

Invited paper

ПЕРЕМЕННОСТЬ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Николай Ерохин¹, Румен Шкевов², Владимир Лозников¹, Надежда Зольникова¹,
Людмила Михайловская¹

¹Институт космических исследований, Российская академия наук, Москва, Россия

²Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките, София, България
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru, shkevov@space.bas.

Ключевые слова: Серфотронный механизм ускорения, плазменные волны, космические лучи, гелиосфера, локальная межзвездная среда.

Аннотация: На основе численных расчетов и анализа данных спутниковых экспериментов Fermi-LAT, AMS-02, DAMPE исследована переменность суммарного потока электронов и позитронов ($e^+ + e^-$) в космических лучах (КЛ) с учетом моделей серфотронного ускорения заряженных частиц электромагнитными волнами в космической плазме. Показано, что переменность спектра КЛ для ($e^+ + e^-$) в энергетическом диапазоне ГэВ-ТэВ достоверна. Наблюдается корреляция между достоверностью переменности для спектров ($e^+ + e^-$) и величиной разности, усредненных за интервал наблюдения, среднемесячных чисел солнечной активности. При повышении солнечной активности низкоэнергетическая часть спектра КЛ возрастает существенно. Таким образом модель серфотронного ускорения космических лучей в ближайшей окрестности солнечной системы (на периферии гелиосферы и в ближайших межзвездных облаках) вполне может объяснить существование наблюдаемой переменной компоненты потока ($e^+ + e^-$) в КЛ на временной шкале от ~ 1 месяца до ~ 1 года.

ELECTRON AND POSITRON FLUX VARIABILITY IN COSMIC RAYS

Nikolay Erokhin¹, Rumen Shkevov², Vladimir Loznikov¹, Nadezhda Zolnikova¹,
Ludmila Mikhailovskaya¹

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Space and Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru, shkevov@space.bas.bg

Key words: Surfatron acceleration mechanism, electrons and positrons, plasma waves, cosmic rays, heliosphere, local interstellar medium, flux variability of electrons and positrons.

Abstract: Based on numerical calculations and data analysis of satellite experiments Fermi-LAT, AMS-02, DAMPE, the total flux variability of electrons and positrons ($e^+ + e^-$) in cosmic rays (CR) was studied taking into account the models of surfatron acceleration of charged particles by electromagnetic waves in space plasma. It was shown that variability of the CR spectrum for ($e^+ + e^-$) in the energy range GeV-TeV is veracious. A correlation is observed between the veracity of the variability, for a pair of spectra ($e^+ + e^-$) and the magnitude of the difference, averaged over the observation interval of the average monthly numbers of solar activity. With the increase of the solar activity, the low-energy part of the CR spectrum grows significantly. The model of cosmic ray surfatron acceleration, within the immediate vicinity of the solar system (on the periphery of the heliosphere and in the nearest interstellar clouds), can give plausible explanation for the existence of the observed variable flux component ($e^+ + e^-$) in CR on the time scale from ~ 1 month to ~ 1 year.

Введение

Последнее поколение детекторов космических лучей (детекторы, запускаемые на аэростатах, спутниках, и большие наземные установки) значительно улучшило чувстви-

ность и энергетическое разрешение измерений, что позволило зарегистрировать переменные особенности в спектрах КЛ. Первое открытие широкого квази-пика в спектре ($e^+ + e^-$) КЛ в окрестности энергий ~ 700 ГэВ было сделано в баллонном эксперименте ATIC [1] и подтверждено в баллонном эксперименте PPB-BETS [2]. Затем, в спутниковых экспериментах PAMELA [3, 4, 5], Fermi-LAT [6, 7], AMS-02 [8, 9] были зарегистрированы значительные изменения в спектрах КЛ для электронов e^- и позитронов e^+ . В последние годы появились новые статьи с данными экспериментов Fermi-LAT [10], DAMPE [11], CALET [12] в диапазоне энергий до нескольких ТэВ. Полученные спектры потока ($e^+ + e^-$) подтверждают наличие широкого квази-пика в окрестности энергий ~ 1 ТэВ. Для больших энергий наблюдается резкое уменьшение потока, однако видна тенденция к продолжению спектра далее 10 ТэВ.

Обычно предполагается, что источники потока ($e^+ + e^-$) в КЛ (с энергией > 10 ГэВ) ассоциированы с остатками сверхновых и пульсарами. Экзотические модели на основе темной материи в данной работе не обсуждаются. Самый близкий пульсар Geminga находится на расстоянии ~ 250 пк (парсек). Отметим однако, что если источник ($e^+ + e^-$) для КЛ находится на расстоянии > 1000 пк, то e^+ и e^- при распространении к Земле теряют энергию в процессах синхротронного излучения в межзвездном магнитном поле и комптоновского рассеяния на микроволновом фоне.

К настоящему времени спектры потока ($e^+ + e^-$) в КЛ измерены до максимальной энергии порядка нескольких ТэВ. Для энергии электронов с энергией ~ 1 ТэВ циклотронный радиус ~ 100 а.е. (или $\sim 10^{-3}$ пк). Даже для энергии частиц порядка энергии “колена” ($\sim 10^6$ ГэВ) циклотронный радиус всего лишь ~ 1 пк. Следовательно, независимо от модели генерации потока ($e^+ + e^-$) КЛ в источниках на расстоянии > 100 пк, все особенности спектра должны сглаживаться при диффузионном распространении ($e^+ + e^-$) от источника до Земли и поэтому переменность спектра не должна наблюдаться для энергий e^+ , e^- более 20 ГэВ, поскольку влиянием солнечного ветра на распространение КЛ можно пренебречь.

В статье [13] дан анализ наблюдений наземной обсерваторией HAWC углового профиля γ -излучения в диапазоне (1–50) ТэВ от ближайших пульсаров Geminga и Monogem. В предположении, что это излучение является результатом обратного комптоновского рассеяния частиц e^+ , e^- на микроволновом фоне частиц определены диффузионные коэффициенты для распространения e^+ , e^- от пульсаров к солнечной системе. Полученные величины этих коэффициентов оказались на порядок меньше, обычно предполагаемых величин, которые находятся из наблюдений адронных КЛ. Показано, что для однородной и изотропной диффузии ближайшие пульсары Geminga, Monogem не могут обеспечить наблюдаемый на Земле поток ($e^+ + e^-$). Варианты иного объяснения результата [13] будут в разделе “Обсуждение”.

Ранее в теоретических работах по изучению резонансного ускорения заряженных частиц электромагнитными волнами в космической плазме [14, 15] была выдвинута гипотеза о том что серфотронное ускорение является одним из возможных механизмов генерации релятивистских и сверхрелятивистских частиц в естественных условиях космического пространства. Позже на основе численных расчетов, доказана высокая эффективность серфотронного ускорения электронов [16, 17] (прирост энергии частицы более чем на 4 порядка) пакетом электромагнитных волн.

В работах [18–22] появление переменных особенностей в энергетических спектрах (ЭС) электронов, позитронов и ядер КЛ обосновывается наличием серфотронного механизма ускорения в ближайшей окрестности солнечной системы (≤ 1 пк).

В настоящей работе рассмотрены ЭС потоков суммы электронов и позитронов КЛ по данным спутниковых экспериментов PAMELA [3–5], Fermi-LAT [7], AMS-02 [9], Fermi-LAT [10], DAMPE [11], CALET [12]. К сожалению, табличные данные PAMELA [4, 5] опубликованы отдельно для спектров e^- [4] и e^+ [5] с различными энергетическими каналами и на разных временных интервалах, но нет данных для потока ($e^+ + e^-$). Поэтому данные PAMELA [4, 5] не использовались для численных оценок переменности. Спектр ($e^+ + e^-$) для эксперимента CALET [12] опубликован только в виде графика (без табличных данных) и здесь он не использован для численных оценок переменности. Поэтому, численные оценки переменности были сделаны только для попарного сравнения спектров Fermi-LAT [7], AMS-02 [9], Fermi-LAT [10], DAMPE [11], измеренных в разное время.

Анализ экспериментальных данных

Поскольку в нашей модели серфотронное ускорение потока ($e^+ + e^-$) в КЛ до энергий ~ 1 ТэВ происходит на периферии гелиосферы в области однородного магнитного поля, а квазипродольные плазменные волны генерируются солнечными вспышками, то уместно привести график солнечной активности (Рис. 1, верхняя панель) [23] для времени проведения

анализируемых экспериментов. На нижней панели Рис.1 горизонтальными отрезками показаны временные интервалы исследованных экспериментальных данных с названиями экспериментов; числа над горизонтальными отрезками соответствуют усредненным за интервал времени наблюдения среднемесячным числам солнечных пятен (AMSN).

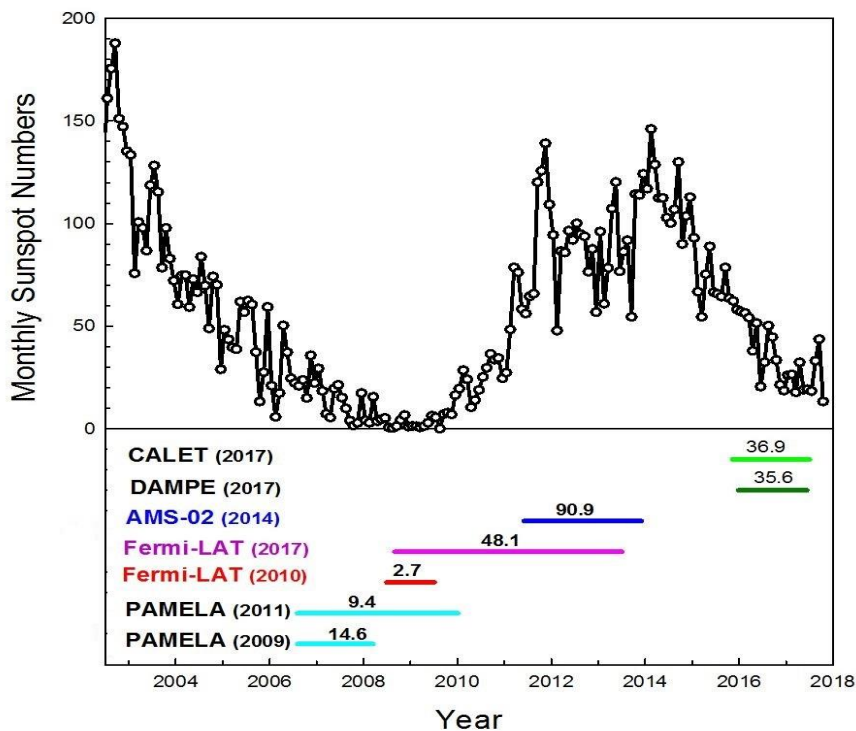


Рис.1. На верхней панели показана зависимость Солнечной активности от времени (среднемесячные данные) [19]. На нижней панели приведены названия инструментов (в скобках год публикации статьи); горизонтальными отрезками показаны временные интервалы экспериментальных данных, использованных для построения спектров; числа над горизонтальными отрезками соответствуют усредненным за интервал времени наблюдения среднемесячным числам солнечных пятен.

В 2010 г. опубликована статья, где представлен спектр потока ($e^+ + e^-$) в КЛ для диапазона 7 ГэВ – 1 ТэВ, полученный на космической обсерватории Fermi-LAT [7] за 12 месяцев начиная с июня 2008 г. В 2014 г. опубликованы статьи с результатами измерений спектров (e^+ и e^-) в КЛ (в диапазоне 0.5 ГэВ – 1 ТэВ), полученных на “Альфа Магнитном Спектрометре” (AMS-02) [9] за 30 месяцев с мая 2011 г. В 2017 г. появилась статья с новыми данными Fermi-LAT [10] по измерению спектров (e^+ и e^-) КЛ в диапазоне (7 ГэВ – 2 ТэВ) за период времени (август 2008 г. – июнь 2013 г.), который включает данные за 10 месяцев из 12 месяцев, представленных в [7]. В 2017 г. появилась статья с данными DAMPE [11] по измерению спектров e^+ , e^- в КЛ для энергий (24 ГэВ – 4.6 ТэВ) за период времени (27 декабря 2015 г. – 8 июня 2017 г.). Как видно на Рис. 2, спектры суммарного потока ($e^+ + e^-$) в КЛ в этих экспериментах значительно отличаются друг от друга. Однако, в [7–11] не упоминается о переменности потока ($e^+ + e^-$) в КЛ. Это можно объяснить тем, что, в рамках традиционного механизма генерации КЛ, нельзя объяснить особенности в спектрах КЛ и их наблюдаемую переменность.

Все аппроксимации спектров (на Рис. 2 сплошные линии) проводились на основе двухкомпонентной модели спектра $F = F_b + F_s$, где $F_b = V \cdot E^{-\beta}$ – поток “фона” с индексом β , $F_s = S \cdot E^{-\alpha} \exp(-E / E_{cut})$ – поток “источника” с индексом $\alpha < \beta$ и обрезанием на высокой энергии E_{cut} . Как видим, в течение времени повышенной солнечной активности (Рис.1), в интервалах времен наблюдений AMS-02 [9] и в правой части интервала Fermi-LAT (2017) [10], низкочастотная часть спектра значительно поднялась (Рис. 2) относительно спектра Fermi-LAT (2010) [7] измеренного для минимальной солнечной активности (Рис. 2). К сожалению, интервал времени для анализа данных в работе Fermi-LAT (2017) [10] почти полностью включает интервал времени для анализа данных в работе Fermi-LAT (2010) [7] поскольку более корректно сравнивать спектры, полученные в последовательные интервалы времени. Чтобы избавиться от субъективной, качественной оценки различия спектров, сделаем количественную оценку

переменности. Для численной оценки переменности спектров ($e^+ + e^-$) в КЛ используем только спектры, для которых имеются табличные данные, т.е. спектры Fermi-LAT [7], AMS-02 [9], Fermi-LAT [10] и DAMPE [11]. Чтобы корректно сравнивать спектры, необходимо иметь данные о потоках и полных стандартных отклонениях в одинаковых энергетических каналах. Поскольку энергетические каналы во всех экспериментах разные, то для каждой пары экспериментов “А” и “В” будем использовать свою комбинированную энергетическую шкалу. При выборе комбинированной энергетической шкалы будем использовать график зависимости ширины канала от энергии (Рис. 3).

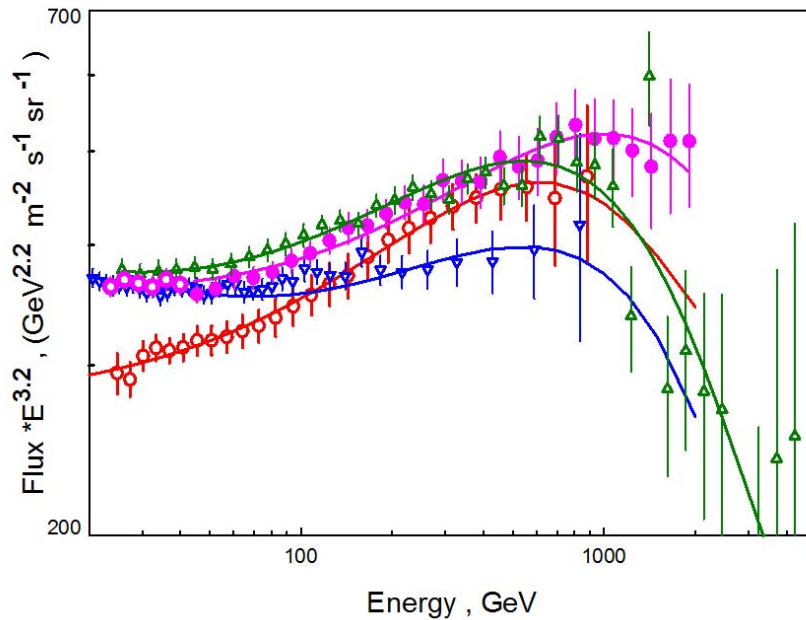


Рис. 2. Энергетические спектры ($\text{Flux} \times E^{3.2}$) потоков суммы электронов и позитронов $\text{Flux} (e^+ + e^-)$ для экспериментов: Fermi-LAT (2010) [7] (пустые красные кружки), Fermi-LAT (2017) [10] (заполненные и пустые фиолетовые кружки), AMS-02 [9] (синие треугольники с вершиной вверх), DAMPE [11] (зелёные треугольники с вершиной вниз). Для всех экспериментов показаны полные стандартные отклонения, включающие статистические и систематические погрешности. Сплошные кривые – наши аппроксимации.

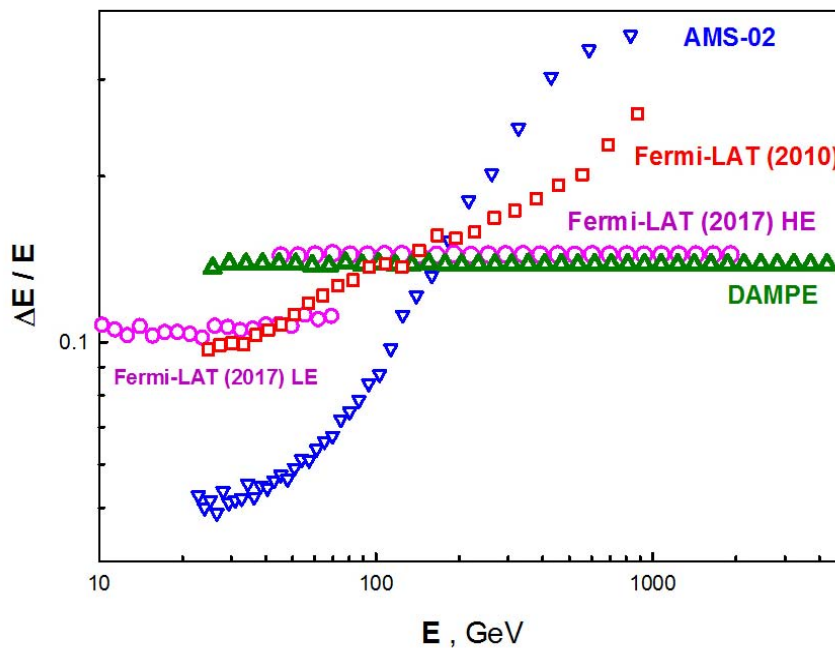


Рис. 3. Зависимость отношения ширины энергетического канала к энергии ($\Delta E/E$) от энергии E : квадратики – Fermi-LAT (2010) [7]; кружочки – Fermi-LAT (HE & LE) (2017) [10]; треугольники с вершиной вниз – AMS-02 [9]; треугольники с вершиной вверх – DAMPE [11].

В качестве оценки различия пары спектров “А” и “В” будем использовать статистику $(\chi^2)_{\text{Test}} = \sum_{i=1,N} ((J_i)_A - (J_i)_B)^2 / ((D_i)_A + (D_i)_B)$, где $(J_i)_A = (E_i)^3 \times (F_i)_A$ – поток в i-ом канале комбинированной энергетической шкалы эксперимента “А” умноженный на $(E_i)^3$; $(J_i)_B = (E_i)^3 \times (F_i)_B$ – умноженный на $(E_i)^3$ поток в i-ом канале комбинированной энергетической шкалы эксперимента “В”; $(D_i)_A = ((E_i)^3 \times (\sigma_i)_A)^2$ – дисперсия в i-ом канале комбинированной энергетической шкалы эксперимента “А” умноженная на $(E_i)^6$; $(D_i)_B = ((E_i)^3 \times (\sigma_i)_B)^2$ – дисперсия в i-ом канале комбинированной энергетической шкалы эксперимента “В” умноженная на $(E_i)^6$; (E_i) – средняя энергия i-го канала. Полная дисперсия в i-ом канале $(D_i)_{A,B}$ вычисляется как сумма статистической и систематической дисперсий $(D_i)_{\text{Tot}} = (D_i)_{\text{Stat}} + (D_i)_{\text{Syst}}$.

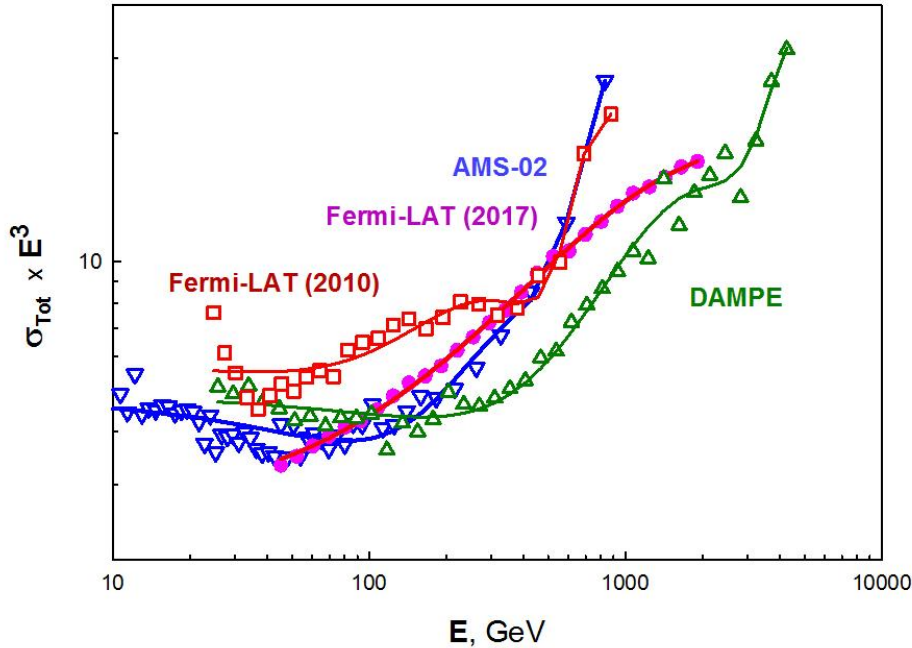


Рис. 4. Зависимость $(\sigma_{\text{Tot}} \times E^3)$ от энергии, где σ_{Tot} полное стандартное отклонение, E энергия. Квадратики – Fermi-LAT (2010) [7]; кружочки – Fermi-LAT (HE & LE) (2017) [10]; треугольники с вершиной вниз – AMS-02 [9]; треугольники с вершиной вверх – DAMPE [11]. Сплошные линии – аппроксимации полиномами 6-ой степени.

Комбинированная энергетическая шкала строится следующим образом. Если для энергии (E_i) ширина канала $(\Delta E_i)_A$ эксперимента “А” больше ширины канала $(\Delta E_i)_B$ эксперимента “В”, то этот канал эксперимента “А” присваивается новой комбинированной шкале и используются табличные величины потоков и стандартных отклонений эксперимента “А”. В этом случае для эксперимента “В” величины потоков и полных стандартных отклонений берутся из наших аппроксимаций (Рис. 2 и Рис. 4). Корректно учесть изменение (уменьшение) величины стандартного отклонения при увеличении ширины каналов могут только сами экспериментаторы. Поэтому, использование нами аппроксимации полных стандартных отклонений (т.е. заведомо больших величин) только уменьшает статистику $(\chi^2)_{\text{Test}}$ и, соответственно, уменьшает достоверность различия двух спектров. Следовательно, наша численная оценка переменности меньше истинной оценки.

Распишем подробно технику численной оценки на примере пары спектров экспериментов “А” \equiv “Fermi-LAT (2010)” [7] и “В” \equiv “AMS-02” [9] (Рис. 5(a)) в диапазоне энергий (24 – 1000) ГэВ, а также и в диапазоне энергий (33–1000) ГэВ.

Используя Рис. 3, построим новую композитную энергетическую шкалу из $N = 24$ энергетических каналов: 18 низкоэнергетических каналов $(\Delta E_i)_A$ эксперимента “А” [7] в диапазоне средних энергий (24–194 ГэВ), (для которых каналы $(\Delta E_i)_A > (\Delta E_i)_B$), и 6 высокоэнергетических каналов $(\Delta E_i)_B$ эксперимента “В” [9] в диапазоне (216 – 832) ГэВ, для которых каналы $(\Delta E_i)_B > (\Delta E_i)_A$. Используя аппроксимации потоков (Рис. 2) и аппроксимации стандартных отклонений (Рис. 4) вычисляем новые величины потоков $(J_i)_B$ и дисперсий $(D_i)_B$ в 18 композитных низкоэнергетических каналах $(\Delta E_i)_A$ эксперимента “В” для средних энергий $(E_i)_A$. Аналогично, используя аппроксимации (Рис. 2 и Рис. 3), вычисляем новые величины потоков $(J_i)_A$ и дисперсий $(D_i)_A$ в 6 композитных высокоэнергетических каналах $(\Delta E_i)_B$ эксперимента “А”

для средних энергий (E_i)_в . Теперь можно для $N_{\text{dof}} = (N - 2)$ степеней свободы вычислить оценку статистики (χ^2)_{Test} .

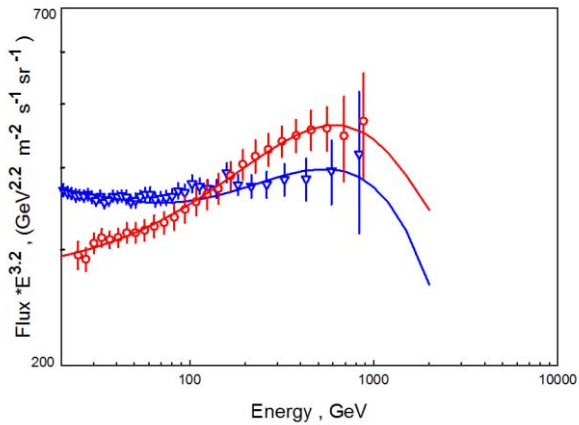


Рис. 5(a). Fermi-LAT (2010) [7] & AMS-02 [9].

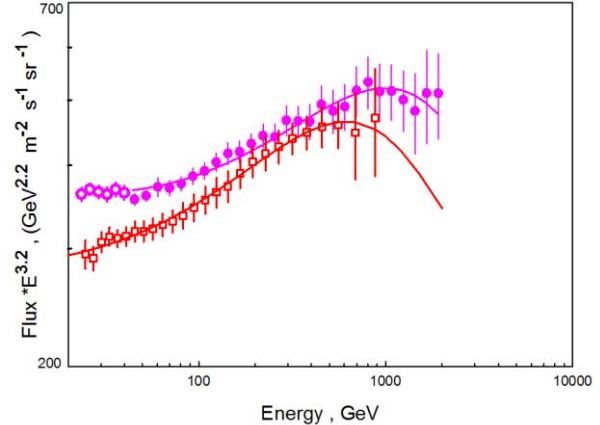


Рис. 5(b). Fermi-LAT (2010) [7] & Fermi-LAT (2017) [10].

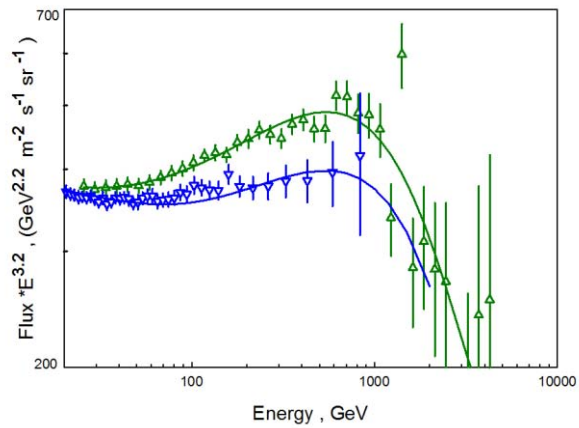


Рис. 5(c) AMS-02 [9] & DAMPE [11]

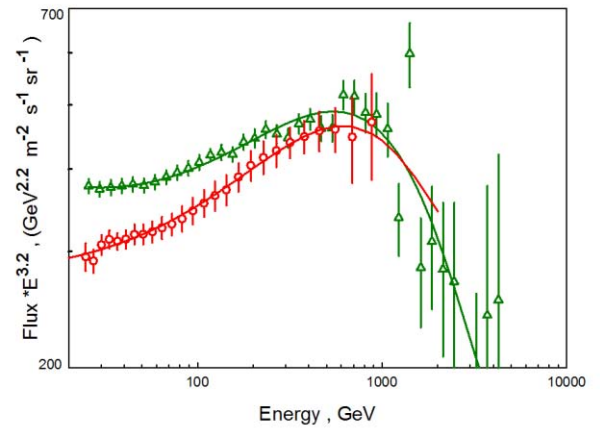


Рис. 5(d) Fermi-LAT (2010) [7] & DAMPE [11]

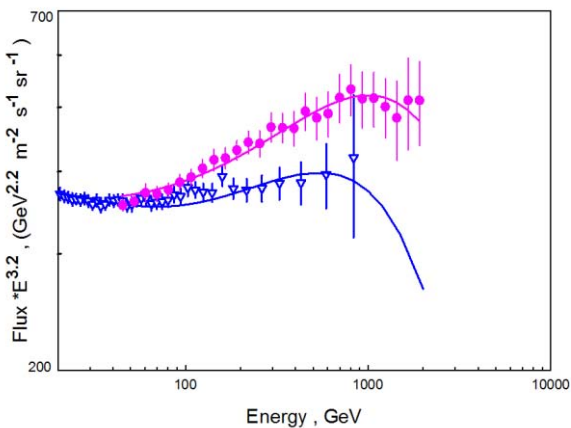


Рис.5(e). Fermi-LAT (2017) [10] &AMS-02 [9]

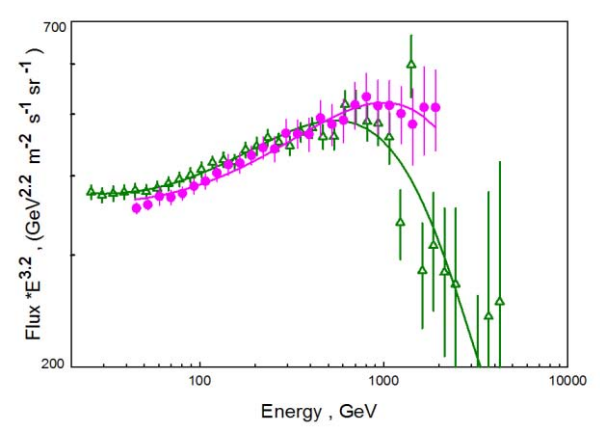


Рис.5(f) Fermi-LAT (2017) [10]&DAMPE [11].

Рис. 5. Те же самые энергетические спектры потоков ($e^+ + e^-$), что и на Рис. 2.

В результате вычислений получаем, что при количестве композитных каналов $N = 24$ для данных Fermi-LAT (2010) и AMS-02 в энергетическом диапазоне (> 24 ГэВ), будет оценка статистики (χ^2)_{Test} / $N_{\text{dof}} = 145.5 / (N-2) = 6.3$.

Чтобы оценить достоверность различия двух спектров нужно вычислить величину функции распределения (кумулятивное распределение) случайной величины (χ^2)_{Test},

т.е. $CDF(a, y_{max}) = \int_0^{y_{max}} \chi^2\{y, a\} \cdot dy = \gamma(a/2, y_{max}/2) / \Gamma(a/2)$, где $\gamma(a, y)$ – неполная гамма-функция, $\Gamma(a/2)$ – гамма-функция. Для данных AMS-2 и Fermi-LAT (2010) получаем $CDF(a, y_{max}) = \int_0^{145.5} \chi^2\{y, k=22\} \cdot dy = \gamma(k/2, y/2) / \Gamma(k/2)|_{y=145.5} = \gamma(11, y) / \Gamma(11)|_{y=72.7} > 1-10^{-16}$. Следовательно, вероятность случайного совпадения данных AMS-02 [9] и Fermi-LAT (2010) [7] (в диапазоне энергий 24–1000 ГэВ) оказывается равной $(1-CDF) < 10^{-16}$ т.е. достоверность отличия двух спектров $> 8\sigma$.

В энергетическом диапазоне ($E > 33$ ГэВ), т.е. при количестве композитных каналов $N = 21$ для данных Fermi-LAT (2010) и AMS-02 будет оценка статистики $(\chi^2)_{Test} / N_{dof} = 81.7 / (N-2) = 4.3$. Чтобы оценить достоверность согласия двух спектров нужно вычислить величину функции распределения (кумулятивное распределение) случайной величины $(\chi^2)_{Test}$, т.е. $CDF(a, y_{max}) = \int_0^{81.7} \chi^2\{y, k=19\} \cdot dy = \gamma(k/2, y/2) / \Gamma(k/2)|_{y=81.7} = \gamma(9.5, y) / \Gamma(9.5)|_{y=40.8} > 1-10^{-9}$. Следовательно, вероятность случайного совпадения данных AMS-02 [9] и Fermi-LAT (2010) [7] равна $(1-CDF) < 10^{-9}$. Иначе говоря, достоверность отличия двух спектров (или значимость) $> 6\sigma$. Аналогично оцениваем достоверность различия двух спектров и для остальных пар экспериментов (Рис. 5. б–ф). Результаты вычислений даны в Табл. 1. Подводя итог результатов численной оценки переменности, представленный в Табл. 1, приходим к заключению, что для всех рассмотренных пар экспериментов, кроме пары Fermi-LAT(2017) и DAMPE, переменность достоверна и превышает 5σ . Как видно из Рис. 1 и Табл. 1, разница Δ_{AMSN} между усредненными за интервалы времени наблюдения среднемесячными числами солнечных пятен для экспериментов Fermi-LAT(2017) [10] и DAMPE [11] наименьшая и составляет 12.5. Соответственно, и достоверность переменности наименьшая. Большим величинам Δ_{AMSN} в Табл. 1 соответствуют и большие значимости $> 5\sigma$.

Таблица 1

Данные \ Параметры	$E_{min} - E_{max}$ (GeV)	N	χ^2	$\chi^2 / (N-2)$	1 - CDF	Validity	Δ_{AMSN}
AMS Fermi-LAT(2010)	~24–1000	24	145.5	6.3	$<10^{-16}$	$> 8\sigma$	88.2
	~33–1000	21	81.77	4.3	$<10^{-9}$	$> 6\sigma$	
Fermi-LAT(2017) Fermi-LAT(2010)	~42–1000	19	50.1	2.95	$<4 \cdot 10^{-5}$	$\approx 4\sigma$	45.4
	~32–1000	22	97.1	4.8	$4 \cdot 10^{-11}$	$> 6\sigma$	
AMS DAMPE	~34–1000	22	177.4	9.8	$<10^{-16}$	$> 8\sigma$	55.3
	~42–1000	20	174.4	10.9	$<10^{-16}$	$> 8\sigma$	
Fermi-LAT(2017) DAMPE	~42–1800	27	25.5	1.0	<0.43	$\approx 1\sigma$	12.5
Fermi-LAT(2010) DAMPE	~32–1000	22	160.1	8.0	$<10^{-16}$	$> 8\sigma$	32.9
	~42–1000	20	119.3	6.6	$<10^{-16}$	$> 8\sigma$	
AMS Fermi-LAT(2017)	~42–1000	17	66.1	4.4	$<10^{-7}$	$> 5\sigma$	42.8

Таблица 1. В первом столбце даны названия пар экспериментов; во втором столбце – энергетические диапазоны комбинированной энергетической шкалы; в третьем столбце – количество каналов комбинированной энергетической шкалы; в четвертом и пятом столбцах приведены вычисленные значения χ^2 и квадрат на степень свободы $\chi^2 / (N-2)$, соответственно; в шестом столбце приведена вероятность случайного совпадения спектров $(1 - CDF)$; в седьмом столбце – достоверность (или значимость) в сигмах; в последнем столбце для каждой пары экспериментов дана величина разности (Δ_{AMSN}) среднемесячных чисел солнечных пятен (AMSN).

Обсуждение результатов

Сделана численная оценка переменности потока суммы электронов и позитронов ($e^+ + e^-$) космических лучей по данным спутниковых экспериментов Fermi-LAT [7, 10], AMS-02 [9], DAMPE [11]. Показано, что переменность спектра КЛ в компоненте ($e^+ + e^-$) для энергетического диапазона > 30 ГэВ достоверна для всех пар экспериментов (кроме пары Fermi-LAT (2017) [10] и DAMPE [11]) и превышает 5σ . Наблюдается корреляция между достоверностью переменности для пары спектров и величиной разности, усредненных за интервал наблюдения

среднемесячных чисел солнечной активности. Действительно, недостоверной переменности для пары (Fermi-LAT(2017) [10] и DAMPE [11]) соответствует наименьшая разница $\Delta_{\text{AMSN}}=12.5$ между усредненными за интервалы времени наблюдения среднемесячными числами солнечных пятен. Для всех остальных пар экспериментов $\Delta_{\text{AMSN}}>32$. Построить точную зависимость между значимостью переменности и величиной Δ_{AMSN} пока невозможно из-за имеющейся неоднородности экспериментальных данных.

Независимо от модели генерации потока ($e^+ + e^-$) в КЛ источниками на расстоянии > 100 пк, все особенности спектра должны сглаживаться при диффузионном распространении потока ($e^+ + e^-$) от источника до Земли, а переменность спектра не должна наблюдаться (для энергий > 20 ГэВ), поскольку влиянием солнечного ветра на распространение КЛ можно пренебречь.

Модель серфотронного ускорения космических лучей (КЛ) в ближайшей окрестности солнечной системы [14–22] (на периферии гелиосферы и в ближайших межзвездных облаках) может объяснить существование наблюдаемой переменной компоненты потока ($e^+ + e^-$) в КЛ на временной шкале от ~ 1 месяца до ~ 1 года.

На периферии Солнечной системы, за ударной волной Солнечного ветра (TS), существует область с однородным магнитным полем, в которой согласно расчетам возможно серфотронное ускорение КЛ до энергии ~ 1 ТэВ. Генератором квази-продольных плазменных волн для этой области являются Солнечные вспышки. Размеры области ускорения (~ 100 а.е.) и, соответственно, положение “квази-пика” в спектре, определяются “космической погодой”. Некоторые авторы отмечают наличие “пика” в одном канале с энергией ~ 1.4 ГэВ эксперимента DAMPE [11], в связи с чем появилось несколько работ, “объясняющих” его появление эффектами темной материи. Однако этот “пик” – может быть чисто статистическим. Действительно, положительное отклонение в канале $E = 1411.4$ ГэВ от нашей аппроксимирующей кривой составляет $\sim 3.1 \sigma$, а в соседнем, предыдущем канале, с энергией $E = 1229.3$ ГэВ имеется отрицательное отклонение на $\sim 2.0 \sigma$. Если усреднить эти две величины, то отклонение от нашей аппроксимирующей кривой составит всего лишь $\sim 1.5 \sigma$, т.е. никакого реального “пика” нет. Вообще говоря, и “пик” на уровне значимости $\sim 3.1 \sigma$ нельзя считать достоверным.

Заключение

В заключение критически рассмотрим некоторые попытки объяснения результатов эксперимента HAWC [13], в котором, по измеренным профилям γ -излучения в окрестности ближайших пульсаров Geminga и Monogem, были определены величины диффузионных коэффициентов для распространения (e^+) и (e^-) в КЛ от этих пульсаров, которые оказались на два порядка меньше, чем обычно предполагаемые величины; и было показано, что пульсары Geminga и Monogem не могут генерировать достаточное количество (e^+) и (e^-) в КЛ, чтобы объяснить наблюдаемый на Земле поток (e^+) и (e^-) в КЛ.

Статья [24], как следует из её названия, посвящена измерению локального диффузионного коэффициента по данным черенковской обсерватории HESS. В ней достаточно много внимания уделяется обсуждению результата эксперимента HAWC [13], однако, в итоге, в ней отвергается измеренная в [13] величина диффузии на основании следующего аргумента: поскольку на расстоянии менее $\sim (10-20)$ пк от Земли нет правдоподобных источников высокоэнергичных КЛ, то межзвездная среда в окрестности пульсаров Geminga и Monogem обладает уникальными свойствами, которые не могут быть общими для всей Галактики. Затем, в модели с экспоненциальным распределением пульсаров в Галактике и в двух близких пульсарах Geminga и Monogem, используя устаревшие данные модели GALPROP (которая не объясняет измеренные за последние годы спектры (e^+) и (e^-) в КЛ) и большую величину коэффициента диффузии (выведенную из адронных данных) подбирают параметры модели для описания спектра HESS. Авторам [24] удается описать данные одного эксперимента HESS, но, очевидно, не удастся одновременно описать и другие эксперименты, которые, как выше показано, достоверно отличаются друг от друга. В работе [24] не было произведено никаких реальных измерений локального диффузионного коэффициента, заявленных в названии статьи. Кроме того, в опровержение главного аргумента авторов [24] об отсутствии правдоподобных близких к Земле источников КЛ можно напомнить, что, как показано в статьях [18–22], в ближайшей окрестности (≤ 1 пк) от Земли существуют близкие серфотронные источники. К сожалению, авторы [24] забыли о приоритете эксперимента перед любой теорией и просто игнорировали результаты эксперимента HAWC [13] не представив реальных замечаний и возражений против методики и результатов эксперимента HAWC [13].

В статье [25] для объяснения результата эксперимента HAWC [13] предложена гипотеза двух-зонной диффузии. Авторы [25] признают существование очень медленной диффузии в локальной области (~ 10 пк) вблизи пульсара [13], но предполагают, что вне этой зоны

диффузия становится быстрой “как обычно”, основываясь на данных по отношению В/С) (потоков ядер бора КЛ и ядер углерода КЛ). Мы полагаем, во-первых, что гипотеза двух-зонной диффузии [25] не достаточно обоснована, т.е. не доказано, что вдали от источников параметры межзвездной среды могут изменяться в десятки раз, что маловероятно; во-вторых, как и авторы [13], считаем, что неправильно применять к распространению потока ($e^+ + e^-$) в КЛ величины диффузионных коэффициентов, полученные для ядер КЛ; в-третьих, если даже при ряде предположений удастся описать спектр AMS-02 [9], то одновременно описать и остальные спектры (рассмотренные выше) невозможно, поскольку они (согласно изложенному выше) достоверно отличаются от [9].

Литература:

1. Chang, J., J. H. Adams, H. S. Ahn et al., “An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV,” *Nature*, vol. 456, no. 7220, pp. 362–365, 2008.
2. Yoshida, K., Torii S., Yamagami T. et al. Cosmic-ray electron spectrum above 100 GeV from PPB-BETS experiment in Antarctica, *Adv. Space Res.* V. 42. 2008. pp. 1670 - 1675.
3. Adriani, O., G. C. Barbarino, G.A. Bazilevskaya et.al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV. *Nature*, V. 458, Issue 7238, 2009, pp. 607 - 609.
4. Adriani, O., G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya et al. (PAMELA Collaboration). Cosmic-Ray Electron Flux Measured by the PAMELA Experiment between 1 and 625 GeV. *Physical Review Letters*, V. 106, 2011, .p.p. 201101 - 201101-5.
5. Adriani, O., G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya et al. (PAMELA Collaboration). Cosmic-Ray Positron Energy Spectrum Measured by PAMELA. *Physical Review Letters*, V. 111, 2013, pp. 081102 - 081102-6.
6. Ackermann, M., M. Ajello, A. Allafort et al. (Fermi-LAT Collaboration). Measurement of separate cosmic-ray electron and positron spectra with the Fermi Large Area Telescope. *Physical Review Letters*. 2012. V. 108. Issue 1. pp. 011103 – 011103-8.
7. Ackermann, M., M. Ajello, W.B. Atwood et al. (Fermi-LAT Collaboration). Fermi LAT observations of cosmic-ray electrons from 7 GeV to 1 TeV. *Phys. Rev. D*, 2010, V. 82, p.p. 092004-092004-7.
8. Aguilar, M., G. Alberti, B. Alpat et al. (AMS Collaboration). First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV. *Phys. Rev. Letters*, V. 110, Issue 14, 2013, pp. 141102 - 141102-10.
9. Aguilar, M., D. Aisa, B. Alpat et al. (AMS Collaboration). Precision Measurement of the ($e^+ + e^-$) Flux in Primary Cosmic Rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station. *Physical Review Letters*, V. 113, 2014, pp. 221102 – 221102-7.
10. Abdollahi, S., M. Ackermann, M. Ajello et al. (Fermi-LAT Collaboration). Cosmic-ray electron-positron spectrum from 7 GeV to 2 TeV with the Fermi Large Area Telescope. *Physical Review D*, V. 95, 2017, pp.082007-082007-16.
11. Ambrosi, G., Q. An, R. Asfandiyarov et al. (DAMPE Collaboration). Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. *arXiv:1711.10981v1, [astro-ph.HE]* , 2017, pp. 1–18.
12. Adriani, O., Y. Akaike, K. Asano et al. (CALET Collaboration). Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station. *Physical Review Letters*, V. 119, 2017, pp. 181101 – 181101-6.
13. Abeyssekara, A.U., A. Albert, R. Alfaro et al. Extended gamma-ray emission around nearby pulsars indicates that positrons arriving at Earth must have an exotic origin. *Science*, V. 358, 2017, p.p. 911 - 914
14. Ерохин, Н. С., А. А. Лазарев, С. С. Моисеев, Р. З. Сагдеев. Увлечение и ускорение заряженных частиц замедленной волной в неоднородной плазме. *ДАН*, т. 295, № 4, 1987, с.с. 849-852.
15. Ерохин, Н. С., С. С. Моисеев, Р. З. Сагдеев. Релятивистский серфинг в неоднородной плазме и генерация космических лучей. *Письма в Астрономический журнал*, т.15, № 1, 1989, с.с. 3-10.
16. Shkevov, R., N. S. Erokhin, L. A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova. Numerical investigation of the surfatron acceleration efficiency of charged particles by wave packets in space plasma. *JASTP*, V.99, 2013, pp. 73-77.
17. Shkevov, R., N. S. Erokhin, V. M. Loznikov, N. N. Zolnikova, L. A. Mikhailovskaya. Surfatron acceleration of weakly relativistic electrons by electromagnetic wave packet in space plasma. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 177, October 2018, p.p. 266 - 273.
18. Лозников, В. М., Н. С. Ерохин, Л. А. Михайловская. Объяснение переменных особенностей в спектрах электронов и позитронов космических лучей. *Космические Иссл.*, Т. 51, № 3, 2013, с.с. 191 - 203.
19. Лозников, В. М., Н.С. Ерохин, Н. Н. Зольникова, Л. А. Михайловская. Серфотронное ускорение протонов электромагнитной волной на периферии гелиосферы. *Физ. плазмы*, Т.39, № 10, 2013, с.с. 927-934.
20. Лозников, В. М., Н. С. Ерохин, Н. Н. Зольникова, Л. А. Михайловская. О причине излома в спектрах жесткости космических лучей протонов и ядер гелия около 230 ГВ. *Физика плазмы*, Т. 41, № 8, 2015, с.с. 693 - 701.
21. Лозников, В. М., Н. С. Ерохин, Н. Н. Зольникова, Л. А. Михайловская. Серфотронный ускоритель в местном межзвездном облаке. *Физика плазмы*. Т. 43, № 1, 2017, с.с. 45 - 57.

22. Лозников, В. М., Н. С. Ерохин, Н. Н. Зольникова, Л. А. Михайловская. О причине переменности спектра космических лучей в области "колена". Физика плазмы. Т. 43, № 9, 2017, с.с. 765 – 775.
23. Australian Government Bureau of Meteorology. Monthly Sunspot Numbers. Space Weather Services, 2017. <http://www.sws.bom.gov.au/Solar/1/6> .
24. Hooper D., T. Linden. Measuring the Local Diffusion Coefficient with H.E.S.S. Observations of Very High-Energy Electrons. arXiv: 1711.07482v1 [astro-ph.HE]. 2017, pp. 1 – 17.
25. Fang K., X.-J. Bi, P.-F. Yin, Q. Yuan. Two-zone diffusion of electrons and positrons from Geminga explains the positron anomaly. arXiv: 1803.02640v1 [astro-ph.HE], 2018, pp. 1 – 18.