523.164

ВНЕАТМОСФЕРНАЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ АСТРОНОМИЯ*)

А. Е. Саломонович

I. ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия отмечены существенным расширением спектра электромагнитного излучения, в котором проводятся астрономические наблюдения. Помимо соседних с видимым участком спектра — ультрафиолетовой и ближней инфракрасной — областей, на службу астрономии поставлена огромная радиообласть. В самое последнее время оказалось возможным использовать наиболее коротковолновые — рентгеновское и γ-излучение. Соответственно получили распространение такие термины, как инфракрасная астрономия, радиоастрономия, рентгеновская и γ-астрономия. Классификация по признаку диапазона волн электромагнитного излучения, приносящего информацию об объектах космического пространства, оправдана в той мере, в какой различие диапазонов обусловливает своеобразие методов приема и анализа излучения, а также специфику задач, решаемых с помощью этих методов.

До последнего времени во всем электромагнитном спектре оставалась одна «неосвоенная» для астрономии область — промежуточная между радиодиапазоном (миллиметровыми волнами) и инфракрасным диапазоном. Эта область, называемая субмиллиметровой или далекой инфракрасной, условно ограничена волнами длиной 50 *мкм* (иногда говорят о 100 *мкм*) со стороны коротких волн и 1000 *мкм* (в ряде случаев считают 2000 *мкм*) со стороны длинных волн [1]. В настоящее время происходит все более интенсивное освоение и этой области, поэтому можно говорить о возникновении субмиллиметровой астрономии. Некоторым задачам и специфическим методам этого направления посвящен предлагаемый обзор.

Заметим сразу же, что одной из основных причин сравнительно позднего развития субмиллиметровой астрономии явились исключительно неблагоприятные условия для наземных астрономических наблюдений в этом диапазоне. Ослабление, вносимое земной атмосферой, делает почти невозможными наблюдения с уровня моря уже на волнах короче 1—2 *мм*. Поэтому широкое развитие субмиллиметровой астрономии оказывается теперь возможным лишь в связи с успехами ракетно-космической техники, создающей условия для внеатмосферных наблюдений. Таким образом, субмиллиметровая астрономия в значительной мере будет основываться на внеатмосферных наблюдениях. Ниже мы в основном будем касаться именно внеатмосферных исследований.

Отмеченные выше трудности наземных наблюдений являются не единственной причиной отставания субмиллиметровых астрономических

*) Доклад на сессии Отделения общей физики и астрономии АН СССР 13 ноября 1968 г.

исследований. Второй, не менее важной, причиной является исключительная сложность генерирования и приема волн этого диапазона. Для методов, разработанных в диапазонах сантиметровых и миллиметровых радиоволн, субмиллиметровые волны «слишком коротки». Создание электронноволновых генераторов, например, типа ламп обратной волны в этом диапазоне требует преодоления значительных трудностей [2]. Супергетеродинный прием в субмиллиметровом диапазоне также весьма сложен [3], малошумящие усилители высокой частоты типа мазеров или параметрических усилителей пока не созданы, причем затруднения здесь выходят за рамки технических.

С другой стороны, для техники, используемой в диапазоне инфракрасных волн, субмиллиметровые волны «слишком длинны». Тепловые источники излучения в этой области становятся малоинтенсивными. Создание когерентных генераторов типа ИК лазеров также связано со значительными принципиальными трудностями. Приемники излучения требуют глубокого охлаждения. Большие трудности возникают и при канализации субмиллиметровых волн.

Несмотря на все эти трудности, распространение астрономических исследований в область субмиллиметровых волн представляется весьма заманчивым. Из опыта радиоастрономии известно, как много неожиданного может дать наблюдение космоса сквозь новое «окно». Поразительные успехи радиоастрономии наводят на мысль о том, что и в соседнем, практически не изученном субмиллиметровом диапазоне таятся большие «сюрпризы». Но, кроме этого общего утверждения, уже сейчас можно сформулировать ряд задач, из-за которых имеет смысл преодолевать те многочисленные трудности, о которых упоминалось выше. Остановимся коротко на некоторых актуальных задачах субмиллиметровой астрономии.

II. НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ

Вообще говоря, исследование любых космических объектов в новом диапазоне волн представляет определенный интерес. Если двигаться от более коротких волн — видимого и ИК участков спектра, то естественно ожидать получения в субмиллиметровом диапазоне наиболее интересных сведений о сравнительно *холодных* объектах, для которых максимум равновесного излучения лежит в интересующем нас диапазоне. С другой стороны, этот диапазон может представлять интерес при спектральных исследованиях таких объектов, у которых характерные линии или полосы попадают в область субмиллиметровых волн. Рассматриваемые ниже задачи связаны с необходимостью проведения исследований отмеченных типов.

1. Исследование характеристик первичного состояния вещества

На основе теории расширяющейся Вселенной А. А. Фридмана была предсказана возможность существования изотропного электромагнитного теплового излучения, соответствующего температуре черного тела в несколько градусов Кельвина. Согласно горячей модели, развивавшейся в рамках этой теории рядом авторов [4], на ранней стадии расширения Вселенной вещество характеризуется большой энтропией. В тепловом равновесии плотность мощного излучения в сжатой горячей плазме на ранней стадии во много раз превосходит плотность вещества. В процессе расширения число квантов излучения сохраняется, однако их энергия убывает в соответствии с увеличением длины волны из-за красного смещения. В настоящее время, как показали, например, расчеты А. Г. Дорош-

кевича и И. Д. Новикова [5], плотность этого излучения, соответствующего излучению черного тела при нескольких градусах Кельвина, оказывается на много порядков больше, чем плотность излучения других источников (радиогалактик и звезд) в том диапазоне волн, где можно ожидать максимума излучения.

Поиски космического излучения, имеющего характер изотропного фона, первоначально не увенчались успехом [6]. Однако проводившиеся в то же время (1965 г.) совсем для других целей тщательные измерения [7] собственных шумов чувствительной приемной системы, состоявшей из большой рупорно-параболической антенны и малошумящего усилителя, настроенного на волну 7,35 *см*, привели к обнаружению не зависящего от положения антенны космического фонового излучения, соответствующего по интенсивности излучению черного тела при температуре 3,5° К *).

Вслед за этим в течение 1966—1968 гг. различные группы наблюдателей в США, Англии и СССР произвели измерения фонового излучения ряда волн дециметрового [8, 9], сантиметрового [10-12] и миллиметрового [13-16] диапазонов, причем все результаты в пределах ошибок измерений могли быть согласованы с кривой чернотельного излучения при температуре, близкой к 3° К. Следует заметить, что лишь наиболее коротковолновое [16] из этой серии измерений (на волне 3,3 *мм*), по-видимому, указывает на отклонение от рэлей-джинсовской ветви кривой Планка ($I_\nu \approx 2kT/\lambda^2$) и на переход к виновской ветви этой кривой, что должно свидетельствовать о том, что наблюдаемое излучение действительно представляет собою излучение черного тела при термодинамической температуре ~3° К, а не является излучением более горячего, но «серого» (полупрозрачного) вещества **). Как легко видеть из рис. 1, на котором приведены все полученные к 1969 г.

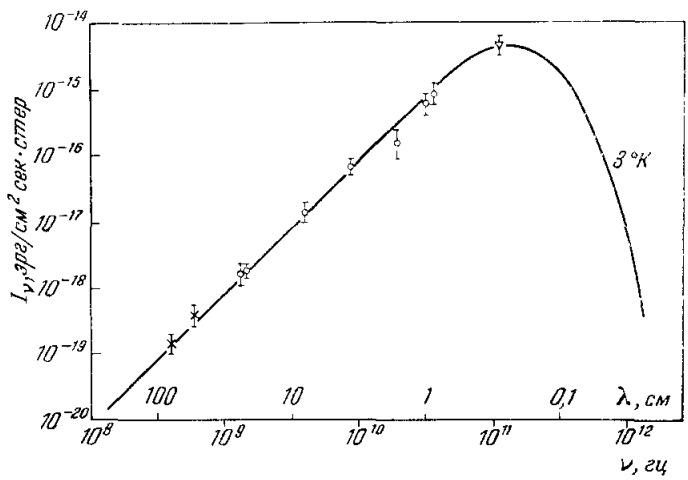


Рис. 1. Результаты измерений фонового космического излучения по данным [7-16].

результаты радиометрических наблюдений, максимум планковской кривой, соответствующей температуре ~3° К, находится вблизи λ = 1 *мм*, а наиболее интересная ее виновская область лежит главным образом в диапазоне субмиллиметровых волн. Тщательные спектральные измерения

*) Позднее это значение было исправлено на 3,1 ± 1° К.

**) Мы не имеем возможности рассмотреть здесь различные альтернативные гипотезы происхождения фонового излучения, например [17]. Этот вопрос рассмотрен, например, в [18]; см. также [19].

в этой области должны не только дать определенный ответ на вопрос о характере наблюдаемого фонового излучения, но и прояснить ряд фундаментальных космологических проблем.

Как показывает теоретическое рассмотрение [20-22], взаимодействие чернотельного излучения с веществом на определенном этапе эволюции Вселенной должно приводить к деформациям планковского спектра реликтового излучения. В горячей модели Вселенной предполагается, что на ранней стадии расширения полностью ионизованная водородная плазма находилась в равновесии с излучением. В дальнейшем охлаждение плазмы при продолжающемся расширении приводило к рекомбинации водорода. Этот процесс, как показано в [21, 22], сопровождается деформацией спектра реликтового излучения в его коротковолновой виновской ветви: происходящие при рекомбинации двухквантовые распады уровня $2s$ атомов водорода связаны с выделением энергичных квантов, что дает возрастание интенсивности фонового излучения на виновской ветви. Это возрастание, хотя и не очень большое, становится заметным при $\lambda < 200$ *мкм*. Измерения спектра в этой области могут дать информацию об этапе рекомбинации водородной плазмы, относящемся, как полагают, к периоду, для которого красное смещение составляет $z \sim 10^3$. Возможно, эти измерения позволят оценить важнейшую величину — плотность вещества во Вселенной, так как интенсивность рекомбинационного излучения существенно зависит от этой величины [22].

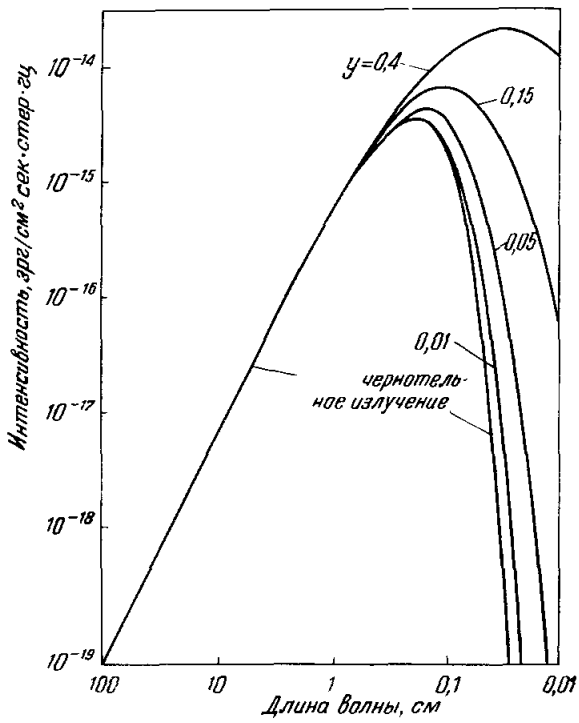


Рис. 2. Спектры реликтового излучения с учетом комптоновского рассеяния согласно расчету [22] при различных значениях малого параметра y, характеризующего искажения планковского спектра.

Деформации спектра реликтового излучения следует ожидать и по другой причине. На более позднем этапе эволюции, согласно теоретическим представлениям [20, 22], должен происходить вторичный разогрев и ионизация межгалактического газа. Рассеяние квантов реликтового излучения на быстрых тепловых электронах разогретого газа приводит, в частности, вследствие обратного комптоновского эффекта к повышению частот рассеянных квантов. На рис. 2 приведены спектры реликтового излучения, рассчитанные с учетом этого эффекта в [22] для различных значений безразмерного малого параметра y, характеризующего степень взаимодействия излучения с электронами. Как видно, вследствие рассеяния максимум спектральной плотности реликтового излучения смещается в сторону коротких волн, а величина максимума оказывается больше, чем при чисто планковском спектре. Измерения аналогичного эффекта в рэлей-джинсовской области не дают ответа на вопрос о взаимодействии с разогретым

межгалактическим газом, ибо интенсивность дополнительного излучения здесь оказывается малой по сравнению с вкладом фона радиогалактик. Лишь измерения в субмиллиметровом диапазоне могут иметь успех.

Следует заметить, что, помимо прямых радиометрических измерений фонового излучения для оценки его интенсивности, для ряда волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов оказалось возможным использовать результаты измерений относительной интенсивности абсорбционных линий в спектре некоторых звезд, вызванных поглощением в молекулах межзвездного CN, а также CH [23, 24]. Суть метода состоит в следующем. Молекулы в межзвездном пространстве (например, молекулы CN, CH и др.) практически не сталкиваются друг с другом. Поэтому переходы молекул из нижнего состояния с энергией A в возбужденное с энергией A^* происходят лишь за счет взаимодействия с излучением, поглощаемым молекулой, когда $h\nu + A \rightleftarrows A^*$. При этом относительная заселенность энергетических уровней молекул $[A^*]/[A] = \exp(-h\nu/kT)$, где T — эффективная температура поглощаемого излучения. В частности, если разность уровней $A^* - A$ соответствует квантам миллиметрового или субмиллиметрового космического излучения, то независимое измерение относительной заселенности этих уровней позволяет определить эффективную температуру космического излучения соответствующих длин волн.

Величину $[A^*]/[A]$ оказывается возможным измерить, анализируя относительную интенсивность близких линий в оптическом спектре звезды, обусловленных поглощением в межзвездных молекулах, именно тех линий, для которых состояния A и A^* являются исходными.

Различия в интенсивности близких абсорбционных линий λ 3874,00 и 3874,61 Å в свете звезд ξ Persei и ξ Ophiuchi, обусловленных поглощением в молекулах CN, оказались меньшими, чем этого можно было ожидать, что указало на повышенную заселенность возбужденного уровня и позволило оценить эффективную температуру фонового излучения на длине волны 2,63 *мм*. Аналогичные оценки для волн 1,32; 0,559 и 0,359 *мм* были получены из анализа измерений абсорбционных линий CN, CH и CH^+. Эти оценки (хотя и довольно грубые) согласуются с представлением о планковском излучении при температуре, близкой к 3° K. К некоторым из этих измерений мы вернемся ниже.

Выше шла речь об измерениях спектральной плотности интенсивности реликтового излучения, распределение которого по небесной сфере, согласно первым наблюдениям, близко к равномерному. Сам факт постоянства яркостной температуры реликтового излучения по всему небу указывал на его реликтовый характер. Однако по необходимости первые наблюдения были не очень точными и не могли охватить значительные области. Между тем детальное исследование распределения яркостной температуры фона представляет значительный интерес. Обнаружение анизотропии — зависимости интенсивности фонового излучения от угловых координат — свидетельствовало бы о справедливости анизотропной космологической модели, а характер этой зависимости (квадрупольная анизотропия или анизотропия более сложного типа) позволил бы сделать выбор между различными анизотропными космологическими моделями [25, 26]. Не менее важны измерения мелкомасштабных флуктуаций (возмущений) распределения интенсивности фонового излучения, несущие информацию о возмущениях плотности вещества, имевших место на ранних этапах эволюции Вселенной [27, 28].

Предпринятые до настоящего времени ограниченные попытки обнаружить наличие анизотропии и неоднородностей распределения яркостной температуры реликтового радиоизлучения в сантиметровом [29, 30] и миллиметровом [31] диапазонах успехом не увенчались и позволили лишь опреде-

лить верхний предел относительных изменений яркостной температуры фона, определяемых ошибками измерений и флуктуациями интенсивности неразрешенных дискретных источников ($\Delta T/T \leqslant 10^{-3}$ в масштабе областей с поперечником $> 3'$). Продолжение таких измерений с точностью лучшей, чем 0,1%, и возможностью разрешения областей поперечником в $1'-2'$ представляется весьма интересной, но исключительно сложной задачей.

Как видно из предыдущего, обнаружение и тем более детальное изучение низкотемпературного космического излучения в субмиллиметровой области требуют тщательного учета всех «паразитных» излучений, в первую очередь «засветки» высокотемпературным излучением атмосферы и поверхностей, окружающих чувствительный приемный элемент радиометра. Прецизионные измерения фонового излучения в субмиллиметровом диапазоне требуют в связи с этим не только выноса аппаратуры за пределы земной атмосферы, но и глубокого охлаждения антенны, модулятора и других элементов радиометра, предшествующих охлаждаемому приемному элементу. Весьма важны для решения рассматриваемой задачи спектральные измерения. Прием интегрального излучения в широком участке спектра оказывается сравнительно менее информативным, чем спектрограмма, показывающая относительное изменение спектральной плотности принимаемого излучения.

2. Исследования состояния, химического и изотопического состава межгалактической и межзвездной среды

Субмиллиметровый диапазон — подходящая область для изучения весьма холодных областей Галактики. Измерения распределения интенсивности излучения в этом диапазоне позволили бы выявить районы, где, возможно, в настоящее время происходит гравитационная конденсация, что крайне важно для звездной и планетной космогонии. В частности, исследования спектра субмиллиметрового излучения, по-видимому, позволят обнаруживать в Галактике различные молекулы и пыль.

На волне около 200 *мкм* можно ожидать максимума собственного излучения межзвездной пыли (в предположении, что температура пылинок составляет около 20° К). Известно, далее, что ряд резонансных линий вращательного спектра молекул водорода, кислорода и некоторых других газов расположен в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Исследование этих линий позволило бы изучать наиболее холодные конденсированные области Галактики — их температуру, плотность и химический состав *).

В субмиллиметровом диапазоне расположен также ряд линий возбужденного атомарного водорода и других элементов, соответствующих переходам между близкими энергетическими уровнями с большими квантовыми числами (рекомбинационное излучение). Возможность наблюдений этого излучения была предсказана и впервые реализована в сантиметровом диапазоне в СССР [33, 34].

В 1968 г. впервые рекомбинационная линия $H56\alpha$ была обнаружена (в туманности Омега) и в миллиметровом диапазоне [35]. Измерения интенсивности, частоты и ширины линий рекомбинационного излучения представляют собою эффективное средство изучения распределения концентрации и электронной температуры, а также скоростей движения областей ионизованного межзвездного газа.

*) Не так давно появилось сообщение об обнаружении в направлении на центр Галактики эмиссионных резонансных линий аммиака ($\nu_1 = 23694{,}5$ *Мгц* и $\nu_2 = 23722{,}6$ *Мгц*) [32].

Хотя яркостная температура рекомбинационных линий в субмиллиметровом диапазоне меньше, чем на сантиметровых волнах, спектральная плотность излучения в линии должна существенно превосходить плотность теплового излучения галактического континуума в соответствующем участке спектра. Для наиболее ярких туманностей ожидаемые потоки от линий возбужденного водорода в диапазоне 0,05—1 *мм* (квантовые числа $n = 10—50$), по оценкам, должны составить, при относительной ширине линий $\Delta\nu/\nu = 10^{-4}$, величины $3\cdot10^{-18}—3\cdot10^{-12}$ *вт/м*^{2}.

3. Исследование «инфракрасных звезд» и квазаров

В последнее время обнаружены ранее не известные космические источники электромагнитного излучения. Например, обнаружен класс «инфракрасных звезд», максимум спектра которых расположен в диапазоне 3—20 *мкм*, что соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре менее 700° К. Весьма вероятно обнаружение аналогичных объектов и в более длинноволновом — субмиллиметровом диапазоне.

Наблюдения показывают, что в диапазоне инфракрасных и субмиллиметровых волн могут находиться максимумы спектральной плотности излучения некоторых мощных космических источников. Известный радиоисточник Телец-А, замечательный во многих отношениях, как показали последние измерения, по-видимому, является также источником интенсивного излучения в субмиллиметровом диапазоне. На рис. 3 приведен спектр этого источника, полученный в результате многочисленных наблюдений многих авторов [36]. Обращает на себя внимание резкое возрастание потока в области субмиллиметровых волн, где пока полностью отсутствуют другие наблюдательные данные.

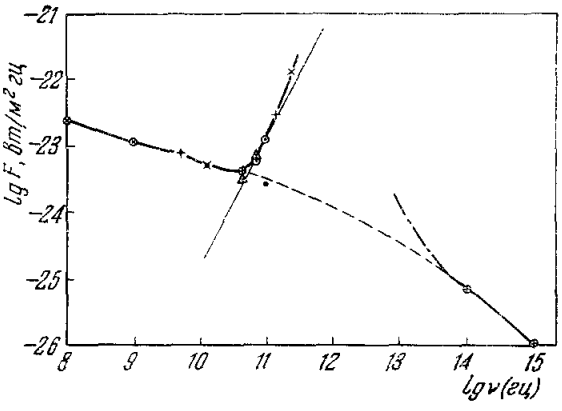


Рис. 3. Спектр электромагнитного излучения источника Телец-А.

——— наблюдаемое непрерывное излучение; — — — континуум без субмиллиметрового избытка; —·— возможный избыток. Значками обозначены результаты различных наблюдений (см. [36]).

Радиоизлучение квазизвездных источников (квазаров), обладающих большим разнообразием характеристик, в частности переменностью интенсивности, наличием поляризации, в области миллиметровых и субмиллиметровых волн имеет необычные спектры. На рис. 4, *а* приведен спектр квазара 3C273, полученный сопоставлением радиоастрономических результатов, полученных в [37], и данных измерений в инфракрасной области, приведенных в обзоре Ф. Лоу [38]. Переменность потока возрастает по мере укорочения длины волны, а среднее значение потока в диапазоне субмиллиметровых волн аномально высоко. Механизм этого повышенного излучения пока не выяснен; предполагается [38], что он связан с переизлучением пыли, нагреваемой до сотен градусов излучением, исходящим из центрального горячего объекта.

Наблюдения в диапазоне инфракрасных волн вплоть до 22 *мкм* привели также к обнаружению интенсивного излучения из нескольких сейфер-

товских галактик [38]. Особенностью этих источников также является их необычный спектр с максимумом в далекой инфракрасной области. На рис. 4, *б* приведен спектр такой галактики NGC 1068, полученный

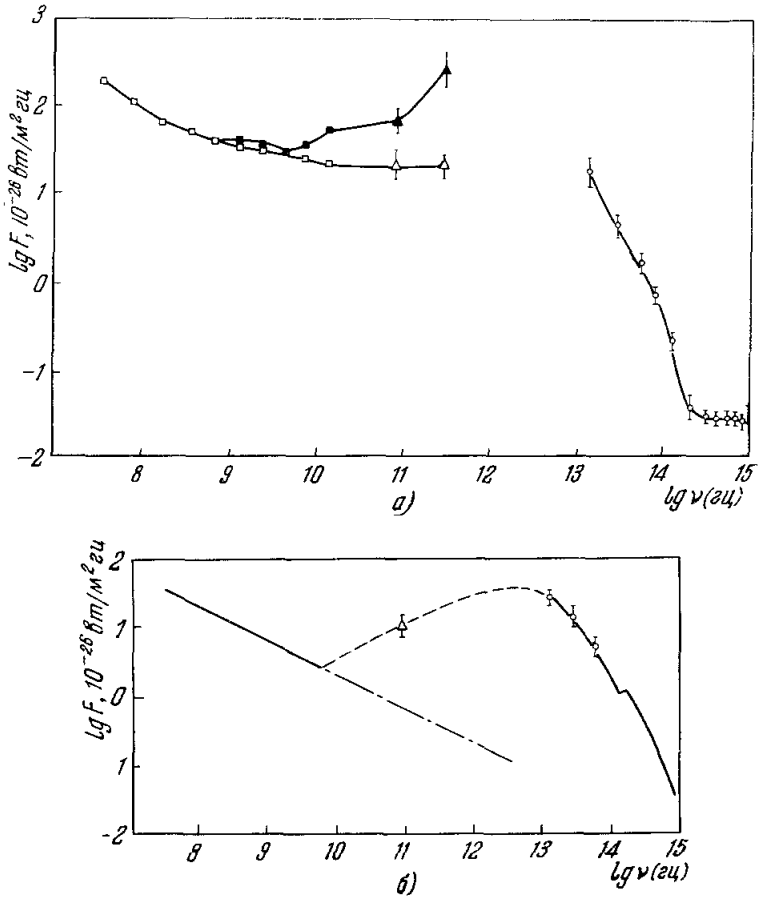


Рис. 4. Спектры дискретных источников: *а*) 3C273 (квазар), *б*) NGC 1068 (*сейфертовская галактика*)—*по данным* [37] и [38].

□ — минимальные и ■ — максимальные потоки между 1964 и 1967 гг. по данным [37]; △ — минимальные и ▲ — максимальные потоки по данным [38]; ○ — данные ИК и оптических измерений [38].

по измерениям [38] в инфракрасной и СВЧ областях. По-видимому, источником повышенного инфракрасного излучения является ядро галактики, но механизм этого излучения не ясен.

Расчеты [39] показывают, что суммарное излучение источников с избытком спектральной плотности в далекой инфракрасной области — инфракрасных галактик — может создавать фоновое излучение в субмиллиметровом диапазоне, сравнимое по интенсивности с реликтовым излучением. Его спектр смыкается со спектром последнего со стороны коротких волн. По оценкам, излучение инфракрасных галактик (число которых, возможно, составляет 1% всех галактик) вносит в общий энергетический баланс Вселенной весьма заметный вклад, сравнимый с излучением всех других галактик. В связи с этим становятся весьма интересными как прямые наблюдения фонового излучения на волнах около 100 *мкм* с широким полем зрения, так и обзоры отдельных участков неба с помощью телеско-

пов, способных разрешать значительное число индивидуальных источников. Выяснение спектров этих объектов позволит не только понять механизм их излучения, но и сделать выбор между различными вариантами космологических моделей [39]. Разумеется, такие наблюдения возможны лишь при использовании высокочувствительных радиометров, вынесенных за пределы земной атмосферы.

Ожидаемые потоки от наиболее ярких объектов на волнах длиною 500—100 *мкм* должны составлять, по-видимому, 10^{-24}—10^{-25} *вт/м²гц*, что в полосе $\Delta\nu/\nu = 30\%$ составляет 10^{-12} — 10^{-13} *вт/м²*.

4. Исследования излучения Солнца

Субмиллиметровое излучение Солнца является источником информации о наиболее глубоко расположенных слоях солнечной атмосферы.

Эффективно излучающий в субмиллиметровом диапазоне слой имеет относительно низкую температуру, вероятно, менее 5000° К. Измерения в этом диапазоне весьма перспективны, так как здесь существенно упрощается интерпретация результатов измерений. Для ожидаемой температуры в субмиллиметровом диапазоне заведомо применимо рэлей-джинсовское

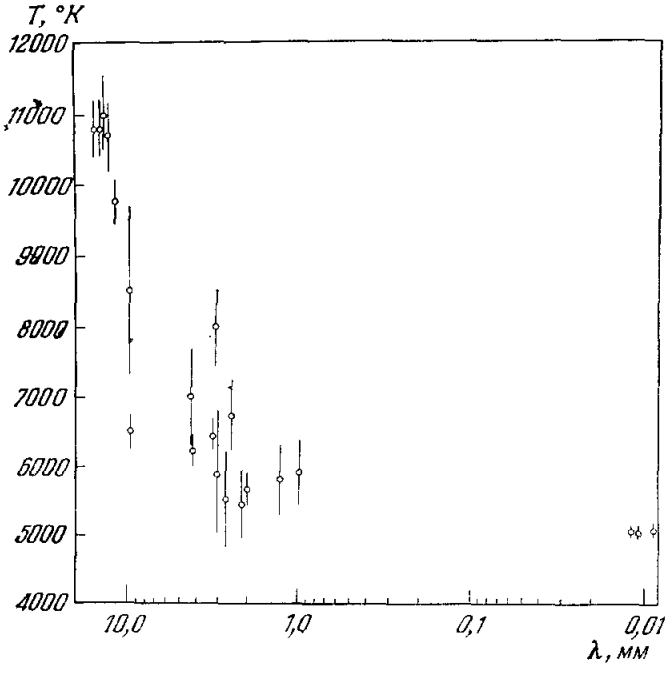


Рис. 5. Результаты измерений яркостной температуры солнечного диска в радиодиапазоне и в ИК области.
Обращает на себя внимание отсутствие данных в субмиллиметровом диапазоне [38].

приближение (в отличие, например, от излучения в ультрафиолетовой области), и от измеряемого потока легко перейти к электронной температуре слоя.

С другой стороны, как раз в области субмиллиметровых волн до последнего времени отсутствовали данные о яркостной температуре Солнца (рис. 5). Исключительно интересны в субмиллиметровом диапазоне измерения локальных источников на Солнце — их интенсивности, поля-

ризации, движений — в зависимости от времени. По-видимому, наблюдения в этом диапазоне дадут много интересного материала о всплесках, связанных с хромосферными вспышками, играющими важнейшую роль во многих геофизических явлениях.

Особый интерес представляют спектральные исследования Солнца в субмиллиметровом диапазоне.

Как показали теоретические исследования [40, 41], эффект так называемой *диэлектронной рекомбинации приводит к существенной перенаселенности* высоких уровней многократно ионизованных атомов в солнечной короне. Это в свою очередь может приводить к появлению резонансных линий поглощения в субмиллиметровом спектре Солнца за счет переходов между соседними уровнями $n \to n - 1$. По оценкам, при температуре и концентрации электронов в короне, равных соответственно $T_e = 10^6$ °K и $N_e = 10^8$—10^9 *см*$^{-3}$, и температуре «черной» фотосферы $T \approx 6 \cdot 10^3$ °K для тех уровней n, для которых перенаселенность максимальна *), можно ожидать при $z \approx 10$ оптическую толщину в линии поглощения $\tau \approx 10^{-2}$, т. е. контраст порядка 6° К. Следует заметить, правда, что относительная ширина искомых линий составит $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-4}$. Для их обнаружения необходимо, таким образом, весьма высокое разрешение. Однако для обнаружения областей спектра, где группируются линии тех или иных элементов, достаточно меньшее разрешение.

5. Исследования планет

Субмиллиметровый диапазон представляет несомненный интерес и для изучения физических условий на Луне и планетах солнечной системы. Подобно тому, как измерения интенсивности инфракрасного излучения позволяют получить сведения о температуре поверхности Луны и планет, лишенных атмосферы, аналогичные измерения в более длинноволновых диапазонах — субмиллиметровом и миллиметровом — дают возможность судить о температуре и характеристиках слоя, непосредственно примыкающего к поверхности. Первые измерения такого рода, выполненные даже в неблагоприятных наземных условиях, указывают на перспективность субмиллиметровых лунно-планетных измерений. Еще более интересны субмиллиметровые радиометрические измерения планетных атмосфер, позволяющие получать сведения о слоях атмосфер, прозрачных для более длинноволнового излучения. Особый интерес имеют спектральные субмиллиметровые измерения.

В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, как известно, расположено множество полос вращательных переходов молекул газов, присутствие которых предполагается или установлено в атмосферах планет. Молекулярная субмиллиметровая астроспектроскопия еще находится в зачаточном состоянии, однако принципиально у нее большие перспективы.

На примере планеты Земля можно проиллюстрировать ситуацию, имеющую здесь место. На рис. 6 представлены спектры поглощения водяного пара земной тропосферы, рассчитанные для уровня моря [42]. С высотой плотность и температура убывают, ширина и интенсивность линий уменьшаются, так что по характеру изменения спектра с высотой можно судить об обилии компонентов атмосферы и о температуре слоя. В качестве примера на рис. 7 показаны спектры поглощения атмосферы Земли в субмиллиметровом диапазоне, рассчитанные для высот 0,5; 3,5 и 30 *км* над уровнем моря [43].

---

*) На волнах $\lambda \approx 1$ *мм* соответствующее $n \approx 60$.

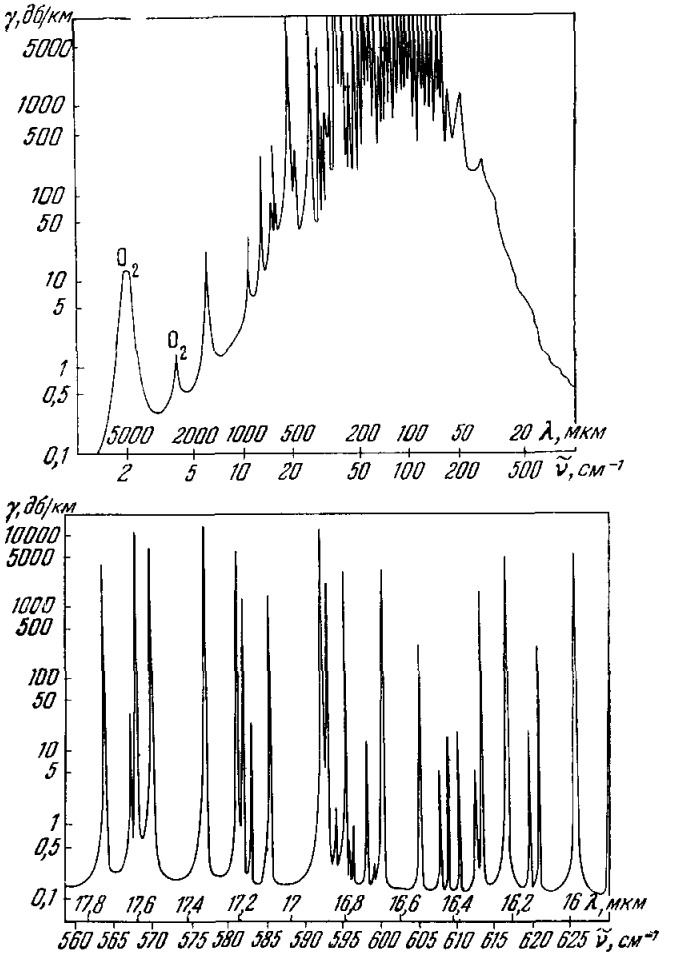


Рис. 6. Спектры поглощения водяного пара земной атмосферы на уровне моря ($T = 293°$ К, $p = 760$ *мм* рт. ст., $\rho = 7{,}5$ *г/м*³), рассчитанные в работе [42].

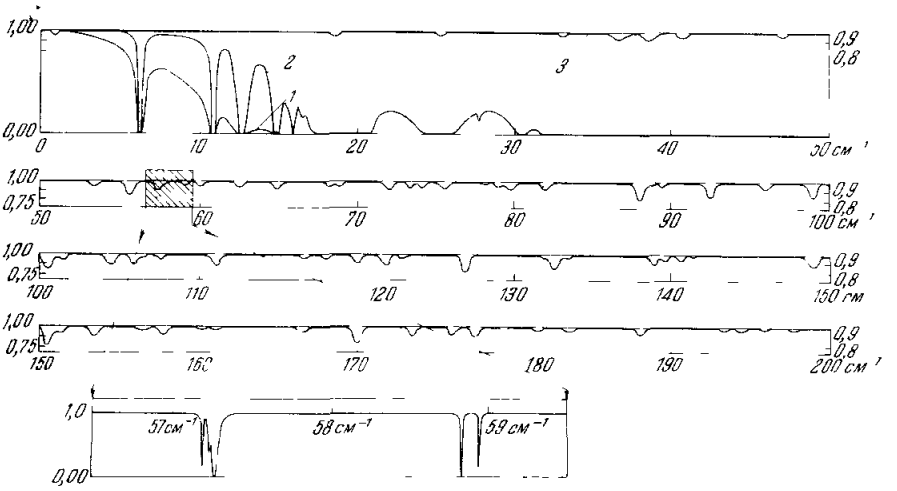


Рис. 7. Изменение спектра поглощения в атмосфере Земли с высотой по данным [43].
1 — 0,5 *км* над уровнем моря; *2* — 3,5 *км* над уровнем моря; *3* — 30 *км* над уровнем моря (в последнем случае приведена свертка кривой прозрачности и аппаратной функции шириной 0,5 *см*⁻¹). Для 57—59 *см*⁻¹ внизу приведена реальная кривая прозрачности.

Эти же рисунки иллюстрируют трудности наземных наблюдений, о чем было сказано выше. Субмиллиметровые исследования, особенно на волнах короче 1 *мм*, оказываются возможными главным образом вне атмосферы, где водяной пар не препятствует измерениям.

III. МЕТОДЫ ВНЕАТМОСФЕРНОЙ СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ

Прежде чем перейти к методам внеатмосферных измерений, остановимся вкратце на состоянии субмиллиметровой приемной техники.

Многочисленные обзоры, в частности известный обзор Патли [44], делают излишним подробное перечисление всевозможных способов приема субмиллиметрового излучения. Современное состояние экспериментальной техники субмиллиметровых волн, в частности методы приема и спектрального анализа излучения, подробно изложено в [3], а также в публикуемом в этом же выпуске УФН переводе обзора [45] (стр. 469).

К настоящему времени для длинноволновой части диапазона разработаны и используются радиометры на основе детекторных [46] и супергетеродинных [47] сверхширокополосных приемников с кристаллическими смесителями на входе (на волнах вплоть до 0,5 *мм*). «Оптические» методы представлены оптико-акустическими преобразователями, болометрами различного типа, в том числе сверхпроводящими и охлаждаемыми до гелиевой температуры германиевыми. По-видимому, наиболее перспективными из разработанных приемников являются болометры и приемники типа фотосопротивлений с полупроводниковыми элементами из германия и сурьмянистого индия. В таблице приведены параметры некоторых применяемых в настоящее время приемников:

Тип приемника	Рабочая температура, °К	Минимальная обнаружимая мощность ΔP_{min}, *вт* (при $\tau = 1$ *сек*)	Постоянная времени детектора τ, *сек*	$\sqrt{\overline{\delta T^2}}$ ($\lambda = 0{,}5$ *мм*)	Полоса частот Δf, *Мгц*
Супергетеродин на кристаллическом детекторе	300	$1{,}1\cdot10^{-13}$	10^{-9}	130	60
То же	300	$1{,}7\cdot10^{-13}$	10^{-9}	10	1200
Оптико-акустический преобразователь	300	$3\cdot10^{-10}$	0,015	$4{,}5\cdot10^{-1}$	$6\cdot10^{4}$
Угольный болометр	2,1	$1\cdot10^{-11}$	0,01	$1{,}5\cdot10^{-2}$	$6\cdot10^{4}$
Германиевый болометр	2,15	$5\cdot10^{-13}$	$4\cdot10^{-4}$	$7{,}5\cdot10^{-4}$	$6\cdot10^{4}$
Сверхпроводящий болометр	3,7	$3\cdot10^{-12}$	1,25	$4{,}5\cdot10^{-3}$	$6\cdot10^{4}$
Приемник на сурьмянистом индии широкополосный с магнитным полем	1,5	$1\cdot10^{-11}$	$2\cdot10^{-7}$	$1{,}5\cdot10^{-2}$	$6\cdot10^{4}$
Приемник на сурьмянистом индии без магнитного поля	4,0	10^{-12}	$3\cdot10^{-7}$	$1{,}5\cdot10^{-3}$	$6\cdot10^{4}$

$$\sqrt{\overline{\delta T^2}} = \frac{\lambda^2 \Delta P_{min}}{2k\,\Delta f}\ [\text{град}\cdot\text{стер}\cdot\text{см}^2].$$

Радиометры с такими приемниками разработаны и используются для наземных измерений в Англии, СССР, США и Франции [48-52].

На рис. 8 в качестве примера приведен субмиллиметровый радиометр с приемником на сурьмянистом индии [53], разработанный в Институте радиотехники и электроники АН СССР [50, 51, 63].

Успехи в области квантовой электроники, в частности создание газовых лазеров субмиллиметрового диапазона [45] и попытки гетеродинирования на охлаждаемых полупроводниковых нелинейных элементах [54], позволяют надеяться на разработку эффективных радиометров супергетеродинного типа с низким уровнем шума.

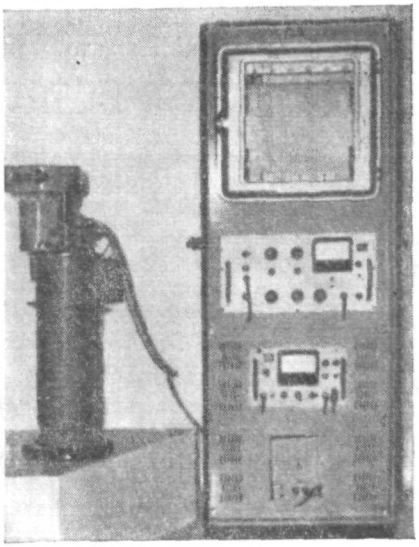


Рис. 8. Субмиллиметровый радиометр с приемником на сурьмянистом индии, разработанный в ИРЭ АН СССР [50, 51, 63].

Следует отметить значительные успехи в области канализации, фильтрации и метрики субмиллиметровых волн, в частности в области поляризационных и интерференционных измерений. На рис. 9 представлен разработанный в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР [55, 56] субмиллиметровый интерферометр Фабри — Перо, в котором в качестве зеркал используются плоские одномерные сетки из тонких металлических проволок диаметром d, натянутых параллельно с шагом l на кольцах диаметром a, причем выполнено условие $a \gg \lambda > l > d$. Изготовленные таким образом зеркала

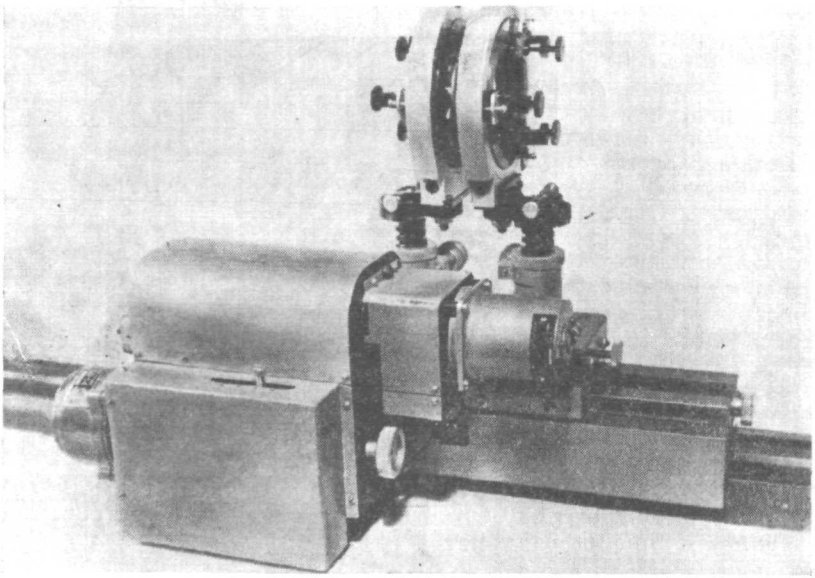
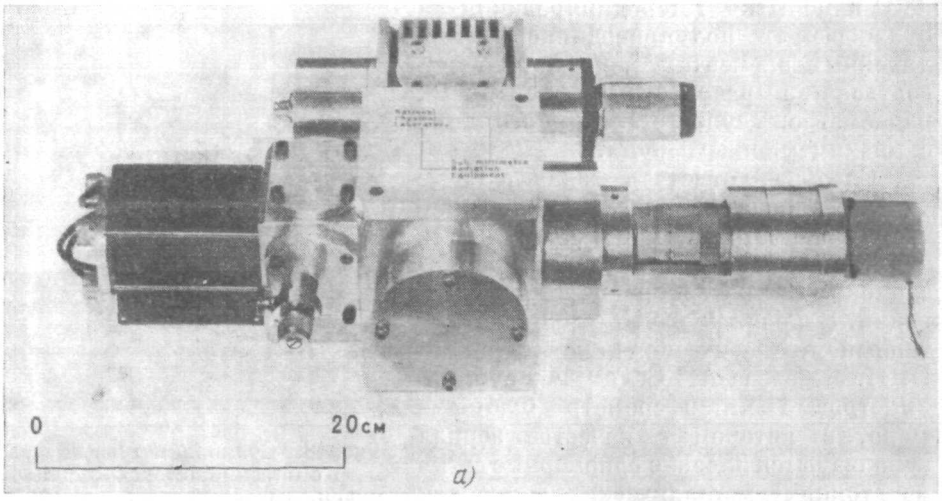


Рис. 9. Субмиллиметровый интерферометр Фабри — Перо, в котором использованы зеркала из проволочек, разработанный в ФИАН СССР им. П. Н. Лебедева.

обладают для излучения, поляризованного параллельно проволокам, весьма высоким коэффициентом отражения $R_{\parallel} \geqslant 0{,}99$ и малыми потерями.

На рис. 10 представлен субмиллиметровый фурье-спектрометр, разработанный в Национальной физической лаборатории (Англия) [57].

В отличие от радиометров СВЧ диапазона, в которых используются одномодовые детекторы излучения, в субмиллиметровом диапазоне применяются в основном детекторы, линейные размеры которых превышают длину волны принимаемого излучения. Каждый элемент такого детектора



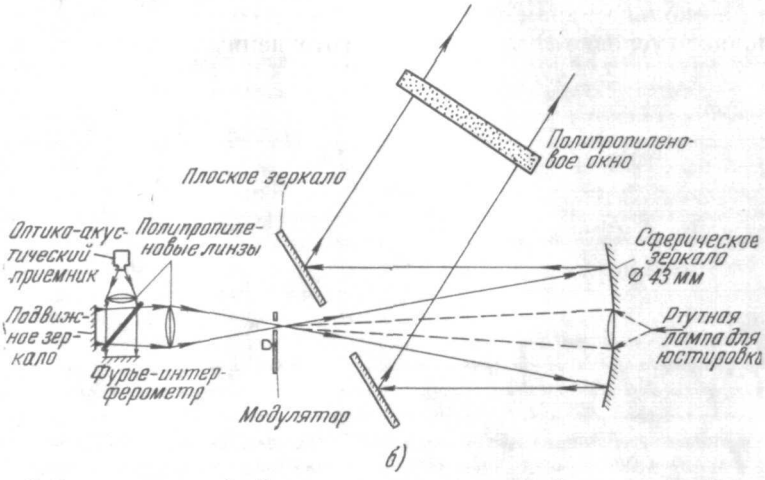


Рис. 10. Субмиллиметровый фурье-спектрометр, разработанный в Национальной физической лаборатории (Англия) [57].

преобразует падающее на него излучение независимо от других. Это обстоятельство приводит, как известно, к изменениям в соотношениях для направленности приема радиометра и для флуктуационного порога чувствительности [52, 58, 59].

Серьезной проблемой является создание эталонных источников излучения в субмиллиметровом диапазоне, необходимых для калибровки радиометров, особенно в области низких температур. Значительные и пока не преодоленные трудности связаны с созданием немеханических модуляторов излучения, аналогичных применяемым в диапазоне СВЧ.

Основные проблемы в разработке техники внеатмосферной субмиллиметровой астрономии вытекают из необходимости выносить приемную аппаратуру за пределы земной атмосферы или по крайней мере частично исключать ее влияние.

Естественно, простейшим способом является подъем радиометров в горы, где в бо́льшую часть года влажность оказывается менее 1 *г/м*^{3}.

Наиболее перспективным, однако, является использование для субмиллиметровых астрономических исследований методов внеатмосферной астрономии. Одним из относительно простых средств является подъем аппаратуры на самолетах и высотных аэростатах. Первые опубликованные результаты применения самолетов и аэростатов для измерений в субмиллиметровой области весьма обнадеживают. Результаты попыток измерения спектра водяного пара на высоте около 12 *км* в диапазоне 15—65 *см*$^{-1}$ (600—1500 *мкм*) [57] приведены на рис. 11. Измерения проводились с помощью субмиллиметрового фурье-спектрометра, упомянутого выше.

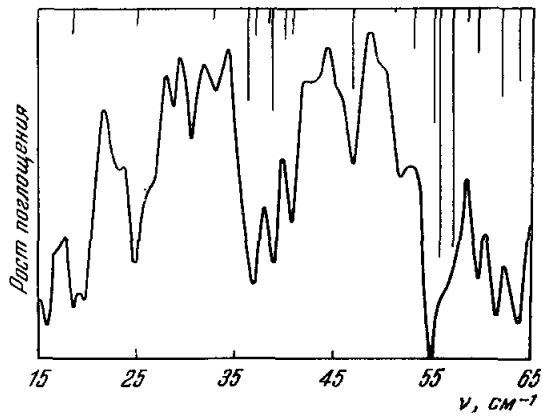


Рис. 11. Субмиллиметровый спектр поглощения земной атмосферы, измеренный на высоте 12 *км* [57].

Аэростатная техника в инфракрасной астрономии получила за последнее время широкое распространение. Принципиальных трудностей в распространении этих методов на область субмиллиметровых волн, во-видимому, нет. Однако жесткие требования к чувствительности радиометров приводят к необходимости разрабатывать для подъема на аэростатах охлаждаемые детекторы. Разумеется, сохраняются трудности ориентации оптических систем.

Первые попытки в этом направлении были сделаны в США [61]. В гондоле стратостата, поднимавшегося на высоту до 30 *км*, был расположен модуляционный радиометр с приемником, представляющим собою германиевый болометр, охлаждаемый жидким гелием. Чувствительность, достигнутая при температуре 1,8° К, составляла $7 \cdot 10^{-14}$ *вт/сек*$^{1/2}$. Интересной особенностью установки являлось использование наружного вакуума для откачки гелиевого дьюара. Измерения проводились в интервале длин волн 300—450 *мкм* с максимумом при 320 *мкм*. Модуляция осуществлялась путем качания отражающего зеркала, поэтому радиоме́тр фиксировал лишь градиенты интенсивности принимаемого излучения. Кроме Луны, не было обнаружено других источников (рис. 12). Верхний предел превышения потока излучения над фоном в интервале 300—360 *мкм* из области 10^{-3} *стер* оказался равным $2 \cdot 10^{-23}$ *вт/см*^{2} *гц*, что указывало на отсутствие дискретных оптически толстых источников диаметром $\geqslant 2°$ с температурой $>10°$ К.

Существенно то, что в этом эксперименте не было обнаружено каких-либо источников излучения атмосферного происхождения, которые могли бы препятствовать стратосферным астрономическим субмиллиметровым измерениям.

Весьма интересны также работы в области внеатмосферной субмиллиметровой астрономии, начавшиеся около двух лет назад в Медонской

обсерватории (Франция) [62]. Используя водородные аэростаты Французского национального центра космических исследований с гондолой, стабилизированной с точностью в 10—20″ по Солнцу или яркой звезде, Медонская группа приступила к исследованию спектра Солнца с разрешением 0,3 $см^{-1}$ в диапазоне 50—2300 *мкм*. Последний полет в начале 1968 г. оказался удачным: был записан спектр Солнца, по которому делались попытки оценить его яркостную температуру. На рис. 13 показан макет аэростатной радиометрической аппаратуры Медонской обсерватории.

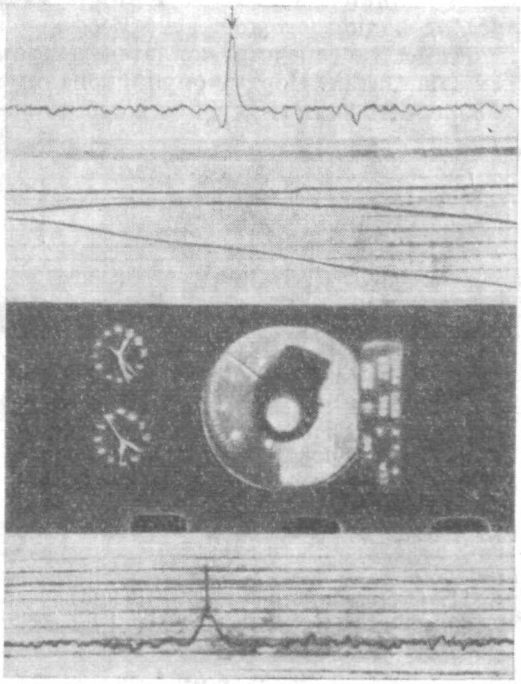


Рис. 12. Запись радиоизлучения Луны в области 300—450 *мкм*, полученная на стратостате с высоты 30 *км* [61].

Первые в Советском Союзе аэростатные эксперименты в субмиллиметровом диапазоне с использованием охлаждаемого до температуры жидкого гелия приемника из сурьмянистого индия были выполнены летом 1968 г. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР [63]. На рис. 14 приведена блок-схема бортового радиометра, разработанного в ФИАН. В двух полетах на высоте 35 *км* осуществлялись вертикальное сканирование лучом с раствором 5° и азимутальные обзоры. Одна из кривых распределения яркостной температуры излучения земной атмосферы в вертикальной плоскости приведена на рис. 15.

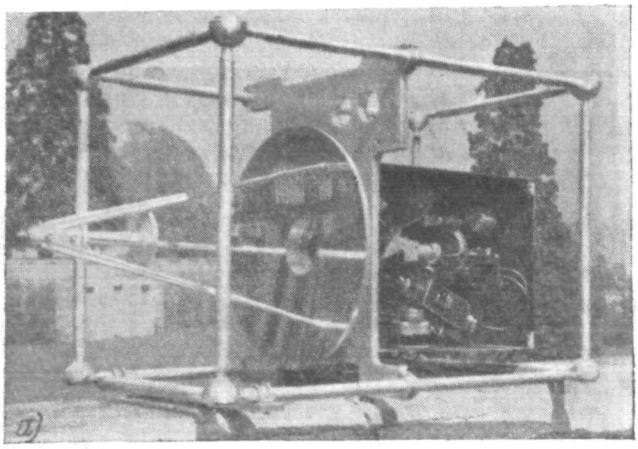
Упомянутые выше трудности внеатмосферных наблюдений существенно возрастают при стремлении использовать для наблюдений ракеты и искусственные спутники.

Две проблемы подлежат решению, и от успехов в этом направлении, очевидно, будут зависеть темпы развития субмиллиметровой астрономии: а) создание зеркальных антенн субмиллиметрового диапазона, снабженных соответствующими механизмами слежения; б) возможность использования на спутниках приемных устройств, охлаждаемых до температуры жидкого гелия.

Что касается создания антенн, то здесь проблемы в некоторых отношениях окажутся, возможно, несколько менее трудными, чем в условиях земной астрономии.

Отсутствие ветровых и весовых нагрузок отчасти облегчает инженерные расчеты. Основные трудности связаны с проблемой монтировки и обеспечения слежения остронаправленной антенной субмиллиметрового телескопа за объектами наблюдения, а также с проблемой устранения тепловых деформаций зеркала, размеры которого для наблюдений дискретных источников излучения было бы желательно довести до 10—20 *м*.

Проблема охлаждения приемника в условиях спутниковой и ракетной аппаратуры достаточно сложна. Потребность охлаждения до температуры 4,2° К (если не будут разработаны полупроводниковые или другие чув-



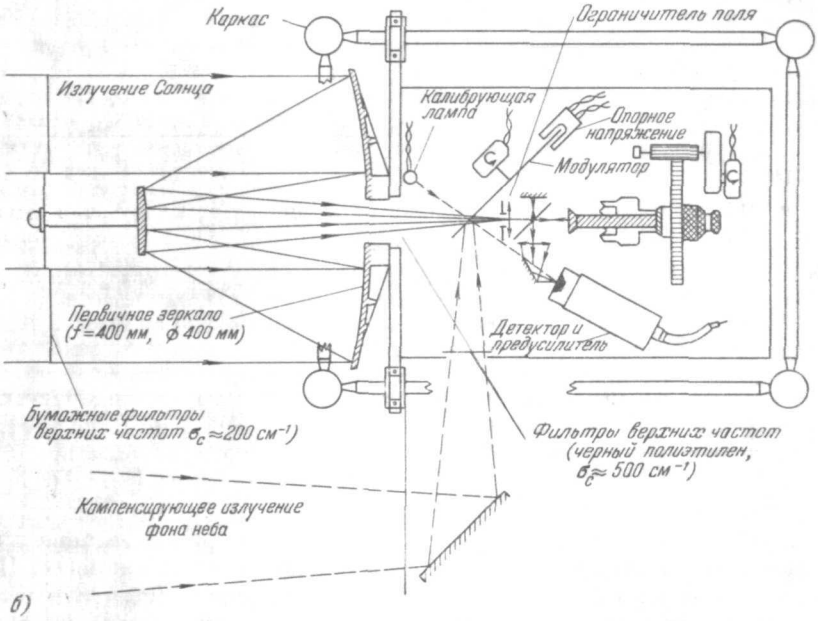


Рис. 13. Макет аэростатной радиометрической аппаратуры Медонской обсерватории.
а) Общий вид аппаратуры; *б)* блок-диаграмма радиометра [62].

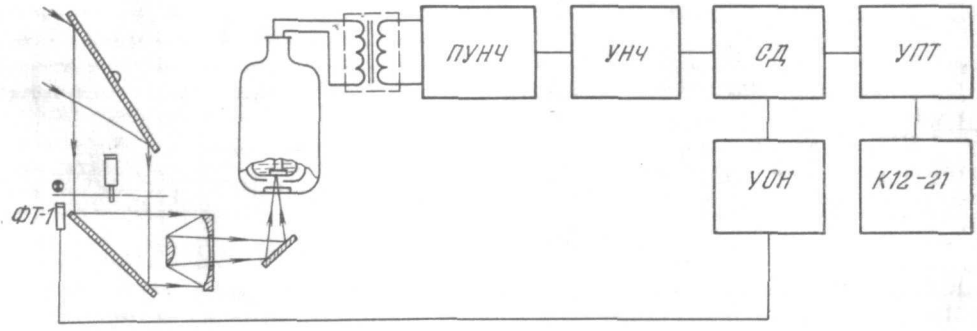


Рис. 14. Аэростатный субмиллиметровый радиометр (ФИАН СССР) [63].

ствительные элементы, для работы которых достаточны более высокие температуры) связана с необходимостью создания объема, заполненного жидким гелием. Сохранение последнего требует либо работы экономичного микроохладителя замкнутого цикла, либо создания криостата, сохраняющего жидкий гелий в течение длительного времени.

В связи с этим интерес представляют результаты методических экспериментов, выполненных в Физическом институте им. П. Н. Лебедева [64, 65].

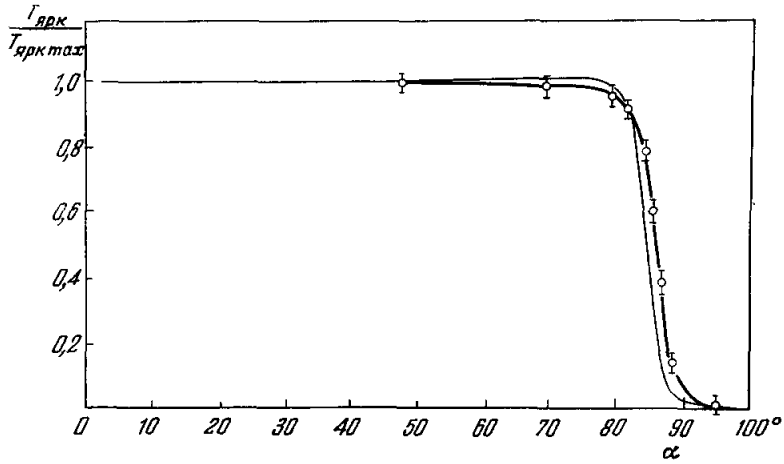


Рис. 15. Кривая распределения яркостной температуры излучения атмосферы Земли $T_{ярк}/T_{ярк\,max}$ в вертикальной плоскости, полученная с высоты 35 *км* [63].

α — угол оптической оси радиометра с надиром. Приведены случайные ошибки измерения (ср. кв.). Полет 27 июня 1968 г. Усреднены 15 записей между 10^h44^m и 11^h27^m. — наблюдения, — расчет по модели атмосферы.

В этих экспериментах проверялись различные методы поддержания температур ниже 10° К на борту спутников.

В первом эксперименте [64] в качестве хладоагента был использован гелий в «закритическом» состоянии — при давлении 2,4 *ата* (начальная температура составляла ~5,2° К). В полете контролировалась температура в шести точках гелиевого контейнера, давление в контейнере и напряженность магнитного поля в двух сверхпроводящих соленоидах. Измерения, выполненные на спутнике «Космос-140», показали, что в условиях орбитального полета, когда имеет место состояние невесомости, такой способ обеспечения низких температур, необходимых для работы сверхпроводящих систем, может успешно использоваться.

Во втором эксперименте [65] проверялась возможность сохранения на борту искусственного спутника Земли жидкого гелия в криостате. Металлический криостат без вспомогательного азотного охлаждения с номинальной емкостью гелиевой ванны в 1,3 *л* был установлен в контейнере ИСЗ.

Сброс испаряющегося газа производился через специальный клапан, поддерживавший в криостате давление ~1,45 *ата*, что соответствовало температуре жидкого гелия 4,6° К. Во время полета измерялась температура внутри гелиевого объема.

Результаты эксперимента подтвердили работоспособность криостата исследованного типа в условиях невесомости, перегрузок и вибраций. Время сохранения жидкого гелия оказалось близким к расчетному (около 1 суток).

Предварительное сообщение о первом эксперименте, выполненном в США в субмиллиметровом диапазоне на геофизической ракете, было опубликовано в ноябре 1968 г. [66]. С помощью ракеты типа «Аэроби» 29 февраля 1968 г. на высоту 170 *км* был поднят небольшой зеркальный телескоп, диаметром 170 *мм*, целиком охлажденный до температуры жидкого гелия. Диапазон волн от 5 *мкм* до 1,3 *мм* перекрывался с помощью четырех полупроводниковых детекторов, в том числе область спектра от 0,4 до 1,3 *мм* — с помощью детектора на сурьмянистом индии. Длинноволновая граница измеряемого спектра определялась сеточным фильтром. Поле зрения кассегреновского телескопа составляло 5°. Детекторы размещались в фокальной плоскости зеркала в полости с отверстием. Излучение, поступавшее в полость, модулировалось камертонным модулятором с частотой 150 *гц*.

Перед запуском и во время активного участка полета верхняя часть телескопа была закрыта заслонкой, охлаждавшейся до весьма низкой температуры. Детектор в это время регистрировал лишь излучение внутренних стенок охлажденного телескопа. На высоте 130 *км* после сброса головного обтекателя ракеты входное отверстие телескопа было открыто и при этом было зарегистрировано отчетливое возрастание сигнала в субмиллиметровом канале (рис. 16). В соответствии с калибровками, выполненными перед стартом, увеличение сигнала интерпретируется авторами как результат появления в интервале 0,4—1,3 *мм* потока излучения плотностью $5 \cdot 10^{-9}$ *вт/см²стер* (с возможной неточностью по потоку ~ 2).

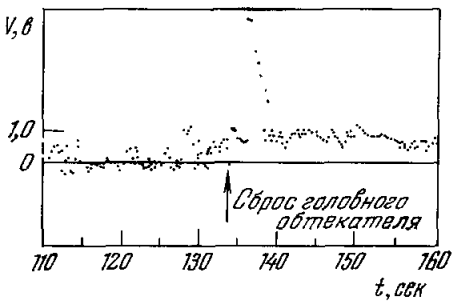


Рис. 16. Телеметрическая запись изменения сигнала на выходе логарифмического усилителя субмиллиметрового канала (0,4—1,3 *мм*) до и после сброса головного обтекателя ракеты (момент сброса указан стрелкой) по данным [66].

Если этот поток приписать космическому фоновому излучению, то его яркостная температура должна составить $8{,}3\,^{+2{,}2}_{-1{,}3}$° К. Измеренный поток космического излучения оказывается почти на два порядка больше, чем следовало бы ожидать при яркостной температуре фонового излучения, близкой к 3° К.

Авторы сообщения приводят ряд аргументов, исключающих другие возможные причины столь сильного возрастания сигнала. В частности, возможная засветка излучением, исходящим от тепловых источников местного происхождения или от Земли, по-видимому, исключается, поскольку детекторы, регистрировавшие излучение в инфракрасном диапазоне, не обнаружили возрастания сигнала при открытии заслонки. С другой стороны, обращает на себя внимание, что возрастание сигнала (см. рис. 16) произошло, возможно, несколько ранее сброса головного обтекателя (его излучение в поле зрения телескопа зарегистрировано в виде пика). Не вполне безупречной представляется и методика измерения, при которой открывание крышки не может не менять условия переизлучения внутри полости телескопа.

Следует подчеркнуть, что столь большая плотность потока космического излучения, обнаруженная в этом эксперименте, находится в серьезном противоречии со всей совокупностью полученных ранее данных. Уже после опубликования результатов ракетного эксперимента [66] было проведено дополнительное, более тщательное измерение верхних пределов

потока космического излучения [60] по упоминавшемуся выше методу сравнения интенсивности близких линий абсорбционного спектра молекул CN, CH и CH^+. Это измерение показало, что яркостная температура фонового излучения на волне $\lambda = 2{,}64$ *мм* с неточностью 0,15° К равна 2,83° К. Яркостные температуры, полученные по измерениям с молекулами CN, CH и CH^+ на волнах 1,32; 0,559 и 0,359 *мм*, не могут превышать соответственно 4,74; 5,21 и 8,11° К. Соответствующие значения верхних пределов плотности потока на указанных волнах оказываются равными: $1{,}92 \cdot 10^{-14}$, $1{,}64 \cdot 10^{-14}$ и $6{,}19 \cdot 10^{-14}$ *эрг·см*$^{-2}\times$ $\times$ *сек*$^{-1}$*стер*$^{-1}$*гц*$^{-1}$. Для волны $\lambda = 2{,}64$ *мм* соответствующая плотность потока составляет $0{,}37 \cdot 10^{-14}$ *эрг·см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$*стер*$^{-1}$ *гц*$^{-1}$.

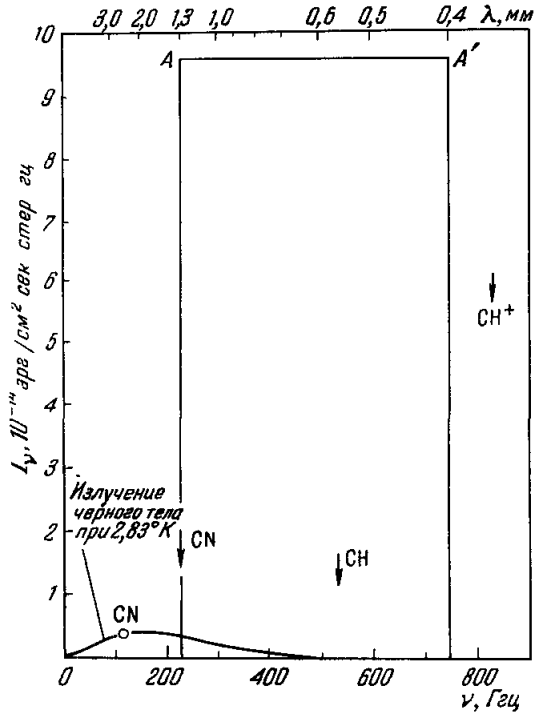


Рис. 17. Интенсивность космического субмиллиметрового излучения по данным сравнительных измерений абсорбционных линий [60] и по ракетному эксперименту [66] (линия AA').

На рис. 17 показаны величины потоков, полученные из анализа интенсивности линий и из ракетного эксперимента (линия AA'). Очевидно резкое несоответствие результатов. Таким образом, первое измерение фонового излучения в субмиллиметровом диапазоне, выполненное методом внеатмосферной астрономии, не только не прояснило ситуацию, но осложнило ее еще больше. Однако этому не следует удивляться. Демонстрируя всю сложность внеатмосферных исследований, этот эксперимент должен рассматриваться как пионерский, за которым, несомненно, последуют другие.

Успехи в технике внеатмосферных субмиллиметровых экспериментов должны приблизить время, когда субмиллиметровая астрономия сможет внести серьезный вклад в познание космоса.

Дополнение при корректуре. За время, прошедшее после написания обзора, появились новые публикации, относящиеся к его теме. В ряде работ уточнены или вновь поставлены астрофизические задачи, нуждающиеся в измерениях в субмиллиметровом диапазоне [67–77]. В работах [78–80] описаны исследования поглощения субмиллиметрового излучения в атмосфере Земли, а в [81–85] рассмотрены аппаратурные проблемы субмиллиметровой астрономии. В дополнение к результатам измерений потока субмиллиметрового космического излучения [65] в области 0,4—1,3 *мм* опубликованы результаты повторения [86] этого эксперимента, а также дополнительные данные [87], подтверждающие существование аномально большого потока излучения в этой области. Обнаружено также интенсивное излучение центра Галактики в областях ~ 100 *мкм* [88] и 5—1500 *мкм* [89]. Неожиданно интенсивное излучение зарегистрировано на борту самолета [90] от Юпитера и Сатурна.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. D. H. Martin, Contemp. Phys. **4**, 139 (1962); **4**, 187 (1963).
2. М. Б. Голант, Р. Л. Виленская, Е. А. Зюлина, З. Ф. Каплун, А. А. Негирев, В. А. Парилов, Т. Б. Реброва, В. С. Савельев, ПТЭ, № 4, 136 (1965).
3. P. D. Coleman, IEEE Trans. **MTT-11** (5), 271 (1963); см. также тематический выпуск журнала Proc. IEEE **54**(4) (1966) (перевод: ТИИЭР **54** (4) (1966)).
4. Я. Б. Зельдович, УФН **89** (4), 647 (1966). В этом обзоре приведена обширная библиография проблемы.
5. А. Г. Дорошкевич, И. Д. Новиков, ДАН СССР **154**, 745 (1964).
6. R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll, D. T. Wilkinson, Astrophys. J. **142**, 414 (1965).
7. R. A. Penzias, E. W. Wilson, Astrophys. J. **142**, 419 (1965).
8. T. F. Howell, J. R. Shakeshaft, Nature **210**, 1318 (1966).
9. T. F. Howell, J. R. Shakeshaft, Nature **216**, 753 (1967).
10. P. G. Roll, D. T. Wilkinson, Phys. Rev. Lett. **16**, 405 (1966).
11. D. J. Welch, S. Keachie, D. D. Thornton, G. Wrixon, Phys. Rev. Lett. **18**, 1068 (1967).
12. R. A. Stokes, R. B. Partridge, D. T. Wilkinson, Phys. Rev. Lett. **19**, 1199 (1967).
13. В. А. Пузанов, А. Е. Саломонович, К. С. Станкевич, Астрон. ж. **44**, 1128 (1967).
14. D. T. Wilkinson, Phys. Rev. Lett. **19**, 1195 (1967).
15. M. S. Ewing, B. F. Burke, D. H. Staelin, Phys. Rev. Lett. **19**, 1251 (1967).
16. P. E. Boynton, R. A. Stokes, D. T. Wilkinson, Phys. Rev. Lett. **21**, 462 (1968).
17. Ю. Н. Парийский, Астрон. ж. **45**, 279 (1968).
18. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, Астрон. ж. **44**, 663 (1967).
19. J. R. Shakeshaft, A. S. Webster, Nature **217**, 339 (1968).
20. R. Weymann, Astroph. J. **145**, 560 (1966).
21. Я. Б. Зельдович, В. Г. Курт, Р. А. Сюняев, ЖЭТФ **55**, 278 (1968).
22. Я. Б. Зельдович, Р. А. Сюняев, Препринт ИПМ АН СССР, ноябрь 1968.
23. G. D. Field, J. L. Hitchcock, Phys. Rev. Lett. **16**, 817 (1966).
24. P. Thaddeus, J. F. Clauser, Phys. Rev. Lett. **16**, 819 (1966).
25. И. Д. Новиков, Астрон. ж. **45**, 538 (1968).
26. Л. П. Грищук, А. Г. Дорошкевич, И. Д. Новиков, ЖЭТФ **55**, 2281 (1968).
27. J. Silk, Astroph. J. **151**, 459 (1967); Nature **215**, 1155 (1967); **218**, 453 (1968).
28. M. S. Longair, R. A. Sunyaev, Nature **223**, 719 (1969).
29. R. B. Partridge, D. T. Wilkinson, Phys. Rev. Lett. **18**, 557 (1967).
30. E. K. Conklin, R. N. Bracewell, Nature **216**, 777 (1967); Phys. Rev. Lett. **18**, 614 (1967).
31. E. E. Epstein, Astrophys. J. **148**, 158 (1967).
32. A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, D. D. Thornton, D. J. Welch, Phys. Rev. Lett. **21**, 170 (1968).
33. Н. С. Кардашев, Астрон. ж. **36**, 838 (1959).
34. Р. Л. Сороченко, Э. В. Бородзич, З. В. Дравских, А. Ф. Дравских, В. А. Колбасов, Доклады на XII Ген. Ассамблее МАС (Гамбург, 1964), D. Reidel Publ. Co., Doordrecht, Holland, 1965.
35. Р. Л. Сороченко, В. А. Пузанов, А. Е. Саломонович, В. Б. Штейншлейгер, Препринт ФИАН (1968); Astrophys. Lett. **3**, 7 (1969).
36. J. E. Beckman, J. A. Bastin, P. G. Clegg, Nature, **221**, 944 (1969).
37. K. I. Kellermann, I. I. K. Pauliny-Toth, Astrophys. J. **152**, 639 (1968).
38. F. J. Low, Report to XIII Gen. Ass. IAU (Prague, 1967), Highlights of Astronomy (L. Perek, Ed.), D. Reidel Publ. Co., Doordrecht, Holland, 1963.
39. F. J. Low, W. H. Tocker, Phys. Rev. Lett. **21**, 1538 (1968).
40. И. Л. Бейгман, Л. А. Вайнштейн, Р. А. Сюняев, УФН **95** (21), 267 (1968).
41. Л. А. Вайнштейн, Р. А. Сюняев, Препринт ФИАН № 134 (1967).
42. С. А. Жевакин, А. П. Наумов, Изв. вузов (Радиофизика) **6**, 674 (1963).
43. P. Turon-Lacarrieu, J. P. Verdet, Ann. d'astrophys. **31**, 237 (1968).
44. E. H. Putley, Proc. IEEE **11**, 1412 (1963).
45. J. F. Moser, H. Steffen, F. K. Kneubühl, Helv. Phys. Acta **41**, 607 (1968) (см. перевод в этом выпуске УФН на стр. 469).
46. Ю. А. Дрягин, Л. И. Федосеев, Изв. вузов (Радиофизика) **12**, 873 (1969).

47. C. Y. Chang, D. Lester, Proc. IEEE 54, 459 (1966).
48. F. J. Low, Proc. IEEE 51, 596 (1965); 54, 477 (1966).
49. J. A. Bastin, A. E. Gear, Proc. Roy. Soc. 296, 349 (1967).
50. Е. И. Попов, Изв. вузов (Радиофизика) 8, 862 (1965).
51. Е. К. Карлова, Н. В. Карлов, ПТЭ, 2, 191 (1966).
52. R. A. Williams, W. S. C. Chang, IEEE Trans. MTT-11, 513 (1963).
53. А. Н. Выставкин, В. Н. Губанков, В. Н. Листвин, В. В. Мигулин, Изв. вузов (Радиофизика) 11, 602 (1968).
54. M. A. Kinch, Appl. Phys. Lett. 12, 78 (1968).
55. Е. А. Виноградов, Е. М. Дианов, Н. А. Ирисова, Письма ЖЭТФ 2, 323 (1965).
56. Н. А. Ирисова, Вест. АН СССР 10, 63 (1968).
57. M. Bater, R. M. Cameron, W. J. Burroughs, H. A. Gebbie, Nature 214 377, (1967).
58. Н. В. Карлов, А. М. Прохоров, Радиотехника и электроника 9, 2088 (1964).
59. В. С. Аблязов, Е. И. Попов, Изв. вузов (Радиофизика) 10, 654 (1967).
60. V. J. Bortolot, J. F. Clauser, P. Thaddeus, Phys. Rev. Lett. 22, 307 (1968).
61. N. J. Woolf, W. F. Hoffmann, G. L. Frederick, F. J. Low, Report at Discussion Meeting on Infrared Astr. London, May 1—2, 1967; Science 157, 187 (1967).
62. J. Lequex et al., Препринт Медонской обсерватории (1968); Astrophys. Lett. 2, 169 (1968).
63. В. И. Лапшин, А. Е. Саломонович, С. В. Соломонов, В. Ф. Троицкий, А. Б. Фрадков, А. С. Хайкин, Препринт ФИАН № 63 (1969).
64. О. А. Анашкин, Б. М. Белицкий, В. Б. Бродский, Л. В. Курносова, Н. М. Михайлов, Л. А. Разоренов, Т. М. Сидякина, М. И. Фрадкин, Косм. исслед. 6, 132 (1968).
65. А. Б. Фрадков, В. Ф. Троицкий, Г. Н. Михайлова, Н. Н. Иноземцев, В. В. Свистельник, Препринт ФИАН № 174 (1968).
66. K. Shivanandan, J. R. Houck, M. O. Harwit, Phys. Rev. Lett. 21, 1460 (1968).

ЛИТЕРАТУРА, ДОБАВЛЕННАЯ ПРИ КОРРЕКТУРЕ

67. P. Lena, Ann. d'astrophys. 29, 361 (1966).
68. R. W. Noyes, Phil. Trans. Roy. Soc. (London) A264 (No. 1150), 205 (1969).
69. H. A. Gebbie, W. J. Burroughs, ibid., стр. 307.
70. P. E. Clegg, R. A. Newstead, L. A. Bastin, ibid., стр. 293.
71. R. D. Davies, ibid., стр. 251.
72. P. J. E. Peebles, ibid., стр. 279.
73. A. A. Penzias, J. Schrame, R. W. Wilson, Astrophys. J. 157, L49 (1969).
74. G. R. Henry, R. B. Feduniak, L. E. Silwer, M. A. Peterson, Phys. Rev. 176 (5), 1451 (1968).
75. J. J. Condon, M. Harwit, Phys. Rev. Lett, 20 (23), 1309; 21 (1), 58 (1968).
76. R. N. Bracewell, E. H. Conclin, Nature 219, 1343 (1968).
77. E. H. Conclin, Nature 222, 971 (1969).
78. W. J. Burroughs, J. E. Harries, H. A. Gebbie, Nature 222 (No. 5194), 658 (1969).
79. Y. Biraud, J. Gay, J. P. Verdet, Y. Zéau, Astron. and Astrophys 2, 413 (1969).
80. А. П. Наумов, В. С. Станкевич, Изв. вузов (Радиофизика) 12 (2), 181 (1969).
81. M. Harwit, J. R. Houck, H. Fuhrmann, Appl. Opt. 8, 473 (1969).
82. Н. А. Панкратов, Г. А. Зайцев, И. А. Хребтов, Оптико-мех. пром., № 1, 23 (1969).
83. Ю. А. Дрягин, А. Ф. Крупнов, Л. М. Кукин, В. А. Скворцов, ПТЭ, № 1, 95 (1969).
84. I. Melngailis, P. E. Tannenwald, Proc. IEEE 57, (No. 5), 806L (1969).
85. P. B. Fellgett, Phil. Trans. Roy. Soc. (London) A264 (No. 1150), 309 (1969).
86. J. R. Houck, M. Harwit, Astrophys. J. 157, 145 (1969).
87. J. R. Houck, M. Harwit. Science, 164 (No. 3885), 1271 (1969).
88. W. F. Hoffmann, C. L. Frederick, Astrophys. J. 155, L9 (1969).
89. F. J. Low, D. E. Kleinmann, F. F. Forbes, H. M. Aumann, Astrophys. J. 157, L97 (1969).
90. H. H. Aumann, C. M. Gillspie Jr., F. J. Low, Astrophys. J. 157, L69 (1969).