

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРАНЫ

УДК 523 + 524.1

БЛИЖАЙШИЕ ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ – ВЕРОЯТНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И.П. Безродных
(ИКИ РАН)

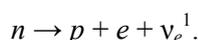
А.П. Тютнев, В.Т. Семёнов
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

В настоящее время имеются достаточные основания считать, что источниками частиц высоких энергий галактических космических лучей являются остатки сверхновых звёзд. В работе обращается внимание на высокий уровень интенсивности потоков позитронов в составе галактических космических лучей. Нейтроны и позитроны в основном являются продуктами одних и тех же процессов, связанных с взаимодействием протонов галактических космических лучей с веществом и электромагнитным излучением в остатках сверхновых и межзвёздной среде. На основании этого делается предположение, что в составе частиц галактических космических лучей есть нейтроны высоких энергий. Сделана оценка энергии нейтронов, которую они должны иметь, чтобы их пробег до распада превышал расстояние от остатков сверхновых звёзд до Солнечной системы.

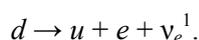
Ключевые слова: пробеги нейтронов, высокие энергии, межзвёздная среда, галактические космические лучи, остатки сверхновых звёзд.

Введение

Нейтрон вне атомного ядра является нестабильной частицей. Время жизни нейтрона около 880 с. Распадается нейтрон на протон, электрон и антинейтрино электронное:

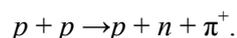


Нейтрон состоит из двух d -кварков и одного u -кварка ($n = ddu$), протон из двух u -кварков и одного d -кварка ($p = duu$). Нестабильный, тяжёлый d -кварк со временем распадается на более легкий u -кварк, электрон и антинейтрино электронное:

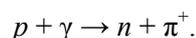


Комбинация кварков (ddu) превращается в комбинацию кварков (duu), это и есть причина распада нейтрона.

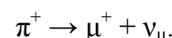
Высокоэнергичные нейтроны генерируются при взаимодействии протонов высоких энергий с веществом в реакции



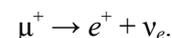
Кроме этого процесса, нейтроны генерируются протонами сверхвысоких энергий при их взаимодействии с фотонами, в частности с фотонами реликтового электромагнитного излучения в реакции:



При этом π^+ -мезон распадается по схеме:



Затем, μ^+ -мюон распадается на позитрон и нейтрино электронное:



Как мы уже упоминали, нейтроны и позитроны высоких энергий являются, в основном, продуктами взаимодействия высокоэнергичных протонов с частицами вещества и фотонами. Наличие большого количества позитронов в составе галактических космических лучей [1] косвенно подтверждает гипотезу о возможности существования в высокоэнергичной части спектра галактических космических лучей нейтронов.

Пробеги нейтронов в межзвёздном пространстве

Зная кинетическую энергию нейтрона, попробуем оценить пройденный им путь до распада. Следует учесть, что согласно теории относительности «внутренние часы» быстрого нейтрона идут медленнее, чем часы внешнего наблюдателя. Вероятность, что частица не распадет на интервале пути x , определяется как:

$$P = \exp(-x/x_0).$$

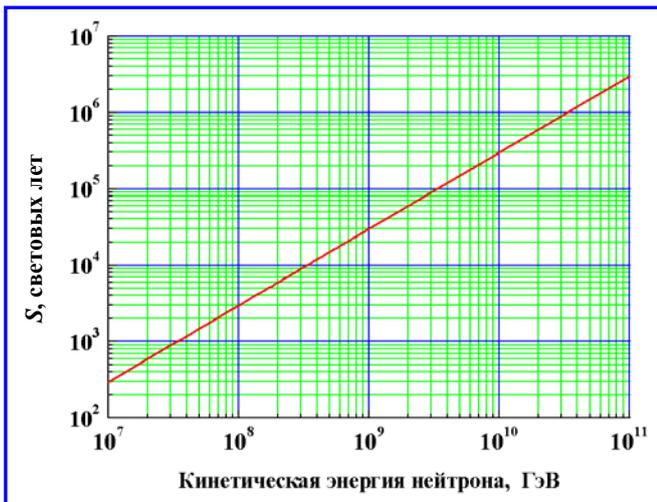


Рис. 1. Зависимость пути, пройденного нейтроном, от его кинетической энергии. За единицу пути принят путь (в лабораторной системе координат), который проходит свет за 1 год

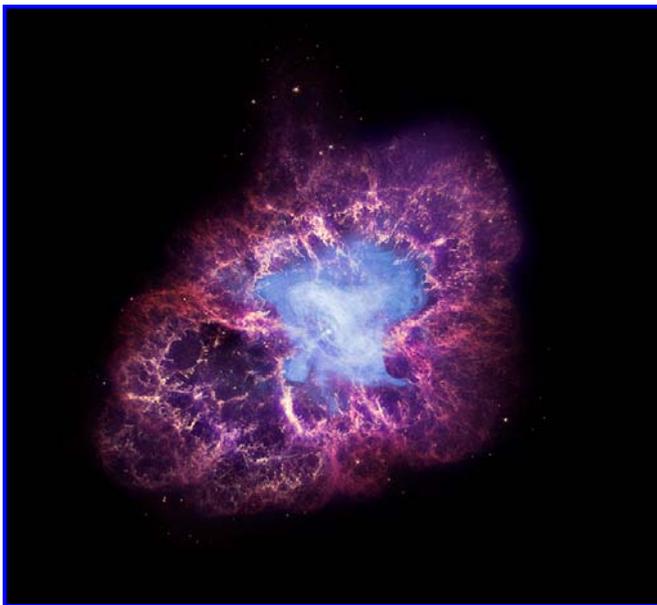


Рис. 2. Крабовидная туманность

Пробег частицы x_0 вычисляется, если известна кинетическая энергия E_k , энергия покоя частицы $E_0 = m_0c^2$ и характерное время жизни до распада t_0 (в системе отсчёта частицы). Скорость частицы определяется из соотношения

$$(v/c)^2 = 1 - E_0^2 / (E_0 + E_k)^2.$$

Учитывая релятивистские эффекты, получим

$$x_0 = vt_0 / [1 - (v/c)^2]^{0.5} = vt_0(E_0 + E_k) / E_0.$$

Вероятность того, что нестабильная частица пройдёт путь $x = x_0$ и не распадется, приблизи-

тельно равна 0,37. Пробег нейтрона до распада будем оценивать в световых годах. Один световой год – это расстояние, которое проходит свет за 1 год, распространяясь со скоростью 300 000 км/с. Учитывая, что время жизни нейтрона около 880 с, определим путь, который он может пройти за это время. Точнее определим, как далеко от Солнечной системы могли быть рождены нейтроны высоких энергий, которые могут быть зарегистрированы у Земли. На рис. 1 показан график зависимости пробега нейтрона x_0 от его кинетической энергии.

Сверхновые звёзды

В конце своей эволюции массивная звезда взрывается, сбрасывая верхние слои своей оболочки массой порядка нескольких масс Солнца. Обычно сброшенная звездой оболочка распространяется со скоростью намного выше скорости звука в межзвёздной среде (например со скоростью около 10 000 км/с), образуя при этом мощную межзвёздную ударную волну, способную эффективно ускорять заряженные частицы до высоких энергий [2]. Центральная часть звезды массой немного большей массы Солнца сжимается до размеров от 20 до 30 км в диаметре, образуя быстро вращающуюся с сильным магнитным полем нейтронную звезду (пульсар). Взрыв звезды может быть виден даже из другой Галактики. Яркость вспышки взрыва звезды превосходит яркость Солнца почти в миллиард раз. Такую вновь появившуюся на небе яркую звезду (её можно видеть невооружённым глазом в течение нескольких десятков дней, даже днём) называют сверхновой [3 – 6].

Остатки сверхновых могут быть источниками нейтронов высоких энергий

Известно, что основными претендентами на источники высокоэнергичных космических лучей в Галактике являются пульсары и ударные волны в межзвёздной среде, образованные взрывами сверхновых звёзд [2]. Максимальная энергия, до которой могут быть ускорены протоны вблизи пульсара, составляет величину около 10^9 ГэВ [7].

К остаткам сверхновых звёзд, расположенных в непосредственной близости от Солнечной системы, относятся остатки в созвездии Паруса, остатки на границе созвездий Близнецов и Единорога, Скорпиона, Тельца (Крабовидная туманность). Из них наиболее изучена Крабовидная туманность (рис. 2). Крабовидная туман-

ность расположена от Солнечной системы на расстоянии 6 500 св. л. – это около 2 кпк, имеет массу около 4,6 масс Солнца и диаметр 11 св. л. (3,4 пк). В настоящее время туманность расширяется со скоростью около 1 500 км/с, она является остатком сверхновой, вспышку которой наблюдали арабские и китайские астрономы 4 июля 1054 г. В центре Крабовидной туманности находится пульсар радиусом около 10 км, с магнитным полем 10^{12} Гс и массой порядка 1,4 массы Солнца. Пульсар (сверхмощный магнит) в центре Крабовидной туманности вращается со скоростью 30 оборотов в секунду. Ось вращения пульсара не совпадает с его магнитной осью. Этот гигантский генератор создает в окружающем его космическом пространстве сильные электрические поля, способные ускорить заряженные частицы окружающей плазмы до высоких энергий. Ускоренные заряженные частицы, взаимодействуя с магнитным полем пульсара и окружающим веществом, генерируют электромагнитное излучение в диапазоне от радиоволн до жёсткого гамма-излучения с энергией квантов более 100 ГэВ и генерируют потоки вторичных частиц, среди которых есть позитроны и нейтроны.

Высокоэнергичные нейтроны от остатков ближайших сверхновых звёзд могут достигать Солнечной системы

Используя данные, представленные на рис. 1, оценим нижний порог энергии нейтронов, которые могут достичь Солнечной системы от предполагаемого источника. Нейтроны от остатка сверхновой (радиопульсар PSR B0656 + 14, на границе созвездия Близнецов и созвездия Единорога):

$$- E = 2,7 \cdot 10^7 \text{ ГэВ}, S \approx 800 \text{ св. л.}$$

Нейтроны от остатка сверхновой в созвездии Паруса:

$$- E = 3,4 \cdot 10^7 \text{ ГэВ}, S \approx 1\,000 \text{ св. л.}$$

Нейтроны от остатка сверхновой в созвездии Тельца (Крабовидная туманность):

$$- E = 2,2 \cdot 10^8 \text{ ГэВ}, S \approx 6\,500 \text{ св. л.}$$

Нейтроны из центральных областей нашей Галактики (рис. 3):

$$- E = 1,0 \cdot 10^9 \text{ ГэВ}, S \approx 30\,000 \text{ св. л.}$$

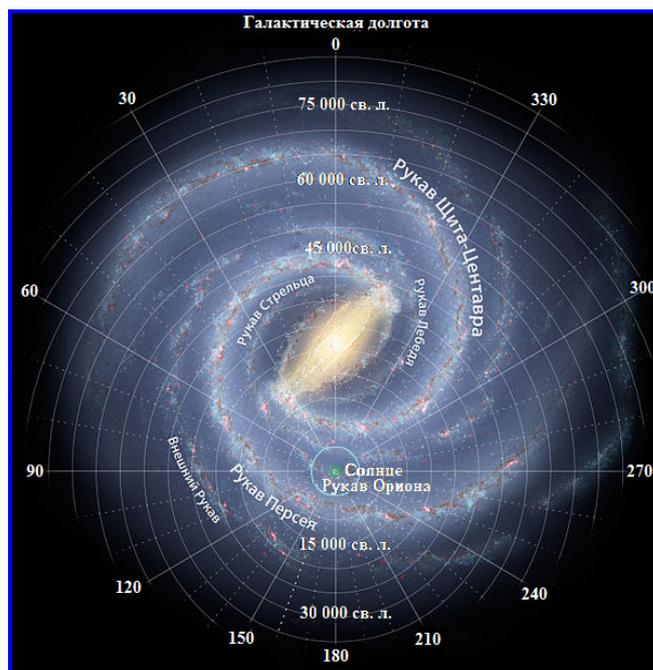


Рис. 3. Схематическое изображение карты нашей Галактики. В центре карты Солнце в рукаве Ориона

Нейтроны, образованные в результате взаимодействия протонов ($E > 4 \cdot 10^{10}$ ГэВ) с реликтовым электромагнитным излучением:

$$\begin{aligned} - E &= 4,0 \cdot 10^9 \text{ ГэВ}, S \approx 119\,000 \text{ св. л.}; \\ - E &= 2,5 \cdot 10^{10} \text{ ГэВ}, S \approx 742\,000 \text{ св. л.}; \\ - E &= 1,0 \cdot 10^{11} \text{ ГэВ}, S \approx 3\,000\,000 \text{ св. л.}, \end{aligned}$$

где E – кинетическая энергия нейтрона; S – пройденный нейтроном путь до распада.

Обратим внимание на то, что изучая энергетические спектры нейтронов от остатков сверхновых, можно проверить достоверность физических теорий, претендующих на объяснение природы частиц галактических космических лучей.

Литература

1. Измерение потоков электронов и позитронов первичных космических лучей в эксперименте «ПАМЕЛА» / В. В. Михайлов, О. Адриани, Г. А. Базилевская, [и др.]. // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 2011. – Т. 75. – № 3. – С. 345 – 347.
2. Генерация космических лучей ударными волнами / Е. Г. Бережко, В. К. Елшин, Г. Ф. Крымский [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1988. – 189 с. : ил.
4. Бисноватый-Коган Г. С. Релятивистская астрофизика и физическая космология / Г. С. Бисноватый-Коган. – М. : Красанд, 2011. – 376 с. : ил.
5. Лозинская Т. А. Остатки вспышек сверхновых: наблюдательные данные. Эволюция в межзвездной среде / Т. А. Лозинская // Итоги науки и техники. Серия

- астрономия.. – М. : ВИНТИ, 1983. – Т. 22. – С. 33 – 82.
6. Сверхновые звезды и остатки вспышек сверхновых / С. И. Блинные, Т. А. Лозинская, Н. Н. Чугай // Итоги науки и техники. Серия астрономия. М. : ВИНТИ, 1987. – Т.32. – С. 142 – 200.
7. Проблемы современной астрофизики / И. С. Шкловский. – М. : Наука, 1982. – 224 с. : ил.
8. Оценка верхней границы энергии частицы, ускоренной вблизи вращающейся нейтронной звезды / И. П. Безродных // Высокоэнергичные частицы в космосе. – Новосибирск : Наука, 1981. – С. 67 – 69.

Поступила в редакцию 01.11.2012

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук,
ст. научн. сотрудник, т. (495) 333-20-00.
Андрей Павлович Тютнев, д-р физ.-мат. наук, ведущий научн. сотрудник.
Владимир Тимофеевич Семёнов, начальник лаборатории.
Т. (495) 366-38-38.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.