1970 г. Декабрь *Том 102, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.038

ГАММА-АСТРОНОМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ *)

Г. Фацио

Задачи астрономии в гамма-лучах с энергией свыше 10 Мэв с экспериментальной точки зрения чрезвычайно трудны, но, как показывает настоящий обзор, в этой области уже появились первые обнадеживающие результаты.

В конце пятидесятых годов сложился взгляд, что исследование космических гамма-квантов с энергией свыше 10 *Мэв* станет многообещающей новой отраслью астрономической науки, средством для получения оригинальной информации о структуре Вселенной [1], невзирая на трудности, связанные с тем, что первичное гамма-излучение можно регистрировать только за пределами атмосферы Земли. Поводов для энтузиазма было несколько. Теоретические расчеты показывали, что во многих из известных источников радиоизлучения должны иметься протоны высоких энергий, которые во взаимодействиях могут рождать заметные потоки гамма-квантов. Другим заманчивым механизмом рождения гамма-лучей могла быть аннигиляция вещества и антивещества в стационарной модели Вселенной; предположение о том, что радиоисточник Лебедь А может оказаться сталкивающимися галактиками из вещества и антивещества, действовало на экспериментаторов подобно шпорам. Кроме того, жесткие гамма-кванты обладают большой проникающей способностью и приходят к наблюдателю по прямой линии от источника; можно поэтому регистрировать испускание их источниками, удаленными на космологические расстояния, а также источниками, невидимыми в других областях спектра. Гамма-кванты проникают также и в верхнюю атмосферу до глубин, достаточных для их регистрации приборами на высотных баллонах. К этому времени в лабораториях высоких энергий уже существовала аппаратура, способная измерять предсказываемые теорией потоки гамма-квантов; необходимо было только сделать ее достаточно надежной и компактной для экспериментов на высотных баллонах и спутниках.

Это новое поле деятельности привлекло многих ученых, занимавшихся космическими лучами и ядерной физикой; начались поиски гамма-источников. Прошло почти десять лет, заполненных напряженной работой и принесших много разочарований. Как на баллонах, так и на спутниках применялись и сцинтилляционные счетчики, и ядерные эмульсии, и искровые камеры, однако немногочисленные сообщения о якобы открытых

*) G. G. Fazio, High-Energy Gamma-Ray Astronomy, Nature 225, 905 (1970). Перевод и примечания Ю. А. Гурьяна.

Автор статьи Г. Фацио — сотрудник Смитсоновской астрофизической обсерватории и обсерватории Гарвадского колледжа, Кембридж, Массачусетс.

источниках так и не были подтверждены. Были определены лишь верхние пределы потока гамма-излучения для большинства подозреваемых радиоисточников. Это давало, разумеется, весьма существенную информацию об этих источниках, но не заменяло прямых измерений потоков. Наконец, в 1968 г. были опубликованы чрезвычайно убедительные доказательства существования диффузного потока жестких гамма-лучей из плоскости Галактики. Эксперимент, о котором идет речь, был проведен Кларком, Гермайром и Краушааром [2] на борту Третьей орбитальной солнечной обсерватории (OSO-3) при помощи сложного сцинтилляционно-черенковского детектора. В 1969 г. американо-австралийская группа *), поставив совместный эксперимент на высотных баллонах, получила доказательства существования точечного гамма-источника в созвездии Стрельца [3].

Моррисон [4] указал (правда, задним числом), что, поскольку спектр космического электромагнитного излучения, построенный в виде зависимости интенсивности в единичном частотном интервале от частоты, монотонно спадает с ростом последней, прежде всего следует изучать гамма-лучи минимальных после видимой части спектра энергий, исключая энергии, для которых данная область Галактики малопрозрачна. С этой точки зрения следовало ожидать, что первые важные результаты в астрономии высоких энергий даст исследование рентгеновского излучения с энергией порядка 1000 *эв*. Так это и произошло в действительности. Космическое рентгеновское излучение, открытое Джаккони, Гурским, Паолини и Росси [5] в 1962 г.— спустя лишь несколько лет после начала гамма-астрономических исследований,— указало астрономии высоких энергий обширное поле деятельности. В коротковолновой области спектра было зарегистрировано изотропное диффузное излучение в области энергий от 0,2 *кэв* до 6 *Мэв*; было обнаружено излучение дискретных источников (например, Крабовидная туманность, Лебедь XR-1, M 87) с энергией вплоть до 500 *кэв* **). В информации о космическом электромагнитном излучении ныне выявились «бреши» в области спектра от 1 до 50 *Мэв* и свыше 1 *Гэв* (10^9 *эв*) ***).

ОБЛАСТЬ ЭНЕРГИЙ ОТ 10 *Мэв* ДО 1 *Гэв*

Ныне вполне доказано существование жесткого (>100 *Мэв*) гамма-излучения из плоскости и, в частности, центра Галактики. Проведенные на OSO-3 [2,6] измерения направления прихода этого излучения чрезвычайно убедительны (рис. 1 и 2). При разрешении прибора в $\pm 15°$ угловое распределение излучения согласуется с предположением о линейном источнике вдоль плоскости Галактики при наиболее сильной эмиссии из ее центра. Однако распределение по долготе гораздо шире, чем ожидается для точечного источника в центре Галактики. Из данных следует также наличие заметных пиков меньшей интенсивности вдоль галактического экватора. Средняя интенсивность линейного источника в областях, отстоящих более чем на 60° от центра Галактики, составляет примерно 25% линейной интенсивности вблизи центра. Что же касается полу-

*) Case Western Reserve University, Cleveland; University of Melbourne.

**) В работе [63] приведен каталог всех обнаруженных дискретных рентгеновских источников (около 60) по состоянию на 1 декабря 1969 г.

***) В области энергий от сотен *кэв* до десятков *Мэв* существуют большие экспериментальные трудности в создании детекторов, способных определять направление прихода квантов. Измерения потока космического излучения в этой области энергий при помощи детекторов с изотропной чувствительностью были выполнены на КА «Рейнджер-3» [64, 65] и ИСЗ «Космос-135» [66]. На ИСЗ ERS-18 были получены ориентировочные спектральные характеристики излучения [67, 68]. На баллонах [69] предпринята попытка измерений с детектором, обладающим направленными свойствами.

ченного в эксперименте абсолютного значения интенсивности излучения из области, включающей центр Галактики ($3 \cdot 10^{-4}$ *см*$^{-2}$ *сек*$^{-1}$ *рад*$^{-1}$), то оно пока не кажется несомненным. Имеется расхождение между значениями потока альбедо Земли, измеренными на OSO-3 и полученными на спутнике «Эксплорер-11» и высотных баллонах. Результаты OSO-3

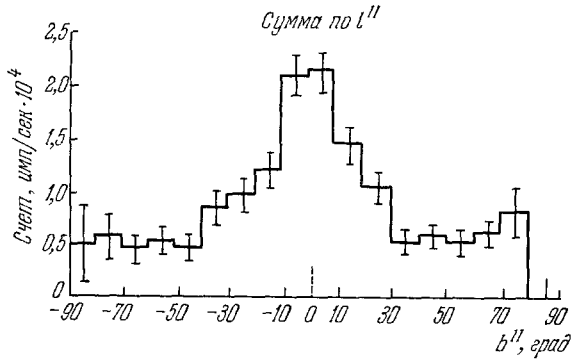

Рис. 1. Данные OSO-3, демонстрирующие зависимость интенсивности гамма-излучения, суммированной по всем галактическим долготам, от галактической широты.

в четыре раза выше полученных по данным «Эксплорера-11» и в три раза выше полученных Фихтелом, Ниффеном и Эгельманом [7]. Несколько

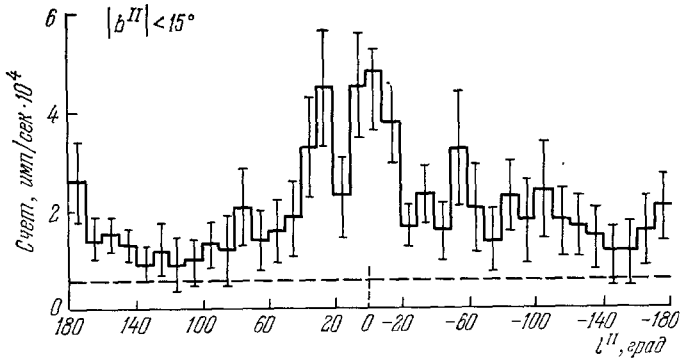

Рис. 2. Данные OSO-3, демонстрирующие зависимость интенсивности гамма-излучения от галактической долготы вблизи диска. Пунктирная линия — средняя скорость счета на высоких галактических широтах.

групп исследователей [3,7-10], работавших на высотных баллонах, представили дополнительные доказательства в пользу данных OSO-3, полученные, однако, на пределе статистической точности. Последние результаты эксперимента, поставленного Саутгемптонским университетом на спутнике OGO-5 [11], также указывают на максимум интенсивности гамма-излучения в направлении плоскости Галактики. В табл. I сравниваются результаты двух таких групп с результатами OSO-3 для области центра Галактики. Особенно важными представляются недавние результаты Фрая и др. [3], которые смогли согласовать свои данные с результатами OSO-3 только при предположении, что линейный источник имеет полуширину в 15°, а его интенсивность меньше по крайней мере вчетверо.

Таблица I

Измерение линейной интенсивности гамма-излучения вблизи центра Галактики

Эксперимент	Область энергии, *Мэв*	Линейная интенсивность гамма-излучения, 10^{-4} *см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$*рад*$^{-1}$, для данного интервала галактической широты		Галактическая долгота l^{II}	
		$b^{II} = \pm 15°$	$b^{II} = \pm 3°$	от	до
Кларк, Гермайр, Краушаар [6], спутник OSO-3	>100	3	—	$-30°$	$+30°$
Фихтел, Ниффен, Эгельман [7], баллон	от 30 до 100	$0{,}9^{+2{,}2}_{-0{,}9}$	—	$-10°$	$+25°$
Фрай, Стейб, Зик, Хоппер, Роулинсон, Томас [3], баллон	>100 >50	$2{,}4\pm2{,}4$ $\leqslant 0{,}7$ *)	$2{,}2\pm1{,}1$ $\leqslant 0{,}3$ **)	$-30°$	$+30°$

*) Верхний предел при 95%-ном доверительном уровне.
**) $b^{II} = \pm 2{,}3°$.

Эти расхождения сейчас пытаются устранить путем перекалибровки спутниковых и баллонных детекторов и контрольных запусков баллонов в Австралии.

Данные OSO-3 указывают также на существование изотропной компоненты космического гамма-излучения с фоновой интенсивностью $(1{,}1 \pm 0{,}2)\cdot 10^{-4}$ *см*$^{-2}$ *сек*$^{-1}$ *стер*$^{-1}$, но измерение ее затруднено и не заслуживает такого же доверия, как измерение галактического потока. Интересно отметить, что в пределах указанных выше ошибок величина этого потока согласуется с величиной, предсказываемой по экстраполяции степенным законом изотропного потока рентгеновских лучей в область более высоких энергий. Интенсивность квантов на единичный энергетический интервал может быть аппроксимирована спектром в форме dE/E^2; это дает равные количества энергии на десятичный разряд энергии квантов.

Спектральные измерения, правда, при довольно плохом разрешении, показывают, что гамма-излучение из плоскости Галактики является в среднем более жестким, чем изотропная компонента излучения при высоких галактических широтах *).

В области энергий выше 1 *Гэв* известен только верхний предел для потока гамма-лучей, который был определен главным образом в баллон-

*) Измерения жесткого космического гамма-излучения на ИСЗ «Космос-208» [70, 71] дали следующие верхние пределы для его интенсивности:

E_γ, *Мэв*	I_γ, *см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$*стер*$^{-1}$
$\geqslant 50$	$(1{,}0\pm0{,}3)\cdot10^{-4}$
$\geqslant 90$	$(5{,}3\pm2{,}2)\cdot10^{-5}$
$\geqslant 150$	$(1{,}3\pm0{,}9)\cdot10^{-5}$
$\geqslant 500$	$(4{,}6\pm3{,}4)\cdot10^{-6}$

Оценка истинной величины интенсивности первичных гамма-квантов, полученная методом линейного регрессионного анализа, приводит к значению I_γ ($E_\gamma \geqslant 50$ *Мэв*), составляющему около половины указанной выше величины. Это значение в несколько раз ниже, чем величина, определенная из данных OSO-3.

ных опытах с ядерными эмульсиями [12-15]. Эксперименты по широким атмосферным ливням, основанные на регистрации ливней с малым числом μ-мезонов, дали для интенсивности изотропных гамма-лучей в области энергий 10^{14} — 10^{16} *эв* верхний предел, равный 10^{-13} *см*$^{-2}$ *сек*$^{-1}$ *стер*$^{-1}$ [16, 17]. Однако недавно было показано [18], что такие ливни могут вызываться и не космическими гамма-лучами.

Полученные верхние пределы изотропного потока гамма-лучей в области энергий от 50 *Мэв* до 1 *Гэв* дают основания для двух важных выводов.

1. Если вещество образуется непрерывно, как того требует модель стационарной Вселенной, то в пределах Метагалактики вещество и антивещество не могут образовываться в сравнимых количествах в одной и той же области. Данные «Эксплорера-11» и OSO-3 показывают, что отношение плотностей антипротонов и протонов не может превосходить величины 10^{-6}. Стейгман [19] показал, что если считать справедливой модель зарядово-симметричной стационарной Вселенной, то вещество и антивещество должны образовываться в различных районах или, по предположению Хойла [20], антивещество должно образовываться в плотных областях, например в центрах галактик; в таких областях аннигиляционное излучение сильно поглощается и поэтому делается недоступным для регистрации.

2. Из этих же экспериментов следует, что плотность электронов высоких энергий в межгалактическом пространстве по крайней мере в 10 раз ниже их плотности внутри Галактики. Этот вывод основан на предсказаниях величины потока, возникающего при комптоновском рассеянии электронов высоких энергий на фотонах видимого света *).

Существование дискретного источника гамма-излучения с энергией выше 50 *Мэв* в созвездии Стрельца доказано не столь надежно, как существование галактической компоненты излучения. Для этого источника, обозначенного как Sgr γ-1, получено значение интенсивности $(3 \pm 1)\cdot 10^{-5}$ *см*$^{-2}$ *сек*$^{-1}$; его приблизительное местоположение задается координатами $\alpha = 288° \pm 3°$ и $\delta = -35° \pm 2°$ ($l^{II} = 3°$, $b^{II} = -20°$). Данные о существовании этого источника были получены на пределе статистической точности в обоих запусках высотных баллонов, выполненных в Австралии в феврале 1969 г. с интервалом в 21 день. В этих полетах использовались два разных экземпляра одинакового по устройству детектора, включавшего многоэлектродную искровую камеру, а данные полетов анализировались отдельно; эти меры исключали систематические ошибки.

Возможность детектирования источника в присутствии атмосферного фона основывается на двух фактах. Во-первых, при разбиении угла зрения прибора на ячейки равного телесного угла ($\Delta\alpha = 4°$, $\Delta \sin\delta = 0{,}08$) максимальное число как парных, так и одиночных треков наблюдались в первом полете в пределах одной ячейки. (Гамма-квант, рождая при взаимодействии с веществом пластины искровой камеры электрон-позитронную пару, образует треки, имеющие форму перевернутого V. При росте энергии кванта треки членов пары невозможно разрешить, в результате чего в камере образуется одиночный трек.) Во-вторых, максимальный сигнал во втором полете наблюдался, с точностью до размеров ячейки телесного угла, при тех же значениях склонения и прямого восхождения, что и в первом полете. Эти данные сведены в табл. II. Эффект, приписываемый источнику, в каждом полете по отдельности имеет низкий уровень

*) Имеется в виду обратный комптоновский эффект, при котором значительная часть энергии электрона передается световому фотону, превращая его в жесткий гамма-квант.

Таблица II

Данные по гамма-источнику в созвездии Стрельца, полученные Фраем и др.[3] при помощи искровой камеры

	Число событий (пары + одиночные треки) на равную ячейку телесного угла		Пуассоновская вероятность
	источник	фон	
Первый полет (5—6 февраля 1969 г.)	57	36,7±1,0	0,2
Второй полет (26—27 февраля 1969 г.)	54	33,4±1,0	0,1
Сумма	111	70,1±1,4	$8\cdot10^{-4}$

значимости, но если рассмотреть оба полета в совокупности, его присутствие явно видно.

В литературе имеется еще несколько указаний на возможное обнаружение дискретных источников излучения с энергией выше 50 *Мэв* (таких, как источник в созвездии Лебедя [21], обнаруженный в 1966 г.) *). Эти источники, как правило, наблюдались только в одном полете. При рассмотрении этих экспериментов, выполненных весьма компетентными исследователями, не удается выявить явных ошибок в их данных. Одним из объяснений, к которому до сих пор еще не прибегали, считая его слишком легким выходом из положения, является предположение о переменных во времени источниках. Однако, имея в виду недавно обнаруженные факты внезапного появления новых источников рентгеновского излучения, к рассмотрению идеи о гамма-источниках с переменной во времени интенсивностью стоит, по-видимому, отнестись серьезно. После успешного запуска баллона проходит по крайней мере 4—6 месяцев, прежде чем результаты опыта становятся известными другим группам исследователей. Если же открыт новый источник, то нужно еще несколько месяцев, чтобы другая группа смогла подтвердить эти результаты. Если источник имеет время жизни порядка одного месяца, как у некоторых рентгеновских звезд, то удастся подтвердить существование лишь очень немногих источников. Единственным выходом из положения оказывается длительная экспозиция детекторов на спутниках.

ГАММА-АСТРОНОМИЯ ПРИ ЭНЕРГИЯХ СВЫШЕ 10^{11} *эв*

Космические гамма-кванты с энергией свыше 10^{11} *эв*, взаимодействуя с атмосферой, рождают каскады частиц высокой энергии и видимый черенковский свет, причем и то и другое можно зарегистрировать наземными приборами. Хотя ожидаемая интенсивность гамма-квантов в этой области енергий значительно ниже, чем для энергий в районе 100 *Мэв*, экспериментаторов привлекает простота и относительно низкая стоимость оборудования. Кроме того, теоретические оценки, основанные на рассмотрении комптоновского рассеяния в радиоисточниках, предсказывают потоки излучения, доступные для обнаружения.

Начиная с 1960 г., несколько групп исследователей [22-26] начали применять такую наземную технику для поисков дискретных источников гамма-излучения, в частности для поисков излучения от интенсивных радиоисточников. В более недавнее время особое их внимание привлекли

*) Особого внимания заслуживают опыты по обнаружению жесткого гамма-излучения в рассматриваемой области энергий от пульсаров (см., например, работу [72] по Крабовидной туманности).

пульсары, так как обнаружение их излучения в этой области энергий, конечно, подняло бы доверие к теории о пульсарах как источнике космических лучей. Хотя и были получены некоторые указания на положительные результаты как по непрерывному, так и по пульсирующему излучению [23, 26–29], они впоследствии не получили подтверждения [30, 31]. Полученные недавно в Смитсоновской астрофизической обсерватории значения верхних пределов для потока от Крабовидной туманности [32] оказались в пятнадцать раз ниже предсказываемых теорией [33, 34] потоков.

Конечно, и эти отрицательные результаты оказались весьма ценными для объяснения процессов, идущих, в частности, в Крабовидной туманности. Они показали следующее:

1) электроны высоких энергий в Крабовидной туманности не могут быть продуктом вторичных взаимодействий протонов, а должны ускоряться от более низких энергий [22, 35, 36];

2) если полагать, что излучение Крабовидной туманности во всем спектре от радиоволн до видимого света является синхротронным, то среднее магнитное поле в туманности должно быть выше чем $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ *гс* [37].

ПОЛОЖЕНИЕ ДЕЛ В ТЕОРИИ

Существуют два основных механизма рождения гамма-лучей высокой энергии: во-первых, взаимодействия частиц, при которых их кинетическая энергия переходит в энергию квантов, и, во-вторых, аннигиляция вещества и антивещества.

В первом случае конкретными процессами рождения квантов являются тормозное излучение и комптоновское рассеяние электронов высоких энергий (электромагнитное взаимодействие) и рождение нейтральных π-мезонов при столкновениях высокоэнергичных протонов (сильное взаимодействие). Во втором случае при аннигиляции протонов и антипротонов рождаются заряженные и нейтральные π-мезоны; нейтральный же π-мезон распадается на два гамма-кванта. Сводка свойств этих взаимодействий дана в табл. III.

Таблица III

Взаимодействия, рождающие гамма-излучение высокой энергии *)

Взаимодействие	Интенсивность пропорциональна произведению	Характеристическая энергия гамма-излучения	Дифференциальный спектр гамма-излучения
Тормозное излучение	$(I_e)(\rho_g)$	E_e	$E_\gamma^{-\Gamma_e}$
Комптоновское рассеяние	$(I_e)(\rho_{ph})$	$\gamma_e^2 \varepsilon$; $\gamma_e \varepsilon \ll m_e c^2$	$E_\gamma^{-(\Gamma_e+1)/2}$
Распад π^0-мезонов	$(I_p)(\rho_g)$	70 *Мэв*	Пик при 70 *Мэв*; $E_\gamma^{-4(\Gamma_p-1/2)/3}$ для $E_\gamma \gg 70$ *Мэв*
Аннигиляция вещества — антивещества	$(\rho_p)(\rho_{\bar{p}})$	70 *Мэв*	Острый пик при 70 *Мэв*

*) Здесь $I_e = K_e E_e^{-\Gamma_e}$ и $I_p = K_p E_p^{-\Gamma_p}$ есть дифференциальные спектры интенсивности соответственно электронов и протонов; ε — энергия фотонов низкой энергии; $m_e c^2$ — энергия покоя электрона; ρ_i — плотности газа (g), фотонов низкой энергии (ph), протонов (p) и антипротонов ($\bar{p}$); $\gamma_e = E_e/m_e c^2$.

В настоящее время усилия теоретиков направлены прежде всего на объяснение величины потока в области энергий около 100 *Мэв* от

плоскости и центра Галактики. До открытия этого излучения в основе наиболее оптимистических и надежных расчетов потока галактических гамма-лучей лежало рассмотрение процесса рождения нейтральных π-мезонов при столкновениях протонов космических лучей с межзвездным газом. Если полагать, что поток протонов одинаков во всей области галактического диска, то поток гамма-квантов должен быть пропорционален полной толщине слоя межзвездного водорода вдоль луча зрения детектора. В этих расчетах интенсивность протонов полагали равной интенсивности, измеренной вблизи Земли, а плотность газа получали из радиоизмерений на волне 21 *см*. Однако поток, полученный в опыте на OSO-3, в десять раз превосходит предсказанную таким образом величину, а зависимость от галактической долготы оказывается больше расчетной. Это расхождение может быть вызвано большими количествами холодного или молекулярного водорода [38] либо повышенной интенсивностью космических протонов в области диска Галактики. Оно может также быть уменьшено в три-четыре раза, если измерения потока действительно окажутся, как уже указывалось, завышенными *). Теоретическая оценка, основанная на обычных предположениях о плотности газа и интенсивности космических лучей, может быть повышена вдвое, но никак не больше. Кроме того, даже если удастся объяснить интенсивность потока гамма-лучей, распределение ее по галактической долготе трудно понять в рамках теперешней модели, основанной на рождении π-мезонов.

Тормозное излучение космических электронов в межзвездном газе при предположениях, аналогичных используемым в расчетах с протонами, дает величину потока, в сто раз меньшую данных OSO-3.

Комптоновское рассеяние [39, 40] (обратный комптон-эффект) космических электронов на световых фотонах, испускаемых звездами, либо на микроволновом (2,7° К) реликтовом излучении не может объяснить наблюдаемый поток. Однако Коусик, Пел [41] и Шен [42] показали, что комптоновское рассеяние на инфракрасном (8° К) излучении черного тела, о котором сообщали Шиванандан, Хаук и Харуит [43], может дать величины потока гамма-лучей, близкие к измеренным по интенсивности и угловому распределению в плоскости Галактики. Поток же из галактического центра удается объяснить, только предположив, что в нем имеется дополнительный интенсивный источник инфракрасного излучения или что центр Галактики является сильным источником космических лучей. Однако факт существования метагалактического или даже галактического инфракрасного излучения с такой температурой и интенсивностью пока вызывает сомнения.

Интересно отметить, что измеренный поток гамма-излучения по долготному распределению подобен нетепловому радиошуму [6] на волне 1,5 *м* и интегральному потоку от дискретных рентгеновских источников, расположенных в пределах 15° от плоскости Галактики. Используя последний факт, Эгельман [44] получил согласие с наблюдаемым потоком гамма-излучения, экстраполируя эти рентгеновские спектры к энергии 100 *Мэв* (на три порядка) и приняв для спектра степенной закон с показателем 2. Хотя законность упомянутой экстраполяции и сомнительна, сама идея о том, что поток гамма-излучения вызван группой неразрешенных дискретных источников в галактической плоскости (какова бы ни была их природа), выглядит интересной и многообещающей [2, 45].

В работе Кларка и др. [6] приведен подробный обзор этих теоретических расчетов.

---

*) Результаты, полученные на ИСЗ «Космос-208» (см. примечание к стр. 624), свидетельствуют, по-видимому, в пользу такого предположения.

Теоретические объяснения изотропного потока гамма-квантов предположительно метагалактического происхождения основываются на данных измерений в области 100 *Мэв*, проведенных на OSO-3 , и на экстраполяции по степенному закону в эту область энергий данных по рентгеновскому излучению с энергией 100 *кэв* — 1 *Мэв*. Наиболее приемлемым объяснением этого потока является комптоновское рассеяние метагалактических релятивистских электронов на фоновом микроволновом (2,7° K) излучении [46]. В высшей степени неопределенной является в этих расчетах интенсивность релятивистских электронов, которые, как полагают, идут из радиогалактик. Предпринималось несколько попыток поместить источник этого гамма-излучения в ранние эпохи (с красным смещением $z \geqslant 2$) с тем, чтобы удовлетворить энергетическим требованиям и согласовать их с наблюдаемым спектром. В частности, Стекер показал [47], что излучение с энергией выше 1 *Мэв* может быть объяснено распадом нейтральных π-мезонов при $z = 100$ *). Вполне возможно, что поток изотропного гамма-излучения является реликтом ранней стадии развития Вселенной.

Предполагая наличие метагалактического инфракрасного излучения, о котором уже упоминалось выше и которое более чем в 50 раз превосходит микроволновое излучение по плотности энергии, можно было бы приписать изотропный поток гамма-излучения комптоновскому рассеянию электронов космических лучей в галактическом гало. О'Коннелл и Верма [48] показали, что то же самое взаимодействие может быть ответственно и за поток фонового рентгеновского излучения. Однако если этот поток имеет галактическое происхождение, он вне галактического диска не может быть изотропен, что противоречит экспериментальным данным об его изотропности с точностью до $\sim 10\%$. Хотя величины фонового потока, предсказываемые этой моделью, кажутся разумными, многие другие следствия, которые должно вызывать метагалактическое инфракрасное излучение, вызывают сомнения в его существовании.

Лонгейр и Сюняев [49] предположили недавно, что жесткая рентгеновская часть изотропного спектра вызвана комптоновским рассеянием на инфракрасных фотонах в ядрах галактик (например, сейфертовских).

Для энергий гамма-лучей выше 100 *Мэв* важным источником изотропного излучения может стать рождение нейтральных π-мезонов, так как электроны, необходимые для рождения таких гамма-квантов при комптоновском рассеянии, быстро теряют свою энергию на излучение.

Можно ожидать, что спектр изотропного гамма-излучения не продолжается за энергии 10^{14} *эв* из-за взаимодействия с фоновым микроволновым излучением [50, 51]. При этих энергиях фотон-фотонное взаимодействие вызывает рождение пары электрон — позитрон.

Подлинное происхождение как галактического, так и метагалактического потока гамма-лучей пока остается загадкой; успехи теории зависят на этой стадии исследований от качества и количества новых экспериментальных данных.

Проведенные недавно расчеты потоков гамма-лучей, ожидаемых от сильных радиоисточников [33, 34], основываются на рассмотрении механизма комптоновского рассеяния релятивистских электронов на их собственном синхротронном излучении. Пользуясь измерениями спектра синхротронного излучения (от радио- до рентгеновских частот) и предположениями о средней плотности магнитного поля, можно рассчитать как интенсивность и спектр релятивистских электронов, так и плотность гамма-квантов. Сравнение с экспериментальными данными позволяет

*) По этому вопросу см. также [68].

определить среднюю величину магнитного поля. Эти предсказания потоков от дискретных источников чрезвычайно полезны также при конструировании новых детекторов.

Аппарао [52] рассмотрел также случай комптоновского рассеяния в радиоисточниках на реликтовом излучении с температурой 2,7° К. Этот эффект должен играть важную роль для расширяющихся источников, в то время как комптон-синхротронный эффект доминирует в компактных.

Грейзен (не опубликовано) заметил, что в противоположность случаю диффузного гамма-излучения, которое обнаружено, но в объяснении механизма происхождения которого возникают большие трудности, для излучения дискретных источников найдено много хороших объяснений, но само оно не зарегистрировано.

Детальное рассмотрение теоретических аспектов гамма-астрономии приводится в обзорных статьях Гинзбурга и Сыроватского [53], Гермайра и Краушаара [54], Хаякавы и Мацуоки [55], Гулда и Бербиджа [36], Фацио [56] и Люста и Пинкау [57] *).

ДЕТЕКТОРЫ ГАММА-КВАНТОВ

Гамма-квант с энергией в области 100 *Мэв* может быть зарегистрирован только по его взаимодействию с веществом, при котором рождаются электрон и позитрон. Частицы этой пары разлетаются, сохраняя общее направление первичного кванта, под углом порядка $m_e c^2/E_\gamma$, где E_γ — энергия кванта. Вследствие этого из кинематики пары можно определить энергию и направление прихода кванта. Однако даже при очень малой толщине материала конвертора электрон и позитрон в заметной мере испытывают в нем многократное рассеяние. Поэтому типичный гамма-детектор имеет угловое разрешение только порядка 1°. Измерения энергии квантов, основанные на измерениях многократного рассеяния или полного поглощения пары, дают не слишком блестящее разрешение (10—50%). Минимальная величина потока $I_{\min}$, доступного для детектирования при данном уровне фона B, определяется так:

$$I_{\min} \propto (B\Omega/\varepsilon AT)^{1/2},$$

где Ω — телесный угол конуса разрешения детектора, A — его чувствительная площадь, ε — конверсионная эффективность и T — время измерения.

Таблица IV

Минимально детектируемый поток от Крабовидной туманности (неопубликованная работа Грейзена)

Порог энергии гамма-лучей	Верхний предел интегрального потока, $см^{-2}сек^{-1}$	Экстраполированный интегральный поток, $см^{-2}сек^{-1}$
10 *Мэв*	$4\cdot10^{-3}$	$1{,}9\cdot10^{-4}$
50 *Мэв*	$1{,}7\cdot10^{-5}$	
100 *Мэв*	$3{,}1\cdot10^{-5}$	$1{,}5\cdot10^{-5}$
500 *Мэв*	$5\cdot10^{-6}$	
1 *Гэв*	$12\cdot10^{-6}$	$1{,}2\cdot10^{-6}$
2 *Гэв*	$1\cdot10^{-10}$	
10^3 *Гэв*	$3\cdot10^{-15}$	

В табл. IV приведены нынешние минимально регистрируемые уровни потока как функция энергии для дискретного источника типа Крабовидной туманности. Эти потоки уже достаточно малы (к примеру, поток видимого света от Полярной звезды составляет примерно 100 *фотонов/см² сек*), но для задачи обнаружения новых источников величины $I_{\min}$ должны быть еще существенно уменьшены. Величины B, Ω и ε относительно постоянны; гамма-фон на баллонных высотах по порядку величины состав-

*) В советской литературе проблемы гамма-астрономии рассматриваются также в обзорах Сыроватского [73], Анисимова и др. [74].

ляет 10^{-3} *см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$*стер*$^{-1}$, а в космосе — 10^{-4} *см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$*стер*$^{-1}$. Детекторы гамма-лучей должны также устранять фон заряженных частиц, который более чем в 1000 раз превосходит фон гамма-излучения. Величина Ω (для конуса разрешения 1°) составляет 10^{-3} *стер*, а ε — около 0,2. Единственными параметрами детектора, которые могут меняться на порядки величины, являются площадь и время. Поэтому наилучшей постановкой эксперимента будет установка детектора большой площади на спутнике или на Луне.

До сих пор применялись три основных типа детекторов: сцинтилляционно-черенковские счетчики, ядерные эмульсии и искровые камеры.

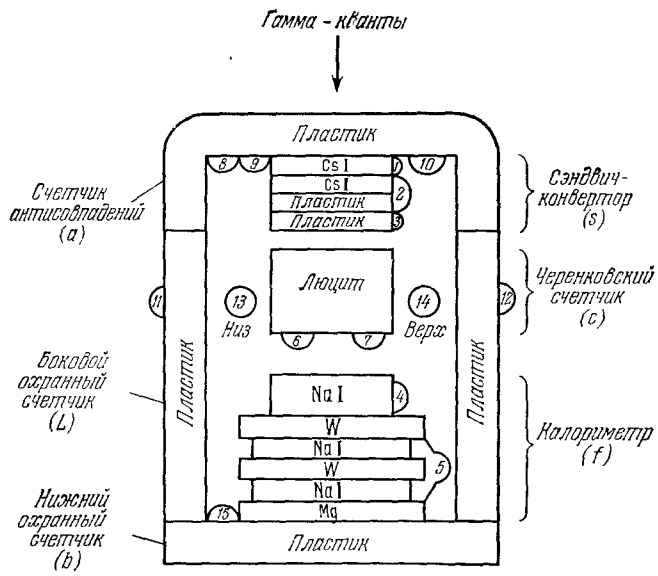

Рис. 3. Схема устройства детектора гамма-лучей спутника OSO-3, запущенного в 1967 г.

Детальное описание этих детекторов имеется в обзорах Грейзена [58] и Краушаара [59] *). На ранней стадии развития гамма-астрономии основным детектором был телескоп из сцинтилляционных и черенковских счетчиков. Площадь, типичная для такого детектора, составляет 100 *см*^{2} при угловом разрешении $\pm 15°$. Своего наиболее полного развития эти детекторы достигли в экспериментах на спутниках «Эксплорер-11» и OSO-3 (рис. 3). Хотя они и имеют высокую конверсионную эффективность и достаточную чувствительную площадь, их угловое разрешение и дискриминация фонового излучения были плохими. Ядерные эмульсии привлекательны высоким угловым и энергетическим разрешением, низким ($\sim$20 *Мэв*) порогом по энергии и простотой, но их недостатком является неизбирательная чувствительность, вызывающая большие трудности в обработке данных (так как они содержат большое количество избыточной информации).

С середины 60-х годов основным детектором становится искровая камера. В сущности она является прибором, который делает видимыми треки электронов и позитронов вследствие возникновения искрового разряда вдоль пути ионизирующих частиц. Расположение треков можно

*) В работах [62, 70, 74, 75] приводятся описания гамма-детекторов, применявшихся советскими исследователями.

зафиксировать на фотопленку, при помощи видиконной телекамеры, акустическими детекторами или закодировать в цифровом виде, если электроды камеры выполнены в виде проволочных сеток, соединенных с магнитной памятью. Преимущество искровой камеры состоит в том, что она является визуальным прибором с избирательной чувствительностью, вследствие чего нежелательных фоновых событий либо регистрируется мало, либо их легко идентифицировать. Камера имеет достаточно большую чувствительную площадь (10^2—10^4 *см*^{2}) и большую широкоугольность ($\pm 30°$) при угловом разрешении порядка $\pm 1°$, что делает ее идеальным поисковым прибором. С помощью искровой камеры в гамма-астрономии уже удалось достичь значительного повышения чувствительности; следующее большое достижение ожидается в 1971 г.: группа из Годдардовского центра космических полетов во главе с К. Фихтелом собирается в этом году установить на Малом астрономическом спутнике (SAS-B) большую ($6{,}5 \cdot 10^2$ *см*^{2}) искровую камеру с цифровым выводом данных (рис. 4).

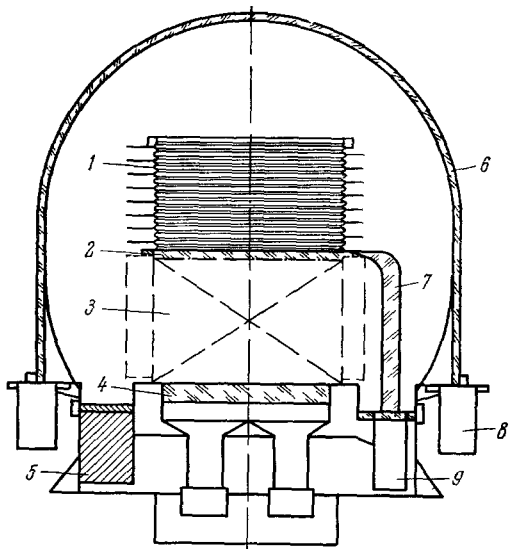

Рис. 4. Схема устройства искровой камеры с цифровым выводом данных, предназначенной для запуска в 1971 г. на Малом астрономическом спутнике (SAS-B, Годдардовский центр космических полетов).

1 — верхняя искровая камера; *2* — сцинтиллятор; *3* — нижняя искровая камера; *4* — блок из 4 черенковских счетчиков; *5* — блоки электроники (4); *6* — охранный сцинтилляционный счетчик; *7* — световоды; *8* — фотоумножители (8); *9* — фотоумножители (4).

В 1972 г. объединенная европейская группа (Миланский университет, французский Центр ядерных исследований в Сакле и мюнхенский Институт космической физики имени Макса Планка) планирует запуск спутника TD-1 Европейской организации космических исследований с видиконной искровой камерой площадью 132 *см*^{2}.

Предполагается также использование комбинации эмульсионной и искровой камер; в таком приборе можно получить лучшее угловое разрешение и более низкую пороговую энергию. Искровая камера в этом приборе дает возможность точно определить ту точку в эмульсии, где происходит конверсия кванта в электрон-позитронную пару. Эту технику развивают сейчас группы исследователей в университете Вашингтона (Сент-Луис), университете штата Миннесота и Морской исследовательской лаборатории.

На рис. 5 показаны минимальные потоки гамма-квантов с энергией 100 *Мэв*, которые были доступны для регистрации в течение последних 10 лет, а также ожидаемая чувствительность детекторов будущего. Из рисунка видно, что минимальные регистрируемые потоки уменьшались на порядок величины каждые 2—3 года и что при сохранении таких темпов прогресса за ближайшие два года будет достигнута чувствительность в 10^{-6} — 10^{-7} *см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$.

Объединенная группа Корнелльского университета, Смитсоновской астрофизической обсерватории и Морской исследовательской лаборатории предприняла попытку существенно увеличить чувствительную пло-

щадь детекторов путем развития техники газовых черенковских счетчиков. Их детектор имеет площадь $5 \cdot 10^4$ *см*^{2} при угловом разрешении $\pm 1°$ и угле чувствительности $\pm 3°$; ожидается, что он будет очень хорошо защищен от фона.

Первый полет баллона с этим прибором предполагается осуществить в 1970 г.; при шестичасовой экспозиции он должен позволить обнаруживать источники, поток от которых превосходит $5 \cdot 10^{-7}$ *см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$. Этот детектор предназначается также для установки на большом космическом аппарате. Уже изготовлен уменьшенный вариант этого прибора ($1{,}9 \cdot 10^3$ *см*^{2}) [60] для области энергий от 10 до 100 *Мэв*.

Хотя эксперименты с максимальной чувствительностью необходимо будет ставить на спутниках, важную роль еще могут сыграть и высотные баллоны, особенно если они станут больше и надежность их увеличится. Например, при помощи баллонной искровой камеры будет возможно с определенностью подтвердить измерения галактического потока гамма-квантов, проведенные на OSO-3. Такие эксперименты подготавливаются сейчас несколькими группами, и результаты их скоро станут известны. В поисках дискретных источников баллонные эксперименты сейчас в отношении чувствительности успешно конкурируют со спутниковыми. Что же касается изотропного потока гамма-излучения, то атмосферный фон заставляет предпочесть для его изучения эксперименты на спутниках. Безусловно необходима также широкая программа баллонных работ по разработке и испытанию новых детекторов.

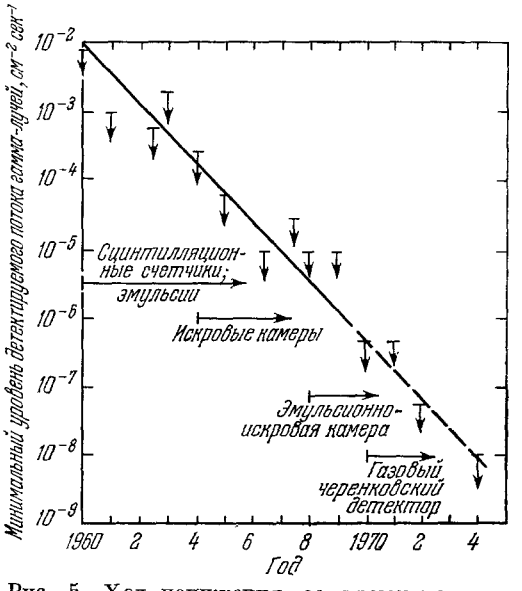

Рис. 5. Ход понижения со временем минимального уровня детектируемого потока гамма-лучей в области энергий около 100 *Мэв*.

Я уже упоминал, что гамма-астрономия в области энергий выше 10^{11} *эв* основана на использовании наземных детекторов. Космические гамма-лучи этих энергий, взаимодействуя с молекулами воздуха, рождают каскады электронов, позитронов и вторичных гамма-квантов. Этот каскад, называемый атмосферным ливнем, имеет высокую степень направленности и распространяется с релятивистской скоростью, сохраняя направление первичного гамма-кванта. Релятивистские заряженные частицы ливня дают конус черенковского светового излучения с углом при вершине около 2° в направлении оси ливня. По длине волны этот свет преимущественно лежит в синей и ультрафиолетовой области спектра; он дает вспышку длительностью около 10^{-8} *сек*, освещающую на земле площадь около 10^8 *см*^{2}. Для детектирования этого света при минимальных энергиях гамма-квантов требуется неосвещенная местность, безоблачная и безлунная ночь и чувствительный коллектор света. К несчастью, космические частицы высокой энергии, главным образом протоны, также образуют атмосферные ливни и вспышки черенковского света, давая однородное распределение этого света по небу (примерно 10^{-4} от общего свечения ночного неба). В настоящее время гамма-кванты можно выделить

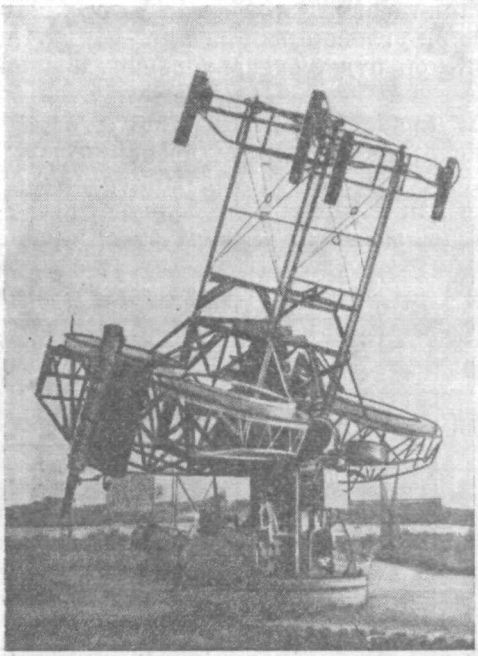

Рис. 6. Установка для регистрации черенковского света, рождаемого гамма-квантами высокой энергии.

Эта установка, расположенная на острове Мальта, состоит из четырех 90-сантиметровых зеркал.

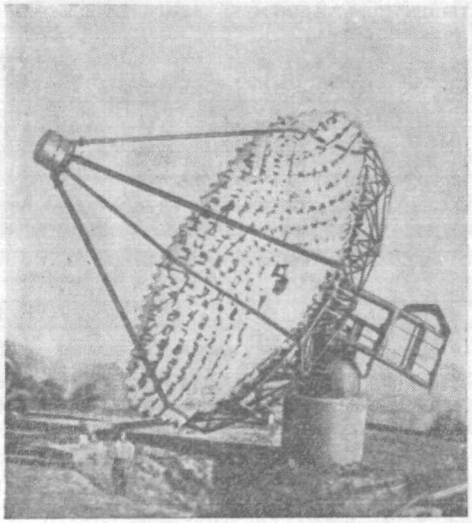

Рис. 7. 10-метровый оптический рефлектор, установленный на вершине Маунт-Хопкинс в Аризоне, используемый Смитсоновской астрофизической обсерваторией для поисков космических гамма-лучей с энергией свыше 10^{11} *эв*.

из этого фона только по возрастанию числа световых импульсов в направлении предполагаемого источника. Вследствие этого типичная постановка эксперимента сейчас такова: зеркало с фотоэлектронным детектором направляется в точку неба по соседству с предполагаемым источником, и регистрируется скорость счета световых вспышек при прохождении источника через поле зрения прибора вследствие вращения Земли. Такой телескоп может регистрировать гамма-кванты на площади 10^8 *см* с угловым разрешением около 1°. Подробный обзор техники таких экспериментов дан Джелли [61].

Типичный для этой области энергий детектор представляет собой набор светособирающих зеркал 1—1,5 *м* в диаметре, установленных на поворотной раме. Рис. 6 представляет собой фотографию детектора такого типа, установленного на острове Мальта; с ним работает группа английских ученых (Atomic Energy Establishment, Harwell; University College, Dublin).

Смитсоновская астрофизическая обсерватория работает с установленным ею в Аризоне 10-метровым рефлектором в виде мозаики из 248 небольших шестиугольных зеркал, укрепленных на одной поворотной раме (рис. 7).

Хотя в этой области энергий достоверно не обнаружено ни одного источника, ведутся дальнейшие поиски с использованием больших экспозиций и с исследованием всей поверхности небесной сферы. Источниками частиц с энергией около 10^{16} *эв* могут оказаться, в частности, пульсары; не удивительно, что все группы исследователей отдают много сил поиску гамма-лучей от этих объектов.

В этих экспериментах очень трудно понизить в значительной степени пороговую энергию гамма-квантов; можно было бы, однако, заметно увеличить чувствитель-

ность, по-видимому, раз в 30, если бы мы научились надежно различать ливни, вызванные протонами и гамма-квантами.

Интересно отметить, что все крупнейшие детекторы атмосферного черенковского света расположены в северном полушарии, а к югу от экватора исследований почти не ведется.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРОГРЕССА

Сейчас дальнейший прогресс в гамма-астрономии зависит только от новых экспериментальных данных. Главной загадкой остается происхождение галактического потока гамма-лучей. Является ли оно диффузным и генерируется во взаимодействиях частиц высокой энергии с межзвездной средой, или оно складывается из излучения дискретных, не разрешенных источников? Без новых данных теория в этом вопросе сейчас не может двигаться вперед. Следующий вопрос: сколько существует дискретных источников, «гамма-звезд»? Являются ли они короткоживущими объектами? Принадлежат ли они нашей Галактике или лежат за ее пределами? Для того чтобы ответить на эти вопросы, необходим систематический поиск по всей поверхности небесной сферы. Являются ли гамма-источниками пульсары? Регистрация такого излучения была бы серьезным доказательством того, что пульсары являются источниками космических лучей. Большое космологическое значение имеет вопрос о происхождении диффузного гамма-излучения. Не есть ли оно реликт ранней стадии развития Вселенной?

Экспериментальные данные, необходимые для ответа на эти важные вопросы, появятся, возможно, не скоро. Ближайший крупный спутниковый эксперимент — установка искровой камеры на борту SAS-B — будет предпринят не ранее 1971 г. Более крупные детекторы, предназначенные для пилотируемых космических станций, не появятся на орбите по крайней мере до 1974 г. Правда, последние баллонные эксперименты в Австралии должны дать дополнительную информацию о потоке гамма-лучей из центра Галактики, но для изучения плоскости Галактики и диффузного излучения необходимы спутники.

Есть нужда также и в новых идеях по разработке детекторов. Для значительного улучшения чувствительности, примерно до 10^{-7} *см*$^{-2}$*сек*$^{-1}$ в районе 100 *Мэв*, пока не видно никакой альтернативы увеличению произведения площадь — время. Возможно, решение этой проблемы дадут газовые черенковские счетчики или наборы большого числа искровых камер. На будущих больших космических станциях или на Луне можно будет установить приборы с чрезвычайно большой площадью. Чтобы можно было сделать выбор между различными механизмами рождения гамма-лучей в источниках, необходимо увеличить энергетическое разрешение приборов; особенно это важно для области энергий 10—100 *Мэв*. Необходимо также, как ни трудно этого добиться, улучшить угловое разрешение во всех областях энергий. Например, при помощи детектора, установленного на Луне, можно будет получить разрешение порядка нескольких дуговых минут, если использовать покрытие источников лунным горизонтом.

Только в результате дальнейшего развития гамма-астрономии можно будет получить ответ на вопросы о распределении и плотности частиц высокой энергии, вещества и электромагнитного излучения во Вселенной. По сравнению с оптической и радиоастрономией эта отрасль науки о Вселенной еще относительно молода, и гамма-астрономические эксперименты чрезвычайно трудны. Тем не менее уже получены очень интересные результаты, а будущее обещает еще гораздо больше.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. P. Morrison, Nuovo Cim. **1**, 858 (1958).
2. G. W. Clark, G. P. Garmire, W. L. Kraushaar, Astrophys. J. Lett. **153**, L203 (1968).
3. G. M. Frye, jr., J. A. Staib, A. D. Zych et al., Nature **223**, 1320 (1969).
4. P. Morrison, Perspectives in Modern Physics, ed. by R. E. Marshak, New York, Interscience Publ. Co., 1966, p. 343.
5. R. Giacconi, H. Gursky, F. R. Paolini, B. B. Rossi. Phys. Rev Lett. **9**, 439 (1962).
6. G. W. Clark, G. P. Garmire, W. L. Kraushaar, Proc. IAU Symp. No. 37, Rome, ed. by L. Gratton (in print).
7. C. E. Fichtel, D. A. Kniffen, H. B. Ögelman, Proc. IAU Symp. No. 37, Rome, ed. by L. Gratton (in print).
8. J. P. Delvaille, P. Albats, K. I. Greisen, H.B. Ögelman, Canad. J. Phys. **46**, S425 (1968).
9. J. V. Valdez, C. J. Waddington, Astrophys. J. Lett. **156**, L85 (1969).
10. R. K. Sood, Nature **222**, 650 (1969).
11. G. W. Hutchinson, A. J. Pearse, D. Ramsden, R. D. Wills, Proc. IAU Symp. No. 37, Rome, ed. by L. Gratton (in print).
12. K. C. Anand, R. R. Daniel, S. A. Stephens, Canad. J. Phys. **46**, S484 (1968).
13. J. M. Kidd, Nuovo Cim. **27**, 57 (1963).
14. J. Duthie, P. H. Fowler, A. Kaddoura et al., Nuovo Cim. **24**, 122 (1962).
15. F. Abraham, J. Kidd, M. Koshiba, R. Levi Setti, C. H. Tsao, W. Wolter, Nuovo Cim. **28**, 221 (1963).
16. Y. Toyoda, K. Suga, K. Murakami et al., Proc. Ninth Intern. Conf. Cosmic Rays, London, **2**, 708 (1965).
17. J. Gawin, J. Hibner, J. Wdowczyk et al., Proc. Ninth Intern. Conf. Cosmic Rays, London, **2**, 639 (1965).
18. Ph. Catz, R. Maze, J. Gawin et al., Phys. Rev. Lett. **23**, 988 (1969).
19. G. Steigman, Nature **224**, 477 (1969).
20. F. Hoyle, Nature **224**, 477 (1969).
21. J. G. Duthie, R. Cobb, J. Stewart, Phys. Rev. Lett. **17**, 263 (1966).
22. А. Е. Чудаков, В. Л. Дадыкин, В. И. Зацепин, Н. М. Нестерова, Труды ФИАН СССР **26**, 118 (1964).
23. D. J. Fegan, B. McBreen, E. P. O'Mongain et al., Canad. J. Phys. **46**, S433 (1968).
24. G. G. Fazio, H. F. Helmken, G. H. Rieke, T. C. Weekes. Astrophys. J. Lett. **154**, L83 (1968).
25. H. S. Tornabene, F. J. Cusimano, Canad. J. Phys. **46**, S81 (1968).
26. W. N. Charman, J. V. Jelley, P. R. Orman et al., Nature **220**, 565 (1968).
27. E. P. O'Mongain, N. A. Porter, J. White et al., Nature **219**, 1348 (1968).
28. N. A. Porter, D. M. Jennings, E. P. O'Mongain, IAU Circ. No. 21 (1969).
29. B. K. Chatterjee, G. T. Murthy, P. V. Ramana Murthy et al., Proc. Eleventh Intern. Conf. Cosmic Rays, Budapest, Acta Physica Academiae Scientiarium Hungaricae, Supplement (in print).
30. G. G. Fazio, D. R. Hearn, H. F. Helmken et al., Proc. Eleventh Intern. Conf. Cosmic Rays, Budapest, Acta Physica Academiae Scientiarium Hungaricae, Supplement (in print).
31. W. N. Charman, R. W. P. Drewer, Nature **224**, 567 (1969).
32. G. G. Fazio, H. F. Helmken, G. H. Rieke, T. C. Weekes, Proc. Eleventh Intern. Conf. Cosmic Rays, Budapest, Acta Physica Academiae Scientiarium Hungaricae, Supplement (in print).
33. R. J. Gould, Phys. Rev. Lett. **15**, 577 (1965).
34. G. H. Rieke, T. C. Weekes, Astrophys. J. **155**, 429 (1969).
35. G. Cocconi, Proc. Intern. Conf. Cosmic Rays, Moscow, **2**, 309 (1960).
36. R. J. Gould, G. R. Burbidge, Handbuch der Physik **46/2**, 265 (1967).
37. G. G. Fazio, H. F. Helmken, G. H. Rieke, T. C. Weekes. Proc. IAU Symp. No. 37, Rome, ed. by L. Gratton (in print).
38. F. W. Stecker, Nature **222**, 865 (1969).
39. J. E. Felten, P. Morrison, Phys. Rev. Lett. **10**, 453 (1963).
40. J. E. Felten, P. Morrison, Astrophys. J. **146**, 686 (1966).
41. R. Cowsik, Y. Pal, Phys. Rev. Lett. **22**, 550 (1969).
42. C. S. Shen, Phys. Rev. Lett. **22**, 568 (1969).
43. K. Shivanandan, J. R. Houck, M. O. Harwit, Phys. Rev. Lett. **21**, 1460 (1968).

44. H. Ögelman, Nature **221**, 753 (1969).
45. S. Hayakawa, Y. Tanaka, Proc. IAU Symp. No. 37, Rome, ed. by L. Gratton (in print).
46. K. Brecher, P. Morrison, Phys. Rev. Lett. **23**, 802 (1969).
47. F. W. Stecker, Nature **224**, 870 (1969).
48. R. F. O'Connell, S. D. Verma, Phys. Rev. Lett. **22**, 1443 (1969).
49. M. S. Longair, R. A. Sunyaev, Astrophys. Lett. **4**, 65 (1969).
50. R. J. Gould, G. Schréder, Phys. Rev. Lett. **16**, 252 (1966).
51. J. V. Jelley, Phys. Rev. Lett. **16**, 479 (1966).
52. M. V. K. Apparao, Proc. Indian Acad. Sci. **65A**, 349 (1967).
53. V. L. Ginzburg, S. I. Syrovatskii, The Origin of Cosmic Rays, New York, Pergamon Press, Macmillan Co., 1964 (см. также В. Гинзбург, С. Сыроватский, УФН 88, 485 (1966)).
54. G. Garmire, W. Kraushaar, Space Sci. Rev. **4**, 123 (1965).
55. S. Hayakawa, M. Matsuoka, Progr. Theor. Phys., Suppl. **30**, 204 (1964).
56. G. G. Fazio, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **5**, 481 (1967).
57. R. Lüst, K. Pinkau, Electromagnetic Radiation in Space, ed. by J. G. Emming, Dordrecht, Reidel, 1967, p. 231.
58. K. Greisen, Perspectives in Modern Physics, ed. by R. E. Marshak, New York, Interscience Publ. Co., 1966, p. 355.
59. W. L. Kraushaar, Astronautics and Aeronautics **7**, 28 (1969).
60. H. Helmken, J. Hoffman, Nuclear Instr. Meth. **80**, 125 (1970).
61. J. V. Jelley, Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics, ed. by J. G. Wilson and S. A. Wouthuysen, Amsterdam, North-Holland, **6**, 39 (1967).

ЛИТЕРАТУРА, ДОБАВЛЕННАЯ ПЕРЕВОДЧИКОМ

62. Н. Л. Григоров, Л. Ф. Калинкин, А. С. Мелиоранский и др., Космич. исслед. 5, 124 (1967).
63. J. F. Dolan, Astron. J. **75**, 223 (1970).
64. A. E. Metzger, E. C. Anderson, M. A. Van Dilla, J. R. Arnold, Nature **204**, 766 (1964).
65. J. R. Arnold, A. E. Metzger, E. C. Anderson, M. A. Van Dilla, J. Geophys. Res. **67**, 4878 (1962).
66. Б. П. Константинов, С. В. Голенецкий, Е. П. Мазец и др., Космич. исслед. (в печати); препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, № 223, Ленинград, 1969.
67. J. I. Vette, D. Gruber, J. Matteson, L. E. Peterson, Proc. IAU Symp. No. 37, Rome, ed. by L. Gratton (in print).
68. J. I. Vette, D. Gruber, J. L. Matteson, L. E. Peterson, Astrophys. J. Lett. **160**, L 161 (1970).
69. A. Danjo, S. Hayakawa, M. Ikeda et al., A Balloon Observation of Diffuse Background Gamma Rays in the Energy Range from 100 kev to 1 Mev (доклад на XIII сессии КОСПАР, Ленинград, 1970, тезисы, стр. 96).
70. Л. С. Братолюбова-Цулукидзе, Н. Л. Григоров, Л. Ф. Калинкин и др., Космич. исслед. 8, 136 (1970).
71. Л. С. Братолюбова-Цулукидзе, Н. Л. Григоров, Е. А. Пряхин и др., Измерения гамма-квантов высокой энергии в первичном космическом излучении, проведенные на борту искусственного спутника Земли «Космос-208» (доклад на XIII сессии КОСПАР, Ленинград, 1970, тезисы, стр. 97).
72. J. P. Leray, B. Parler, J. Vasseur, et. al., Recherche du Pulsar NP 0532 a 100 *Mev* (доклад на XIII сессии КОСПАР, Ленинград, 1970, тезисы, стр. 95).
73. С. И. Сыроватский, Труды шестой Всесоюзной ежегодной зимней школы по космофизике, ч. I, Апатиты, ПГИ КФАН СССР, 1969, стр. 97.
74. М. М. Анисимов, Л. С. Братолюбова-Цулукидзе, Н. Л. Григоров и др., Труды шестой Всесоюзной ежегодной зимней школы по космофизике, ч. I, Апатиты, ПГИ КФАН СССР, 1969, стр. 124.
75. Л. С. Братолюбова-Цулукидзе, Н. Л. Григоров, Л. Ф. Калинкин и др., Труды Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Ташкент, 1968, ч. II, вып. 1, М., ФИАН СССР, 1969, стр. 15.