

Сложные ядра сверхвысоких энергий во Вселенной

В.В. Балашов

НИИ ядерной физики Московского государственного университета

Экспериментальные исследования последних лет говорят о большом, а на определенном участке энергетического спектра — даже доминирующем вкладе сложных ядер в составе космических лучей сверхвысоких энергий. В работе обсуждается связь этих наблюдений с проблемами ядерной физики и γ -астрономии.

Недавние систематические измерения гигантских атмосферных ливней, выполненные в Англии (Haverah Park) [1], Якутии [2], в Соединенных Штатах (Fly's Eye) [3] и Японии (AGASA) [4], установили около двух десятков событий, созданных космическими частицами с энергией выше 10^{20} eV. Это открытие не осталось незамеченным в широких кругах физиков, а в физике космических лучей, астрофизике и космологии вызвало поток новых гипотез, сопровождающийся критическим пересмотром фундаментальных положений в этих областях науки.

Прежде всего, это относится к эффекту Грейзена-Зацепина-Кузьмина (GZK) [5, 6]. Когда протон с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ eV, проходя через газ мягких фотонов реликтового теплового излучения ($T = 2.7K$), сталкивается с одним из них, энергия этой пары в Ц-системе может быть достаточной для фоторождения пиона. В результате происходит резкий сброс энергии протона. Таким образом, согласно механизму GZK, спектр первичного космического излучения обретен сверху, а $5 \cdot 10^{19} - 10^{20}$ eV — это абсолютный предел энергии частиц, способных дойти до нас из далеких областей Вселенной. Обнаружение таких частиц в работах [1-4] превратило эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина в острейший парадокс, работа по разгадке которого сулит много нового не только для понимания самой верхней части спектра приходящих на Землю частиц, но и гораздо более широкой области их энергии, для совершенствования методов регистрации широких атмосферных ливней и дальнейшей разработки их теории, для γ -астрономии.

С новой остротой встает вопрос о происхождении космических лучей. Отправляясь от температуры реликтового излучения и используя известные данные о сечении процесса фоторождения пиона $p(\gamma, \pi)N$ в обычных условиях, нетрудно рассчитать, что средняя длина свободного пробега ультрарелятивистского протона, энергия которого выше порога GZK, составляет в межгалактическом пространстве около 50 Мпк, что является небольшой долей размера Вселенной. Означает ли это, что частицы такой энергии, зарегистрированные в работах [1-4], получили свою огромную энергию внутри сферы радиуса 50 Мпк? За счет чего это происходит? путем какого механизма? Важно добавить, что направления прихода этих частиц на Землю не указывают на какие-либо известные

локальные источники, а вся статистика наблюдения гигантских атмосферных ливней не противоречит представлению о том, что угловое распределение частиц сверхвысоких энергий за пределом GZK изотропно.

Диапазон поисков ответа на возникающие новые вопросы велик — помимо предложений, расширяющих набор возможных электромагнитных механизмов ускорения заряженных частиц до сверхвысоких энергий, здесь и гипотеза прямого рождения таких частиц в гамма-вспышках [7] (а, параллельно с ней, и критика этой гипотезы [8]), и предложение о нарушении лоренц-инвариантности в акте взаимодействия ультрарелятивистского протона с реликтовым фотоном [9], и многое другое. На фоне этого многообразия особое значение (и особый интерес для тех, кто занимается физикой ядра и ядерных реакций) приобретают активизированные последними открытиями исследования, связывающие проблему происхождения космических лучей с вопросом о составе первичного космического излучения. Прошли времена, когда доминантность протонной компоненты (с небольшой, на уровне нескольких процентов, примесью ядер гелия) казалась универсальным и естественным свойством космических лучей. Измерения, выполненные за последние 20 лет разными методами и разными группами, показали, что в верхней части спектра космических лучей, около известного излома (“колена”) в спектре, при $E \sim 10^{15}$ eV, и за ним, это совсем не так; по многим данным, доля сложных ядер и, в особенности, ядер элементов вблизи железа здесь является преобладающей (“iron dominance” [10, 11]). Выше 10^{16} eV, она, по-видимому, снова падает. Правда, встречаются предположения, что один из самых мощных зарегистрированных к настоящему времени ливней с энергией выше $2 \cdot 10^{20}$ eV [12] порожден, если анализировать структуру ливня, не протоном, а, скорее, ядром железа. В этой непростой ситуации все более укрепляется точка зрения, что основные источники протонов в космических лучах сверхвысоких энергий находятся за пределами Галактики, а их ядерная компонента имеет галактическое происхождение.

Не вдаваясь в разбор всех предложений, относящихся к тому, как появляются сложные ядра в первичном космическом излучении, остановимся на разрабатываемой многими авторами концепции эжекции и ускорения протонов и сложных ядер в магнитосфере пульсаров (см., например, [13]). Вот как выглядит схема процесса в двойных звездах: ядра железа вырываются с горячей оболочки нейтронной звезды в результате термоэмиссии, под действием ее собственного электрического поля или аккреции вещества со стороны звезды-компаньона и затем ускоряются в быстро вращающемся магнитном и электрическом поле пульсара. В случае одиночного пульсара особая роль отводится воздействию на его поверхность частиц, вырванных с нее, затем ускоренных в магнитосфере и возвращающихся обратно, бомбардируя поверхность и вырывая с нее новые частицы. В обоих случаях мы еще очень мало знаем о физических параметрах рассматриваемых систем, чтобы ставить задачу о количественном расчете спектра испускаемого пульсаром излучения. Тем интереснее на данном этапе качественные оценки разного рода факторов, которые могут влиять на интенсивность, энергетический спектр и состав излучения, приходящего от дискретных источников на Землю.

Среди них, что касается сложных ядер, одним из важнейших является эффект их расщепления в окрестности самой звезды — как в процессах сильного взаимодействия с окружающим его веществом, так и под действием мощного электромагнитного излучения в этом окружении. Вопрос о фоторасщеплении тяжелых частиц космических лучей при взаимодействии с электромагнитным излучением звезды был поставлен более 50 лет тому назад (применительно к другой задаче) Г. Т. Зацепиным [14]. В сегодняшних

теоретических исследованиях процесс фоторасщепления релятивистских ядер в окрестности дискретных источников рассматривается обычно с точки зрения формирования химического состава космических лучей. Более полное рассмотрение этого процесса ведет также к вопросам γ -астрономии, к предложенному нашей группой в 80-е годы фотоядерному механизму генерации космических γ -квантов сверхвысокой энергии.

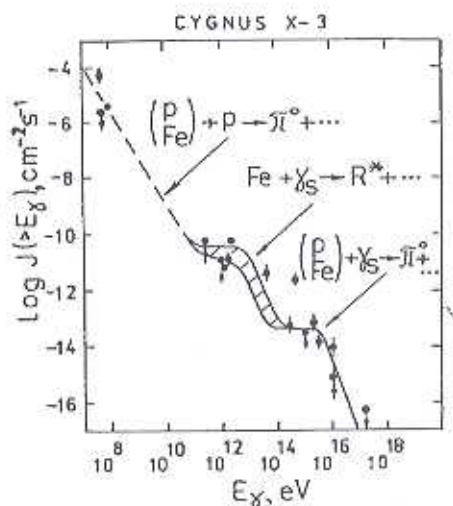


РИС. 1: Интегральный спектр γ -лучей сверхвысокой энергии от источника Cyg X-3. Данные наблюдений — из работ [17, 18]. Сплошная кривая — наш расчет [16]. Штриховкой показана область изменения результатов при варьировании в разумных пределах средней энергии и множественности вторичных γ -квантов в реакции фоторасщепления ядер железа. Пунктир — возможный вклад от процессов рождения π^0 -мезона в сильном взаимодействии релятивистских протонов и ядер с веществом окружения звезды.

Мы начинали со схематического описания энергетического спектра диффузного (внегалактического) γ -излучения [15]. Фотоядерный и известный задолго до этого фотомезонный механизмы его генерации были включены в рассмотрение одновременно; первый — в связи с ядерной, второй — с протонной компонентой первичных корпускулярных потоков. При взаимодействии ультрарелятивистского

MeV. Когда такой процесс происходит при прохождении ультрарелятивистских сложных ядер через газ реликтовых фотонов, его порог на порядок ниже а, вместе с тем, характерная энергия образующегося сверхжесткого электромагнитного излучения — на два порядка ниже, чем в процессе фоторождения пиона. Здесь надо учесть, что спектр первичных космических лучей подчиняется степенному закону: $I_p(\Gamma_p) \sim \Gamma_p^{-s}$, с показателем $s \sim 2.5 - 3.0$. Быстрый спад интенсивности космических лучей с энергией приводит к тому, что даже при малой относительной доле сложных ядер (в работе [15] мы исходили из соотношения $I_A(\Gamma)/I_p(\Gamma) = 10^{-3}$) плотность генерируемых γ -квантов в области действия фотоядерного механизма ($E_\gamma \leq 10^{17} - 10^{18}$ eV) оказывается на полтора порядка выше, чем это дает фотомезонная составляющая, где максимальная энергия γ -квантов приходится на $10^{19} - 10^{20}$ eV. Сочетание вкладов фотомезонного и фотоядерного механизмов придает спектру γ -квантов сверхвысокой энергии характерную ступенчатую форму.

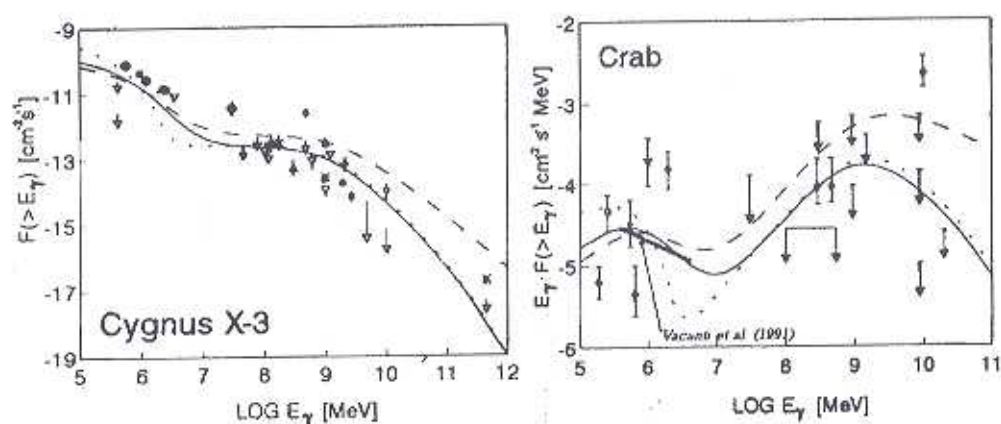


РИС. 2: Интегральный спектр γ -лучей сверхвысокой энергии от дискретных галактических источников [22]. Сплошная, пунктирная и точечная кривые — теоретические расчеты с разными способами учета поглощения γ -лучей на пути от источника. Данные наблюдений — из монографии [23].

Это наблюдение стало отправным пунктом единого рассмотрения фотомезонного и фотоядерного механизмов генерации при описании спектра и интенсивности γ -лучей высокой энергии от дискретных галактических источников. На рис.1 показан пример результатов работы [16], относящихся к двойной звезде Cyg X-3. Аналогично выглядят полученные в той же работе результаты расчетов и их сравнение с данными наблюдений для одиночного пульсара PSR 0531+21, находящегося в Крабовидной туманности. Исходными параметрами расчетов были средняя температура газа фотонов в окрестности звезды ($\langle \omega \rangle = 6$ eV для Cyg X-3 и 30 eV для PSR 0531+21), отношение плотностей числа фотонов и нуклонов в среде генерации и др., значения которых согласовывались с оценками из предшествовавших работ, где источником γ -лучей высокой энергии полагался распад π^0 -мезонов, образующихся в электромагнитных и сильных взаимодействиях генерируемых пульсаром частиц с его окружением [19]. Энергия и множественность вторичных γ -квантов при фоторасщеплении ядер железа оценивались в рамках стандартной теории фотоядерных реакций [20, 21].

Предложенный подход не был предназначен для получения устойчивых количественных результатов. На описываемом этапе работы важен был ее главный качественный

результат — вывод о доминирующем вкладе фотоядерного механизма в средней части γ -спектра ($E_\gamma \sim 10^5$ GeV) и его ответственности за ступенчатую форму спектра в этом районе. Он сохранился в последующих, более детальных исследованиях других групп, выполненных в 90-е годы [22] (Рис. 2).

Проблема сложных ядер сверхвысоких энергий во Вселенной фундаментальна. Тесное перекрывание методов и представлений астрофизики, физики космических лучей и ядерной физики при ее разработке делает ее исключительно привлекательной для исследователей разных специальностей и является залогом дальнейшего продвижения вперед.

-
- [1] M. A. Lawrence *et al.*, *J. Phys. G* **17** (1991) 773. 11
- [2] B. N. Afanasiev *et al.*, *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf.*, **2** (1995) 756. 11
- [3] D. J. Bird *et al.*, *Ap. J.* **424** (1994) 491. 11
- [4] M. Takeda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 1163. 11
- [5] Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин, *Письма в ЖЭТФ* **4** (1966) 114. 11
- [6] K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* **16** (1966) 748. 11
- [7] E. Waxman, *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995) 386. 12
- [8] S. T. Scully, F. W. Stecker, *Astropart. Phys.* **16** (2002) 271. 12
- [9] S. L. Glashow, S. Coleman, *Phys. Lett. B* **405** (1997) 249. 12
- [10] W. V. Jones, *Nucl. Phys. A* **418** (1984) 139. 12
- [11] M. A. C. Glasmacher *et al.*, *Astropart. Phys.* **12** (1999) L1. 12
- [12] C. C. H. Jui, *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf.*, vol. "Inv. Rapp. and Highlight", (1999) 370. 12
- [13] W. Bedranek, R. J. Protheroe, *Astropart. Phys.* **16** (2002) 397. 12
- [14] Г. Т. Зацепин, *ДАН СССР* **80** (1951) 577. 12, 13
- [15] В. В. Балашов, В. Л. Коротких, И. В. Москаленко, *Вестник Моск. ун-та, сер. физ. астрон.* **28** (1967) 76. 13, 14
- [16] V. V. Balashov, V. L. Korotkikh, I. V. Moskalenko, *Proc. 21st. Int. Cosmic Ray Conf.* vol. **OG4** (1990) 8-6. 13, 14
- [17] J.-M. Bonnet-Bidaud, G. Chardin, *Phys.Rep.* **160** (1988) 325. 13
- [18] Б. М. Владимировский, А. М. Гальпер, Б. И. Лучков, А. А. Степанян, *УФН* **145** (1985) 255. 13
- [19] F. A. Aharonian *et al.* *Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conf.* **1** (1985) 255. 14
- [20] В. Л. Коротких, Е. Л. Ядровский, В. В. Варламов, *Препринт НИИЯФ МГУ, № 88-33/54.* — М., 1988. 14
- [21] И. В. Москаленко, О. В. Фолина, *ЯФ* **49** (1989) 1623. 14
- [22] S. Karakula, G. Kocielek, I. V. Moskalenko, W. Tkaczyk, *Proc. 22nd Int. Cosmic Ray Conf.* **1** (1991) 255. 14, 15
- [23] V. S. Berezinskii, S. V. Bulanov, V. L. Ginzburg, V. L. Dogel, V. S. Pluskin, *Astrophysics of Cosmic Rays*, North-Holland, 1990. 14
- [24] V. V. Balashov, *Proc. 4th Workshop on Perspectives in Nuclear Physics at Intermediate Energies*, S. Boffi, C. Ciofi degli Atti, M. Giannini (Eds), World Scientific, 1989, p. 503.