

На правах рукописи

Стрельникова Ольга Николаевна

**Исследование влияния близких источников на спектры и анизотропию  
космических лучей**

01.04.23 – физика высоких энергий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2012

Работа выполнена на кафедре физики космоса физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

***Научный руководитель:***

*Свешникова Любовь Георгиевна*

доктор физ. - мат. наук, ведущий научный сотрудник

***Официальные оппоненты:***

*Зиракашвили Владимир Николаевич*

доктор физ.- мат. наук, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (г. Троицк), ведущий научный сотрудник

*Лагутин Анатолий Алексеевич*

доктор физ. - мат. наук, Алтайский государственный университет, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и теоретической физики (г. Барнаул)

***Ведущая организация:***

Учреждение Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН (г. Москва)

Защита состоится «1» июня 2012 года в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д501.001.77, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119234, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-й корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 215

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2012 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук, профессор

С.И.Страхова

## **Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена исследованию влияния близких молодых источников космических лучей на спектры и анизотропию ядерной и электронной компонент космических лучей у Земли. В работе разрабатывается методика расчета этих характеристик на основе современных представлений о свойствах источников и распространении космических лучей, а также составляется каталог близких молодых источников по данным новейших гамма-астрономических экспериментов. С помощью разработанной методики были рассчитаны спектр и анизотропия ядерной компоненты в области энергий ТэВ-ПэВ и электронной компоненты в области энергий ГэВ-ТэВ. Из сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными получены ограничения на некоторые характеристики процессов распространения и свойства источников, а также подтверждения правильности современных общих представлений о процессах распространения и источниках космических лучей.

### **Актуальность темы**

Актуальность проведенного исследования определяется тем, что в свете появления новых данных о спектрах КЛ и их анизотропии у Земли появилось множество гипотез, объясняющих поведение той или иной характеристики КЛ, чувствительной к источникам, но при этом не «проверенных» на влияние на другие характеристики. В проведенной работе исследуется влияние фиксированного набора близких источников одновременно на все эти характеристики КЛ.

Тема исследования актуальна также по причине активных поисков проявлений темной материи, для которых требуется знание «фонового» спектра электронов, над которым следует искать превышение.

### **Цель работы**

Цель диссертационной работы заключается в создании методики исследования, создании модели источников космических лучей в Галактике и интерпретации спектров, амплитуды и направления анизотропии космических лучей с Земли с использованием этой методики.

### **Научная новизна работы**

В диссертации впервые:

1. Развита методика исследования влияния близких источников на спектры и анизотропию космических лучей у Земли, в котором одновременно учтен вклад реальных близких молодых источников в потоки космических лучей у Земли, свойства различных типов галактических источников, зависимость максимальной энергии «убегающих» частиц от возраста остатка. Метод был применен к исследованию влияния близких источников на спектры и анизотропию ядерной и электронно-позитронной компоненты космических лучей одновременно.

2. Учтен в расчетах метод экспериментального измерения «двумерной» анизотропии, и показано его влияние на результаты расчета амплитуды и направления анизотропии ядерной компоненты космических лучей.

3. Найдены однородные приближения к диффузионным моделям распространения, реализованным в GALPROP.

4. По соотношению потоков первичных ядер получены оценки энергетической зависимости толщи вещества, пройденного космическими лучами до выхода из Галактики.

5. Получены ограничения на возможный вклад магнитосфер пульсаров в потоки электронов и позитронов у Земли, рассчитанные с учетом вклада близких источников, которые в значительной степени определяют этот фон при энергиях в области ГэВ-ТэВ.

## **Основные научные результаты**

1. Разработана модель для исследования влияния близких молодых источников космических лучей на анизотропию, спектры ядерной компоненты в области энергий ТэВ-ПэВ и электронной компоненты в области ТэВ-ных энергий. Модель впервые учитывает ряд существенных характеристик источников, процессов ускорения и распространения космических лучей. Создано математическое обеспечение для расчета спектров и анизотропии космических лучей у Земли согласно предложенной модели.

2. Создан сводный каталог потенциальных близких молодых источников по данным последних гамма-астрономических экспериментов и проанализирована полнота их статистической выборки. Показано отсутствие близких неидентифицированных источников.

3. Проведено исследование различных методов расчета распространения космических лучей от источников до Земли. Получен вывод о применимости однородной модели распространения для расчетов потоков стабильных ядер.

4. Получены аналоги толщи пройденного вещества для версии диффузионной модели, реализованной в широко распространенной программе GALPROP.

5. Получена оценка зависимости толщи пройденного вещества от жесткости в ТэВ-ной области энергий по спектрам первичных ядер.

6. Показано, что интерпретация спектров и анизотропии ядер и электронов в различных энергетических интервалах в рамках единого фиксированного набора близких источников в целом подтверждает стандартную модель происхождения КЛ в остатках сверхновых. Сильное

изменение какого–либо параметра построенной модели влечет появление противоречия между результатами расчета и экспериментальными данными.

### **Практическая значимость работы**

Результаты работы могут быть использованы в обучающих курсах; составленный каталог потенциальных близких источников и разработанное математическое обеспечение могут быть использованы для проверки гипотез, объясняющих структуру спектра и анизотропии космических лучей у Земли.

### **Вклад автора**

1. Разработка программы для проведения расчетов спектров и анизотропии ядерной и электронно-позитронной компоненты космических лучей согласно предложенной методике.
2. Составление каталога близких источников.
3. Модификации программы GALPROP и проведении расчетов с ее помощью для исследования распространения космических лучей от источников до Земли.

### **Апробация результатов**

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах НИИЯФ МГУ, а также на следующих конференциях:

- 1) 31 международной конференции ICRC (г. Лодзь, Польша, 2009 г.),
- 2) 32 международной конференции ICRC (г. Пекин, Китай, 2011 г.),
- 3) 31 Всероссийской конференции по космическим лучам (г. Москва; Россия, 2010 г.),
- 4) 12 международной конференции ICATPP (г. Комо, Италия, 2010),

- 5) международной научной конференции «Ломоносов-2009» (г. Москва, Россия, 2009 г.),
- 6) международной научной конференции «Ломоносов-2010» (г. Москва, Россия, 2010 г.).

Результаты работы изложены в 9 публикациях (из них 4 в реферируемых журналах, 2 в трудах всероссийских конференций и 3 в трудах международных конференций).

### Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, содержит 48 рисунков и 4 таблицы; список литературы включает 145 наименований. Объем диссертации 127 страниц.

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется основная цель, новизна работы, а также перечисляются основные научные результаты и выводы.

**В первой главе** проводится анализ применения широко используемых методов и моделей распространения заряженных частиц космических лучей от источников к Земле: программы GALPROP (численной реализации диффузионной модели с источниками, распределенными в виде гладкой функции по диску Галактики) [1], однородной модели [2, 3], статистического подхода, учитывающего стохастическую природу источников [4, 5, 6, 7].

В первой главе предложен метод сравнения диффузионной и однородной моделей распространения, который основывается на исследовании зависимости эффективного пробега истекания  $X_{eff}$  от сечения взаимодействия ядер космических лучей с межзвездной средой. Показано, что однородная модель является адекватным приближением к диффузионной модели для задачи расчета распространения тяжелых стабильных ядер КЛ с

использованием единственного параметра – эффективного пробега истекания  $X_{eff}$ , зависящего от жесткости частицы  $R$ . Найдены зависимости пробега истекания  $X_{eff}(R)$ , соответствующие трем моделям распространения в GALPROP [1].

Проведенные аналитические расчеты в рамках простых диффузионных моделей показали, что отклонение величины  $X_{eff}$ , полученной в рамках диффузионной модели распространения в Галактике с высотой гало  $H$ , от результатов однородной модели при больших сечениях взаимодействия зависит от разницы между шириной диска газа  $h_g$  и диска источников  $h_s$ , а также от сечения взаимодействия частицы с ядрами межзвездной среды  $\sigma$ , коэффициента диффузии  $D$ , плотности газа  $n$  и скорости частицы  $v$ :

$$\frac{\delta X_{ef}}{X_{ef}(\sigma=0)} \approx \frac{\sigma n v h_g^2}{6D} \left( 1 - \frac{h_g}{h_s} \right). \quad (1)$$

Предложен новый метод получения толщи пройденного вещества  $X_{eff}(R)$  с помощью анализа отношения потоков первичных ядер железа и протонов. Полученная в результате расчетов согласно новому методу зависимость  $X_{eff}(R)$  представлена на рисунке 1 в сравнении с аналогичной зависимостью, полученной с помощью широко используемого способа определения толщи пройденного вещества по отношению потоков вторичных и первичных ядер бора и углерода. Из рисунка 1 видно, что полученная нами зависимость  $X_{eff}(R)$  хорошо согласуется с данными, полученными стандартным способом, в области жесткости до 300 ГВ и указывает на уположение зависимости  $X_{eff}(R)$  при жесткости более 300 ГэВ или на изменение спектров в источнике.



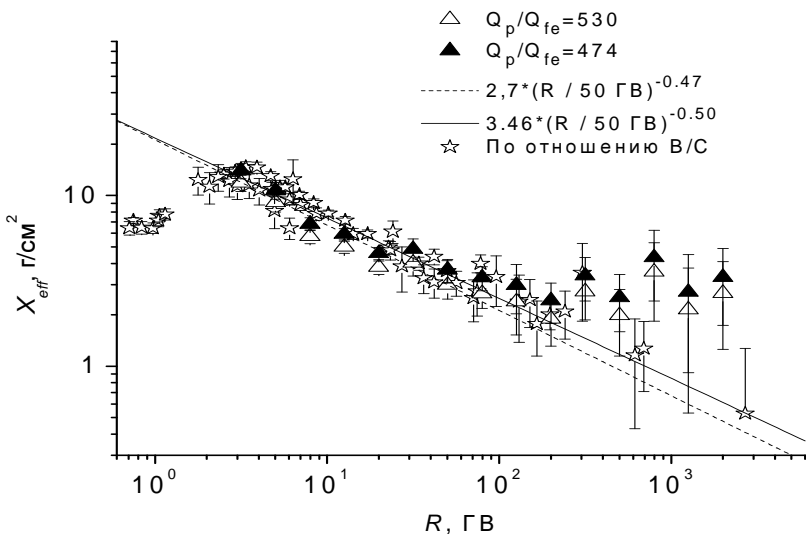


Рисунок 1. Зависимость  $X_{eff}(R)$  (треугольники), полученная новым методом при двух значениях нормировочного коэффициента  $Q_p / Q_{Fe}$  при 50 ГВ. Представлены также степенные аппроксимации полученной нами зависимости  $X_{eff}(R)$  :  $X_{eff}(R) \sim 3.46(R / 50 \text{ ГВ})^{-0.47}$  (сплошная линия) и  $X_{eff}(R) \sim 2.7(R / 50 \text{ ГВ})^{-0.50}$  (штриховая кривая). Звездами обозначены результаты расчета толщи пройденного вещества, полученные стандартным способом по отношению потоков ядер бора и углерода из экспериментальных данных.

В главе 1 развит метод исследования влияния близких молодых источников на характеристики космических лучей, чувствительных к положению таких источников: спектр и анизотропию электронной компоненты космических лучей в области энергии ГэВ-ТэВ, спектр и анизотропию ядерной компоненты космических лучей в области энергии ТэВ-ПэВ. В отличие от предшествующих работ [4, 5, 6, 7] в нашем методе расчета близкие молодые источники, находящиеся на расстоянии не более  $R_{near}$  от Земли и имеющие возраст не более  $T_{near}$ , выбирались из каталогов

гамма-астрономических экспериментов, а старые и/или далекие источники задавались как статистический ансамбль. Параметры  $R_{near} = 1.5$  кпс и  $T_{near} = 6 \times 10^4$  лет подбирались таким образом, чтобы одновременно выполнялись следующие условия: набор источников с расстоянием параметрами  $R < R_{near}$  и возрастом  $T < T_{near}$  должен быть полным, и ядра с энергией в области ТЭВ - ПЭВ должны успеть дойти от источника к Земле. При расчете использовался формализм функций Грина [2]. Спектр космических лучей у Земли вычислялся как сумма вкладов от всех источников статистического ансамбля.

**Во второй главе** приводится обзор свойств и типов источников космических лучей в соответствии с современными представлениями и данными гамма-астрономических экспериментов. Приводятся возможные распределения газа в Галактике по данным основных работ в этой области, и распределение источников по диску Галактики связывается с распределением газа.

В главе приводится обзор существующих каталогов гамма-астрономических экспериментов, и на их основе составляется сводный каталог близких молодых источников, находящихся на расстоянии не более 1.5 кпс от Земли и имеющих возраст не более  $6 \times 10^4$  лет. Всего было отобрано 18 источников, большинство из которых были найдены в каталогах нескольких экспериментов одновременно. Среди отобранных источников только 1-5 источников могут относиться к типу сверхновых Ia, так как в их составе, возможно, нет пульсара или пульсарной туманности. Это не противоречит экспериментально полученному относительному количеству сверхновых этого типа (20-30%) [8]. В главе также анализируется полнота полученного набора близких молодых источников и приводится подробная

характеристика близких молодых источников, расположенных на расстоянии менее 800 пс от Земли.

В главе 2 также описывается модель источников, основанная на разнообразии свойств сверхновых [9] и современных теоретических расчетах спектров [10], в которой число сверхновых, дающих вклад при заданной энергии, уменьшается с ростом энергии, до 25% от их общего количества при 4 ПэВ (сверхновые типов Ia и Ib). При этом впервые мы учитывали относительно недавно установленную зависимость максимальной энергии ускоренных частиц от возраста остатка, ускоряющего эти частицы, вследствие замедления скорости фронта ударной волны [11].

**В третьей главе** приводится определение дипольной анизотропии, обзор существующих экспериментальных данных по амплитуде и направлению анизотропии, а также излагается метод экспериментального измерения анизотропии и способ его воспроизведения в расчетах. Учет экспериментальной процедуры измерения «двумерной» анизотропии в расчетах проведен впервые. Для его имитирования мы а) фиксировали ячейку на небесной сфере в экваториальных координатах с прямым восхождением  $\alpha_i$  и склонением  $\delta_k$ , б) вычисляли проекцию градиента концентрации от каждого источника рассматриваемого статистического ансамбля, в) суммировали вклады источников, г) усредняли полученную величину по прямому восхождению при каждом фиксированном склонении и д) в каждом поясе склонений находили отклонение суммы проекций градиентов при каждом прямом восхождении от среднего значения, получая таким образом зависимость амплитуды анизотропии от звездного времени.

Мы получили, что величина анизотропии максимальна вдоль небесного экватора  $\delta_k = 0$ , при измерении на более высоких широтах амплитуда анизотропии уменьшается как  $\cos \delta_k$  и вблизи полюсов

становится равной 0; а максимум амплитуды анизотропии на каждом склонении находится при одном и том же значении прямого восхождения, поэтому можно невозможно определить истинное значение склонения направления анизотропии. Наши выводы согласуются со сделанными ранее утверждениями Баксанской группой [12] об имитировании максимума анизотропии на небесном экваторе  $\delta_k = 0$ . Вывод о том, что максимум анизотропии при каждом склонении находится на одном и том же значении прямого восхождения, в целом хорошо соответствует данным IceCube [13] (рисунок 2).

В главе 3 проводится исследование влияния на амплитуду и фазу анизотропии распределения источников по диску Галактики, зависимости энергии «убегающих» частиц от возраста остатка, энергетической зависимости коэффициента диффузии, учета метода экспериментального измерения анизотропии. Показано, что

1) форма распределения источников по диску Галактики имеет решающее значение для результатов расчета амплитуды и направления анизотропии ядерной компоненты, и даже незначительные изменения распределения влекут за собой сильные изменения амплитуды в области энергии сотен ТэВ-ПэВ и направления анизотропии в области колена;

2) учет зависимости энергии «убегающих» ускоренных частиц от возраста остатка приводит к появлению более резких пиков и «провалов» в зависимости амплитуды и направления анизотропии ядерной компоненты космических лучей от энергии в области энергий ТэВ-ПэВ, поскольку в этом случае спектры частиц, испущенных близкими молодыми, становятся «уже» по энергии, чем в случае импульсного испускания источников всего спектра частиц;

3) для воспроизведения экспериментальных данных по амплитуде

анизотропии необходимо предположить относительно медленный рост коэффициента диффузии с энергией  $D \sim E^{0.337}$ ;

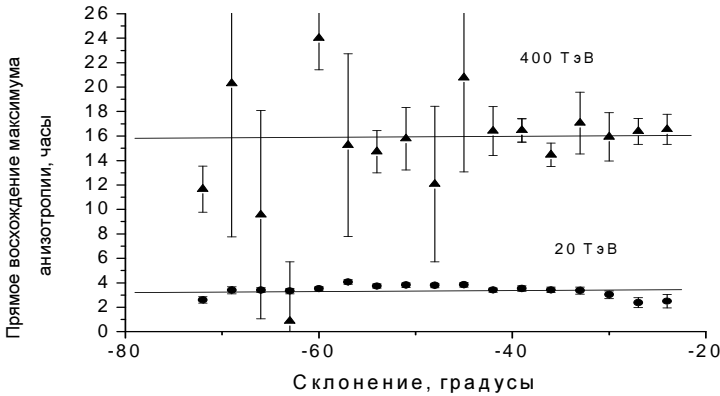


Рисунок 2. Зависимость прямого восхождения максимума анизотропии от пояса склонения, в котором измеряется вариация темпа счета, по данным эксперимента IceCube [13] для ядерной компоненты космических лучей при энергиях 20 и 400 ТэВ.

4) учет экспериментального метода измерения анизотропии в расчете приводит к отличию результатов расчета амплитуды в 2 раза и небольшому смещению особенностей зависимости амплитуды от энергии по сравнению с расчетами трехмерной анизотропии, а также к подавлению вклада источников, имеющих большое склонение.

В главе 3 приведены результаты расчетов амплитуды и направления анизотропии ядерной компоненты космических лучей у Земли с помощью описанного в главе 1 статистического метода от совокупности источников, описанной в главе 2. Показано, что

- 1) предложенный метод расчета хорошо воспроизводит суммарный спектр ядерной компоненты космических лучей (рисунок 3);
- 2) экспериментальные данные по крупномасштабной анизотропии

ядерной компоненты космических лучей удовлетворительно воспроизводится в расчетах согласно предложенному методу (рисунок 4) при условиях медленного роста коэффициента диффузии с увеличением энергии  $D \sim E^{0.337}$  и отсутствия близких молодых неидентифицированных источников КЛ. Абсолютные величины амплитуды и направления в области 1-100 ТэВ составляют соответственно (4-10)  $10^{-3}$  и 2-4 часа, в области 100 – 1000 ТэВ анизотропия резко меняет направление из-за уменьшения влияния, в области 1-100 ПэВ анизотропия составляет проценты благодаря смещенному составу частиц, в области колена происходит выбывание легких частиц;

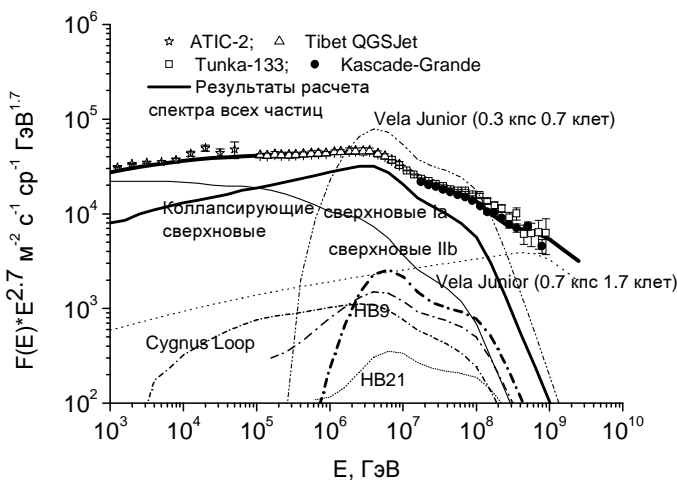


Рисунок 3. Результаты расчетов спектра всех частиц в сравнении с экспериментальными данными (символы); толстая сплошная кривая – спектр всех частиц от всей совокупности источников, сплошная кривая – спектр всех частиц от сверхновых типа Ia, тонкая сплошная кривая – спектр всех частиц от коллапсирующих сверхновых кроме Ib, точечная кривая – спектр всех частиц от сверхновых типа Ib. Спектры от некоторых самых близких сверхновых представлены штрих-точечными кривыми. Для источника Vela Junior приведены спектры в случае, если расстояние до нее составляет 300 пс, и она имеет возраст 700 лет, и в случае, если расстояние до нее составляет 700 пс, и она имеет возраст 1700 лет.

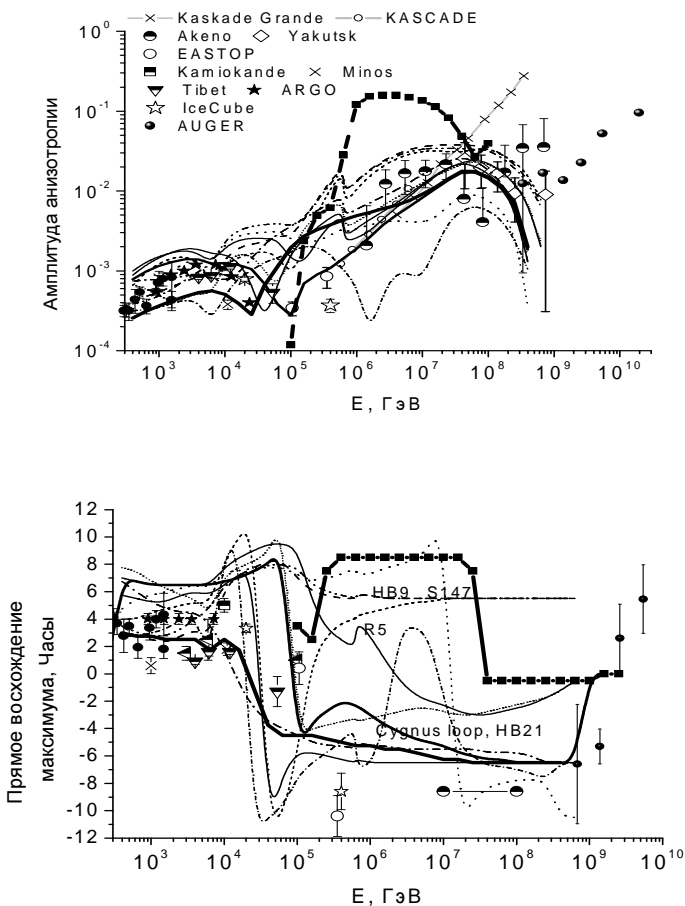


Рисунок 4. Результаты расчетов амплитуды (верхний рисунок) и направления (нижний рисунок) ядерной компоненты космических лучей на галактическом экваторе в случае 1) среди близких источников в радиусе 0,8 кпс вокруг Земли ни один не ускоряет до энергии 4 ПэВ (очень толстая кривая); 2) оболочечные остатки Cygnus loop, HB9, HB21, S147 ускоряют ядра до  $4 \times Z$  ПэВ (толстая кривая); 3) Vela Junior находится на расстоянии 300 пс и имеет возраст 700 лет (толстая кривая с закрашенными квадратами). Показаны также результаты расчетов в случае, если одна из близких сверхновых оболочечного типа ускоряет ядра до энергии 4 Z ПэВ (штриховые кривые).

3) суммарный вклад источников, находящихся на расстоянии не более 1,5 кпс и имеющих возраст не более 60 тысяч лет в области колена не превышает 10%;

4) для улучшения соответствия результатов расчетов анизотропии ядерной компоненты космических лучей и ее экспериментальной величины в ТэВ-ной области энергии необходимо уменьшить вклад источника Vela X по сравнению со вкладом средней сверхновой до 50% и менее;

5) поиск кандидата на роль близкого источника, определяющего форму колена в спектре всех частиц [13], показал, что единственным подходящим по возрасту и расстоянию известным объектом является остаток сверхновой Vela Junior (при минимальной оценке возраста и расстояния); но результаты расчетов анизотропии ядерной компоненты космических лучей с учетом вклада этого источника резко противоречат экспериментальным данным (рисунок 4).

Необходимо отметить, что учет реальных источников в расчете позволяет значительно снизить уровень флуктуаций концентрации и анизотропии космических лучей и позволяет описать экспериментальные данные в этой области энергий в общих чертах; но попытки воспроизвести точную кривую не имеют смысла, поскольку свойства, расстояние и возраст близких сверхновых определены неточно, а неизвестные «фоновые» источники продолжают давать вклад в спектр в области энергий до 10 ТэВ.

**В четвертой главе** приводится обзор экспериментальных данных по спектрам электронной и позитронной компонент космических лучей. В главе приведены результаты расчетов спектров электронной и позитронной компонент, а также амплитуды и направления анизотропии электронной компоненты космических лучей у Земли с помощью описанного в главе 1 статистического метода от совокупности источников, описанной в главе 2. Показано, что добавление возможного вклада магнитосфер пульсаров к



потоку электронов и позитронов от оболочек остатков сверхновых улучшает соответствие результатов расчетов и экспериментальных данных (рисунок 5).

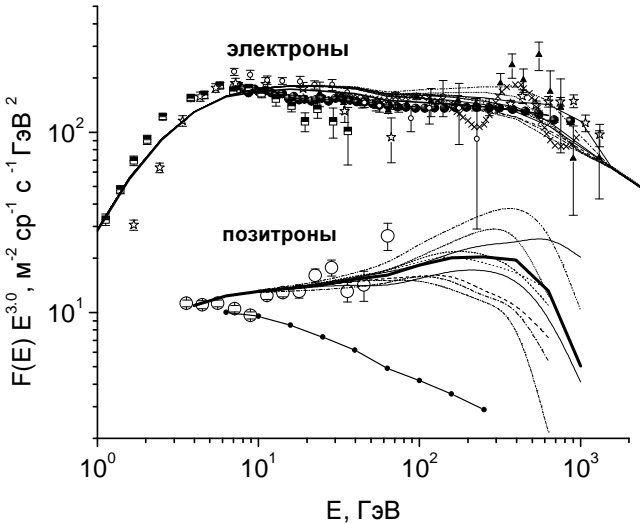


Рисунок 5. Экспериментальные данные: спектры электронов (верхняя группа), спектр позитронов (нижняя группа). Результаты расчетов, верхняя группа кривых: толстая сплошная кривая – средний спектр электронов от оболочек сверхновых и пульсаров в случае, когда  $E_{out}=10^{48}$  эрг и излучаются электроны и позитроны всего 2% от общего числа пульсаров, штриховые и точечные кривые – спектр от различных наборов источников. Результаты расчетов, нижняя группа кривых: толстая сплошная кривая – средний спектр позитронов от оболочек сверхновых и пульсаров, сплошная кривая с кружками – только вторичные позитроны от оболочек сверхновых, штриховые и тонкие точечные кривые – спектр от различных наборов источников.

В расчетах получены ограничения возможного вклада магнитосфер пульсаров в электронно-позитронную компоненту космических лучей. Рассчитанный спектр электронов в предположении существования вклада магнитосфер пульсаров удастся согласовать с экспериментальным, если полная энергия вращения пульсара  $E_{out}$ , переходящая в электрон-позитронные пары, в среднем составляет  $3 \times 10^{46}$  эрг, или вклад в поток электронов и позитронов у Земли дают только 3% от общего числа пульсаров

и  $E_{out} = 10^{48}$  эрг. Два эти предположение дают различные предсказания о величине анизотропии электронов: величина анизотропии больше, если активных источников меньше. Пока экспериментальные данные по анизотропии электронов космических лучей не позволяют сделать однозначное заключение.

В **заключении** приведены следующие основные результаты и выводы диссертационной работы:

I. Развита метод исследования влияния близких молодых источников космических лучей на анизотропию, спектры ядерной компоненты в области энергий ТэВ-ПэВ и электронной компоненты в области ТэВ-ных энергий.

II. Создана программа для расчета спектров и анизотропии космических лучей у Земли согласно предложенному методу, учитывающая

- 1) дискретность источников во времени и пространстве,
- 2) положение, возраст и свойства реальных близких молодых потенциальных источников космических лучей,
- 3) разнообразие галактических источников
- 4) распределение источников по диску Галактики,
- 5) зависимость энергии «убегающих» ускоренных частиц от возраста остатка сверхновой,
- 6) химический состав ядерной компоненты космических лучей в области колена.

III. Создан каталог потенциальных близких молодых источников по данным последних гамма-астрономических экспериментов. Проанализирована статистика близких молодых источников и показано, что она хорошо согласуется с ожидаемой.

IV. Проведено исследование различных методов расчетов распространения космических лучей от источников до Земли. Получены:

- 1) область применимости однородной модели распространения для расчетов потоков стабильных ядер,
- 2) аналоги толщи пройденного вещества, являющегося параметром однородной модели распространения, для диффузионной модели,
- 3) получена оценка зависимости толщи пройденного вещества от жесткости в ТэВ-ной области энергий по спектрам первичных ядер,
- 4) показано, как на измеряемую в экспериментах амплитуду и фазу анизотропии влияют распределения источников по диску Галактики, зависимости энергии «убегающих» частиц от возраста остатка, энергетической зависимости коэффициента диффузии.

V. Проведен расчет спектров и анизотропии ядерной и электронно-позитронной компонент космических лучей в рамках предложенного метода. Показано, что

- 1) предложенный метод расчета хорошо воспроизводит суммарный спектр ядерной компоненты космических лучей;
- 2) экспериментальные данные по крупномасштабной анизотропии космических лучей удовлетворительно воспроизводятся в расчетах согласно предложенному методу при условии медленного роста коэффициента диффузии с увеличением энергии  $D \sim E^{0.337}$ ;
- 3) суммарный вклад источников, находящихся на расстояниях до 1,5 кпк и имеющих возраст не более 60-100 тысяч лет в области колена не превышает 10%;
- 4) поиск кандидата на роль близкого источника, определяющего форму колена в спектре всех частиц, показал, что единственным подходящим по возрасту и расстоянию известным объектом является остаток сверхновой Vela Junior (при минимальной оценке возраста и расстояния); но результаты расчетов анизотропии ядерной компоненты космических лучей с учетом вклада этого источника резко противоречат экспериментальным данным;

5) расчет спектров и анизотропии электронно-позитронной компоненты космических лучей показал, что добавление возможного вклада магнитосфер пульсаров к потоку электронов и позитронов от оболочек остатков сверхновых улучшает соответствие результатов расчетов и экспериментальных данных. Получены ограничения возможного вклада магнитосфер пульсаров в электронно-позитронную компоненту космических лучей.

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих изданиях:**

1. Свешникова Л.Г., Птускин В.С., Стрельникова О.Н. 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//Известия РАН серия физическая 2011. Т.75. Н.3. С.363
2. Ptuskin V.S., Strelnikova O.N., Sveshnikova L.G. On leaky-box approximation to GALPROP//Astropart. Phys. 2009. V.31. P.284
3. Strelnikova O., Ptuskin V., Sveshnikova L. Analysis of Possibility of Cosmic Rays Proton Anisotropy Phase and Amplitude and Electron Spectra Description at TeV-region within the Bounds of the Same Set of Sources//Proceedings of the 12th ICATPP Conference, Italy, Como 2011, Astroparticle, Particle, Space Physics, Radiation Interaction, Detectors and Medical Physics Applications. V.6.
4. Стрельникова О.Н., Свешникова Л.Г. Зависимость пробега истечения космических лучей в Галактике по данным о протонах и ядрах железа у Земли в области 3-3000 ГВ// Вестник МГУ 2012. В.2. С.78
5. Стрельникова О.Н., Птускин В.С., Свешникова Л.Г. Влияние близких источников на спектры электронов и позитронов//Труды 31 Всероссийской конференции по космическим лучам, Москва, 2010. [http://cr2010.sinp.msu.ru/cr2010/pcr/pcr\\_41.pdf](http://cr2010.sinp.msu.ru/cr2010/pcr/pcr_41.pdf).

7. Свешникова Л.Г., Птускин В.С., Стрельникова О.Н. 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. //Труды 31 Всероссийской конференции по космическим лучам, Москва, 2010. [http://cr2010.sinp.msu.ru/cr2010/pcr/pcr\\_05.pdf](http://cr2010.sinp.msu.ru/cr2010/pcr/pcr_05.pdf)
8. Svshnikova L.G., Strelnikova O.N., Ptuskin V.S. On probable contribution of nearby sources to anisotropy and spectrum of cosmic rays at TeV-PeV-energies// Proceedings of 32 ICRC, Beijing, China, 2011. V.6. P.184
9. Ptuskin V., Strelnikova O., Svshnikova L. On leaky-box approximation to GALPROP// Proceedings of 31 ICRC, Lodz, Poland, 2009 <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc0593.pdf>
10. Svshnikova L., Strelnikova O., Ptuskin V. Rigidity dependence of cosmic ray escape length in the Galaxy obtained from a comparison of proton and iron spectra in the range 3-3000 GV// Proceedings of 31 ICRC, Lodz, Poland, 2009<http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc0688.pdf>

### **Список литературы**

1. Strong A.W., Moskalenko I.V. Propagation of cosmic ray nuclei in the Galaxy//Astrophys. J. 1998. V.509. P.212
2. Березинский В.С., Буланов С.В., Догель В.А., Гинзбург В.Л., Птускин В.С. Астрофизика космических лучей. М.: Наука, 1990
3. Ptuskin V.S., Strelnikova O.N., Svshnikova L.G. On leaky-box approximation to GALPROP//Astropart. Phys. 2009. V.31. P.284
4. Lee M.A. A statistical theory of cosmic ray propagation from discrete galactic sources// Astrophys. J. 1979. V. 229. P.424
5. Lagutin A.A., Nikulin Y.A. Fluctuations and anisotropy of cosmic rays in the Galaxy//JETP 1995. V.81. P.825
6. Ptuskin V.S., Jones F.C., Seo E.S., Sina R. Effect of random nature of cosmic ray sources – Supernova remnants on cosmic ray intensity

- fluctuations, anisotropy, and electron energy spectrum//Adv. In Sp. Research 2006. V.37 P.1909
7. Blasi P., Amato E. Diffusive propagation of cosmic rays from supernova remnants in the Galaxy. II: anisotropy//JCAP 2012. V.1 P.11
  8. Li W., Chornock R., Leaman J., Filippenko A.V., Poznanski D., Wang X., Ganeshalingam M., Mannucci F. Nearby supernova rates from the Lick Observatory Supernova Search – III. The rate–size relation, and the rates as a function of galaxy Hubble type and colour//MNRAS 2011. V.412. Is.3. P. 1473
  9. Ptuskin V., Zirakashvili V., Seo E.-S. Spectrum of galactic cosmic rays accelerated in supernova remnants // Astrophys. J. 2010. V.718. P.31
  10. Zirakashvili V.N., Ptuskin V.S. Role of reverse shocks for the production of galactic cosmic rays in SNRs//Proceedings of 32 ICRC, Beijing, China, 2011. V.6. P.162
  11. Bell A.R., Lucek S.G. Cosmic ray acceleration to very high energy through the non-linear amplification by cosmic rays of the seed magnetic field//MNRAS 2001. V.321. P.433
  12. Козяривский В.А., Лидванский А.С. К вопросу о величине и направлении анизотропии галактических космических лучей//ПАЖ 2008. Т.34. №2. С.131
  13. Rasha Abbasi and IceCube col. Energy Dependence of the Large Scale Galactic Cosmic Rays Anisotropy Measured With IceCube//Proceedings of 32 ICRC, Beijing, China, 2011. V.10. P.70
  14. Erlykin A.D., Wolfendale A.W. The Anisotropy of Galactic Cosmic Rays as a Product of Stochastic Supernova Explosions//Astrop. Phys. 2006. V.25. P.183