

НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ ГАММА-АСТРОНОМИЯ

А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Угрюмов, Б. И. Лучков

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	491
2. Важность и особенности γ -астрономических наблюдений	492
а) Происхождение космических лучей (492). б) Активность ядра Галактики (493). в) Молекулярный водород (493). г) Образование галактик и космологическое γ -излучение (493). д) Симметричная Вселенная и аннигиляционное γ -излучение (494). е) Метagalактические космические лучи (494).	
3. Изотропное диффузное γ -излучение	495
4. Галактическое γ -излучение	497
5. Дискретные источники γ -излучения	500
а) γ -излучение Солнца (501). б) γ -излучение Крабовидной туманности и пульсара NP 0532 (502). в) Другие дискретные источники γ -квантов (505).	
6. Кратковременные потоки космических γ -квантов	507
7. Развитие техники γ -астрономических наблюдений	509
8. Заключение	512
Цитированная литература	512

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые попытки регистрации внеземного γ -излучения были предприняты более 10 лет назад. Долгое время, однако, не удавалось измерить конечные потоки и из результатов наблюдений определялись лишь верхние пределы потоков космических γ -квантов ¹⁻³. Такое положение возникло из-за больших трудностей в измерении космического γ -излучения на фоне большого, на несколько порядков превосходящего потока заряженных космических частиц, а также из-за чрезмерно оптимистических оценок потоков в первых теоретических работах по γ -астрономии, неправильно ориентировавших наблюдателей. В результате рождение наблюдательной γ -астрономии затянулось, в то время как «соседняя» рентгеновская астрономия бурно развивалась. Справедливости ради надо отметить, что и верхние пределы потоков γ -квантов дали ценную информацию о процессах в источниках и в космическом пространстве ³. Кроме того, все это время происходило постоянное совершенствование аппаратуры и методов наблюдения во всех интервалах энергий γ -диапазона, в результате чего чувствительность телескопов возросла почти в 10^3 раз.

Положение в γ -астрономии существенно изменилось за последние два года. Были измерены потоки как диффузного излучения, так и излучения дискретных источников. Прогресс γ -астрономических наблюдений продолжается. Он идет широким фронтом, почти одинаково в энергетических интервалах мягких ($0,1-10$ Мэв), энергичных ($10-1000$ Мэв) и сверхжестких (10^2-10^4 Гэв) γ -квантов. По-видимому, детекторы приближаются, наконец, к нужному уровню чувствительности и совершенства,

чтобы стать действительными инструментами наблюдений. Лишь интервал жесткого ($1-100$ Гэв) γ -излучения исследован значительно хуже из-за малости потоков и отсутствия светосильных телескопов. Достигнутые успехи заставляют нас признать, что наблюдательная γ -астрономия уже возникла, и серьезно отнестись к первым положительным результатам наблюдений. Более того, мы считаем, что по темпу набора новой информации γ -астрономия уже сейчас не уступает другим разделам астрономии (даже рентгеновской), а в ближайшие годы от нее можно ожидать важных открытий. Напомним, что на XI Международной конференции по космическим лучам (Будапешт, 1969 г.) результаты исследований космического γ -излучения были включены в один раппортерский доклад с первичными электронами и рентгеном⁴. На XII конференции (Тасмания, 1971 г.) обилие материала заставило организаторов выделить космическое γ -излучение в отдельный доклад. На 55 симпозиуме Международного Астрономического союза (Испания, 1972 г.) раппортерских докладов было уже два: отдельно по диффузному γ -излучению⁵ и излучению дискретных источников⁷. А в 1973 г. результаты наблюдательной астрономии обсуждались уже на трех международных совещаниях: на симпозиуме НАСА по γ -астрономии (Грин-Белт, апрель)^{11a}, на XIII конференции по космическим лучам (Денвер, август) и на конференции по кратковременным потокам рентгеновского и γ -излучения (Лос-Аламос, сентябрь).

2. ВАЖНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ γ -АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Очевидно, что получить правильное представление о процессах, происходящих во Вселенной, можно лишь, изучая ее во всех диапазонах электромагнитного спектра. Хорошо известно, в каких процессах возникает тот или иной вид излучения, и поэтому наблюдательные данные, полученные в разных диапазонах, взаимно дополняют друг друга. В этом смысле исследование космического γ -излучения составляет неотъемлемую часть современной астрофизики. Но есть особая черта, свойственная только γ -излучению, которая делает эти наблюдения чрезвычайно ценными для физики космических лучей и космологии.

γ -излучение генетически связано с космическими лучами: с электронной компонентой — через процессы тормозного и магнитотормозного (синхротронного) излучений и обратный комптон-эффект, с протонно-ядерной компонентой — через рождение и распад нейтральных пионов^{*}). Последний процесс дает вклад только в γ -диапазон, и именно с ним связаны основные надежды γ -астрономии. В связи с этим можно перечислить важнейшие астрофизические и космологические проблемы, решение которых в значительной мере зависит от результатов наблюдательной γ -астрономии.

а) Происхождение космических лучей. Одной из важнейших проблем современной физики является вопрос о происхождении космических лучей. Являются ли космические лучи, наблюдаемые у Земли, галактическими, или они возникли где-то в Метагалактике и затем проникли в нашу звездную систему? Дискуссия вокруг галактической и метагалактической гипотез происхождения космических лучей ведется уже давно, но решающего аргумента пока не найдено. Как ука-

^{*}) Более подробно процессы генерации космического γ -излучения рассмотрены в обзорах^{1, 3, 8}.

зал Гинзбург⁸, определенный ответ на этот вопрос может дать γ -астрономия. Протоны и ядра космических лучей, сталкиваясь с межзвездным газом, рождают нейтральные пионы, распад которых создает поток энергичных γ -квантов с характерным спектром, имеющим максимум при энергии $E = (1/2) m_{\pi^0} c^2 = 67,5 \text{ Мэв}$ (m_{π^0} — масса нейтрального пиона, c — скорость света). Зная количество газа в каком-либо космическом объекте и измерив поток «пионного» γ -излучения от него, можно определить плотность космических лучей. И наоборот, приняв определенную плотность космических лучей в согласии с той или иной гипотезой об их происхождении, можно вычислить ожидаемый поток γ -квантов и затем сравнить его с результатами измерений. Согласно метagalактической гипотезе плотность космических лучей у Земли такая же, как всюду в Метagalактике, и составляет $\sim 10^{-12} \text{ эрг/см}^3$. Такая интенсивность космических лучей приводит к потоку $F (\geq 100 \text{ Мэв}) \approx 3 \cdot 10^{-7} (\text{см}^2 \text{сек})^{-1}$ от ближайших галактик — Магеллановых Облаков, масса и расстояние до которых хорошо известны. Если измерения покажут, что γ -излучение Магеллановых Облаков много меньше указанной цифры, это будет означать, что плотность метagalактических космических лучей меньше $10^{-12} \text{ эрг/см}^3$, т. е. что метagalактическая гипотеза неверна. Если же поток окажется больше, вопрос останется открытым, так как большой поток может быть обусловлен дискретными источниками γ -квантов в Магеллановых Облаках, и только детальное изучение γ -светимости галактик позволит дать однозначный ответ.

б) Активность ядра Галактики. Проблема происхождения космических лучей тесно связана с вопросом об источниках космических лучей в нашей Галактике. Одним из возможных мест, где могут рождаться космические лучи, является район центра Галактики с галактическим ядром. Известна активность ядра в радио-, инфракрасном диапазоне и рентгене⁹⁻¹¹. В случае, если активность ядра связана с генерацией космических лучей, оно должно быть мощным источником «пионных» γ -квантов. Обнаружение γ -излучения ядра явилось бы подтверждением галактической гипотезы происхождения космических лучей⁸.

в) Молекулярный водород. Радиоастрономические наблюдения выявили распределение и плотность межзвездного водорода в Галактике. В основном эти данные получены на волне длиной 21 см и поэтому относятся к атомарному водороду. Ни радио, ни оптические наблюдения не дают точного значения количества водорода в форме молекул в составе межзвездного газа. Существуют лишь косвенные оценки количества молекулярного водорода в плотных пылевых облаках. По-видимому, наиболее точные сведения о плотности водорода (во всех его формах, а следовательно, и в форме молекул) могут дать наблюдения γ -излучения Галактики при энергиях «пионных» γ -квантов. Так, Блэкком и Фацио⁴² указаны области на небе, откуда можно ожидать повышенных потоков энергичных γ -квантов в связи с возможным содержанием молекулярного водорода в составе пылевых туманных облаков.

Наличие межгалактического молекулярного водорода может сказаться на потоках изотропного диффузного γ -излучения^{44, 65}.

г) Образование галактик и космологическое γ -излучение. Эпоха образования галактик в расширяющейся Вселенной, по-видимому, является также и началом генерации космических лучей. Это время должно было оставить естественную отметку в виде потока «пионных» γ -квантов, возникших в результате столкновений протонов

и ядер космических лучей с плотным веществом Вселенной, так называемого космологического γ -излучения¹². Как и его аналог — тепловое реликтовое излучение, этот поток должен быть изотропным и в наше время смещен в сторону меньших энергий из-за расширения Вселенной. Так, энергия в максимуме спектра, равная в момент генерации $67,5 \text{ Мэв}$, станет сейчас равной $67,5 / (Z_e + 1) \text{ Мэв}$, где Z_e — космологический возраст кванта или, по-другому, параметр красного смещения, соответствующий «эпохе образования галактик». По разным предположениям $Z_e = 2-100$ ^{12, 13}. Космологическое γ -излучение должно наблюдаться как некоторая особенность, уплощение или избыток, в энергетическом спектре диффузного изотропного γ -излучения. Место особенности укажет параметр Z_e , а вид особенности может представить сведения о плотности и составе вещества (отношение водород — гелий) в ту эпоху.

д) *Симметричная Вселенная и аннигиляционное γ -излучение.* В симметричной (или почти симметричной) по веществу и антивеществу Вселенной должно было возникнуть аннигиляционное γ -излучение¹⁴. Кроме «пионных» γ -квантов, возникающих в результате аннигиляции ядер с антиядрами, образуется также линия с энергией $E_\gamma = m_e c^2 = 0,51 \text{ Мэв}$ от аннигиляции позитронов с электронами. Энергия квантов аннигиляционного γ -излучения будет в наше время в $Z_a + 1$ раз меньше из-за расширения Вселенной, где Z_a — параметр красного смещения «эпохи аннигиляции». Аннигиляционное излучение должно быть изотропным и, как и космологическое, может проявиться в виде некоторой особенности в спектре диффузного γ -излучения.

Из-за поглощения квантов в плотном веществе расширяющейся Вселенной аннигиляционное и космологическое излучение могут дойти до нашего времени только с моментов $Z \leq 100$.

е) *Метагалактические космические лучи.* Исследование диффузного рентгеновского и γ -излучений предоставляет сведения о метагалактических космических лучах. В то время, как электронная компонента дает излучение в рентгеновский и γ -диапазоны (в основном через процесс обратного комптоновского рассеяния на реликтовых фотонах), протонно-ядерная компонента даст вклад только в γ -излучение в результате столкновений с межгалактическим газом, рождения и распада нейтральных пионов.

Таким образом, энергетический спектр диффузного изотропного рентгеновского и γ -излучения включает в себе сведения о составе, спектре и интенсивности метагалактических космических лучей, о времени возникновения и эволюции источников²⁶.

Перечисленными проблемами, конечно, не исчерпываются основные задачи гамма-астрономии. На сегодняшний день они являются наиболее интересными, так как могут быть решены уже в ближайшее время. Очень важен, например, поиск дискретных источников γ -квантов, механизм генерации которых может быть как пионным, так и синхротронным, тормозным или комптоновским. В частности, как указал Пилкау¹²², расширяющиеся оболочки сверхновых, содержащие космические лучи, будут регистрироваться как протяженные дискретные источники γ -излучения, угловые размеры которых могут быть до нескольких градусов. Весьма многообещающим являются исследования γ -излучения таких пекулярных объектов, как пульсары, оболочки сверхновых, рентгеновские источники, предполагаемые «черные дыры». Ясно, что природа этих необычных объектов может быть раскрыта только с привлечением данных γ -астрономии.

Особенно интересным представляется наблюдение γ -излучения ядер галактик и квазаров, в частности, в свете идей Амбарцумяна^{15, 16} о «новой физике», «работающей» в этих объектах, состоящих, как предполагается, из сверхплотного дозвездного вещества. Протекающие в них процессы отличаются большим энерговыделением, и именно γ -излучение — самое энергичное в электромагнитном спектре, сможет в первую очередь выявить существование подобных форм материи. В этом случае данные γ -астрономических наблюдений будут способствовать прогрессу, далеко выходящему за рамки астрофизики.

3. ИЗОТРОПНОЕ ДИФфуЗНОЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЕ

Изотропная компонента диффузного γ -излучения отождествляется с излучением Метагалактики, и ее исследование имеет первостепенное значение для астрофизики и космологии (см. разделы г — е) гл. 2).

Экспериментальная ситуация с изотропным диффузным излучением характеризуется не только получением новых данных, но и исправлением ошибок, допущенных в ранних работах. Чтобы лучше понять происшедшие перемены, рассмотрим энергетический спектр изотропного диффузного γ -излучения, обсуждавшийся два года назад (XII конференции по физике космических лучей, Тасмания). Результаты измерений представлены на рис. 1. Наибольшее число работ было выполнено в интервале мягких γ -квантов¹⁷⁻¹⁹. Лишь в двух измерениях, проведенных на спутниках OSO-3^{20, 21} и «Космос-208»²², были получены данные об энергичном γ -излучении. Приведенный спектр имел следующие особенности: а) Излом спектра при энергии ~ 40 кэв (данные Шварца и др., полученные на OSO-3¹⁷). б) Уплотнение спектра, начиная с энергии $E_\gamma \approx 1$ Мэв и больше (данные Ветте и др.²³, полученные на спутнике с вытянутой орбитой ERS-18, выходящем за магнитосферу). Данные Ветте находились, однако, в противоречии с результатами Голепецкого и др.^{24, 25}, которые были получены на спутниках «Космос-135» и «163» с близкой к Земле орбитой. в) Отсутствие точных данных (приводились лишь верхние пределы) для энергичных γ -квантов. В интервале энергий от 6 до 30 Мэв не было проведено ни одного эксперимента. Особенности в спектре диффузного излучения явились отправной точкой многих теоретических гипотез. Излом в спектре при 40 кэв пытались объяснить изменением спектра метagalактических электронов. Уплотнение спектра в интервале 1—6 Мэв трактовалось как вклад «космологического» γ -излучения.

Прошедшие два года существенно изменили положение. Появились результаты экспериментов в ранее неисследованном интервале, а также была показана ошибочность выводов об особенностях в спектре диффуз-

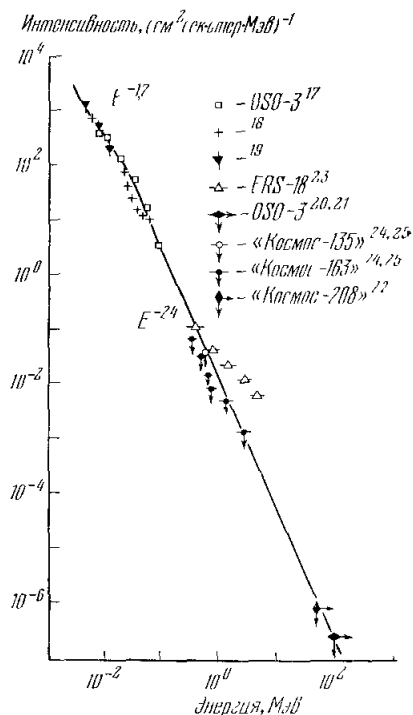


Рис. 1. Дифференциальный энергетический спектр диффузного γ -излучения, измеренный к 1971 г.

ного излучения. В чем заключались ошибки ранних работ? Было показано, что в интервале мягких γ -квантов существенный вклад в регистрируемые потоки дает наведенная активность, искусственная радиоактивность материала детектора, возникающая под действием космических

лучей. Одной из причин появления большого потока γ -квантов, измеренного на ERS-18 и приведенного к уплотнению спектра, является именно наведенная активность, что было показано в работах ^{24, 25, 28}. Была также показана неправильность традиционного способа нахождения потока космических γ -квантов при измерении на высотных аэростатах путем линейной экстраполяции данных, полученных всенаправленными детекторами, к границе атмосферы. Рядом авторов ^{6, 27, 28} экспериментально и расчетным путем было показано, что вблизи границы атмосферы (для глубин ≤ 10 г/см²) поток вторичных γ -квантов не только не убывает линейно с уменьшением глубины, на чем основывалась линейная экстраполяция, но даже возрастает, имитируя первичный поток. Особенно подробный анализ этого эффекта «накопления» был проведен Данжо ^{6, 29}.

Таким образом, ситуация в значительной мере прояснилась. На рис. 2 приведены результаты измерений изотропного диффузного потока, полученные к настоящему времени. Исчез излом при 40 кэв, нет уплотнения спектра в интервале 1–10 Мэв. Результаты измерений от 20 кэв до 1 Мэв можно представить единым степенным спектром ⁶:

$$\frac{dI}{dE} = 25 \cdot 10^3 \left(\frac{E}{1 \text{ кэв}} \right)^{-2,1} \text{ квант.} \cdot (\text{см}^2 \text{ сек} \cdot \text{стер} \cdot \text{Мэв})^{-1}. \quad (1)$$

Эта эмпирическая зависимость хорошо согласуется с теоретическим спектром диффузного γ -излучения, возникающего при комптоновском рассеянии релятивистских электронов, образуемых в радиогалактиках и заполняющих метагалактическое пространство, на трехградусном реликтовом излучении ^{30, 31}. Обратное комптоновское рассеяние является, по-видимому, главным процессом, определяющим форму спектра диффузного излучения в области энергий до 1 Мэв. Отклонения от теоретического спектра невелики и, возможно, обусловлены вкладом дискретных метагалактических источников. Спектр (1), экстраполированный в область

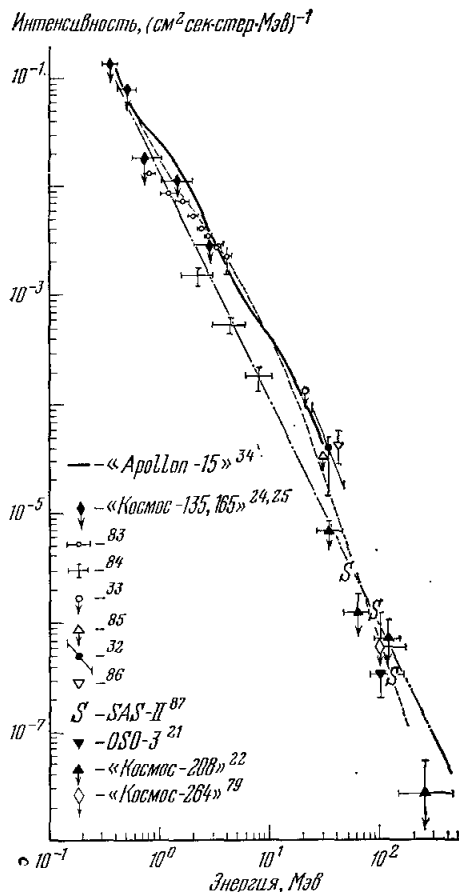


Рис. 2. Дифференциальный энергетический спектр диффузного γ -излучения по измерениям на сентябрь 1973 г.

Штрих-пунктирная линия — экстраполяция из области рентгена ($\sim E^{-2,1}$); штриховая кривая — расчет по модели Бречера — Моррисона (комптоновское рассеяние электронов на трехградусном излучении ³⁰) с добавлением космологического γ -излучения с $Z = 100$ ¹⁴.

больших энергий, может служить ориентиром для результатов измерений γ -излучения с энергией 1—100 Мэв.

В последнее время выполнен ряд таких измерений. Наблюдения проводились различными методами: большим всенаправленным γ -детектором на космическом корабле «Апполон-15»³⁴ во время его полета от Луны к Земле, светосильным γ -телескопом с нитяными искровыми камерами, работающим длительное время на малом астрономическом спутнике SAS-II⁸⁷, а также с помощью γ -телескопов, поднимавшихся на аэростатах. Впервые в аэростатных наблюдениях в области энергий $E_\gamma \leq 50$ Мэв применены искровые камеры^{32, 33, 85, 86}, а в интервале 1—10 Мэв использован метод регистрации γ -квантов по двойному комптоновскому рассеянию^{86, 84}. Оба метода существенно повышают надежность выделения γ -квантов.

Из результатов наблюдений следует, что: а) в интервале 1—50 Мэв наблюдается некоторое превышение измеренного потока над экстраполяционным спектром (1); б) в интервале 50—250 Мэв спектр становится более крутым и характеризуется показателем ≈ 3 ⁸⁷, что также противоречит экстраполяционной зависимости (1).

На рис. 2 представлен также теоретический спектр, при расчете которого, кроме доминирующего процесса комптоновского рассеяния метagalактических электронов на тепловых реликтовых фотонах³⁰, учтена «космологическая» добавка с параметром красного смещения $Z = 100$. Большинство экспериментальных результатов, в том числе полученные на «Аполлоне» и SAS-II (статистически более обеспеченные и относящиеся к более широкому интервалу энергий), хорошо согласуются с расчетным спектром, что свидетельствует в пользу существования «космологического» γ -излучения (см. г) и д) гл. 2). Однако результаты работ^{22, 25, 84}, не находящихся избытков, и работы³³, отмечающей возможность объяснения избытка аппаратурным фоном, не позволяют считать обнаружение «космологического» излучения окончательно установленным. Нужны дополнительные эксперименты.

4. ГАЛАКТИЧЕСКОЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЕ

Наиболее многочисленные результаты получены по исследованию γ -излучения Галактики (Млечного Пути). Еще в 1967 г. Кларком, Гармайром и Краушааром на орбитальной солнечной обсерватории OSO-3 был измерен поток γ -квантов с энергией $E_\gamma \geq 100$ Мэв, идущий от плоскости Галактики²⁰. Обработка экспериментального материала заняла несколько лет, и окончательные данные появились лишь в 1972 г.²¹ На рис. 3, а и б приведены распределения потока по галактической широте b'' (за вычетом района центра Галактики $|l''| \leq 30$) и по галактической долготе l'' . Измеренный поток представляется в виде излучения линейного источника, интенсивность которого составляет $(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$ квант \cdot $(\text{см}^2 \text{сек} \cdot \text{рад})^{-1}$ от района центра Галактики ($-15^\circ < b'' < 15^\circ$, $-30^\circ < l'' < 30^\circ$) и $(3,4 \pm 1,0) \cdot 10^{-5}$ квант \cdot $(\text{см}^2 \text{сек} \cdot \text{рад})^{-1}$ в среднем по другим местам Галактики ($-15^\circ < b'' < 15^\circ$, $30 < l'' < 330^\circ$)²¹.

Интерпретация результатов OSO-3 как излучения линейного источника, расположенного вдоль галактического экватора, основывалась на широтном распределении, показанном на рис. 3, а. Ширина пика, составляющая $\sim 30^\circ$, полностью объясняется плохим угловым разрешением детектора ($\pm 15^\circ$). Недавние наблюдения, проведенные γ -телескопами с лучшим угловым разрешением (с использованием искровых камер и фотоэмульсий), подтвердили правильность такого представления^{67, 87}. На рис. 3, в показано широтное распределение γ -квантов с энергией

$E_\gamma \geq 15 \text{ Мэв}$, измеренное с помощью фотоэмульсии ⁶⁷. Ширина пика сузилась до 3° и по-прежнему определяется угловым разрешением детектора.

Распределение γ -излучения по галактической долготе (рис. 3, б) обнаруживает широкий максимум, расположенный вдоль экватора в обе стороны от центра. По данным SAS-II ширина максимума составляет $\sim 70^\circ$ ⁸⁷.

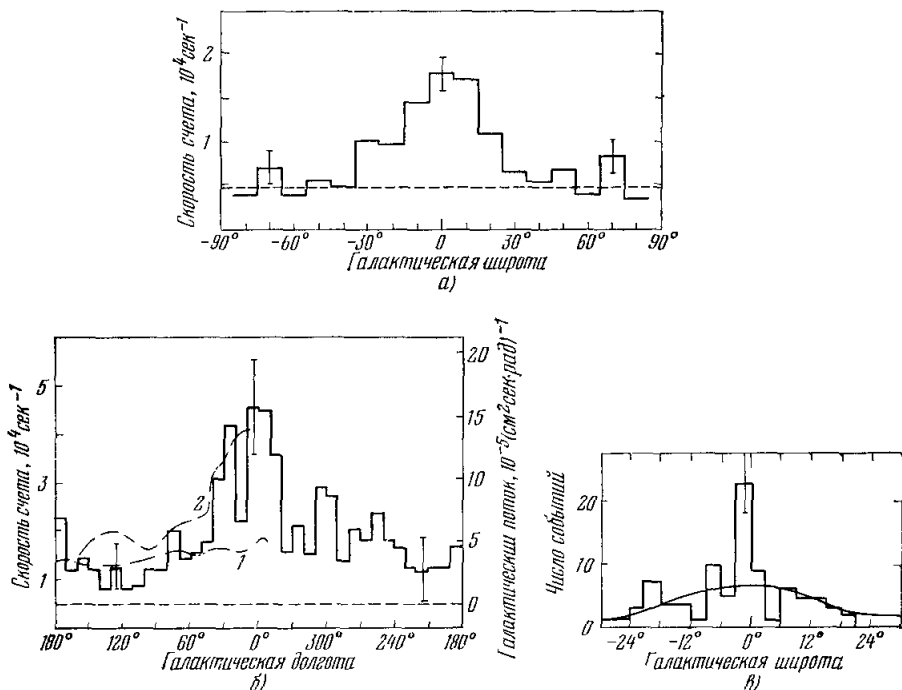


Рис. 3. γ -излучение Галактики.

Широтное и долготное распределение по данным OSO-3⁸⁰, ⁸¹ $E_\gamma \geq 100 \text{ Мэв}$ (а, б) и ⁶⁷ $E_\gamma > 15 \text{ Мэв}$ (в). Штриховой линией указан уровень изотропного диффузного потока для широт $|\delta| \geq 35^\circ$; 1 и 2 — расчетные кривые Кавалло — Гоулда⁴³ и Стронга и др.⁸⁶. Сплошная линия на рис. 3, в — фон атмосферных γ -квантов.

Сопоставление результатов разных работ по измерению потока галактического γ -излучения позволяет сделать первые предположения об энергетическом спектре (рис. 4).

Результаты измерений отвергают как чисто степенной, так и (менее определенно) чисто «пионный» спектры и согласуются с комбинированным спектром, в котором для энергий $E_\gamma \geq 70 \text{ Мэв}$ доминирует «пионная» компонента, а в области $E_\gamma < 70 \text{ Мэв}$ имеется значительная добавка с более мягким степенным спектром.

Теоретическая трактовка результатов измерения галактического γ -излучения основывается на том, что основную часть галактического потока составляют «пионные» γ -кванты, образующиеся при столкновениях ядерно-активной компоненты космических лучей с межзвездным газом. Расчеты, проведенные Кавалло и Гоулдом⁴³ и Стеккером⁴⁴, ⁶⁹ в предположении, что поток космических лучей во всем галактическом диске такой же, как измеренный около Земли (с учетом солнечной модуляции), показали согласие расчетной интенсивности галактического γ -излучения с измеренной всюду, кроме области широкого максимума вблизи центра Галактики.

На рис. 3, б показана расчетная кривая Кавалло и Гоулда (1). Измеренный поток от района центра Галактики приблизительно в три раза больше расчетного, что давало основание для предположений о других дополнительных источниках галактического γ -излучения, например, в результате комптоновского рассеяния релятивистских электронов на инфракрасном излучении ^{70, 72, 73}, которые все же не позволили устранить расхождение. Более продуктивной кажется идея Стронга и др. ⁶⁸, предположивших, что интенсивности космических лучей в различных областях Галактики неодинаковы и пропорциональны магнитным полям в этих областях. Идея эта представляется естественной, так как в больших полях заряженные космические лучи удерживаются дольше и могут, таким образом, накапливаться. Наглядной аналогией могут служить области захваченной радиации в магнитном поле Земли. Кривая 2 на рис. 3, б показывает, что долготная зависимость расчетной интенсивности в этом случае хорошо согласуется с наблюдательными данными. Аналогичные соображения о повышенной интенсивности космических лучей вблизи центра Галактики были высказаны Анандом и Стивенсом ⁷⁴.

Проведенные эксперименты с высокой достоверностью открыли галактическое γ -излучение и, как часто бывает в подобных случаях, поставили еще больше вопросов. Многие не ясно как в сопоставлении результатов разных наблюдений, так и в их астрофизической «расшифровке». Например, что представляет мягкая степенная компонента в спектре потока от центра Галактики? О чем говорит повышенная интенсивность космических лучей в районе галактического центра? Возможно, она указывает на генерацию космических лучей галактическим ядром, как предполагает Гинзбург ⁸, хотя в этом случае в центре Галактики должен наблюдаться дискретный источник γ -излучения (см. раздел 6) гл. 2).

В настоящее время вопрос о существовании дискретного источника в центре Галактики окончательно не решен. Плохое угловое разрешение детекторов Кларка и др. ²¹ и Хелмкена и др. ⁴⁶ не позволило выделить центральный источник. Если такой источник есть, его интенсивность составляет $(4,9 \pm 1,8) \cdot 10^{-5}$ квант/см²сек для энергий $E_\gamma \geq 100$ Мэв ²¹ и $(1,9 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$ квант/см²сек для $E_\gamma \geq 15$ Мэв ⁴⁶. Наблюдения района центра Галактики с помощью телескопов с лучшим угловым разрешением ($\sim 2-3^\circ$) не дали однозначного результата. Так, Фраем и др. ³⁸ был найден дискретный источник, расположенный вблизи центра, поток от которого составлял $(1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$ квант/см²сек для энергий $E_\gamma \geq 100$ Мэв. Фихтель и др. ⁴⁵ не обнаружили центрального дискретного

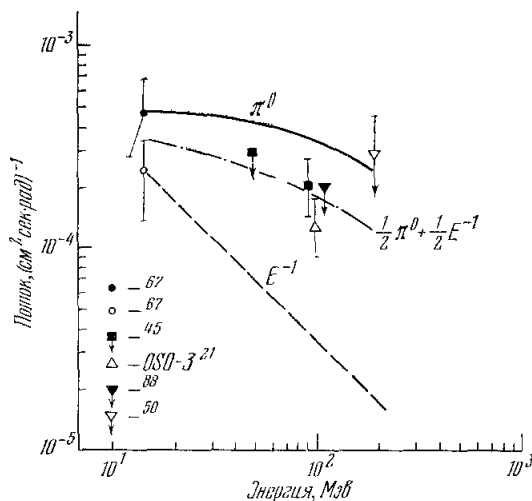


Рис. 4. Интегральный энергетический спектр γ -излучения района центра Галактики.

Кривые показывают спектры для чисто «пионного», чисто степенного и смешанного потоков. Так как эффективность регистрации γ -квантов зависит от формы спектра (особенно для малых энергий), данные работы ⁶⁷ обозначены темным кружком для «пионного» спектра и светлым для степенного спектра.

источника, хотя проводили наблюдения подобной же аппаратурой. Кинцер и др.⁶⁷ дают для центрального источника верхний предел $6 \cdot 10^{-5}$ квант/см²сек для $E_\gamma \geq 15$ Мэв.

Наблюдения на SAS-II⁸⁰ по предварительным результатам также не выявили центрального источника.

5. ДИСКРЕТНЫЕ ИСТОЧНИКИ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ

Вопросу о дискретных источниках γ -излучения посвящено большое количество экспериментальных работ. Основная часть их выполнена на высотных аэростатах. По сравнению со спутниковыми аэростатные наблюдения менее надежны и информативны, так как выполнены в условиях большого фона атмосферных γ -квантов, непродолжительны (часы), и позволяют просмотреть лишь отдельные участки неба. По полученным результатам аэростатные наблюдения последних двух лет разделились на две группы: одна^{45-47, 49, 50, 67} находит лишь диффузное излучение галактического диска и подтверждает интенсивность линейного источника, измеренную на OSO-3, другая^{38, 48, 51-53, 58} обнаруживает целый ряд дискретных источников γ -излучения, из потоков которых складывается почти все излучение Галактики. Найдены также источники в стороне от галактического экватора^{51, 52, 58}.

Нам представляется, что достоверность некоторых из объявленных источников недостаточна, и требуются дополнительные наблюдения для их подтверждения. Именно поэтому представление о галактическом γ -излучении, состоящем из отдельных дискретных источников, скорее всего не оправдано. С критикой методов выделения дискретных источников, обнаруженных в работах^{48, 51, 53, 58}, выступил О'Монгейн⁷⁷, указавший на недостаточный полный учет возможности группировки γ -квантов в результате случайных флуктуаций.

В этой связи естественно поставить вопрос о надежности регистрации и критерии «открытия» дискретного источника. Степень надежности — понятие относительное, и возможен разный подход к выработке критерия «принятия» источника. Так, например, при наблюдениях на спутнике SAS-A («Uhuru») ⁷⁵ дискретный источник рентгеновского излучения считался достоверно установленным, если превышение избытка над фоном выходило за $3,4 \sigma_{\text{эфф}}$ при одном и за $2,4 \sigma_{\text{эфф}}$ при каждом из двух сканирований области избытка, где $\sigma_{\text{эфф}}$ — эффективное стандартное отклонение. В работах Хёрна⁷⁶ и О'Монгейна⁷⁷ предложен метод функции максимального правдоподобия для выработки критерия принятия источника, а также для вычисления потоков, их ошибок и верхних пределов.

Функция правдоподобия наблюдения источника для случая пуассоновского распределения фоновых событий имеет вид

$$L(S) = \frac{1}{M} \left(\frac{S}{B} + 1 \right)^N e^{-S}, \quad (2)$$

где N — число γ -событий, наблюдаемых от некоторого участка неба, B и S — число фоновых событий и событий от источника из этого же участка, M — число проб (разбиений, сдвигов), проведенных при обработке экспериментальных данных. Максимального значения L_{max} функция достигает при $S_{\text{max}} = N - B$. В качестве критерия обнаружения источника берется 95%-ный доверительный уровень ($C = 0,95$), для которого

$$L_{\text{max}} \geq \frac{1}{1-C} = 20. \quad (3)$$

Ошибки S_+ , S_- и верхнее значение $S_{\text{верх}}^{\pi\pi}$ потока от источника определяются из выражений

$$L(S_{\pm}) = e^{-0,5} L_{\text{max}}(S_{\text{max}}), \quad (4)$$

$$L(S_{\text{верх}}) = L_{\text{max}}(S_{\text{max}})(1 - C). \quad (5)$$

Однако самым убедительным доказательством существования дискретного источника является регистрация избытка от него не только в двух наблюдениях одной и той же группы, но и разными группами (критерий «повторяемости»). Факт повторного наблюдения может быть учтен в методе максимума правдоподобия, как уменьшение «проб», из числа которых был найден случай с избытком.

Рассмотрим более подробно данные по регистрации γ -излучения от некоторых наиболее достоверных дискретных источников.

а) γ -излучение Солнца. γ -излучение спокойного Солнца до сих пор не обнаружено. Верхние пределы потоков как в интервале мягких γ -квантов, так в еще большей степени в интервале энергичного излучения еще слишком велики и на 2—3 порядка больше ожидаемого потока солнечного γ -альbedo, возникающего под действием космических лучей. Уровень γ -излучения Солнца значительно возрастает во время хромосферных вспышек, как было показано наблюдениями Чаппа и др.⁸² на орбитальной солнечной обсерватории OSO-7. Наблюдения проводились с помощью кристалла NaI(Tl) площадью $7 \times 7 \text{ см}^2$, окруженного анти-совпадательным экраном из CsI(Na). Энергия квантов в интервале 0,3—10 Мэв измерялась по амплитуде сцинтилляции в кристалле с помощью многоканального амплитудного анализатора. Разрешение прибора составляло $\sim 8\%$ на линии 662 кэв. В течение всего полета проводилась калибровка с помощью радиоактивного источника Co^{60} . Было зарегистрировано линейчатое γ -излучение во время двух вспышек в августе 1972 г. В табл. I приведены измеренные потоки γ -квантов.

Таблица I

Потоки линейчатого γ -излучения Солнца во время хромосферных вспышек⁸²

Вспышка, время измерения	Поток, квант·(см ² сек) ⁻¹			
	0,5 Мэв	2,2 Мэв	4,4 Мэв	6,1 Мэв
2В (H_{α}), 2 августа 1972 г., 0626—0632 UT (до max H_{α})	$(7 \pm 1,5) \cdot 10^{-2}$	$(2,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-1}$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-2}$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-2}$
3В (H_{α}), 7 августа 1972 г., 1538—1547 UT (после max H_{α})	$(3,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$	$(2,6 \pm 1) \cdot 10^{-2}$	$< 2 \cdot 10^{-2}$	$< 2 \cdot 10^{-2}$

Длительность вспышек γ -лучей составляла несколько минут. Во время наблюдений 4 августа были прослежены все стадии вспышки; 7 августа измерения, начавшиеся после выхода спутника из области тени, пропустили начальную фазу вспышки. При вспышке 4 августа было обнаружено возрастание счета прибора в четырех каналах, указывающее на регистрацию прибором линейчатого γ -излучения Солнца с энергией 0,5; 2,2;

4,4 и 6,1 Мэв. Первые две линии хорошо известны. Они возникают в процессе аннигиляции позитрона и электрона при остановке

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma, E_{\gamma_1} = 0,51 \text{ Мэв}, \quad (6)$$

и при захвате нейтрона протоном с рождением дейтона:

$$n + p \rightarrow d + \gamma, E_{\gamma_2} = 2,23 \text{ Мэв}. \quad (7)$$

Интерпретация двух других линий менее определена. Они могут быть связаны с излучением возбужденных ядер C^{12*} ($E_{\gamma_3} = 4,43 \text{ Мэв}$) и O^{16*} ($E_{\gamma_4} = 6,13 \text{ Мэв}$). Регистрация линейчатого γ -излучения Солнца

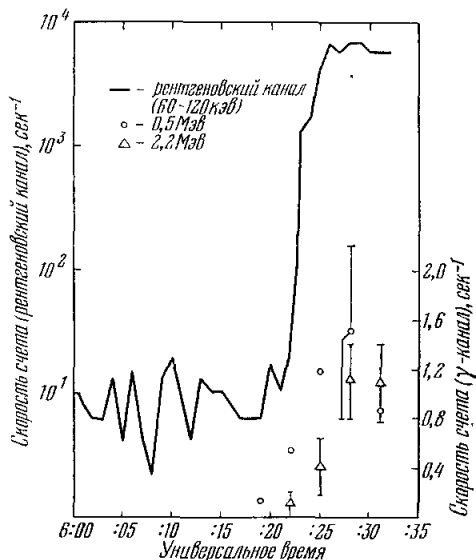


Рис. 5. Регистрация солнечного рентгеновского и γ -излучения во время вспышки класса 2В 4 августа 1972 г. ⁸²

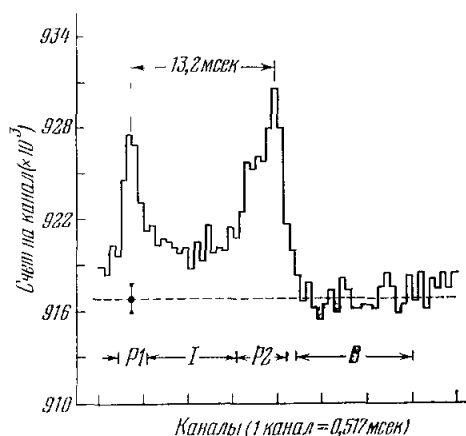


Рис. 6. Измерение пульсирующего γ -излучения с энергией 0,1—0,4 Мэв от пульсара NP 0532 ⁵⁹.

P1 — главный импульс, P2 — второй импульс, I — излучение между импульсами, B — фон.

дает интересную информацию о процессах, происходящих во время вспышки и связанных с ускорением частиц. Линия 2,2 Мэв определенно указывает на возникновение в солнечной атмосфере нейтронного потока, а аннигиляционная линия — на рождение большого числа π -мезонов, которые через цепочку $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ распадов приводят к появлению потока позитронов. Из интенсивности ядерных линий было определено число ускоренных во вспышке протонов. За время вспышки $\sim 10^3 \text{ сек}$ образовалось $2 \cdot 10^{33}$ протонов с энергиями 10—50 Мэв. Важную информацию несет и временная зависимость γ -излучения. На рис. 5 показано изменение со временем темпа счета солнечных γ -квантов с энергией 0,5 и 2,2 Мэв и жесткого рентгеновского излучения. Как видно, во время вспышки происходит одновременное синхронное возрастание потоков рентгеновского и γ -излучения. Рост γ -излучения до его максимального значения, характеризующий время ускорения солнечных протонов, происходит за время меньше 10 минут.

б) γ -излучение Крабовидной туманности и пульсара NP 0532. Как известно, Крабовидная туманность, образованная расширяющейся оболочкой Сверхновой 1054 г., наблюдается

во всех диапазонах электромагнитного спектра от радиообласти до жесткого рентгена. Кроме того, обнаружены пульсирующие с периодом пульсаций ~ 33 мсек радио-, оптическое и рентгеновское излучения пульсара NR 0532, расположенного в центре Крабовидной туманности и представляющего нейтронную звезду — остаток сверхновой.

В многочисленных работах, выполненных в основном в последнее время, излучение Крабовидной туманности и пульсара было измерено и в γ -диапазоне. Особенно успешными были наблюдения пульсирующей компоненты. В качестве примера на рис. 6 показано выделение пульсирующего излучения с энергией квантов $0,1-0,4$ Мэв⁵⁹. Пульсации отчетливо проявляются, если провести временной анализ скорости счета γ -детектора, задавшись точным периодом, полученным из радионаблюдений за тот же интервал времени. Отчетливо выделяется главный импульс (P1), второй импульс (P2), отстоящий от главного на 13,2 мсек, в согласии с наблюдениями в радиодиапазоне, оптике и рентгене, и повышенная интенсивность между импульсами. Штриховой линией показан фон, создаваемый атмосферными γ -квантами и заряженными частицами. Хотя вклад пульсирующей компоненты в общий счет прибора составляет лишь 0,7%, временной анализ позволяет надежно выделить ее. В других работах, измерявших пульсирующее γ -излучение NR 0532 в интервале $0,1-10^3$ Мэв, также обнаружены главный и второй импульсы, выбросы от которых составляли от 2,6 до 5 стандартных отклонений над фоном^{39, 41, 49, 60-62, 90-92}.

Временная последовательность импульсов существенно не отличается от того, что наблюдается в радио-, оптическом и рентгеновском диапазонах. Так, положение главного импульса во всех интервалах γ -излучения совпадает в пределах $0,5$ мсек с положением в других диапазонах электромагнитного спектра. Однако структура пульсирующего излучения претерпевает значительные изменения с увеличением энергии квантов: в рентгеновской области второй импульс больше главного импульса (их отношение равно 2,3), а в интервале энергичных γ -квантов ($E_\gamma \approx 20$ Мэв) они в лучшем случае сравниваются (отношение становится не больше 1,2)^{61, 91}.

Спектр излучения NR 0532 показан на рис. 7⁹⁰. Лучшим образом наблюдательные данные аппроксимируются степенной зависимостью

$$\frac{d(EI)}{dE} = 1,0E^{-1,1} \text{ кэв} \cdot (\text{см}^2 \text{ сек} \cdot \text{кэв})^{-1}. \quad (8)$$

Штриховой линией показан спектр полного (пульсирующего и постоянного) излучения Крабовидной туманности, который можно представить

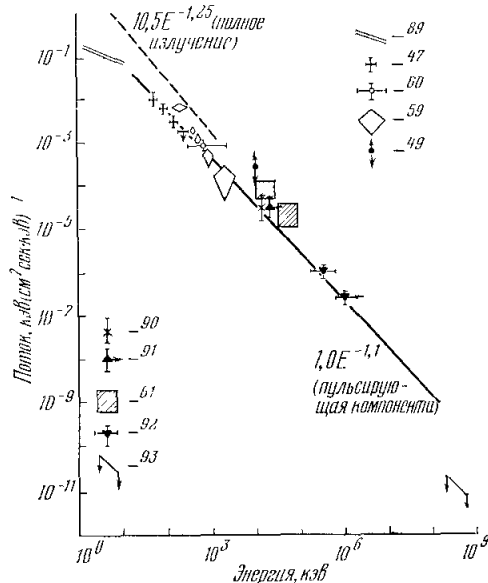


Рис. 7. Энергетический спектр γ -излучения пульсара NR 0532.

Сплошной линией показана лучшая аппроксимация экспериментальных данных ($E^{-1,1}$), штриховой кривой — полное излучение Крабовидной туманности.

в виде ⁹⁰

$$\frac{d(EI)}{dE} = 10,5 E^{-1,25} \text{ кэв} \cdot (\text{см}^2 \text{сек} \cdot \text{кэв})^{-1}. \quad (9)$$

Спектр (8) более пологий, чем (9), что приводит к увеличению доли пульсирующей компоненты с возрастанием энергии. Она составляет 2—10% в рентгене и больше 20% в интервале γ -квантов ($E_\gamma \approx 1\text{--}10 \text{ Мэв}$). Экстраполяция спектров (8) и (9) в область больших энергий приведет к их слиянию при энергии несколько гигаэлектрон-вольт, что означало бы возрастание доли пульсирующей компоненты до 100% при этих энергиях.

Результаты измерений Хиллера и др. ⁴¹ и Кинцера и др. ^{40, 49} дают большие потоки пульсирующей компоненты, превышающие спектр (8), что, возможно, указывает на временные вспышки, когда доля пульсирующего излучения возрастала почти до 100% в интервале мягких γ -квантов.

γ -излучение Крабовидной туманности измерено и в интервале сверхжесткого излучения. В результате двухлетних наблюдений Крабовидной туманности наземным черенковским телескопом Смитсоновской обсерватории был измерен поток, усредненная за все время наблюдений, величина которого равна $F_\gamma (\geq 2,5 \cdot 10^{11} \text{ эв}) = (4,4 \pm 1,4) \cdot 10^{-11} \text{ квант} \cdot (\text{см}^2 \text{сек})^{-1}$ ⁶⁴. Временной анализ этих же данных с использованием периода $\sim 33 \text{ мсек}$ не выявил пульсирующей компоненты сверхжесткого излучения пульсара ⁹³. Верхний предел потока, показанный на рис. 7, в 100 раз меньше экстраполяции по спектру (8), что указывает на изменение наклона спектра в интервале 1—100 Гэв . Доля пульсирующей компоненты, определенная по верхнему пределу, не превышает 30% ⁹⁴. Однако Гриндлей ^{63, 117} и Гриндлей и др. ⁸¹ указали на существование пульсирующего потока интенсивностью $F_\gamma (\geq 5 \cdot 10^{11} \text{ эв}) = (7,5 \pm 4) 10^{-12} \text{ квант} \cdot (\text{см}^2 \text{сек})^{-1}$.

В работе ⁶⁴ наблюдались также вариации потока, коррелирующие с моментами спонтанных изменений периода пульсации NP 0532. Для трех изменений периода, происшедших в 1969—1971 гг., было замечено возрастание потока до значения $(1,21 \pm 0,24) \cdot 10^{-10} \text{ квант} \cdot (\text{см}^2 \text{сек})^{-1}$ за интервал времени от 60 до 120 суток после изменения периода. Так как именно такое время требуется, чтобы релятивистская частица пересекла Крабовидную туманность, можно предположить, что зарегистрированные всплески сверхжесткого γ -излучения представляют излучение всей Крабовидной туманности, инициированное потоком частиц, испущенных пульсаром. Полная энергия излучения составляла $\sim 10^{41} \text{ эрг}$ и приблизительно равна энергии, выделявшейся при изменении момента количества движения пульсара.

Механизм излучения Крабовидной туманности и пульсара NP 0532 во всех исследованных интервалах электромагнитного спектра вплоть до γ -излучения с энергией квантов 100 Мэв представляет синхротронное излучение релятивистских электронов с энергией до 10^{17} эв , движущихся в магнитных полях. Для энергий больше 100 Мэв преобладающим механизмом становится комптон-синхротронный ^{5, 95}, при котором фотоны синхротронного излучения, созданного электронами, испытывают комптоновское рассеяние на других релятивистских электронах, превращаясь в высокоэнергичные γ -кванты. Оба механизма позволяют оценить величину среднего магнитного поля Крабовидной туманности ($\bar{H}_{\text{КТ}}$) и пульсара ($\bar{H}_{\text{П}}$). Из данных по сверхжесткому γ -излучению было получено, что поперечная составляющая магнитного поля Крабовидной туманности равна $\bar{H}_{\perp \text{КТ}} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ гс}$ в предположении равномерного поля и $\bar{H}_{\perp \text{КТ}}(0) = 10^{-3} \text{ гс}$ для значения поля в центре при законе изменения $1/r$ ^{94, 95}. Оценка магнитного поля пульсара дает величину $\bar{H}_{\text{П}} > 10^3 \text{ гс}$ ¹²¹.

в) Другие дискретные источники γ -квантов. Одной из областей неба, откуда регистрировались избыточные потоки γ -квантов, является созвездие Лебеда. Область неба в созвездии Лебеда исследовалась так же часто, как районы центра Галактики и антицентра с расположенной вблизи Крабовидной туманностью.

Созвездие Лебеда удобно для аэростатных наблюдений, так как просматривается при запусках на средних широтах в северном полушарии, где расположены основные полигоны Европы и Америки. На рис. 8 показана схематическая карта района Лебеда с участками, от которых наблюдались избыточные потоки γ -квантов. Границы участков указывают возможное местоположение источника, определяемое неточностью измерения направлений прихода γ -квантов, в пределах одного стандартного отклонения. Результаты наблюдений приведены в табл. II. Впервые в 1965 г. избыточный над атмосферным фоном поток γ -квантов с энергией $E_\gamma \geq 50$ Мэв был зарегистрирован Дьюти и др.^{35, 100} с помощью искрового γ -телескопа. Величина

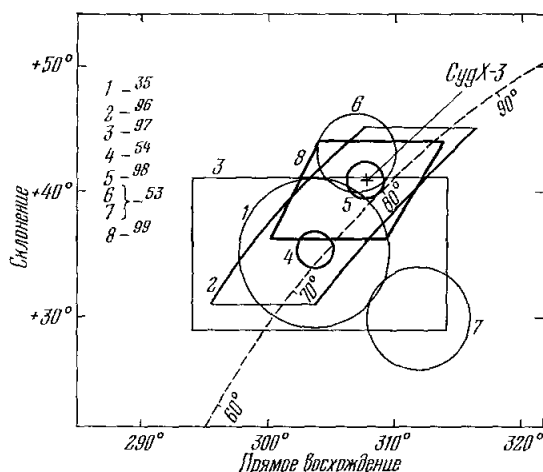


Рис. 8. Карта района созвездия Лебеда.

Указаны участки избыточного γ -излучения и галактический экватор (штрихованная линия).

наблюдений приведены в табл. II. Впервые в 1965 г. избыточный над атмосферным фоном поток γ -квантов с энергией $E_\gamma \geq 50$ Мэв был зарегистрирован Дьюти и др.^{35, 100} с помощью искрового γ -телескопа. Величина

Таблица II

Избыточные потоки γ -квантов из района созвездия Лебеда

Участки на рис. 8	Авторы	Дата	Пороговая энергия, Мэв	Поток $F_\gamma (\geq E)$ квант.·(см ² сек) ⁻¹	Превышение над фоном в стандартных отклонениях
1	Дьюти и др. ^{35, 100} Фрай, Уэнг ¹⁰¹	23.10.1965 г. 01.1965 г. 07.1966 г.	50 100 100	$(1,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$ $< 6 \cdot 10^{-5}$ $< 1,2 \cdot 10^{-5}$	3
2	Валдец, Уэддингтон ⁹⁶ Хатчинсон и др. ¹²⁰	07.1967 г. 04.1968— 06.1968 г.	100 40	$(3 \pm 1,5) \cdot 10^{-4}$ рад ⁻¹ $(4,9 \pm 2,1) \cdot 10^{-4}$ рад ⁻¹	4 2,6
3	Нил и др. ⁹⁷	9.10.1969 г. 16.10.1969 г.	60	$(5,7 \pm 3) \cdot 10^{-5}$	1,8
4	Владимирский и др. ⁵⁴ Владимирский и др. ⁵⁵	08.1970— 10.1970 г. 1971 г.	$2,5 \cdot 10^6$ $2,5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-11}$ $< 4 \cdot 10^{-12}$	3,7

потока составляла $F_\gamma (\geq 50 \text{ Мэв}) = (1,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$ квант.·(см²сек)⁻¹¹⁰⁰. Однако в двух наблюдениях Фрай и др.¹⁰¹, проведенных до и после³⁵ с интервалом приблизительно в девять месяцев, избыток обнаружен не был. Позднее избыточное излучение с энергией квантов больше 100 и 60 Мэв было вновь зарегистрировано из этой области^{57, 97, 98, 120}. В 1970 г. группа Крымской астрофизической обсерватории, регистрирую-

щая сверхжесткие γ -кванты по черенковскому излучению ливней, обнаружила избыточный поток $F_\gamma (\geq 2 \cdot 10^{12} \text{ эв}) \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ квант} \cdot (\text{см}^2 \text{сек})^{-1}$ ⁵⁴ от этого же участка неба (превышение над атмосферным фоном составляло 3,6 стандартных отклонения). Наблюдения, проведенные этой же группой в 1971 г., избытка не обнаружили, и верхний предел потока оказался в пять раз меньше измеренного ранее ⁵⁵. Как видно, ситуация достаточно сложная, но по статистическим оценкам и повторяемости наблюдений избыточных потоков следует признать существование дискретного источника γ -квантов, положение которого определяется координатами: прямое восхождение $\alpha = 304^\circ \pm 1,0^\circ$, склонение $\delta = 35,5^\circ \pm 1,0^\circ$ (источник КРАО-1) ^{54, 102}. Отсутствие источника в некоторых работах может быть объяснено его переменностью, в результате которой поток оказывался ниже уровня чувствительности телескопов. В этом случае из результатов наблюдений следует, что за 6—9 месяцев поток изменялся приблизительно на порядок в интервале энергий $E_\gamma \geq 100 \text{ Мэв}$ и по крайней мере в пять раз в интервале сверхжестких γ -квантов.

Целенаправленный характер носил поиск γ -излучения дискретного источника Суг X-3, расположенного в созвездии Лебедя, откуда в течение сентября и октября 1972 г. было зарегистрировано несколько мощных вспышек радио- и инфракрасного излучения ^{103, 104}. Расположение источника вспышки по данным радионаблюдений определялось координатами $\alpha_{\text{в}} = 307^\circ 39'$, $\delta_{\text{в}} = 40^\circ 47'$, а расстояние до него оценивалось приблизительно в 12 *кпс* ¹⁰⁴. Рентгеновское излучение Суг X-3 за это же время не носило характера вспышки, но была обнаружена его синусоидальная переменность с периодом 4,8 часа и плавный дрейф как среднего уровня, так и амплитуды колебаний ¹⁰⁵. Источник Суг X-3 является, по-видимому, двойной системой.

В работе Владимирского и др. ⁹⁸, наблюдавших наземным γ -телескопом источник Суг X-3 через несколько дней после первой вспышки радиоизлучения, был зарегистрирован поток сверхжестких γ -квантов, превышающий фон на 5σ : $F_{\text{Суг X-3}} (\geq 10^6 \text{ Мэв}) = 2 \cdot 10^{-10} \text{ квант} \cdot (\text{см}^2 \text{сек})^{-1}$. Гальпер и др. ⁹⁹ наблюдали район созвездия Лебедя широкоугольным телескопом с искровыми камерами на высотном аэростате через несколько дней после второй вспышки источника. От участка неба, в центре которого расположен Суг X-3, был обнаружен избыточный поток, превышающий фон на $3,6\sigma$: $F_{\text{Суг X-3}} (\geq 40 \text{ Мэв}) \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ квант} \cdot (\text{см}^2 \text{сек})^{-1}$. Приведенные результаты с высокой степенью достоверности указывают на существование γ -излучения от вспыхивающего источника Суг X-3 в период его повышенной активности. Мощность γ -излучения Суг X-3 составляла $\sim 5 \cdot 10^{37} \text{ эрг/сек}$ для энергий $E_\gamma \geq 40 \text{ Мэв}$ и $\sim 2 \cdot 10^{38} \text{ эрг/сек}$ для $E_\gamma \geq 10^{12} \text{ эв}$. В то же время мощность рентгеновского излучения для энергий 2—6 *кэв* была $\sim 6 \cdot 10^{37} \text{ эрг/сек}$.

Рассмотрим еще два дискретных источника гамма-излучения с энергией больше 100 *Мэв*: *Lib* γ -1 ⁵² и *Tau* γ -1 ³⁷, которые были предварительно отождествлены с внегалактическими радиообъектами PKS 1514-24 и 3C 120. Источник *Lib* γ -1 был зарегистрирован при одном наблюдении, причем избыточный поток γ -квантов превышал уровень фона на 6σ . Так как во время более ранних наблюдений этого же участка неба, проведенных теми же авторами, избыток обнаружен не был, источник *Lib* γ -1 можно считать переменным. Переменным также следует считать и источник *Tau* γ -1. Помимо работы ³⁷, γ -излучение от этого участка неба было зарегистрировано в работах ^{51, 58}. Однако по предварительным данным SAS-II, наблюдавшего район 3C 120 в течение недели, γ -излучение объекта не превышает уровня $10^{-5} \text{ квант} \cdot (\text{см}^2 \text{сек})^{-1}$, что на порядок меньше ранее зарегистрированного потока.

Пекулярная галактика 3С 120 является одним из объектов, для которых Шкловским¹⁰⁶ были предсказаны вспышки γ -излучения одновременно с возрастанием коротковолнового радиоизлучения. И действительно, наблюдение источника Тау γ -1 совпало с одним из самых больших всплесков радиоизлучения галактики^{107, 108}. Галактики 3С 120 и PKS 1514-24 относятся к редкому классу внегалактических объектов — радиогалактик с яркими (13—15 звездной величины) звездообразными ядрами, обнаруживающими довольно сильную оптическую переменность^{53, 109, 110}. По своим свойствам они близки к сейфертовским галактикам. Наблюдение всплесчного γ -излучения у двух объектов этого класса еще сильнее подчеркивает их необычную природу. Представляет интерес поиск потоков γ -квантов от других источников такого типа, список которых приводится в работах^{109, 110}, от объектов, рассмотренных Шкловским¹⁰⁶, и от сейфертовских галактик. В частности, в работе Гальпера и др.⁷¹ с помощью искрового γ -телескопа на спутнике «Космос-264» обнаружено избыточное γ -излучение с энергией $E_\gamma \geq 100$ Мэв от участка неба, в котором находятся сейфертовские галактики NGC 4051 и NGC 4151. Зарегистрированный поток составляет величину $4 \cdot 10^{-5}$ квант \cdot (см²сек)⁻¹ и превышает фон на четыре стандартных отклонения.

Переменный источник γ -квантов сверхвысокой энергии, не отождествленный ни с каким астрофизическим объектом, был обнаружен Степаняном и др.⁵⁶ в созвездии Кассиопеи. Наблюдалось изменение интенсивности источника в течение недели.

Таким образом, наблюдательные данные указывают на существование ряда дискретных источников. Хотя их характеристики, например, энергетический спектр, еще не измерены, и надежное отождествление с астрофизическими объектами не проведено, одно общее свойство источников установлено — их временная переменность^{37, 124}. Действительно все без исключения рассмотренные выше дискретные источники обнаруживают в той или иной мере временную переменность, которая носит всплесчный, спорадический характер.

6. КРАТКОВРЕМЕННЫЕ ПОТОКИ КОСМИЧЕСКИХ γ -КВАНТОВ

Всплески потоков космического γ -излучения малой энергии обнаружили недавно Клебеседель и др.¹¹¹, проводившие постоянные в течение трех лет (июль 1969 г. — июль 1972 г.) наблюдения на спутниках «Вела-5А, 5В, 6А и 6В». Спутники «Вела» обращались по далекой круговой орбите с радиусом, равным ~ 20 радиусам Земли. Регистрирующая установка на каждом спутнике состояла из шести кристаллов CsI размером 10 см³, обернутых тонким экраном, так что могли регистрироваться электроны с энергией $E_e > 0,75$ Мэв и протоны с энергией $E_p > 20$ Мэв. Кристаллы располагались на поверхности спутника таким образом, что телесный угол установки составлял 4л. Искались случаи резкого повышения скорости счета детекторов. За все время наблюдений было зарегистрировано 16 таких событий, когда скорость счета кристаллов возрастала в десятки раз. Некоторые из зарегистрированных случаев оказались записанными на двух, трех и даже всех четырех спутниках. Гистограммы одной такой одновременной записи на трех спутниках приведены на рис. 9. В начале каждой гистограммы показан нормальный темп счета приборов до всплеска. Стрелками обозначены отдельные пики «тонкой структуры», повторяющейся на всех трех гистограммах. Временная структура всплесков на разных спутниках совпадала с точностью до 0,8 сек. С учетом больших расстояний между спутниками такая одновременность означает, что всплески могли быть вызваны электромагнитным излучением либо

потоками заряженных частиц большой энергии (несколько Гэв), способных пройти без отклонения магнитное поле Земли. Такие частицы были бы зарегистрированы детекторами заряженных частиц, имевшимися на спутниках, которые, однако, не показали изменения счета во время регистрации всплесков. Следовательно, наблюдались кратковременные, длительностью от 0,1 до 30 сек потоки мягкого γ -излучения с энергией 0,2—4,5 Мэв .

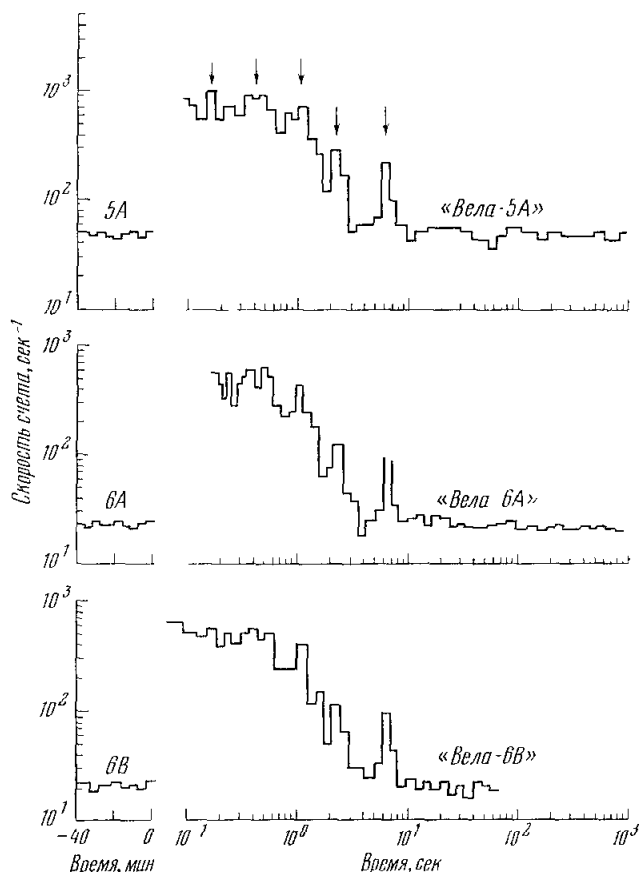


Рис. 9 Пример одновременной регистрации кратковременного потока мягкого γ -излучения на ИСЗ «Вела»¹¹¹.

Стрелками показаны пики «тонкой структуры».

Потоки энергии излучения составляли 10^{-5} — $2 \cdot 10^{-4} \text{ эрг/см}^2$, что представляет значительную для космического излучения величину, сравнимую, например, с излучением Солнца в линии 0,5 Мэв за все время хромосферной вспышки ($\sim 10^3 \text{ сек}$). В то же время отсутствовала корреляция зарегистрированных всплесков с солнечной активностью и известными вспышками сверхновых. Приблизительное направление прихода потока γ -квантов, определенное по запаздыванию сигналов на разных спутниках, исключает Солнце и Землю как возможные источники зарегистрированного излучения.

Результаты работы¹¹¹ были подтверждены Клайном и Дезеем¹¹² по наблюдениям на спутникахOGO и IMP, зарегистрировавшими те же самые всплески. Авторы¹¹² отмечают также необычно жесткий энергетический спектр излучения, определенный по результатам спутника IMP-6, короткую временную шкалу (передний фронт меньше 0,05 сек, спад $\sim 1 \text{ сек}$)

и большую интенсивность потоков. На спутнике IMP-7 наблюдения продолжаются.

Обнаружение кратковременных всплесков мягкого γ -излучения дает еще одно убедительное доказательство резкой переменности источников космических γ -квантов. По-видимому, исследователи столкнулись с проявлением нового, ранее неизвестного явления.

7. РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ γ -АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Последние годы отмечены значительным совершенствованием техники наблюдений, охватившим все интервалы γ -диапазона, от детекторов мягкого излучения до наземных телескопов γ -квантов сверхвысоких энергий. Были усовершенствованы методы выделения космического γ -излучения, существенно увеличены геометрические факторы и эффективные площади телескопов, улучшено их энергетическое и угловое разрешение. Кроме того, большое внимание было уделено обработке экспериментальных данных, в частности, методам выделения потоков от дискретных источников⁷⁶⁻⁷⁸.

В интервале мягких γ -квантов все большее распространение находит метод двойного комптоновского рассеяния, позволяющий более надежно выделять γ -кванты, определять их направление и энергию. В работах^{66, 84} приведены предварительные результаты наблюдений γ -квантов с энергией 1—10 Мэв, выполненных этим методом телескопом из сцинтилляционных счетчиков. Еще лучшие характеристики ожидаются у телескопа с использованием жидкостных детекторов из-за их более высокой эффективности, лучшего пространственного и энергетического разрешения. На рис. 10 представлена схема проекта γ -телескопа Альвареца и др.¹¹³ для наблюдения γ -излучения в интервале 0,3—3 Мэв. В верхнем жидкостном ксеноновом счетчике регистрируется акт первого комптоновского рассеяния γ -кванта, измеряются координаты (x_1, y_1) и энергия (E_e) электрона отдачи. В нижней многослойной проволоочной камере, заполненной жидким ксеноном, определяется место второго комптоновского рассеяния (x_2, y_2) и измеряется полная энергия рассеянного кванта (E'_γ). По измеренным значениям x_1, y_1, x_2, y_2, E_e и E'_γ , используя формулы комптоновского рассеяния, вычисляют энергию γ -кванта E_γ и направление его прихода. По одному зарегистрированному событию определяется круг на небе, на котором расположен источник γ -квантов. Пересечение кругов, опре-

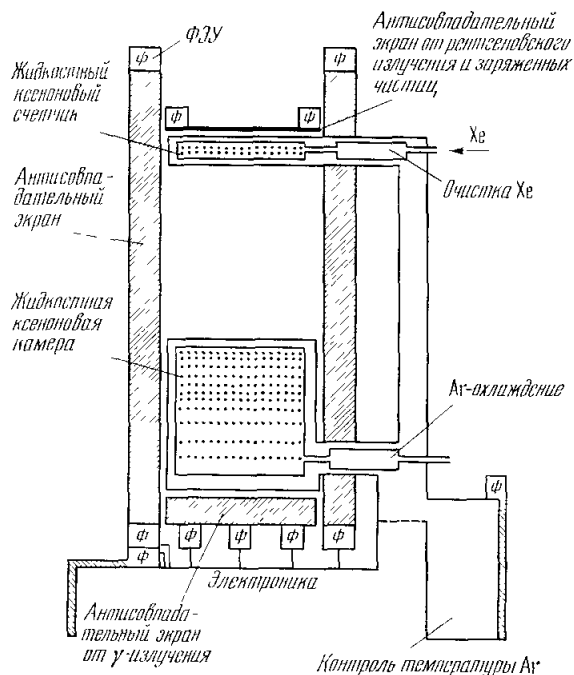


Рис. 10. Проект жидкостного ксенонового γ -телескопа, предназначенного для регистрации γ -квантов с энергией 0,3—3 Мэв по двойному комптоновскому рассеянию¹¹³.

деленных для разных событий, укажет место источника. При существующей технике жидкостных ксеноновых детекторов (пространственное разрешение ~ 2 мм, энергетическое разрешение $\sim 10\%$ при 300 кэв) можно рассчитывать на локализацию источника с точностью до долей квадратного градуса. Для эффективной площади 400 см² чувствительность телескопа к потоку от дискретного источника составит 10^{-3} квант \cdot (см \cdot сек)⁻¹ за одно наблюдение на высотном аэростате.

Весьма эффективной оказалась методика регистрации всплесков мягкого γ -излучения, использованная на спутниках «Вела»¹¹¹. Детекторы имели 4 π -геометрию, просматривая сразу всю небесную сферу. Измерения

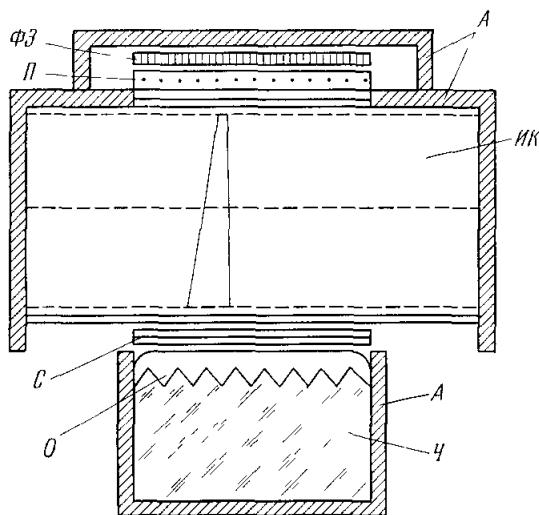


Рис. 11. Блок-схема фотоэмульсионно-искрового γ -телескопа^{33, 49}.

А — антисовпадателный счетчик, П — пропорциональный счетчик, ФЭ — фотоэмульсионно-конвертор, ИК — широкоазовая искровая камера, С — сцинтилляционный счетчик, Ч — черенковский направленный счетчик, О — отражатель.

проводились непрерывно в течение трех лет, так что экспозиция превосходила на несколько порядков экспозицию любого из наблюдений, проведенных до сих пор с помощью направленного γ -телескопа. При этом измерялось направление потока (по запаздыванию всплесков на разных спутниках), временная структура и энергетический спектр всплеска. По-видимому, такой метод применим и для регистрации «вспышечных» потоков γ -квантов больших энергий, а добавление антисовпадателных экранов позволило бы снизить космический фон и регистрировать потоки меньшей интенсивности, которые, возможно, встречаются чаще. В интервале энергий 10 – 50 Мэв начали успешно применяться γ -телескопы с искровыми камерами^{32, 33, 49, 67, 85–87, 91}. В телескопе Шэа и др. (см. ^{33, 49, 67}), показанном на рис. 11, в качестве конвертора применена фотоэмульсия. Широкоазовая искровая камера позволяет ограничить место поиска события в фотоэмульсии площадью до нескольких квадратных миллиметров. Регистрация конверсионной пары в фотоэмульсии дает лучшее пространственное и угловое разрешение (точность измерения угла $\sim 3^\circ$ для $E_\gamma = 15$ Мэв), а также более надежное отделение от фоновых событий. Большие успехи достигнуты в создании искровых телескопов с автоматическим съемом информации, предназначенных для работы на спутниках^{87, 114, 115}. Блок-схема телескопа Фихтеля и др.^{87, 123} с нитяными искровыми камерами, ведущего непрерывные наблюдения γ -квантов с энергией $E_\gamma \geq 40$ Мэв на спутнике SAS-II показана на рис. 12 (см. дополнение при корректуре 1 на стр. 512). Телескоп отрабатывался в течение нескольких лет на высотных аэростатах^{45, 78} и достиг того уровня надежности, который требуется для проведения длительных (многомесячных) измерений на спутнике. При площади телескопа 540 см², геометрическом факторе 125 см²стер, угловом разрешении $\sim 2^\circ$ для γ -квантов с энергией 100 Мэв и с учетом большой длительности наблюдений в условиях сравнительно невысокого фона (на почти эква-

ториальной орбите) ожидается, что данные SAS-II позволят зарегистрировать дискретные источники с потоком $\geq 5 \cdot 10^{-7}$ квант $\cdot (см^2 \cdot сек)^{-1}$.

Продвинулась вперед техника регистрации γ -квантов газовым черенковским счетчиком низкого давления. Преимуществами этого метода являются высокое угловое разрешение детектора при сравнительной простоте (не используются следовые детекторы — искровые камеры или фотоэмульсия), большая эффективная площадь, малый фон от космических частиц и возможность измерения потоков γ -квантов с энергией в сотни и тысячи мегаэлектрон-вольт, что пока невозможно другими методами.

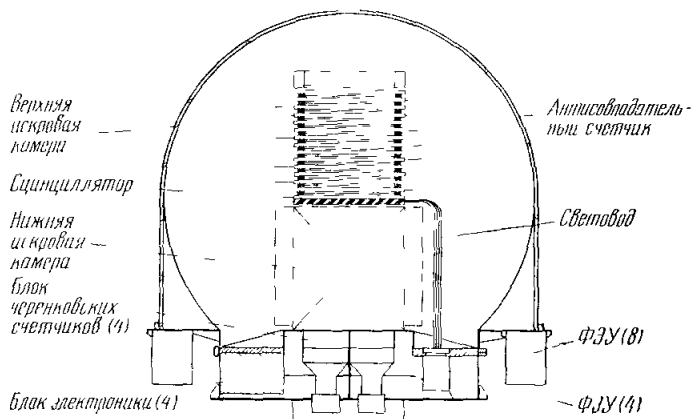


Рис. 12. Блок-схема γ -телескопа с нижней искровой камерой, работающего на борту ИСЗ SAS-II⁸⁷.

Проведены первые измерения с помощью подобной методики на аэроста-тах^{46, 90, 92}. Эффективная площадь телескопов составляла $3,4 м^2$ ^{46, 90} и $4,5 м^2$ ⁹². Впереди — использование таких γ -телескопов на спутниках.

Из планируемых наблюдений по γ -астрономии в интервале энергичных квантов следует отметить телескопы для спутников COS-B (1974 г.) и HEAO (1975—1976 гг.)⁷. Оба телескопа снабжены проволочными искровыми камерами, позволяющими измерять направление γ -квантов с точностью $\sim 2^\circ$ (для $E_\gamma = 100 Мэв$) и предназначены для регистрации γ -квантов с энергией $E_\gamma \geq 30 Мэв$. Европейский телескоп на COS-B имеет площадь $576 см^2$ и геометрический фактор $70 см^2 \cdot стер$. Американский телескоп на HEAO-B при площади регистрации $4000 см^2$ будет иметь геометрический фактор $\sim 2000 см^2 \cdot стер$.

В области γ -квантов сверхвысоких энергий, регистрируемых наземными установками по черенковскому излучению ливней, существенное усовершенствование метода предложено Гриндлеем^{116, 117}. Им найдена возможность отделения ливней, создаваемых γ -квантами, от ливней, генерируемых протонами и ядрами. Наблюдение ведется несколькими рефлекторами, одни из которых настроены на исследуемый участок неба, а другие смещены по углу настолько, что регистрируют излучение, возникающее на больших глубинах атмосферы. В таком случае ливни от γ -квантов, образуемые в верхних слоях атмосферы (в соответствии с ко-версионной и радиационной длинами), должны регистрироваться только первой группой рефлекторов, в то время как ливни, порождаемые ядерно-активными частицами, длина взаимодействия которых больше радиационной длины, будут давать вспышки в обеих группах рефлекторов. Включая группы на антисовпадение, удастся «подавить» до $\sim 70\%$ счет фоновых протонных ливней.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При всей важности результатов наблюдательной γ -астрономии, полученных в последние годы, нам представляется, что это лишь начало. Дальнейший прогресс в этой области астрофизики зависит от создания более современной аппаратуры, и в этом направлении уже многое сделано. В одной из своих последних статей Л. А. Арцимович¹¹³ писал, что использование новой космической техники для внеатмосферной астрономии должно привести к такому «информационному взрыву», который заставит вновь подвергнуть коренному пересмотру многие из наиболее фундаментальных предположений о строении материи. Наблюдательная γ -астрономия, несомненно, внесет достойный заряд для этого «взрыва»

Дополнения при корректуре. 1. По сообщению¹²⁵, γ -телескоп на SAS-II прекратил по техническим причинам работу в июне 1973 г.

2. За прошедшие несколько месяцев появились экспериментальные работы (см., например, ¹²⁶), убедительно подтвердившие факт существования кратковременных вспышек мягкого γ -излучения, обнаруженных на спутниках «Вела». Установлено, что максимальная интенсивность всплесков приходится на энергии 100—400 кэв. По уточненным данным спутников «Вела», IMP и OSO-7 удалось определить небесные координаты источников некоторых всплесков. Источники приблизительно изотропно расположены на небе и не совпадают ни с какими особыми астрофизическими объектами. Изотропия указывает на то, что источники являются либо близкими галактическими объектами в радиусе < 100 пс¹²⁷, либо, напротив, далекими метagalacticкими объектами, находящимися на расстояниях > 1 Мпс¹²⁸.

Московский инженерно-физический институт

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский, УФН 84, 201 (1964).
2. G. G. Fazio, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 5, 481 (1967).
3. А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Угрюмов, Б. И. Лучков, О. Ф. Прилуцкий, УФН 105, 209 (1971).
4. Y. Pal, Proc. of the Intern. Conference on Cosmic Rays, Budapest, 1969, p. 241.
5. R. J. Gould, Phys. Rev. Lett. 15, 577 (1965).
6. Y. Pal, Tata Institute of Fundamental Research Preprint TIFR-N CR-NE-72, Bombay (1972).
7. G. G. Fazio, Smithsonian Astrophysical Observatory Preprint 206—026, Cambridge (1972).
8. В. Л. Гинзбург, УФН 108, 273 (1972).
9. J. Lequeux, сборник «Radio Astronomy and the Galactic System», Ed H. van Woerden, N.Y., Academic Press (1967), p. 393.
10. W. F. Hoffman, C. L. Frederick, R. J. Emery, Astrophys. J. (Lett.) 164, L23 (1971).
11. E. Kellogg, H. Gursky, S. Murray, H. Tananbaum, R. Giacconi, ibid. 169, L99.
12. F. W. Stecker, Nature 224, 870 (1969).
13. И. Л. Розенталь, И. Б. Шукалов, Астроном. ж. 46, 779 (1969).
14. F. W. Stecker, D. L. Morgan, J. Bredekamp, Phys. Rev. Lett. 27, 1469 (1971).
15. В. А. Амбарцумян, Вестн. АН СССР, № 2, 20 (1969).
16. В. А. Амбарцумян, В. В. Казютинский, Природа, № 4, 16 (1970).
17. D. A. Schwartz, H. S. Hudson, L. E. Peterson, Astrophys. J. 162, 431 (1970).
18. A. Toor, F. D. Seward, L. R. Cathey, W. E. Kunuel, ibid. 160, 209.
19. C. Cunningham, D. Groves, R. Price, R. Rodrigues, C. Swift, H. Mark, ibid., p. 1177.
20. G. W. Clark, G. P. Garmire, W. L. Kraushaar, Astrophys. J. (Lett.) 153, L203 (1968); Proc. of the Intern. Conference on Cosmic Rays, Hobart, v. 1, 1971, p. 91.

21. W. L. Kraushaar, G. W. Clark, G. P. Garmire, R. Borken, P. Higbie, C. Leong, T. Thorsos, *Astrophys. J.* **177**, 341 (1972).
22. Л. С. Братоловцова-Цулукидзе, Н. Л. Григоров, Л. Ф. Калликин, А. С. Мелиоранский, Е. А. Пряхин, И. А. Савенко, В. Я. Юфаркин, *Косм. иссл.* **8**, 136 (1970).
23. J. I. Vette, D. Gruber, J. L. Matteson, L. E. Peterson, *Astrophys. J. (Lett.)* **160**, L161 (1970).
24. С. В. Голенецкий, Е. П. Мазец, *Письма ЖЭТФ* **14**, 201 (1971).
25. S. V. Golenetsky, E. P. Mazets, V. N. Ilinsky, R. L. Aptekar, M. M. Bredov, Yu. A. Guruyan, V. N. Panov, *Astrophys. Lett.* **9**, 69 (1971).
26. A. W. Strong, A. W. Wolfendale, J. Wdowczyk, *Nature* **241**, 109 (1973).
27. R. K. Manchanda, S. Biswas, P. C. Agarwal, G. S. Ockhale, V. S. Iyengar, P. K. Kunte, B. V. Steckantan, *Astrophys. and Space Sci.* **15**, 272 (1972).
28. C. Dyer, G. E. Morfill, *ibid.* **14**, 243 (1971).
29. A. Danjo, *Proc. of IAU Symposium No. 55 on X Ray and Gamma Ray Astronomy*, Ed. H. Bradt, Madrid, (в печати).
30. K. Brecher, P. Morrison, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 802 (1969).
31. R. Cowsik, E. Y. Kobetich, *ibid.* **20**, p. 38.
32. H. A. Mayer-Hasselwander, E. Pfeffermann, K. Pinkau, H. Rothermel, M. Sommer, *Astrophys. J. (Lett.)* **175**, L23 (1972).
33. G. H. Share, R. L. Kinzer, N. Seeman, *Proc. of the Intern. Conference on Cosmic Rays*, Denver, v. 1, 1973, p. 14.
34. J. I. Trombka, A. E. Metzger, J. R. Arnold, J. L. Matteson, R. C. Reedy, L. E. Peterson, *Astrophys. J.* **181**, 737 (1973).
35. J. G. Duthie, R. Cobb, J. Stewart, *Phys. Rev. Lett.* **17**, 263 (1966).
36. G. M. Frye, Jr., J. A. Staib, A. D. Zych, V. D. Hopper, W. R. Rawlinson, J. A. Thomas, *Nature* **223**, 1320 (1969).
37. С. А. Волобуев, А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Угрюмов, В. И. Лучков, Ю. В. Озеров, *Письма ЖЭТФ* **13**, 43 (1971); *Астрон. ж.* **48**, 1105 (1971).
38. G. M. Frye, Jr., P. A. Albats, A. D. Zych, J. A. Staib, V. D. Hopper, W. R. Rawlinson, J. A. Thomas, *Nature* **231**, 372 (1971).
39. J. Vasseur, J. Paul, B. Parlier, J. P. Leray, M. Forichon, B. Arginier, G. Boella, L. Maraschi, A. Treves, R. Bucchieri, L. Scarsi, *Nature* **226**, 534 (1970); **233**, 48 (1971).
40. R. L. Kinzer, R. C. Noggle, N. Seeman, G. H. Share, *ibid.* **229**, 187.
41. R. R. Hillier, W. R. Jackson, A. Murray, R. M. Radfern, R. G. Sale, *Astrophys. J. (Lett.)* **162**, L177 (1970).
42. J. H. Black, G. G. Fazio, *Smithsonian Astrophysical Observatory Preprint* 306—037A, Cambridge (1973).
43. G. Cavallo, R. J. Gould, *Nuovo Cimento* **B2**, 77 (1971).
44. F. W. Stecker, *Astrophys. and Space Sci.* **6**, 377 (1970).
45. C. F. Fichtel, R. C. Hartman, D. A. Kniffen, M. Sommer, *Astrophys. J.* **171**, 31 (1972).
46. H. F. Helmken, J. A. Hoffman, *Nature (Phys. Sci.)* **243**, 6 (1973).
47. W. N. Johnson, III, F. R. Harden, R. C. Haymes, *Astrophys. J. (Lett.)* **172**, L1 (1972).
48. R. Browning, D. Ramsden, P. J. Wright, *Nature* **238**, 138 (1972).
49. R. L. Kinzer, G. H. Share, N. Seeman, *Astrophys. J.* **180**, 547 (1973).
50. K. Bennett, P. Penengo, G. K. Rochester, T. R. Sanderson, R. K. Sood, *Nature*, **238**, 31 (1972).
51. G. M. Frye, Jr., P. A. Albats, A. D. Zych, сборник ²⁹.
52. G. M. Frye, Jr., P. A. Albats, A. D. Zych, J. A. Staib, V. D. Hopper, W. R. Rawlinson, J. A. Thomas, *Nature* **233**, 466 (1971).
53. R. Browning, D. Ramsden, P. J. Wright, *Nature (Phys. Sci.)* **235**, 128 (1972).
54. Б. М. Владимирский, И. В. Павлов, А. А. Степанян, В. П. Фомиин, *Астроном. ж.* **49**, 3 (1972).
55. В. М. Vladimirsky, I. V. Pavlov, A. A. Stepanian, V. P. Fomin, *сборник*, цит. в ²⁰, в. 5, p. 1708.
56. A. A. Stepanian, B. M. Vladimirsky, V. P. Fomin, *Nature (Phys. Sci.)* **239**, 40 (1972).
57. G. M. Frye, C. P. Wang, *Astrophys. J.* **158**, 925 (1969).
58. M. Forichlon, B. Agrinier, J. P. Leray, P. Parlier, G. Boella, L. Maraschi, R. Bucchieri, N. R. Robba, L. Scarsi, *сборник*, цит. в ²⁹.

59. J. D. Kurfess, *Astrophys. J. (Lett.)* **168**, L39 (1971).
60. L. E. Orwig, E. L. Chupp, D.-J. Forrest, *Nature (Phys. Sci.)* **231**, 171 (1971).
61. P. Albats, G. M. Frye, Jr., A. D. Zych, O. B. Mace, V. D. Hopper, J. A. Thomas, *Nature* **240**, 221 (1972).
62. J. P. Leray, J. Vasseur, J. Paul, B. Parlier, M. Forichon, B. Agrinier, G. Boella, L. Maraschi, A. Treves, R. Buccheri, A. Cuccia, L. Scarsi, *Astron. and Astrophys.* **16**, 443 (1972).
63. J. E. Grindley, *Astrophys. J. (Lett.)* **174**, L9 (1972).
64. G. G. Fazio, H. F. Helmken, E. O' Mongain, T. C. Weekes, *ibid.* **175**, L117.
65. T. P. Stecher, F. W. Stecker, *Nature* **226**, 1234 (1970).
66. V. Schönfelder, G. Lichti, *сборник* ³³, p. 1.
67. R. L. Kinzer, G. H. Share, N. Seeman, *сборник* ³³, p. 433.
68. A. W. Strong, J. Wdowczyk, A. W. Wolfendale, *ibid.*, p. 463.
69. F. W. Stecker, *ibid.*, p. 468.
70. F. M. Ipravich, A. M. Lenchev, *Phys. Rev.* **D2**, 266 (1970).
71. А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Угрюмов, Б. И. Лучков, Ю. В. Озеров, *Письма ЖЭТФ* **17**, 265 (1973); *сборник* ³³, p. 450.
72. R. Cowsik, Y. Pal, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 1467 (1969).
73. M. S. Longair, R. A. Sunyaev, *Astrophys. Lett.* **4**, 69 (1969).
74. K. C. Anand, S. A. Stephens, *Astrophys. and Space Sci.* **18**, 387 (1972).
75. R. Giacconi, S. Murray, H. Gursky, E. Kellogg, E. Schreier, H. Tananbaum, *Astrophys. J.* **178**, 281 (1972).
76. D. R. Hearn, *Nucl. Instr. Meth.* **70**, 200 (1969).
77. E. O'Mongain, *Nature* **241**, 376 (1972).
78. C. E. Fichtel, D. A. Kniffen, H. B. Ogelman, *Astrophys. J.* **158**, 193 (1969).
79. А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Угрюмов, Б. И. Лучков, Ю. В. Озеров, *Изв. АН СССР, сер. физ.* **37**, 1144 (1973).
80. D. A. Kniffen, C. E. Fichtel, R. C. Hartman, *сборник* ³³, p. 311.
81. J. E. Grindlay, H. F. Helmken, T. C. Weekes, G. G. Fazio, F. Boley, *ibid.* p. 36.
82. E. L. Chupp, D. J. Forrest, A. N. Suri, *Nature* **241**, 333 (1972).
83. G. Vedrenne, F. Alberne, I. Martin, R. Talon, *Astron. and Astrophys.* **15**, 50 (1971).
84. R. C. White, R. Koga, G. Simnett, *сборник* ³³, p. 7.
85. B. Agrinier, M. Forichon, J. P. Leray, B. Parlier, T. Moutmerle, G. Boella, L. Maraschi, B. Sacco, L. Scarsi, J. M. Da Costa, L. Palmeira, *ibid.*, p. 8.
86. W. Herterich, K. Pinkau, H. Rothermel, M. Sommer, *ibid.*, p. 21.
87. C. E. Fichtel, R. C. Hartman, D. A. Kniffen, *ibid.*, p. 302.
88. G. H. Dahlbacka, P. S. Freier, C. J. Waddington, *Astrophys. J.* **180**, 371 (1973).
89. G. Fritz, J. F. Meekins, R. A. Chubb, H. Friedman, R. C. Henry, *Astrophys. J. (Lett.)* **164**, L45 (1971).
90. H. Helmken, J. Hoffmann, *сборник* ³³, p. 31.
91. B. Parlier, B. Agrinier, M. Forichon, J. P. Leray, G. Boella, L. Maraschi, R. Buccheri, N. R. Robba, L. Scarsi, *Nature (Phys. Sci.)* **242**, 117 (1973).
92. M. Campbell, S. E. Ball, Jr., B. McBreen, K. Greisen, D. Koch, *New Mexico State University Preprint* 11-06-09 (1973).
93. H. F. Helmken, G. G. Fazio, E. O'Mongain, T. C. Weeks, *Astrophys. J. (в печати)*.
94. G. G. Fazio, *Smithsonian Astrophysical Observatory Preprint* 305—038 (1973).
95. J. E. Grindlay, J. Hoffmann, *Astrophys. Lett.* **8**, 209 (1971).
96. J. V. Valdez, C. J. Waddington, *Astrophys. J. (Lett.)* **156**, L85 (1969); *Acta Phys. Acad. Sci. Hungar.* **29**, Suppl. 1, 79 (1970).
97. M. Niel, G. Vedrenne, R. Buique, *Astrophys. J.* **171**, 529 (1972).
98. B. M. Bladimirsky, A. A. Stepanian, V. P. Fomin, *сборник* ³³, p. 456.
99. А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Угрюмов, А. В. Курочкин, Б. И. Лучков, Ю. Т. Юркин, *Письма ЖЭТФ* **18**, 217 (1973).
100. J. G. Duthie, *Canad. J. Phys.* **46**, S401 (1968).
101. G. M. Frye, C. P. Wang, *Phys. Rev. Lett.* **18**, 132 (1967).
102. А. А. Степанян, Б. М. Владимирский, *Астрон. ж.* **50**, 449 (1973).
103. P. C. Gregory, *Nature* **239**, 439 (1972).
104. Special issue of *Nature (Phys. Sci.)* **239**, No. 95 (1972).

105. C. R. Canizares, J. E. McClintock, G. W. Clark, W. H. G. Lewin, H. W. Schnopper, G. F. Sprott, *ibid.* 241, 28 (1973).
 106. И. С. Шкловский, *Астрон. ж.* 47, 742 (1970).
 107. I. I. K. Pauliny-Toth, K. I. Kellermann, *Astrophys. J. (Lett.)* 152, L169 (1968).
 108. J. L. Locke, B. H. Andrew, W. J. Meed, *ibid.* 157, L81 (1969).
 109. F. Biraud, *Nature* 232, 178 (1971).
 110. I. W. Browne, *ibid.* 231, 515.
 111. R. W. Klebesadel, I. B. Strong, R. A. Olsen, *Astrophys. J. (Lett.)* 182, L89 (1973).
 112. T. L. Cline, U. D. Desai, сборник³³, p. 80.
 113. L. W. Alvarez, P. M. Dauber, L. H. Smith, *Space Sci. Laboratory Preprints* 14, is. 17, University of California, Berkeley, 1973.
 114. W. Voges, K. Pinkau, Y. Koechlin, J. P. Leray, G. Boella, G. Sironi, M. Turner, сборник³³, p. 293.
 115. В. К. Бочаркин, Г. М. Городинский, Е. М. Круглов, Г. А. Пятигорский, А. М. Романов, Е. И. Чуйкин, *Изв. АН СССР, сер. физ.* 36, 2400 (1972).
 116. J. E. Grindlay, *Nuovo Cimento* B2, 119 (1971).
 117. J. E. Grindlay, *Nature (Phys. Sci.)* 234, 153 (1971).
 118. Л. А. Арцимович, *Природа*, № 9, 2 (1972).
 119. NASA Intern. Symposium and Workshop on Gamma-Ray Astrophysics, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 1973.
 120. G. W. Hutchinson, A. J. Pearce, D. Ramsden, Ч. D. Wiles, Intern. Conference on Cosmic Rays (Budapest, 1969), *Acta Phys. Acad. Sci. Hungar.* 29, Suppl. 1, 87 (1970).
 121. M. Apparo, J. Hoffmann, *Astrophys. Lett.* 5, 25 (1970).
 122. K. Pinkau, *Phys. Rev. Lett.* 25, 603 (1970).
 123. S. M. Derdeyn, C. H. Ehrmann, C. E. Fichtel, D. A. Kniffen, R. W. Ross, *Nucl. Instr. Meth.* 98, 557 (1972).
 124. Б. М. Владимирский, А. А. Степанян, В. П. Фомин, *Астрон. ж.* 50, 449 (1973).
 125. *Spaceflight* 15, 431 (1973).
 126. Е. Мазец, С. Голенецкий, В. Ильинский, *Письма ЖЭТФ* 19, 126 (1974).
 127. D. Lamb, F. Lamb, D. Pines, *Nature (Phys. Sci.)*, 26 November 1973.
 128. О. Прилукский, И. Розенталь, В. Усов, доклад на научной сессии ООФА АН СССР 23 января 1974 г.
-