

В. С. Березинский. Нейтринная астрофизика высоких энергий. Космические нейтрино с $E_\nu \geq 3-100$ ГэВ образуются в источниках при взаимодействии ускоренных протонов и ядер с газом или фотонами малых энергий: в результате этого взаимодействия рождаются заряженные π - и K -мезоны, в цепочках распада которых образуются нейтрино. Идея о существовании космических нейтрино высоких энергий и о возможности их регистрации была впервые выдвинута М. А. Марковым в 1959 г.¹, основные источники и современные возможности нейтринной астрофизики высоких энергий впервые обсуждались в обзоре².

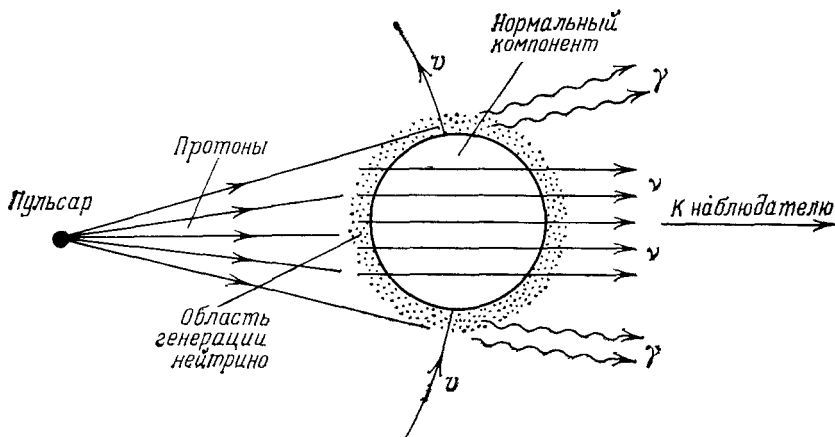
Нейтринная астрофизика естественно подразделяется на область высоких и сверхвысоких энергий. Последняя характеризуется энергиями нейтрино $E_\nu \geq 10^7$ ГэВ. В генерации этих нейтрино доминируют $p\gamma \rightarrow \pi^+ X$ -процессы, при регистрации — резонансное рождение W^- -бозона ($\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow$ адроны), и использование акустического или радиометодов регистрации³ позволяет в будущем надеяться на использование гигантских детектирующих объемов естественного вещества (вода, лед). В настоящем докладе обсуждается нейтринная астрофизика высокой энергии ($E_\nu \geq 30-100$ ГэВ). В генерации нейтрино при этих энергиях доминируют $pp \rightarrow \pi^\pm X$ -процессы, а при регистрации — $\nu_\mu N \rightarrow \mu^\pm X$ -рассеяние. При энергии $E_\mu \geq 30-100$ ГэВ мюон практически сохраняет направление рождающего его нейтрино, благодаря чему подземный (подводный) детектор мюонов является нейтринным телескопом. Мюоны с энергией $E_\mu \geq 100$ ГэВ имеют пробег в грунте, превышающий $0,5 \cdot 10^5$ г/см², для детекторов относительно небольшого объема мюоны рождаются преимущественно вне детектора и определяющим параметром возможности регистрации потока нейтрино оказывается площадь детектора.

В настоящее время работают несколько подземных детекторов нейтрино высоких энергий с площадью $S \sim 100$ м². Наиболее эффективным из них является Баксанский нейтринный телескоп ИЯИ АН СССР⁴, с размерами $16 \times 16 \times 11$ м³. Хорошими возможностями для детектирования нейтрино высоких энергий обладает детектор ЖСД (ИЯИ АН СССР, Институт космогеофизики, Турин) под Мон-Бланом с размерами $8 \times 7 \times 5$ м³. Регистрация космических нейтрино высоких энергий является также одной из задач детекторов распада протонов: ИМБ — США (размер $22,8 \times 16,9 \times 17,8$ м³); КЕК — Япония (цилиндр диаметром 15,6 м и высотой 16 м), «Фрежюс» — Франция, ФРГ ($18 \times 6,2 \times 6,2$ м³); НУСЕРС — Италия ($3,5 \times 3,5 \times 3,5$ м³). Ведутся работы по созданию специализированного глубоководного нейтринного телескопа на Байкале с площадью $S \sim 10^5$ м²⁵. Проект глубоководной установки ДЮМАНД в США предполагает еще более обширную площадь детектора.

Горизонт существующих подземных детекторов площадью $S \sim 100$ м² ограничен пределами нашей Галактики. При регистрации детектором с $S \sim 100$ м² даже для галактических источников светимость в форме ускоренных частиц должна составлять $10^{41}-10^{43}$ эрг/с при показателе интегрального спектра генерации $\gamma = 1,1-1,3$. Источники с такой высокой светимостью

должны быть короткоживущими (например, $\tau \sim 10$ лет для пульсара с $L \sim 10^{43}$ эрг/с). Примером подобного источника нейтрино служат плотные оболочки сверхновых в период от 2 недель до 5 месяцев после вспышки⁶. Протоны могут ускоряться как ферми-механизмом непосредственно в оболочке, так и в магнитосфере молодого пульсара. Вспышки сверхновых в Галактике ожидаются с частотой от 10^{-1} до 10^{-2} лет⁻¹. Другой моделью является тесная двойная система с молодым пульсаром в качестве компактного компаньона⁷.

Интересным классом объектов служат так называемые «скрытые» нейтринные источники. Они характеризуются относительно малым потоком γ -излучения (от $pp \rightarrow \pi^0 X$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ -реакций). Примером такого источника



служит двойная система из активного пульсара и звездного ядра гиганта, находящихся внутри общей оболочки⁸. γ -излучение поглощается в оболочке и по всем наблюдательным параметрам звезда ничем не отличается от обычного гиганта за исключением того, что она излучает поток нейтрино высокой энергии.

В настоящее время наибольший интерес вызывает модель скрытого источника, представляющего собой своеобразный «нейтринный пульсар»⁸ (см. рисунок): пучок протонов, ускоренных в магнитосфере молодого пульсара, рождает нейтрино (через $pp \rightarrow \pi^\pm X$, $\pi^\pm \rightarrow \mu\nu$, $\mu \rightarrow e\nu\nu$ -реакции) в атмосфере массивного компонента на «обратной» (по отношению к наблюдателю) стороне звезды. Наблюдаемое γ -излучение генерируется, когда атмосфера пересекает линию наблюдения толщиной $x \sim 10-100$ г/см²: при меньших толщинах — неэффективно рождение пионов пучком, при больших — поглощается γ -излучение. В результате γ -поток ослаблен по сравнению с нейтринным фактором τ_ν/τ_γ , где τ_γ и τ_ν — длительность гамма и нейтринного пульсов ($\tau_\nu \sim 2R/v$ и $\tau_\gamma \sim H/v$, где R — радиус нормального компонента, v — скорость орбитального движения, H — высота однородной атмосферы звезды).

Описанная модель была использована в⁹ для объяснения γ -излучения высокой энергии от Лебеда X-3¹⁰.

Приведем результаты наших вычислений потока нейтрино с энергией выше E от Лебеда X-3 в предположении, что пульсар испускает ускоренные протоны в виде пучка с телесным углом Ω и с энергетическим спектром $A E^{-(\gamma+1)}$:

$$j_{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu} (> E) = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{1}{1-\alpha^\gamma} (\varphi_{\nu_\mu} + \varphi_{\bar{\nu}_\mu}) \cdot \frac{4\pi}{\Omega} \frac{R}{\pi A} L_p E^{-\gamma}; \quad (1)$$

здесь $j_{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}$ — поток мюонных нейтрино и антинейтрино, усредненный по наблюдаемому периоду источника $T = 4,8$ час, $r = 10$ кпс — расстояние

до Лебеда X-3, γ — показатель интегрального спектра протонов, $\alpha \approx 0,5$ — доля энергии, сохраняемая протоном в pp-соударении, φ_{ν_μ} и $\varphi_{\bar{\nu}_\mu}$ — безразмерные выходы нейтрино¹¹, R — радиус звезды, A — расстояние между звездой и пульсаром, L_p — светимость пульсара в ускоренных частицах, выраженная в ГэВ/с и E — энергия нейтрино в гигаэлектронвольтах; коэффициент $R/\pi A$ в (1) связан с длительностью нейтринного импульса $\tau_\nu = (R/\pi A) T$. Поток гамма-излучения с энергией выше E выражается аналогичной формулой

$$j_\nu(> E) = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{1}{1-\alpha^\gamma} \varphi_\nu \frac{\varphi_\pi}{\Omega} \frac{\tau_\nu}{T} L_p E^{-\gamma}, \quad (2)$$

где $\varphi_\nu = 0,95 (\varphi_{\nu_\mu} + \varphi_{\bar{\nu}_\mu})$.

При $E > 10^3$ ГэВ наблюдаемый гамма-поток составляет $j_\nu (> 1 \text{ ТэВ}) \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $\gamma \approx 1,0$ для энергии вплоть до $E_\gamma \approx 10^3$ ТэВ. Число мюонов с энергией выше 1 ТэВ, пересекающих за 1 год подземный детектор с $S \approx 100 \text{ м}^2$, равно

$$n_\mu (> 1 \text{ ТэВ}) \approx 6,7 \cdot 10^2 \frac{4\pi}{\Omega} \frac{R}{\pi A} \frac{L_p}{10^{43} \text{ эрг/с}}.$$

Согласование с гамма-поток (2) при этом требует малого τ_ν/T .

Недавно были получены предварительные данные о регистрации потока мюонов в направлении на Лебедь X-3 детекторами НУСЕКС и ИМБ. Неясно, можно ли интерпретировать их с помощью потока нейтрино от этого источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Markov M. A.— In: Proc. of 1960 Intern. Conference on High Energy Physics.— Rochester, 1960, p. 578.
2. Березинский В. С., Зацепин Г. Т.— УФН, 1977, т. 122, с. 3.
3. Аскарьян Г. А.— АЭ, 1957, т. 3, с. 152.
Аскарьян Г. А., Дологошеин Б. А.— Письма ЖЭТФ, 1977, т. 25, с. 232.
Аскарьян Г. А.— ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 616.
Гусев Г. А., Железных И. М.— Письма ЖЭТФ, 1983, т. 38, с. 505.
4. Alekseev E. N. et al.— In: Proc. of 16th Intern. Cosmic Ray Conference (ICRC).— Kyoto, 1979, v. 10, p. 276.
5. Domogatsky G. V. et al.— In: Proc. of Intern. Conference «Neutrino-84».— Dortmund (to be published).
6. Berezinsky V. S., Prilutsky O. F.— In: Proc. of DUMAND Summer Workshop/Ed. A. Roberts, 1976, p. 229.
Silberberg M., Shapiro M.— In: Proc. of 15th ICRC.— Plovdiv, 1977, v. 6, p. 237.
Berezinsky V. S., Prilutsky O. F.— Astron. and Astrophys., 1978, v. 66, p. 325.
7. Eichler D., Schramm D.— Nature, 1978, v. 275, p. 704.
8. Berezinsky V. S.— In: Proc. 1979 DUMAND Summer Workshop at Khabarovsk and Lake Baikal/Ed. J. Learned.— Hawaii DUMAND Center, 1980, p. 245.
9. Vestrand W. T., Eichler D.— Astrophys. J., 1982, v. 261, p. 251.
10. Stepanian A. A. et al.— In: Proc. of Intern. Workshop on High Energy Gamma Ray Astronomy/Ed. R. Murtky. Ootakamund, 1982, p. 43.
Samorski M., Stamm W.— Astrophys. J. Lett., 1983, v. 268, p. 17.
Morello C., Navarra G., Vernetto S.— In: Proc. of 18th ICRC — Bangalore, 1983, v. 1, p. 127.
Lloyd-Evans J. et al.— Nature, 1983, v. 305, p. 784.
11. Berezinsky V. S., Volynsky V. V.— In: ⁴, p. 326.