

УДК: 52—732

ПЕРВИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ
СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Ф. А. АГАРОНЯН, Э. А. МАМИДЖАНЫН, С. И. НИКОЛЬСКИЙ

Поступила 4 декабря 1988

Обзор посвящен наблюдательным данным по гамма-излучению сверхвысоких энергий от астрофизических объектов, полученным в последние годы с помощью наземных ливневых установок.

1. *Введение.* Появление гамма-астрономии завершило превращение оптической астрономии во всеволновую, использующую все частоты электромагнитного излучения. Все это разнообразие наблюдательного материала вместе с данными о космических лучах создает хорошую экспериментальную основу современной астрофизики.

Земная атмосфера непрозрачна для гамма-квантов. Поэтому первые реальные успехи гамма-астрономии связаны с выносом за пределы атмосферы светосильных гамма-телескопов, способных длительное время эффективно работать на космических аппаратах. Малые потоки первичных гамма-квантов и большой (превосходящий на несколько порядков) фон заряженных частиц сильно осложняют методику регистрации. Поэтому гамма-телескопы на космических аппаратах успешно используются пока лишь для наблюдения гамма-квантов с энергией $E_{\gamma} \leq 10^9$ эВ. Предполагается, что к 1990 г. на планируемых орбитальных космических обсерваториях (советско-французский проект «Гамма-1» [1] и американский проект GRO [2]) будет достигнута энергия $E_{\gamma} \sim 10^{10}$ эВ, а в первой половине 90-х годов — энергия $E_{\gamma} \sim 10^{11}$ эВ (американский проект «ASTROMAG» [3]). С ростом энергии наблюдаемых гамма-квантов интенсивность потока убывает, методы измерения энергии гамма-квантов в условиях превосходящего по потоку фона заряженных частиц усложняются, и, как следствие, наблюдение за пределами атмосферы становится слишком тяжелым и в прямом и переносном смысле.

Первичные гамма-кванты сверхвысокой энергии, поглощаясь в атмосфере, образуют электронно-фотонные каскады. Регистрация таких каскадов равнозначна наблюдению первичных гамма-квантов, и задача экспериментов сводится к надежному разделению электронно-фотонных каскадов от первичных гамма-квантов и на несколько порядков большего числа электронно-фотонных лавин, сопровождающих адронные каскады, образуемые в атмосфере протонами и ядрами космических лучей.

Начиная с $E_{\gamma} \geq 10^{11}$ эВ, гамма-кванты, взаимодействуя с атомами воздуха, эффективно генерируют вторичные электроны, которые в свою очередь порождают черенковское оптическое излучение, достигающее поверхности Земли. Это обстоятельство дает возможность косвенно исследовать поток гамма-квантов, регистрируя черенковское излучение с помощью установок, расположенных как на высотах гор, так и на уровне моря. В настоящее время с помощью этой методики обнаружен «избыток» излучения при $E \geq 3 \cdot 10^{11}$ эВ в направлении ряда астрофизических объектов (рентгеновские двойные Cyg X—3, Her X—1, Vela X—1, пульсар NP 0532 в Крабовидной туманности и т. д.) [4]. Выше энергии $10^{13} - 10^{14}$ эВ эффективность этого метода падает из-за лимита ясных безлунных ночей, необходимых для регистрации черенковского излучения атмосферных ливней.

Исследование космического гамма-излучения с $E_{\gamma} \geq 10^{14}$ эВ возможно благодаря регистрации ШАЛ, генерируемых при попадании гамма-квантов в атмосферу Земли. При этом, как и в случае регистрации черенковского излучения, дискретные источники гамма-квантов могут быть обнаружены по статистически выделенному избытку ливней в определенных направлениях небесной сферы. Согласно современным представлениям узкой анизотропией могут обладать ШАЛ, инициируемые гамма-квантами. Подобной анизотропией не могут обладать ШАЛ от заряженных частиц из-за отклонения последних в магнитном поле межзвездной среды. Узкую анизотропию, помимо гамма-квантов, в принципе, могут создавать также нейтроны и нейтрино. Однако в первом случае такая возможность практически исключается из-за малого времени жизни нейтрона, а во втором случае — из-за неэффективного взаимодействия нейтрино с атмосферой Земли.

К настоящему времени с большей или меньшей достоверностью обнаружены потоки гамма-квантов с $E_{\gamma} \geq 10^{15}$ эВ от нескольких дискретных источников, и все они являются объектами одного класса — это тесные рентгеновские двойные: Cyg X-3, Her X-1, Vela X-1, Cyg X-1, LMC X-4 (см., например, [5]). Возможно, что имеется положительный сигнал также в направлении Крабовидной туманности. Однако надежность всех дан-

ных (даже данных, относящихся к наиболее интенсивно изученному объекту — Суг X-3) далека от желаемого уровня. То же самое можно утверждать о достоверности экспериментальных результатов, полученных черенковскими телескопами в области энергии $E_{\gamma} \geq 10^{12}$ эВ. Таким образом, в настоящее время с определенной уверенностью можно говорить лишь о существовании дискретных источников гамма-квантов сверхвысоких энергий, о периодичности гамма-излучения этих источников и, по-видимому, о спорадическом характере этого излучения.

2. Основные результаты наблюдений гамма-квантов высоких энергий. Современные представления о космическом гамма-излучении высоких энергий ($E_{\gamma} \geq 100$ МэВ) основываются преимущественно на данных, полученных с помощью специализированного европейского спутника COS B (1975—1980 гг.) и, частично, американского спутника SAS-2 (1972—1973 гг.). Многочисленным аспектам гамма-астрономии высоких энергий посвящен ряд обзоров (см., например, [2, 6, 7]). Здесь мы ограничимся лишь кратким перечислением основных результатов, полученных в этой области энергий, которые нам понадобятся при интерпретации данных по гамма-излучению сверхвысоких энергий.

Изучение широтного распределения диффузного гамма-излучения с $E_{\gamma} \geq 35$ МэВ на спутнике SAS-2 показало, что оно состоит из двух компонентов: а) нетеплового галактического излучения, обусловленного взаимодействиями космических лучей с межзвездной средой и б) изотропного фонового излучения, имеющего, по-видимому, внегалактическое происхождение [8]. Галактический компонент характеризуется жестким степенным спектром. При малых широтах дифференциальный спектр в области $E_{\gamma} > 150$ МэВ имеет показатель $\Gamma \simeq 2$. Отсутствие в спектре характерного «горба» около 100 МэВ, ожидаемого от распадов π^0 -мезонов, указывает на большой вклад в диффузное галактическое гамма-излучение низких энергий электронного компонента космических лучей через тормозное излучение [9, 10], обратное комптоновское рассеяние [11] и, возможно, аннигиляционное излучение нетермализовавшихся позитронов [12]. Из крупномасштабного распределения галактического диффузного излучения следует, что имеет место заметная неоднородность в распределении космических лучей средних энергий ($E \leq 10$ ГэВ), что свидетельствует в пользу гипотезы о галактическом происхождении космических лучей в этой области энергии.

В диффузном излучении галактического диска надежно выделяются два компонента — узкий, наблюдаемый в направлении центра Галактики ($\Delta\psi \sim 3^\circ - 5^\circ$) и широкий, образуемый скорее всего в ближайшей окрестности Солнца. Весьма интересная особенность в распределении диффузного

галактического излучения была обнаружена на SAS-2 в области широт от 10° до 25° [8]. Эта особенность, по-видимому, связана с излучением пекулярного комплекса молодых звезд — Пояса Гулда, представляющего собой некую кольцеобразную конфигурацию с диаметром ≤ 1 кпк, наклоненную на 20° относительно галактического экватора. Позже на спутнике COS B были получены наблюдательные свидетельства [7] корреляции гамма-излучения с новой локальной системой, открытой Дюлидзе [13]. Если гамма-излучение является результатом взаимодействия космических лучей с межзвездным газом и пылью, то плотность космических лучей в этих системах интенсивного звездообразования должна быть выше, чем в окосолучном пространстве [14].

Основная информация о диффузном компоненте гамма-излучения для больших широт получена на спутнике SAS-2. После учета вклада галактического излучения был определен спектр изотропного космического гамма-излучения в области энергии 35—200 МэВ. В отличие от галактического компонента он оказался мягким, с показателем $\gamma = 2.7_{-0.3}^{+0.4}$ [8]. Полный поток квантов с энергией выше 35 МэВ оценивается как $(5.7 \pm 1.3) \cdot 10^{-5}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$. Единственным возможным объяснением изотропного компонента в рамках галактических моделей является генерация гамма-квантов в результате обратного комптоновского рассеяния релятивистских электронов в гало с радиусом ~ 15 кпк. Среди внегалактических моделей можно указать на аннигиляцию материи и антиматерии или взаимодействия космических лучей на ранних космологических эпохах (см., например [15]), излучение первичных мини черных дыр [16]; модели, учитывающие суммарный вклад дискретных внегалактических источников [17]. Последнее предположение подкрепляется обнаружением гамма-излучения с $E_\gamma \sim 50$ —500 МэВ от квазара 3C 273 на COS B [17], а также мягкого гамма-излучения (~ 1 МэВ) от ряда активных галактик (Центавр А, NGC 4151, MCG-8-11-11) [18].

Из 25 дискретных гамма-источников COS B лишь 4 надежно сопоставлены с известными астрофизическими объектами: пульсарами PSR 531+21 в Крабовидной туманности и PSR 0833—45 в Парусах, с близким молекулярным облаком ρ Oph и с квазаром 3C 273 [19]. Остальной 21 источник остается до сих пор неотожествленным. Характерной особенностью этих источников является их концентрация в узкой полосе вблизи галактического экватора (около 70% неотожествленных источников COS B имеют галактическую координату $|b^{\text{III}}| \leq 1.5^\circ$). Из этого следует их галактическая принадлежность: возможно они представляют молодое население Галактики. Расстояния до них оцениваются в несколько кпк, а средняя гамма-светимость $\sim 10^{36}$ эрг/с, что на 3—4 порядка больше чем в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах волн. Это обстоятельство накладывает суще-

ственные ограничения на модели, предложенные для неотожественных источников COS B (аккреция на компактные объекты, молодые пульсары, расширяющиеся оболочки сверхновых, плотные молекулярные облака и связанные с ними ОВ-звезды и т. д.). В заключение этого раздела отметим, что в каталог не входит источник Cyg X-3, хотя ранее о пульсирующем гамма-излучении с периодом 4.8 г от этого источника в области $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ сообщалось группой МИФИ [20] и группой SAS-2 [21].

3. *Результаты наблюдений гамма-квантов сверхвысоких энергий.* Поиск дискретных источников гамма-квантов сверхвысоких энергий ведется более 20 лет, но статистически значимые потоки фотонов столь высоких энергий наблюдались лишь от некоторых объектов. Список этих источников приведен в табл. 1. Отметим, что под выражением гамма-кванты сверхвысоких энергий мы в дальнейшем будем подразумевать фотоны с энергией $E_{\gamma} \sim 10^{11}$ эВ.

Таблица 1

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ГАММА-КВАНТОВ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Источник	Периодичность	Расстояние (кпк)	Светимость выше 1 ТэВ (эрг/с)
Рентгеновские двойные:			
Cyg X-3*	4.8 ч; 34 дн. 12 мс (?)	>10	$5 \cdot 10^{37}$ эрг/с
Her X-1*	1.24 с	5	$10^{36} - 10^{37}$ эрг/с
4U011+63	3.61 с	5	$5 \cdot 10^{35}$ эрг/с
Vela X-1*	8.9 дн.	1.4	$2 \cdot 10^{31}$ эрг/с
X-4**	1.41 дн.	55	$\geq 10^{40}$ эрг/с
Пульсары:			
PSR 0531 (Краб)	33 мс	2	$6 \cdot 10^{33}$
PSR 0833 (Ве)	89.2 мс	0.5	$3 \cdot 10^{32}$
PSR 1937+21	1.56 мс	5	$2 \cdot 10^{35}$
PSR 1953+29	6.13 мс	3.5	$6 \cdot 10^{35}$
Остатки сверхновых:			
Крабовидная туманность*	—	2	$2 \cdot 10^{35}$
Внегалактические объекты:			
Радиогалактика Сеп А	—	5000	$4 \cdot 10^{40}$ эрг/с
Неотожественные источники:			
Геминга (CG 195+4)	59 с (?)	?	?

* От указанного источника наблюдались также γ -кванты в области $E \geq 10^{15}$ эВ.** Светимость источника в области $E \geq 10^{16}$ эВ с учетом поглощения фотонами на реактивном излучении.

$\div 10^{16}$ эВ и при обсуждении наблюдательных данных не будем разделять, как обычно поступают в литературе, области энергии 10^{12} — 10^{13} эВ и 10^{14} — 10^{16} эВ. Вместе с тем полезно помнить, что область энергии 10^{12} — 10^{13} эВ исследуется с помощью черенковских телескопов, имеющих узкую диаграмму направленности. Поэтому с помощью этих телескопов до сих пор проводился лишь поиск гамма-квантов от известных, заранее заданных источников. В области же $E_{\gamma} \geq 10^{14}$ эВ гамма-кванты исследуются с помощью регистрации ливневыми детекторами электронно-фотонного компонента атмосферных ливней, одновременно экспонируя большой участок неба (например, $30^{\circ} \times 30^{\circ}$) над детекторами. При этом точность определения направления индивидуального ливня может быть достигнута до 1° , т. е. такого же порядка, что и угловое разрешение черенковских телескопов. Поэтому с помощью ливневых детекторов можно проводить не только исследование гамма-излучения от известных астрофизических объектов, но и поиск дискретных источников гамма-квантов (в некотором смысле это аналог телескопа Шмидта в оптической астрономии). Более того, оснащая ливневые установки детекторами мюонов, можно не только подавить фон от космических лучей и тем самым улучшить чувствительность установки, но проводить также исследования диффузного компонента гамма-излучения сверхвысоких энергий.

3.1. *Дискретные источники гамма-квантов.* Из источников, приведенных в табл. 1, наиболее интенсивно исследовалась рентгеновская двойная Суг X-3. Этот источник, обнаруженный впервые в гамма-квантах сверхвысоких энергий группой КрАО АН СССР [22] после мощной сентябрьской радиовспышки 1972 г., во многих отношениях является уникальным астрофизическим объектом. Достаточно сказать, что этот источник, принадлежащий к широкому классу тесных рентгеновских двойных, вместе с тем на фоне всех остальных источников этого класса выделяется как объект со вспышечным радиоизлучением. Светимость источника в рентгеновских и гамма-лучах составляет порядка 10^{38} эрг/с, причем заметная доля светимости, приходящаяся на диапазон жестких гамма-квантов, безусловно связана с нетепловыми процессами. Со всей определенностью можно утверждать, что в случае с Суг X-3 мы имеем дело с объектом, ускоряющим протоны и ядра вплоть до $E \sim 10^{16}$ эВ (ускорение электронов до столь высоких энергий, необходимых для объяснения всего спектра наблюдаемого гамма-излучения, в условиях сильного магнитного поля и большой плотности низкочастотного излучения представляется нереальным). Более того, громадная светимость этого источника в гамма-лучах указывает, что один лишь этот объект в принципе может поддерживать наблюдаемую интенсивность космических лучей в Галактике при энергиях $E \sim 10^{15}$ — 10^{16} эВ [23].

Детальному анализу как наблюдательных данных, так и теоретических моделей Суг X-3 посвящены многочисленные обзоры (см., например, [24, 25]). Поэтому остановимся лишь на общих характеристиках источника с учетом новых результатов, полученных за последние 2—3 года.

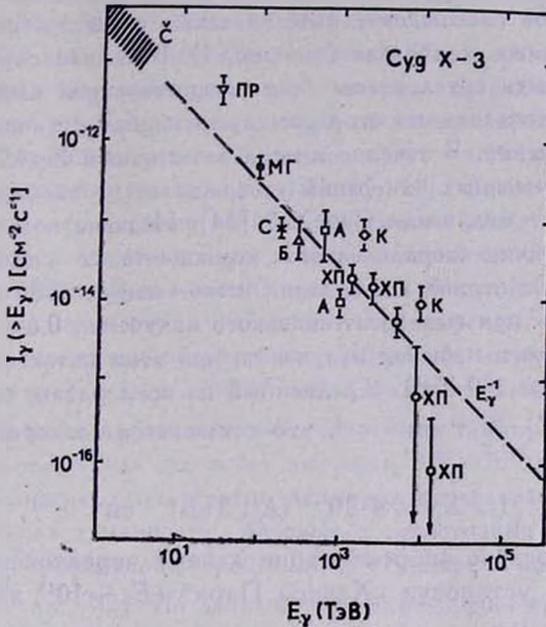


Рис. 1. Интегральный спектр гамма-квантов сверхвысоких энергий от рентгеновского источника Суг X-3. Обозначения: К—Киль, Б—Бакан, А—Акено, ХП—Хавера Парк, ПР—Плато Роза, С—Сигнус, МГ—Мушинский Глаз, С—черенковские телескопы.

Гамма-кванты с $E_\gamma \geq 1$ ТэВ от Суг X-3 на удовлетворительном уровне статистической значимости ($\sim 4-5\sigma$) наблюдались на ряде установок, преимущественно в СССР (КрАО АН СССР, Тянь-Шаньская станция ФИАН) и США (черенковская установка Даремского университета в Дареме, шт. Юта; 10-м рефлектор обсерватории им. Л. Уилла, шт. Аризона; 11-м солнечные аккумуляторы на базе ВВС Эдвардс, шт. Калифорния и т. д.). Во всех экспериментах, проведенных за период 1972—1985 гг., наблюдалась периодичность излучения 4.8 ч, при этом максимумы на световой кривой проявлялись при значениях фазы $\psi \sim 0.2$ и/или $\psi \sim 0.6-0.8$. Следует обратить внимание, что максимум при фазе $\psi \sim 0.2$ в ТэВ-ной области наблюдался лишь на установках КрАО [26] и ФИАН [27], а в области $E_\gamma \geq 10^{14}$ эВ максимум при фазе $\psi \sim 0.2$ проявлялся на установках Кильского университета [28] и Лидского университета (Хавера Парк) [29]. На других же ливневых установках (Акено, Токийский университет) [30], «Ковер» (ИЯИ АН СССР) [31], «CYGNUS» (Лос-Аламос-

ская национальная лаборатория, США) [32] и на той же установке Хавера Парк [33]) обнаружен максимум при фазе ~ 0.6 . Вопрос — в чем заключается причина расхождения данных различных групп по значению фаз световых кривых Суг X-3 — остается до сих пор открытым.

Существенное расхождение имеется также в абсолютных потоках, полученных на разных установках (см. рис. 1). В данном случае различия в потоках могут быть обусловлены как существующей неопределенностью значений энергетических порогов регистрирующих установок, так и переменностью излучения. В течение многих лет группой КрАО на основании анализа долговременных измерений утверждалось о спорадическом характере переменности излучения Суг X-3 [34]. Недавно получено новое свидетельство о наличии опорадического компонента в спектре излучения Суг X-3 [35]. За период наблюдений июнь—август 1985 г. на установке «Мушинный глаз» при фазе рентгеновского излучения 0.65—0.7 на уровне 3.9σ был обнаружен избыток излучения, при этом поток фотонов в области энергии $E_{\gamma} \geq 100$ ТэВ, усредненный по всем фазам, был найден равным $\sim (4.5 \pm 1.2) \cdot 10^{-13}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, что согласуется со «средним» спектром Суг X-3:

$$F_{\gamma} (\geq E_{\gamma}) = 4 \cdot 10^{-11} (E/1 \text{ ТэВ})^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

полученным на основе аппроксимации данных черенковских телескопов ($E_{\gamma} \sim 10^{12}$ эВ) и установки „Хавера Парк“ ($E_{\gamma} \sim 10^{15}$ эВ).

Помимо выделенного периодического (квази) стационарного компонента излучения Суг X-3 на установке «Мушинный глаз» ночью 17 июня 1985 г. было обнаружено резкое возрастание потока [35]. Примечательно, что в этом вспыхивающем компоненте не наблюдалась какая-либо периодичность, во всяком случае избыток излучения имел место в разных фазах [35]. Поток спорадического излучения, определенный за 4.8 ч наблюдений, при энергиях $E_{\gamma} \geq 10$ ТэВ составлял $(2.8 \pm 0.8) \cdot 10^{-10}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, а выше $E_{\gamma} \geq 100$ ТэВ — $(6.1 \pm 2.4) \cdot 10^{-12}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$. Аппроксимируя спектр по этим двум точкам степенным законом, получаем показатель интегрального спектра 1.7 ± 0.3 . Таким образом, излучение, возникающее во время вспышки, отличается от (квази) стационарного компонента не только спорадическим характером, но и более крутым спектром, близким к спектру первичных космических лучей.

Рентгеновские [36, 37] и гамма-наблюдения в области $E_{\gamma} \geq 1$ ТэВ [38] свидетельствуют о наличии, по крайней мере, еще одного периодического компонента в спектре излучения Суг X-3 с периодом ~ 34 сут. И, наконец, следует отметить сообщение группы Даремского университета об обнаружении пульсирующего компонента гамма-излучения с периодом $P = 12.59$ мс [39]. Огромный интерес, вызванный этим сообщением, свя-

зан с тем, что в случае подтверждения этого результата мы получим важную информацию о наличии молодого пульсара в двойной системе Суг Х-3. Однако результат Даремской группы до сих пор не подтвердился наблюдениями других групп, в частности на 10-м рефлекторе обсерватории им. Л. Уиппла на горе Маунт Хопкинс [40].

В настоящее время предложен ряд моделей ускорения и взаимодействия (с образованием гамма-квантов) частиц сверхвысоких энергий в двойной системе Суг Х-3, претендующих на качественное объяснение тех или иных характеристик гамма-излучения этого источника. Детальному анализу моделей посвящены обзоры [24, 25, 41]. Здесь мы ограничимся лишь замечанием, что ни одна из этих моделей не может даже приблизительно объяснить совокупность удивительных свойств Суг Х-3, обнаруженных в гамма-лучах. В частности, «ахиллесовой пятой» всех существующих моделей является несостоятельность объяснения беспрецедентно большой для галактических объектов нетепловой светимости $\sim 10^{38}$ эрг/с в гамма-квантах с энергией $E_{\gamma} \geq 10^{12}$ эВ. Предполагая, что гамма-кванты являются результатом взаимодействий ускоренных протонов, оценка нетепловой мощности источника достигает значения $10^{30} - 10^{40}$ эрг/с [23].

В течение многих лет в центре внимания исследователей находилась также Крабовидная туманность. Впервые о регистрации гамма-квантов с $E_{\gamma} \geq 0.3$ ТэВ в направлении Крабовидной туманности на уровне 3σ сообщалось Фацио и др. [42]. По данным этих наблюдений средняя за 3 года интенсивность источника в этой области энергии составляла $(4.4 \pm \pm 1.4) \cdot 10^{-11}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$. Однако за этот период наблюдений (1969—1972 гг.) трижды наблюдалось существенное возрастание потока и во всех трех случаях имела место корреляция со скачками периода пульсара PSR 0531+21, находящегося в центре Крабовидной туманности. В связи с этим возникает естественный вопрос о вкладе пульсара в суммарное излучение, наблюдаемое от Крабовидной туманности. Напомним, что в области $E_{\gamma} \geq 100 \div 1000$ ГэВ вклад пульсара PSR 0531+21, согласно данным COS B [43], является доминирующим. Впервые указание о наличии в спектре излучения пульсирующего компонента в области энергий сверхвысоких энергий было получено Гриндли и др. [44]. Подобный же вывод был сделан позже другими группами [45—47].

Недавно были опубликованы результаты наблюдений на 10-м рефлекторе обсерватории им. Л. Уиппла по исследованию гамма-квантов от Крабовидной туманности [48]. На высоком уровне статистической значимости ($\sim 5,6\sigma$) был обнаружен избыток, соответствующий потоку выше энергии 0.4 ТэВ: $F_{\gamma} \sim 6 \cdot 10^{-11}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$. В то же время для пульсирующего компонента излучения был найден верхний предел $\leq 1.1 \cdot 10^{-11}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, который, однако, не противоречит данным [47].

Область Крабовидной туманности неоднократно исследовалась на наличие гамма-квантов с энергией больше 10^{14} эВ. Впервые об избытке ШАЛ в направлении Крабовидной туманности при энергиях $E \geq 10^{16}$ эВ сообщалось Лодзинской группой [49]. Однако величина зарегистрированного потока $(3 \pm 2) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ лежит значительно выше верхних пределов потоков, полученных на установках «Мушиный глаз» [50], Хавера Парк [51]

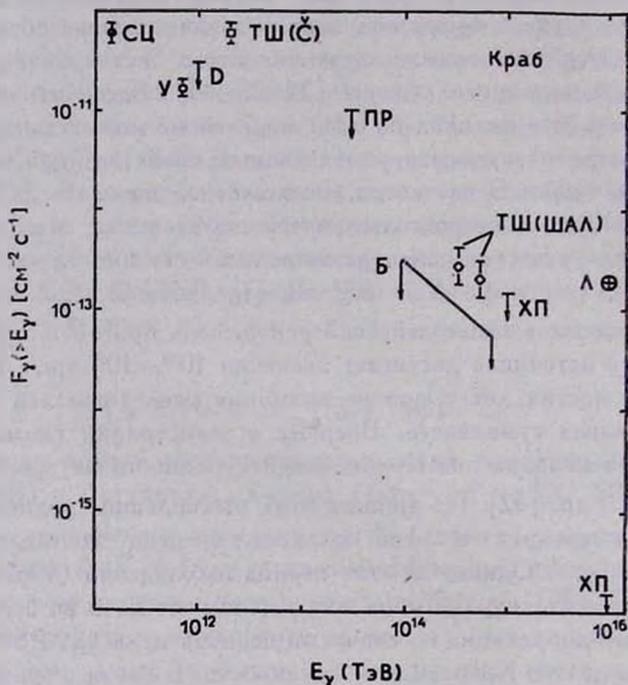


Рис. 2. Интегральный спектр гамма-квантов сверхвысоких энергий от Крабовидной туманности. Обозначения: СЦ—Смитсоновский центр, У—Узпл, Д—Дарем, ТШ—Тянь-Шань, Б—Баксан, ПР—Плато Роза, ХП—Хавера Парк, Л—Лодзь.

и Акено [52] (см. рис. 2). Исключение составляют данные Тянь-Шаньской комплексной установки ШАЛ [53]. При этом анализ тянь-шаньских данных выявил избыток ШАЛ в направлении Крабовидной туманности лишь после отбора событий по критерию «безмюонности». С одной стороны это является указанием на то, что избыток ШАЛ в действительности обусловлен, как и ожидается, гамма-квантами. Вместе с тем, в данном случае мы имеем дело с ситуацией, в некотором роде противоположной по сравнению с данными Суг Х-3. Как известно, еще в первом сообщении об обнаружении избытка ШАЛ в направлении Суг Х-3 [28] указывалось на аномально высокое содержание (для « γ -событий») мюонов в ШАЛ (так

называемый «кильский эффект»). Недавно к подобному же выводу пришла группа, работающая на установке «CYGNUS» Лос-Аламосской национальной лаборатории [32]. Более того, существенная разница в характеристиках ливней, наблюдаемых в направлении Суг Х-3 и Крабовидной туманности, наблюдается, по-видимому, и в области энергии $E \geq 1$ ТэВ. Если черенковское излучение ливней, наблюдаемых от Крабовидной туманности, имеет характерную для γ -ливней форму («изображения»), то черенковские «изображения» ливней от Суг Х-3 скорее соответствуют протонным ливням. Означает ли это, что от Крабовидной туманности наблюдаются гамма-кванты, а от Суг Х-3 — другие (неизвестные к настоящему времени) экзотические нейтральные частицы [54]? На наш взгляд, подобные радикальные выводы, основанные на небогатом экспериментальном материале, преждевременны. Представляется более вероятным, что трудности, связанные с Суг Х-3, обусловлены методическими погрешностями. Поэтому, не исключая полностью возможность генерации в Суг Х-3 отличных от гамма-квантов нейтральных частиц, мы в дальнейшем будем считать, что ливни, наблюдаемые в направлении дискретных астрофизических источников, вызваны гамма-квантами.

Как видно из табл. 1, все обнаруженные к настоящему времени дискретные галактические источники, за исключением Крабовидной туманности, пульсара PSR 0833 в Парусах и, возможно, Геминги, являются тесными рентгеновскими двойными. Среди этих источников наиболее надежные данные получены от известного рентгеновского пульсара Нег Х-1. Первые гамма-кванты сверхвысоких энергий от этого источника были обнаружены во время 3-минутной вспышки группой Даремского университета [55]. Вспышка происходила во время перехода «из низкого» состояния рентгеновского излучения в «высокое». При этом весь поток $F_{\gamma}(E_{\gamma} \geq 1 \text{ ТэВ}) \simeq 1.2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ состоял из пульсирующего компонента с известным периодом этого рентгеновского пульсара $P = 1.24 \text{ с}$. Позже этот период подтвердился в 4-х измерениях на 10-м рефлекторе обсерватории им. Л. Уиппла [56], где в каждом из наблюдений источник «светил» более 0.5 ч, а поток выше 0.15 ТэВ во всех четырех измерениях составлял $F_{\gamma} \sim 6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Гамма-кванты от Нег Х-1 в области энергии выше 500 ТэВ наблюдались также в течение 40 минут на установке «Мушиный глаз» [57], а недавно и на установке «CYGNUS» [32]. Светимость этого источника в гамма-квантах сверхвысоких энергий составляет порядка $10^{38} - 10^{37} \text{ эрг/с}$, что сравнимо с рентгеновской светимостью, а энергетические требования к моделям этого источника значительно мягче, чем в случае Суг Х-3.

В настоящее время интерес к этому источнику очень высок. Это объясняется рядом причин, в частности тем, что система Нег Х-1 обстоятельно изучена практически во всех диапазонах волн (в отличие от Суг Х-3, для

которого даже вопрос о расстоянии содержит большие неопределенности). Это позволяет разработать теоретические модели этого источника на базе большего наблюдательного материала и с более жесткими критериями, чем в случае Суг Х-3. Наблюдения этого источника выгодно отличают его на фоне остальных источников, приведенных в табл. 1, также с экспериментальной точки зрения. Совокупность ряда факторов, в первую очередь большой поток, периодичность с малым периодом $P = 1.24$ с и удобные координаты (для большинства существующих и планируемых на северном полушарии установок), позволяет изучить этот источник на достаточно высоком уровне статистической значимости за относительно короткие периоды наблюдений. Это обстоятельство для столь сильно переменных объектов, какими являются дискретные источники гамма-квантов, представляется исключительно важным.

Из источников, приведенных в табл. 1, наиболее загадочным объектом является второй по яркости на небесной сфере гамма-источник (в области энергии $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ) из каталога COS B CG 195+4 — «Геминга». Исследования на Тянь-Шаньской высокогорной станции [58] дали статистически значимый поток излучения $F_{\gamma} (\geq 2 \cdot 10^{12} \text{ эВ}) = (5 \pm 3) \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При этом основная доля излучения согласно [58] является пульсирующей, с периодом ~ 60 с, найденным ранее для гамма-квантов с энергией $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ [59]. Однако этот результат до сих пор не подтвержден на других установках. В частности, верхние пределы на уровне 3σ , полученные на 10-м рефлекторе [60], значительно ниже потока, обнаруженного на Тянь-Шаньской установке.

Еще меньше достоверность данных по гамма-излучению сверхвысоких энергий от остальных источников, приведенных в табл. 1 (за исключением, может быть, рентгеновского тразнента 4U 0115+63 [61] и радиогалактики Сеп А [62]). Особенное сомнение вызывает результат австралийской группы относительно обнаружения гамма-квантов с энергией $E_{\gamma} \geq 10^{16}$ эВ от рентгеновского источника LMC X-4 [63], расположенного в Большом Магеллановом Облаке. С учетом сильного поглощения гамма-квантов столь высоких энергий на реликтовом микроволновом излучении 2.7 К (расстояние до LMC X-4 составляет порядка 55 кпк), светимость этого источника в области энергии $E_{\gamma} \geq 10^{16}$ эВ составляет $L_{\gamma} \geq 10^{40}$ эрг/с, что представляется весьма неправдоподобным для тесных двойных систем (LMC X-4 принадлежит этому классу объектов) с любой точки зрения.

В настоящее время единственным внегалактическим объектом, от которого на достаточно высоком уровне достоверности ($\geq 4\sigma$) обнаружено гамма-излучение с $E_{\gamma} \geq 0.3$ ТэВ, является ближайшая радиогалактика Сеп А [62]. Светимость этого объекта в области сверхвысоких энергий оценивается порядка 10^{41} эрг/с [62], что составляет $\sim 10^{-3}$ доли общей светимости Сеп А/NGC 5128, обусловленной преимущественно излучением

в области жесткого рентгена [64]. С энергетической точки зрения интерпретация гамма-излучения сверхвысоких энергий Сеп А не встречается с такими серьезными трудностями, как, например, в случае Суг X-3. Более того, наличие в спектре излучения этого источника гамма-квантов вполне согласуется с современными представлениями о процессах ускорения и взаимодействия частиц высоких и сверхвысоких энергий в ядрах активных галактик (см., например, [65]). Недавно на 10-м рефлекторе обсерватории им. Л. Уиппла начата программа систематических исследований гамма-квантов от активных галактик и квазаров [66]. Однако из-за ограниченного времени наблюдений пока получены лишь верхние пределы потоков с $E_\gamma > 0.15$ ТэВ ($F_\gamma \leq 10^{-10}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$), которые в среднем на порядок превосходят ожидаемые потоки.

Регистрация гамма-квантов сверхвысоких энергий от активных галактик может играть ключевую роль в понимании процессов ускорения частиц в этих объектах. Огромные светимости и быстрая переменность излучения ядер активных галактик свидетельствуют о чрезвычайно большой плотности фотонов, в частности рентгеновских лучей в источниках. При таких условиях свободный выход гамма-квантов из источника, даже при их эффективной генерации, сильно затруднен. В результате в поле рентгеновских лучей генерируется релятивистский электромагнитный каскад, поэтому спектр выходящих из источника гамма-квантов обусловлен преимущественно особенностями развития каскада и слабо зависит от спектра иницилирующих каскад частиц [67]. При этом стандартизация спектра гамма-излучения, выходящего из источника, приводит к образованию «горба» вблизи $E_\gamma \sim 1$ МэВ, что и наблюдается в спектрах многих активных галактик и квазаров [68—70].

Стандартизация спектра гамма-излучения, к сожалению, не позволяет получить информацию о спектре ускоренных частиц на основании спектра гамма-квантов. Однако это утверждение справедливо лишь для области энергии $E_\gamma \leq 10$ —100 ГэВ. Из-за падающего характера сечения рождения e^+e^- пар от параметра $s = E_x E_\gamma / m_e^2 c^4$ при $s \gg 1$ компактный рентгеновский источник, будучи толстым для гамма-квантов умеренных энергий, оказывается прозрачным для гамма-квантов сверхвысоких энергий. Поэтому, если в ядрах галактик каким-то образом происходит ускорение частиц до сверхвысоких энергий, то наряду с мягкими гамма-квантами ($E_\gamma \sim 1$ МэВ) следует ожидать и фотоны с $E_\gamma \gg 10$ ГэВ, причем спектр у последних не будет искажен [68]. С этой точки зрения наблюдаемые в спектре излучения радиогалактики Сеп А особенности — «избыток» при $E_\gamma \sim 1 \div 10$ МэВ, излом спектра при энергиях выше нескольких десятков МэВ и наличие высокоэнергетичного «хвоста» при $E_\gamma \geq 0.25$ ТэВ — могут быть объяснены развитием каскада в поле рентгеновских лучей [68].

В настоящее время в литературе широко обсуждаются многочисленные модели генерации частиц сверхвысоких энергий в ядрах активных галактик и квазаров [65, 71]. Более того, согласно современным представлениям, космические лучи с энергией $E \geq 10^{17}$ эВ имеют внегалактическое происхождение (см., например, [72]). В качестве возможных внегалактических источников космических лучей чаще всего обсуждаются ядра активных галактик и квазары. В этих объектах происходит не только ускорение протонов и ядер сверхвысоких энергий, но и их эффективное взаимодействие с окружающей средой — с тепловой плазмой и фотонами [72—75]. В результате этого происходит обильное образование π -мезонов, а через их распад, в конечном счете, — гамма-квантов и нейтрино. Теоретически ожидаемые светимости ядер галактик и квазаров в гамма-квантах и нейтрино сверхвысоких энергий позволяют надеяться, что они могут быть обнаружены в планируемых экспериментах. Отметим, что одной из важнейших задач проекта «ДЮМАНД» является регистрация нейтрино с $E \geq 1$ ТэВ (см., например, [76]). Гамма-кванты и нейтрино от распадов π -мезонов образуются примерно в одинаковом количестве, и возможности гамма-астрономии сверхвысоких энергий с точки зрения изучения ядер галактик и квазаров представляются более перспективными, чем нейтринной астрономии (по крайней мере в обозримом будущем), т. к. чувствительность уже существующих черенковских телескопов ($\sim 10^{-11}$ фот/см²с) превосходит чувствительность установки «ДЮМАНД». Ожидается, что чувствительность черенковских телескопов нового поколения будет улучшена еще на один порядок [77]. Вместе с тем, следует подчеркнуть исключительную важность коррелированных γ — ν наблюдений в будущем, которые позволят получить надежную информацию об условиях генерации частиц сверхвысоких энергий, в частности о родительских частицах, приводящих к образованию гамма-квантов и нейтрино.

Если гамма-кванты и нейтрино рождаются при взаимодействиях ускоренных протонов с окружающим газом и низкочастотным излучением (через распад вторичных π -мезонов), то мы вправе были бы ожидать одинаковые потоки фотонов и нейтрино. Однако в отличие от нейтрино, гамма-кванты от внегалактических объектов из-за взаимодействия с реликтовым излучением доходят до наблюдателя с существенно искаженным спектром (при $E_\gamma \geq 100$ ТэВ). Это обстоятельство открывает уникальную возможность для проверки ряда важнейших гипотез с помощью поиска «изломов» в спектрах гамма-квантов от внегалактических объектов в интервале энергии 10^{13} — 10^{14} эВ [78]. В частности, этот метод дает принципиальную возможность для проверки гипотезы о космологическом происхождении красных смещений квазаров и зондирования расстояний до них, а также исследования характера эволюции реликтового излучения во времени при $z \geq 1$ и т. д.

3.2. *Диффузное гамма-излучение сверхвысоких энергий.* Комплексное исследование различных компонентов (электронов, мюонов, адронов) широких атмосферных ливней в области энергии $E \geq 10^{14}$ эВ позволяет, помимо поиска дискретных источников, определить поток диффузного гамма-излучения. Впервые такая попытка была предпринята в работе [79]. При поиске широких атмосферных ливней с аномально малым содержанием мюонов и адронов на Тянь-Шаньской комплексной установке был оценен поток первичных частиц, инициирующих электромагнитные ливни $F (\geq 500 \text{ ТэВ}) \sim 5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ [79]. Следует отметить, что электромагнитные ливни в атмосфере могут быть вызваны не только гамма-квантами, но и первичными электронами. Однако ожидаемый поток электронов при этих энергиях не может существенно превосходить $10^{-16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ [80] (иначе имело бы место противоречие с экспериментальными данными в области энергий $\sim 10\text{--}100 \text{ ГэВ}$, где имеются надежные измерения [81, 82]). Это является естественным следствием того, что электроны столь высоких энергий, в отличие от фотонов, в межзвездной среде быстро теряют энергию в результате синхротронного излучения и обратного комптоновского рассеяния на низкочастотном излучении. Это означает, что обнаруженное в тянь-шаньском эксперименте излучение, вызывающее «мюонобедные» ливни, имеет «фотонное» происхождение. В дальнейшем это излучение будем называть как «диффузное» гамма-излучение сверхвысоких энергий. Примечательной особенностью этого излучения является то, что оно приходит к нам преимущественно вне галактического диска [83]. Этот результат тянь-шаньского эксперимента недавно был подтвержден на основе значительно более богатого экспериментального материала, полученного на установке «Акено» [84] (поток диффузного гамма-излучения, полученный путем отбора около 100 «мюонобедных» ливней при средней энергии $E \sim 10^4 \text{ ТэВ}$, составляет $\sim 3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, что также согласуется с тянь-шаньским результатом).

С обнаружением гамма-квантов сверхвысоких энергий в составе космических лучей появилось, на наш взгляд, серьезное свидетельство в пользу гипотезы о галактическом происхождении космических лучей, по крайней мере до энергии $E \leq 10^{16}$ эВ. Для подобного утверждения имеются следующие основания [85]:

1) Анализ поглощения гамма-квантов на реликтовом излучении с температурой 2.7 К показывает, что свободный пробег фотонов с $E_\gamma \sim 10^{15}$ эВ составляет порядка 10 кпк, т. е. наблюдаемое «диффузное» гамма-излучение сверхвысоких энергий генерируется в пределах галактики. В случае однородного заполнения источников в галактике мы вправе были бы ожидать «дисковую» анизотропию (наблюдаемую, в частности, в области энергий $E \geq 100 \text{ МэВ}$ [8]). Однако, как указывалось выше, данные Тянь-Шаньской установки ШАЛ и установки «Акено» не согласуются с подоб-

ной картиной. Допуская реальность наблюдаемого распределения, можно делать два предположения: а) гамма-кванты генерируются в гало Галактики и б) характерный размер области генерации гамма-излучения по порядку величины не превосходит толщину галактического диска (≤ 1 кпк). В работе [86] приводились аргументы против первого предположения и указывалось, что наблюдаемое «диффузное» гамма-излучение скорее всего генерируется в близких от Солнца областях интенсивного звездообразования.

2) Предполагая, что космические лучи, ответственные за образование «диффузного» гамма-излучения сверхвысоких энергий, захвачены в области с характерным размером L , для отношения скоростей энерговыделения в гамма-квантах и в космических лучах имеем:

$$\chi_{\gamma} = \frac{\dot{W}_{\gamma}(\geq 5 \cdot 10^{14} \text{ эВ})}{\dot{W}_{\text{КЛ}}(\geq 5 \cdot 10^{15} \text{ эВ})} \sim \frac{F_{\gamma}(\geq 5 \cdot 10^{14} \text{ эВ})}{F_{\text{КЛ}}(\geq 5 \cdot 10^{15} \text{ эВ})} \cdot \frac{t_{\text{КЛ}} \cdot c}{L}, \quad (2)$$

где $t_{\text{КЛ}}$ — время жизни (удержания) КЛ в Галактике, составляющее в области энергии $E \sim 10^{15}$ эВ порядка $t_{\text{КЛ}} \sim 10^5$ лет [23]; $L \sim 3 \cdot 10^{21}$ см (толщина галактического диска); $F_{\gamma}(\geq 5 \cdot 10^{14}) \simeq 5 \cdot 10^{-13}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$; $F_{\text{КЛ}}(\geq 5 \cdot 10^{15}) \simeq 10^{-11}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$ [79]*). Подставляя эти значения в (2), получаем $\chi_{\gamma} \sim 1!$ Необычность этого результата заключается в том, что если гамма-кванты являются вторичными продуктами взаимодействий космических лучей (а в этом вряд ли следует сомневаться), то должен существовать исключительно эффективный механизм переработки энергии космических лучей в гамма-кванты сверхвысоких энергий. Другими словами, космические лучи должны пройти путь порядка их среднего свободного пробега в области генерации гамма-излучения.

3) Очевидно, что взаимодействия, приводящие к образованию гамма-квантов, не происходят в межзвездной среде, поскольку количество вещества, набираемое в межзвездной среде, намного меньше 100 г/см 2 (свободный пробег протонов относительно ядерных столкновений). Оценки показывают, что интегральный поток истинно диффузного гамма-излучения, генерируемого при взаимодействиях космических лучей с межзвездным газом, для больших галактических широт составляет меньше 10^{-16} см $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$, т. е. не более 0.1% наблюдаемого значения. Следовательно, «диффузное» гамма-излучение сверхвысоких энергий в действительности

* Здесь учитывается то обстоятельство, что гамма-квантам, как правило, передается примерно 0.1 доля энергии первичных ускоренных частиц.

является суперпозицией вкладов неразрешенных дискретных источников, в которых более эффективно происходит трансформация энергии космических лучей в гамма-кванты.

Таким образом, из ограниченного размера области генерации «диффузного» гамма-излучения (≤ 1 кпк), неспособности космических лучей обеспечить наблюдаемый поток гамма-квантов при взаимодействиях с межзвездной средой и из-за значения параметра $\kappa \sim 1$ следует, что основная доля космических лучей сверхвысоких энергий (по крайней мере в интервале энергии $10^{15} \div 10^{16}$ эВ) ускоряется в галактических источниках.

Какова природа этих источников? Не решив до сих пор проблему происхождения неотожествленных гамма-источников COS B (см., например, [19]), с обнаружением первичного гамма-излучения сверхвысоких энергий мы, похоже, сталкиваемся с новым классом загадочных объектов. Единственное утверждение, которое возможно на сегодняшний день на основе небогатого статистического материала, заключается в том, что получено наблюдательное указание на возникновение частиц сверхвысоких энергий в источниках галактического происхождения. При этом, если принять, что часть из них связана с рентгеновскими двойными (Cyg X-3, Her X-1 и т. д.) и, возможно, с оболочками сверхновых и/или пульсарами (Крабовидная туманность и пульсар PSR 0531+21 в ней), то другую часть, в которой генерируется «диффузное» излучение, следует отнести к какому-то иному классу астрофизических объектов. Эти источники, по всей вероятности, как это следует из углового распределения «диффузного» излучения, находятся на относительно небольших расстояниях ($R \leq 1$ кпк). Нам представляется наиболее естественной связь этих источников с космогонически активными областями, т. е. очагами интенсивного звездообразования в Поясе Гулда [86]. К сожалению, наблюдательный материал, накопленный к настоящему времени, недостаточно статистически обеспечен для более конкретных утверждений. С этой точки зрения преждевременно обсуждение моделей источников гамма-квантов сверхвысоких энергий. Вместе с тем, возможны определенные выводы относительно механизмов генерации гамма-излучения.

В условиях большой плотности низкочастотного излучения и напряженности магнитного поля в источниках механизмы генерации гамма-квантов сверхвысоких энергий, связанные с ускоренными электронами, представляются крайне маловероятными. Другими словами, с достаточной уверенностью можно утверждать, что наблюдаемое гамма-излучение сверхвысоких энергий обусловлено взаимодействиями протонно-ядерного компонента космических лучей.

В астрофизике наиболее существенным механизмом генерации гамма-квантов, связанным с протонно-ядерным компонентом, является распад π^0 -мезонов, рождаемых при p - p -столкновениях. Этот механизм играет

важнейшую роль в генерации гамма-излучения в области энергии $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ (см., например, [15]). Могут ли неупругие $p-p$ взаимодействия объяснить «диффузное» гамма-излучение сверхвысоких энергий?

Если «диффузное» гамма-излучение сверхвысоких энергий генерируется при взаимодействиях ускоренных протонов с окружающим веществом, то, как указывалось выше, они до выхода из источника должны пройти путь ~ 100 г/см². Однако в этом случае космические лучи были бы сильно обеднены ядрами, что не согласуется с экспериментальными данными, во всяком случае в области энергии $E \geq 10^{15} - 10^{16}$ эВ [79]. С другой стороны, гипотеза о генерации гамма-квантов сверхвысоких энергий при $p-p$ столкновениях приводит к потокам при $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ, превосходящим интенсивность диффузного гамма-излучения с $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ, измеренную на спутниках SAS-2 и COS B. В принципе можно было бы «подавить» интенсивность фотонов с $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ, предполагая исключительно жесткие спектры ускоренных частиц в источниках (показатель дифференциального спектра $\Gamma \simeq 2$), но такие спектры не согласуются с наблюдаемым спектром космических лучей.

Исходя из этого, нам представляется более вероятным образование гамма-квантов в результате фоторождения Λ -мезонов при столкновениях протонов сверхвысоких энергий с оптическим излучением. Этот механизм, предложенный впервые в работе [85], позже был развит для объяснения ряда спектральных [87, 88] и временных [89] особенностей гамма-излучения сверхвысоких энергий рентгеновского источника Cyg X-3. В работе [88] показано, что кроме указанного механизма существенный вклад в образование гамма-квантов, особенно в области энергии $10^{12} - 10^{14}$ эВ, могут внести взаимодействия ядер сверхвысоких энергий с оптическим излучением. Примечательно же к «диффузному» гамма-излучению предположение о взаимодействии протонов и ядер сверхвысоких энергий с низкочастотным излучением согласуется с гипотезой, что наблюдаемый излом в энергетическом спектре космических лучей при $E \sim 10^{15}$ эВ, а также химический состав космических лучей при этих энергиях являются результатом фоторождения Λ -мезонов и фоторасщепления ядер на оптических фотонах непосредственно в источниках космических лучей [90, 91].

Будущие комплексные исследования гамма-квантов сверхвысоких энергий, а также химического состава и энергетического спектра протонно-ядерного компонента космических лучей дадут важнейшую информацию об источниках ускорения частиц сверхвысоких энергий.

4. *Перспективы.* Астрономия гамма-квантов сверхвысоких энергий делает свои первые шаги, однако ее информативность несомненна. Гамма-кванты, будучи нейтральными, не отклоняются межзвездными магнитными

ми полями и, следовательно, указывают на объекты, где они образуются. Поскольку энергия гамма-квантов по порядку величины близка к энергии родительских ускоренных частиц, то гамма-кванты сверхвысоких энергий указывают на места концентрации и ускорения космических лучей сверхвысоких энергий в отдаленных от солнечной системы областях. Сразу после обнаружения первичных гамма-квантов сверхвысоких энергий стало ясно, что именно этот новый канал информации о космических лучах может оказаться ключевым для решения проблемы происхождения космических лучей.

Отталкиваясь от современного состояния гамма-астрономии сверхвысоких энергий, можно сказать, что насущной задачей эксперимента стал переход от обнаружения наличия потока гамма-квантов сверхвысокой энергии от известных рентгеновских и гамма-источников к их исследованию. Такие исследования включают в себя изучение их энергетических спектров в области энергий 10^{12} — 10^{17} эВ, временные изменения интенсивности потока гамма-квантов, как периодического, так и спорадического характера. В экспериментальном плане это означает создание новых установок и совершенствование методов регистрации. При этом трудно и, по-видимому, неоправданно пытаться создавать какую-то универсальную установку на весь указанный выше интервал энергий. Сильно убывающая интенсивность потока гамма-квантов с ростом их энергии требует существенного увеличения эффективной площади регистрации ливня. С другой стороны, с увеличением начальной энергии ливня возрастает число электронов и фотонов в ливне, что позволяет уменьшать детектирующие устройства, либо разносить их на большие расстояния.

Вместе с тем, исследование источников требует также наблюдения одного и того же источника многими установками, работающими в различных энергетических областях и размещенных в разных точках земного шара. Лишь скоординированные по единой программе наблюдения многих установок позволят изучить периодические изменения интенсивности потока гамма-квантов различной энергии, надежно установить наличие спорадических изменений интенсивности. Конечно, это необходимо сочетать с анализом данных наблюдений тех же астрофизических объектов в других диапазонах электромагнитного излучения. Поскольку максимум развития электромагнитного каскада от первичного гамма-кванта с энергией 10^{12} — 10^{13} эВ приходится на высоты Джомолунгмы, то для таких энергий наиболее эффективны зеркальные системы, регистрирующие черенковское излучение электронов ливня в атмосфере. Ограниченность времени наблюдения такими установками погодными условиями приводит к необходимости разносить их не только по долготе для компенсации вращения Земли, но и по широте. Гамма-кванты с энергией 10^{14} — 10^{17} эВ более эффективно наблюдать и исследовать с помощью установок различного масштаба, регистрирующих электроны. При этом вплоть до энергий $\sim 10^{17}$ эВ предпоч-

тительно их высокогорное размещение. В зависимости от выбранного энергетического интервала исследуемых первичных гамма-квантов полная площадь установки должна составлять от 0.1 км^2 до нескольких десятков км^2 , а шаг между размещенными на такой площади сцинтилляционными детекторами может быть выбран от 10 до нескольких сот метров. Лишь создание ряда надежных, автоматизированных установок, пригодных к измерениям в течение десятков лет, позволит говорить о начале систематических исследований по астрофизике локальных гамма-источников сверхвысоких энергий.

Здесь стоит вернуться к вопросу поиска таких источников. До сих пор поиск источников гамма-квантов сверхвысоких энергий сводился к обнаружению такого излучения от уже известных астрофизических объектов, прежде всего рентгеновских источников. Задачу картографирования небесной сферы в области энергий выше 10^{12} эВ целесообразно решать в диапазоне энергий $5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ эВ}$ с помощью установки для регистрации широких атмосферных ливней общей площадью более 0.1 км^2 путем применения сцинтилляционных детекторов с хорошим временным разрешением. Если такая установка имеет достаточно эффективную площадь мюонных детекторов (детекторов проникающего компонента широких атмосферных ливней), исключаящих с вероятностью 0.95 ливни от первичных протонов и ядер в исследуемом энергетическом интервале, то за ~ 1 год может быть картографирована большая часть наблюдаемого неба на наличие локальных источников с интенсивностью потока гамма-квантов $F_{\gamma} (\geq 10^{14} \text{ эВ}) \simeq 10^{-14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Подобное исследование с установкой без мюонных детекторов потребует более 15 лет. Не менее длительно и исследование неба с помощью зеркальных установок, регистрирующих черенковское излучение. Более высокая интенсивность потока гамма-квантов с энергией выше 10^{12} эВ не компенсирует увеличения общего времени наблюдения той же части небесной сферы из-за в ~ 100 раз меньшего телесного угла обзора установки, а также из-за ограниченного времени наблюдений.

Ереванский физический

институт

Физический институт АН СССР

им. П. Н. Лебедева

PRIMARY ULTRAHIGH ENERGY GAMMA RAYS

F. A. AHARONIAN, E. A. MAMIDJANIAN, S. I. NIKOLSKY

The review is dedicated to the observational data on ultrahigh energy gamma-ray emission from astrophysical objects.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Кириллов-Узрюмов, Вестн. АН СССР, 9, 12, 1981.
2. С. Е. Fichtel, Proc. Inter. Workshop on VHE Gamma-Ray Astronomy. Ootacamund, 1981, p. 118.
3. J. F. Ormes, M. H. Israel, R. Mewald, M. Wiendenbeck, 20th ICRC, Moscow, 2, 378, 1987.
4. K. E. Turver, 19th ICRC, La Jolla, 9, 399, 1985.
5. R. J. Protheroe, 20th ICRC, Moscow, 8, 21, 1987.
6. K. Pinkau, Nature, 277, 17, 1979.
7. G. F. Bignami, 17th ICRC, Paris, 13, 21, 1981.
8. С. Е. Fichtel, G. A. Stimpson, D. J. Thompson, Astrophys. J., 222, 833, 1978.
9. С. J. Cesarsky, J. A. Paul, P. G. Shakla, Astrophys. and Space Sci., 59, 73, 1978.
10. С. Е. Fichtel, D. A. Kniffen, D. J. Thompson, G. F. Bignami, C. Y. Cheung, Astrophys. J., 208, 211, 1976.
11. D. A. Kniffen, С. Е. Fichtel, Astrophys. J., 250, 389, 1981.
12. Ф. А. Агаронян, В. Г. Кириллов-Узрюмов, Ю. Д. Когов, Астрофизика, 19, 139, 1983.
13. М. В. Дюлдзие, Письма в Астрон. ж., 6, 92, 1980.
14. M. Casse, J. P. Paul, Astrophys. J., 237, 236, 1980.
15. F. W. Stecker, Cosmic Gamma Rays, NASA-SP-249, Washington, 1971.
16. D. N. Page, S. W. Hawking, Astrophys. J., 206, 1, 1976.
17. G. F. Bignami, K. Bennett, R. Buccheri, P. A. Caravoso, W. Hermsen, G. Kanbach, G. G. Lichti, J. L. Masnou, H. A. Mayer-Hasselwander, J. A. Paul, B. Sacco, L. Scarsi, B. N. Swanenburg and R. D. Wills, Astron. and Astrophys., 93, 71, 1981.
18. L. Bassani, A. J. Dean, Space Sci. Rev., 35, 367, 1983.
19. G. F. Bignami, W. Hermsen, Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 21, 67, 1983.
20. А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Узрюмов, А. В. Курочкин, Н. Г. Лейков, Б. И. Лучков, Ю. Т. Юркин, Письма в Ж. эксперим. и теор. физ., 26, 381, 1977.
21. R. C. Lamb, С. Е. Fichtel, R. C. Hartman, D. A. Kniffen and D. J. Thompson, Astrophys. J., 212, L63, 1977.
22. Б. М. Владимирский, А. М. Гальпер, Ю. Л. Зыскин, А. А. Степанян, В. П. Фомин, Ю. Т. Юркин, Изв. Крым. астрофиз. обсерв., 51, 3, 1974.
23. А. М. Hillas, Nature, 312, 50, 1984.
24. Б. М. Владимирский, А. М. Гальпер, Б. И. Пучков, А. А. Степанян, Успехи физ. наук, 145, 255, 1985.
25. А. М. Hillas, 19th ICRC, La Jolla, 9, 407, 1985.
26. А. А. Stepanian, Adv. Space Res., 3, 123, 1984.
27. Дж. Б. Муканов, Изв. Крым. астрофиз. обсерв., 63, 151, 1981.
28. M. Samorski, W. Stamm, Astrophys. J., 268, L17, 1983.
29. J. L. Llogd-Evans, R. N. Coy, A. Lambert, Nature, 305, 784, 1983.
30. T. Kifune, K. Nishijima, T. Hara, Y. Hatano, N. Hayashida, M. Honda, K. Kamata, Y. Matsubara, M. Mori, M. Nagano, G. Tanahashi and M. Teshtma, 19th ICRC, La Jolla, 1, 67, 1985.
31. V. V. Alexeenko, A. E. Chudakov, N. S. Khaerdinov, A. S. Lidvansky, G. Navarra, S. S. Ozrokov, V. V. Sklyarov, V. A. Tizengauzen, 19th ICRC, La Jolla, 1, 91, 1985.

32. B. L. Dingus, J. A. Goodman, S. K. Gupta, G. Yodh, I. Ellsworth, Prepr. Univ. Maryland, 1987.
33. A. Lambert, J. Lloyd-Evans, J. C. Perrett, R. J. O. Reid, A. A. Watson and A. A. West, 19th ICRC, La Jolla, 1, 71, 1985.
34. V. P. Fomin, Yu. I. Neshpor, A. A. Stepanian, B. M. Vladimirovsky, 17th ICRC, Paris, 1, 28, 1981.
35. R. M. Baltrusaitis, G. L. Casiday, R. Cooper, B. R. Dawson, J. W. Elbert, B. E. Fick, P. R. Gerhardt, K. D. Green, D. F. Liebking, C. P. Lingle, E. C. Loh, P. Sokolsky, P. Sommers and D. Steck, 20th ICRC, Moscow, 1, 233, 1987.
36. J. M. Bonnet-Bidaud, M. van der Klis, *Astron. and Astrophys.*, 101, 299, 1981.
37. D. Molteni, M. Rapsarda, *Astron. and Astrophys.*, 87, 88, 1980.
38. Ю. И. Нешпор, Б. М. Владимировский, Ю. Л. Зыскин, А. А. Степанян, В. П. Фомин, *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 46, 1665, 1982.
39. P. M. Chadwick, N. A. Dipper, J. C. Douthwaite, A. I. Gibson, A. B. Harrison, I. W. Kirkman, A. P. Lotts, J. H. Macrae, T. J. L. McComb, K. J. Orford, K. E. Turver & M. Walmsley, *Nature*, 318, 642, 1985.
40. D. J. Fegan, in "Very High Energy Gamma Ray Astronomy", ed K. E. Turver, Dordrecht, Reidel, 1987, p. 111.
41. V. S. Berezinsky, 20th ICRC, Moscow, 9, 39, 1987.
42. G. G. Fazio, H. E. Helmken, E. P. O'Mongain, T. C. Weekes, *Astrophys. J.*, 175, L117, 1972.
43. J. L. Masnow, K. Bennet, G. F. Bignami, W. Hermsen, G. Kanbach, G. L. Masnow, 17th ICRC, Paris, 1, 177, 1981.
44. J. Grindlay, H. Helmken, T. Weekes, *Astrophys. J.*, 209, 592, 1976.
45. A. I. Gibson, A. B. Harrison, I. W. Kirkman, A. P. Lotts, J. H. Macrae, K. J. Orford, K. E. Turver & M. Walmsley, *Nature*, 296, 833, 1982.
46. P. N. Bhat, *Adv. Space Res.*, 3, 135, 1984.
47. J. C. Douthwaite, A. B. Harrison, I. W. Kirkman, H. J. Macrae, T. J. L. McComb, K. J. Orford, K. E. Turver, and M. Walmsley, *Astrophys. J.*, 286, L35, 1984.
48. M. F. Cawley, D. J. Fegan, K. Gibbs, Prepr. № 2173, Harvard-Smithsonian Center Astrophys., 1985.
49. T. Dzikowski, J. Gawin, B. Grochalska, J. Korejwo, J. Wdowczyk, 18th ICRC, Bangalore, 2, 132, 1983.
50. J. Boone, R. Cady, G. L. Casiday, J. W. Elbert, E. C. Loh, P. Sokolsky, D. Steck, and S. Wasserbaech, *Astrophys. J.*, 285, 264, 1984.
51. A. Lambert, J. Lloyd-Evans, and A. A. Watson, 18th ICRC, Bangalore, 9, 219, 1983.
52. N. Hayashida, F. Ishikawa, K. Kamata, T. Kifune, M. Nagano, 17th ICRC, Paris, 9, 9, 1981.
53. I. N. Ktrov, J. N. Stamenov, S. Karakula, W. Tkaczyk, 20th ICRC, Moscow, 1, 282, 1987.
54. A. M. Hillas, 20th ICRC, Moscow, 1, 362, 1987.
55. J. C. Douthwaite, A. B. Harrison, I. W. Kirkman, H. J. Macrae, K. J. Orford, K. E. Turver & M. Walmsley, *Nature*, 309, 691, 1984.
56. M. F. Cawley, D. J. Fegan, K. G. Gibbs, P. W. Gorham, S. Kenney, R. C. Lamb, D. F. Liebking, N. A. Porter, V. J. Stenger, T. C. Weekes, 19th ICRC La Jolla, 1, 119, 1985.

57. R. M. Baltrusaitis, G. L. Cassiday, R. Cooper, J. W. Elbert, P. R. Gerhardy, E. C. Loh, Y. Mizumoto, P. Sokolsky, P. Sommers, and D. Steck, *Astrophys. J.*, 293, L69, 1985.
58. Ю. А. Зыскин, Д. Б. Муканов, Письма в Астрон. ж., 9, 117, 1983.
59. D. J. Thompson, C. E. Fichtel, R. C. Hartman, D. A. Kniffen, and R. C. Lamb, *Astrophys. J.*, 213, 252, 1977.
60. M. F. Cawley, D. J. Fegan, K. Gibbs, P. W. Gorham, R. C. Lamb, D. F. Liebing, P. K. MacKown, N. A. Porter, V. J. Stenger, T. C. Weekes, 19th ICRC, La Jolla, 1, 173, 1985.
61. M. F. Cawley, D. A. Lewis, D. J. Fegan, K. G. Gibbs, A. M. Hillas, R. C. Lamb, N. A. Porter, P. T. Reynolds and T. C. Weekes, 20th ICRC, Moscow, 1, 240, 1987.
62. J. F. Grindley, H. Helmken, R. Handbury-Brown, J. Davis, and L. R. Allen, *Astrophys. J.*, 197, L9, 1975.
63. R. J. Protheros, R. M. Clay, 19th ICRC, La Jolla, 1, 247, 1985.
64. N. Gehrels, T. L. Cline, B. J. Teegarden, W. S. Paciesas, J. Tueller, Ph. Darouchoux, and J. M. Hameury, *Astrophys. J.*, 278, 112, 1984.
65. M. Kafatos, M. M. Shapiro, R. Silberberg, *Comm. Astrophys.*, 9, 179, 1981.
66. M. F. Cawley, D. J. Fegan, K. Gibbs, P. W. Gorham, R. C. Lamb, D. F. Liebing, N. A. Porter, V. J. Stenger, T. C. Weekes, 19th ICRC, La Jolla, 1, 264, 1985.
67. F. A. Aharonian, V. G. Kirillov-Ugryumov, V. V. Vardanian, *Astrophys. and Space Sci.*, 115, 201, 1985.
68. Ф. А. Азаронян, В. В. Варданян, В. Г. Кириллов-Угрюмов, *Астрофизика*, 20, 78, 1984.
69. R. J. Protheros, D. Kazanas, *Astrophys. J.*, 265, 620, 1983.
70. A. A. Zdziarski, A. P. Lightman, *Astrophys. J.*, 294, L79, 1985.
71. V. S. Berezinsky, V. L. Ginzburg, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 194, 3, 1981.
72. Астрофизика космических лучей (под ред. В. Л. Гинзбурга), Наука, М., 1984.
73. G. R. Blumenthal, *Phys. Rev. D*, 1, 1596, 1970.
74. S. Colgate, 18th ICRC, Bangalore, 2, 230, 1983.
75. Ф. А. Азаронян, А. С. Амбарцумян, *Астрофизика*, 21, 275, 1984.
76. V. J. Stenger, Prepr. HDC-1-84, Univ. Hawaii, 1984.
77. T. C. Weekes, Prepr. № 2106, Harvard-Smithsonian Center Astrophys., 1984.
78. Ф. А. Азаронян, А. М. Атоян, Ж. эксперим. и теор. физ., 89, 337, 1985.
79. С. И. Никольский, И. Н. Стаменов, С. Э. Ушев, Ж. эксперим. и теор. физ., 87, 18, 1984.
80. Ф. А. Азаронян, А. С. Амбарцумян, *Астрофизика*, 23, 479, 1985.
81. J. Nishimura, M. Fujii, T. Tatra, E. Atza, Y. Nomura, T. Kobayashi, 17th ICRC, Paris, 2, 94, 1981.
82. D. Muller, J. Tang, 18th ICRC, Bangalore, 2, 60, 1983.
83. Ф. А. Азаронян, Э. А. Мамиджанян, С. И. Никольский, Е. И. Тукчиш, Изв. АН СССР, сер. физ., 48, 2196, 1984.
84. T. Kifune, T. Hara, Y. Matsubara, M. Nagano, K. Nishijima, M. Teshima, K. Ntu, A. Nishio, R. L. Golden, T. A. Koss, J. J. Lord, R. J. Wilkes, 20th ICRC, Moscow, 1, 314, 1987.
85. F. A. Aharonian, E. A. Mamidjanian, S. I. Nikolsky, E. I. Tuktsh, 19th ICRC, La Jolla, 1, 255, 1985.

86. Ф. А. Агаронян, Э. А. Мамиджаниян, С. И. Никольский, Е. И. Тукиш, *Астрофизика*, 23, 55, 1985.
87. F. A. Aharonian, *Prepr. EFI-932(83)-86*, Yerevan, 1986.
88. В. В. Балашов, В. Л. Коротких, И. В. Москаленко, *Вестн. МГУ, Физ., астрон.* 28, 76, 1987.
89. A. A. Stepanian, 20th ICRC, Moscow, 1, 262, 1987.
90. A. M. Hillas, 16th ICRC, Kyoto, 8, 7, 1979.
91. J. N. Stamenov, S. I. Nikolsky, 18th ICRC, Bangalore, 2, 111, 1983.