценарии триггерного ЗО, который проявляется в данном случае в виде филаментной структуры, является сверхзвуковая турбулентность и связанные с ней квазидномерные каустики [123, 124]. Действие на филаменты ударных волн стимулирует их переход в область гравитационной неустойчивости.

Таким образом, характер распределения пыли указывает на то, что при ЗО с высокой эффективностью сам процесс образования звёзд стимулирует возникновение положительных обратных связей, а именно приводит к формированию такого динамического режима — кинематики, пространственного распределения газа и его физических свойств, — который оказывается благоприятным для зарождения новых очагов возникновения звёзд. В целом, наблюдения эмиссии от самых холодных областей межзвёздного газа в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах позволяют выявить его особенности и по-новому рассмотреть общую концепцию явления ЗО.

4.1.2. Происхождение молекулярных облаков. Шкала времени молекулярного газа. Фундаментальной задачей физики ЗО и молекулярных облаков являются установление их времени жизни и связанная с этим проблема происхождения молекулярных облаков.

Несмотря на многочисленные исследования, вопрос остаётся открытым: существуют наблюдения, указывающие как на короткую (10–30 млн лет), так и на длинную (> 100 млн лет) шкалы времени.

Детали физического механизма, который вынуждает межзвёздный атомарный водород трансформироваться в молекулярный, всё ещё остаются предметом дискуссий, хотя в целом понятно, что, поскольку плотность газа в спиральных галактических рукавах выше, чем в про-

странстве между рукавами²⁷, процесс конденсации газа в рукавах будет более эффективным, чем в межрукавном пространстве.

Современные представления основываются на двух классических концепциях: в рамках первой предполагается, что спиральная волна плотности стимулирует радиационное остывание газа и быстрый переход $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$, возникновение гигантских молекулярных облаков и инициирование ЗО в них с последующим разрушением облаков энерговыделением массивных звёзд [126–128]. В рамках альтернативного подхода переход $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$ в МЗС происходит непрерывно, так что молекулярные облака присутствуют как в рукавах, так и в межрукавной среде, с тем только отличием, что в рукавах облака за счёт слияний вырастают до гигантских размеров, и в таких молекулярных облаках в основном и протекает процесс ЗО [129–131]. Очевидное наблюдательное различие между этими сценариями состоит в том, что в первом случае молекулярный газ наблюдается только в спиральных рукавах, во втором — как в рукавах, так и в межрукавном пространстве.

Ранние наблюдения пространственного распределения молекулярного газа в Галактике подтверждали скорее первый сценарий (см., например, [132–134], а также исторический обзор вопроса в [131]). С другой стороны, интерферометрические наблюдения OVRO (Owens Valley Radio Observatory) молекулы CO в межрукавном пространстве галактики M51 свидетельствовали в пользу второго сценария [135] (рис. 7).

Вместе с тем наблюдательная идентификация признаков, присущих тому или иному сценарию, осложнена инструментальным влиянием, которое затрудняет уверенную интерпретацию, в частности, из-за потери деталей пространственного распределения источников на малых масштабах при радиоинтерферометрии с массивом менее 10 антенн (см. обсуждение в [136]). Тщательный анализ высококачественного изображения M51, полученного с помощью объединения возможностей интерферометрических наблюдений на обсерватории CARMA (Combined Array for Research in Millimeter Astronomy) и наблюдений в режиме одиночной антенны на телескопе NRO45 (45-метровый телескоп Nobeyama Radio Astronomy), позволил уверенно обнаружить большое количество молекулярного газа в межрукавном пространстве [136]. Этот результат подтверждён с использованием комбинации интерферометрических наблюдений на PdBI (Plateau de Bure Interferometer) и на одиночном 30-метровом зеркале телескопа IRAM-30 m (IRAM — от франц. Institut de Radioastronomie Millimétrique) [137]. С этой точки зрения повышение качества изображения является критически важным для правильного выбора сценария взаимного превращения атомарного и молекулярного газа.

Аналогичные наблюдения перехода $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$ для нашей Галактики недавно были выполнены в работе [131]. Одна из принципиальных трудностей при наблюдении физического состояния газа в Галактике связана с двусмысленностью кинематического расстояния до газового облака, определяемого по доплеровскому смещению

²⁷ Это различие невелико — примерно в два раза [125], тем не менее оно может оказаться существенным, например, в силу того, что радиационные процессы, которыми определяется тепловой режим газа, пропорциональны квадрату плотности.

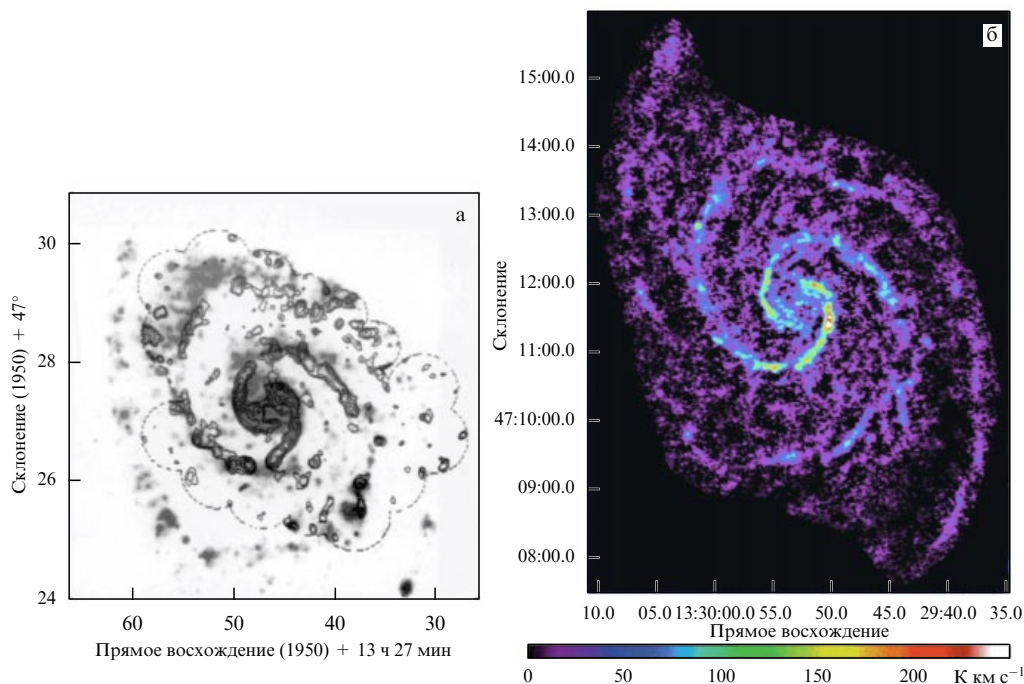


Рис. 7. (В цвете онлайн.) (а) Карта распределения CO (контуры) с наложением на карту H_2 (серым цветом) в галактике M51, полученная в [135] на обсерватории OVRO. (б) Приведённое для сравнения распределение CO в той же галактике, полученное в [136] посредством комбинированных наблюдений на обсерватории CARMA и телескопе NRO45 (см. текст).

спектральных линий: для атомарного газа это линия 21 см HI, для молекулярного — это, как правило, вращательная линия CO(1–0) 2,6 мм. Проблема состоит в том, что луч зрения вдоль межзвёздного диска дважды пересекает окружность (или цилиндрическую поверхность, если луч зрения наклонён к плоскости Галактики) определённого радиуса с соответствующим значением вращательной скорости (см., например, рис. 1 в работе [138]). При этом два одинаковых объёма газа, расположенных на разных расстояниях от Солнца, имеют одинаковую составляющую вдоль луча зрения. Иногда это приводит к ошибке при наблюдениях пространственного распределения газа и, как следствие, к ошибке в оценке доли молекулярного водорода в той или иной области Галактики. Этим, в частности, объясняется различие радиального профиля доли молекулярного газа в области размером от 4 до 8 кпк, полученное в [139, 140].

В недавней работе [131] такая двусмысленность преодолена посредством следующего простого подхода: был проведён анализ пространственного распределения доли молекулярного водорода $f_{\text{mol}} = \Sigma_{\text{H}_2} / (\Sigma_{\text{H}_2} + \Sigma_{\text{HI}})$ в координатах галактической долготы (l)–лучевая скорость (v) без пересчёта этого распределения на гелиоцентрические расстояния, здесь Σ_{HI} , Σ_{H_2} — поверхностные массовые плотности атомарного и молекулярного водорода²⁸. Это даёт возможность определять как радиальное по Галактике распределение f_{H_2} , так и вариации f_{H_2} в газе рукавов и газе, заполняющем межрукавное пространство. Поскольку касательные к рукавам отчётливо выделяются на l – v -диаграммах и, как видно из рис. 8, величина разброса в f_{H_2} в области касательных мало

отличается от таковой в других направлениях, естественно предположить, что этот разброс отражает различие между долями f_{H_2} в рукавах и межрукавной области [131]. В итоге делается вывод о том, что в целом азимутальные (а значит, и от рукавов к межрукавной среде) вариации f_{H_2} находятся в пределах 20% в области доминирования молекулярного газа с радиусом $R \leq 6$ кпк. За пределами преимущественно молекулярного диска, $R \geq 6$ кпк, эти вариации увеличиваются до ~ 40 –50%, что, по-видимому, связано с уменьшением средней плотности газа во внешних областях диска, вследствие чего молекулярные облака легче разрушаются под действием активных звёзд. Этот вывод согласуется с тем, что в галактиках, в которых атомарный газ доминирует, молекулярный водород в межрукавной среде, как правило, не наблюдается, что указывает на короткую временную шкалу молекулярных облаков, ~ 20 –30 млн лет [141].

Вместе с тем следует отметить недавние попытки построить карту распределения фракции молекулярного водорода, основанную на измерениях плотности HI и H_2 в нашей галактике, $\bar{f}_{\text{H}_2} = \rho_{\text{H}_2} / (\rho_{\text{HI}} + \rho_{\text{H}_2})$ [142], с использованием данных [140], взятых из тех же обзоров атомарного [143–145] и молекулярного [132] газа, которые использовались в [131]. Вывод о различии между пространственными вариациями доли молекулярного газа в спиральных рукавах и межрукавной области несколько отличается от того, который был сделан на основе измерений этой доли по *поверхностной* плотности HI и H_2 . Так, показано, что в области галактоцентрических расстояний $R = 6$ –10 кпк карты \bar{f}_{H_2} явно демонстрируют спиральную структуру. За пределами этой области тенденции молекулярного газа концентрироваться преимущественно в спиральных выявлять не удастся: во внутренних из-за того, что там различие в concentra-

²⁸ Массовые поверхностные плотности определены интегрированием по галактическим широтам (b) в пределах $b < |30^\circ|$.

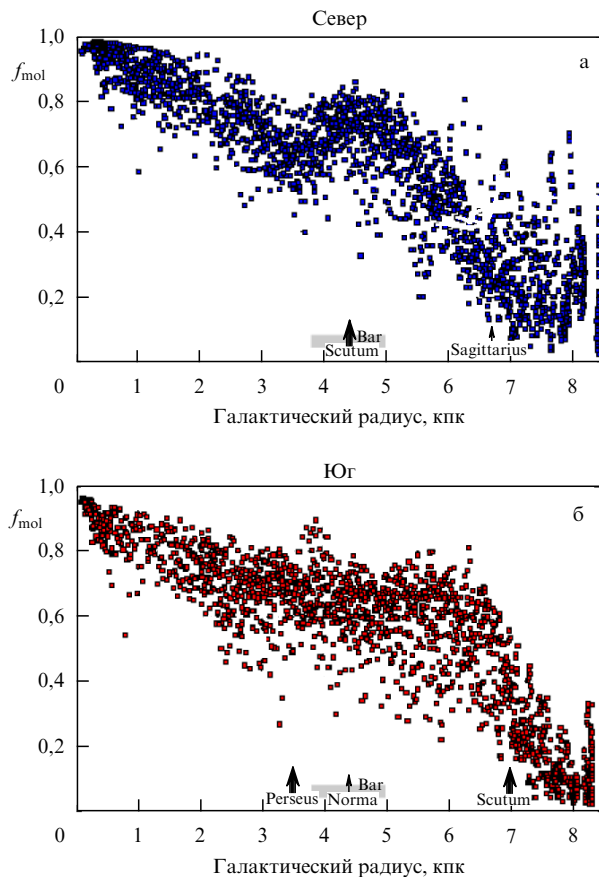


Рис. 8. Распределение доли молекулярного водорода f_{mol} в межзвёздном диске Галактики в северной (а) и южной (б) частях диска [131]. Стрелками отмечены положения касательных к известным спиральным рукавам, другие части рукавов распределены по всем радиусам. Жирные стрелки указывают положения увеличенного содержания звёзд и связанного с этим увеличения гравитационного потенциала. Разброс значений f_{H_2} при каждом фиксированном значении радиуса отражает, по-видимому, вариации долей молекулярного газа в рукавах и междурукавном пространстве [131].

ции нивелируется доминированием молекулярного газа, а во внешних из-за того, что атомарный газ доминирует в целом по диску. Если учесть, что в области размером $R = 6 - 10$ кпк время пересечения междурукавного пространства составляет от нескольких сотен миллионов до 1 млрд лет, то верхним пределом времени жизни молекулярных облаков следует считать несколько сотен миллионов лет. Уместно, впрочем, подчеркнуть, что подход [146] отягощён отмеченным выше эффектом вырождения скорости.

Ещё один фактор неопределённости при наблюдениях молекулярного водорода в галактических спиральных рукавах связан с эффектом селекции, обусловленным тем, что молекулярный газ наблюдается по эмиссионным линиям дипольных молекул, таких как CO. Такие молекулы разрушаются внешним УФ-излучением легче, чем молекулярный водород H_2 , — это связано с тем, что из-за существенно большего количества водорода при его молекуляризации включается эффект самоэкранирования, т.е. защита внутренних слоёв МО от диссоциирующего УФ-излучения молекулами H_2 внешних слоёв облака [147]. В результате часть H_2 в МЗС может оказаться необнаружимой по наблюдениям в линиях CO [148, 149]. Это явление, получившее название "СО-тём-

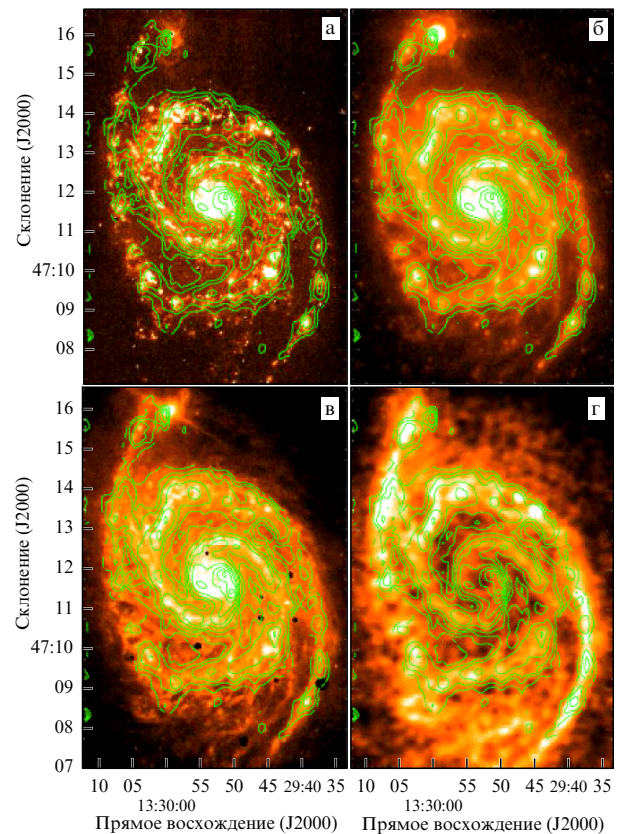


Рис. 9. (В цвете онлайн.) Карты распределения CO (контуры) с наложением на карты H_{α} (а), 24 мкм (б), 8 мкм от полиароматических углеводородов (в) и 21 см HI (г) в галактике M51 [150].

ный газ" (см. обсуждение ниже), может приводить к тому, что облака в определённом интервале размеров (оптических толщин) могут быть, по существу, уже молекулярными (т.е. содержать водород преимущественно в форме H_2), но невидимыми, поскольку дипольные молекулы, такие как CO, в них ещё отсутствуют. Учитывая последнее обстоятельство, можно допустить, что даже тогда, когда молекулярный газ виден только в спиральных рукавах (как, например, [142]), он может присутствовать и в междурукавной среде, но в достаточно разреженных и прозрачных облаках малых размеров, где молекулы CO диссоциированы внешним УФ-излучением. С этой точки зрения отсутствие молекулярного газа в междурукавном пространстве может быть лишь необходимым, но не достаточным условием первого сценария — короткой временной шкалы МО.

Информативным в связи с этим может оказаться ИК-диапазон, в котором тёмные молекулярные облака могут проявляться по эмиссии пыли. Действительно, наблюдения галактики M51 телескопами JCMT и "Спитцер" показали присутствие в её междурукавном пространстве эмиссии не только в линиях CO(3-2) (однако всё ещё с низким угловым разрешением, $\sim 10'' \approx 600$ пк, что заметно превышает размер облаков), но и в ИК-диапазоне от мелких пылевых частиц (полиароматических углеводородов — ПАУ) на длине волны 8 мкм, а также от тёплой пыли (длина волны 24 мкм) [150] (рис. 9). Однако ввиду низкого пространственного разрешения эти наблюдения вполне могут соответствовать как длинной, так и короткой временной шкале.

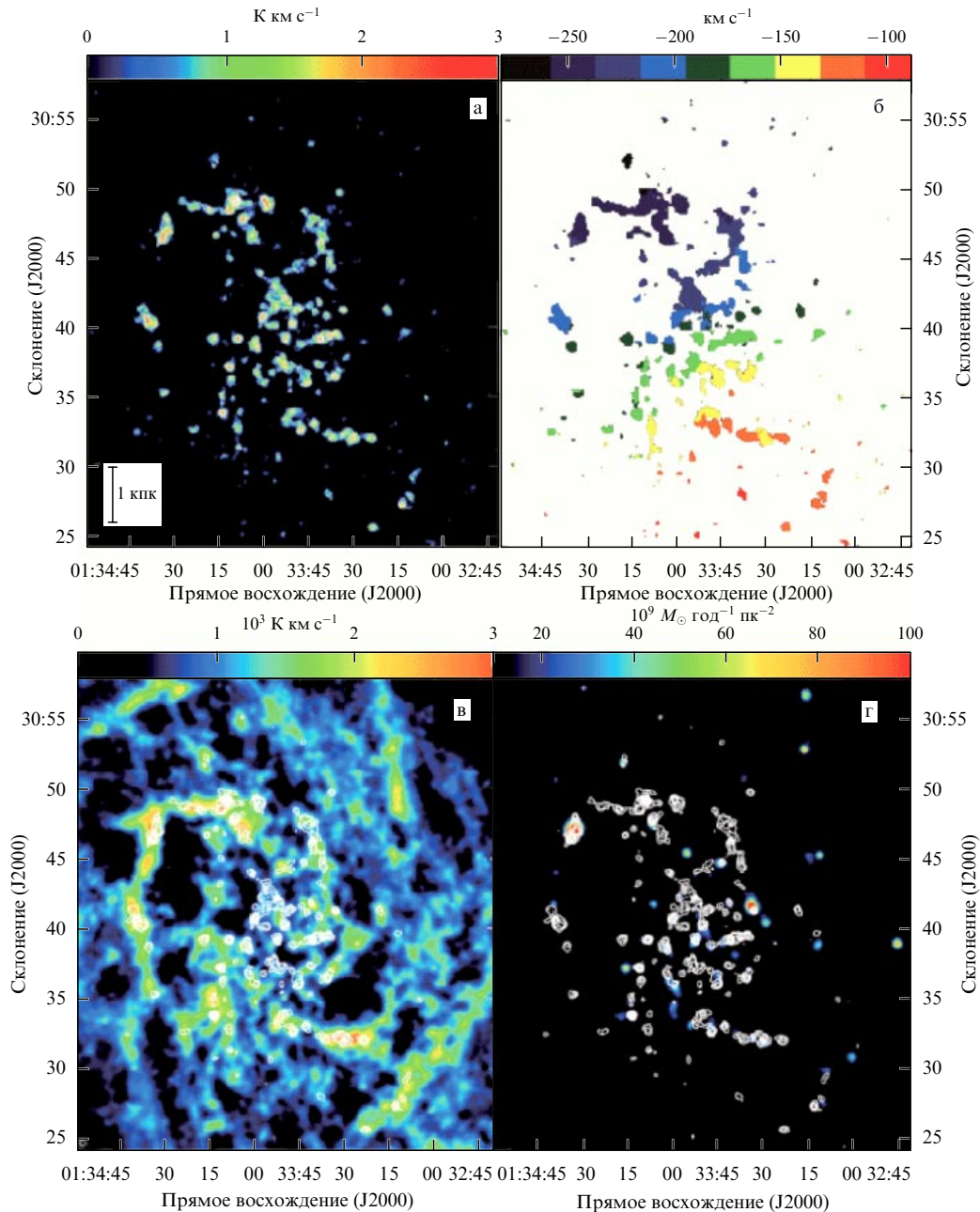


Рис. 10. (В цвете онлайн.) Карты распределения интенсивности (а) и поля скоростей (б) ^{12}CO ($J = 1 - 0$) в галактике M33. Размер поля $30' \times 30'$, разрешение $19''$, что соответствует линейным масштабам 7×7 кпк и 81 пк при расстоянии до M33 $D = 840$ кпк. Контуры интенсивности ^{12}CO ($J = 1 - 0$, показаны белым цветом), наложенные на карты эмиссии в линии 21 см H I (в) и $\text{H}\alpha$ (г) [151].

Противоположным примером является галактика M33 с весьма слабой и аморфной спиральной структурой [151] (рис. 10). Молекулярный газ (CO) в ней представлен слабыми фрагментарными эмиссиями из области спиральных ветвей, что, вероятнее всего, указывает на их короткую временную шкалу, хотя из-за малой плотности облаков существенным может быть влияние неоднородного фактора конверсии эмиссии CO в массу H_2 . Нельзя также исключить и того, что определённая часть молекулярных облаков H_2 может быть прозрачной для излучения, разрушающего CO.

Далёкий ИК- и СММ-диапазон может оказаться ещё более информативным для решения задач, связанных с взаимопревращением $\text{H I} \leftrightarrow \text{H}_2$ в МЗС галактик. Прежде 2 УФН, т. 187, № 10

всего, это может проявляться в избытке эмиссии от пыли по сравнению со стандартным значением для измеренной полной лучевой концентрации водорода $N = N_{\text{H I}} + 2N_{\text{H}_2}$, поскольку области молекулярного газа с дефицитом молекул CO не дают вклада в H_2 — такой избыток повсеместно обнаружен в обзорах неба обсерватории "Планк" (Planck HFI 350 мкм – 2 мм) совместно с данными IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) на длине волны 100 мкм [152] и отнесён к тёмному молекулярному газу. Неопределённость здесь может возникать из-за вариаций температуры пыли, которые, как показано в [153], могут быть значительными — от 14 до 25 К.

Перспективной также представляется возможность отождествления и диагностики невидимого молекуляр-

ного газа в далёком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах в спектральных линиях атомов и ионов различных элементов.

Известно, например, что линии тонкой структуры атомарного и однократно ионизованного углерода попадают в далёкую ИК-часть спектра: [C I] ($\lambda = 370$ и 609 мкм), и [C II] ($\lambda = 158$ мкм). Очевидно, что в областях переходов $\text{HI} \leftrightarrow \text{H}_2$ состояние ионизации углерода зависит от теплового и ионизационного состояния газа и, вообще говоря, от его эволюционного статуса. В таких условиях естественно ожидать, что отношение C II к C I может характеризовать состояние газа в областях $\text{HI} \leftrightarrow \text{H}_2$, в том числе и долю молекулярного газа в них (см. обсуждение в [154]). Последнее обстоятельство подтверждено наблюдательно в [155] в рамках программы поиска тёмного молекулярного газа на радиотелескопе Морга (Австралия) как части CO-обзора в Южной галактической плоскости и на телескопе HEAT (High Elevation Antarctic TeraHertz) в Антарктике в программе обзора атомарного углерода в МЗС Галактики: вблизи границ молекулярных облаков отношение $[\text{C I}]/^{13}\text{CO}$ увеличивается примерно на 50 %, а отношение $[\text{C I}]/\text{HI}$ уменьшается на $\simeq 10$ %. Наблюдательно возможность обнаружения и диагностики тёмного молекулярного газа реализована в обзоре Herschel в линии [C II] с $\lambda = 158$ мкм [156]. Радиальное распределение областей, излучающих в линии 158 мкм и не показывающих эмиссии в CO (диффузные молекулярные облака), является чрезвычайно широким и, имея максимум в области $R \simeq 7$ кпк, простирается до области $R \gtrsim 8,5$ кпк, в которой наблюдения показывают дефицит CO в межзвездном пространстве [131].

СО-тёмный молекулярный газ. В условиях молекулярных облаков ($n > 10 \text{ см}^{-3}$, $T < 100 \text{ K}$) молекулы водорода H_2 находятся в основном электронном состоянии $X^1\Sigma_g^+$, колебательном состоянии $v = 0$ и преимущественно в основном вращательном, $J = 0$ (параводород) и $J = 1$ (ортоводород), состоянии. Это связано с тем, что энергии возбуждения переходов $J = 0 \rightarrow 2$ (параводород) и $J = 1 \rightarrow 3$ (ортоводород) составляют $E_{0,2}/k_B = 540 \text{ K}$ и $E_{1,3}/k_B = 720 \text{ K}$ соответственно, поэтому населённости указанных и более высоких уровней малы, более того, вероятности спонтанных квадрупольных переходов составляют всего 2×10^{-9} и $4 \times 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ — всё это вместе приводит к тому, что эмиссия в линиях H_2 от молекулярных облаков не видна. По той же причине не видна эмиссия от H_2 и для газа в области промежуточных температур $T \sim 10^3 \text{ K}$, соответствующей превращению газа HI в молекулярный газ $^{29} \text{H}_2$.

Поэтому основным инструментом выявления в МЗС молекулярного газа и исследования его динамики служат молекулы CO с низкими энергиями возбуждения и быстрыми спонтанными переходами. Причём в среднем по Галактике принимается следующее соотношение между эмиссией в линиях CO и лучевой концентрацией H_2 : $N_{\text{H}_2} = X_{\text{CO}} W(^{12}\text{C}^{16}\text{O}: J = 1 \rightarrow 0)$, с фактором конверсии $X_{\text{CO}} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-2} (\text{K км с}^{-1})^{-1}$. Здесь $W(^{12}\text{C}^{16}\text{O}: J = 1 \rightarrow 0)$ — проинтегрированная по ширине линии интенсивность $[\text{K км с}^{-1}]$. Для МЗС в других галактиках фактор X_{CO} принимается обычно таким же, как и в нашей

Галактике, что, в принципе подтверждается наблюдениями, хотя и с существенными отклонениями и неопределённостями в оценках (см. обсуждение в [158]).

Таким образом, измерение интенсивности приводит обычно к однозначной оценке лучевой концентрации H_2 . Первые предположения относительно возможности существования CO-тёмного газа (невидимого в эмиссионных вращательных линиях молекул CO) были высказаны в [159], где на ИК-телескопе IRAS был обнаружен избыток ИК-эмиссии по сравнению с наблюдаемыми лучевыми концентрациями атомарного HI (измеряемыми по эмиссии на длине волны 21 см) и молекулярного водорода (измеряемого по CO-эмиссии).

Впоследствии предположения, что молекулы H_2 более распространены, чем свидетельствует эмиссия в линиях CO, были подтверждены в [160] при анализе ИК-эмиссии и спектров HI и CO нескольких ИК-облаков, обнаруженных на длине волны 100 мкм телескопом IRAS. В наблюдениях были обнаружены два замечательных обстоятельства, которые убедительно указали на возможность существенных отклонений фактора конверсии X_{CO} от "стандартного" среднего значения. Выборка из 26 изолированных ИК-облаков с угловым размером порядка 1° была просканирована в линии 21 см с разрешением $3'$ и в линиях CO с разрешением $1' - 2'$, что позволило получить намного более детальную картину.

В результате было обнаружено, что, во-первых, эмиссия в CO, как правило, охватывает центральную область облака размером от $2'$ до $10'$, в то время как ИК-эмиссия и линия 21 см охватывают всё облако. Во-вторых, при больших значениях лучевых концентраций HI ($N_{\text{HI}} > 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$) наблюдается явный избыток ИК-излучения, который, судя по его квадратичной зависимости от N_{HI} (рис. 11а), может быть наиболее правдоподобно объяснён присутствием в этих областях молекулярного водорода³⁰.

Избыток ИК-эмиссии на длине волны 100 мкм является, по существу, лишь отражением того, что фактор конверсии X_{CO} может сильно отличаться от обычно принимаемого среднего значения. Физическая причина больших вариаций соотношения между H_2 и CO состоит в том, что, в отличие от молекул H_2 , которые могут обеспечивать самоэкранирование от разрушающего излучения, молекулы CO, являясь существенно менее обильными в МЗС, не могут поддерживать достаточно большую оптическую толщину, препятствующую разрушающему излучению, и поэтому не могут защищать себя от разрушения [162, 163].

На основе этих соображений в [148] показано, что фактор конверсии для условий в МЗС нашей Галактики $X_{\text{CO}} \simeq X_{\text{CO},\infty} [1 - \tau_v (n/10^3 \text{ см}^{-3})^{1/2}]^{-1}$, где τ_v — оптическая толщина облака в оптической области, n — концентрация газа в нём, $X_{\text{CO},\infty}$ — фактор конверсии при $\tau_v = \infty$. Будучи проинтегрированным с наблюдаемым спектром масс молекулярных облаков [164], в целом по Галактике это уравнение приводит к оценке полной массы молеку-

²⁹ Исключение составляет лишь молекулярный газ в зонах фотодиссоциации молекулярного газа в непосредственном окружении молодых массивных звёзд в областях ЗО (см. обзор [157]).

³⁰ В стационарной кинетике молекул H_2 на пылинках их концентрация определяется уравнением $\gamma(T) n(\text{HI}) n = R_0 \beta N_{\text{H}_2}^{-1/2} n(\text{H}_2)$, где R_0 — скорость фотодиссоциации молекул излучением в лайман-вернерской УФ-полосе, фактор $\beta N_{\text{H}_2}^{-1/2}$ описывает самоэкранирование молекул H_2 в пределе большой оптической толщины (см. [160]).

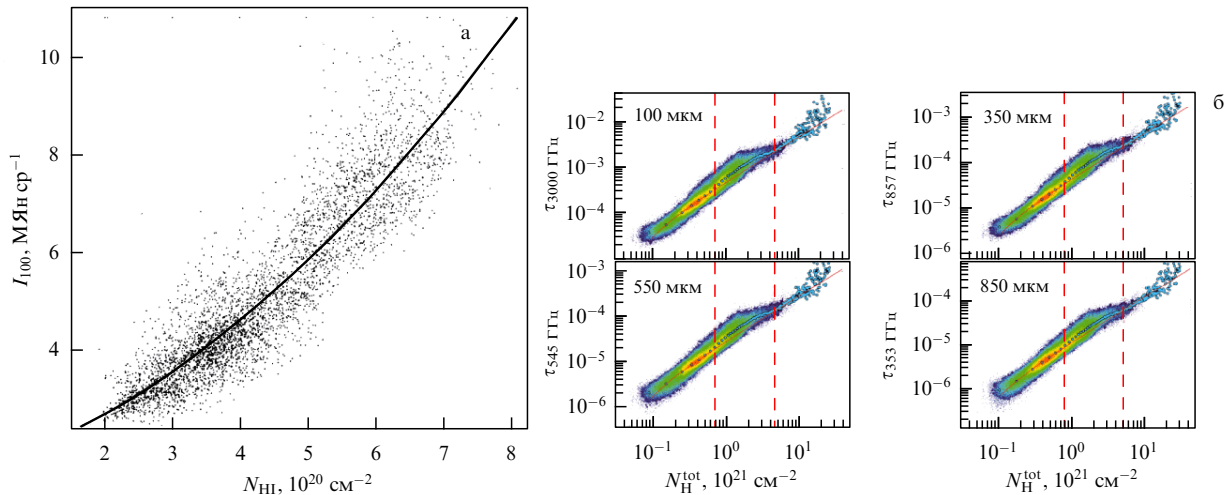


Рис. 11. (В цвете онлайн.) (а) Зависимость поверхностной ИК-яркости на длине волны 100 мкм I_{100} от лучевой концентрации в линии 21 см N_{HI} для молекулярного облака G236 + 39 — точками показаны данные в направлении на 4400 позиции в облаке. Явно виден ИК-избыток — отличие зависимости от линейной в области лучевых концентраций $N_{\text{HI}} > 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$, связанный, как предполагается, с избытком водорода в виде H_2 . Сплошная кривая показывает квадратичную зависимость, соответствующую стационарной кинетике равновесия H_2 в облаке [160]. (б) Зависимость оптической толщины τ экстинкции на пыли при различных длинах волн, указанных на рисунке, от полной лучевой концентрации водорода: тонкая красная линия показывает стандартное линейное соотношение, соответствующее оптической экстинкции. Как видно, имеется сильный избыток экстинкции в интервале лучевых концентраций $N(\text{H}) = 7 \times 10^{20} - 5 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, что соответствует переходной области, в которой часть водорода уже находится в молекулярной форме, но непрозрачность в УФ-области ещё недостаточна для того, чтобы защитить молекулы CO от разрушения [161].

лярного газа, на полпорядка превышающей видимую в линиях CO. Более консервативная оценка, основанная на прямых измерениях поглощения внегалактического рентгеновского излучения ($E = 0,1 - 2,4 \text{ кэВ}$) на высоких галактических широтах ($|b| > 25^\circ$) [165], дала сравнимое с количеством атомарного водорода количество молекул H_2 , не видимое в эмиссии CO.

Анализ тепловой эмиссии пыли и γ -излучения от распадов π^0 , возникающих при взаимодействии протонов космических лучей и протонов поля в МЗС, показал, что масса невидимого молекулярного газа сравнима по порядку величины с массой H_2 , наблюдаемого в линиях CO [166]. Обзор галактического диска в линии тонкой структуры [CII] 370 мкм, а также в линии 21 см атомарного водорода и вращательных линиях CO показал, что около трети "тёмного" молекулярного газа сосредоточено в переходных поверхностных слоях облаков [155]. Впоследствии детальная теория, описывающая тёмный в линиях CO молекулярный газ, была развита в [167].

Осознание того обстоятельства, что широко используемый коэффициент пересчёта X_{CO} наблюдаемой эмиссии CO в массу молекулярного водорода не является константой, а напротив, оказывается чувствительным ко многим параметрам газовых облаков, их геометрическим характеристикам и УФ-излучению, стимулировало дальнейшие исследования соотношения между концентрациями молекул CO и H_2 и развитие альтернативных методов детектирования молекулярного газа, когда эмиссия CO оказывается недостаточной. Естественным образом такие методы были ассоциированы с наблюдениями в ИК-области, причём здесь речь идёт не только о тепловой эмиссии пыли, но и об эмиссии в линиях тонкой структуры атомов и ионов некоторых элементов.

Как отмечалось выше, процесс перехода атомарного газа в молекулярный в МЗС так или иначе сопровождается радиационным остыванием газа, доминирующую роль в котором в области интересующих нас температур

играют линии тонкой структуры однократно ионизованного и атомарного углерода: [CII] ($\lambda = 158 \text{ мкм}$) и [CII] ($\lambda = 340$ и 609 мкм). С другой стороны, поскольку атомарный углерод, так же как и CO, не может защищать себя от ионизирующего излучения из-за своего малого обилия, повышенная эмиссия в линиях [CII] будет исходить из областей молекулярного газа с дефицитом молекул CO (см. обсуждение в разделе 4.1.2). На этой основе в [168] молекулярный газ в областях ЗО в карликовых галактиках был обнаружен именно по 10-кратному избытку отношения [CII] 158/CO(1-0) по сравнению с галактическим значением. Более того, в [169] был продемонстрирован 3–4-кратный избыток [CII] 158 мкм/FIR100 мкм по сравнению с таковым в нормальных галактиках³¹. В целом оказалось, что оценки массы молекулярного водорода H_2 в карликовых галактиках, полученные с использованием "стандартного" коэффициента конверсии CO– H_2 , принимаемого для нашей Галактики [170], занижены более чем в 10 раз.

Между тем история с CO-тёмным молекулярным газом не закончена. Недавние наблюдения обсерватории "Планк" показали для Галактики значительное (28 % по массе от HI) количество CO-тёмного молекулярного газа, оцениваемого по инфракрасному избытку в областях с $7 \times 10^{20} < N(\text{H}) < 5 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (см. рис. 11) [161]. Эти оценки основаны, однако, на простейших и слишком сильных, если учесть сложное динамическое состояние газа МЗС, предположениях о малой оптической толщине в линии 21 см и о постоянной спиновой температуре HI $T_s = 80 \text{ К}$. Существуют довольно убедительные аргументы в пользу того, что CO-тёмный молекулярный газ

³¹ В [168, 169] речь идёт об эмиссии из зон фотодиссоциации молекулярного газа областей ЗО, поэтому детектировались также колебательно-вращательные линии H_2 1–0 S(1) (2,1 мкм), что позволяет более уверенно отнести избыток эмиссии [CII] к дефициту или отсутствию молекул CO.

может быть лишь следствием недооценки массы HI из-за пренебрежения эффектами оптической толщины [171, 172]. По-видимому, надежды на объяснение феномена CO-тёмного молекулярного газа можно возлагать на наблюдения в далёкой ИК-области и СММ-области — в спектральных линиях тонкой структуры атомов и ионов, а также в тепловой эмиссии пыли.

4.2. Диагностика термодинамики космической плазмы

4.2.1. Особенности термодинамики межзвёздного и межгалактического газа. Тепловые свойства МЗС определяются притоком энергии от "внешних" по отношению к газовой составляющей источников энергии: космических лучей, рентгеновского излучения, диссипации магнитогидродинамических движений, а также фотоэмиссией электронов с поверхности пылинок под действием межзвёздного поля УФ-излучения и потерями тепловой энергии при неупругих столкновениях атомов и ионов и возбуждении внутренних степеней свободы с последующим переизлучением энергии, которая свободно выходит за пределы области излучения.

В результате в медленных процессах — с характерными динамическими временами, превышающими времена нагрева и охлаждения, — устанавливается равновесное состояние, в котором температура газа оказывается функцией его плотности — при увеличении плотности температура уменьшается. В более общем случае динамических процессов с широкой временной шкалой в МЗС галактик выделяют три преимущественных значения температуры: температура холодного газа $T \lesssim 100$ К, $T \sim 10^4$ К тёплого газа и $T \sim 10^6$ К горячего газа, причём в МГС горячая фаза может иметь на один-два порядка более высокую температуру. Поэтому наблюдение эмиссий, ответственных за отвод энергии из системы, может служить индикатором физического состояния излучающей плазмы.

4.2.2. Температура возбуждения и интенсивности линий.

Сама возможность диагностики термодинамического состояния космической плазмы основана на связи температуры возбуждения того или иного уровня атома, иона или молекулы с концентрацией газа. Температура возбуждения определяется как температура T_x , при которой населённости верхнего (u) и нижнего (l) уровней соответствуют бoльцмановской заселённости:

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{E_{u,l}}{k_B T_x}\right), \quad (1)$$

где $n_{u,l}$ — населённости верхнего и нижнего уровней, $g_{u,l}$ — их статистические веса, $E_{u,l}$ — разность между энергиями уровней u и l. В общем случае в условиях космической плазмы термодинамическое равновесие отсутствует, поэтому в простейшем случае двухуровневой системы, в которой детальный баланс поддерживается столкновительными процессами возбуждения и деактивации уровней и спонтанными радиационными переходами между ними, населённости связаны между собой соотношением [173]

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{E_{u,l}}{k_B T}\right) \left(1 + \frac{n_{cr}}{n}\right)^{-1}, \quad (2)$$

где $n_{cr}(n, T) = A_{ul}/\beta_{ul}$ — критическая плотность, A_{ul} — вероятность радиационных и $\beta_{ul} = \beta_{ul}(n, T)$ — вероят-

ность столкновительных переходов между уровнями u и l. При плотности выше критической, $n > n_{cr}$, населённости уровней приближаются к столкновительному бoльцмановскому распределению. Решение уравнения баланса населённости двухуровневой системы приводит к следующему выражению, связывающему температуру возбуждения и кинетическую температуру газа:

$$\frac{T_x}{T} = \left[1 + \frac{k_B T}{E_{u,l}} \ln\left(1 + \frac{n_{cr}}{n}\right)\right]^{-1}. \quad (3)$$

В простейшем случае оптически тонкой среды интенсивность линии с частотой $\nu_{u,l}$ определяется скоростью спонтанных распадов $u \rightarrow l$: $A_{ul}n_u$. Поэтому легко увидеть, что отношение интенсивностей линий, соответствующих переходам между уровнями, определяется температурой возбуждения и тем самым величиной n_{cr} . Поскольку, с другой стороны, $n_{cr} = f_{u,l}(n, T)$, это даёт возможность измерять плотность и температуру излучающего газа по измерениям отношения интенсивностей в различных линиях [174]. Наиболее эффективна диагностика космической плазмы в линиях тех атомов, ионов или молекул, которые доминируют в поддержании баланса притока энергии от внешних источников и радиационных потерь в неупругих столкновительных процессах частиц плазмы.

Среди агентов, обеспечивающих радиационное остывание газа, доминируют: 1) в области высоких температур ионы OIII ($10^4 < T < 3 \times 10^5$ К), ионы Ne ($3 \times 10^5 < T < 10^6$ К) и ионы Fe ($10^6 < T < 10^7$ К); 2) в области промежуточных температур — HI, CII и OI с некоторым вкладом NII ($100 < T < 10^4$ К); 3) в области низких температур — CI и молекулы CO ($T < 10^2$ К), [OII] (88 мкм), [CII] (157,7 мкм), [OI] (63,2 мкм), [NII] (122 и 205 мкм), [CI] (370 и 610 мкм), CO ($J = 12 \rightarrow 11, \dots, J = 1 \rightarrow 0$) в диапазоне 300–3000 мкм соответственно. Это даёт возможность использовать характерные эмиссии охлаждающих агентов не только для диагностики текущего состояния газа (см., например, работу [175], в которой описывается метод измерения давления в межзвёздном газе по отношению интенсивностей линий [CI] 370 и 610 мкм), но и для выяснения его тепловой истории [176]. То обстоятельство, что все эти линии лежат в средней и далёкой ИК-областях и СММ-области, ставит планируемый в настоящее время телескоп "Миллиметр" (см. обзор [91]) в чрезвычайно выгодную позицию уникального инструмента для исследования именно этого круга задач для галактик и внегалактического газа как в локальной, так и в далёкой Вселенной и, таким образом, открывает новые возможности для объяснения явлений в межзвёздной и межгалактической среде на "атомарном уровне".

Ввиду того что линии [CII] 158 мкм и [CI] 370 и 610 мкм обеспечивают бoльшую часть отвода тепла от тёплой и холодной фаз соответственно [177], светимость галактик в этих линиях может быть столь же значительной, как и, например, во вращательных линиях CO, поэтому в них могут быть видны даже галактики, находящиеся от нас на космологических расстояниях. В самом деле, характерная величина скорости радиационных потерь энергии для межзвёздного газа в интервале температур $T = 10^2 - 10^4$ К, где находится большая часть атомарного водорода, составляет $A_m \sim (0,1 - 1) n$ [эрг $s^{-1} g^{-1}$] [178, 179]. Для галактики с массой газа $M_g \sim 10^{10} M_\odot$ это означает $L_{[CII]} \sim 10^9 - 10^{10} L_\odot$, что даёт величину около $1 -$

10 мЯн, если галактика локализована на красном смещении $z = 5$.

Таким образом, линии ионов углерода могут быть использованы для диагностики галактик на их начальных фазах. Этот инструмент диагностики в последнее время позволил получить очень интересные, а часто и неожиданные результаты. Мы остановимся здесь лишь на нескольких наиболее ярких примерах.

4.2.3. Карликовые галактики в линии [CII] 158 мкм.

Большая (по массе) часть межзвёздного газа галактик находится в состояниях с температурой $T = 10^2 - 10^4$ К, поэтому основная доля энергии, выделяемой звёздами, переизлучается в линии [CII] 158 мкм, в связи с чем наблюдения в этой линии стали широко использоваться для оценки скорости ЗО в галактиках.

В последнее время этот метод применяется к голубым компактным карликовым галактикам (Blue Compact Dwarf — BCD) с низкой металличностью, интересным тем, что по тепловым свойствам своего газа они могут мимикрировать под ранние галактики.

Особенность эмиссионной линии [CII] 158 мкм, отличающая её от [OIII] 88 мкм и [OI] 63,2 мкм или, например, от CO(1-0), также используемых в диагностике физических условий газа в карликовых галактиках [180], состоит в меньшем значении критической плотности, что делает линию [CII] 158 мкм более чувствительной к вариациям температуры и плотности газа в том интервале, где эта линия вносит существенный вклад в охлаждение. По этой причине все корреляционные зависимости с участием потока (или отношения интенсивностей) в линии [CII] 158 мкм могут показывать больший разброс, чем аналогичные зависимости с линиями [OIII] 88 мкм и [OI] 63,2 мкм. В любом случае яркая линия [CII] 158 мкм вместе с линиями тонкой структуры [OIII] и [OI] являются очень хорошими и чувствительными индикаторами ЗО в галактиках локальной Вселенной, позволяя детектировать ЗО на уровне $\sim 10^{-3} M_\odot$ в год [181].

Вместе с тем наблюдения ИК-линий тонкой структуры в карликовых галактиках показали необычно высокое отношение эмиссии в [OIII] 88 мкм к эмиссии в [CII] 158 мкм [180–182], большее почти на порядок, чем в нормальных галактиках. Это обстоятельство может указывать на необычные физические свойства МЗС в карликовых галактиках [183], например на меньшую металличность газа в них или на особенности их элементного состава, а именно на дефицит углерода по отношению к кислороду. Такой дефицит может быть обусловлен либо эволюционными особенностями BCD-галактик с избытком активности звёзд с массами $M \gtrsim 10 M_\odot$, либо особенностями ионизирующего поля излучения в их МЗС. Например, это может отражать тот факт, что детектируемая ИК-эмиссия в линиях тонкой структуры исходит из компактных областей активного ЗО с избытком [OIII], о чём свидетельствует и отношение эмиссии на линии [CII] 158 мкм к полной эмиссии в далёкой ИК-области [183]. В любом случае за этим стоит ещё не вполне выясненная физика.

4.2.4. Галактики в ранней Вселенной в линиях тонкой структуры. Ввиду большой светимости межзвёздного газа в линии тонкой структуры [CII] 158 мкм последняя может служить хорошим инструментом для исследования физических условий в межзвёздном газе ранних галактик. В первых СММ-наблюдениях ранних галак-

тик ($z > 4$) с экстремально высокой скоростью ЗО ($\sim 10^3 M_\odot$ в год) [CI] 370 мкм и [CII] 158 мкм были единственными детектированными линиями [184–187].

С началом активных наблюдений на обсерватории ALMA с большей чувствительностью и большим угловым разрешением, чем у предшествующих инструментов в СММ-области, появились и новые результаты. Оказалось, в частности, что отмеченное в разделе 4.2.3 превышение отношения интенсивностей линий [OIII] 88 мкм и [CII] 158 мкм по крайней мере на порядок, обнаруженное в карликовых малометаллических галактиках локальной Вселенной, типично и для ранней Вселенной, особенно в области $z > 6$ [188, 189].

Особый интерес с этой точки зрения представляет галактика SXDF-NB 1006-2 ($z = 7,2$). По наблюдениям в ближней ИК-области, проведённым на телескопе Subaru [190], эмиссия соответствует линии Ly_α , и поэтому галактика SXDF-NB 1006-2 относится к Ly_α -эмиттерам (Lyman Alpha Emitter — LAE) — ранним галактикам с высокой скоростью ЗО, в которых большая часть ионизирующих квантов переизлучается в линии Ly_α . Эмиссия в линиях [OIII] 88 мкм и [CII] 158 мкм для этой галактики измерялась на обсерватории ALMA: для [OIII] 88 мкм был детектирован уверенный ($5,3\sigma$) сигнал, соответствующий светимости $L([OIII] 88 \text{ мкм}) = 3,8 \times 10^{42}$ эрг с^{-1} , в то время как для [CII] 158 мкм была получена только верхняя оценка $L([CII] 158 \text{ мкм}) < 3,2 \times 10^{41}$ эрг с^{-1} на уровне 3σ . Следует отметить, что слабый сигнал в линии [CII] 158 мкм на уровне достоверности $3,5\sigma$ был обнаружен на расстоянии 2 кпк (что соответствует угловому расстоянию $0,4''$, $z = 7,2$) от области эмиссии [OIII] 88 мкм. Область эмиссии [OIII] 88 мкм перекрывается областью эмиссии в Ly_α , хотя из-за резонансных многократных рассеяний область Ly_α больше по размеру области [OIII] 88 мкм.

Слабый сигнал в линии [CII] 158 мкм или даже его отсутствие в пространственной локализации основной эмиссии означают, скорее всего, малое количество атомарного газа в галактике SXDF-NB 1006-2. Последнее согласуется с тем, что из-за резонансных рассеяний линия Ly_α смещена относительно линии [OIII] 88 мкм на величину $\Delta v_{Ly_\alpha} = 1,1(\pm 0,3) \times 10^2$ км с^{-1} , меньшую по сравнению с аналогичным смещением в галактиках на меньших z , что в свою очередь может соответствовать верхней границе концентрации атомарного газа $N_{\text{HI}} < 10^{20}$ см $^{-2}$ [191, 192]. Отсюда следует вывод о том, что большая часть газа в галактике ионизована, поэтому доля квантов лаймановского континуума ($E \geq 13,6$ эВ), способных покинуть галактику и вносить вклад в реионизацию, может быть исключительно велика: в работе [189] этот вклад оценивают как $\sim 50\%$.

Замечательной особенностью СММ-спектра галактики SXDF-NB 1006-2 является и отсутствие заметной тепловой эмиссии пыли, особенно если учесть, что металличность её межзвёздного газа в верхнем пределе может быть довольно высокой: от 5% до 100% от солнечной. Можно обсуждать возможные причины этого, однако, безусловно, указанная особенность отличает галактику SXDF-NB 1006-2 от популяции экстремально ярких галактик в ранней Вселенной³².

³² Заметим, что в локальной Вселенной BCD-галактики показывают хорошую пространственную корреляцию эмиссии пыли и H α [193], однако темп ЗО в них весьма скромен: $\sim (10^{-2} - 10^{-3}) M_\odot$ в год.

Отражением значимости методов СММ-спектроскопии далёкой Вселенной в линиях тонкой структуры является проведённый недавно обзор ASPECS (ALMA Spectroscopic Survey) [194] галактик в хаббловском сверхглубоком поле (Hubble Ultra-Deep Field — HUDF), который охватывает интервал частот 212–272 ГГц и тем самым — эмиссию галактик в линии [CII] 158 в интервале красных смещений $z=6-8$ с глубиной детектирования $L([CII] 158) < (1,6-2,5) \times 10^8 L_{\odot}$ ($L([CII] 158) < (0,6-1) \times 10^{42}$ эрг s^{-1}) и угловым разрешением $\sim 1''$. Всего выделено 14 галактик-кандидатов с уровнем отношения сигнала к шуму $S/N > 4,5$. Как и в галактике SXDF-NB 1006-2, ни в одном из таких кандидатов не обнаружено пылевой эмиссии в континууме, хотя оценки темпа ЗО в них существенно меньше, чем в SXDF-NB 1006-2 — порядка $3 M_{\odot}$ в год. Один из важных предварительных выводов обзора ASPECS состоит в указании на существенно большее в единице объёма количество галактик с эмиссией в линии [CII] 158 мкм при $z=6-8$, чем предсказывают современные модели.

4.2.5. Далёкие радиогалактики. Радиогалактики на космологических расстояниях привлекают внимание потому, что определение их физического состояния служит ключом для выяснения их происхождения. В этом ряду удалённая радиогалактика MRC 1138-262 ($z=2,161$) интересна ещё и тем, что её ближайшая окрестность переполнена галактиками, т.е. содержит избыточное количество галактик внутри области радиусом 1 Мпк [195–198]. Радиогалактика MRC 1138-262 по физическим и морфологическим признакам, таким как повышенная концентрация галактик в её окрестности, иррегулярное поле скоростей галактик, горячее рентгеновское гало и её высокая масса [199], может являться центром скопления. Скорость ЗО в MRC 1138-262 чрезвычайно велика: многополосная фотометрия даёт $\simeq 1400 M_{\odot}$ в год — более чем на порядок выше того, что дают наблюдения УФ-эмиссии [200]. При этом, несмотря на столь высокую скорость ЗО, сильный галактический ветер, уносящий массу более чем $400 M_{\odot}$ в год, обусловлен, по-видимому, ускорением со стороны радиоджета [201].

В целом, радиогалактика MRC 1138-262 — объект чрезвычайно интересный, и логика наблюдений, проведённых обсерваторией ALMA, такова: высокая скорость ЗО предполагает, с одной стороны, большую массу молекулярного газа и соответствующие эмиссии в линиях, а с другой — большую частоту сильных ударных волн от вспышек сверхновых и возможную синхротронную эмиссию в континууме. В рамках такого представления в самом деле удалось не только детектировать ожидаемые синхротронную эмиссию на частотах 238,28 и 253,48 ГГц и излучение в линиях [CII] 370 мкм и CO(7–6) (с отношением интенсивностей CO(7–6)/[CII] 370 меньше стандартного) газа сравнительно невысокой плотности ($\sim 10^2-10^3$ см $^{-3}$), а также в линии H $_2$ O 2 $_{11}-2_{02}$ (указывающей на высокую плотность газа, 10^3-10^5 см $^{-3}$, излучающей области), но и неожиданно обнаружить (по ширине и профилю линии [CII] 370 мкм) второй радиоспокойный компонент на расстоянии около 4 кпк от известного ранее радиояркого активного галактического ядра MRC 1138-262. Не исключено, что последнее соответствует слиянию двух активных ядер галактик. Само по себе это обстоятельство требует дальнейшего деталь-

ного исследования эмиссий от центральных областей MRC 1138-262.

Если говорить о свойствах ЗО в MRC 1138-262 и стимулирующих его механизмах, то имеющиеся данные отягощены несколькими существенными неопределёнными факторами: произвольно полагаемая солнечной металличность газа и предполагаемая постоянной температура излучающей пыли $T_d = 40$ К. Оба предположения представляются не вполне оправданными, если учесть хотя бы то обстоятельство, что один из компонентов эмиссии [CII] 370 мкм имеет лоренцевский профиль линии, что свидетельствует о большой оптической толщине в линии и в свою очередь допускает возможность неоднородного нагрева пыли. С другой стороны, учитывая в среднем высокие плотности излучающего газа и малые времена его охлаждения (от 10^3 до 10^4 лет), трудно ожидать хорошего перемешивания металличности во всей массе газа $M_g \gtrsim 10^{10} M_{\odot}$.

4.2.6. Эффекты "памяти" в МЗС и возможность диагностики её эволюции. Следует подчеркнуть, что до недавнего времени задачи диагностики термодинамического состояния межзвёздного и межгалактического газа на основе ИК-эмиссий охлаждающих атомов и ионов основывались явно на предположении о тепловом "равновесии"³³, т.е. о стационарном ионизационном состоянии среды. В действительности такое предположение далеко не всегда справедливо, поскольку в некоторых случаях характерные времена ионизационных процессов могут оказаться сравнимыми с динамическими и тепловыми временами или превышать их. В этом легко убедиться, сравнив характерное время рекомбинации водорода $t_r \sim 3 \times 10^{13} T_6^{1/2}/n$ [с], где $T_6 \equiv T/(10^6$ К), n — концентрация газа, со временем радиационного охлаждения в области температур $\sim 10^5-10^6$ К $t_c \sim 10^{12}/n$ [с] [202]. Следствием этого является, например, возможная "мимикрия" уже остывшего газа остатков сверхновых под горячий, если о его температуре судить по абсорбционным линиям высокозарядных ионов, таких как NV и OVI [203, 204].

Появление в тепловых и ионизационных процессах в межзвёздной и межгалактической средах характерных времён означает переход от теплового "равновесия" к эволюционности, т.е. к явной зависимости текущего состояния среды от начальных условий. Особенно это касается соотношения концентраций различных ионов, а значит, и соотношения между интенсивностями их эмиссий. Таким образом, они могут давать непосредственную информацию об эволюционном статусе того или иного объёма газа. Иными словами, тепловые и ионизационные процессы в МЗС могут играть роль "устройств памяти". Это даёт возможность исследовать эволюцию по однократному наблюдению отдельного объекта.

Для многих задач физики МЗС, в частности физики пыли, использование такой возможности позволит получить критически важную информацию о процессах, опре-

³³ Тепловое равновесие в межзвёздной и межгалактической плазме никогда не является в полном смысле тепловым равновесием — оно всегда означает только баланс источников и стоков. В термодинамическом отношении эти среды являются сильно неравновесными, включающими в себя нетепловые компоненты, объёмный нагрев, объёмные радиационные потери энергии и т.д.

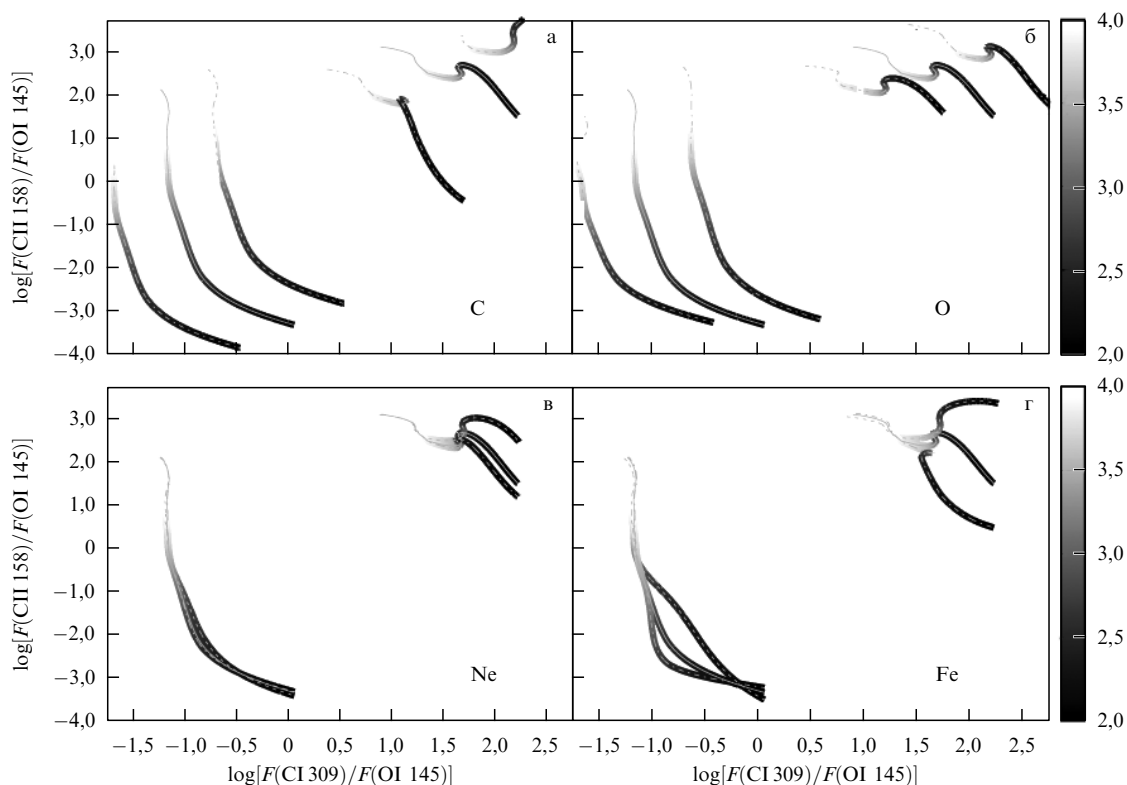


Рис. 12. (а–г) Эволюция относительных интенсивностей линий тонкой структуры атомов и ионов: CII 158 мкм, CI 309 мкм и OI 145 мкм в охлаждающейся плазме при вариациях относительной распространённости углерода, кислорода, неона и железа. Группа треков на рис. в соответствует изобарическому процессу, а на рис. б — изохорическому. Средняя линия в каждой из групп треков — трек для газа с солнечной металличностью, две другие линии соответствуют вариации содержания элемента C (рис. а), O (рис. б), Ne (рис. в) и Fe (рис. г) на $-0,5$ dex и $0,5$ dex [176].

деляющих баланс массы пыли в нашей и других галактиках, об особенностях перемешивания химических элементов, выброшенных в МЗС сверхновыми или звёздным ветром. В частности, если говорить о диагностике горячего газа за фронтом ударной волны от сверхновой, то на радиационных стадиях расширения оболочки сверхновой газ теряет энергию в линиях тонкой структуры [OIII] 88 мкм, [CII] 157,7 мкм, [OI] 63,2 мкм, [NII] 122 и 205 мкм, [CI] 370 и 610 мкм. Соотношение между интенсивностями этих линий даёт принципиальную возможность определить не только эволюционный статус, но и элементный состав выброшенного сверхновой вещества, как показано на рис. 12.

Эволюционные эффекты в космической плазме активно исследуются в последние годы в УФ-области (см. обсуждение в [205, 206]). В инфракрасной и субмиллиметровой областях это направление пока не является активным, хотя, как отмечалось выше, может оказаться перспективным.

4.3. Циркуляция пыли в галактиках: рождение и разрушение пыли

4.3.1. Источники пыли в галактиках. В последнее время проблема происхождения космической пыли привлекает всё больший интерес исследователей. Во многом это вызвано обнаружением пыли на больших красных смещениях, хотя не в меньшей степени сильным стимулирующим фактором остаётся давняя, всё ещё не решённая проблема баланса массы пыли в МЗС (см. обсуждение в [207, 208]). До недавнего времени считалось общепри-

нятым, что пылевые частицы конденсируются в протяжённых холодных атмосферах звёзд асимптотической ветви гигантов (Asymptotical Giant Branch — AGB) [209] и поставляют в МЗС Галактики массу около $0,003 M_{\odot}$ в год [210]. Значительная масса пыли вносится в МЗС планетарными туманностями. По оценкам [207] соответствующая скорость производства пыли может составлять $\sim 0,004 M_{\odot}$ в год. Это сравнимо с тем, что выбрасывается в МЗС ветром звёзд-гигантов и сверхгигантов.

Ситуация радикально изменилась после обнаружения следов пыли в линиях Ly_{α} -леса и особенно после прямого обнаружения эмиссии пыли в далёкой ИК-области по данным SCUBA на больших красных смещениях ($z \sim 5-6$) [211]. Это обнаружение инициировало ряд работ, в которых исследовалась возможность производства пыли сверхновыми II типа с короткой шкалой времени, соответствующей красным смещениям $z > 5$ [212, 213]. Дальнейшие исследования показали, что в галактиках, подобных нашей, AGB-звёзды и массивные сверхновые с коллапсом ядра (Core-Collapse SuperNovae — CCSN) могли бы давать сравнимый вклад при условии, что на одну сверхновую производится $0,1-1 M_{\odot}$ пыли [213].

Однако измерения массы пыли в более чем 20 сверхновых II типа по данным "Спитцера", Воздушной обсерватории им. Койпера (Kuiper Airborne Observatory) и "Гершеля" [214] показали, что выбрасываемая этими сверхновыми масса пыли находится в пределах ($10^{-4}-10^{-5}$) M_{\odot} , что явно недостаточно для объяснения наличия пыли в ранней Вселенной, если предположить, что сверхновые II типа в ранней Вселенной и нашей близкой

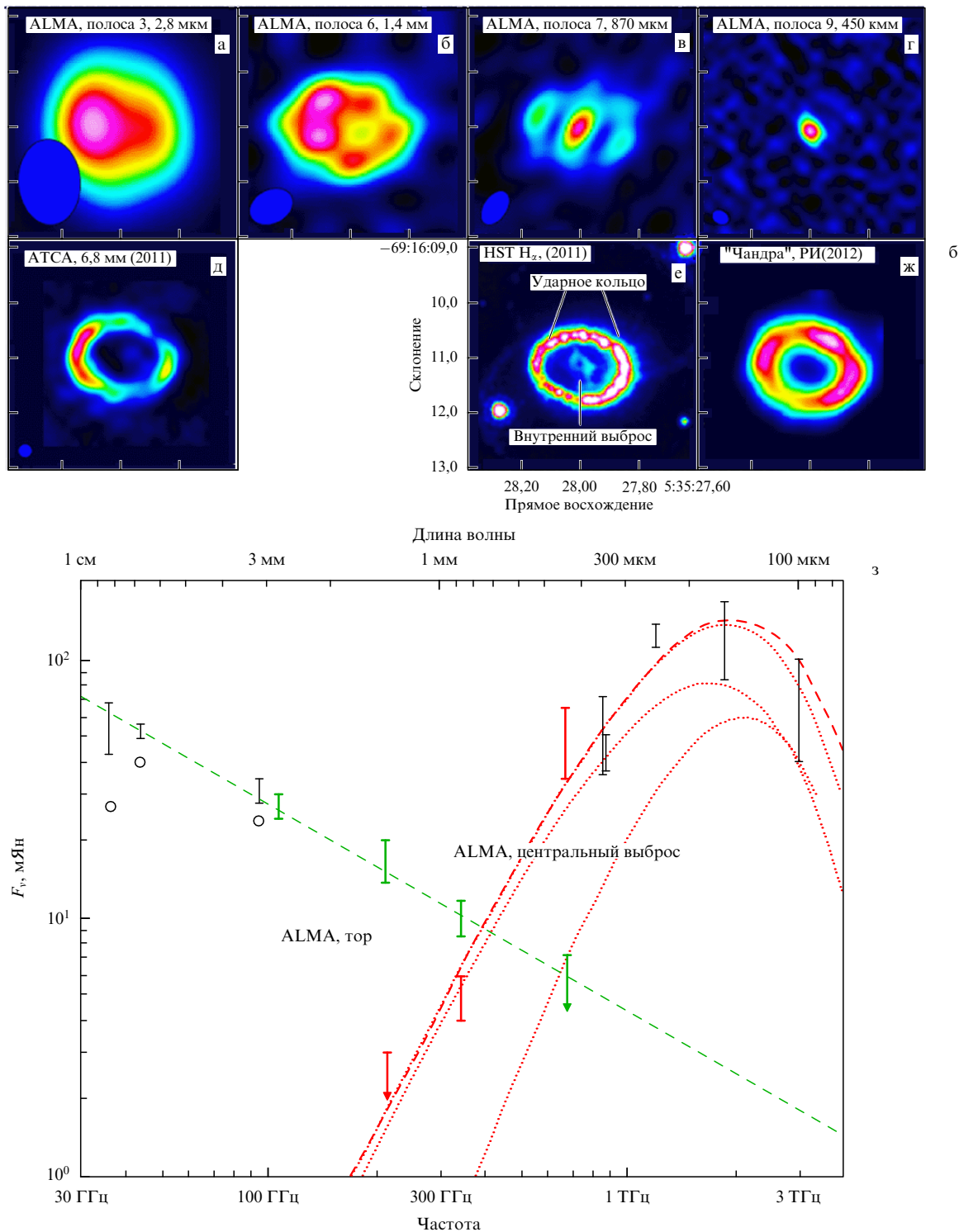


Рис. 13. (В цвете онлайн.) Изображения сверхновой SN 1987A в различных волновых полосах: ALMA 2,8 мм (а), ALMA 1,4 мм (б), ALMA 870 мкм (в) и ALMA 450 мкм (г). Изображения той же сверхновой, полученные на телескопе ATCA (Australia Telescope Compact Array) 6,8 мм (д), космическом телескопе Хаббла HST H α (е) и телескопе "Чандра" (рентгеновское излучение — РИ) (ж). (з) Низкочастотный (пыль + синхротрон) спектр с разделёнными вкладами от тора (т.е. оболочки сверхновой) и центрального выброса [218].

окрестности одинаково эффективны в производстве пыли. Единственным на сегодня известным исключением из этого ряда является сверхновая SN 1987A, для которой данные обсерватории "Гершель" показали довольно большое количество сравнительно холодной ($T_d = 20-25$ K) пыли с массой $0,4-0,7 M_\odot$ [215]. Столь большая масса пыли, на несколько порядков превыша-

ющая среднее значение её массы, найденное ранее в остатках более чем 20 сверхновых, требует более тщательного анализа такого различия. Одной из возможных причин может быть большое количество околозвёздной пыли в окрестности предсверхновой SN 1987A. Последнее тем более правдоподобно, что угловое разрешение "Гершеля" $\Delta\theta > 3,5''$ явно недостаточно для того, чтобы

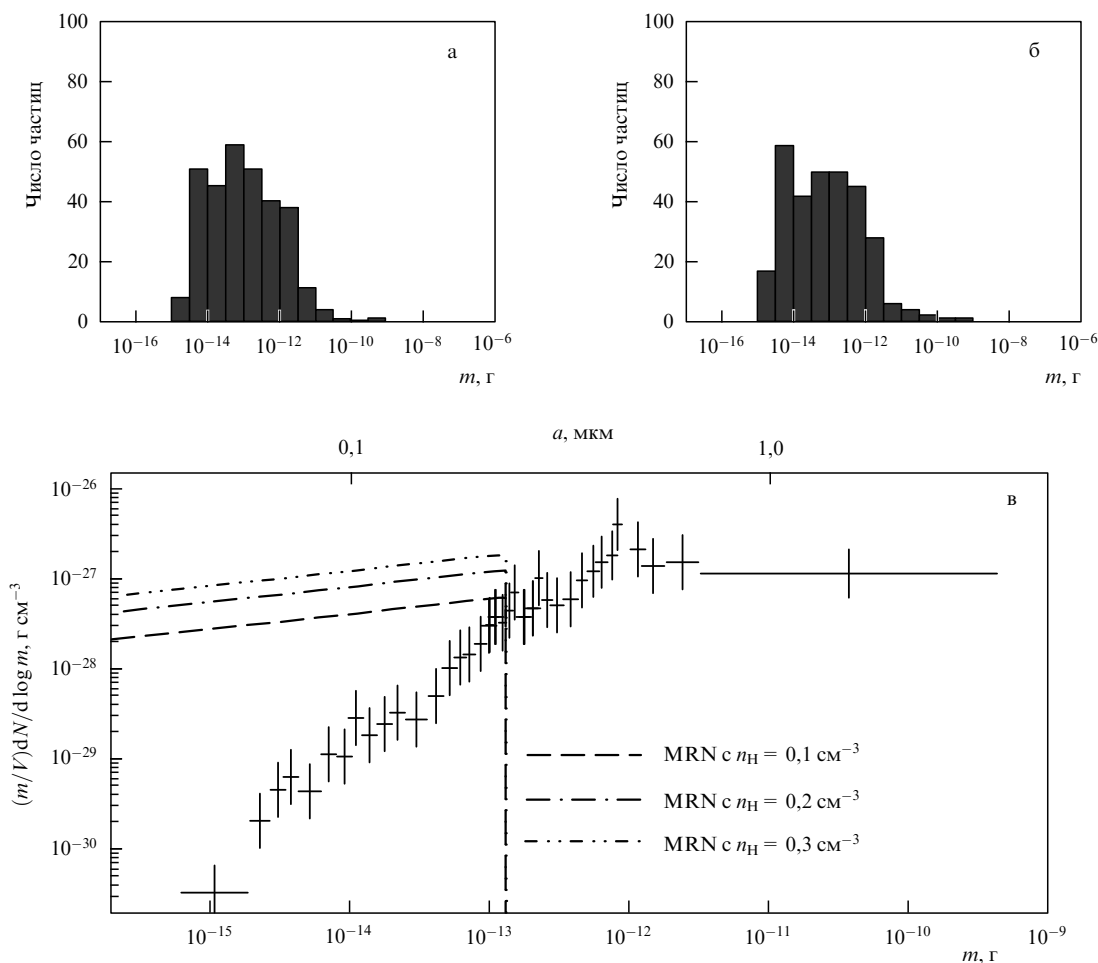


Рис. 14. Гистограммы распределения пылинок по массам, полученные на основе измерений на Galileo (а) и Ulysses (б); резкое уменьшение функции распределения в области малых масс обусловлено недостаточной чувствительностью масс-спектрометров, а в области больших масс может быть связано с наблюдательной селекцией. (в) Дифференциальная функция распределения межзвёздной пыли (так называемое MRN-распределение — по первым буквам фамилий Матиса, Рампла и Нордсика (Mathis, Rumpl, Nordsieck) — авторов статьи [222]), полученная на основе кумулятивных данных Galileo и Ulysses [221], штриховые, штрихпунктирные и пунктирные линии показывают ожидаемое распределение частиц пыли, которое соответствует "стандартному" спектру [222] межзвёздной пыли для различных значений плотности локальной МЗС, V — единичный объём межзвёздной области, m — масса пылевой частицы.

отличить пыль, произведённую собственно вспышкой, от околозвёздной и межзвёздной пыли, сжатой ветром предсверхновой. Наблюдения окрестности SN 1987A с высоким угловым разрешением в ближней и далёкой ИК-области телескопом Gemini South показали наличие всего $\sim 10^{-4} M_{\odot}$ тёплой пыли [216, 217]. Однако недавние наблюдения на обсерватории ALMA с существенно лучшим разрешением на длинах волн 2,8 мм, 1,4 мм, 870 и 450 мкм, позволившие отделить эмиссию от собственно выброса из сверхновой, дали намного более оптимистичную оценку: согласно этой оценке более $0,2 M_{\odot}$ пыли может быть произведено собственно сверхновой [218] (рис. 13). Возможно, это один из наиболее ярких последних результатов обсерватории ALMA в области физики космической плазмы.

4.3.2. Аномально крупные пылевые частицы в МЗС. В последние годы внимание исследователей привлекает вопрос о предельных размерах пылевых частиц, а именно о верхнем пределе диапазона их размеров. Наблюдения экстинкции в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах ограничивают размер пылинок интервалом $a \in [30 \text{ \AA} - 0,3 \text{ мкм}]$ (см., например, [207]). Вместе с

тем на протяжении более чем 20 лет появляются наблюдательные данные, указывающие на присутствие в МЗС более крупных пылинок. Прямые измерения на аппаратах Ulysses [219] и Galileo [220, 221] показали присутствие в межпланетной среде межзвёздных пылинок размером 0,3–1,5 мкм (рис. 14). Резкое уменьшение функции распределения в области частиц малых масс, видимое на рис. 14в, обусловлено ограниченной чувствительностью масс-спектрометров.

С другой стороны, крутое падение функции распределения в области больших масс, хотя и ожидаемое согласно представлениям о межзвёздной пыли [222], кажется чрезмерным — по-видимому, оно связано с наблюдательной селекцией, обусловленной тем, что отношение заряда к массе уменьшается при увеличении массы, ларморовские радиусы частиц пыли в межпланетном магнитном поле увеличиваются, поэтому крупные пылинки слабо захватываются на орбиты во внутренней области Солнечной системы — области измерений спутниками Galileo и Ulysses [221].

Радарные наблюдения микрометеоритов NAIC Arecibo (National Astronomical and Ionosphere Center at Arecibo) (США) выделили около 3000 микрочастиц ра-

диусом около 1 мкм, замедляющих своё движение в земной атмосфере, и измерили их скорости [223]. Интегрирование траекторий назад по времени позволило восстановить траектории частиц и их кинематические и физические параметры за 10 лет до вхождения в атмосферу, а восстановленные параметры (в частности, скорость частиц относительно Солнца $v_{\text{ISP}} \simeq 40 \text{ км с}^{-1}$) указали на межзвёздное происхождение микрочастиц (InterStellar Particle — ISP). Их массы варьировались в интервале $m_g \simeq 10^{-14} - 3 \times 10^{-9} \text{ г}$, что в верхнем пределе на три порядка превышает массы пылевых частиц, детектированных спутником Ulysses. Для измеренного потока массы $\rho_{\text{ISP}} v_{\text{ISP}} \sim 10^{-21} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ это даёт плотность пыли в МЗС $\rho_{\text{ISP}} \simeq 5,3 \times 10^{-27} \text{ г см}^{-3}$ [224].

Если принять среднее значение концентрации межзвёздного газа $\langle n \rangle \sim 0,3 \text{ см}^{-3}$, то данные радарных наблюдений NAIC Arecibo предсказывают значение плотности межзвёздной пыли $\rho_{\text{ISP}} \simeq 0,015 \langle n \rangle m_p$ (где m_p — масса протона), что сравнимо с плотностью тяжёлых элементов в МЗС и в 2–3 раза превышает плотность межзвёздной пыли, измеряемую по экстинкции света. Само по себе это обстоятельство определённо указывает на то, что наши представления не только о происхождении пыли, но и даже о её полной массе в Галактике являются далеко не полными.

Последний вывод может быть сформулирован, видимо, более жёстко, если принять во внимание данные радарных наблюдений комплексом AMOR (Advanced Meteor Orbit Radar facility) [225, 226] (см. также [227]). Комплекс AMOR детектирует только крупные частицы ($a > 15 \text{ мкм}$, $m > 3 \times 10^{-7} \text{ г}$), таким образом, при среднем потоке частиц $\sim 2 \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (см. обсуждение в [227]) и скорости $v_{\text{ISP}} \simeq 40 \text{ км с}^{-1}$ это даёт величину $\rho_{\text{ISP}} > 10^{-26} \text{ г см}^{-3}$, двукратно превышающую плотность тяжёлых элементов в МЗС.

Недавно появились данные обработки архивов ИК-эмиссии в далёкой ИК-области и СММ-части спектра COBE/DIRBE, COBE/FIRAS и Planck совместно с наблюдениями экстинкции в ближней и средней ИК-областях в архивах IRAS, Spitzer и Herschel, из которых следует, что около 15% массы межзвёздной пыли может быть сосредоточено в крупных пылинках с размерами 1,4 мкм и с ними может быть связано около 3% полной тепловой эмиссии МЗС [228]. Несмотря на то что массовая доля таких пылинок и их вклад в общую тепловую эмиссию незначительны, ввиду определяющей роли пылевых частиц в образовании планет эти данные чрезвычайно важны для выяснения всех вопросов, связанных с космической пылью, и заслуживают дальнейшего детального исследования. В связи с этим очень важно осознавать, что наблюдения любых проявлений крупных пылевых частиц в МЗС осложнены несколькими чрезвычайно важными обстоятельствами.

Во-первых, поскольку температура межзвёздных пылинок в общем случае уменьшается с увеличением их размера как $T_d \sim a^{-1/6}$, а поток тепловой эмиссии пылинки в максимуме изменяется как $\propto T_d^5$, выделение вклада холодных пылинок из общего теплового спектра само по себе является трудной задачей.

Во-вторых, если говорить о вкладе таких пылинок в экстинкцию, то с учётом их малого числа он оказывается чрезвычайно малым. Более того, для оптических измерений экстинкции крупные пылинки становятся уже серыми, т.е. их вклад в экстинкцию перестаёт зависеть от

длины волны. В какой-то мере преодолеть это затруднение могут помочь измерения экстинкции в длинноволновой части спектра в направлениях с очень высокой поверхностной плотностью, однако это представляется чрезвычайно трудоёмким и вряд ли существенно расширит возможность измерения вклада в экстинкцию от крупных пылинок. Остаётся, по-видимому, возможность обнаружения следов присутствия в МЗС крупных пылинок в эмиссии от горячей плазмы за фронтами ударных волн исторических сверхновых в СММ-области спектра.

Представляется весьма возможным, что оценка доли массы крупных (размером 1,4 мкм) пылинок в МЗС $\sim 15\%$, полученная в рамках программы измерения экстинкции в ближней и средней ИК-областях в направлении на галактический центр по архивным данным IRAS, Spitzer и Herschel [228], является заниженной.

Одна из причин состоит в том, что используемая в [228] модель пылевых частиц неявно включает в себя предположение о полном перемешивании пылинок во всём спектре размеров, что является слишком сильным (и важным с точки зрения численных оценок) предположением, поскольку отношение заряда к массе q/m_d уменьшается с увеличением массы в любой модели заряжения пылинок — это делает крупные пылинки распределёнными по существенно большему объёму и обуславливает их дефицит в тех областях, в которых измеряется экстинкция. Другим важным обстоятельством является то, что крупные частицы разрушаются при прочих равных условиях медленнее мелких, а именно: характерное время разрушения пылинки возрастает с увеличением радиуса как $\tau_{\text{dest}} \propto a$. Поэтому можно ожидать, что крупные пылинки накапливаются в МЗС. Однако вследствие отмеченного выше уменьшения отношения q/m_d для крупных пылинок, слабо связанных с плазмой, и их более диффузного распределения в МЗС, вклад в экстинкцию, обусловленный ими, может оказаться малым. В самом деле, если предположить существование в среде крупных пылевых частиц размером a , составляющих массу, равную наблюдаемой в Галактике массе пыли $M_d \sim 2 \times 10^7 M_\odot$, то её вклад в экстинкцию составит $A_v/L \sim [0,3/(a/1 \text{ мкм})]^{\text{mag}}$ на 1 кпк, что в пять раз меньше наблюдаемой величины.

В последнее десятилетие появились новые данные о существовании *крупных межгалактических* пылинок. Одно из убедительных доказательств существования крупной пыли в Галактике и, возможно, в межгалактическом пространстве опубликовано в работе [229]: в июле 2006 г. на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН была детектирована слабая эмиссия в линиях FeI, MgI, OI, NI и в полосах N₂, типичных для свечения метеоров. Скорость вхождения метеора в атмосферу была оценена величиной 300 км с^{-1} , его размер — от нескольких десятых миллиметра до 1 мм с учётом неопределённости атмосферных данных. Указанные свойства позволяют отнести этот метеор к хондрулам. Метеор был зарегистрирован также камерой CCD-TV (Charge-Coupled Device Television) двухтелескопного комплекса FAVOR (FAst Variability Optical Registration) на уровне достоверности более 96%. Это уникальное событие — все ранее детектировавшиеся микроскопические или пылевые частицы, попадающие в Солнечную систему из МЗС, имели ограниченные как размеры (около 1 мкм), так и скорости (как

правило, около $10-15 \text{ км с}^{-1}$), что следует из данных многих космических миссий (см., например, данные *Ulysses* [230, 231] и недавние данные *StarDust* [232]). Ввиду необычной для Галактики высокой скорости метеороного свечения и его направленности в сторону центроида Местной группы, происхождение этого метеора естественным образом было связано с МГС [229].

Если придерживаться общепринятой точки зрения, что пыль образуется в звёздных источниках, то наличие крупной пыли в МГС должно указывать на то, что она должна присутствовать в существенно большем количестве в МЗС галактик, в том числе и нашей. Поляриметрические наблюдения звезды *VY CMa* в оптическом диапазоне показали возможность присутствия в её оболочке крупных, размером до $0,5 \text{ мкм}$, пылинок [233]. Недавно на обсерватории *ALMA* были проведены исследования [234] переменной звезды асимптотической ветви гигантов *Mira A* с целью поиска признаков производства пыли в верхних слоях её атмосферы и окружающей оболочке. К сожалению, явных признаков пыли обнаружить не удалось, хотя указания на то, что пыль производится, следуют из быстрого (более чем на порядок величины) уменьшения концентрации молекул SiO на границе фотосферы звезды (около пяти радиусов звезды). Пыль в этих областях является слишком горячей ($T > 100 \text{ К}$) для того, чтобы давать эмиссию в далёкой ИК-области, однако наблюдения СММ-эмиссии от прямых предшественников пылинок — молекул SiO [234], как и наблюдения СММ-эмиссии молекул AlO (предшествующих образованию кластеров Al_2O_3), выполненные ранее на той же обсерватории *ALMA* [235], позволяют оптимистично смотреть на возможность детектирования СММ-эмиссии от высших оксидов алюминия (таких, как Al_2O_3), а также холодной крупной пыли в околосвёздном газе вокруг красных гигантов.

Нельзя, впрочем, исключить и того, что пыль, наблюдаемая в [229], родилась во Вселенной на самых ранних стадиях звёздного нуклеосинтеза — на это указывает и её нетипичная для МЗС скорость. В таком случае измерение количества крупной пыли в нашей МЗС становится ещё более интересной и важной задачей. Наблюдения ИК- и СММ-эмиссии от крупных пылинок пока отсутствуют.

5. Холодная пыль в окрестностях галактик

5.1. Пыль и газ в горячем гало Галактики

На протяжении последнего десятилетия широко обсуждается проблема скрытых (или утерянных) барионов. Суть её состоит в том, что масса барионов в галактиках, скоплениях и МГС в современную эпоху ($z \simeq 0$) оказывается более чем вдвое меньшей, чем следует из космологических данных по распространённости лёгких элементов и анизотропии реликтового излучения. Предполагается, что резервуаром скрытых барионов могут быть протяжённые ($100-200 \text{ кпк}$) галактические газовые гало вокруг галактик. Однако, несмотря на приложенные усилия, обнаружить скрытые барионы в гало Галактики пока не удалось.

Результаты первых наблюдений, указывающие на большое количество высокозарядных ионов кислорода OVII в гало Галактики, опубликованы в [236]. Однако оценка массы барионов в гало, которая составила

$M \sim 10^{11} M_\odot$, чрезвычайно сильно зависит от относительной концентрации поглощающих ионов, $f^{-5}(\text{OVII})$, и металличности, Z^{-3} . В недавней работе [237] сообщено об обнаружении рентгеновских линий поглощения атомарного и однократно ионизованного кислорода от конденсаций тёплого ($T \sim 10^4 \text{ К}$) ионизованного газа, локализованного, по-видимому, в пределах области радиусом 15 кпк от центра Галактики, с полной массой $M_{\text{WIM}} \sim 10^9 M_\odot$. Это значительно меньше величины, которую обычно связывают со скрытыми барионами в нашей Галактике. Здесь, однако, существенным обстоятельством является то, что тёплый ионизованный газ, обнаруженный в [237], должен быть сосредоточен в конденсациях сравнительно небольшого размера ($\leq 25 \text{ пк}$), и поэтому вероятность его попадания на луч зрения слишком мала. Помимо того, такие конденсации должны удерживаться в равновесии давлением окружающего их горячего газа, так что оценка [237] является оценкой снизу.

Таким образом, на основе рентгеновских данных можно сделать вывод о том, что в протяжённом гало Галактики содержится значительно бóльшая барионная масса (вплоть до $M \sim 10^{11} M_\odot$). Однако этот вывод справедлив при условии, что профиль плотности тёмной материи является не "касповым", как предсказывает модель Наварро–Френка–Уайта (Navarro–Frenk–White — NFW), а имеет более пологую форму с несингулярным ядром, соответствующим гидростатическому равновесию [238].

На полпорядка меньшая оценка массы барионов получается из требования сохранения массы газа в Большом Магеллановом Облаке, движущемся в протяжённом газовом гало Галактики, $M \simeq 2,6 \times 10^{10} M_\odot$ [239]. Недавно в рентгеновских спектрах активных галактических ядер были детектированы 20 линий поглощения высокозарядными ионами OVI , принадлежащими гало Галактики [240]. Оценка массы поглощающего газового гало на основе этих данных затруднительна. Надежды можно связывать с наблюдением периферии галактик в далёкой ИК-области и особенно СММ-области. Основанием для этого является обычно принимаемое предположение о том, что масса пыли в межзвёздном газе пропорциональна массе тяжёлых элементов с коэффициентом пропорциональности $0,3-0,4$ [241], который может несколько изменяться, по-видимому, только в очень малометаллических галактиках [242, 243]. Поэтому если в околосвёздном газе наблюдаются тяжёлые элементы, то можно предполагать, что в нём присутствует примерно такое же по массе количество пыли и наблюдение эмиссии от неё позволит измерить полную массу газа в околосвёздном (или межгалактическом) газе. Очевидно, что пыль в таких условиях имеет низкую температуру, $T_d \lesssim 15 \text{ К}$, если только она не окружена горячим газом в скоплениях галактик (см. обсуждение в [244]).

5.2. Наблюдения холодной пыли в промежуточных гало галактик

Значительная часть галактического газа находится далеко за пределами оптических радиусов галактик $r > R_{25}$, где R_{25} — радиус области галактики, в которой поверхностная яркость в оптическом диапазоне составляет 25 звёздных величин на квадратную угловую секунду. Часто размер радиальных распределений атомарного водорода в галактиках оказывается в $3-5$ раз больше R_{25} .

Естественно ожидать, что в таких условиях ещё большей протяжённостью характеризуются радиальные распределения ионизованного газа с низкой мерой эмиссии, являющиеся поэтому труднодоступными для наблюдений в оптическом диапазоне и радиодиапазоне [245]. С другой стороны, присутствующая в таких протяжённых окологалактических областях пыль может быть видна в эмиссии в ИК-области спектра, причём, будучи удалённой на большие расстояния от звёзд, пыль остаётся холодной, и поэтому она должна излучать в далёкой ИК- и СММ-областях.

Наблюдения галактик, видимых с ребра, телескопом "Гершель" позволили выделить пыль за пределами звёздных дисков в направлении, перпендикулярном плоскости диска. Например, для спиральной галактики NGC 891 подтверждено наличие не только обнаруженного ранее в оптическом диапазоне довольно толстого (2–3 кпк) пылевого слоя над звёздным диском [246, 247], но и более протяжённого (вплоть до 10–12 кпк над плоскостью диска) пылевого гало с убывающей вдоль нормали к диску температурой пыли, при этом массовая доля пыли более чем в два раза превышает её значение для Галактики [248, 249].

Существенное увеличение (в четыре раза) массовой доли пыли с уменьшением её температуры — от $\Sigma_d/\Sigma_{H_2} = 0,012$ при $T = 24,5$ К до 0,05 при $T = 20$ К — является интересным и перспективным с точки зрения дальнейшего исследования холодной пыли в гало галактик. Поскольку это означает, что большая часть холодной пыли находится на расстояниях около 10 кпк над плоскостью галактики, должен существовать механизм селективного выноса пыли из галактики, более эффективный, чем вынос газа. В качестве такого механизма можно предложить радиационное давление, и, хотя детальные расчёты селективного выноса пока отсутствуют, связь заряженных пылинок с магнитным полем является, по-видимому, фактором, ограничивающим такой перенос. Более того, ввиду сложной топологии магнитного поля как в диске галактики, так и за его пределами такой расчёт может оказаться чрезвычайно трудоёмким [250]. Важной особенностью такого двухтемпературного распределения пыли является то обстоятельство, что при наблюдении галактик, ориентированных к нам ребром (edge-on), на коротких длинах волн ($\sim 0,5$ –3 мкм) проявляет себя только (или преимущественно) горячая пыль со шкалой высот 250–300 пк, в то время как в более длинноволновой области (8–250 мкм) выделяются два компонента: со шкалами высот 150–250 пк и 1–2,5 кпк [249]. К сожалению, сравнительно слабая чувствительность телескопа "Гершель" по потоку пока не позволила сделать сколько-нибудь уверенного заключения о протяжённых в радиальном направлении пылевых дисках.

Очень интересный результат, касающийся холодной пыли в промежуточных гало видимых с ребра галактик NGC 3044 и NGC 4157, опубликован в [251], где обнаружена корреляция теплового излучения холодной пыли на длине волны 850 мкм и синхротронного континуума на частоте 617 МГц: $S_{617} \propto S_{850}^{2,2}$. Результат неожиданный и, хотя авторы [251] предлагают интерпретацию, основанную на правдоподобном предположении о том, что синхротронная эмиссия связана с магнитным полем и релятивистскими электронами, а тепловая эмиссия пыли — с плотностью пыли, приводимые ими количественные соотношения не кажутся убедительными и требуют даль-

нейшего анализа, по крайней мере потому, что релятивистские электроны являются более диффузионными и в любом случае обладают пространственным распределением, отличным от распределения пыли, поэтому аргументы, не учитывающие указанные обстоятельства, должны быть подкреплены дополнительными наблюдательными свидетельствами. В любом случае возможная тесная связь теплового излучения пыли и нетеплового излучения релятивистских электронов требует тщательного наблюдательного исследования на большей выборке наблюдаемых с ребра галактик с лучшей чувствительностью и лучшим пространственным разрешением, чем у GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) и JСMT в радиодиапазоне и СММ-диапазоне соответственно.

Измерения эмиссии пыли на галактических масштабах, в частности на периферии галактических дисков, представляет интерес, кроме того, с точки зрения переноса пыли в межзвёздной и межгалактической среде, а также в более общем контексте обмена веществом между галактиками и МГС. В связи с этим следует отметить исследования пространственных вариаций распространённости пыли и металлов (тяжёлых элементов) в МЗС галактик.

В настоящее время имеются указания на существование двух типов радиальной зависимости отношения массы пыли к массе металлов в галактиках: в одном случае это отношение в среднем увеличивается с уменьшением металличности от центра галактики к её периферии [252, 253], в другом — плотность пыли уменьшается в радиальном направлении с удалением от центра галактики пропорционально плотности металлов [254, 255].

Если такая дихотомия реальна, то из неё вытекают важные следствия для физики пыли в МЗС. Первый тип распределения — увеличение отношения массовой доли пыли к металличности на периферии галактики — может свидетельствовать либо о менее эффективном разрушении пыли за фронтами ударных волн от сверхновых, либо о селективном транспорте пыли в радиальном направлении.

Второй тип распределения может означать, что перенос пыли и тяжёлых элементов в радиальном направлении осуществляется одинаковыми механизмами с неизменным отношением доли металлов, связанных в пыли, или что пыль возникает непосредственно в МЗС при выбросах из массивных звёзд в одинаковой пропорции.

При оценке пространственных вариаций отношения массовой доли пыли к металличности существенное влияние может оказывать вырождение, связанное с неопределённостью индекса эмиссии β , фактора конверсии CO в H_2 — $X(CO)$ — и других физических величин, характеризующих пыль и состояние межзвёздного газа [256]. Наблюдения на "Миллиметроне" в широкой полосе длин волн, от 20 мкм до 3 мм, могут внести существенный вклад в решение этой проблемы, в частности, снять вырождения по индексу эмиссии β и уточнить фактор конверсии $X(CO)$ посредством одновременного наблюдения эмиссии CO и тепловой эмиссии пыли.

Между тем прямые наблюдения пыли на периферии галактических межзвёздных дисков крайне редки. Первые убедительные наблюдательные свидетельства существования запылённого межзвёздного диска с радиусом, по меньшей мере в два раза превышающим радиус звёздного диска, представлены в [257]: в оптическом диапазоне была обнаружена спиральная галактика (ориентирован-

ная к лучу зрения под углом $\simeq 45^\circ$), которая проецировалась на фоновую галактику большего размера, расположенную почти перпендикулярно к лучу зрения. Ориентация запылённого диска не позволяет оценить малые значения оптической толщины пыли, поэтому минимальное измеренное значение экстинкции $A_V \lesssim 0,1$. Учитывая экспоненциальный характер радиального профиля оптической толщины, можно ожидать, что общая протяжённость пылевого диска с оптической толщиной $\tau \sim 0,01$, при которой она всё ещё будет видна в ИК-области, может простираться вплоть до трёх оптических радиусов. Запылённый межзвёздный диск демонстрирует оптические свойства, типичные для пыли в нашей Галактике.

В последнее время появились убедительные наблюдательные свидетельства в пользу существования протяжённых дисков межзвёздного газа в линии 21 см с радиусами, в несколько раз превышающими радиус оптических звёздных дисков [258, 259]. Если учесть существование вокруг протяжённых дисков корон ионизованного водорода [HII] [245], то такие диски содержат, по-видимому, большую массу газа. Очевидно, диски должны содержать также и пылевой компонент, как это наблюдается в случае "затменных" галактик [257]. В настоящее время, однако, нет данных об обнаружении пыли в галактиках из каталогов [258, 259], хотя, учитывая достаточно высокие значения лучевых концентраций ($\sim 10^{21} - 10^{22} \text{ см}^{-2}$) водорода $N(\text{HI} + \text{HII})$, можно ожидать вполне детектируемых значений величины экстинкции, $A_V \gtrsim 1$, и достаточно высоких потоков эмиссии в далёком ИК-диапазоне и СММ-диапазоне длин волн.

В настоящее время далеко не ясно, насколько повсеместны такие протяжённые межзвёздные диски вокруг галактик, а также зависит ли их протяжённость от морфологического типа, массы галактики и т.д., но в любом случае понятно, что наличие вокруг галактики протяжённого межзвёздного диска должно коррелировать с наличием у неё протяжённой газовой горячей короны, а также с массой и конфигурацией гало тёмной материи. Поэтому обнаружение протяжённых межзвёздных дисков посредством наблюдения СММ-эмиссии имело бы принципиально важное значение для физики галактик и космологии.

Исследование пыли на периферии галактик как в протяжённых межзвёздных дисках, так и в перпендикулярном к плоскости диска направлении в промежуточных гало имеет ещё одну сторону, принципиально важную для наблюдательной космологии. В начале 1990-х годов в ряде работ, особенно в [47, 260], была высказана идея о том, что пыль, заполняющая периферийные области межзвёздных галактических дисков, может вносить заметный вклад в ослабление излучения от удалённых фоновых объектов, в том числе от удалённых сверхновых. На больших красных смещениях такой вклад могут вносить протогалактики или галактики на ранних стадиях эволюции, например протяжённые диски насыщенных Ly α -систем (Damped Lyman-Alpha — DLA).

Помимо того что протяжённые запылённые межзвёздные диски могут затенять оптическое и ультрафиолетовое излучение далёких источников, они, будучи нагретыми собственным звёздным населением, могут давать вклад во внегалактические средний и дальний ИК-фоны. Этот вклад, тщательно исследованный в работе [261], оказался в очень хорошем согласии с наблюдаемым спектром, полученным телескопом COBE/DIRBE

на длинах волн 140 и 240 мкм с фактором неопределённости 1,5–2 [262] и COBE/FIRAS в интервале длин волн 150–2000 мкм с фактором неопределённости 3–5 [263]. Большая ошибка во втором случае обусловлена, по-видимому, тем, что в этой области спектра приходится вычитать большой вклад реликтового излучения. Понятно, что запылённые межзвёздные диски могут приводить к существенной недооценке количества оптических и ультрафиолетовых квантов во Вселенной, а следовательно, и недооценке темпа ЗО в ранней Вселенной, скорости производства тяжёлых элементов, вклада от космических лучей и всего того, что связано с термоядерным синтезом в пострекомбинационной Вселенной. Более того, если вернуться к промежуточным запылённым газовым гало галактик, подобных, например, гало галактики NGC 891, то такие гало могут затенять довольно большую часть оптических и ультрафиолетовых квантов собственного звёздного населения галактик. В [264] приводятся аргументы в пользу того, что запылённые гало могут затенять или поглощать от 37 % для собственных звёздных галактических дисков и до 71 % для их балджей. Это обстоятельство может быть одной из причин обнаруженного недавно дефицита УФ-излучения во Вселенной [265].

5.3. Холодная пыль в дальней окрестности галактик: окологалактический газ

По данным измерений экстинкции в удалённых ($z \sim 0,3$) галактиках, проведённых в Слоановском цифровом обзоре неба (Sloan Digital Sky Survey — SDSS), пыль простирается далеко за пределы галактик по степенному закону $\Sigma_d \propto r_p^{-0,8}$ (здесь Σ_d — поверхностная плотность пыли вдоль луча зрения, r_p — прицельное расстояние от луча зрения до галактики), что даёт космологическую плотность пыли в локальной Вселенной $\Omega_d \simeq 5 \times 10^{-6}$. Эта величина согласуется с оценками средней металличности во Вселенной $Z_d \sim 0,1 Z_\odot$, которая при стандартном отношении массовых долей пыли и газа $Z_d/Z = 0,2$ приводит к сравнимой оценке космологической пыли, $\Omega_d = 1,6 \times 10^{-5}$, хотя и большей на полпорядка. Это расхождение оценок Ω_d отражает неопределённость оценок металличности во Вселенной, основанных преимущественно на измерениях абсорбционных линий квазаров и оптических послесвечений гамма-всплесков.

На основе рентгеновских и радиоданных можно сделать вывод о том, что наша Галактика может иметь в своём протяжённом гало значительное количество барионов. При этом требуется, чтобы распределение гало тёмной материи, в отличие от предсказываемого моделью NFW [266] распределения с каспом, имело протяжённый, достаточно плоский профиль плотности с большим центральным несингулярным ядром [240, 267].

Оценки массы пыли во Вселенной [268] превышают массу пыли, наблюдаемую в дисках галактик [23]. Это означает, что большая часть пыли находится за пределами галактик (например, в окологалактических коронах) или в МГС.

Что касается галактических корон, то в последние пять лет ряд исследовательских групп начал наблюдения абсорбционных линий от многозарядных ионов в пределах нескольких вириальных радиусов вокруг спиральных галактик в сравнительно близкой Вселенной: на красных смещениях $z \leq 0,3$. Наблюдения показывают наличие большого количества тяжёлых элементов

(кислорода, углерода, азота), иногда сравнимого с их массой в межзвёздных дисках. Логично предположить, что наряду с тяжёлыми элементами в газовой фазе в таких гало присутствует пыль в соотношении, близком к галактическому, т.е. около 30 % по массе. Однако такое предположение может быть справедливым только при условии, что в процессе транспорта тяжёлых элементов и пыли из газовых дисков в гало пыль не разрушается. Современные теоретические оценки противоречивы — они основаны главным образом на наблюдениях абсорбции в линиях ионов тяжёлых элементов [269, 270] и поэтому содержат неопределённость в доле поверхности картинной плоскости, занятой поглощающими или рассеивающими конденсациями газа, что всегда приводит к занижению оценки. Таким образом, убедительный ответ на вопрос о количестве пыли в протяжённых коронах вокруг галактик может быть получен только в результате наблюдений холодной пыли в далёкой ИК-области.

Существование таких протяжённых газовых корон связано с активностью звёздных населений галактик и главным образом со вспышками ЗО в галактических ядрах. Уже в течение более чем 20 лет известно явление, называемое "галактическим ветром", — мощные крупномасштабные истечения газа из центральных областей галактик, наблюдаемые практически во всех диапазонах: если в начале исследования галактических ветров это были наблюдения $H\alpha$ -эмиссии и в некоторых линиях тяжёлых элементов, то в последние годы появились многочисленные наблюдения в рентгеновском диапазоне, а сравнительно недавно — в молекулярных линиях. Ближайшее из известных газовых истечений генетически связано с ядром Галактики, демонстрирующим высокую активность ЗО, приведшую к формированию так называемого пузыря Ферми в центре [271].

5.4. Звездообразование в условиях низкой плотности

Несмотря на исследования процесса ЗО в течение длительного времени и существенный прогресс, достигнутый в последние годы в объяснении этого процесса, благодаря главным образом ИК-наблюдениям, продолжают появляться факты, противоречащие общей картине. К этим фактам относится обнаружение ЗО в таких условиях, в которых, казалось бы, оно происходить не

должно. Примером являются галактики с низкой поверхностной яркостью (Low Surface Brightness — LSB), многие из которых локализованы в скоплениях галактик, в частности в Virgo и Fornax [272]. Это класс "анемичных" галактик, которые отличаются от прочих поверхностной яркостью, меньшей яркости ночного неба по крайней мере на одну звёздную величину (mag): 23–25 mag на 1 угл. $с^2$. Это является следствием чрезвычайно низкой эффективности ЗО, малого отношения светимости к массе, отсутствия сверхновых. Число LSB-галактик — четыре на 1 угл. град² — существенно (на три порядка) меньше числа нормальных галактик, однако необходимо учитывать возможную наблюдательную селекцию.

Другим неожиданным результатом в этой области оказалось недавнее обнаружение ещё менее ярких объектов (с поверхностной яркостью 24–26 mag на 1 угл. $с^2$) — чрезвычайно диффузных анемичных галактик с размером, близким к размеру Галактики, в центральной области скопления Coma [273, 274].

Физика LSB-галактик чрезвычайно интересна как с точки зрения их происхождения (в процессе иерархического сгущивания), так и с точки зрения особенностей ЗО в условиях столь малой плотности барионов, которая имеет место в таких галактиках. Однако из-за низкой поверхностной яркости LSB-галактик определение характеристик их звёздного населения чрезвычайно затруднено. Одна из наиболее экстремальных галактик этого класса — галактика Malin-1 (рис. 15) с поверхностной яркостью ≥ 24 mag на 1 угл. $с^2$ и радиусом межзвёздного HI-диска и, возможно, звёздного диска ~ 100 кпк. Динамическая масса Malin-1 достаточно велика — порядка $10^{12} M_{\odot}$, что может объяснять устойчивость подобных галактик в плотном окружении скопления, но тем загадочнее кажется отсутствие процесса ЗО.

Слабость оптического свечения звёздного населения галактик с низкой поверхностной яркостью затрудняет их наблюдательное исследование. В таких условиях ИК-наблюдения имели бы фундаментальную значимость. Были проведены наблюдения в ближнем ИК-диапазоне телескопом "Спитцер" [275], но в галактике Malin-1 ИК-излучения обнаружено не было, а в галактике UGC 6614 было детектировано несколько пятен на длинах волн 8, 24 и 160 мкм, некоторые области эмиссии на длинах волн

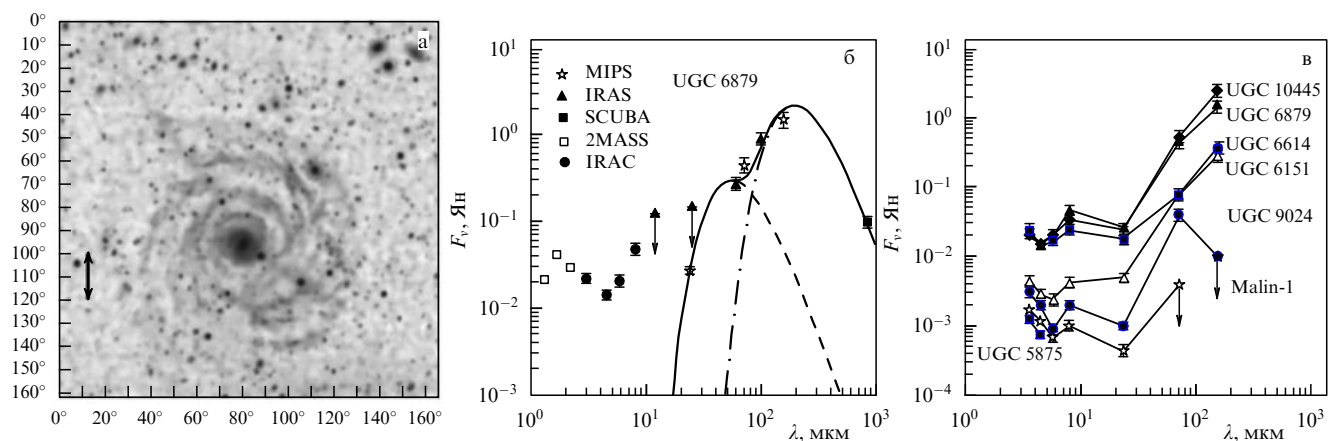


Рис. 15. (а) Изображение галактики низкой поверхностной яркости Malin-1. Масштабный отрезок в левой части рисунка соответствует удвоенному размеру Галактики [277]. Спектр ИК-эмиссии пыли: (б) в нормальной галактике UGC 6879, где видна эмиссия холодной пыли, (в) для галактик с низкой поверхностной яркостью, которые не показывают эмиссии холодной пыли на уровне чувствительности инструментов 2MASS, SCUBA, Spitzer [275].

8 и 24 мкм были пространственно близки к пятнам, наблюдаемым в линии H_α от областей слабого ЗО. Помимо того, на интерферометре BIMA (Berkeley Illinois Maryland Association) и телескопе IRAM в миллиметровом диапазоне были выполнены наблюдения нескольких LSB-галактик [276]. В двух из них, в том числе в Malin-1, обнаружена эмиссия CO (1 \rightarrow 0) в диске и центральной области и континуум с плоским спектром также в центральной области. Следов пыли найти не удалось. Отсутствие сигнала в далёкой ИК-области связано, по-видимому, с недостаточной чувствительностью по потоку телескопа IRAM (~ 1 мЯн). Учитывая, что звёздное население центральных областей Malin-1 является более старым, чем периферийные спиральные рукава [277], можно предположить, что в рукавах присутствуют молекулярный газ и пыль, которые и обеспечивают вялотекущее ЗО. Это может рассматриваться как косвенное указание на наличие пыли в Malin-1.

В последние годы появились другие свидетельства возможности ЗО в областях с низкой плотностью газа. Экстремальным примером могут служить области ЗО в межгалактическом пространстве. По-видимому, впервые на такую возможность обратили внимание Караченцев с соавторами [278, 279], обнаружившие области слабого ЗО на периферии спутников галактики M31 и в межгалактическом пространстве между M81 и NGC 2403. Недавно были опубликованы данные о сравнительно молодом (возрастом около 100 млн лет) звёздном населении в Магеллановом потоке [280]. Впоследствии там же в области, близкой к обнаруженной группе молодых звёзд, был детектирован молекулярный газ (по эмиссии в линиях HCO^+ и очень слабой эмиссии CO), хотя плотность газа в указанной области, по-видимому, чрезвычайно мала, о чём свидетельствует очень низкая лучевая концентрация водорода: $N(\text{H}) < 10^{20} \text{ см}^{-2}$ [281]. Похожие результаты получены для окологалактического облака HI, принадлежащего популяции высокоскоростных облаков, падающих на Галактику: лучевая концентрация атомарного водорода здесь также невелика: $N(\text{H}) < 5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$, а объёмная, по-видимому, близка к $n \sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ [282]. Учитывая предельно низкую поверхностную яркость таких областей, логично предположить, что их количество велико и они могут представлять собой отдельный класс внегалактических объектов с анемичным ЗО.

Существует по меньшей мере две причины, по которым эти области низкой плотности, содержащие в себе следы ЗО, представляют фундаментальный интерес для физики галактик и космологии: во-первых, они указывают на то, что общепринятый критерий Тоомре начала ЗО по достижении определённого критического значения поверхностной плотности не является универсальным, а процесс рождения звёзд определяется локальными эффектами, и, во-вторых, обнаруженные недавно предельно слабые карликовые галактики (Ultra Faint Dwarf — UFD) [283] характеризуются чрезвычайно низкими светимостями и плотностью барионов, поэтому обнаруженное внегалактическое ЗО может относиться, в частности, и к таким предельно слабым карликовым галактикам. Очевидно, что если UFD-галактики являются фрагментами иерархического процесса формирования галактик, то их исследование становится необходимым.

Галактики с низкой поверхностной яркостью в оптическом диапазоне могут, тем не менее, иметь достаточно

высокие светимости в дальней инфракрасной и миллиметровой областях. Ввиду того что такие галактики демонстрируют экстремальные свойства с точки зрения как предельно низкой поверхностной яркости и скорости ЗО, так и своих гигантских размеров и, по-видимому, большой доли в них тёмной материи, их наблюдения в СММ-области могут принести неожиданные результаты.

Ранее уже делались попытки проведения наблюдений галактик с низкой поверхностной яркостью в ИК-диапазоне на телескопах "Спитцер" и SCUBA [284]. Из пяти исследованных галактик четыре показали слабую (на полтора-два порядка меньшую, чем у нормальных галактик) эмиссию в ближней ИК-области (3,6, 4,5, 8, 24 мкм), две (UGC 6151 и UGC 9024) продемонстрировали эмиссию на длинах волн 70 и 160 мкм. В отличие от них, нормальная галактика UGC 6879 показала эмиссию во всей ИК-области³⁴, в том числе и на длине волны 850 мкм с потоком, соответствующим температуре пыли $T = 15$ К. Кроме того, в UGC 6879 имеется более горячий пылевой компонент ($T = 50$ К). При этом полная масса пыли ($\sim 3 \times 10^7 M_\odot$) довольно велика, если учесть, что масса атомарного водорода в этой галактике $M(\text{HI}) \sim 10^9 M_\odot$, т.е. концентрация пыли в ней в четыре раза больше, чем в нашей. По-видимому, отсутствие эмиссии холодной пыли в других галактиках связано с тем обстоятельством, что большая часть пыли является распределённой диффузно по диску большого радиуса и находится в слабом поле излучения и поэтому не достигает предела чувствительности SCUBA.

Более того, недавно было показано, что в LSB-галактиках радиальное распределение металлов (а возможно, и пыли) может быть инвертированным, т.е. иметь положительный градиент с большей массовой долей металлов на периферии галактики [286]. В пользу такого предположения могут свидетельствовать наблюдения эмиссии холодной пыли в галактиках UGC 6151 и UGC 9024 преимущественно в периферийных областях. Этот результат согласуется с предположением о том, что большая часть холодной пыли находится в областях с низкой плотностью излучения и поэтому требует более высокочувствительных наблюдений.

Помимо того, наблюдения пыли в галактиках с низкой поверхностной яркостью имели бы важное значение для объяснения процесса циркуляции пыли во Вселенной, т.е. баланса массы космической пыли в процессах её производства в звёздных источниках или МЗС и разрушения сильными ударными волнами от сверхновых.

Как было отмечено, все попытки свести воедино разнонаправленные процессы производства и разрушения пыли в нашей и других галактиках встречаются с большими трудностями. Так, считается общепринятым, что пыль производится звёздами ранних спектральных классов и сверхновыми, а разрушается ударными волнами от сверхновых в МЗС. Вместе с тем тщательный подсчёт производства пыли в галактиках всё ещё не даёт убедительных наблюдательных подтверждений тому, что полная скорость разрушения пыли может быть

³⁴ Галактика UGC 6879 первоначально была классифицирована как галактика с низкой поверхностной яркостью, однако формально она таковой не является из-за высокой поверхностной яркости центральных областей [285]. Тем не менее UGC 6879 приведена в [284] в качестве примера.

компенсирована её производством всеми возможными источниками. Однако прямые оценки для Большого и Малого Магеллановых Облаков — лабораторий по "измерению" баланса массы пыли в МЗС, основанному на ИК-наблюдениях, — показали только, что механизмы производства пыли в них явно слабее, чем требуется, чтобы компенсировать её достаточно быстрое разрушение [287].

Таким образом, всё более убедительными представляются аргументы в пользу того, что сверхновые, прототипами которых являются массивные звёзды (в стандартной классификации это сверхновые с коллапсирующим ядром (core-collapse)), могут вносить доминирующий вклад в производство пыли [288]. Однако с наблюдательной точки зрения одна сверхновая может дать не более $0,01 M_{\odot}$ пыли, что является явно недостаточным и предполагает слишком длинную шкалу воспроизводства пыли в Галактике: $\tau_{d,g} \sim 5$ млрд лет — по крайней мере на порядок большую характерного времени разрушения пыли. Приемлемые способы преодоления этой трудности в настоящее время отсутствуют. Проблема, однако, может заключаться в том, что наблюдения скорости производства пыли позволяют выделять только достаточно горячую (и поэтому яркую) пыль вокруг звёзд асимптотической ветви гигантов или расширяющихся оболочек сверхновых, так что остывшая пыль на более далёких расстояниях от центральной звезды остаётся незамеченной. Если это так, то очевидным решающим экспериментом в подсчёте баланса массы произведённой пыли может стать наблюдение холодной пыли в окрестности её возможных источников.

Не исключено, впрочем, что существенную роль в подсчёте баланса массы пыли в межзвёздной и межгалактической средах может играть также то обстоятельство, что механизмы разрушения и производства пыли распределены крайне неоднородно. Известно, что значительную роль в увеличении массы пыли может играть конденсация тяжёлых элементов на пылинках в плотных молекулярных облаках [289]. В этих условиях очевидно, что области, в которых пыль преимущественно разрушается ударными волнами, должны проявляться ярче в ближней и средней ИК-частях спектра, в то время как эмиссия из областей активного роста пылевых частиц будет смещена главным образом в далёкий ИК-диапазон. Это означает необходимость одновременных комбинированных наблюдений эмиссии в среднем и далёком ИК-диапазонах в галактиках с низкой поверхностной яркостью, где источники пыли и области её разрушения пространственно разнесены и поэтому легко идентифицируемы.

6. Пыль и газ в скоплениях галактик и межгалактической среде

6.1. Пыль и газ в группах галактик

Измерения экстинкции в оптической области, ближней и средней ИК-областях в некоторых галактиках Местной группы демонстрируют определённые особенности по сравнению с измерениями экстинкции в Галактике. Эти особенности могут объясняться дефицитом (или избытком) мелкой пыли в галактиках, т.е. изменением распределения частиц пыли по размерам. Последнее обстоятельство затрудняет в целом измерение массы пыли во

Вселенной. Более того, возможное измерение пространственного распределения пыли в Местной группе позволит решить некоторые проблемы формирования галактик согласно сценарию эволюции Вселенной в рамках стандартной космологической модели Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter), а именно проблемы "потерянных спутников", выделенной плоскости движения наиболее ярких галактик-спутников, избегания карликовыми галактиками крупных морфологических структур и др.

Измерения экстинкции пыли в группах галактик большой выборки каталога SDSS [290] показали наличие значительного количества пыли как в маломассивных группах (с массовой долей пыли около 50 % от её галактического значения), так и в массивных скоплениях (с относительной массой пыли около 3 % от галактической). Эти наблюдения показывают, что пыль разрушается в горячем газе скоплений, однако как её большое количество в крупных скоплениях, так и подобие её оптических свойств свойствам галактической пыли требуют, по-видимому, уточнения механизмов и динамического сценария её разрушения в процессе выноса из галактик на периферию. Современные возможности не позволяют сделать сколько-нибудь уверенного вывода о количестве пыли в гало удалённых галактик и группах галактик. Часть проблемы состоит в том, чтобы разделить вклады центральной горячей пыли и холодной пыли на периферии галактик, в том числе в гало. В качестве возможного решения данной проблемы предлагается комплексное исследование эмиссии в далёком ИК-диапазоне и экстинкции от далёких квазаров, однако осуществить это пока не удалось [291].

6.2. Пыль и газ в скоплениях галактик

Наблюдения экстинкции скоплений галактик по данным SDSS показывают наличие пыли в скоплениях на расстояниях вплоть до $\sim 10 R_{200} \sim 10$ Мпк от их центров [292], хотя отличные от нуля значения коэффициента покраснения $E(g-i) \lesssim 0,003$ простираются на значительно большие расстояния. (Здесь g и i характеризуют зелёную (4679 Å) и ближнюю инфракрасную (7439 Å) фотометрические полосы.) В самом деле, галактики поля показывают неубывающую экстинкцию на значительно больших расстояниях, вплоть до 10 Мпк (что в единицах вириального радиуса R_{200} для типичной галактики составляет $\sim 100 R_{200}$) [270]. Таким образом, несмотря на то что горячий газ в скоплениях галактик приводит к быстрому разрушению пыли, её определённая часть, тем не менее, оказывается экранированной, что ограничивает истечение пыли далеко за пределы скоплений. Поэтому принципиально важным является вопрос о том, откуда попадает пыль в МГС. Ответ на него существует для выяснения процессов обмена веществом между галактиками и МГС.

В процессе выброса металлов и пыли из галактик пыль, будучи связанной с окружающим их газовым облаком, разрушается горячим газом скопления через некоторое характерное время, заполняя при этом некоторый объём вокруг галактик. Оценки показывают, что в зависимости от параметров фрагментов, выбрасываемых в режиме активного (или вспышки) ЗО, пыль может переноситься на расстояния вплоть до 100 кпк. Это означает, что содержащая пыль облака могут быть распределены почти равномерно по всему объёму скопления. Однако, ввиду того что при таких условиях пыль

всё ещё сосредоточена в конденсациях размером не более 1–2 кпк, её попадание на луч зрения маловероятно и вклад пыли в экстинкцию мал, как это и наблюдается в скоплениях. С другой стороны, если выброшенные галактиками газовые фрагменты с пылью заполняют достаточно равномерно всё скопление, то в тепловой эмиссии пыли они могут проявляться по всей его поверхности в картинной плоскости. Более того, поскольку, согласно такому сценарию, пыль погружена в холодные облака, её температура будет определяться только диффузным УФ-излучением внегалактического фона и не превысит величины 10 К. Само по себе это обстоятельство может объяснять, почему попытки обнаружения эмиссии пыли от скоплений телескопом "Спитцер" оказались неудачными.

Проведённые до сих пор наблюдения пока не подтверждают наличия пыли собственно в горячем газе скоплений. Например, детальный анализ экстинкции A_V для большой выборки скоплений из SDSS и IRAS [293] показал, с одной стороны, наличие экстинкции на уровне $\sim 3 \times 10^{-4}$ mag, а с другой — эмиссию на длине волны 100 мкм и средний поток, отнесённый к одному скоплению, $\approx 0,2$ Ян. Однако радиальный профиль экстинкции соответствует скорее радиальному профилю распределения яркости галактик³⁵, поэтому полная эмиссия в ИК-диапазоне может быть отнесена к эмиссии пыли от входящих в скопление спиральных галактик, и тогда вклад от собственно диффузно распределённой (внегалактической) пыли оказывается пренебрежимо малым.

Существенным, однако, остаётся следующее обстоятельство: средний поток на длине волны 100 мкм довольно быстро возрастает с увеличением красного смещения: $L \propto (1+z)^{4,7}$ (рис. 16), указывая на резко возрастающую скорость ЗО, производства тяжёлых элементов и пыли. В таких условиях вполне естественно ожидать, что в эпохи $z \lesssim 1$ пыль выметалась из галактик в горячий газ и её остатки в малых количествах могут присутствовать в газе скоплений. Более того, поскольку галактики выбрасывают в окружающую среду пыль вместе с газом (в виде фрагментов плотных расширяющихся газовых оболочек), пыль в течение некоторого времени остаётся

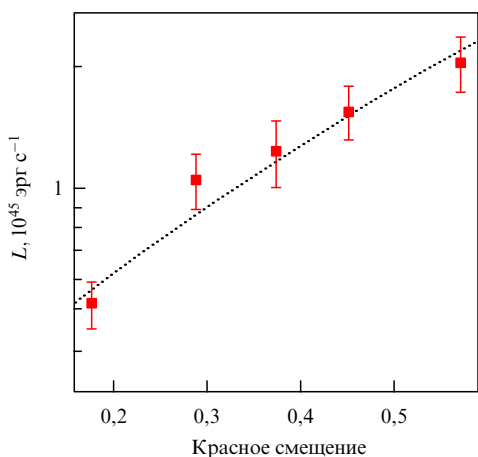


Рис. 16. Усреднённая по выборке IRAS скоплений галактик тепловая эмиссия на длине волны 100 мкм [293].

³⁵ Хотя есть некоторые выходящие за 2σ отклонения в центральных частях скоплений.

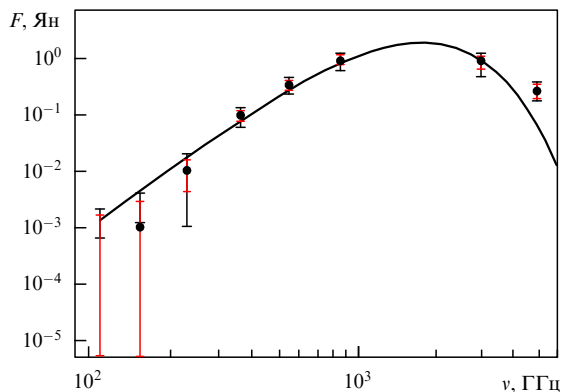


Рис. 17. (В цвете онлайн.) Усреднённый по выборке из 645 скоплений галактик тепловой спектр пыли; чёрные и оранжевые отрезки ошибок соответствуют разным методам их оценки (см. детали в [294]).

частично экранированной окружающим газом и имеет низкую температуру с пиком эмиссии на длине волны более 100 мкм. Результат, описанный в [293], получил развитие в программе телескопа "Планк".

Опубликованные недавно данные глобального обзора скоплений галактик телескопом "Планк" в интервале частот $353 \leq \nu \leq 5000$ ГГц [294] показали значительное количество пыли в выборке из 645 скоплений со средней по выборке температурой пыли $T_d = (19,2 \pm 2,4)$ К (рис. 17) и средним отношением массы пыли к массе газа $\zeta \sim 2 \times 10^{-4}$. Интересным и, возможно, существенным обстоятельством является уменьшение массовой доли пыли, $\zeta \sim 10^{-4}$, в скоплениях на меньших красных смещениях, $z < 0,25$, по сравнению с массовой концентрацией пыли $\zeta \sim 4 \times 10^{-4}$ в более ранних скоплениях, $z > 0,25$. Впрочем, учитывая ограниченность выборки, нельзя исключить того, что это является следствием наблюдательной селекции.

Интересным здесь является следующее обстоятельство: вследствие низкого углового разрешения телескопа "Планк" ($\Delta\theta = 14' - 33'$ в низкочастотном канале, 30–70 ГГц, и $\Delta\theta = 5' - 10'$ в высокочастотном канале, 100–857 ГГц) в обзоре скоплений галактик трудно отделить излучение пыли, сосредоточенной в галактиках, от излучения пыли вне галактик. По этой причине судить о природе пыли можно лишь на основе её массовой концентрации и в какой-то мере температуры. Если говорить о массовой концентрации, то данные обзора свидетельствуют скорее в пользу того, что пыль большей частью распределена вне галактик. Впрочем, следует иметь в виду, что доля эллиптических и сфероидальных галактик в скоплениях больше, чем среди галактик поля. В таком случае обнаруженная в скоплениях пыль с массовой концентрацией $\zeta \sim 10^{-4}$ вполне может быть связана не с горячим газом собственно скоплений, а с более плотным горячим газом входящих в них эллиптических галактик, столь же неблагоприятным для пыли. Здесь следует также учесть, что значительная часть холодной (и, возможно, крупной) пыли может быть не обнаружена наблюдениями и завал в усреднённом спектре в области низких частот, $\nu < 200$ ГГц, может свидетельствовать именно об этом. Кроме того, добавляется то обстоятельство, что при усреднении по большой выборке вклад эмиссии холодной пыли может оказаться ничтожно малым по сравнению со вкладом эмиссии

более горячей пыли, присутствующей в галактиках или внегалактических областях.

7. Газ и пыль в галактических ветрах

Интерес к областям со вспышками ЗО в центральных областях галактик не угасает уже в течение более четверти века. Одно из мощных динамических явлений, связанных с этой активностью, — галактический ветер, представляющий собой, как сейчас становится понятным, фактор глобальной эволюции барионной части Вселенной.

В последние несколько лет опубликованы данные о молекулярных линиях из ядерных областей галактик со вспышками ЗО и галактическим ветром (например, M82), обнаружены области галактического ветра, включающие в себя молекулярные потоки в линиях CO, HCN, HCO⁺ [295, 296]. Морфология и кинематика этих течений существенно отличаются от привычных морфологии и кинематики течений ионизованного газа, и в целом проблема молекулярных ветров пока далека от своего решения. Однако, учитывая именно то обстоятельство, что в галактических ядрах — источниках энергии галактических ветров — проявляют себя в эмиссии компоненты, представляющие различные состояния вещества: горячей газ в рентгеновской области, атомарный и молекулярный газ, H₂, тепловой и нетепловой континуум, можно заключить, что состояние межзвёздного газа в этой области является чрезвычайно сложным и его выяснение может стать первым шагом к построению физической картины всего того, что там происходит. С этой точки зрения возможности "Миллиметра" в наблюдении континуума и в спектроскопии газа могут играть очень важную роль.

Самым близким объектом исследования с этой точки зрения может являться центральная часть Галактики размером несколько сотен парсек: здесь сосредоточена большая масса молекулярного газа — в целом очень сложный многофазный газовый конгломерат, проявляющий себя в линиях CO, NH₃, 8,28 мкм, 21,3 мкм, 24 мкм, 21 см, в синхротронной эмиссии [297]. Морфология и кинематика этой области указывают на непрерывный процесс взаимопревращений различных фазовых состояний газа, что отражает сложный характер бурной динамики. На этом фоне характер протекающего там ЗО не ясен. Учитывая высокую плотность газа в этой области (о чём свидетельствует эмиссия в линиях CO, NH₃), можно ожидать наличия как горячей (наблюдаемой в ближней ИК-области), так и холодной тепловой эмиссии пыли, эмиссии в спектральных линиях тонкой структуры [CII] 370 и 610 мкм, [CII] 157,7 мкм, [OI] 62, 145 и 63,2 мкм — все они могут присутствовать ввиду широкого разброса температур и плотностей в этой области, а также бурной динамики с большой временной шкалой.

Измерения экстинкции в ближней ИК-области в направлении на центр (в пределах 4 кв. град. вокруг центра) нашей Галактики продемонстрировали, что, в отличие от принятых "классических" представлений об однопараметрическом законе экстинкции, определяемом постоянной $R_v = A_v/E(B-V)$, закон экстинкции в центральной области Галактики характеризуется, по-видимому, двумя степенями свободы [298].

Систематический анализ закона экстинкции в широком интервале от ближней ИК-области до дальней

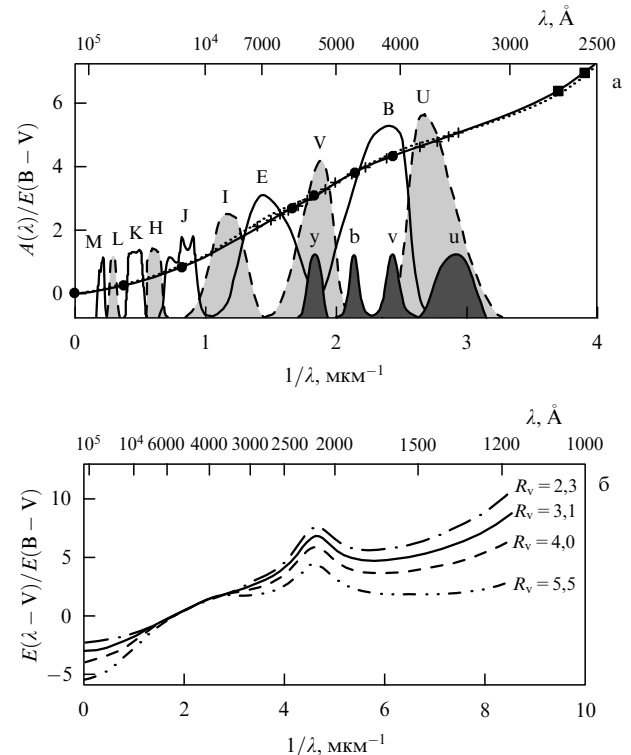


Рис. 18. Однопараметрический закон экстинкции. Жирная сплошная кривая соответствует "стандартному" галактическому значению $R_v = A_v/E(B-V) = 3,1$. (б) Кривые экстинкции для различных значений параметра R_v . Видна чувствительность к R_v в ИК-области [299]. Прописными буквами М, L, K и т.д. указаны фотометрические полосы в системе Джонсона, строчными буквами у, b и т.д. — фотометрические полосы Стрёмгена.

УФ-области одним из первых провёл Фитцпатрик [299] (рис. 18). Закон экстинкции определяется свойствами пыли, в том числе распределением её частиц по размерам, и может испытывать пространственные вариации. На рисунке 19а показан пример таких вариаций, измеренных обсерваторией IUE (International Ultraviolet Explorer) в различных направлениях в МЗС Галактики [300]. В [298] показано, что в направлении на галактический центр вариации экстинкции в ближней ИК-области $A_1/E(V-I)$ и коэффициентов покраснения $E(I-J)/E(V-I)$, $E(J-K_s)/E(V-I)$ независимо от значения R_v могут превышать 20 %, причём отношение показателей $\langle A_v/A_{K_s} \rangle = 13,44$ в оптической полосе и ближней ИК-полосе K_s ($\lambda = 2,149$ мкм) на 60 % превышает "стандартное" для МЗС значение. Более того, отсутствие корреляции между вариациями $A_1/E(V-I)$ и $E(J-K_s)/E(I-J)$ (см. рис. 19) может указывать на то, что закон экстинкции характеризуется по крайней мере двумя степенями свободы.

Обусловлено ли декларированное в [298] существование дополнительных степеней свободы, характеризующих частотную зависимость экстинкции, спектром размеров пылинок, их химическим составом и свойствами содержащих их облаков газа на луче зрения в том или другом исследуемом направлении, остаётся неясным. Вместе с тем недавно опубликованные результаты спектроскопического (со спектральным разрешением $R = \lambda/\Delta\lambda = 22500$) обзора APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) 150 000 звёзд толстого диска Галактики в комбинации с фотометрией Pan-STARRS1 (Panoramic Survey Telescope & Rapid Response

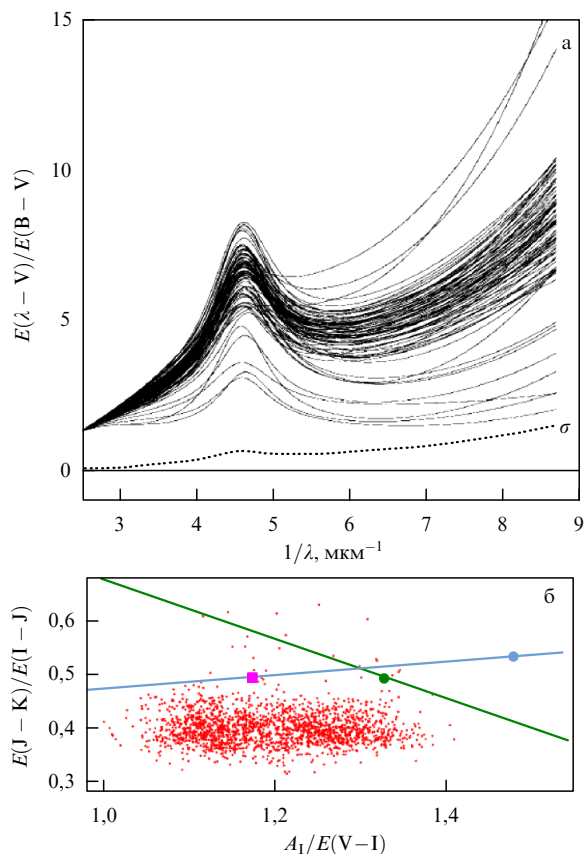


Рис. 19. (В цвете онлайн.) Пример вариаций закона экстинкции для 80 направлений в Галактике по измерениям на обсерватории IUE (International Ultraviolet Explorer). Пунктирная кривая в нижней части рисунка показывает стандартное отклонение $\sigma(R_v)$, нормированное на $\sigma(\lambda = 1500 \text{ \AA}) = 0,74$ [300]. (б) Плоскость $A_I/E(V-I) - E(J - K_s)/E(1 - J)$ по данным измерения экстинкции в ИК-обзоре на обсерватории Planck. "Облако" красных точек — данные третьего этапа Оптического эксперимента гравитационного линзирования (Optical Gravitational Lensing Experiment III) [301]. Зелёная и голубая линии — аппроксимации закона покраснения по [299] и [300] соответственно. Красный квадрат соответствует наблюдениям работы [300], зелёным кружком показаны данные работы [299], а голубым — работы [302].

System (Институт астрономии Гавайского университета)), 2MASS (Two Micron All-Sky Survey) и WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) показали, что все вариации экстинкции в оптической и ближней инфракрасной областях могут быть объяснены в рамках стандартной однопараметрической модели пыли с возможными значительными вариациями показателя $R_v = A_v/E(B-V)$ [303].

С этой точки зрения детальное исследование пространственных вариаций тепловой эмиссии пыли в окрестности центра Галактики 4 угл. кв. град. представляет чрезвычайный интерес для выяснения её физических свойств. Эта задача, помимо того, что она представляет общефизический интерес, важна в наблюдательной космологии, в частности, потому, что возможные вариации экстинкции могут оказывать сильное влияние на правильность оценки блеска удалённых космологических источников (таких, как сверхновые на $z > 1$) и интерпретацию происходящих в них процессов. В связи с этим необходимо отметить, что авторы [303] указывают на взаимосвязь между R_v и тепловым спектром пыли.

8. Пыль в ранних галактиках

Возникновение первых галактик относится к далёким эпохам эволюции Вселенной, когда её возраст составлял не более 3% от нынешнего, поэтому из-за красного смещения в настоящее время даже оптическое излучение от них попадает в ближнюю ИК-область, а всё ИК-излучение от областей ЗО будет видно в далёком ИК-диапазоне. Поэтому с целью исследования таких галактик представляет интерес проводить измерения интенсивности спектральных линий основных "охлаждателей" газа, а именно ионов [CII] (157,7 мкм), [NII] (122 мкм), атома [OI] (62 и 145 мкм), молекул CO, NH₃ и др. Вместе с измерениями теплового излучения пыли это позволит определить скорость ЗО в далёких галактиках и общее состояние МЗС в них.

Более детальную информацию можно получить, наблюдая вращательные переходы молекулярного водорода в линиях 28,22, 17,04, 12,28, 9,67 мкм и т.д., которые на больших красных смещениях попадают в область дальнего ИК-диапазона. Эти линии охлаждают газ с очень низкой металличностью, который должен был существовать в первых галактиках. Наблюдения этих линий в сравнительно близких (на расстояниях около 1000 Мпк) галактиках с мощным ЗО телескопом Spitzer [304] позволили измерить степень возбуждения и массу водорода, а также установить роль турбулентности и ударных волн при нагреве газа.

Главным требованием при наблюдениях ранних галактик является высокая чувствительность. Лишь недавно с помощью наиболее чувствительной в СММ-области наземной обсерватории ALMA удалось зарегистрировать излучение линии [CII] от галактик с красным смещением $z \sim 7$ [305, 306], причём сами галактики были обнаружены по их мощному УФ-излучению. Ряд более ранних попыток оказался неудачным [307, 308]. По-видимому, можно находить далёкие галактики на фотометрических изображениях по их СММ-"цвету", как это было продемонстрировано на телескопе "Гершель" [309]. Так, с помощью критерия, что поток на длине волны 500 мкм больше, чем на длине волны 350 мкм, а поток на длине волны 350 мкм больше, чем на длине волны 250 мкм, были найдены 38 кандидатов в галактики с большими красными смещениями в обзоре HerMES (Herschel Multi-tiered Extragalactic Survey). Последующие оптические наблюдения показали, что 80% этих кандидатов имеют красные смещения $z > 4$.

9. Заключение

Два обстоятельства делают исследования космической плазмы в далёкой ИК-области и СММ-области спектра исключительно важными и интересными:

- массо- и энергообмен в плазме, в том числе между её газовым и пылевым компонентами, проявляется как в спектральных линиях тонкой структуры частиц плазмы, так и в тепловой эмиссии пыли. Очевидно, что обменные процессы в низкотемпературной космической плазме могут сопровождаться эмиссией только длинноволновой части электромагнитного излучения. Поэтому именно далёкая инфракрасная и субмиллиметровая части спектра позволяют "визуализировать" определяющие низкоэнергетичные физические процессы, которые не проявляют себя в других спектральных областях. Ввиду

того что космическая плазма подвергается воздействию всех источников энергии во Вселенной, далёкий инфракрасный и субмиллиметровый диапазоны открывают уникальные возможности для диагностики ближней Вселенной;

- красное смещение длин волн вследствие расширения Вселенной даёт возможность диагностировать бурные процессы энерговыделения, присущие начальным этапам звёздного нуклеосинтеза в далёкой Вселенной, с помощью спектральных линий атомов и ионов с частотами в ближней и средней ИК-области и горячей ($T_d > 40$ К) пыли.

Упомянутые кратко в настоящем обзоре недавние результаты обсерваторий "Гершель" и "Планк" и последние результаты обсерватории ALMA ярко демонстрируют эти возможности. Безусловно, важным представляется и исследование пылевой составляющей космической плазмы как с точки зрения физических процессов, определяющих производство и разрушение пыли, так и с точки зрения того, что пыль определяет прозрачность МЗС нашей Галактики и тем самым возможность исследования удалённых объектов во Вселенной. Одна из фундаментальных задач, для решения которой принципиально важна детальная информация о свойствах пыли и её распределении в Галактике, — исследование поляризации реликтового излучения. Однако это совсем другая история.

Благодарности. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 15-02-08293 и 16-02-01043), Программой фундаментальных исследований Президиума РАН П-7 (подпрограмма "Переходные и взрывные процессы в астрофизике") и грантом Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ НШ 6595.2016.2.

Список литературы

- Jansky K G *Proc. Inst. Radio Eng.* **20** 1920 (1932)
- Jansky K G *Nature* **132** 66 (1933)
- Шкловский И С *Проблемы современной астрофизики* (М.: Наука, 1988)
- Penzias A A, Burrus C A *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **11** 51 (1973)
- Ginzburg V L *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **28** 1 (1990)
- Reich W, Wielebinski R *Astron. Nachrich.* **323** 530 (2002)
- Silk J *Infinite Cosmos. Questions from the Frontiers of Cosmology* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2008)
- Лукаш В Н, Михеева Е В *Физическая космология* (М.: Физматлит, 2010); Лукаш В Н, Михеева Е В *Физическая космология* (М.: Физматлит, 2012)
- Phillips T F et al., in *Millimetre and Submillimetre Astronomy. Lectures Presented at a Summer School, Stirling, Scotland, June 21–27, 1987* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 147, Eds R D Wolstencroft, W B Burton) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1988) p. 1
- Саломонович А Е *УФН* **99** 417 (1969); Salomonovich A E *Sov. Phys. Usp.* **12** 731 (1970)
- Кисляков А Г *УФН* **101** 607 (1970); Kislyakov A G *Sov. Phys. Usp.* **13** 495 (1971)
- Torgashin M Yu et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 379 (2007)
- Koshelets V P et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **486** 012026 (2014)
- Karasik B S, McKitterick C B, Prober D E *J. Low Temp. Phys.* **176** 249 (2014)
- Nomoto K, Kobayashi C, Tominaga N *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **51** 457 (2013)
- Karlsson T, Bromm V, Bland-Hawthorn J *Rev. Mod. Phys.* **85** 809 (2013)
- Pagel B E J *Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009)
- Krügel E *The Physics of Interstellar Dust* (Bristol: Institute of Physics Publ., 2003)
- Songaila A *Astrophys. J.* **561** L153 (2001)
- Simcoe R A et al. *Astrophys. J.* **637** 648 (2006)
- Schaye J, Carswell R F, Kim T-S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **379** 1169 (2007)
- Voshchinnikov N V, Henning Th *Astron. Astrophys.* **517** A45 (2010)
- Ménard B, Fukugita M *Astrophys. J.* **754** 116 (2012)
- Richards P L J *J. Appl. Phys.* **76** 1 (1994)
- Hoffmann W F et al. *Astron. J.* **72** 804 (1967)
- Hoffmann W F et al. *Science* **157** 187 (1967)
- Shivanandan K, Houck J R, Harwit M O *Phys. Rev. Lett.* **21** 1460 (1968)
- Дорошкевич А Г, Новиков И Д *ДАН СССР* **154** 745 (1964); Doroshkevich A G, Novikov I D *Sov. Phys. Dokl.* **9** 111 (1964)
- Gaitskell J N, Gear A E *Icarus* **5** 237 (1966)
- Федосеев Л И, Лубяко Л В, Кукин Л М *Астрон. журн.* **44** 1191 (1967); Fedoseev L I, Lubyako L V, Kukin L M *Sov. Astron.* **11** 953 (1968)
- Афонченков Н Г и др. *Астрон. журн.* **53** 178 (1976); Afonchenkov N G et al. *Sov. Astron.* **20** 95 (1976)
- Cheung A C et al. *Phys. Rev. Lett.* **21** 1701 (1968)
- Kellermann K I, Pauliny-Toth I I K *Astrophys. J.* **152** 639 (1968)
- Васильченко Н В и др. *Астрон. журн.* **44** 897 (1967); Vasil'chenko N V et al. *Sov. Astron.* **11** 720 (1968)
- Gebbie N A et al. *Astrophys. J.* **154** 405 (1968)
- Дорошкевич А Г, Зельдович Я Б, Станяев Р А *Астрон. журн.* **55** 913 (1978); Doroshkevich A G, Zel'dovich Ya B, Syunyaev R A *Sov. Astron.* **22** 523 (1978)
- Partridge R B *Rep. Prog. Phys.* **51** 647 (1988)
- Boggess N W et al. *Astrophys. J.* **397** 420 (1992)
- Bennett C L et al. *Astrophys. J.* **396** L7 (1992)
- Smoot G F et al. *Astrophys. J.* **396** L1 (1992)
- Струков И А и др. *Письма в Астрон. журн.* **18** 387 (1992); Strukov I A et al. *Sov. Astron. Lett.* **18** 153 (1992)
- Mather J C et al. *Adv. Space Res.* **11** 181 (1991)
- Silverberg R F et al., COBE Preprint 93-10E (1993)
- Hauser M G, in *Extragalactic Background Radiation. A Meeting in honor of Riccardo Giacconi. Proc. of the Extragalactic Background Radiation Meeting, Baltimore, 1993 May 18–20* (Space Telescope Science Inst. Symp. Ser., Vol. 7, Eds D Calzetti, M Livio, P Madau) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995) p. 135
- Hauser M G, in *The Extragalactic Infrared Background and Its Cosmological Implications. IAU Symp. 204. Proc. of the 24th General Assembly of the IAU, Manchester, United Kingdom, 15–18 August 2000* (Eds M Harwit, M G Hauser) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2001) p. 101
- Hauser M G et al. *Astrophys. J.* **508** 25 (1998)
- Fall S M, Charlot S, Pei Y C *Astrophys. J.* **464** L43 (1996)
- Fixsen D J et al. *Astrophys. J.* **490** 482 (1997)
- Spitzer L (Jr.) *Astron. Quart.* **7** 131 (1990)
- Werner M W et al. *Astrophys. J. Suppl.* **154** 1 (2004)
- Fazio G G et al. *Astrophys. J. Suppl.* **154** 10 (2004)
- Kennicutt R C (Jr.) et al. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **115** 928 (2003)
- Шоломицкий Г Б и др., в сб. *Научное космическое приборостроение. Материалы семинара, 27 сентября–1 октября 1982 г., Одесса* Вып. 1 (Отв. ред. В М Балебанов) (М.: Металлургия, 1983) с. 10
- Шоломицкий Г Б и др. *Астрон. журн.* **63** 867 (1986); Sholomitskii G B et al. *Sov. Astron.* **30** 514 (1986)
- Pilbratt G L *Proc. SPIE* **7010** 701002 (2008)
- Vaccari M, arXiv:1605.01215
- Madau P, Dickinson M *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **52** 415 (2014)
- Heckman T M, Best P N *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **52** 589 (2014)
- Grossi M et al. *Astron. Astrophys.* **518** L52 (2010)
- di Serego Alighieri S et al. *Astron. Astrophys.* **552** A8 (2013)
- Coppin K E K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **416** 680 (2011)
- Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **594** A13 (2016)
- Верходанов О В *УФН* **186** 3 (2016); Verkhodanov O V *Phys. Usp.* **59** 3 (2016)
- Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **581** A14 (2015)
- Adam R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **586** A135 (2016)
- Naylor D A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **315** 622 (2000)
- Holland W S et al. *Proc. SPIE* **3357** 305 (1998); astro-ph/9809121
- Seaquist E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **349** 1428 (2004)
- Vlahakis C, Dunne L, Eales S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **364** 1253 (2005)
- Sanders D B *Adv. Space Res.* **34** 535 (2004)
- Thomas H C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **351** 362 (2004)
- Ward-Thompson D et al. *Astrophys. J.* **537** L135 (2000)
- Crutcher R M et al. *Astrophys. J.* **600** 279 (2004)
- Ward-Thompson D et al., in *Star Formation at High Angular Resolution. Proc. of the 221st Symp. of the Intern. Astronomical Union, Sydney, Australia, 22–25 July 2003* (Eds M G Burton, R Jayawardhana, T L Bourke) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2004) p. 43
- Matthews B C, in *Astronomical Polarimetry: Current Status and Future Directions. Proc. of a Meeting, Waikoloa, Hawaii, USA, 15–19 March 2004* (Astronomical Society of the Pacific Conf., Vol. 343, Eds A Adamson et al.) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2005) p. 99
- Matthews B C et al. *Astrophys. J. Suppl.* **182** 143 (2009)

77. Franco G A P, Alves S O *Astrophys. J.* **807** 5 (2015)
78. Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **586** A136 (2016)
79. Holland W S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **430** 2513 (2013)
80. Bustos R et al. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126** 1126 (2014)
81. Wootten A, Thompson A R *Proc. IEEE* **97** 1463 (2009)
82. Herrera C N et al. *Astron. Astrophys.* **538** L9 (2012)
83. Ziurys L M, in *AAS Meeting* (228) 203.02 (2016)
84. Simpson J M et al. *Astrophys. J.* **807** 128 (2015)
85. Chen C-C et al. *Astrophys. J.* **820** 82 (2016)
86. Imanishi M, Nakanishi K, Izumi T *Astrophys. J.* **825** 44 (2016)
87. Strandet M L et al. *Astrophys. J.* **822** 80 (2016)
88. Casey C M, Narayanan D, Cooray A *Phys. Rep.* **541** 45 (2014)
89. Dunlop J S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **466** 861 (2017); arXiv:1606.00227
90. Sibthorpe B et al., in *Conditions and Impact of Star Formation. From Lab to Space. In memory of Charles H. Townes. The 6th Xermatt ISM-Symp., Zermatt, Switzerland, September 7–11, 2015* (EAS Publ. Ser., Vol. 75–76, Eds R Simon, R Schaaf, J Stutzki) (Les Ulis: EDP Sciences, 2016) p. 411
91. Кардашев Н С и др. *УФН* **184** 1319 (2014); Kardashev N S et al. *Phys. Usp.* **57** 1199 (2014)
92. Wild W et al. *Exp. Astron.* **23** 221 (2009)
93. Smirnov A V et al. *Proc. SPIE* **8442** 84424C (2012)
94. Bradford C M et al., arXiv:1505.05551
95. Kravtsov A V *Astrophys. J.* **764** L31 (2013)
96. Aalto S, in *Revolution in Astronomy with ALMA. The Third Year. Proc. of a Conf., Tokyo Intern. Forum, Tokyo, Japan 8–11 December 2014* (ASP Conf. Ser., Vol. 499, Eds D Iono et al.) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2015) p. 85
97. Salak D, Nakai N, Miyamoto Y, in *Revolution in Astronomy with ALMA. The Third Year. Proc. of a Conf., Tokyo Intern. Forum, Tokyo, Japan 8–11 December 2014* (ASP Conf. Ser., Vol. 499, Eds D Iono et al.) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2015) p. 155
98. Kennicutt R C (Jr.), Evans N J *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **50** 531 (2012)
99. Васильев Е О, Шекинов Ю А *Астрон. журн.* **93** 892 (2016); Vasiliev E O, Shchekinov Yu A *Astron. Rep.* **60** 924 (2016)
100. Lada C J, in *Star Forming Regions. Proc. of the 115th Symp. of the International Astronomical Union, Tokyo, Japan, November 11–15, 1985* (Eds M Peimbert, J Jugaku) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1987) p. 1
101. Lada C, in *The Origin of Stars and Planetary Systems* (NATO Science Series, Ser. C, Vol. 540, Eds C J Lada, N D Kylafis) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1999) p. 143
102. Van Doshoeck E F, Hogerheijde M R, in *The Origin of Stars and Planetary Systems* (NATO Science Series, Ser. C, Vol. 540, Eds C J Lada, N D Kylafis) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1999) p. 97
103. Seifried D et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **459** 1892 (2016)
104. Dunham M M et al. *Astrophys. J.* **823** 160 (2016); arXiv:1604.04027
105. Takakuwa S et al. *IAU General Assembly Meeting* (29) 2230558 (2015)
106. Men'shchikov A et al. *Astron. Astrophys.* **518** L103 (2010)
107. André Ph et al. *Astron. Astrophys.* **518** L102 (2010)
108. Könyves V et al. *Astron. Astrophys.* **518** L106 (2010)
109. Arzoumanian D et al. *Astron. Astrophys.* **529** L6 (2011)
110. Ibañez S M H, Sigalotti L Di G *Astrophys. Space Sci.* **95** 145 (1983)
111. Inutsuka S-I, Miyama S M *Astrophys. J.* **388** 392 (1992)
112. Kawachi T, Hanawa T *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **50** 577 (1998)
113. Hill T et al. *Astron. Astrophys.* **533** A94 (2011)
114. Roy A et al. *Astron. Astrophys.* **562** A138 (2014)
115. Tremblin P et al. *Astron. Astrophys.* **564** A106 (2014)
116. Дибай Е А, Каплан С А *Астрон. журн.* **41** 652 (1964); Dibai E A, Kaplan S A *Sov. Astron.* **8** 520 (1965)
117. Elmegreen B G, Lada C J *Astrophys. J.* **214** 725 (1977)
118. Gerola H, Seiden P E *Astrophys. J.* **223** 129 (1978)
119. Ефремов Ю Н *Письма в Астрон. журн.* **5** 21 (1979); Efremov Yu N *Sov. Astron. Lett.* **5** 12 (1979)
120. Sandford M T (II), Whitaker R W, Klein R I *Astrophys. J.* **260** 183 (1982)
121. LaRosa T N *Astrophys. J.* **274** 815 (1983)
122. Cammerer M, Shchekinov Yu *Astron. Astrophys.* **283** 845 (1994)
123. Зельдович Я Б, Мамаев А В, Шандарин С Ф *УФН* **139** 153 (1983); Zel'dovich Ya B, Mamaev A V, Shandarin S F *Sov. Phys. Usp.* **26** 77 (1983)
124. Elmegreen B G, Scalo J *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **42** 211 (2004)
125. Young J S, Scoville N Z *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **29** 581 (1991)
126. Blitz L, Shu F H *Astrophys. J.* **238** 148 (1980)
127. Cohen R S et al. *Astrophys. J. Lett.* **239** L53 (1980)
128. Goldsmith P F, Li D, Krčić M *Astrophys. J.* **654** 273 (2007)
129. Scoville N Z, Hersch K *Astrophys. J.* **229** 578 (1979)
130. Pringle J E, Allen R J, Lubow S H *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **327** 663 (2001)
131. Koda J, Scoville N, Heyer M *Astrophys. J.* **823** 76 (2016)
132. Dame T M, Hartmann D, Thaddeus P *Astrophys. J.* **547** 792 (2001)
133. Heyer M H et al. *Astrophys. J.* **602** 723 (2004)
134. Fukui Y et al. *Astrophys. J.* **705** 144 (2009)
135. Rand R J, Kulkarni S R *Astrophys. J.* **349** L43 (1990)
136. Koda J et al. *Astrophys. J. Suppl.* **193** 19 (2011)
137. Pety J et al. *Astrophys. J.* **779** 43 (2013)
138. Roman-Duval J et al. *Astrophys. J.* **699** 1153 (2009)
139. Kalberla P M W, Dedes L *Astron. Astrophys.* **487** 951 (2008)
140. Nakanishi H, Sofue Y *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **68** 5 (2016)
141. Kawamura A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **184** 1 (2009)
142. Sofue Y, Nakanishi H *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **68** 63 (2016)
143. Hartmann D, Burton W B *Atlas of Galactic Neutral Hydrogen* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997)
144. Kerr F J et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **66** 373 (1986)
145. Kalberla P M W et al. *Astron. Astrophys.* **440** 775 (2005)
146. Sofue Y, Nakanishi H *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **68** 63 (2016)
147. van Doshoeck E F, in *Millimetre and Submillimetre Astronomy. Lectures, Summer School, Stirling, Scotland, June 21–27, 1987* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 147, Eds R D Wolstencroft, W B Burton) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1988) p. 117
148. Шекинов Ю А *Астрофизика* **47** 241 (2004); Shchekinov Yu A *Astrophysics* **47** 205 (2004)
149. Wolfire M G, Hollenbach D, McKee C F *Astrophys. J.* **716** 1191 (2010)
150. Vlahakis C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **433** 1837 (2013)
151. Tosaki T et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **63** 1171 (2011)
152. Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **536** A17 (2011)
153. Abergel A et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **536** A21 (2011)
154. Hollenbach D J, Tielens A G G M *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **35** 179 (1997)
155. Burton M G et al. *Astrophys. J.* **811** 13 (2015)
156. Langer W D et al. *Astron. Astrophys.* **561** A122 (2014)
157. Hollenbach D J, Tielens A G G M *Rev. Mod. Phys.* **71** 173 (1999)
158. Bolatto A D, Wolfire M, Leroy A K *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **51** 207 (2013)
159. de Vries H W, Heithausen, Thaddeus P *Astrophys. J.* **319** 723 (1987)
160. Reach W T, Koo B-C, Heiles C *Astrophys. J.* **429** 672 (1994)
161. Ade P A R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **536** A19 (2011)
162. Glassgold A E, Huggins P J, Langer W D *Astrophys. J.* **290** 615 (1985)
163. Maloney P, Black J H *Astrophys. J.* **325** 389 (1988)
164. Heyer M H, Tereby S *Astrophys. J.* **502** 265 (1998)
165. Arabadjis J S, Bregman J N *Astrophys. J.* **510** 806 (1999)
166. Grenier I A, Casandjian J-M, Terrier R *Science* **307** 1292 (2005)
167. Wolfire M G, Hollenbach D, McKee C F *Astrophys. J.* **716** 1191 (2010)
168. Poglitsch A et al. *Astrophys. J.* **454** 293 (1995)
169. Madden S C et al. *Astrophys. J.* **483** 200 (1997)
170. Leroy A K et al. *Astron. J.* **137** 4670 (2009)
171. Fukui Y et al. *Astrophys. J.* **798** 6 (2015)
172. Lee M-Y et al. *Astrophys. J.* **809** 56 (2015)
173. Hollenbach D, McKee C F *Astrophys. J. Suppl.* **41** 555 (1979)
174. Hollenbach D, McKee C F *Astrophys. J.* **342** 306 (1989)
175. Jenkins E B, Tripp T M *Astrophys. J. Suppl.* **137** 297 (2001)
176. Васильев О Е, Шекинов Ю А *Астрон. журн.* **94** 333 (2017); Vasiliev E O, Shchekinov Yu A *Astron. Rep.* **61** 342 (2017)
177. Wolfire M G et al. *Astrophys. J.* **587** 278 (2003)
178. Spaans M, Norman C A *Astrophys. J.* **483** 87 (1997)
179. Vasiliev E O *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **431** 638 (2013)
180. Madden S C et al. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **125** 600 (2013)
181. De Looze I et al. *Astron. Astrophys.* **568** A62 (2014)
182. Cormier D et al. *Astron. Astrophys.* **578** A53 (2015)
183. Vallini L et al. *Astrophys. J.* **813** 36 (2015)
184. Maiolino R et al. *Astron. Astrophys.* **440** L51 (2005)
185. Stacey G J et al. *Astrophys. J.* **724** 957 (2010)
186. Cox P et al. *Astrophys. J.* **740** 63 (2011)
187. De Breuck C et al. *Astron. Astrophys.* **565** A59 (2014)
188. Maiolino R et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **452** 54 (2015)
189. Inoue A K et al. *Science* **352** 1559 (2016)
190. Shibuya T et al. *Astrophys. J.* **752** 114 (2012)
191. Hashimoto T et al. *Astrophys. J.* **812** 157 (2015)
192. Kakiichi K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **463** 4019 (2016); arXiv:1510.05647
193. Jimmy et al. *Astrophys. J.* **825** 34 (2016)
194. Aravena M et al. *Astrophys. J.* **833** 71 (2016); arXiv:1607.06772
195. Pentericci L et al. *Astrophys. J.* **504** 139 (1998)
196. Pentericci L et al. *Astron. Astrophys.* **396** 109 (2002)
197. Kurk J D et al. *Astron. Astrophys.* **428** 793 (2004)
198. Dannerbauer H et al. *Astron. Astrophys.* **570** A55 (2014)
199. Pentericci L et al. *Astron. Astrophys.* **361** L25 (2000)
200. Ogle P et al. *Astrophys. J.* **751** 13 (2012)
201. Nesvadba N P H et al. *Astrophys. J.* **650** 693 (2006)
202. Vasiliev E O *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **431** 638 (2013)
203. Shapiro P R, Moore R T *Astrophys. J.* **207** 460 (1976)
204. Сучков А А, Шекинов Ю А *Письма в Астрон. журн.* **10** 35 (1984); Suchkov A A, Shchekinov Yu A *Sov. Astron. Lett.* **10** 13 (1984)
205. Vasiliev E O, Ryabova M V, Shchekinov Yu A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **446** 3078 (2015)
206. Oppenheimer B D et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **460** 2157 (2016)

207. Draine B T, in *Cosmic Dust: Near and Far. Proc. of a Conf., 8–12 September 2008, Heidelberg, Germany* (ASP Conf. Ser., Vol. 414, Eds T Henning, E Grün, J Steinacker) (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009) p. 453
208. Jones A P, Nuth J A (III) *Astron. Astrophys.* **530** A44 (2011)
209. Whittet D C B *Dust in the Galactic Environment* (Bristol: A. Hilger, 1992)
210. Bode M F, in *Dust in the Universe. Proc. of the Conf., Manchester, England, Dec. 14–18, 1987* (Eds M E Bailey, D A Williams) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1988) p. 73
211. Priddey R S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **344** L74 (2003)
212. Todini P, Ferrara A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **325** 726 (2001)
213. Maiolino R et al. *Nature* **431** 533 (2004)
214. Gall C, Hjorth J, Andersen A C *Astron. Astrophys. Rev.* **19** 43 (2011)
215. Matsuura M et al. *Science* **333** 1258 (2011)
216. Bouchet P et al. *Astrophys. J.* **611** 394 (2004)
217. Dwek E, Galliano F, Jones A P *Astrophys. J.* **662** 927 (2007)
218. Indebetouw R et al. *Astrophys. J. Lett.* **782** L2 (2014)
219. Grün E et al. *Nature* **362** 428 (1993)
220. Landgraf M et al. *Science* **286** 2319 (1999)
221. Frisch P C et al. *Astrophys. J.* **525** 492 (1999)
222. Mathis J S, Rumpl W, Nordsieck K H *Astrophys. J.* **217** 425 (1977)
223. Meisel D D, Janches D, Mathews J D *Astrophys. J.* **567** 323 (2002)
224. Meisel D D, Janches D, Mathews J D *Astrophys. J.* **579** 895 (2002)
225. Baggaley W J et al. *Q. J. R. Astron. Soc.* **35** 293 (1994)
226. Taylor A D, Baggaley W J, Steel D I *Nature* **380** 323 (1996)
227. Landgraf M et al. *J. Geophys. Res.* **105** 10343 (2000)
228. Wang S, Li A, Jiang B W *Astrophys. J.* **811** 38 (2015)
229. Афанасьев В Л, Калениченко В В, Караченцев И Д *Астрофиз. бюл.* **62** 319 (2007); Afanasiev V L, Kalenichenko V V, Karachentsev I D *Astrophys. Bull.* **62** 301 (2007)
230. Krüger H, Grün E *Space Sci. Rev.* **143** 347 (2009)
231. Krüger H et al. *Planet. Space Sci.* **58** 951 (2010)
232. Westphal A J et al. *Meteor. Planet. Sci.* **49** 1720 (2014)
233. Scicluna P et al. *Astron. Astrophys.* **584** L10 (2015)
234. Wong K T et al. *Astron. Astrophys.* **590** A127 (2016); arXiv:1603.03371
235. Kamiński T et al. *Astron. Astrophys.* **592** A42 (2016)
236. Gupta A et al. *Astrophys. J. Lett.* **756** L8 (2012)
237. Nicastrò F et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **457** 676 (2016)
238. Fang T et al. *Astrophys. J.* **762** 20 (2013)
239. Salem M et al. *Astrophys. J.* **815** 77 (2015)
240. Fang T et al. *Astrophys. J. Suppl.* **217** 21 (2015)
241. Leroy A K et al. *Astrophys. J.* **737** 12 (2011)
242. Rémy-Ruyer A et al. *Astron. Astrophys.* **563** A31 (2014)
243. Shi Y et al. *Nature* **514** 335 (2014)
244. Поликарпова О Л, Шекинов Ю А *Астрон. журн.* **94** 99 (2017); Polikarpova O L, Shchekinov Yu A *Astron. Rep.* **61** 89 (2017)
245. Аль Наджм М Н, Поликарпова О Л, Шекинов Ю А *Астрон. журн.* **93** 355 (2016); Al Najm M N, Polikarpova O L, Shchekinov Yu A *Astron. Rep.* **60** 389 (2016)
246. Howk J C, Savage B D *Astron. J.* **114** 2463 (1997)
247. Howk J C, Savage B D *Astron. J.* **117** 2077 (1999)
248. Hughes T M et al. *Astron. Astrophys.* **565** A4 (2014)
249. Bocchio M et al. *Astron. Astrophys.* **586** 8B (2015)
250. Khoperskov S A, Shchekinov Yu A, arXiv:1403.7075
251. Irwin J A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **433** 2958 (2013)
252. Holwerda B W et al. *Astron. Astrophys.* **444** 101 (2005)
253. Holwerda B W *Astron. Nachr.* **334** 268 (2013)
254. Fritz J et al. *Astron. Astrophys.* **546** A34 (2012)
255. Smith M W L et al. *Astrophys. J.* **756** 40 (2012)
256. Mattsson L et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **444** 797 (2014)
257. Holwerda B W et al. *Astron. J.* **137** 3000 (2009)
258. Wang J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441** 2159 (2014)
259. Martinsson T P K et al. *Astron. Astrophys.* **585** A99 (2016)
260. Fall S M, Pei Y C *Astrophys. J.* **402** 479 (1993)
261. Pei Y C, Fall S M, Hauser M G *Astrophys. J.* **522** 604 (1999)
262. Hauser M G et al. *Astrophys. J.* **508** 25 (1998)
263. Fixsen D J et al. *Astrophys. J.* **508** 123 (1998)
264. Driver S P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **379** 1022 (2007)
265. Kollmeier J A et al. *Astrophys. J. Lett.* **789** L32 (2014)
266. Navarro J F, Frenk C S, White S D M *Astrophys. J.* **462** 563 (1996)
267. Feldmann R, Hooper D, Gnedin N Y *Astrophys. J.* **763** 21 (2013)
268. Fukugita M, arXiv:1103.4191
269. Peeples M S et al. *Astrophys. J.* **786** 54 (2014)
270. Peek J E G, Ménard B, Corrales L *Astrophys. J.* **813** 7 (2015)
271. Su M, Slatyer T R, Finkbeiner D P *Astrophys. J.* **724** 1044 (2010)
272. Impey C, Bothun G *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **35** 267 (1997)
273. van Dokkum P G et al. *Astrophys. J. Lett.* **804** L26 (2015)
274. Koda J et al. *Astrophys. J. Lett.* **807** L2 (2015)
275. Rahman N et al. *Astrophys. J.* **663** 908 (2007)
276. Das M et al. *Astrophys. J.* **651** 853 (2006)
277. Galaz G et al. *Astrophys. J. Lett.* **815** L29 (2015)
278. Кайсин С С, Караченцев И Д *Астрофизика* **49** 337 (2006); Kaisi S S, Karachentsev I D *Astrophysics* **49** 287 (2006)
279. Karachentsev I et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415** L31 (2011)
280. Casetti-Dinescu D I et al. *Astrophys. J. Lett.* **784** L37 (2014)
281. Murray C E et al. *Astrophys. J.* **808** A1 (2015)
282. Stark D V, Baker A D, Kannappan S J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **446** 1855 (2015)
283. Giallongo E et al. *Astrophys. J.* **813** 68 (2015)
284. Hintz J L et al. *Astrophys. J.* **663** 895 (2007)
285. Impey C D et al. *Astrophys. J. Suppl.* **105** 209 (1996)
286. Young J E, Kuzio de Naray R, Wang S X *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **452** 2973 (2015)
287. Matsuura M *Proc. Int. Astron. Union* **8** (S292) 267 (2012)
288. Lazzati D, Heger A *Astrophys. J.* **817** 134 (2016)
289. Linsky J L et al. *Astrophys. J.* **647** 1106 (2006)
290. McGee S L, Balogh M L *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **405** 2069 (2010)
291. Kashiwagi T, Suto Y *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **451** 4162 (2015)
292. Shelouche D, Koester B P, Bowen D V *Astrophys. J.* **671** L97 (2007)
293. Gutiérrez C M, López-Corredoira M *Astron. Astrophys.* **571** A66 (2014)
294. Adam R et al. (Planck Collab.) *Astron. Astrophys.* **596** A104 (2016)
295. Walter F, Weiss A, Scoville N *Astrophys. J.* **580** L21 (2002)
296. Salas P et al. *Astrophys. J.* **797** 134 (2014)
297. Diederik Kruijssen J M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **440** 3370 (2014)
298. Nataf D M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **456** 2692 (2016)
299. Fitzpatrick E L *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111** 63 (1999)
300. Fitzpatrick E L, Massa D *Astrophys. J. Suppl.* **72** 163 (1990)
301. Nataf D M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **456** 2692 (2016)
302. Cardelli J A, Clayton G C, Mathis J S *Astrophys. J.* **345** 245 (1989)
303. Schlafly E F et al. *Astrophys. J.* **821** 78 (2016); arXiv:1602.03928
304. Higdon S J U et al. *Astrophys. J.* **648** 323 (2006)
305. Capak P L et al. *Nature* **522** 455 (2015)
306. Maiolino R et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **452** 54 (2015)
307. Ota K et al. *Astrophys. J.* **792** 34 (2014)
308. Ouchi M et al. *Astrophys. J.* **778** 102 (2013)
309. Darren Dowell C et al. *Astrophys. J.* **780** 75 (2014)

Interstellar and intergalactic gas in the far IR and submillimeter spectral ranges

Yu.A. Shchekinov^(1,2), V.N. Lukash⁽¹⁾, E.V. Mikheeva^(1,3), S.V. Pilipenko⁽¹⁾

⁽¹⁾ Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Astro Space Centre, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Raman Research Institute, Sadashiva Nagar, Bangalore 560080, India

⁽³⁾ Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Institutskii per. 9, 141700 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russian Federation
E-mail: ^(1,2)yus@asc.rssi.ru, ⁽¹⁾lukash@asc.rssi.ru, ^(1,3)helen@asc.rssi.ru, ⁽¹⁾spilipenko@asc.rssi.ru

This review discusses key physical problems that relate to the interstellar and intergalactic medium and are the subject of far infrared (FIR) and submillimeter (submm) astronomy. It outlines the most impressive results of the last 25 years and summarizes the characteristics of most successful space- and ground-based FIR and submm observatories, either currently in operation or already inoperative or else under development. A brief discussion is given of the physical problems that are concerned with the evolution of gaseous medium in galaxies and nearby and in the intergalactic medium, for whose solution the FIR and submm spectral ranges can provide critically important and sometimes otherwise inaccessible information. Among such problems are: the origin of the galactic molecular gas, the conversion of gas into stars, ejection of gas and dust into intergalactic space, the long-term survival of dust in the hostile environment of this space (in particular, in the hot environment of galaxy clusters) and the very origin of dust in the Universe. There are a host of surprising findings that have emerged from recent astronomical observations which are related to our understanding of the evolution of the galaxies, the chemical history of the Universe, etc. A brief discussion of some of these findings is given.

Keywords: far infrared astronomy, submillimeter astronomy, diagnostics of interstellar medium, diagnostics of intergalactic medium, origin of cosmic dust, early galaxies

PACS numbers: **95.30.** – k, 95.85.Fm, 95.85.Gn, 97.10.Bt, **98.58.** – w

Bibliography — 309 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (10) 1033–1070 (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.02.038059>

Received 2 September 2016, revised 2 December 2016

Physica – Uspekhi **60** (10) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.02.038059>