

Влияние близких источников на спектры электронов и позитронов

О.Н.Стрельникова¹, В.С. Птускин², Л.Г.Свешникова³

¹ МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет; olga.n.strelnikova@gmail.com

² НИИЯФ МГУ

³ ИЗМИРАН

Аннотация

В работе исследуется вклад близких источников, зарегистрированных в радио, рентгеновском и гамма диапазонах в последних экспериментах FERMI, Chandra, HESS в спектр электронов у Земли. Оценивается возможный вклад электрон-позитронных пар от магнитосфер гамма-пульсаров. В отличие от других работ при расчете спектра учитывается распределение источников по диску Галактики, временная зависимость спектров ускоренных электронов и одновременно (в [1] в настоящем сборнике) проводится расчет анизотропии протонов КЛ, - величины, также сильно зависящей от перечисленных выше параметров и накладывающей ограничения на выбор параметров расчета. Приведены результаты вариантов расчетов, в которых одновременно удастся объяснить и спектры электронов, и анизотропию протонов в области ТэВ-ных энергий.

Введение

Данные последних экспериментов (АТИК [2], HESS [3,4], Fermi [5]) показали превышение потока электронов у Земли в области энергий 300 ГэВ – 1 ТэВ относительно ожидаемого распределения электронов. Для объяснения данных перечисленных выше экспериментов, а также данных PAMELA по доле позитронов у Земли [6] предлагались самые разные гипотезы – от подбора параметров пространственного распространения источников [7] до проявления темной материи [8], а также гипотеза существенного вклада электрон-позитронных пар из магнитосфер близких пульсаров в космические лучи [8,9]. Для всех этих работ очень существенен вопрос - относительно какого фона считать этот избыток? Обычно фон рассчитывается с помощью кода GALPROP [10], в котором реализована диффузионная модель распространения КЛ в предположении «размазанного» распределения источников по диску Галактики. С другой стороны известно [11,12,13], что «размазанность» источников - слишком грубое приближение, так как высокоэнергичные электроны доходят только от близких источников. Близкие источники нельзя учитывать статистически из-за слишком больших флуктуаций, поэтому в ряде работ [13,11,12,14], анализировался вклад реальных близких сверхновых в спектр электронов у Земли. В настоящей работе мы рассчитываем фон электронов у Земли в рамках статистического подхода [15], разделяя источники на случайные далекие и старые и реальные близкие и молодые. При этом наша задача состоит в том, чтобы проверить, как влияют на спектр электронов у Земли

- 1) учет реальных близких сверхновых, пульсарных туманностей (PWN) и пульсаров;
- 2) учет распределения источников по диску Галактики;
- 3) учет зависимости максимальной энергии излучаемых частиц от возраста источника;
- 4) учет вклада излучения электрон-позитронных пар из магнитосфер пульсаров не только близких, но и далеких источников, содержащих пульсар;
- 5) в отличие от других работ мы попытались одновременно в рамках одного набора источников описать и спектры электронов и анизотропию протонов КЛ - характеристику, очень чувствительную к перечисленным выше параметрам расчета в области ТэВ-ных энергий (результаты расчета анизотропии приводятся в статье [1] в настоящем сборнике). При этом, в соответствии со стандартной моделью [15], делается основное предположение, состоящее в том, что и протоны, и электроны ускоряются на фронтах одних и тех же оболочек.

Авторы поддерживаются РФФИ, грант 10-02-01443

² Соавтор поддерживается РФФИ, грант 10-02-00110

1 Метод расчета спектра электронов у Земли

Для расчета спектра электронов у Земли мы использовали статистический подход [15], который заключается в суммировании вклада КЛ от каждого источника статистического ансамбля в Галактике. Этот подход основывается на решении упрощенного уравнения диффузии [15]. Спектр частиц от источника при этом подходе описывается функцией Грина, которая зависит от коэффициента диффузии КЛ $D(E)$ и учитывает границы Гало [15]

Поток электронов у Земли $F(E)$ от k источников, каждый из которых находится на расстоянии r_k от Земли, и излучил $t-t_{0k}$ лет назад спектр частиц $Q(E)$, равен

$$F(E) = \frac{c}{4\pi} N(E) = \frac{c}{4\pi} \sum_k N_k(E, r_k, t - t_{0k}), \quad (1)$$

где $N_k(E, r_k, t - t_{0k})$ - вклад в концентрацию электронов у Земли от k -того источника.

Для получения спектра электронов у Земли по формуле (1) все источники были разделены на две группы: близкие молодые, которые находятся на расстоянии не более 1.0 кпс от Земли и не старше $1 \cdot 10^5$ лет (назовем ее группа 1 – реальные источники), которые дают основной вклад в поток электронов с зарегистрированной энергией порядка сотен ГэВ, и все остальные (группа 2 –случайные источники). Флуктуации вкладов далеких и близких старых источников невелики, поэтому при расчете спектра электронов у Земли они задаются случайным образом по времени и расстоянию, а в качестве близких и молодых берутся реальные источники, зарегистрированные в радио, рентгеновском и гамма диапазонах в последних экспериментах FERMI[25], Chandra[16], HESS[3, 4]. Список источников группы 1 приведен в статье [1] в Приложении 1.

При низких энергиях (ниже 50 ГэВ) существенны эффект доускорения и потери энергии на кулоновское взаимодействия, магнитотормозное излучение и ионизацию, поэтому в настоящей работе для получения спектра электронов у Земли при энергиях ниже 50 ГэВ используется код GALPROP [10], а при более высоких энергиях спектр получается путем сложения вкладов от точечных источников по формуле (1).

2 Особенности распределения источников космических лучей по диску Галактики

Для выбора группы близких источников было проанализировано несколько последних каталогов источников: пульсаров и сверхновых в радиоизлучении [17,18], пульсарных туманностей в рентгеновском излучении (PWN)[16], и гамма-пульсаров [3, 4, 5]. Таким образом, в отличие от других работ при составлении списка близких источников мы опирались не только на каталог сверхновых. Поскольку частоты рождения обычных и гамма-пульсаров сравнимы с частотой рождения оболочек сверхновых, вспыхивающих в нашей и других спиральных Галактиках, можно считать, что пульсары - остатки объектов, в которых когда-то была оболочка, или она по какой-то причине не видна в настоящее время. Доля сверхновых типа Ia (в которых отсутствует пульсар) – около 25%.

Из приведенных выше каталогов были выбраны источники (они приведены в [1]), находящиеся на расстоянии не более 1,5 кпс от Земли по двум причинам: для них существующие методы определения расстояния и возраста дают наиболее точные результаты, и из-за потерь энергии на синхротронное излучение и обратный Комптон-эффект электроны с регистрируемой на Земле энергией порядка сотен ГэВ не могут приходиться с больших расстояний [15].

Поскольку появилась работа [7], в которой утверждалось, что рукавная структура Галактики существенно влияет на форму спектра электронов и позитронов, то мы исследовали этот вопрос и учитывали рукавную структуру в распределении источников в расчетах. Положение выбранных молодых ($T < 2 \times 10^5$ лет) источников было нанесено на схему расположения спиральных рукавов Галактики (рис.1). Из рис. 1 видно, что молодые источники в основном сосредоточены на границах спиральных рукавов. Для старых источников такой выраженной структуры в распределении нет. Для случайных источников мы предполагали, что только коллапсирующие сверхновые типа II, Ibс (их около 75%) [19] следуют рукавной структуре, так как они из-за относительно короткого времени эволюции не успевают отойти от мест активного звездообразования, сосредоточенных в рукавах. Для сверхновых Ia было задано равномерное распределение по Галактике, так как сверхновые этого типа - взрывающиеся белые карлики, успевающие далеко отойти от мест активного звездообразования (их около 25% среди всех сверхновых).

Точное положение спиральных рукавов Галактики не установлено, при моделировании границ рукавов мы опирались на работы [20, 21, 22] [23]. Распределение сверхновых по радиусу Галактики имеет пики и некоторый максимум на 4 кпс [23], поэтому при задании рукавной структуры в расчете мы

следили, чтобы интегральное распределение в целом не противоречило данным работы [23]. Оказалось, что к рукавной структуре в распределении источников чрезвычайно чувствительно направление анизотропии КЛ, подробно исследованное в [1], а утверждение о сильной чувствительности спектра электронов и позитронов к рукавной структуре, сделанные в [7], не подтвердились.

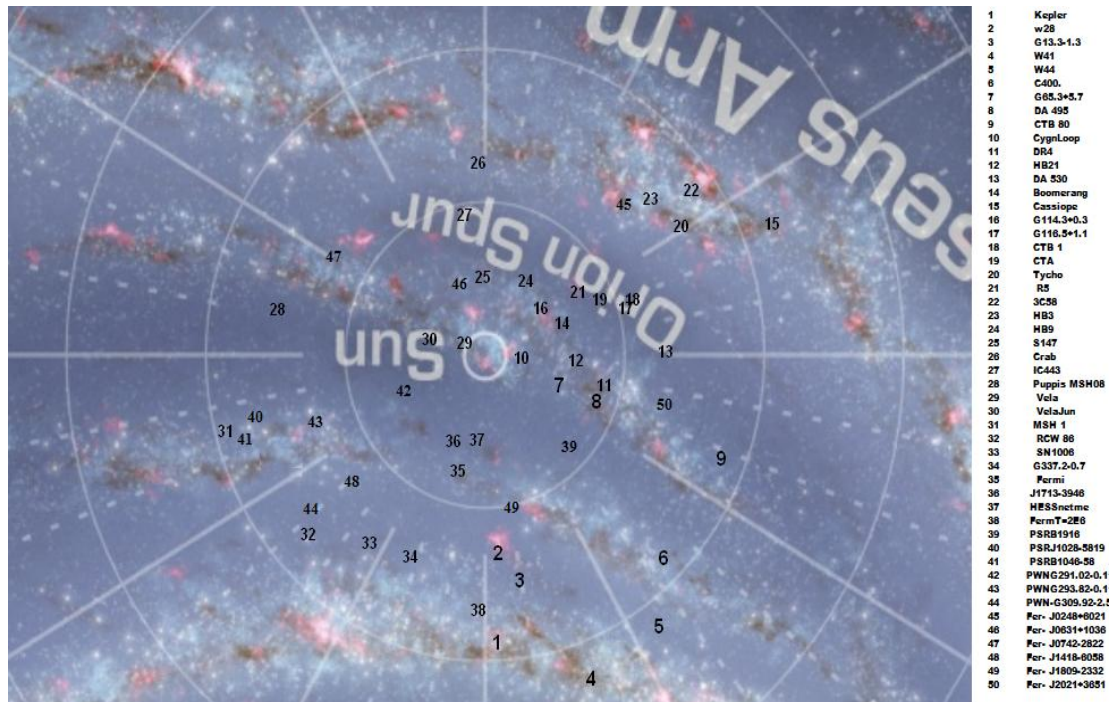


Рис. 1. Расположение близких источников (находящихся на расстоянии не больше 1,5 кпс от Земли) в сравнении с рукавной структурой Галактики, полученной телескопом Спитцер (художественное изображение)[20].

3 Временная зависимость излучения в оболочках сверхновых

В своем расчете мы учли установленную относительно недавно зависимость энергии излучаемых частиц от времени согласно работе [24]. В этой работе был рассмотрен механизм ускорения космических лучей в оболочках сверхновых с учетом эффектов усиления магнитного поля вокруг фронта ударной волны и показано, что максимальная энергия испускаемых оболочкой сверхновой частиц зависит от возраста остатка – она с течением времени уменьшается. Этот вывод подтверждается тем фактом, что остатки сверхновых возрастом несколько тысяч лет не видны в ТэВ-ном диапазоне в гамма-излучении, так как для возникновения гамма-квантов такой энергии необходимы заряженные частицы еще более высокой энергии, которых в остатке нет ввиду его возраста, тогда как некоторые молодые остатки видны в ТэВ-ных гамма-квантах. Ускоренные частицы начинают покидать остаток с началом стадии Седова, остаток излучает частицы в течение всей жизни оболочки, и максимальная энергия E_{mg} убегающих из остатка частиц падает с возрастом остатка [24], так как уменьшается скорость ударной волны. В соответствии с [24] нами была получена зависимость максимальной энергии убегающих протонов E_{mg} от возраста остатка t :

$$\lg E_{mg} = 12.84 - 5.55 \lg t + 1.51 \lg t^2 - 0.17 \lg t^3. \quad (2)$$

Спектр электронов формируется сложнее, т.к. с усилением магнитного поля должна расти максимальная энергия, но и резко растут потери энергии электронами на синхротронное излучение. Для расчета спектра электронов мы выбрали зависимость

$$\lg E_{mg} = 5 - 1.614(\lg t - 1.91) \quad (3)$$

Зависимости (2,3) означают, что при $t=100$ лет начинают излучаться протоны с энергией 2.6 ПэВ и электроны с энергией 70 ТэВ, а при возрасте остатка $t=10^5$ лет, максимальная энергия образующихся протонов 40 ГэВ, а электронов – 1 ГэВ. При расчете спектров электронов у Земли мы пользовались следующими предположениями: 1) у всех источников одинаковая зависимость $E_{mg}(t)$, 2) источник

начинает излучать в возрасте 100 лет, 3) источник в течение всей своей жизни с некоторым шагом по времени испускает убегающие частицы, спектр которых имеет гауссову форму (рис.2).

Итак, энергия, при которой спектр убегающих в момент t частиц имеет максимум, зависит от времени по закону (3). Сам спектр убегающих в момент t частиц имеет гауссову форму:

$$dQ = \frac{A}{E} \cdot \exp\left(-\frac{(\lg E - \lg E_{mg})^2}{2 \cdot 0.03}\right), \quad (5)$$

где

$$A = 2.54 \cdot 10^8 \cdot E_{mg}^{-0.8} \cdot \exp\left(-\frac{E_{mg}}{50000}\right). \quad (6)$$

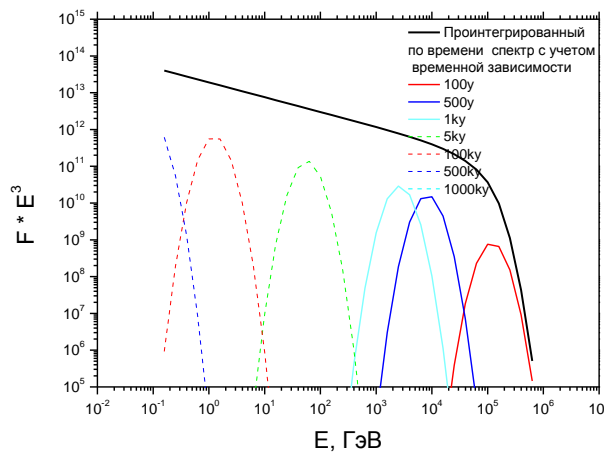


Рис. 2. Спектр электронов в источнике. Цветные кривые – спектры убегающих частиц, испущенных источником на разных стадиях: красная сплошная – 100 лет, синяя сплошная – 500 лет, бирюзовая сплошная – 1000 лет, зеленая штриховая – 5000 лет, красная штриховая – 100000 лет. Черная кривая – проинтегрированный по времени спектр убегающих частиц.

Выше приведены величины E_0 , $A(E_{mg})$, dQ подобранные таким образом, чтобы при интегрировании по времени получилась степенная зависимость от энергии $Q(E) = Q_0 E^{-2.4}$. Рассчитанный спектр нормировался к эксперименту по интенсивности в точке 50 ГэВ. Учет зависимости $E_{mg}(t)$ приводит к «сужению» спектра, которое объясняется тем, что чем ниже энергия частицы, тем больше должен быть возраст источника для ее испускания. Если источник сравнительно молодой, то частицы низких энергий еще не успели излучиться или дойти до Земли.

4 Результат расчета спектра электронов у Земли из оболочек сверхновых

При расчете потоков электронов от далеких и старых источников наиболее существенными параметрами оказываются плотность источников и время жизни КЛ в Галактике, которые задают пространственные и временные границы распределения статистического набора случайных источников. Мы использовали общепринятые параметры: - радиус Галактики 15 кпс, высота гало $H=4$ кпс, время жизни $T=1.4 \times 10^8$ лет при энергии 1 ГэВ (так как должно выполняться соотношение $H=(D \times T)$ [15]). Отсюда, задавая частоту вспышек сверхновых в Галактике 1/50 лет, мы получаем полное число источников - 2.9 млн за время жизни T . Близкие и молодые источники выбирались из Табл. 1, приведенной в Приложении в статье [1]. Интенсивность излучения в каждом близком источнике предполагалась равной интенсивности от случайного источника. Поскольку из расчетов по GALPROP следует [10], что наиболее удачный вариант для описания протонов и электронов в приближении непрерывных источников дает модель с доускорением со слабым ростом коэффициента диффузии в области более 30 ГэВ ($D \sim 4 \times 10^{29} (E_{ГэВ}/1000)^{0.33} \text{ см}^2/\text{сек}$), спектрами в источнике и электронов и

протонов с показателем степени $\gamma = -2.4$, то и в рамках статистического подхода мы использовали такие параметры.

Спектр электронов был рассчитан по формуле (1). Величина максимальной энергии электронов в источнике $E_{cut} \approx 2$ ТэВ выбиралась из условия описания данных HESS [3,4], явно указывающих на загиб спектра в этой области энергий. Результаты расчетов спектра электронов у Земли в различных предположениях о близких источниках представлены на рис. 3. На рисунке зеленая кривая – результат расчета спектра электронов у Земли только от случайных источников. Эта кривая имеет дисперсию около 25%, мы не привели ее здесь. Видно, что учет только случайных далеких источников не дает возможность описать экспериментальные данные. При включении всех близких источников (из Приложения [1]) получается спектр, представленный на рис. 3 черной кривой. В целом вариант расчета спектра электронов у Земли от источников обеих групп и с учетом возможных флуктуаций фона случайных далеких источников неплохо воспроизводит экспериментальные спектры электронов (пик АТИКа [2] не описывается такими расчетами ни в каких предположениях).

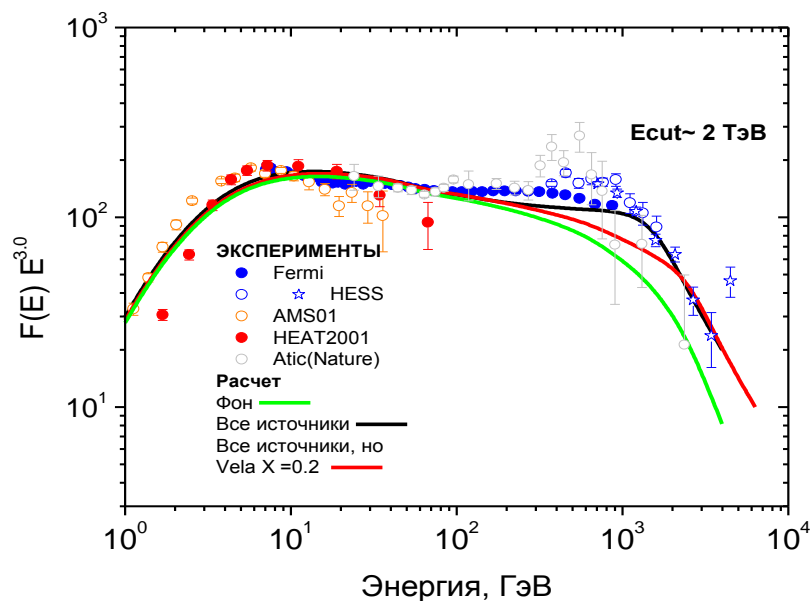


Рис. 3 Спектр электронов у Земли, рассчитанный для варианта только далеких и старых источников (зеленая кривая), для всех источников (черная кривая), для всех источников, но вклад Vela X понижен в 5 раз по сравнению со средним (красная кривая).

Одно из условий настоящего расчета состояло в предположении, следуемом из стандартной модели происхождения КЛ, что и протоны и электроны образуются в одних и тех же источниках – в оболочках сверхновых. В параллельной статье [1] показано, что предположение, что один из ближайших и мощных источников, зарегистрированный во всех диапазонах излучений, Vela X излучает столько же протонов, сколько средняя сверхновая, противоречит данным анизотропии. Кроме того, ТэВ-ное гамма – излучение Vela X зарегистрировано из магнитосферы пульсара, а не из его оболочки [13,4]. На рис. 3 мы приводим вариант расчета (красная кривая) с уменьшенным в 5 раз по сравнению со средней сверхновой вкладом Vela X. Как видно из рисунка, при малом вкладе Vela X остается некоторая разница между наблюдаемым спектром и результатом нашего расчета. Для преодоления этого различия можно варьировать различные параметры распространения и источников, но мы рассмотрим вариант учета излучения электрон-позитронных пар из магнитосфер пульсаров.

5 Результат расчета вклада электронов у Земли из магнитосфер пульсаров

На существование электронов и позитронов с энергией до сотен ТэВ в магнитосферах пульсаров указывают наблюдения высокоэнергичного гамма- излучения из пульсарных туманностей и гамма-пульсаров. Интенсивность испускания пульсаром $e+e-$ пар зависит от его свойств, и на данный момент

нет общепринятого теоретического предсказания относительно спектра и нормировки потока. Неясно и то, как и когда электрон-позитронный поток покидает пульсар.

Мы в своих расчетах будем следовать работе [25], в которой уточнены расстояния для части гамма-пульсаров, зарегистрированных в эксперименте Fermi, по сравнению с [26], и рассматривается вклад близких гамма-пульсаров в потоки электронов и позитронов у Земли. Мы повторим этот расчет, но кроме близких пульсаров учтем вклад случайных далеких и старых источников, используя параметры близких пульсаров в качестве средних характеристик всех пульсаров. Частота образования гамма-пульсаров в Галактике составляет около 1/ 50 лет [26], полное число случайных пульсаров оказывается равным 3×10^6 . Реальные близкие пульсары выбирались из каталога гамма-пульсаров [25].

Так как точность определения расстояний и возраста для пульсаров значительно выше, чем для сверхновых, то мы расширили круг объектов, попадающих в группу близких источников (группу 1): $R=1.5$ кпс (вместо 1 кпс для сверхновых) и $T=2 \times 10^5$ лет (вместо 1×10^5 лет для сверхновых).

В работе [25] поток $e+e-$ пар из магнитосфер пульсаров рассчитывается по формуле

$$Q(E_{in}, t, \vec{r}) = Q_0 \left(\frac{E_{in}}{1 \text{ GeV}} \right)^{-\Gamma} \exp[-E_{in} / E_{cut}] \delta(t - t_0) \delta(\vec{r}), \quad (8)$$

где Q_0 - нормировочный множитель, E_{in} - энергия электрона в источнике, E_{cut} - максимальная энергия электронов из магнитосферы пульсара, $t - t_0$ - возраст пульсара и $|\vec{r}|$ - расстояние от Земли до источника, Γ - спектральный индекс. Для пульсаров из каталога Fermi-LAT [26] величина Γ распределена между 1 и 2, и это распределение имеет пики при 1.3 и 1.7. В расчете мы берем $\Gamma = 1.6$, $E_{cut} \approx 2T \text{ эВ}$. Мы предполагаем, что электроны и позитроны не способны проникнуть через оболочку сверхновой, и излучение от пульсара появляется только тогда, когда оболочка рассеется, то есть пульсар импульсно излучает в возрасте 10^5 лет.

Нормировочный множитель Q_0 в формуле (8) для пульсаров из каталога Fermi, для которых известна величина \dot{E} , согласно [25] находится из условия

$$\int_{n_e}^{\infty} E_{in} \times Q(E_{in}) dE_{in} = E_{out} = \eta \frac{\dot{E} t_{ch}^2}{\tau}, \quad (9)$$

где t_{ch} - характеристический возраст пульсара, $\tau \approx 10^4$ л, \dot{E} - скорость потерь энергии и $\eta = 0.4$ - эффективность образования электронов и позитронов, E_{out} - энергия, переходящая в энергию e^+e^- пар, которая, для близких известных пульсаров, рассматриваемых в работе [25], в среднем составила 10^{48} эрг. На первом этапе расчетов мы и для случайных пульсаров группы 2 полагали $E_{out} = 10^{48}$ эрг.

Мы провели расчеты с несколькими наборами параметров по формулам (8,9) и сравнили с экспериментальными спектрами электронов. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Из рис. 4 видно, что вклад электронов и позитронов от близких реальных пульсаров (в которых полная энергия в $e+e-$ пары составляет $E_{out}=10^{48}$ эрг согласно [25]), существенен только в области высоких энергий (зеленая кривая). Если дополнительно учитываем и далекие старые пульсары с той же величиной $E_{out} = 10^{48}$ эрг (синий пунктир), то результат начинает резко противоречить эксперименту. Для согласования с экспериментом нужно предположить, что в среднем гамма-пульсары в $e+e-$ пары отдают $E_{out}=3 \times 10^{46}$ эрг (голубая линия), тогда суммарный вклад из оболочек сверхновых и магнитосфер пульсаров очень хорошо описывает эксперимент (черная кривая). Уменьшение величины E_{out} в нашем расчете эквивалентно предположению, что только несколько процентов пульсаров генерируют электрон-позитронные пары высоких энергий.

Далее нами был рассчитан спектр доли позитронов от рассмотренной выше совокупности источников – оболочек сверхновых и пульсаров, в предположении равного содержания электронов и позитронов в потоке от пульсаров, а поток вторичных позитронов рассчитывался с помощью GALPROP. На рис. 4 приведены результаты расчетов доли позитронов в сравнении с экспериментальными данными PAMELA [6]. Как видно, учет вклада гамма-пульсаров позволяет не только согласовать экспериментальные и расчетные спектры электронов, но и объяснить наблюдающийся рост позитронов, зарегистрированный в эксперименте PAMELA.

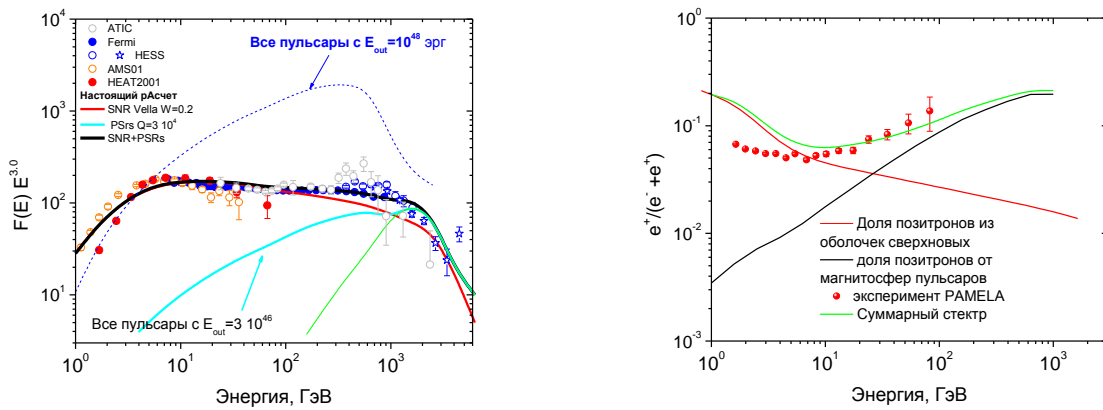


Рис. 4. Экспериментальные спектры электронов в сравнении с расчетными спектрами из оболочек сверхновых (красная кривая, вклад Vela X=0.2). Остальные кривые – результаты расчета вклада электронов и позитронов из магнитосфер пульсаров по формуле (16). Зеленая кривая – расчетный спектр электронов от реальных близких гамма-пульсаров. Синий пунктир – расчетный спектр электронов от реальных близких пульсаров и случайных далеких в предположении $E_{out}=10^{48}$ эрг. Голубая кривая – расчетный спектр от близких и случайных далеких пульсаров в предположении $E_{out}=3 \times 10^{46}$ эрг. Черная кривая - суммарный вклад из оболочек сверхновых и магнитосфер пульсаров. Правый рисунок – расчет доли позитронов в потоке $e+e-$.

Заключение

В работе рассчитан спектр электронов у Земли с учетом реальных близких и молодых сверхновых и пульсаров из новейших каталогов и случайных старых и далеких источников. При этом учтены рукавная структура в распределении случайных источников и зависимость энергии излучаемых частиц от возраста источника. Кроме того, мы попытались одновременно в рамках одного набора источников описать и спектры электронов и анизотропию протонов КЛ [1], предполагая, что и электроны, и протоны образуются в одних и тех же оболочках сверхновых. Из сравнения расчетной анизотропии с экспериментом было получено ограничение на вклад в поток электронов у Земли пульсара Vela X (менее 20% от средней сверхновой).

Показано, что при зависимости коэффициента диффузии $D \sim 4 \times 10^{29} (E_{ГэВ}/1000)^{0.33}$ см²/сек и степенном спектре электронов в источнике с показателем степени $\gamma=2.4$ экспериментальный спектр электронов удастся описать. Но учет ограничения вклада Vela X приводит к недостатку электронов высоких энергий в расчете (рис. 3). Одним из вариантов «заполнения» этой разницы является учет возможного вклада в поток электрон-позитронных пар магнитосфер гамма-пульсаров (рис. 4), полученный в следующих предположениях – полная энергия, выделяемая в электрон-позитронные пары в среднем по Галактике $E_{out} < 3 \times 10^{46}$ эрг, спектр $\gamma \sim 1.6$, частота рождения 1/50 лет. Эта гипотеза хороша тем, что дает возможность с хорошей точностью объяснить не только спектры электронов, но и рост позитронов КЛ, зарегистрированных в эксперименте PAMELA [6].

Список литературы

- [1] Л.Г. Свешникова, В.С. Птускин, О.Н. Стрельникова. Анализ возможности описания амплитуды и фазы анизотропии протонов и спектров электронов космического излучения в области энергий около 1 ТэВ в рамках одного набора близких источников. PCR_5, настоящий сборник.
- [2] Chang et al. [ATIC Collaboration], Nature 456 (2008) 362.
- [3] F. Aharonian et al. [H.E.S.S. Collaboration], Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 261104.
- [4] F. Aharonian et al. [H.E.S.S. Collaboration], astro-ph/0905.0105 (2009)
- [5] A.A. Abdo et al. 2009 [Fermi collaboration], Phys. Rev. Lett. 102, (2009) 181101.
- [6] O. Adriani et al. [PAMELA Collaboration], Nature 458 (2009b) 607.
- [7] N. Shaviv et al. Inhomogeneity in cosmic ray sources as the origin of the electron spectrum and the PAMELA anomaly. Physical review letters, PRL 103, 111302 (2009)
- [8] D. Malyshev et al. Pulsars versus dark matter interpretation of ATIC/PAMELA. Astro-ph/0903.1310v2
- [9] D. Grasso et al. On possible interpretations of the high energy electron-positron spectrum measured by the Fermi Large Area Telescope. Astro-ph/0905.0636v3

- [10] A.W. Strong, I.V. Moskalenko, Propagation of cosmic ray nuclei in the Galaxy. *Astrophys. J.* 509, 212 (1998).
- [11] V.S. Ptuskin, F.C. Jones, E.S. Seo, R. Sina. Effect of random nature of cosmic ray sources – Supernova remnants on cosmic ray intensity fluctuations, anisotropy, and electron energy spectrum. . *Adv. In Sp. Research* (2005)
- [12] Lagutin, A.A., Nikulin, Y.A. Fluctuations and anisotropy of cosmic rays in the Galaxy. *JETP* 81, 825–830, 1995.;
- [13] T. Kobayashi et al. The most likely sources of high-energy cosmic-ray electrons in supernova remnants. *The Astrophysical J.*, 601:340-351, 2004.
- [14] А.А. Лагутин. Спектр электронов у Земли.
- [15] Березинский В.С., Буланов С.В., Гинсбург В.Л., Догель В.А., Птускин В.С. *Астрофизика космических лучей*. М.: Наука, (1990).
- [16] O. Kargaltsev and G. G. Pavlov. Pulsar Wind Nebulae in the Chandra Era. *Astro-ph/0801.2602v2*.
- [17] R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh and M. Hobbs. The ATNF Pulsar Catalogue. *Astro-ph/0412641v1*
- [18] D. A. Green. A revised Galactic supernova remnant catalogue. *Astro-ph/0905.3699v2*
<http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/>
- [19] R.J. McMillani et al. Constraining the ages of supernova progenitors I. Supernovae and spiral arms. *The Astrophysical J.* 473:707-712, 1996.
- [20] A roadmap to the Milky Way <http://spitzer.caltech.edu/images/1925-ssc2008-10b-A-Roadmap-to-the-Milky-Way-Annotated->
- [21] P. Englmaier, M. Pohl, and N. Bissantz. Milky Way Spiral Arm Pattern/ 3D distribution of molecular gas. [arXiv:0812.3491v1](https://arxiv.org/abs/0812.3491v1)
- [22] Y. Xu, M. J. Reid, X. W. Zheng, K. M. Menten The Distance to the Perseus Spiral Arm in the Milky Way. *Astro-ph/0512223v1*
- [23] G. Case and Bhattacharya. Revising the galactic supernova remnant distribution. *A&A Supplement. Ser.120*, p.437.
- [24] V. Ptuskin, V.Zirakashvili. Limits on diffusive shock acceleration in supernova remnants in the presence of cosmic-ray streaming instability and wave dissipation. *Astro-ph/0302053v1*
- [25] Gendeleev L. The Contribution of Fermi Gamma-Ray Pulsars to the local Flux of Cosmic-Ray Electrons and Positrons. *Astro-ph 1001.4540v1*
- [26] A. A. Abdo et al (Fermi collaboration). The First Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars. *Astro-ph/0910.1608v1*