

О ПРИЧИНЕ ИЗЛОМА В СПЕКТРАХ ЖЕСТКОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРОТОНОВ И ЯДЕР ГЕЛИЯ ОКОЛО 230 ГВ

В.М. Лозников В.М., Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова,
Л.А. Михайловская
E-mail: vloznikov@yandex.ru

Аннотация. Для описания особенностей спектра космических лучей протонов (p) и гелия (He) (в диапазоне $30 \div 2 \cdot 10^5$ ГВ) предлагается трехкомпонентная феноменологическая модель. Первая компонента соответствует постоянному фону, вторая – переменному “мягкому” (30-500 ГВ) гелиосферному источнику, третья – переменному “жесткому” (0.5-200 ТВ) галактическому источнику внутри местного пузыря (LB). За существование и переменность обоих источников отвечают соответствующие “серфотронные ускорители”. Размеры каждого источника определяют величину максимальной энергии КЛ, до которой могут быть ускорены КЛ в этих источниках. “Мягкий” источник, размером ~ 100 AU, находится на периферии гелиосферы за граничной ударной волной солнечного ветра (TS), а “жесткий” источник, размером > 0.1 пс, находится вблизи границы местного межзвездного облака (ММО) на расстоянии от Солнца ~ 0.01 пс. Наличие излома в спектрах жесткости p и He около ~ 230 ГВ – явление эпизодическое, связанное с переменностью физических условий в двух областях ускорения.

1. Введение

Спектрометр заряженных частиц PAMELA [1], установленный на спутнике Ресурс-ДК1, и работающий в широком диапазоне энергий $\sim 1 \div 1000$ ГэВ, обнаружил особенность (резкий V-образный излом) в спектрах КЛ p и He (измеренных в течение 2006 – 2008 гг.) в области около ~ 230 ГВ (рис.1).

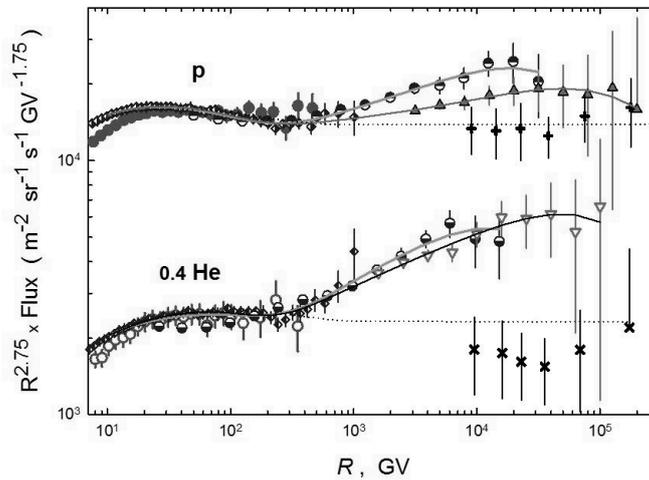


Рис. 1.

На этом графике приведены спектры p и He (и наши аппроксимации) для 5-и экспериментов: PAMELA (полузаполненные ромбики) и BESS-TeV (кружочки) в диапазоне < 1 ТВ, а также ATIC-2 (полузаполненные кружки), CREAM (треугольники) и RUNJOB (крестики) в диапазоне > 1 ТэВ. По оси абсцисс – жёсткость R , по оси ординат – поток умноженный на жёсткость в степени 2.75 ($\text{Flux} * R^{2.75}$).

В баллонном эксперименте ATIC-2 [2], 3.5 года ранее (в период 12.2002 – 01.2003 гг.) в диапазоне энергий 50 ГэВ ÷ 30 ТэВ был измерен спектр p и He. В спектре протонов, который частично перекрывается со спектром PAMELA, также хорошо видна эта особенность. Спектр ATIC-2 согласуется и со спектром баллонного эксперимента BESS-TeV [3], проведенного 08.2002 г. Однако в спектре ATIC-2 ядер гелия эта особенность не видна, спектры ATIC-2 и PAMELA совпадают лишь в области > 300 ГэВ, а наклон спектра ATIC-2 увеличивается плавно (без излома) в области > 200 ГэВ (рис.1).

Энергетические спектры p и He, измеренные (в диапазоне 2.5 ÷ 250 ТэВ) в баллонном эксперименте CREAM [4, 5] в течение месяца (в период 12.2004 – 01.2005 гг., на 1.5 года раньше эксперимента PAMELA), к сожалению, не перекрываются со спектрами PAMELA, но хорошо ложатся на продолжение спектров PAMELA и BESS-TeV.

Для иллюстрации существования переменности в энергетическом диапазоне > 1 ТэВ и указания на возможность значения степенного индекса фона ~ 2.75 на рис.1 приведены также (в шкале $\text{Flux} \cdot R^{2.75}$) данные баллонного эксперимента RUNJOB [6, 5] измеренные (в диапазоне $10 \div 1000$ ТэВ) в течение 10 полетов в период 1995 – 1999 гг.

Проблема несовпадения спектров потоков КЛ в диапазоне $\sim 10 \div 10^6$ ГэВ, измеренных различными (или даже одинаковыми) инструментами в разные годы, существует давно.

Напомним здесь только о некоторых недавних попытках объяснения особенностей в спектрах и различия индексов наклона в спектрах p и He .

Авторы [7] модифицируют традиционный механизм ускорения Ферми первого рода и предлагают объяснить излом в спектре и относительно более жесткие спектры He , чем p , дополнительной инжекцией тепловых p и He из области перед фронтом ударной волны.

Трехкомпонентной модель [8], предполагает, что галактические КЛ (с энергиями в диапазоне $10 \div 10^8$ ГэВ) являются смесью потоков КЛ, ускоряемых ударными волнами трех классов источников. К первому классу они относят одиночные СН в межзвездной среде, ко второму классу – СН в суперпузыре, и к третьему классу – новые звезды. Предполагается, что самые жесткие спектры генерируются во втором классе источников, а самые мягкие – в третьем классе источников. Более плоские спектры He относительно спектров p они объясняют тем, что источники разных типов имеют разные спектральные индексы и разный элементный состав.

В нашей статье предлагается гипотеза, объясняющая переменность спектров КЛ в диапазоне энергий $\sim 30 \div 2 \cdot 10^5$ ГВ и излом в окрестности ~ 230 ГВ как следствие переменности двух разных источников (в дополнение к постоянному галактическому фону), локализованных в различных, но относительно близких к Солнцу областях.

Для объяснения переменности КЛ (электронов, позитронов и протонов) в “мягком” диапазоне $\sim (10 \div 1000)$ ГэВ мы уже предлагали гипотезу о существовании серфотронного ускорителя (СУ) на периферии гелиосферы [9], в области между ударной

волной солнечного ветра (*TS*) и гелиопаузой (*HP*) (на расстоянии ~ 100 AU от Солнца).

Здесь мы продолжаем использовать идею о серфотронном ускорении для объяснения переменности спектров КЛ при энергиях > 1 ТэВ и V-образного излома в спектре КЛ р и He в области около ~ 230 ГВ. И предлагаем в качестве кандидата для второго (жесткого) переменного источника СУ в области вблизи границы местного межзвездного облака (ММО).

Для подтверждения нашей гипотезы нужны прямые и/или косвенные свидетельства наличия протяженного упорядоченного магнитного поля и существования плазменных волн в области ускорения.

Независимо от механизма ускорения величина крупномасштабного магнитного поля в области ускорения должна быть такой, чтобы магнитное поле могло бы удерживать ускоряемые частицы (см. ссылки в [9]), т.е. чтобы циклотронный радиус заряженной частицы не превышал размеров самой области $L_c = R/V_m$. В этой формуле, по определению, жесткость $R \equiv p \cdot c / Ze = (T_{kin} / Z) \cdot (1 + 2 \cdot Mc^2 / T_{kin})^{1/2}$, где p – импульс, c – скорость света, Z – зарядовое число, e – заряд протона, T_{kin} – кинетическая энергия, M – масса, V_m – величина магнитного поля. В более удобной для оценок форме размер области в астрономических единицах $L_c(\text{AU}) \approx 0.22 \cdot [E(\text{ТэВ}) / Z] / V_m(\mu\text{G})$, где E – энергия частицы.

Из этой простой формулы следует, чтобы удерживать заряженные частицы (ЗЧ) с энергией < 1 ТэВ необходимо упорядоченное магнитное поле ($V_m \approx 1 \mu\text{G}$) с характерным размером ~ 100 AU, а для ЗЧ с энергией < 200 ТэВ характерный размер должен быть ~ 20000 AU (или ~ 0.1 пс).

В окрестности солнечной системы существует подходящая по размерам структура – это ММО, протяженность которого не менее 3 пс. Причем, Солнце находится на расстоянии < 2000 AU (или < 0.01 пс) от границы ММО. Следовательно, близость предполагаемой области ускорения может обеспечить наблюдаемую переменность.

Есть ли свидетельства существования упорядоченного магнитного поля в ММО? Прямым доказательством существования плазменных волн (необходимых для работы СУ) может служить радиоизлучение, зарегистрированное

инструментом PWS на борту Voyager 1 после пересечения гелиопаузы (HP), на плазменной частоте ~ 2.6 кГц [10].

2. Модель Спектра

Для описания наблюдаемых спектров КЛ p и He предлагается трехкомпонентная феноменологическая модель, в соответствии с которой поток КЛ для компоненты ($j = p, He$) равен $F_{(j)} = F_{B(j)} + F_{SH(j)} + F_{SG(j)}$. Первая компонента $F_{B(j)}$ соответствует постоянному степенному фону $F_{B(j)} = V_{(j)} \cdot E^{-\beta_{(j)}}$ с величиной спектрального индекса $\beta_{(j)}$. Вторая компонента соответствует “мягкому” степенному источнику $F_{SH(j)}$ на периферии гелиосферы $F_{SH(j)} = S_{H(j)} \cdot E^{-\alpha_{H(j)}} \cdot \exp(-E / E_{CH(j)})$ со степенным индексом наклона $\alpha_{H(j)}$ и обрезанием на энергии $E_{CH(j)} < 1$ ТэВ. Третья компонента соответствует “жесткому” близкому галактическому источнику $F_{SG(j)} = S_{G(j)} \cdot E^{-\alpha_{G(j)}} \cdot \exp(-E / E_{CG(j)})$ со степенным индексом наклона $\alpha_{G(j)}$ и обрезанием на энергии $E_{CG(j)} \sim 100$ ТэВ (находящемуся вблизи границы ММО).

Здесь и далее под символом “E” подразумевается жесткость R , которая для энергий > 100 ГэВ практически совпадает с кинетической энергией деленной на зарядовое число.

При аппроксимации совокупности данных PAMELA и ATIC-2 получены следующие величины индексов наклона $\alpha_{H(p)} \approx 2.5$, $\alpha_{H(He)} \approx 2.4$, $\alpha_{G(p)} \approx 2.2$, $\alpha_{G(He)} \approx 2.1$.

Подбирая параметры обрезаниями ($E_{CH(j)}$ и $E_{CG(j)}$), индексы наклона ($\alpha_{H(j)}$ и $\alpha_{G(j)}$) и амплитуды ($S_{H(j)}$ и $S_{G(j)}$), соответственно, для каждой компоненты ($j = p, He$) КЛ, можно описать и объяснить как возможность появления резкого излома в спектрах (p и He), так и возможность появления плавного перегиба или отсутствия особенности вообще.

3. Выводы

Объяснить переменность спектров КЛ на временной шкале порядка нескольких месяцев или лет не может никакой из статистических механизмов. Ясно, что источники, отвечающие за характерные переменности (“мягкого” источника порядка нескольких месяцев, и “жесткого” источника – порядка нескольких лет) должны находиться близко к Земле и должны обеспечивать быструю генерацию КЛ.

Вблизи границы ММО имеется подходящая структура магнитного поля для удержания ЗЧ. Можно предположить, что самым мощным источником плазменных волн являются ударные

волны [11], возникающие при столкновении двух облаков: ММО и G-облака.

Существование излома при одинаковой жесткости для p и He свидетельствует об ускорении всех заряженных частиц в магнитном поле, что и требуется для реализации работы СУ.

Наличие излома в спектрах жесткости p и He (в области около ~ 230 ГВ) – явление эпизодическое, связанное с переменностью физических условий в области ускорения, и зависит от соотношения между амплитудами и степенными индексами фона, “мягкого” гелиосферного источника и “жесткого” близкого Галактического источника.

Наша гипотеза о серфотронной природе переменных источников подтверждается и результатами работы [12], в которой показано, что с точностью до ошибок величина жесткости V-образного излома (“kink”) в спектрах КЛ нескольких ядер элементов (H, He, C, O, Ne, Mg, Si, Fe) одинакова !

Существование переменности подтверждается результатами недавно проведенного эксперимента AMS-02 [13], по данным которого (с 19 мая 2011 г. по 10 декабря 2012 г.) уже не наблюдается значимой особенности в окрестности 230 ГВ. Следовательно, через ~ 3 года после измерений PAMELA [1] (в 2006 – 2008 гг.) спектр p и He существенно изменился.

Литература

- [1]. O.Adriani et al. Science. 2011, v.332, № 6025, p.69.
- [2]. A.D.Panov et al. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009, v.73, p.564.
- [3]. S.Haino et al. Physics Letters B. 2004, v.594, issue.1-2, p.35.
- [4] H.S.Ahn et al. Astrophys. Journal Letters. 2010, v.714, p.89.
- [5] Y.S.Yoon et al. Astrophys. Journal. 2011, v.728, p.122.
- [6] V.A.Derbina et al. Astrophys. Journal Letters 2005, v.628, p.41.
- [7] M.A.Malkov et al. Phys. Rev. Letters. 2012, v.108, p.081104.
- [8] V.I.Zatsepin, N.V.Sokolskaya. A&A. 2006, v.458, p.1.
- [9] В.М.Лозников, Н.С.Ерохин, Л.А.Михайловская. Физика плазмы. 2013, т.39, №10, с.927.
- [10] D.A.Gurnett et al. Science. 2013, v.341, p.1489.
- [11] S.A.Fuselier, I.H.Cairns. Astrophysical Journal. 2013, v.771, p.83.
- [12] A.D.Erlykin, A.W.Wolfendale. Astropart. Phys. 2012, v.35, p.449.
- [13] P.Mertsch, S.Sarkar. 2014, arXiv: 1402.0855 [astro-ph.HE]