

ПЕРЕМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ИЗБЫТКА КОСМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕЛИОСФЕРЕ

В.М. Лозников, Н.С. Ерохин

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: nerokhin@iki.rssi.ru

Показано, что серфатронный механизм ускорения космических лучей (КЛ), работающий в гелиосфере, может создавать избыток электронов космических лучей в диапазоне энергий 300...800 ГэВ, наблюдавшийся в недавних экспериментах ATIC, PPV-BETS и Fermi LAT. Очевидно, что этот дополнительный, ближайший к Земле источник электронов высоких энергий (вследствие его гелиосферного происхождения) должен быть переменным. Его переменность позволяет объяснить большинство из всех противоречиво интерпретируемых экспериментов по регистрации КЛ, выполненных в другие эпохи, например, баллонный эксперимент Чикагского университета (ЧУ) 1980 г.

1. ВВЕДЕНИЕ

Избыток электронов и позитронов высоких энергий (от нескольких сотен до ~ 800 ГэВ) над ожидаемым фоном был зарегистрирован в трех недавних баллонных экспериментах ATIC-1 и ATIC-2 [1], PPV-BETS [2] и в одном космическом эксперименте Fermi LAT [3]. При анализе измерений в [1] использовались данные обоих полетов ATIC-1 и ATIC-2. Отметим, что данные PPV-BETS [2] находятся в качественном согласии с данными ATIC. Данные Fermi LAT также визуально указывают на явное отклонение от стандартного степенного спектра КЛ и, в отличие от других экспериментов, могут быть описаны достаточно гладкой кривой. Не противоречат этим результатам данные наземного черенковского телескопа HESS [4] (с энергией ускоренных электронов выше 800 ГэВ). Экспериментальные данные спутника PAMELA [5] (пока только до энергий 100 ГэВ) и некоторых предыдущих экспериментов также согласуются со спектрами ATIC [7] и Fermi LAT [8].

Поскольку электроны (и позитроны) достаточно быстро теряют свою энергию в процессе распространения (вследствие синхротронных потерь в магнитном поле и в процессе обратного комптоновского рассеяния на микроволновом излучении), то общепринято, что избыточный источник космических лучей должен быть не далее нескольких килопарсек от Солнца. В указанной связи в литературе прошли дискуссии о возможном близком источнике этой особенности в спектре электронов высоких энергий (см., например, [6,7] и указанные там ссылки). В них для объяснения широкого пика высокоэнергичных электронов предлагалось два типа источников: ближайшие пульсары и распады частиц темной материи. Так в качестве добавочного источника к степенному спектру фона в работах [1,6] рассматривались распаднющие электроны и позитроны от частиц темной материи, которые могут приводить к широкому асимметричному пику. В [7] предлагался степенный спектр ($F_S \sim 1/E^\alpha$ с индексом $\alpha = 2.2$) для дополнительного пульсарного источника электронов и позитронов (с обрезанием на энергиях ~ 700 ГэВ) и принимался степенный спектр галактического фона вида $F_B \sim 1/E^\beta$ с индексом $\beta = 3.2$.

Давно известно, что источником космических лучей могут быть не только сверхновые, но и обычные звезды, например, Солнце [9], хотя величина их вклада в полный спектр космических лучей пока неизвестна. Так в работе [11] было предложено, что серфатронный механизм [10] может ускорять заряженные частицы в Галактике в две стадии: на первой стадии частицы ускоряются электромагнитными волнами до энергии порядка 10^{13} эВ/нукл. в магнитосферах обычных звезд, а в Галактическом диске - до энергии 10^{15} эВ/нукл. В случае серфинга на нелинейных плазменных волнах предельная энергия частиц выше и определяется размерами области распространения волн, а также величиной магнитного поля [12].

Вплоть до начала 70-х годов общепринятой величиной для спектрального индекса потока галактических электронов вблизи Земли было значение $\alpha \approx 2.7$. Однако в последующих измерениях установлено, что спектр электронов имеет переменный показатель степени от 2.9 до 3.4 [7]. Возможно, что это не ошибки предыдущих измерений, а реальные величины. Общепринято, что частицы космических лучей могут ускоряться и ударными волнами. Поскольку магнитозвуковая ударная волна (МЗУВ) характеризуется положительным скачком потенциала, только ионы могут ускоряться в МЗУВ. Поэтому среди различных механизмов ускорения ниже рассматривается серфатронная модель [10-12], в которой как положительные, так и отрицательные частицы ускоряются одинаковым образом.

Предположим следующее: полный спектр КЛ, измеренный около Земли, состоит из двух компонент. Первой является постоянная компонента электронов космических лучей (со степенным индексом $\beta=3.2$), имеющая галактическое происхождение, а вторая обусловлена переменным источником (с $2.0 \leq \alpha \leq 2.7$) гелиосферного происхождения. Величина индекса $\alpha = 2.0$ предлагалась в [10], а значение $\alpha=2.7$ соответствует общепринятому индексу потока протонов космических лучей (которые не меняют свой спектр вследствие синхротронных потерь). Для оценки максимальной энергии ускоренных в гелиосфере электронов высокой энергии используем формулу [11], совпадающую с выражением для ги-

порядка $R_g = E_c / (qV_m) = 2.333 \cdot 10^9 \cdot E_{700} / V_m$, где E_c – максимальная энергия ускоренного электрона (E_{700} – энергия, нормированная на 700 ГэВ); V_m – величина магнитного поля в гауссах. В гелиосфере есть несколько источников крупномасштабных ударных волн, главные из которых приведены в Табл.1.

Таблица 1

Объект	R_m /AU	V_m /Гс	R_g /AU	R_m/R_g
Земля	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	~ 0.08	$6.6 \cdot 10^{-3}$
Юпитер	$5.3 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-5}$	~ 2.3	$2.3 \cdot 10^{-2}$
Солнце	100...230	10^{-6}	~ 155.3	1.4...2.9
ISM	> 230	$3 \cdot 10^{-6}$	~ 51.9	~ 4.4

Для каждого из объектов приведены: R_m – радиус магнитосферы в астрономических единицах AU; V_m – величина магнитного поля в гауссах; R_g и ω_c – соответственно гирорадиус электронов и их циклотронная частота для энергии $E_c = 0.7$ ТэВ; R_m/R_g – отношение радиуса магнитосферы к гирорадиусу электронов.

Как следует из Табл.1 хорошим кандидатом на роль ускорителя электронов высоких энергий является область (> 100 AU) между граничной ударной волной солнечного ветра (ГУВСВ) и головной ударной волной гелиосферы (ГУВГ).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравним аппроксимации спектров электронов высокой энергии (в диапазоне от 7 до 2000 ГэВ) для нескольких недавних экспериментов: эксперимент АТИС, по совместным данным баллонных экспериментов АТИС-1 и АТИС-2 [1], каждый продолжительностью около 2 недель; баллонный эксперимент РРВ-BETS [2] длительностью около 2 недель; космический эксперимент Fermi LAT [3] длительностью около 6 месяцев, а также эксперимент ЧУ, выполненный в 1980 г. (баллонный эксперимент Чикагского Университета [13] длительностью около 20 часов). На рисунках ниже для наглядности спектры умножаются на E^3 .

2.1. ЭКСПЕРИМЕНТ FERMI LAT И ЭКСПЕРИМЕНТ ЧУ

На Рис.1 приведены данные двух экспериментов: спутникового эксперимента Fermi LAT [3], проведенного в период с 04.08.2008 по 31.01.2009, и баллонного эксперимента Чикагского Университета [13] (данные этого эксперимента были получены в течение 20 часов баллонного полета в Палестине, Техас, в 1980 г.).

Правый пик на Рис.1 аппроксимирует данные Fermi LAT. Пустые маленькие кружки с 1- σ ошибками представляют данные эксперимента Fermi LAT (см. Рис.3 статьи [3]). Данные Fermi LAT аппроксимировались простой моделью (сплошная кривая линия), которая является суммой двух кривых: $F = F_B + F_S$, где F_B – галактический фон электронов космических лучей (сплошная прямая линия), а F_S – дополнительный (гелиосферный) источник. Галактический фон имеет степенную форму $F_B = V / E^\beta$ с фиксированным индексом $\beta = 3.2$ и свободным параметром V . Дополнительный источник имеет степенную форму с экспоненциальным обрезанием $F_S = (S / E^\alpha) \cdot \exp(-E/E_0)$, причем $E_0 < 700$ ГэВ, индекс $\alpha < \beta$ ($2.0 \leq \alpha \leq 2.7$) и S – свободные параметры. Результаты аппроксимации

представлены в Табл.2. При использовании величин стандартных отклонений из таблицы в статье [3] величина приведенного $\chi^2 \approx 0.07$ становится очень малой для этой аппроксимации.

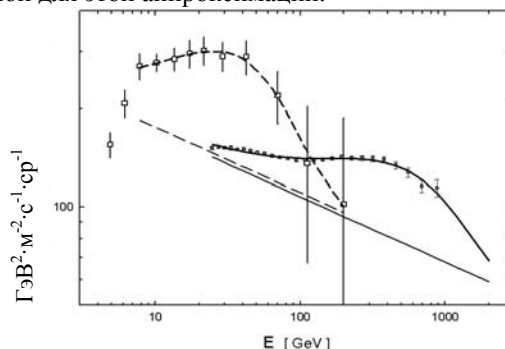


Рис.1. Данные Fermi LAT представлены маленькими пустыми кружками с 1- σ ошибками, а их аппроксимация (и соответствующий фон) – сплошными кривыми линиями. Данные эксперимента ЧУ представлены пустыми квадратиками с 1- σ ошибками, а их аппроксимация (и соответствующий фон) – пунктирными кривыми линиями

Левый пик на Рис.1 аппроксимирует данные эксперимента ЧУ. Пустые квадратики представляют данные эксперимента ЧУ (см. Рис.8 статьи [13]). Данные эксперимента ЧУ аппроксимировались такой же моделью (пунктирная кривая), как и данные Fermi LAT. Пунктирная прямая представляет модельный фон. При аппроксимации первые 2 точки (из 12 точек) отбрасывались. Таким образом, имеется всего 5 степеней свободы для 10 точек данных. Результаты аппроксимации представлены в Табл. 2. Следует отметить, что по результатам аппроксимации двух разных экспериментов, проведенных в разные эпохи, получены одинаковые (с точностью до ошибок) значения V . Однако нельзя отвергнуть возможность того, что в других экспериментах фон может изменяться вследствие модуляции солнечным ветром.

2.2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ АТИС И РРВ-BETS

На Рис.2 приведены данные двух баллонных экспериментов проведенных в Антарктиде:

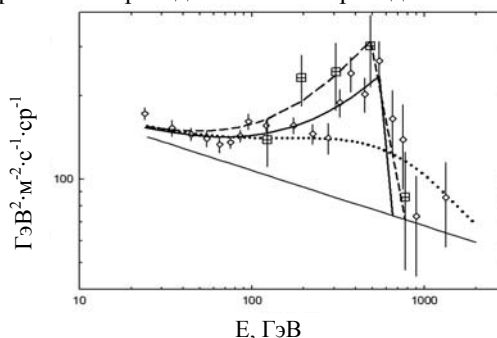


Рис.2. Данные экспериментов АТИС [1] представлены пустыми ромбиками с 1- σ ошибками, а их аппроксимация (и соответствующий фон) – сплошными кривыми линиями. Данные эксперимента РРВ-BETS представлены пустыми перекрещенными квадратиками с 1- σ ошибками, а их аппроксимация (и соответствующий фон) – пунктирными кривыми линиями. Для сравнения на этом рисунке представлена также модельная кривая эксперимента Fermi LAT объединенные данные экспериментов АТИС-1 и АТИС-2 (выполненных в течение ~2 недель в период

2000-2001 гг. и в течение ~2 недель в период 2002-2003 гг.) и данные эксперимента РРВ-BETS (выполненного в период с 04.01.2004 по 17.01.2004). Пустые ромбики с ошибками представляют объединенные данные эксперимента АТИС (взятые из Рис.4 статьи [1]). Данные АТИС аппроксимировались простой моделью (сплошная кривая линия), которая является суммой двух кривых $F = F_B + F_S$, где F_B – галактический фон электронов космических лучей (сплошная прямая линия), а F_S – дополнительный (гелиосферный) источник. Для галактического фона (имеющего простую степенную форму $F_B = V/E^\beta$) использовались значения параметров, найденные для эксперимента Fermi LAT (индекс $\beta = 3.2$ и величина $V=270$). Дополнительный источник имеет степенную форму $F_S = S / E^\alpha$ с резким обрывом, причем

индекс $2.0 \leq \alpha \leq 2.7$, где $E_0 < 700$ ГэВ и S – свободные параметры.

На Рис.2 пустые перекрещенные квадратики с ошибками представляют данные эксперимента РРВ-BETS (взятые из Рис.3 статьи [13]). Данные эксперимента РРВ-BETS аппроксимировались такой же моделью (пунктирная кривая), как и данные АТИС. Результаты аппроксимации представлены в Табл.2.

Для сравнения приведена также модельная кривая эксперимента Fermi LAT.

Как следует из Табл.2 интегральный поток от источника избыточных электронов изменяется от ~4% относительно фона для недавних экспериментов (с максимумом около 300...600 ГэВ) до ~60% для эксперимента ЧУ под руководством Танга в 1980 г. (с максимумом около 20...40 ГэВ).

Таблица 2

Данные	V	$F_B = V/E^{3.2}$ 1/м ² ·с·ср	S	α	E_0 (ГэВ)	F_S 1/м ² ·с·ср	F_S/F_B	χ^2
Fermi LAT	270.0 ± 6.9	0.169 20...1000 ГэВ 1.761 7...2000 ГэВ	1.22 ± 0.67	2.24 ± 0.11	533.0 ± 85.2	$2.14 \cdot 10^{-2}$ 20...1000 ГэВ $8.54 \cdot 10^{-2}$ 7...2000 ГэВ	0.127 0.0485	0.07
АТИС-1, АТИС-2	270	0.169 20...1000 ГэВ 1.761 7...2000 ГэВ	0.66 ± 0.45	2.13 ± 0.12	< 600	$1.94 \cdot 10^{-2}$ 20...600 ГэВ $6.44 \cdot 10^{-2}$ 7...600 ГэВ	0.115 0.0366	1.5
РРВ- BETS	270	0.169 20...1000 ГэВ 1.761 7...2000 ГэВ	0.57 ± 0.93	2.03 ± 0.28	< 600	$2.45 \cdot 10^{-2}$ 20...600 ГэВ $7.38 \cdot 10^{-2}$ 7...600 ГэВ	0.146 0.0419	1.8
Tang (ЧУ)	278.0 ± 37	1.754 20...1000 ГэВ 1.813 7...2000 ГэВ	13.29 ± 9.76	1.98 ± 0.25	30.0 ± 6.6	1.0707 20...1000 ГэВ 1.0827 7...2000 ГэВ	0.610 0.597	0.05

Для каждого из обсуждаемых экспериментов приведены значения параметров модели (см. в тексте).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Будем полагать, что небольшая доля надтепловой части функции распределения заряженных частиц плазмы захватывается нерелятивистскими плазменными волнами и ускоряется посредством серфатронного механизма [10]. В серфатронном механизме все типы заряженных частиц ускоряются одинаковым образом. Темп ускорения частиц столь высок, что потери являются пренебрежимыми даже для такого эффективного механизма как синхротронный [11] на рассматриваемых масштабах. Заряженные частицы захватываются и ускоряются электрическим полем медленной плазменной волны, имеющей фазовую скорость $v_\phi < c$. В случае $v_\phi \ll c$ основное ускорение частиц идет вдоль волнового фронта. Предположим, что Солнце возбуждает плазменные волны в области от ГУВСВ (~100 AU) до ГУВГ (~200 AU). Угол между направлением плазменной волны, распространяющейся от Солнца, и направлением спирального магнитного поля (спирали Паркера) в окрестности орбиты Земли (~1 а.е.) равен приблизительно 45°. В области (порядка 100...200 AU) от ГУВСВ до ГУВГ эти направления становятся почти ортогональными [14] и создаются условия для эффективной работы серфатронного механизма. Для оценки

максимальной энергии ускоренных электронов высокой энергии используем формулу [12], которая совпадает с формулой для гирорадиуса $R_g = E_c / (qB_m)$, где E_c – максимальная энергия ускоряющегося электрона, B_m – величина магнитного поля в гауссах.

Вояджер-1 [14] пересек ГУВСВ 16.12.2004 на расстоянии 94 AU. Фактически Вояджер-1 зарегистрировал быстрые флуктуации направления и величины магнитного поля до пересечения ГУВСВ, а также значительное увеличение величины магнитного поля постоянного направления в течение долгого времени после пересечения ГУВСВ [14]. Именно вследствие того, что магнитное поле долгое время не изменяет своего направления после пересечения ГУВСВ, создаются условия для длительного ускорения электронов.

Были проведены модельные численные расчеты захвата и последующего релятивистского ускорения заряженных частиц волновым пакетом большой, но конечной толщины с амплитудой выше порогового для реализации серфинга значения. Расчеты показали (см., например, [16]), что в диапазоне благоприятных фаз волны на траектории частицы, имеют место захват зарядов и их последующее сильное ускорение. После пересечения волнового пакета

частицы вылетают из эффективной потенциальной ямы и происходит ларморовское вращение. В случае фазовых скоростей волны, существенно меньших скорости света, частица, совершая гирооборот в магнитном поле, возвращается в центральную часть волнового пакета. При благоприятной фазе волны на ее траектории и реализации черенковского резонанса возможен повторный захват заряда и его дополнительное ускорение. Для неблагоприятной (в начальный момент времени) фазы волны на траектории частицы заряд может совершить ряд гирооборотов и только затем захватиться волной с последующим релятивистским ускорением.

После пересечения ГУВСВ Вояджер-1 наблюдал систематическое увеличение интенсивности потока электронов [15] от ~ 4 до $\sim 8/\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$ в диапазоне 6...14 МэВ для расстояний от ~ 94 до ~ 95.7 AU соответственно. Величина магнитного поля [14] увеличилась от значения $\leq 10^{-6}$ Гс до $\sim 1.5 \cdot 10^{-6}$ Гс. Направление магнитного поля [14] стало более стабильным с почти постоянной величиной азимутального угла $\lambda \sim 270^\circ$. На расстояниях ближе ГУВСВ распределение величины магнитного поля ($\sim 0.4 \pm 0.12$ Гс) было логнормальным, а дальше ГУВСВ стало гауссовым ($\sim 1.4 \pm 0.4$ Гс) [14]. В связи с этим создались подходящие условия для работы серфатронного механизма. Если порядка 10% от количества этих электронов ускоряются до энергий порядка нескольких гигаэлектронвольт, то интенсивность этого источника вполне может объяснить избыточный источник электронов высокой энергии, наблюдаемый в окрестности Земли. Реальная величина максимума пика, его форма и положение в спектре избыточного источника зависят от "гелиосферной погоды", т.е. от таких параметров как амплитуда плазменной волны, ее частота, величина магнитного поля, длительность ускорения. Детальные теоретические оценки будут даны в последующей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Chang, et al. // *Nature*. 2008, v.456, p.362.
2. S. Torii, et al. // *Adv. Polar Upper Atmos. Res.* 2006, v.20, p.52. S. Torii, et al. // arXiv: 0809.0760 [astro-ph]. 2008.
3. A.A. Abdo, et al. // arXiv: 0905.0025 [astro-ph]. 2009.
4. F. Aharonian, et al. // arXiv: 0811.3894 [astro-ph]. 2008.
5. O. Adriani, et al. // arXiv: 0810.4995 [astro-ph]. 2008.
6. J. Hall and D. Hooper // arXiv: 0811.3362 [astro-ph]. 2008.
7. D. Malyshev, I. Cholis, J. Gelfand // arXiv: 0903.1310 [astro-ph]. 2009.
8. D. Malyshev // arXiv: 0905.2611 [astro-ph]. 2009.
9. В.С. Березинский, С.В. Буланов, В.Л. Гинзбург и др. *Астрофизика космических лучей* / Под ред. В.Л. Гинзбурга. 1990, М.: «Наука».
10. Н.С. Ерохин, С.С. Моисеев, Р.З. Сагдеев // *Письма в Астрон. журнал*. 1989, т.15, №5, с.3.
11. Г.Н. Кичигин // *Письма в ЖЭТФ*. 2008, т.87, с.403. G.N. Kichigin // *JETP Letters*. 2008, v.87, p.343.
12. Г.Н. Кичигин // *ДАН*. 2003, т.392, с.470. G.N. Kichigin // *Doklady Physics*. 2003, v.48, p.565.
13. К.К. Tang // *Astroph. Journal*. 1984, v.278, p.881.
14. L.F. Burlaga, et al. // *Science*. 2005, v.309, p.2027.
15. E.C. Stone, et al. // *Science*. 2005, v.309, p.2017.
16. Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, Е.А. Кузнецов, Л.А. Михайловская. Серфинг релятивистских зарядов на электромагнитной волне с плавной огибающей амплитуды // *Сб. трудов Международной конференции МСС-09 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность»*. М.: «URSS», 2009, с.92-99.

Статья поступила в редакцию 25.05.2010 г.

EXCESSES OF VARIABLE SOURCES OF COSMIC ELECTRONS IN THE HELIOSPHERE

V.M. Loznikov, N.S. Erokhin

It is shown that surfatronmechanism of acceleration of cosmic rays (CR), working in the heliosphere, may cause an excess of electrons in the cosmic ray energy range 300...800 GeV, observed in recent experiments ATIC, PPV-BETS and Fermi LAT. It is obvious that this additional, closest to the Earth, the source of high-energy electrons (due to its heliospheric origin) should be variable. Its variability can explain most of all the contradictory interpretable experiments on registration of the TC made in other periods, such as balloon experiment, University of Chicago in 1980.

ЗМІННЕ ДЖЕРЕЛО НАДЛИШКУ КОСМІЧНИХ ЕЛЕКТРОНІВ У ГЕЛІОСФЕРІ

V.M. Loznikov, M.S. Erokhin

Показано, що серфатронний механізм прискорення космічних променів (КП), який працює у геліосфері, може створювати надлишок електронів космічних променів у діапазоні енергій 300...800 ГеВ, що спостерігалось у недавніх експериментах ATIC, PPV-BETS і Fermi LAT. Очевидно, що це додаткове, найближче до Землі джерело електронів високих енергій (внаслідок його геліосферного походження), повинно бути змінним. Його змінність дозволяє пояснити більшість з усіх суперечливо інтерпретованих експериментів з реєстрації КП, що виконані в інші епохи, наприклад, балонний експеримент Чикагського університету (ЧУ)1980 р.