

ОЦЕНКА ПЕРЕМЕННОСТИ ПОТОКА СУММЫ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2019 г. В. М. Лозников^{a,*}, Н. С. Ерохин^a

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: vloznikov@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.12.2018 г.

После доработки 07.02.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

Сделана численная оценка переменности потока суммы электронов и позитронов ($e^+ + e^-$) космических лучей (КЛ) по данным спутниковых экспериментов Fermi-LAT, AMS-02, DAMPE. Показано, что переменность спектра КЛ ($e^+ + e^-$) в энергетическом диапазоне >30 ГэВ достоверна. Наблюдается корреляция между достоверностью переменности для каждой пары спектров и величиной разности среднемесячных чисел солнечной активности, усредненных за интервал наблюдения. Модель серфотронного ускорения космических лучей (КЛ) в ближайшей окрестности Солнечной системы (на периферии гелиосферы и в ближайших межзвездных облаках) может объяснить существование наблюдаемой переменной компоненты потока ($e^+ + e^-$) КЛ на временной шкале от ~ 1 месяца до ~ 1 года.

DOI: 10.1134/S0367292119090051

1. ВВЕДЕНИЕ

Последнее поколение детекторов космических лучей (КЛ) (детекторы, запускаемые на аэростатах, на спутниках, и огромные наземные установки) привело к значительному улучшению чувствительности и энергетического разрешения и позволило зарегистрировать переменные особенности в спектрах КЛ.

Первое достоверное открытие широкого квазипика в спектре ($e^+ + e^-$) КЛ в окрестности ~ 700 ГэВ было сделано в баллонном эксперименте ATIC [1] и подтверждено в баллонном эксперименте PVB-BETS [2]. Затем, в спутниковых экспериментах PAMELA [3–5], Fermi-LAT [6, 7], AMS-02 [8, 9] были зарегистрированы значительные изменения в спектрах электронов (e^-) и позитронов (e^+) КЛ.

Недавно появились новые статьи с данными экспериментов Fermi-LAT [10], DAMPE [11], CALET [12] в энергетическом диапазоне до нескольких ТэВ. Эти спектры подтверждают наличие широкого квазипика в окрестности ~ 1 ТэВ. На больших энергиях наблюдается резкое уменьшение потока, однако имеется явная тенденция к продолжению спектра далее 10 ТэВ.

Обычно предполагается, что источники ($e^+ + e^-$) КЛ (с энергией >10 ГэВ) – остатки сверхновых и пульсары. Экзотические модели на основе темной материи мы обсуждать не будем. Самый

близкий пульсар Geminga находится на расстоянии ~ 250 пк. Если источник ($e^+ + e^-$) КЛ находится на расстоянии >1000 пк, то e^+ и e^- при распространении к Земле теряют свою энергию в процессах синхротронного излучения в межзвездном магнитном поле и комптоновского рассеяния на микроволновом фоне.

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

В статье [13] анализируются наблюдения наземной обсерваторией HAWC углового профиля γ -излучения в диапазоне (1–50 ТэВ) двух ближайших пульсаров (Geminga, PSR B0633+17 и Monogem, PSRB0656+14). В предположении, что это излучение – результат обратного комптоновского рассеяния на микроволновом фоне e^+ и e^- опре-

деляются диффузионные коэффициенты для их распространения от пульсаров. Полученные величины диффузионных коэффициентов оказались на порядок меньше, чем предполагаемые обычно величины, которые выводятся из наблюдений адронных КЛ. Показано, что в предположении однородной и изотропной диффузии ближайшие пульсары Geminga и Monogem не могут обеспечить наблюдаемый на Земле поток e^+ и e^- . Некоторые попытки объяснить результат [13] иначе будут рассмотрены в ниже в разделе “Обсуждение”.

В наших работах [14–18] возможность появления переменных особенностей в энергетических спектрах (ЭС) электронов, позитронов и ядер КЛ обосновывается существованием серфотронных ускорителей в ближайшей окрестности солнечной системы (≤ 1 пк).

В данной работе анализируются энергетические спектры потоков суммы электронов и позитронов ($e^+ + e^-$) 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 за разные временные интервалы), но нет данных для суммы ($e^+ + e^-$). Поэтому данные PAMELA [4, 5] не использовались для численных оценок переменной. Спектр ($e^+ + e^-$) CALET [12] (к моменту написания нашей статьи) опубликован только в виде графика (без табличных данных), поэтому тоже не использовался для численных оценок переменной. Поэтому, численные оценки переменной были сделаны только для попарного сравнения спектров Fermi-LAT [7], AMS-02 [9], Fermi-LAT [10], DAMPE [11], измеренных в разное время.

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Поскольку в нашей модели серфотронное ускорение ($e^+ + e^-$) 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. 1а) [19] за период времени проведения анализируемых экспериментов. На рис. 1б 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).

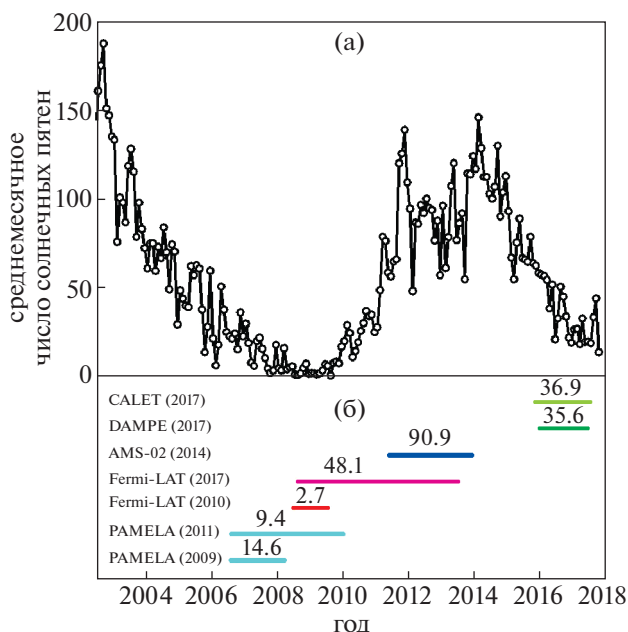


Рис. 1. Зависимость солнечной активности от времени (среднемесячные данные) [19] (а). Горизонтальными отрезками показаны временные интервалы использованных для построения спектров экспериментальных данных; слева от каждого отрезка приведено название инструмента (в скобках год публикации статьи); числа над горизонтальными отрезками соответствуют усредненным за интервал времени наблюдения среднемесячным числам солнечных пятен (б).

В 2010 г. была опубликована статья, в которой был представлен спектр суммы ($e^+ + e^-$) КЛ (в диапазоне 7 ГэВ–1 ТэВ), полученный на космической обсерватории Fermi-LAT [7] за 12 месяцев (с июня 2008 г.). В 2014 г. была опубликована серия статей с результатами измерений спектров (e^+ и e^-) 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 большой 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^+ и e^-) КЛ в диапазоне (24 ГэВ–4.6 ТэВ) за период времени (27 декабря 2015 г.–8 июня 2017 г.).

Как видно на рис. 2, спектры суммы потоков ($e^+ + e^-$) КЛ в этих экспериментах значительно отличаются друг от друга. Однако удивительно, что авторы [7–11] не упоминают о переменной потоков ($e^+ + e^-$) КЛ. Этот факт можно объяснить только тем, что, оставаясь в рамках традиционного механизма генерации КЛ, нельзя объяснить

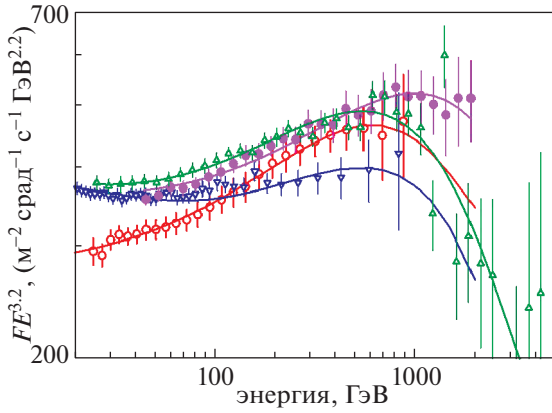


Рис. 2. Энергетические спектры ($FE^{3.2}$) потоков суммы электронов и позитронов экспериментов: Fermi-LAT (2010) [7] (пустые красные кружочки), Fermi-LAT (2017) [10] (заполненные и пустые фиолетовые кружочки), AMS-02 [9] (синие треугольники с вершиной вниз), DAMPE [11] (зеленые треугольники с вершиной вверх). Для всех экспериментов показаны полные стандартные отклонения, включающие статистические и систематические ошибки. По оси абсцисс – энергия (в ГэВ), по оси ординат – поток в ($m^{-2} \cdot срад^{-1} \cdot с^{-1} \cdot ГэВ^{-1}$), умноженный на $E^{3.2}$. Сплошные кривые – наши аппроксимации.

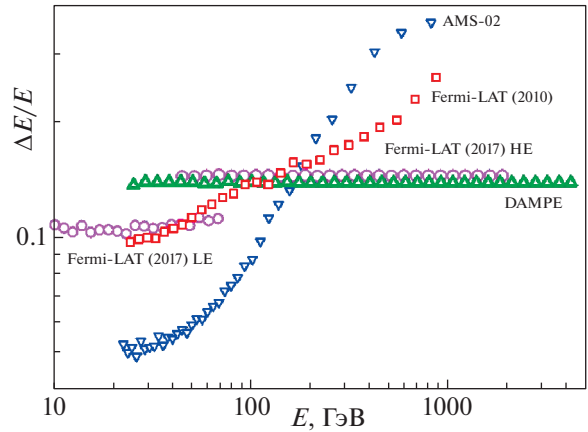


Рис. 3. Зависимость отношения ширины энергетического канала к энергии ($\Delta E/E$) от энергии E : квадратики – Fermi-LAT (2010) [7]; кружочки – Fermi-LAT (HE&LE) (2017) [10]; треугольники с вершиной вниз – AMS-02 [9]; треугольники с вершиной вверх – DAMPE [11].

особенности в спектрах КЛ и их наблюдаемую переменность.

Все аппроксимации спектров, показанные на рис. 2 сплошными линиями, проводились с использованием двухкомпонентной модели спектра $F = F_B + F_S$, где $F_B = BE^{-\beta}$ – поток “фона” со степенным индексом β , $F_S = SE^{-\alpha} \exp(-E/E_{Cut})$ – поток “источника” со степенным индексом $\alpha < \beta$ и обрезанием на высокой энергии E_{Cut} .

В периоды времени повышенной солнечной активности (рис. 1), в интервалах времен наблюдений AMS-02 [9] и правой части интервала Fermi-LAT (2017) [10], низкочастотная часть спектра значительно поднялась (рис. 2) относительно спектра Fermi-LAT (2010) [7], измеренного в период времени 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]. Было бы более корректно сравнивать спектры, полученные в последовательные интервалы времени.

Чтобы избавиться от субъективной, качественной оценки различия спектров, мы сделаем количественную оценку переменности. Для численной оценки переменности спектров (e^+ и e^-) КЛ будут использоваться только спектры, для которых имеются табличные данные, т.е. спектры

Fermi-LAT [7], AMS-02 [9], Fermi-LAT [10] и DAMPE [11].

Для корректного сравнения спектров 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).

В качестве оценки различия пары спектров “А” и “В” будем использовать статистику

$$(\chi^2)_{\text{Тест}} = \sum_{i=1,N} \frac{((J_i)_A - (J_i)_B)^2}{(D_i)_A + (D_i)_B},$$

где $(J_i)_A = (E_i)^3 (F_i)_A$ – поток в i -м канале комбинированной энергетической шкалы эксперимента “А”, умноженный на $(E_i)^3$; $(J_i)_B = (E_i)^3 (F_i)_B$ – умноженный на $(E_i)^3$ поток в i -м канале комбинированной энергетической шкалы эксперимента “В”; $(D_i)_A = ((E_i)^3 (\sigma_i)_A)^2$ – дисперсия в i -м канале комбинированной энергетической шкалы эксперимента “А”, умноженная на $(E_i)^6$; $(D_i)_B = ((E_i)^3 (\sigma_i)_B)^2$ – дисперсия в i -м канале комбинированной энергетической шкалы эксперимента “В”, умноженная на $(E_i)^6$; E_i – средняя энергия i -го канала. Полная дисперсия в i -м канале $(D_i)_{A,B}$ вычисляется как сумма статистической и систематической дисперсий $(D_i)_{\text{Tot}} = (D_i)_{\text{Stat}} + (D_i)_{\text{Syst}}$.

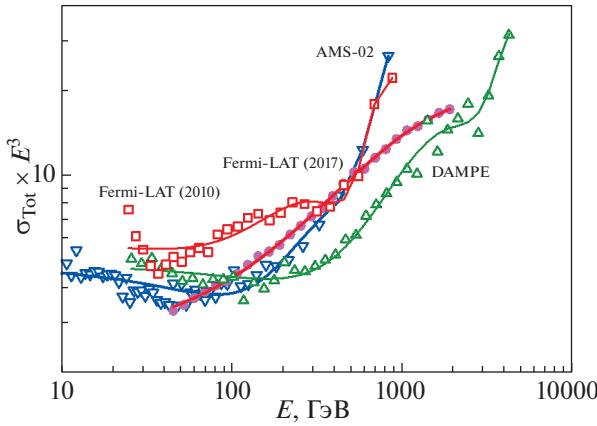


Рис. 4. Зависимость $(\sigma_{\text{Tot}} E^3)$ от энергии, где σ_{Tot} – полное стандартное отклонение. Сплошные линии – аппроксимации полиномами 6-й степени. Остальные обозначения, как на рис. 3.

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 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.

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

Используя рис. 3, построим новую комбинированную 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 4), 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 $(E_i)_B$. Теперь мы можем для $N_{\text{dof}} = N - 2$ степеней свободы вычислить оценку статистики $(\chi^2)_{\text{Test}}$.

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

Чтобы оценить достоверность различия двух спектров нужно вычислить величину функции распределения (кумулятивное распределение) случайной величины $(\chi^2)_{\text{Test}}$, т.е.

$$CDF(a, y_{\text{max}}) = \int_0^{y_{\text{max}}} \chi^2\{y, a\} dy = \frac{\gamma(a/2, y_{\text{max}}/2)}{\Gamma(a/2)},$$

где $\gamma(a, y)$ – неполная гамма-функция, $\Gamma(a/2)$ – гамма-функция. Для данных AMS-2 и Fermi-LAT (2010) получаем

$$\begin{aligned} CDF(a, y_{\text{max}}) &= \int_0^{145.5} \chi^2\{y, k = 22\} dy = \\ &= \frac{\gamma(k/2, y/2)}{\Gamma(k/2)} \Big|_{y=145.5} = \frac{\gamma(11, y)}{\Gamma(11)} \Big|_{y=72.7} > \\ &> 0.9999999999999999. \end{aligned}$$

Следовательно, вероятность случайного совпадения данных AMS-02 [9] и Fermi-LAT(2010) [7] (в диапазоне энергий 24–1000 ГэВ) оказывается равной $(1 - CDF) < 10^{-16}$. Иначе говоря, достоверность отличия двух спектров $>8\sigma$.

В энергетическом диапазоне (>33 ГэВ), т.е. при количестве композитных каналов $N = 21$ для данных Fermi-LAT (2010) и AMS-02 оценка статистики $(\chi^2)_{\text{Test}}/N_{\text{dof}} = 81.7/(N - 2) = 4.3$. Чтобы оценить достоверность согласия двух спектров нужно вычислить величину функции распределения (кумулятивное распределение) случайной величины $(\chi^2)_{\text{Test}}$, т.е.

$$\begin{aligned} CDF(a, y_{\text{max}}) &= \int_0^{81.7} \chi^2\{y, k = 19\} dy = \\ &= \frac{\gamma(k/2, y/2)}{\Gamma(k/2)} \Big|_{y=81.7} = \frac{\gamma(9.5, y)}{\Gamma(9.5)} \Big|_{y=40.8} > \\ &> 0.999999999016. \end{aligned}$$

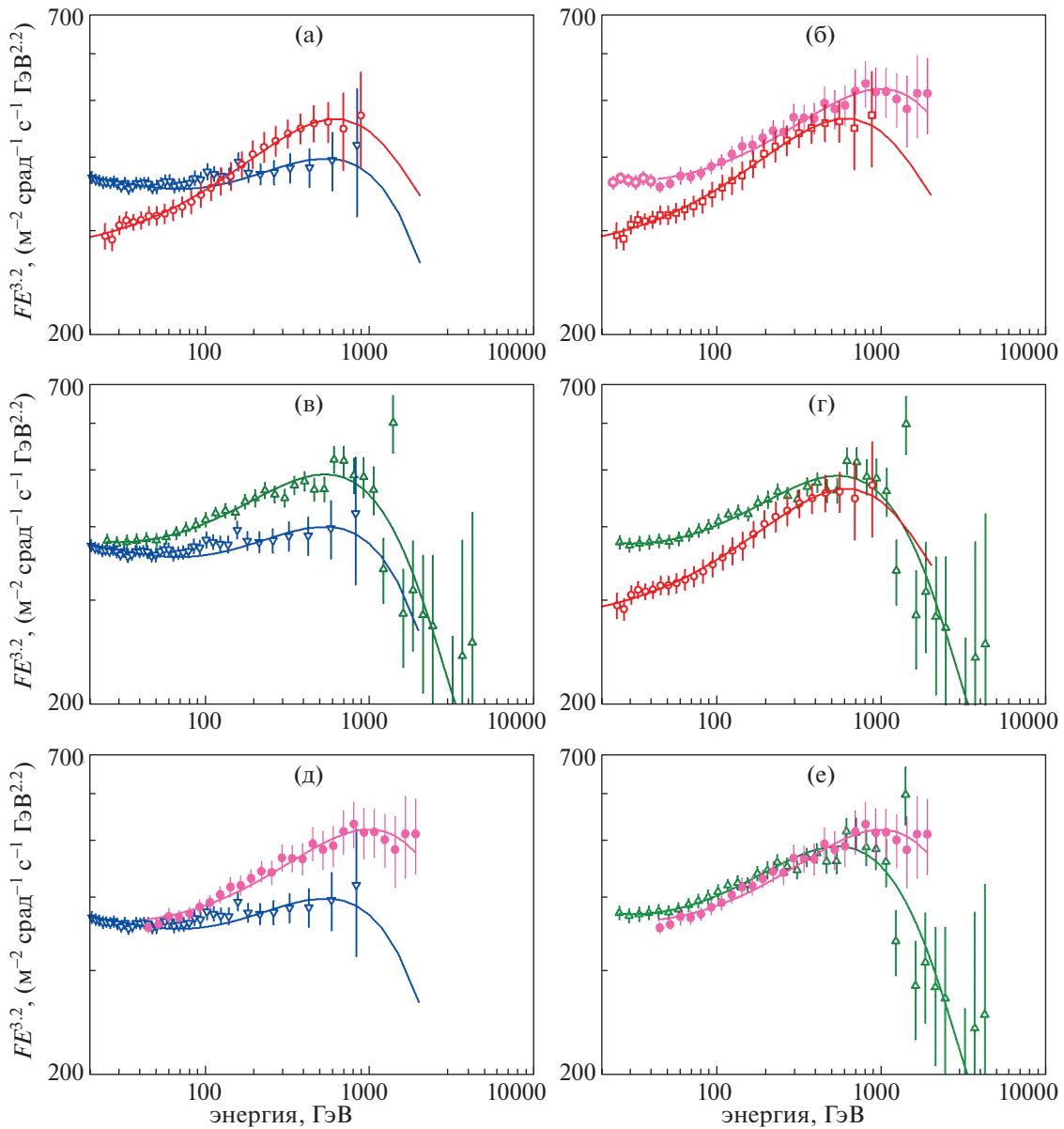


Рис. 5. Те же самые энергетические спектры потоков ($e^+ + e^-$), что и на рис. 2: Fermi-LAT (2010) [7] & AMS-02 [9] (а); Fermi-LAT (2010) [7] & Fermi-LAT (2017) [10] (б); AMS-02 [9] & DAMPE [11] (в); Fermi-LAT (2010) [7] & DAMPE [11] (г); Fermi-LAT (2017) [10] & AMS-02 [9] (д); Fermi-LAT (2017) [10] & DAMPE [11] (е).

Следовательно, вероятность случайного совпадения данных AMS-02 [9] и Fermi-LAT (2010) [7] оказывается равной $(1 - CDF) < 10^{-9}$. Иначе говоря, достоверность отличия двух спектров (или значимость) $> 6\sigma$.

Аналогично оценивается достоверность различия двух спектров и для остальных пар экспериментов (рис. 5б–е). Результаты вычислений представлены 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. 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 хи-квадрат χ^2 и хи-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)

| Данные | Параметры | | | | | | |
|------------------|---------------------------|-----|----------|----------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| | $E_{\min}-E_{\max}$, ГэВ | N | χ^2 | $\chi^2/(N-2)$ | $1 - CDF$ | Значимость | Δ_{AMSN} |
| AMS | ~24–1000 | 24 | 145.5 | 6.3 | $<10^{-16}$ | $>8\sigma$ | 88.2 |
| Fermi-LAT (2010) | ~33–1000 | 21 | 81.7 | 4.3 | $<10^{-9}$ | $>6\sigma$ | |
| Fermi-LAT (2017) | ~42–1000 | 19 | 50.1 | 2.95 | $<4 \times 10^{-5}$ | $\approx 4\sigma$ | 45.4 |
| Fermi-LAT (2010) | ~32–1000 | 22 | 97.1 | 4.8 | 4×10^{-11} | $>6\sigma$ | |
| AMS | ~34–1000 | 22 | 177.4 | 9.8 | $<10^{-16}$ | $>8\sigma$ | 55.3 |
| DAMPE | ~42–1000 | 20 | 174.4 | 10.9 | $<10^{-16}$ | $>8\sigma$ | |
| Fermi-LAT (2017) | ~42–1800 | 27 | 25.5 | 1.0 | <0.43 | $\approx 1\sigma$ | 12.5 |
| Fermi-LAT (2010) | ~32–1000 | 22 | 160.1 | 8.0 | $<10^{-16}$ | $>8\sigma$ | 32.9 |
| DAMPE | ~42–1000 | 20 | 119.3 | 6.6 | $<10^{-16}$ | $>8\sigma$ | |
| AMS | ~42–1000 | 17 | 66.1 | 4.4 | $<10^{-7}$ | $>5\sigma$ | 42.8 |
| Fermi-LAT (2017) | | | | | | | |

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделана численная оценка переменности потока суммы электронов и позитронов ($e^+ + e^-$) космических лучей (КЛ) по данным спутниковых экспериментов Fermi-LAT [7, 10], AMS-02 [9], DAMPE [11]. Показано, что переменность спектра КЛ ($e^+ + e^-$) в энергетическом диапазоне >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 неоднородности экспериментальных данных.

Независимо от модели генерации ($e^+ + e^-$) КЛ в источниках на расстоянии >100 пк, все особенности спектра должны сглаживаться при диффузионном распространении ($e^+ + e^-$) КЛ от источника до Земли и 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 [14–18] (на периферии гелиосферы и в ближайших межзвездных облаках) может объяснить существование наблюдаемой переменной компоненты потока ($e^+ + e^-$) 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 возможно серфотронное ускорение КЛ до энергии ~ 1 ТэВ. Генератором квазипродольных плазменных волн для этой области являются Солнечные вспышки. Размеры области ускорения (~ 100 а. е.) и, соответственно, положение “квазипика” 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. Мы считаем, что этот “пик” — чисто статистический. Действительно, положительное отклонение в энергетическом 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 усред-

нить 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.

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^- 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^- КЛ, чтобы объяснить наблюдаемый на Земле поток e^+ и e^- КЛ.

Статья [20], как следует из ее 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, отвергают измеренную в [13] величину диффузии на основании следующего аргумента: поскольку на расстоянии менее ~ 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 двух близких пульсаров Geminga и Monogem, используя устаревшие данные модели GALPROP (которая не объясняет измеренные за последние годы спектры e^+ и e^- КЛ) и большую величину коэффициента диффузии (выведенную из адронных данных) подбирают параметры модели для описания спектра HESS. Авторам [20] удается описать данные одного эксперимента HESS, но, очевидно, не удастся одновременно описать и другие эксперименты, которые, как мы показали, достоверно отличаются друг от друга. В работе [20] не было произведено никаких реальных измерений локального диффузионного коэффициента, заявленных в названии статьи. Кроме того, в опровержение главного аргумента авторов [20] об отсутствии правдоподобных близких источников КЛ можно напомнить, что, как показано в статьях [14–18] в ближайшей окрестности (≤ 1 пк) от Земли существуют близкие серфотронные источники. К сожалению, авторы [20] 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 [21] предлагается для объяснения результата эксперимента HAWC [13] гипотеза двухзонной диффузии. Авторы [21] 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 двухзонной диффузии [21] недостаточно 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 ($e^+ + e^-$) 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 нами) невозможно, поскольку (как мы показали) они достоверно отличаются от [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang J., Adams J.H., Ahn H.S., Bashindzhagyan G.L., Christ M., Ganel O., Guzik T.G., Isbert J., Kim K.C., Kuznetsov E.N., Panasyuk M.I., Panov A.D., Schmidt W.K.H., Seo E.S., Sokolskaya N.V., Watts J.W., Wefel J.P., Wu J., Zatsepin V.I. // Nature. 2008. V. 456. P. 362.
2. Yoshida K., Torii S., Yamagami T., Tamura T., Kitamura H., Chang J., Iijima I., Kadokura A., Kasahara K., Katayose Y., Kobayashi T., Komori Y., Matsuzaka Y., Mizutani K., Murakami H., Namiki M., Nishimura J., Ohta S., Saito Y., Shibata M., Tateyama N., Yamagishi H., Yuda T. // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 1670.
3. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A., Bellotti R., Boezio M., Bogomolov E.A., Bonechi L., Bonghi M., Bonvicini V., Bottai S., Bruno A., Cafagna F., Campana D., Carlson P., Casolino M., Castellini G., de Pascale M.P., de Rosa G., de Simone N., di Felice V., Galper A.M., Grishantseva L., Hofverberg P., Koldashov S.V., Krutkov S.Y., Kvashnin A.N., Leonov A., Malvezzi V., Marcelli L., Menn W., Mikhailov V.V., Mocchiutti E., Orsi S., Osteria G., Papini P., Pearce M., Picozza P., Ricci M., Ricciarini S.B., Simon M., Sparvoli R., Spillantini P., Stozhkov Y.I., Vacchi A., Vannuccini E., Vasilyev G., Voronov S.A., Yurkin Y.T., Zampa G., Zampa N., Zverev V.G. // Nature. 2009. V. 458. P. 607.
4. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A., Bellotti R., Boezio M., Bogomolov E.A., Bonghi M., Bonvicini V., Borisov S., Bottai S., Bruno A., Cafagna F., Campana D., Carbone R., Carlson P., Casolino M., Castellini G., Consiglio L., de Pascale M.P., de Santis C., de Simone N., di Felice V., Galper A.M., Gillard W., Grishantseva L., Jerse G., Karelin A.V., Koldashov S.V., Krutkov S.Y., Kvashnin A.N., Leonov A., Malakhov V., Malvezzi V., Marcelli L., Mayorov A.G., Menn W., Mikhailov V.V., Mocchiutti E., Monaco A., Mori N., Nikonov N., Osteria G., Palma F., Papini P., Pearce M., Picozza P., Pizzolotto C., Ricci M., Ricciarini S.B., Rossetto L., Sarkar R.,

- Simon M., Sparvoli R., Spillantini P., Stochaj S.J., Stockton J.C., Stozhkov Y.I., Vacchi A., Vannuccini E., Vasilyev G., Voronov S.A., Wu J., Yurkin Y.T., Zampa G., Zampa N., Zverev V.G., PAMELA Collaboration // Physical Review Letters. 2011. V. 106. P. 201101.*
5. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A., Bellotti R., Bianco A., Boezio M., Bogomolov E.A., Bongi M., Bonvicini V., Bottai S., Bruno A., Cafagna F., Campana D., Carbone R., Carlson P., Casolino M., Castellini G., De Donato C., De Santis C., De Simone N., Di Felice V., Formato V., Galper A.M., Karelin A.V., Koldashov S.V., Koldobskiy S.A., Krutkov S.Y., Kvashnin A.N., Leonov A., Malakhov V., Marcelli L., Martucci M., Mayorov A.G., Menn W., Mergé M., Mikhailov V.V., Mocchiutti E., Monaco A., Mori N., Munini R., Osteria G., Palma F., Papini P., Pearce M., Picozza P., Pizzolotto C., Ricci M., Ricciarini S.B., Rossetto L., Sarkar R., Scotti V., Simon M., Sparvoli R., Spillantini P., Stochaj S.J., Stockton J.C., Stozhkov Y.I., Vacchi A., Vannuccini E., Vasilyev G.I., Voronov S.A., Yurkin Y.T., Zampa G., Zampa N., Zverev V.G., PAMELA Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 081102.*
 6. *Ackermann M., Ajello M., Allafort A., Atwood W.B., Baldini L., Barbiellini G., Bastieri D., Bechtol K., Bellazzini R., Berenji B., Blandford R.D., Bloom E.D., Bonamente E., Borgland A.W., Bouvier A., Bregeon J., Brigida M., Bruel P., Buehler R., Buson S., Caliandro G.A., Cameron R.A., Caraveo P.A., Casandjian J.M., Cecchi C., Charles E., Chekhtman A., Cheung C.C., Chiang J., Ciprini S., Claus R., Cohen-Tanugi J., Conrad J., Cutini S., deAngelis A., dePalma F., Dermer C.D., Digel S.W., Do Couto E.Silva E., Drell P.S., Drlica-Wagner A., Favuzzi C., Fegan S.J., Ferrara E.C., Focke W.B., Fortin P., Fukazawa Y., Funk S., Fusco P., Gargano F., Gasparrini D., Germani S., Giglietto N., Giommi P., Giordano F., Giroletti M., Glanzman T., Godfrey G., Grenier I.A., Grove J.E., Guiriec S., Gustafsson M., Hadasch D., Harding A.K., Hayashida M., Hughes R.E., Jóhannesson G., Johnson A.S., Kamae T., Katagiri H., Kataoka J., Knödseder J., Kuss M., Lande J., Latronico L., Lemoine-Goumard M., Llena Garde M., Longo F., Loparco F., Lovellette M.N., Lubrano P., Madejski G.M., Mazziotta M.N., McEnery J.E., Michelson P.F., Mitthumsiri W., Mizuno T., Moiseev A.A., Monte C., Monzani M.E., Morselli A., Moskalenko I.V., Murgia S., Nakamori T., Nolan P.L., Norris J.P., Nuss E., Ohno M., Ohsugi T., Okumura A., Omodei N., Orlando E., Ormes J.F., Ozaki M., Paneque D., Parent D., Pesce-Rollins M., Pierbattista M., Piron F., Pivato G., Porter T.A., Rainò S., Rando R., Razzano M., Razzaque S., Reimer A., Reimer O., Reposeur T., Ritz S., Romani R.W., Roth M., Sadrozinski H.F.-W., Sbarra C., Schalk T.L., Sgrò C., Siskind E.J., Spandre G., Spinelli P., Strong A.W., Takahashi H., Takahashi T., Tanaka T., Thayer J.G., Thayer J.B., Tibaldo L., Tinivella M., Torres D.F., Tosti G., Troja E., Uchiyama Y., Usher T.L., Vandenbroucke J., Vasileiou V., Vianello G., Vitale V., Waite A.P., Winer B.L., Wood K.S., Wood M., Yang Z., Zimmer S., Fermi-LAT Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 011103.*
 7. *Ackermann M., Ajello M., Atwood W.B., Baldini L., Ballet J., Barbiellini G., Bastieri D., Baughman B.M., Bechtol K., Bellardi F., Bellazzini R., Belli F., Berenji B., Blandford R.D., Bloom E.D., Bogart J.R., Bonamente E., Borgland A.W., Brandt T.J., Bregeon J., Brez A., Brigida M., Bruel P., Buehler R., Burnett T.H., Busetto G., Buson S., Caliandro G.A., Cameron R.A., Caraveo P.A., Carlson P., Carrigan S., Casandjian J.M., Ceccanti M., Cecchi C., Çelik Ö., Charles E., Chekhtman A., Cheung C.C., Chiang J., Cillis A.N., Ciprini S., Claus R., Cohen-Tanugi J., Conrad J., Corbet R., Deklotz M., Dermer C.D., deAngelis A., dePalma F., Digel S.W., diBernardo G., Do Couto E.Silva E., Drell P.S., Drlica-Wagner A., Dubois R., Fabiani D., Favuzzi C., Fegan S.J., Fortin P., Fukazawa Y., Funk S., Fusco P., Gaggero D., Gargano F., Gasparrini D., Gehrels N., Germani S., Giglietto N., Giommi P., Giordano F., Giroletti M., Glanzman T., Godfrey G., Grasso D., Grenier I.A., Grondin M.-H., Grove J.E., Guiriec S., Gustafsson M., Hadasch D., Harding A.K., Hayashida M., Hays E., Horan D., Hughes R.E., Jóhannesson G., Johnson A.S., Johnson R.P., Johnson W.N., Kamae T., Katagiri H., Kataoka J., Kerr M., Knödseder J., Kuss M., Lande J., Latronico L., Lemoine-Goumard M., Llena Garde M., Longo F., Loparco F., Lott B., Lovellette M.N., Lubrano P., Makeev A., Mazziotta M.N., McEnery J.E., Mehlert J., Michelson P.F., Minuti M., Mitthumsiri W., Mizuno T., Moiseev A.A., Monte C., Monzani M.E., Moretti E., Morselli A., Moskalenko I.V., Murgia S., Nakamori T., Naumann-Godo M., Nolan P.L., Norris J.P., Nuss E., Ohsugi T., Okumura A., Omodei N., Orlando E., Ormes J.F., Ozaki M., Paneque D., Panetta J.H., Parent D., Pelassa V., Pepe M., Pesce-Rollins M., Petrosian V., Pinchera M., Piron F., Porter T.A., Profumo S., Rainò S., Rando R., Rapposelli E., Razzano M., Reimer A., Reimer O., Reposeur T., Ripken J., Ritz S., Rochester L.S., Romani R.W., Roth M., Sadrozinski H.F.-W., Saggini N., Sanchez D., Sander A., Sgrò C., Siskind E.J., Smith P.D., Spandre G., Spinelli P., Stawarz Ł., Stephens T.E., Strickman M.S., Strong A.W., Suson D.J., Tajima H., Takahashi H., Takahashi T., Tanaka T., Thayer J.B., Thayer J.G., Thompson D.J., Tibaldo L., Tibolla O., Torres D.F., Tosti G., Tramacere A., Turri M., Uchiyama Y., Usher T.L., Vandenbroucke J., Vasileiou V., Vilchez N., Vitale V., Waite A.P., Wallace E., Wang P., Winer B.L., Wood K.S., Yang Z., Ylinen T., Ziegler M., Fermi-LAT Collaboration // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 092004.*
 8. *Aguilar M., Alberti G., Alpat B., Alvino A., Ambrosi G., Andeen K., Anderhub H., Arruda L., Azzarello P., Bachlechner A., Barao F., Baret B., Barrau A., Barrin L., Bartoloni A., Basara L., Basili A., Batalha L., Bates J., Battiston R., Bazo J., Becker R., Becker U., Behlmann M., Beischer B., Berdugo J., Berges P., Bertucci B., Bigongiari G., Biland A., Bindi V., Bizzaglia S., Boella G., deBoer W., Bollweg K., Bolmont J., Borgia B., Borsini S., Boschini M.J., Boudoul G., Bourquin M., Brun P., Buénerd M., Burger J., Burger W., Cadoux F., Cai X.D., Capell M., Casadei D., Casaus J., Cascioli V., Castellini G., Cernuda I., Cervelli F., Chae M.J., Chang Y.H., Chen A.I., Chen C.R., Chen H., Cheng G.M., Chen H.S., Cheng L., Chernoplyokov N., Chikanian A., Choumilov E., Choutko V., Chung C.H., Clark C., Clavero R., Coignet G., Commichau V., Consolandi C., Contin A., Corti C., Costado Dios M.T., Coste B., Crespo D., Cui Z., Dai M., Delgado C., DellaTorre S., Demirköz B., Dennett P., Derome L., DiFalco S., Diaó X.H., Diago A., Djambazov L., Díaz C., von Doetinchem P., Du W.J., Dubois J.M., Duperay R., Duranti M., D'Urso D., Ego-*

- rov A., Eline A., Epling F.J., Eronen T., van Es J., Esser H., Falvard A., Fiandrini E., Fiasson A., Finch E., Fisher P., Flood K., Foglio R., Fohey M., Fopp S., Fouque N., Galaktionov Y., Galilee M., Gallin-Martel L., Gallucci G., García B., García J., García-López R., García-Tabares L., Gargiulo C., Gast H., Gebauer I., Gentile S., Gervasi M., Gillard W., Giovacchini F., Girard L., Goglov P., Gong J., Goy-Henningsen C., Grandi D., Graziani M., Grechko A., Gross A., Guerri I., de la Guía C., Guo K.H., Habiby M., Haino S., Hauler F., He Z.H., Heil M., Heilig J., Hermel R., Hofer H., Huang Z.C., Hungerford W., Incagli M., Ionica M., Jacholkowska A., Jang W.Y., Jinchi H., Jongmanns M., Journet L., Jungermann L., Karpinski W., Kim G.N., Kim K.S., Kirn Th., Kossakowski R., Koulemzine A., Kounina O., Kounine A., Koutsenko V., Krafczyk M.S., Laudi E., Laurenti G., Lauritzen C., Lebedev A., Lee M.W., Lee S.C., Leluc C., León Vargas H., Lepareur V., Li J. Q., Li Q., Li T.X., Li W., Li Z.H., Lipari P., Lin C.H., Liu D., Liu H., Lomtdzge T., Lu Y.S., Lucidi S., Lübelmeyer K., Luo J.Z., Lustermann W., Lv S., Madsen J., Majka R., Malinin A., Mañá C., Marín J., Martin T., Martínez G., Masciocchi F., Masi N., Maurin D., McInturff A., McIntyre P., Menchaca-Rocha A., Meng Q., Menichelli M., Mereu I., Millinger M., Mo D.C., Molina M., Mott P., Mujunen A., Natale S., Nemeth P., Ni J.Q., Nikonov N., Nozzoli F., Nunes P., Obermeier A., Oh S., Oliva A., Palmonari F., Palomares C., Paniccia M., Papi A., Park W.H., Pauluzzi M., Paus F., Pauw A., Pedreschi E., Pensotti S., Pereira R., Perrin E., Pessina G., Pierschel G., Pilo F., Piluso A., Pizzolotto C., Plyaskin V., Pochon J., Pohl M., Poireau V., Porter S., Pouxé J., Putze A., Quadrani L., Qi X.N., Rancoita P.G., Rapin D., Ren Z.L., Ricol J.S., Riihonen E., Rodríguez I., Roeser U., Rosier-Lees S., Rossi L., Rozhkov A., Rozza D., Sabellek A., Sagdeev R., Sandweiss J., Santos B., Saouter P., Sarchioni M., Schael S., Schinzel D., Schmanau M., Schwering G., Schulz von Dratzig A., Scolieri G., Seo E.S., Shan B.S., Shi J.Y., Shi Y.M., Siedenburger T., Siedling R., Son D., Spada F., Spinella F., Steuer M., Stiff K., Sun W., Sun W.H., Sun X.H., Tacconi M., Tang C.P., Tang X.W., Tang Z.C., Tao L., Tassan-Viol J., Ting Samuel C.C., Ting S.M., Titus C., Tomassetti N., Toral F., Torsti J., Tsai J.R., Tutt J.C., Ulbricht J., Urban T., Vagelli V., Valente E., Vannini C., Valtonen E., Vargas Trevino M., Vaurynovich S., Vecchi M., Vergain M., Verlaet B., Vescovi C., Vialle J.P., Viertel G., Volpini G., Wang D., Wang N.H., Wang Q.L., Wang R.S., Wang X., Wang Z.X., Wallraff W., Weng Z.L., Willenbrock M., Wlochal M., Wu H., Wu K.Y., Wu Z.S., Xiao W.J., Xie S., Xiong R.Q., Xin G.M., Xu N.S., Xu W., Yan Q., Yang J., Yang M., Ye Q.H., Yi H., Yu Y.J., Yu Z.Q., Zeissler S., Zhang J.G., Zhang Z., Zhang M.M., Zheng Z.M., Zhuang H.L., Zhukov V., Zichichi A., Zuccon P., Zurbach C., AMS Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 141102
9. Aguilar M., Aisa D., Alpat B., Alvino A., Ambrosi G., Andeen K., Arruda L., Attig N., Azzarello P., Bachlechner A., Barao F., Barrau A., Barrin L., Bartoloni A., Basara L., Battarbee M., Battiston R., Bazo J., Becker U., Behlmann M., Beischer B., Berdugo J., Bertucci B., Bigongiari G., Bindi V., Bizzaglia S., Bizzarri M., Boella G., de Boer W., Bollweg K., Bonnivard V., Borgia B., Borsini S., Boschini M.J., Bourquin M., Burger J., Cadoux F., Cai X.D., Capell M., Caroff S., Casaus J., Cascioli V., Castellini G., Cernuda I., Cervelli F., Chae M.J., Chang Y.H., Chen A.I., Chen H., Cheng G.M., Chen H.S., Cheng L., Chikarian A., Chou H.Y., Choumilov E., Choutko V., Chung C.H., Clark C., Clavero R., Coignet G., Consolandi C., Contin A., Corti C., Coste B., Crispoltoni M., Cui Z., Dai M., Delgado C., Della Torre S., Demirköz M.B., Derome L., Di Falco S., Di Masso L., Dimicoli F., Díaz C., von Doetinchem P., Donnini F., Du W.J., Duranti M., D'Urso D., Eline A., Epling F.J., Eronen T., Fan Y.Y., Farnesini L., Feng J., Fiandrini E., Fiasson A., Finch E., Fisher P., Galaktionov Y., Gallucci G., García B., García-López R., Gargiulo C., Gast H., Gebauer I., Gervasi M., Ghelfi A., Gillard W., Giovacchini F., Goglov P., Gong J., Goy C., Grabski V., Grandi D., Graziani M., Guandalini C., Guerri I., Guo K.H., Habiby M., Haino S., Han K.C., He Z.H., Heil M., Hoffman J., Hsieh T.H., Huang Z.C., Huh C., Incagli M., Ionica M., Jang W.Y., Jinchi H., Kanishev K., Kim G.N., Kim K.S., Kirn Th., Kossakowski R., Kounina O., Kounine A., Koutsenko V., Krafczyk M.S., Kunz S., La Vacca G., Laudi E., Laurenti G., Lazzizzera I., Lebedev A., Lee H.T., Lee S.C., Leluc C., Li H.L., Li J.Q., Li Q., Li Q., Li T.X., Li W., Li Y., Li Z.H., Li Z.Y., Lim S., Lin C.H., Lipari P., Lippert T., Liu D., Liu H., Lomtdzge T., Lu M.J., Lu Y.S., Luebelsmeyer K., Luo F., Luo J.Z., Lv S.S., Majka R., Malinin A., Mañá C., Marín J., Martin T., Martínez G., Masi N., Maurin D., Menchaca-Rocha A., Meng Q., Mo D.C., Morescalchi L., Mott P., Müller M., Ni J.Q., Nikonov N., Nozzoli F., Nunes P., Obermeier A., Oliva A., Orcinha M., Palmonari F., Palomares C., Paniccia M., Papi A., Pauluzzi M., Pedreschi E., Pensotti S., Pereira R., Pilo F., Piluso A., Pizzolotto C., Plyaskin V., Pohl M., Poireau V., Postaci E., Putze A., Quadrani L., Qi X.M., Rähä T., Rancoita P.G., Rapin D., Ricol J.S., Rodríguez I., Rosier-Lees S., Rozhkov A., Rozza D., Sagdeev R., Sandweiss J., Saouter P., Sbarra C., Schael S., Schmidt S.M., Schuckardt D., Schulz von Dratzig A., Schwering G., Scolieri G., Seo E.S., Shan B.S., Shan Y.H., Shi J.Y., Shi X.Y., Shi Y.M., Siedenburger T., Son D., Spada F., Spinella F., Sun W., Sun W.H., Tacconi M., Tang C.P., Tang X.W., Tang Z.C., Tao L., Tescaro D., Ting Samuel C.C., Ting S.M., Tomassetti N., Torsti J., Türkoğlu C., Urban T., Vagelli V., Valente E., Vannini C., Valtonen E., Vaurynovich S., Vecchi M., Velasco M., Vialle J.P., Wang L.Q., Wang Q.L., Wang R.S., Wang X., Wang Z.X., Weng Z.L., Whitman K., Wienkenhöver J., Wu H., Xia X., Xie M., Xie S., Xiong R.Q., Xin G.M., Xu N.S., Xu W., Yan Q., Yang J., Yang M., Ye Q.H., Yi H., Yu Y.J., Yu Z.Q., Zeissler S., Zhang J.H., Zhang M.T., Zhang X.B., Zhang Z., Zheng Z.M., Zhuang H.L., Zhukov V., Zichichi A., Zimmermann N., Zuccon P., Zurbach, C., AMS Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. P. 221102.
10. Abdollahi S., Ackermann M., Ajello M., Atwood W.B., Baldini L., Barbiellini G., Bastieri D., Bellazzini R., Bloom E.D., Bonino R., Brandt T.J., Bregeon J., Bruel P., Buehler R., Cameron R.A., Caputo R., Caragiulo M., Castro D., Cavazzuti E., Cecchi C., Chekhtman A., Ciprini S., Cohen-Tanugi J., Costanza F., Cuoco A., Cutini S., D'Ammando F., de Palma F., Desiante R., Digel S.W., Di Lalla N., Di Mauro M., Di Venere L., Drell P.S., Drlica-Wagner A., Favuzzi C., Focke W.B., Funk S., Fusco P., Gargano F., Gasparrini D., Giglietto N., Giordano F., Giroletti M., Green D., Guillemot L., Guiriec S., Harding A.K., Jogler T., Jóhannesson G., Kamae T., Kuss M., La Mura

- G., Latronico L., Longo F., Loparco F., Lubrano P., Maldera S., Malyshev D., Manfreda A., Mazziotta M.N., Michelson P.F., Mirabal N., Mitthumsiri W., Mizuno T., Moiseev A.A., Monzani M.E., Morselli A., Moskalenko I.V., Negro M., Nuss E., Orlando E., Paneque D., Perkins J.S., Pesce-Rollins M., Piron F., Pivato G., Porter T.A., Principe G., Rainò S., Rando R., Razzano M., Reimer A., Reimer O., Sgrò C., Simone D., Siskind E.J., Spada F., Spandre G., Spinelli P., Tajima H., Thayer J.B., Tibaldo L., Torres D.F., Troja E., Wood M., Worley A., Zaharijas G., Zimmer S., (Fermi-LAT Collaboration) // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. P. 082007.
11. Ambrosi G., An Q., Asfandiyarov R., Azzarello P., Bernardini P., Bertucci B., Cai M.S., Chang J., Chen D.Y., Chen H.F., Chen J.L., Chen W., Cui M.Y., Cui T.S., D'Amone A., de Benedittis A., De Mitri I., di Santo M., Dong J.N., Dong T.K., Dong Y.F., Dong Z.X., Donvito G., Droz D., Duan K.K., Duan J.L., Duranti M., D'Urso D., Fan R.R., Fan Y.Z., Fang F., Feng C.Q., Feng L., Fusco P., Gallo V., Gan F.J., Gao M., Gao S.S., Gargano F., Garrappa S., Gong K., Gong Y.Z., Guo D.Y., Guo J.H., Hu Y.M., Huang G.S., Huang Y.Y., Ionica M., Jiang D., Jiang W., Jin X., Kong J., Lei S.J., Li S., Li X., Li W.L., Li Y., Liang Y.F., Liang Y.M., Liao N.H., Liu H., Liu J., Liu S.B., Liu W.Q., Liu Y., Loparco F., Ma M., Ma P.X., Ma S.Y., Ma T., Ma X.Q., Ma X.Y., Marsella G., Mazziotta M.N., Mo D., Niu X.Y., Peng X.Y., Peng W.X., Qiao R., Rao J.N., Salinas M.M., Shang G.Z., Shen W.H., Shen Z.Q., Shen Z.T., Song J.X., Su H., Su M., Sun Z.Y., Surdo A., Teng X.J., Tian X.B., Tykhonov A., Vagelli V., Vitillo S., Wang C., Wang H., Wang H.Y., Wang J.Z., Wang L.G., Wang Q., Wang S., Wang X.H., Wang X.L., Wang Y.F., Wang Y.P., Wang Y.Z., Wen S.C., Wang Z.M., Wei D.M., Wei J.J., Wei Y.F., Wu D., Wu J., Wu L.B., Wu S.S., Wu X., Xi K., Xia Z.Q., Xin Y.L., Xu H.T., Xu Z.L., Xu Z.Z., Xue G.F., Yang H.B., Yang P., Yang Y.Q., Yang Z.L., Yao H.J., Yu Y.H., Yuan Q., Yue C., Zang J.J., Zhang C., Zhang D.L., Zhang F., Zhang J.B., Zhang J.Y., Zhang J.Z., Zhang L., Zhang P.F., Zhang S.X., Zhang W.Z., Zhang Y., Zhang Y.J., Zhang Y.Q., Zhang Y.L., Zhang Y.P., Zhang Z., Zhang Z.Y., Zhao H., Zhao H.Y., Zhao X.F., Zhou C.Y., Zhou Y., Zhu X., Zhu Y., Zimmer S., DAMPE Collaboration // arXiv:1711.10981v1 [astro-ph.HE] 29 Nov 2017.
 12. Adriani O., Akaike Y., Asano K., Asaoka Y., Bagliesi M.G., Bigongiari G., Binns W.R., Bonechi S., Bonghi M., Brogi P., Buckley J.H., Cannady N., Castellini G., Cecchia C., Cherry M.L., Collazuol G., di Felice V., Ebisawa K., Fuke H., Guzik T.G., Hams T., Hareyama M., Hasebe N., Hibino K., Ichimura M., Ioka K., Ishizaki W., Israel M.H., Javald A., Kasahara K., Kataoka J., Kataoka R., Katayose Y., Kato C., Kawanaka N., Kawakubo Y., Krawczynski H.S., Krizmanic J.F., Kuramata S., Lomtatze T., Maestro P., Marrocchesi P.S., Messineo A.M., Mitchell J.W., Miyake S., Mizutani K., Moiseev A.A., Mori K., Mori M., Mori N., Motz H.M., Munakata K., Murakami H., Nakahira S., Nishimura J., de Nolfo G.A., Okuno S., Ormes J.F., Ozawa S., Pacini L., Palma F., Papini P., Penacchioni A.V., Rauch B.F., Ricciarini S.B., Sakai K., Sakamoto T., Sasaki M., Shimizu Y., Shio-mi A., Sparvoli R., Spillantini P., Stolzi F., Takahashi I., Takayanagi M., Takita M., Tamura T., Tateyama N., Terasawa T., Tomida H., Torii S., Tsunesada Y., Uchiho-ri Y., Ueno S., Vannuccini E., Wefel J.P., Yamaoka K., Yanagita S., Yoshida A., Yoshida K., Yuda T., CALET Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 181101.
 13. Abeysekara A.U., Albert A., Alfaro R., Alvarez C., Álvarez J.D., Arceo R., Arteaga-Velázquez J.C., Avila Rojas D., Ayala Solares H.A., Barber A.S., Bautista-Eli-var N., Becerril A., Belmont-Moreno E., Ben Zvi S.Y., Berley D., Bernal A., Braun J., Brisbois C., Caballero-Mora K.S., Capistrán T., Carramiñana A., Casanova S., Castillo M., Cotti U., Cotzomi J., Coutiño de León S., De León C., De la Fuente E., Dingus B.L., Du Vernois M.A., Díaz-Vélez J.C., Ellsworth R.W., Engel K., Enríquez-Rivera O., Fiorino D.W., Fraija N., García-González J.A., Garfias F., Gerhardt M., González Muñoz A., González M.M., Goodman J.A., Hampel-Arias Z., Harding J.P., Hernández S., Hernández-Almada A., Hinton J., Hona B., Hui C.M., Hüntemeyer P., Iriarte A., Jardin-Blicq A., Joshi V., Kaufmann S., Kieda D., Lara A., Laurer R.J., Lee W.H., Lennarz D., León Vargas H., Linne-mann J.T., Longinotti A.L., Luis Raya G., Luna-García R., López-Coto R., Malone K., Marinelli S.S., Marti-nez O., Martinez-Castellanos I., Martínez-Castro J., Martínez-Huerta H., Matthews J.A., Miranda-Romag-noli P., Moreno E., Mostafá M., Nellen L., Newbold M., Nisa M.U., Noriega-Papaqui R., Pelayo R., Pretz J., Pérez-Pérez E.G., Ren Z., Rho C.D., Rivière C., Rosa-González D., Rosenberg M., Ruiz-Velasco E., Salazar H., Salesa Greus F., Sandoval A., Schneider M., Schorlem-mer H., Sinnis G., Smith A.J., Springer R.W., Surajba-li P., Taboada I., Tibolla O., Tollefson K., Torres I., Uk-watta T.N., Vianello G., Weisgarber T., Westerhoff S., Wisher I.G., Wood J., Yapici T., Yodh G., Younk P.W., Zepeda A., Zhou H., Guo F., Hahn J., Li H., Zhang H. // Science. 2017. V. 358. P. 911.
 14. Лозников В.М., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А. // Космич. исслед. 2013. Т. 51. С. 191.
 15. Лозников В.М., Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Ми-хайловская Л.А. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. С. 927.
 16. Лозников В.М., Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Ми-хайловская Л.А. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 693.
 17. Лозников В.М., Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Ми-хайловская Л.А. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 48.
 18. Лозников В.М., Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Ми-хайловская Л.А. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 765.
 19. Australian Government Bureau of Meteorology // Space Weather Services. 2017. <http://www.sws.bom.gov.au/Solar/1/6>.
 20. Hooper D., Linden T. // arXiv: 1711.07482v1 [astro-ph.HE]. 2017.
 21. Fang K., Bi X.-J., Yin P.-F., Yuan Q. // arXiv: 1803.02640v1 [astro-ph.HE]. 2018.