

УДК: 524.1:524.6:530.145

ПЕРВИЧНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ С ЭНЕРГИЕЙ 10^{14} — 10^{16} эВ И ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГАЛАКТИКЕ

Ф. А. АГАРОНЯН, Э. А. МАМИДЖАНЯН, С. И. НИКОЛЬСКИЙ,
Е. И. ТУКИШ

Поступила 25 мая 1984

Принята к печати 3 марта 1985

Анализ условия поглощения гамма-квантов сверхвысоких энергий на реликтовых фотонах позволяет установить жесткий предел на расстояния до возможных источников первичного гамма-излучения с $E_{\gamma} > 10^{15}$ эВ: $d \leq 10$ кпс. Тем самым получено первое наблюдательное указание на генерацию космических лучей сверхвысоких энергий в источниках галактического происхождения. Приводятся аргументы в пользу того, что обнаруженная на Тянь-Шаньской комплексной установке ШАЛ «диффузное» гамма-излучение с $E_{\gamma} \gtrsim 5 \cdot 10^{14}$ эВ обусловлено вкладом неразрушенных дискретных источников и формируется в близких от Солнца областях интенсивного звездообразования.

1. *Введение.* Исследования космического гамма-излучения сверхвысоких энергий возможны благодаря регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), генерируемых при попадании гамма-квантов в атмосферу Земли. Выделение ливней чисто электромагнитного происхождения на фоне большого числа ШАЛ, инициируемых протонами и ядрами космических лучей, осуществляется двумя путями. Дискретные источники гамма-квантов могут быть найдены по статистически выделенному избытку ливней в определенных направлениях небесной сферы. Эффективность метода существенно зависит от разрешающей способности регистрирующей аппаратуры. Угловое разрешение $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ рад является пока предельным, чем и определяется нижний предел наблюдаемой интенсивности гамма-квантов от дискретных источников, по порядку величины равный 10^{-5} от приблизительно изотропной интенсивности первичных космических лучей той же энергии. Для гамма-квантов с $E_{\gamma} \geq 10^{15}$ эВ это составляет $\geq 10^{-15}$ фот/см² с.

Первое указание о наличии дискретных источников гамма-квантов с $E_{\gamma} \geq 10^{15}$ эВ было получено Штамом и Саморским [1, 2]. Ими было обнаружено 6 дискретных источников на уровне 5σ с интенсивностью порядка $(1.5 \div 3) \cdot 10^{-13}$ фот/см² с.

Второй метод выделения первичного гамма-излучения основан на различии состава ШАЛ, инициируемых гамма-квантами и протонами (ядрами) космических лучей. ШАЛ электромагнитного происхождения в отличие от ШАЛ, генерируемых протонами и ядрами космических лучей, содержат лишь небольшое количество мюонов и адронов*. Этот метод пригоден как для поиска дискретных источников, так и для определения диффузного потока гамма-квантов сверхвысоких энергий. Первые попытки регистрации ШАЛ электромагнитного происхождения этим методом предпринимались еще 20 лет тому назад, однако лишь недавно были получены надежные результаты о диффузном потоке космических гамма-квантов сверхвысоких энергий [3]. При выделении ШАЛ электромагнитного происхождения на фоне «обычных» ШАЛ от протонов и ядер космических лучей на Тянь-шаньской комплексной установке одновременно использовались два критерия — как отсутствие мюонов, так и отсутствие адронов в составе ШАЛ. За время наблюдений $\sim 1.6 \cdot 10^4$ час на эффективной площади детектора ~ 20 м² было обнаружено 8 гамма-квантов в энергетическом диапазоне $(0.5 \div 1) \cdot 10^{15}$ эВ. Полученные координаты зарегистрированных первичных гамма-квантов не позволяют связать их с дискретными источниками, указываемыми Штамом и Саморским [1] (см. рис. 1). Поэтому более обосновано предположение рассматривать их как диффузный поток гамма-квантов с интенсивностью $(5 \pm 2) \cdot 10^{-13}$ фот/см² с стер. При этом характерной особенностью диффузного компонента является отсутствие увеличения потока гамма-квантов при приближении к галактическому диску. Хотя абсолютный поток диффузных гамма-квантов с $E_{\gamma} \geq 5 \cdot 10^{14}$ эВ составляет лишь 10^{-3} от общего потока первичного ядерного компонента при тех же энергиях [3], тем не менее сам факт существования первичного гамма-излучения сверхвысоких энергий весьма интересен в астрофизическом аспекте.

2. *Ограничение расстояний до источников.* Сразу после открытия реликтового чернотельного излучения Джелил обратил внимание на неизбежность поглощения гамма-квантов сверхвысоких энергий на микроволновых фотонах [4] в результате процесса фоторождения электронно-позитронных пар.

* Из-за фоторождения пионов некоторое количество мюонов и адронов обязательно будет присутствовать и в ШАЛ электромагнитного происхождения.

Два сталкивающихся фотона с энергиями E_γ и ε могут образовать $e^+ - e^-$ пару при условии

$$E_\gamma \geq 2(\pi c^2)^2/\varepsilon(1 - \cos \theta), \quad (1)$$

где θ — угол столкновения, m — масса покоя электрона.

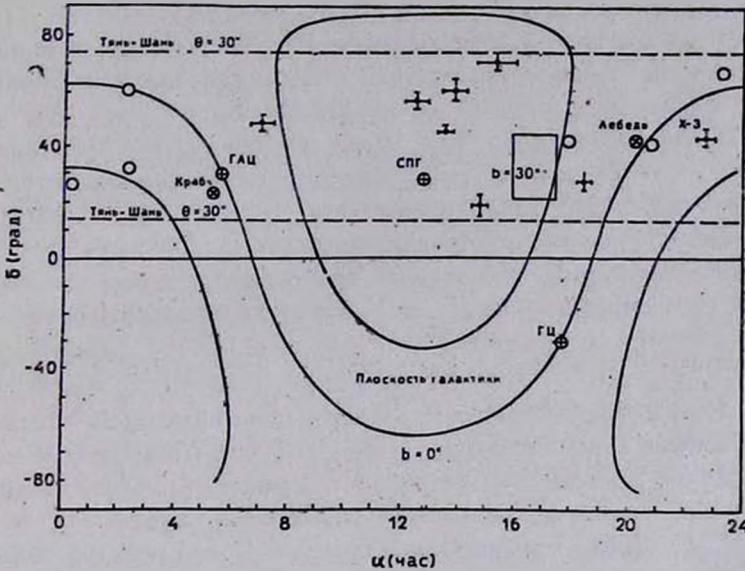


Рис. 1. Распределение первичных гамма-квантов по изобесной сфере. \dagger — Тянь-Шань ($E_\gamma > 5 \cdot 10^{14}$ эВ); пунктирные линии ограничивают область, в пределах которой Тянь-шаньская установка ШАЛ регистрирует ливни. \circ — Кзыл [1] ($E_\gamma > 10^{15}$ эВ); предположительные источники гамма-квантов. \square — Область избытка ШАЛ с $E_0 > 10^{17}$ эВ.

В случае прохождения гамма-квантов через изотропное поле фотонов с характерной энергией ε усредненное по всем углам сечение фоторождения имеет простую зависимость от единственного параметра $z = \frac{E_\gamma \varepsilon}{m^2 c^4}$: начиная с порогового значения $z = 1$ оно быстро растет, достигая максимума при $z = 3$, а далее медленно падает примерно по закону $z^{-1} \ln z$.

Свободный пробег гамма-квантов λ в чернотельном поле фотонов с температурой T_r вычислен Гулдом и Шредером [5]:

$$\lambda^{-1} = \frac{\alpha^2}{\pi \Lambda} \left(\frac{k T_r}{m c^2} \right)^3 f(\nu), \quad (2)$$

где $\alpha = 1/137$; $\Lambda = \hbar/mc = 3.86 \cdot 10^{-11}$ см. Функция $f(\nu)$ от параметра

$\nu = m^2 c^4 / E_\gamma k T$, для $\nu = 10^{-3} + 10$ рассчитана в работе [5]. В двух предельных случаях $f(\nu)$ можно выразить в аналитической форме:

$$\begin{aligned} f(\nu) &\simeq (\pi^2/3) \nu \ln \nu (0.117/\nu) & \nu \ll 1, \\ f(\nu) &\simeq (\pi\nu/4)^{1/2} e^{-\nu} (1 + 75/8\nu + \dots) & \nu \gg 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Функция $f(\nu)$ имеет максимум при $\nu \sim 1$: $f(\sim 1) \sim 1$.

Из (2) следует, что свободный пробег гамма-квантов в поле реликтовых фотонов с температурой 2.7 К минимален при $E_\gamma = 10^{15}$ эВ ($\nu \sim 1$) и составляет $\lambda(\sim 10^{15} \text{ эВ}) \simeq 2.4 \cdot 10^{23} \text{ см} = 8 \text{ кпс}$. Для гамма-квантов меньших энергий свободный пробег резко увеличивается (достигая до ~ 20 кпс и ~ 30 Мпс энергиях гамма-квантов $E_\gamma = 5 \cdot 10^{14}$ эВ и $E_\gamma = 10^{14}$ эВ, соответственно), так как вследствие порога реакции (1) взаимодействия происходят на вириальском „хвосте“ реликтового излучения. Увеличение свободного пробега при энергиях $\gg 10^{15}$ эВ (пропорционально $E_\gamma / \ln E_\gamma$) связано с зависимостью сечения образования пар от $\bar{z} = \frac{E_\gamma \bar{z}}{m^2 c^4} \simeq 3/\nu$.

Таким образом, мы приходим к модельно-независимому заключению, что наблюдаемое гамма-излучение с $E_\gamma \geq 10^{15}$ эВ генерируется в пределах Галактики. Правда, для диффузного компонента, обнаруженного на Тянь-шаньской комплексной установке ШАЛ в области $E_\gamma \sim (0.5 \div 1) \cdot 10^{15}$ эВ, оценка верхнего предела характерного размера области генерации излучения составляет ~ 20 кпс, т. е. не исключается возможность формирования диффузного компонента в гало с радиусом 15—20 кпс.

3. *Дискретные источники гамма-излучения с $E_\gamma \geq 10^{15}$ эВ.* Первое надежное свидетельство существования гамма-источников сверхвысоких энергий с $E_\gamma \geq 10^{15}$ эВ было получено Кильской группой [1]. Координаты и интенсивности излучения этих источников приведены в табл. 1. Ранее Дзиковским и др. [6] сообщалось об избытке ШАЛ в направлении Крабовидной туманности, который, как показывает анализ по содержанию мюонов в ШАЛ, скорее всего обусловлен первичными фотонами [7].

Полученное выше ограничение ≤ 8 кпс на расстояния до областей, где формируется гамма-излучение с $E_\gamma \geq 10^{15}$ эВ, свидетельствует о галактическом происхождении этих источников, что в значительной степени упрощает проблему их отождествления с известными астрофизическими объектами. Из 6 источников, открытых Штамом и Саморским [1], только один (SS 2) однозначно отождествляется с известным объектом — рентгеновской двойной Суг X-3 [8]. Важным аргументом в пользу предположения, что гамма-излучение сверхвысоких энергий, наблюдаемое в направлении созвездия Лебедя, связано с рентгеновским источником Суг X-3.

является обнаруженная периодичность излучения с периодом 4.8 час, открытая ранее в рентгеновских лучах [9]. Пульсирующий компонент от Суг X-3 наблюдается также в жестких гамма-квантах (см., например, [10]). Среднее значение потока фотонов с $E_{\gamma} \geq 2 \cdot 10^{12}$ эВ, усредненного за период 1972—1975 гг., составляет $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ фот/см² с, причем примерно половина этого потока состоит из сильно флуктуирующего компонента [10]. Наблюдаемая периодичность 4.8 час при энергиях $E_{\gamma} \geq 10^{12}$ эВ указывает на генетическую связь этой области энергии с гамма-квантами сверхвысоких энергий ($E_{\gamma} \geq 10^{15}$ эВ).

Таблица 1

ДИСКРЕТНЫЕ ИСТОЧНИКИ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ
СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Источник	Координаты		Избыток (σ)	Поток (фот/см ² с) при $E_{\gamma} > 10^{15}$ [3]
	δ^{II}	l^{II}		
SS 1	-25.17	145.25	5.4	$(2.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-13}$
SS 2	+ 0.68	79.92	4.9	$(1.9 \pm 0.6) \cdot 10^{-13}$
SS 3	+26.54	69.41	4.3	$(1.9 \pm 0.6) \cdot 10^{-13}$
SS 4	+ 0.63	134.3	4.6	$(1.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-13}$
SS 5	+ 5.99	115.37	4.5	$(1.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-13}$
SS 6	-36.02	113.15	5.2	$(3.0 \pm 1.1) \cdot 10^{-13}$

Следует отметить, что из-за экстинкции, поток гамма-квантов с $E_{\gamma} \sim 2 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{16}$ эВ, обнаруженных в направлении Суг X-3 [8], на реликтовом излучении будет ослаблен примерно в 3 раза (при расстоянии до источника 11 кпс). С учетом этого фактора и предполагая степенной спектр Суг X-3 в интервале $2 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{16}$ эВ получаем показатель дифференциального спектра ~ 1.6 и энергетический поток излучения $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ эрг/см² с, что соответствует значению светимости $L_{\gamma} (\geq 2 \times 10^{13} \text{ эВ}) \simeq 7 \cdot 10^{37}$ эрг/с*. Это составляет значительную долю мощности кинетической энергии вращения нейтронной звезды (пульсара) — наиболее вероятного компактного источника, входящего в состав рентгеновской двойной Суг X-3 [11]. Отметим, что ожидаемый поток гамма-излучения в области $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ, если спектр простирается вплоть до 100 МэВ единым степенным законом, составляет лишь $\sim 10^{-8}$ фот/см² с, что примерно на три порядка меньше наблюдаемых значений [12, 13]. Это означает, что в области энергий меньше 10^{13} эВ спектр гамма-излучения становится значительно круче.

* В действительности светимость может оказаться несколько меньше из-за возможного направленного характера излучения пульсара.

Дополнительным аргументом в пользу пульсаров, как источников гамма-квантов сверхвысоких энергий, может служить регистрация фотонов с $E_{\gamma} \geq 10^{16}$ эВ в направлении Крабовидной туманности [7]. В области энергий $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ излучение Крабовидной туманности содержит пульсирующий компонент с периодом 33 мс, свидетельствующий о генерации излучения (по крайней мере его пульсирующего компонента) непосредственно вблизи радиопульсара NP 0532. Согласно данным COS B доля пульсирующего компонента растет с увеличением энергии, достигая почти 100% при $E_{\gamma} > 400$ МэВ (см. например, [14]). В области 100—800 МэВ пульсирующий компонент аппроксимируется степенным спектром $I(E_{\gamma}) = 2 \cdot 10^{-7}$ фот/см² с ГэВ [14]. Продолжая этот спектр до области сверхвысоких энергий, получаем поток фотонов с $E_{\gamma} \geq 10^{16}$ эВ — $I(> 10^{16} \text{ эВ}) \simeq 10^{-15}$ фот/см² с, существенно меньше наблюдаемого значения $\sim 2 \cdot 10^{-13}$ фот/см² с [7] (из-за близости пульсара NP 0532 (~ 1.5 кпс) поглощением фотонов на реликтовом излучении можно пренебречь). В то же время степенная аппроксимация в областях $10^8 + 2 \cdot 10^{11}$ эВ и $2 \cdot 10^{11} + 2 \cdot 10^{16}$ эВ требует существенно разных показателей: $\alpha = 2.5$ и $\alpha = 1.5$, соответственно*. Таким образом, как и в случае Cyg X-3, спектр гамма-излучения в области высоких энергий значительно уплощается.

Обнаружение гамма-квантов с $E_{\gamma} \geq 10^{15}$ эВ от Cyg X-3 и NP 0532 является первым свидетельством об ускорении частиц сверхвысоких энергий пульсарами. В связи с этим представляется на первый взгляд вполне естественной корреляция и остальных источников из табл. 1 с радиопулсарами (как в случае NP 0532) или двойными рентгеновскими источниками, содержащими нейтронную звезду (пульсар) (как в случае Cyg X-3). Однако попытка отождествления этих источников с радиопулсарами или нейтронными звездами, входящими в состав рентгеновских двойных, приводит к отрицательному результату. Возможно, исключение составляет лишь SS 4, вблизи которого находится гамма-источник CG 135+1 из первого каталога COS B, а также двойная звездная система с компактным радиоисточником [17], хотя в данном случае надежность отождествления не очень высока. Более того, в пределы координат локализации остальных гамма-источников не попадают какие-либо пекулярные объекты, за исключением, может быть, ярких переменных звезд и центров активного звездообразования. Вероятно, мы имеем дело с новым классом объектов, которые при огромной мощности в гамма-квантах сверхвысоких энергий ($\sim 2 \cdot 10^{35}$ ($d/1$ кпс)² эрг/с, где d — расстояние до источников) ничем не проявляют себя в других диапазонах электромагнитных волн. В этом отношении они

* О регистрации гамма-излучения с $E_{\gamma} \geq 2 \cdot 10^{11}$ эВ в направлении Крабовидной туманности сообщалось в работах [15, 16].

напоминают неотожествленные источники COS B, хотя имеется и одна существенная разни́ца. Если почти все гамма-источники COS B лежат в галактической плоскости ($|b^1| \leq 1.5^\circ$), то гамма-источники сверхвысоких энергий, за исключением SS 2 (\equiv Cyg X-3), SS 4 и NP 0532 (которые являются также источниками гамма-излучения с $E_\gamma \geq 100$ МэВ), лежат существенно выше галактического экватора (см. табл. 1). Не решив до сих пор проблему о происхождении неотожествленных гамма-источников COS B (см., например, [18]) с обнаружением гамма-источников 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 пульсарами, в которых ускорение космических лучей (в том числе и сверхвысоких энергий) предсказывалось в рамках многих моделей, то другую часть следует отнести к какому-то иному классу астрофизических объектов.

4. *Диффузный компонент гамма-квантов сверхвысоких энергий и происхождение космических лучей.* В настоящее время установлено, что диффузное гамма-излучение с $E_\gamma \geq 100$ МэВ, открытое на ИСЗ примерно двадцать лет тому назад, состоит из двух компонентов: а) «дискового» компонента, обусловленного взаимодействиями космических лучей с межзвездной средой и частично вкладом излучения неразрешенных галактических источников и б) «изотропного» компонента, имеющего, скорее всего, внегалактическое происхождение (см., например, [19]). Из ограничения на расстояния до областей (≤ 20 кпс), откуда доходит гамма-излучение с $E_\gamma \geq 5 \cdot 10^{14}$ эВ (см. выше), следует, что наблюдаемое на Тяньшаньской комплексной установке ШАЛ гамма-излучение не связано с внегалактическим изотропным компонентом, а имеет галактическое происхождение. Дополнительную информацию об области формирования диффузного компонента сверхвысоких энергий дает наблюдаемое пространственное распределение гамма-квантов на небесной сфере. В случае однородного заполнения источников в Галактике мы вправе были ожидать «дисковую» анизотропию (наблюдаемую, в частности, в области энергий $E_\gamma \geq 100$ МэВ). Однако данные Тяньшаньской установки не согласуются с подобной картиной. Допуская реальность наблюдаемого распределения (рис. 1), можно сделать два предположения: а) излучение формируется в гало Галактики с радиусом 15—20 кпс или б) характерный размер области генерации излучения не превосходит по порядку величины толщину галактического диска (~ 500 пс).

Наиболее вероятной моделью в первом случае представляется комптоновское рассеяние ультрарелятивистских электронов, захваченных в гало, на реликтовых микроволновых фотонах. В частности, подобная модель предлагалась Воррал и Стронгом [20] для объяснения «изотропного» гамма-излучения в области энергий $E_\gamma \geq 100$ МэВ. Заметим, что эффективность этого механизма для генерации гамма-квантов сверхвысоких энергий очень высока, так как выполняется условие $E_e \cdot v \gg m^2 c^4$ и, следовательно, при первом же акте рассеяния почти вся начальная энергия электрона передается гамма-кванту [21, 22]. Однако комптоновское рассеяние электронов на микроволновом излучении приводит к формированию спектра гамма-квантов, не согласующегося с наблюдательными данными при разумных предположениях о спектре электронов. В частности, в случае единого степенного спектра электронов в результате комптоновского рассеяния формируется степенной спектр гамма-квантов с показателем $\alpha_\gamma = \frac{\alpha_e + 1}{2}$ вплоть до значений энергии $E_\gamma \sim 10^{-2} \frac{m^2 c^4}{3kT_e} \sim 3 \cdot 10^{12}$ эВ, а далее спектр делается более крутым и падает по закону $E_\gamma^{-(\alpha_\gamma + 1)} \ln E_\gamma$. Для значений показателя электронного спектра $\alpha_e \approx 3.8$, необходимых для объяснения крутого спектра «изотропного» излучения в области $E_\gamma \geq 100$ МэВ с показателем фотонов $\alpha_\gamma = 2.7_{-0.3}^{+0.4}$ [19], ожидаемое отношение дифференциальных потоков вблизи $E_\gamma \sim 100$ МэВ и $E_\gamma \sim 5 \cdot 10^{14}$ эВ более чем на три порядка превосходит наблюдаемое значение. Это противоречие можно преодолеть, предполагая, что спектр электронов в области сверхвысоких энергий существенно уплощается. Однако в этой области энергий спектр электронов в действительности становится более крутым из-за сильных синхротронных и комптоновских потерь (см., например, [23]).

Более правдоподобной представляется реализация случая б), т. е. генерация гамма-излучения в неотдаленных от Солнца областях с $d \lesssim 500$ пс. Нетрудно убедиться в том, что в этом случае излучение лишь условно можно назвать «диффузным», так как оно скорее всего обусловлено неразрешенными дискретными источниками, а не взаимодействиями космических лучей с межзвездной средой. Действительно, предполагая, что наблюдаемое излучение является результатом распада π^0 -мезонов, возникающих при взаимодействиях протонного компонента космических лучей с межзвездным газом, имеем

$$I_\gamma (> 5 \cdot 10^{14} \text{ эВ}) \sim \langle n_H l \rangle \int \sigma_{in}(E) J_{\pi^0}(E) dE \sim \\ \sim \langle n_H l \rangle \bar{\sigma}_{in} J_{\pi^0} (> 10^{15} \text{ эВ}) \sim 10^{-35} \langle n_H l \rangle \text{ фот/см}^2 \text{ с стер},$$

где $\langle n_H l \rangle$ — количество водорода (как атомарного, так и молекулярного) в столбце единичного сечения. Для больших широт ($|b_{\text{г}}| > 15^\circ$) оно не превосходит $\sim 10^{21} \text{ см}^{-2}$ [19] и, следовательно, ожидаемый поток гамма-квантов, генерируемых при взаимодействиях протонов и ядер космических лучей в межзвездной среде, по-видимому, составляет не более 10% наблюдаемого значения. Еще меньше оказывается вклад, вносимый электронным компонентом космических лучей. Действительно, если экстраполировать спектр электронов, измеренный в области 10—300 ГэВ, степенным законом с показателем $\alpha \approx 3.6$ [24] в область сверхвысоких энергий, то получим, что поток электронов в области $\geq 5 \cdot 10^{14}$ эВ примерно на 5 порядков меньше наблюдаемого на Тянь-шаньской установке ШАЛ потока фотонов. Это является естественным следствием того, что в результате синхротронного излучения электроны столь высоких энергий, в отличие от фотонов, очень быстро теряют энергию $\left(t \sim \frac{E}{(dE/dt)_s} \sim 10^3 (H/4 \text{ мкГс})^{-2} (E_s/10^{15} \text{ эВ})^{-1} \text{ лет} \right)$. Энергетические потери электронов с $E_\gamma \geq 10^{15}$ эВ комптоновском рассеянии на низкочастотном излучении в межзвездной среде менее важны из-за падающего характера сечения Клейна-Нишины от параметра $b \equiv \frac{4E_s \varepsilon}{m^2 c^4}$, который даже в случае рассеяния на реликтовом микроволновом излучении существенно больше единицы: $b \sim 10$. Эти оценки указывают, что наблюдаемое на Тянь-шаньской комплексной установке ШАЛ гамма-излучение, по-видимому, генерируется непосредственно вблизи источников космических лучей, где как плотность окружающего газа, так и самих космических лучей может оказаться существенно выше, чем в межзвездном пространстве. Ограничение на расстояния до возможных источников «диффузного» гамма-излучения сверхвысоких энергий, $b \leq 500$ пс, не согласуется с традиционными представлениями о «спокойной» области, охватывающей солнечную систему. Однако астрономические наблюдения последних 10 лет показали, что Солнце в действительности находится в окружении пекулярного комплекса молодых звезд — Пояса Гулда [25, 26], представляющего собой кольцеобразную конфигурацию с диаметром ~ 1 кпс и наклоном 20° относительно галактического экватора. В поясе Гулда сконцентрировано подавляющее большинство ближайших ОВ-звезд, молодых звездных скоплений и молекулярных облаков. Весь этот комплекс звездообразования, как показывают наблюдения, является мощным источником гамма-излучения с $E_\gamma \geq 100 \text{ МэВ}$. Предполагая, что последнее является результатом взаимодействий космических лучей с окружающим газом, легко получить, что плотность космических лучей в этой области существенно выше локально-

го значения (~ 1 эВ/см³), полученного прямыми измерениями на ИСЗ в околоземном пространстве. В частности, анализ условий генерации гамма-излучения в ρ Орн— ближайшем агрегате газа и молодых звезд ($d \approx 160$ пс), принадлежащем Поясу Гулда, показывает, что плотность космических лучей в 5—10 раз превосходит (с учетом неопределенности массы молекулярного облака $M \sim 2000\text{--}4000 M_{\odot}$) локальную плотность [27]. Примечательно, что вблизи этого объекта, как это следует из наблюдений в мягком рентгеновском диапазоне, нет сверхновых звезд моложе 10^6 лет [28], которые традиционно считаются основными источниками космических лучей в Галактике (см., например, [29]).

К настоящему времени в литературе широко обсуждаются модели ускорения космических лучей в ударных волнах сверхновых (см., например, [30, 31]). Однако наблюдательные свидетельства в пользу сверхновых, как потенциальных источников космических лучей, пока касаются лишь релятивистских электронов. Основные надежды получить прямую информацию об ускорении протонно-ядерного компонента космических лучей в оболочках сверхновых связываются с регистрацией жесткого гамма-излучения с $E_{\gamma} \geq 100$ МэВ от распада π^- -мезонов, генерируемых при неупругих ядерных столкновениях [32]. Однако до сих пор не получены какие-либо экспериментальные указания о «проявлении» сверхновых в гамма-лучах. Более того, сравнение крупномасштабного распределения дискретных гамма-источников COS B с распределением сверхновых не обнаруживает какой-либо заметной корреляции*.

В то же время имеет место явная корреляция между гамма-источниками COS B и молодыми звездными ассоциациями или связанными с ними молекулярными облаками и H II областями [33]. Правда, в некоторых случаях в области локализации гамма-источников попадают, помимо OB ассоциаций, также оболочки сверхновых. На основе этого, в работе [33] была выдвинута модель гамма-источников «SNOB» (сверхновые + OB-ассоциации), согласно которой наличие «инжектора» (вспыхивающие звезды в OB-ассоциациях), «ускорителя» (ударные волны сверхновой) и «мишени» (молекулярные облака) создавало бы благоприятные условия для генерации гамма-излучения. Однако модель «SNOB» не получила в дальнейшем наблюдательного подтверждения. Возможно, сверхновые играют незначительную роль при образовании излучения в гамма-источниках. С другой стороны, генетическая связь между некоторыми гамма-источниками COS B и молодыми звездными ассоциациями не вызывает

* Хотя жесткое гамма-излучение с $E_{\gamma} > 100$ МэВ обнаружено в направлении сверхновых Gsв и Vela, однако, согласно данным COS B излучение почти полностью состоит из пульсирующего компонента и, очевидно, связано с пульсарами NP 0532 и PSR 0833.

сомнений. Недавно на спутнике COS B обнаружено жесткое гамма-излучение ($E_{\gamma} \geq 100$ МэВ) еще от одной близкой области интенсивного звездообразования — комплекса Ориона [34], а также получено свидетельство о корреляции жесткого гамма-излучения с еще одной, открытой недавно Дюлидзе [35], местной системой звезд [36].

Таким образом, наблюдательные данные последних лет указывают на целесообразность рассмотрения новых моделей происхождения космических лучей, учитывающих связь источников космических лучей с космогонически активными областями, т. е. очагами интенсивного звездообразования. В частности в работе [27] на основе гамма-астрономических данных была выдвинута гипотеза о том, что наблюдаемые около Земли космические лучи вплоть до энергий 10^{15} эВ генерируются молодыми вспыхивающими звездами. Аргументы иного характера, в первую очередь основанные на недавних измерениях спутника HEAO-3 по зарядовому составу космических лучей, в пользу гипотезы о «местном» происхождении космических лучей, приводились в работах [37, 38]. Нам представляется разумным считать, что космические лучи сверхвысоких энергий ($E \geq 10^{15}$ эВ) и связанный с ними «диффузный» компонент гамма-излучения с $E_{\gamma} \sim (0.5 \div 1) \cdot 10^{15}$ эВ также генерируется в этих объектах. Интересно отметить, что шесть из восьми событий, отобранных в тянь-шаньском эксперименте, группируются в направлении, совпадающем с направлением наблюдаемой анизотропии ШАЛ с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ.

При характерном расстоянии до источников $d \sim 200$ пс светимость в гамма-квантах сверхвысоких энергий составляет примерно 10^{34} эрг/с. Наблюдения на спутнике «Коперник» показали, что звезды ярче $2 \cdot 10^4$ (т. е. ОВ-звезды и сверхгиганты поздних спектральных классов) теряют массу со сверхзвуковыми скоростями [39]. Исходя из этих данных, в работе [27] была оценена суммарная кинетическая энергия (мощность) звездного ветра 44-х ОВ-звезд в Поясе Гулда, в $2 \cdot 10^{38}$ эрг/с. Это значение примерно на порядок превосходит мощность, необходимую для поддержания локальной плотности космических лучей в сфере с диаметром ~ 1 кпс [27] за время удержания космических лучей $2 \cdot 10^7$ лет [40] и примерно на 4 порядка — светимость в гамма-лучах сверхвысоких энергий. Существенный вклад могут внести также другие близкие комплексы звездообразования, как, например, молодые звезды в Поясе Дюлидзе. К сожалению, экспериментальный материал, накопленный к настоящему времени, недостаточно статистически обеспечен для более глубокого понимания природы первичного гамма-излучения сверхвысоких энергий.

В заключение отметим, что на создаваемом экспериментальном комплексе АНИ на г. Арагац [41] будут продолжены поиски первичных гамма-квантов с $E_{\gamma} \sim 5 \cdot 10^{14} \div 5 \cdot 10^{15}$ эВ. Ливни от первичных гамма-квантов содержат, по крайней мере на порядок, меньше высокоэнергичных

мюонов с $E_{\mu} \geq 5$ ГэВ, чем ливни с тем же числом электронов, но созданные первичными протонами и ядрами. Аномально малое число мюонов в ШАЛ и будет служить критерием электромагнитного происхождения ливня. Для определения числа мюонов в ливне в эксперименте АНИ будут использованы 200 сцинтиляционных детекторов, каждый площадью ~ 1 м², расположенные под слоем грунта толщиной около 20 м водного эквивалента. Для определения места прохождения оси ливня, направления его прихода и числа частиц в нем, будут использованы 40—50 групп сцинтиляционных детекторов, расположенных на поверхности Земли по площади круга с радиусом 100 м. По сравнению с Тянь-шаньской установкой ШАЛ [3] установка АНИ будет иметь детектор мюонов в 8 раз большей площади и в 50—100 раз большую эффективную площадь, на которой будут определены координаты осей ливней.

Авторы признательны В. А. Амбарцумяну и А. Р. Петросяну за обсуждение работы и ценные замечания.

Ереванский физический
институт
Физический институт
им. П. Н. Лебедева
АН СССР

PRIMARY GAMMA-RAY EMISSION WITH ENERGY 10^{14} — 10^{16} eV AND POSSIBLE SOURCES OF COSMIC RAYS IN THE GALAXY

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

The analysis of the ultra-high energy gamma-rays absorption on the microwave background radiation allows to establish the upper limit on the distances to the possible sources of gamma-ray emission with $E_{\gamma} \geq 10^{15}$ eV: $d \leq 10$ kpc. Hence the first observational evidence for ultra-high energy cosmic rays acceleration in the galactic sources is obtained. Some arguments that the "diffuse" gamma-rays with $E_{\gamma} \geq 5 \times 10^{14}$ eV, observed in the Tien Shan EAS array and associated with the unresolved discrete sources in the nearest active regions of the star formation are presented.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Stamm, M. Samorski, 18-th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore, v. 1, 1983, p. 131.
2. M. Samorski, W. Stamm, Ap. J., 268, L17, 1983.
3. J. N. Stamenov, S. Z. Ushev, S. I. Nikolsky, V. I. Yakovlev, 18-th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore, v. 6, 1983, p. 54.
4. J. V. Jelley, Phys. Rev. Lett., 16, 479, 1966.
5. R. J. Gould, G. P. Schreder, Phys. Rev., 155, 1404, 1967.

6. *T. Dzikowski, B. Grochalska, J. Gawln, J. Wdowczyk*, Origin of Cosmic Rays, IUPAP-IAU Symp. No. 94, 1980, p. 327.
7. *T. Dzikowski, J. Gawln, B. Grochalska, J. Korejwo, J. Wdowczyk*, 18-th Int. Cosmic Ray Conf., v. 2, 1983, p. 132.
8. *M. Samorski, W. Stamm*, 18-th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore, v. 1, 1983, p. 135.
9. *D. R. Parsingault, E. Schreier, J. Grindlay, H. Gursky*, Ap. J., 209, L73, 1976.
10. *A. A. Степанян*, сб. «Итоги науки и техники, сер. Астрономия», 24, 205, 1982.
11. *W. T. Vestrand, D. Eichler*, Ap. J., 261, 251, 1982.
12. *A. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Урюмов, А. В. Курочкин и др.* Письма ЖЭТФ., 26, 381, 1977.
13. *R. C. Lamb, C. E. Fichtel, R. C. Hartman, D. A. Kniffen, D. J. Thompson*, Ap. J., 212, L63, 1977.
14. *G. G. Lichti, R. Buccheri, P. Caraveo et al.*, in "Non Solar Gamma-Rays", eds. R. Cowsic, R. D. Wills, Pergamon Press, 1980, p. 49.
15. *G. G. Fazio*, Ap. J., 175, L117, 1972.
16. *A. I. Gibson, A. B. Harrison, A. P. Lotts et al.*, Nature, 296, 833, 1982.
17. *L. Maraschi, A. Treves*, M. N. RAS, 194, 1, 1981.
18. *G. F. Bignami, W. Hermsen*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 21, 67, 1983.
19. *C. E. Fichtel, G. A. Stimpson, D. J. Thompson*, Ap. J., 222, 833, 1978.
20. *D. M. Worrall, A. W. Strong*, Astron. Astrophys., 57, 229, 1977.
21. *G. R. Blumenthal, R. J. Gould*, Rev. Mod. Phys., 42, 237, 1970.
22. *F. A. Aharonian, A. M. Atoyan*, Astrophys. Space Sci., 79, 321, 1981.
23. *R. Daniel, S. Stephens*, Space Sci. Rev., 17, 45, 1975.
24. *D. Müller, J. Tang*, 18-th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore, v. 2, 1983, p. 60.
25. *R. Stothers, J. A. Frogel, A. J.*, 79, 456, 1974.
26. *J. A. Frogel, R. Stothers, A. J.*, 82, 890, 1977.
27. *M. Cassé, J. P. Paul*, Ap. J., 237, 236, 1980.
28. *K. M. V. Apparao, S. Hayakawa, D. R. Hearn*, Astrophys. Space Sci., 65, 419, 1979.
29. *В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский*, Происхождение космических лучей, Из-во АН СССР, М., 1963.
30. *S. Colgate*, in "Origin of Cosmic Rays", eds. Osborn, A. W. Wolfendale, Reidel, 1975, p. 447.
31. *W. I. Axford*, Proc. Int. School and Workshop on Plasma Astrophys., (ESA Sp-161), 1981, p. 167.
32. *K. Ptnkau*, Nature, 277, 17, 1979.
33. *T. Montmerle*, Ap. J., 231, 95, 1979.
34. *P. A. Caraveo, K. Bennett, G. F. Bignami et al.*, Astron. Astrophys., 91, L3, 1980.
35. *М. В. Долидзе*, Письма АЖ, 6, 92, 1980.
36. *G. F. Bignami*, 17-th Int. Cosmic Ray Conf., Paris, v. 13, 1981, p. 21.
37. *R. E. Strelmutter, V. K. Balasubrahmanyam, J. F. Ormes, R. J. Protheroe*, 18-th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore, v. 2, 1983, p. 183.
38. *J. F. Ormes*, 18-th Int. Cosmic Ray Conf., Bangalore, v. 2, 1983, p. 187.
39. *T. P. Snow, D. C. Morton*, Ap. J. Suppl. ser., 32, 429, 1975.
40. *H. Garcia-Munoz, G. H. Mason, J. A. Stimpson*, Ap. J., 217, 859, 1977.
41. *С. И. Никольский, Е. И. Тукиш, Е. А. Файнберг, А. Ц. Амагуни, Э. А. Мамиджаниян, С. Г. Матиян*, Преприят ЕрФИ-358 (16)-79, Ереван, 1979.