

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. Скобельцына

На правах рукописи

Тимохин Алексей Викторович

ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА КОСМИЧЕСКИХ  
ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В  
МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ГАЛАКТИКИ

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

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

Москва

2007

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

Научный руководитель: **Калмыков Николай Николаевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, НИИЯФ МГУ

Официальные оппоненты: **Роганова Татьяна Михайловна**  
доктор физико-математических наук,  
НИИЯФ МГУ

**Зиракашвили Владимир Николаевич**  
кандидат физико-математических наук,  
ИЗМИРАН

Ведущая организация: **Институт ядерных исследований РАН,**  
г. Москва

Защита диссертации состоится «15» мая 2007 г. в 15 час. на заседании  
диссертационного совета К.501.001.03 в Московском государственном  
университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва,  
Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19 корп., ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан «5» апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета К.501.001.03,  
кандидат физико-математических наук

А.К. Манагадзе

## **Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена исследованию распространения космических лучей сверхвысоких энергий в Галактике и влияния этого процесса на энергетические спектры космических лучей (КЛ). В работе проводится моделирование траекторий заряженных частиц в магнитных полях Галактики для получения количественных оценок изменений в парциальных спектрах при распространении КЛ от источника до наблюдателя. С помощью комбинированного метода, сочетающего решение уравнения диффузии для концентрации КЛ в Галактике и метод численного интегрирования траекторий, были рассчитаны спектры КЛ у Земли в диапазоне энергий  $10^{12}$ - $10^{20}$  эВ. Полученные результаты применены для проверки гипотез происхождения излома в спектре КЛ при энергии  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ с привлечением экспериментальных данных о спектре КЛ у Земли.

### **Актуальность темы**

Актуальность данной работы следует из того, что проблема происхождения космических лучей сверхвысоких энергий является одной из важнейших в физике космических лучей. Проверка гипотез происхождения КЛ и природы излома в их энергетическом спектре при энергии  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ с использованием имеющихся экспериментальных данных о спектрах КЛ осложняется тем, что спектры в источниках и у Земли отличаются друг от друга.

Наблюдаемый в наземных экспериментах и в космосе энергетический спектр КЛ у Земли обусловлен как особенностями спектра в источниках, так и процессом распространения в галактическом пространстве. Изменения в спектре КЛ в процессе их распространения в Галактике связаны с тем, что существует зависимость времени жизни КЛ

от энергии. Кроме того, определенные изменения в исходный спектр вносит взаимодействие частиц КЛ с веществом межзвездной среды, в результате чего происходит как убыль тяжелых ядер КЛ, так и некоторый прирост в интенсивности легких ядер.

Связь между энергетическим спектром КЛ в источниках  $Q(E)$  и спектром КЛ у Земли  $I(E)$  можно представить соотношением:

$$I(E) \propto Q(E) \left( \frac{1}{\tau_{esc}(E)} + \frac{1}{\tau_{int}(E)} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\tau_{esc}(E)$  - время жизни КЛ в Галактике, связанное с их удержанием магнитными полями;  $\tau_{int}(E)$  - время, связанное с взаимодействием КЛ с межзвездным веществом.

Для исследования зависимостей  $\tau_{esc}(E)$ ,  $\tau_{int}(E)$  существенны знания о магнитных полях Галактики. К сожалению, вопрос о точной конфигурации магнитного поля Галактики остается открытым – на основании имеющихся экспериментальных данных возникают различные модели магнитного поля Галактики.

Таким образом, для проверки гипотез происхождения КЛ и сопоставления спектров в источниках с экспериментальными данными о спектре у Земли возникает необходимость исследования распространения КЛ в рамках различных моделей магнитных полей Галактики.

**Целью диссертационной работы** является исследование распространения КЛ в магнитных полях Галактики и определение изменений в их энергетическом спектре, связанных с процессом

распространения, что позволяет сопоставлять спектры в источниках, следующие из теорий происхождения КЛ, и экспериментальные данные о спектре КЛ у Земли.

**Научная новизна работы.** В диссертации впервые:

1. Проведены расчеты энергетического спектра КЛ в широком диапазоне энергий  $10^{12}$ - $10^{20}$  эВ комбинированием решения уравнения диффузии для плотности КЛ при энергиях  $10^{12}$ - $10^{18}$  эВ с методом численного счета траекторий при энергиях  $10^{14}$ - $10^{20}$  эВ.

2. Прямым сопоставлением результатов расчета спектров КЛ у Земли, полученных двумя разными методами, установлена граница применимости диффузионной модели распространения КЛ в Галактике.

3. Результаты численного счета траекторий применены для количественных оценок изменений в парциальных спектрах КЛ сверхвысоких энергий вследствие взаимодействия с межзвездной средой (с использованием модели QGSJET).

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Комбинированный метод, сочетающий решение уравнения диффузии для концентрации космических лучей в Галактике и численное интегрирование траекторий, позволяет эффективно рассчитывать спектр КЛ в диапазоне энергий  $10^{12}$ - $10^{20}$  эВ.

2. Установлена граница применимости диффузионного подхода к проблеме распространения КЛ в Галактике – энергия протона должна быть не более  $10^{17}$  эВ.

3. Зависимость времени жизни КЛ от энергии вида  $\tau \sim E_0^{-\alpha}$ , где  $\alpha = 0.7-0.8$ , имеет место лишь в узком интервале (не более двух

порядков) по  $E_0$ . Это затрудняет согласование наблюдаемого у Земли спектра КЛ с выводами стандартной модели ускорения КЛ на фронте ударной волны сверхновой.

4. Вид зависимости времени жизни КЛ в Галактике от энергии при  $E > 10^{17}$  эВ слабо меняется при использовании различных моделей регулярного магнитного поля Галактики.

5. Учет поглощения ядер КЛ в результате взаимодействия с протонами межзвездной среды приводит к тому, что парциальные спектры становятся жестче (показатель парциального спектра железа меняется на  $\Delta\gamma = 0.10 \div 0.15$ ).

6. Излом в энергетическом спектре КЛ у Земли при энергии  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ не может быть объяснен в рамках чисто диффузионных представлений, если считать окончательными данные эксперимента KASCADE об изломах в парциальных спектрах ядер различных групп. Изменение спектра, которое получается в рамках диффузионной модели, недостаточно, и надо предполагать изменение спектра в источниках.

### **Вклад автора**

1. Созданы новые программы на основе метода численного интегрирования траекторий, позволяющие моделировать распространение КЛ в Галактике.

2. С использованием разработанных программ выполнены расчеты времени жизни и энергетического спектра КЛ у Земли в диапазоне энергий  $10^{14}$ - $10^{20}$  эВ для различных моделей магнитного поля Галактики и предположений об источниках галактических КЛ.

3. Разработаны и реализованы программы расчета взаимодействия ядер КЛ с веществом межзвездной среды при

использовании данных о количестве пройденного вещества, полученных моделированием траекторий КЛ в Галактике.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ МГУ, а также на следующих рабочих встречах и конференциях.

- 28-я и 29-я Всероссийские конференции по космическим лучам, Москва 2004, 2006;
- Aspen, Colorado, USA, April 2005;
- 29<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, August 03 -10, 2005, Pune, India;
- 19th European Cosmic Ray Symposium (ECRS 2004), Florence, Italy, 30 Aug - 3 Sep 2004;
- Ломоносовские чтения 2005, 2006

### **Публикации**

Основные результаты работы диссертации изложены в 6 публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы; содержит 31 рисунок и 1 таблицу; список литературы включает 68 наименований. Объем диссертации - 102 страницы.

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется основная цель, новизна работы, а также перечисляются выносимые на защиту положения.

**В первой главе** кратко излагаются основные гипотезы происхождения КЛ, описывается характер их распространения в Галактике.

В качестве наиболее вероятного кандидата на роль галактических источников КЛ традиционно рассматриваются остатки сверхновых. Согласно теории ускорения ударными волнами, спектр КЛ в источниках является степенным с показателем  $\gamma_s \approx 2$  вплоть до максимальной энергии ускорения.

Покинув область ускорения, заряженные частицы блуждают в магнитных полях Галактики. При распространении КЛ дрейфуют в крупномасштабном магнитном поле Галактики и рассеиваются на магнитных неоднородностях. В результате удержания КЛ в магнитных полях Галактики с исходным спектром происходят изменения - он становится «мягче».

Поскольку спектр, наблюдаемый у Земли ( $\sim E^{-2,7}$ ), значительно отличается от предсказываемого стандартной теорией ускорения ударными волнами ( $\sim E^{-2}$ ), необходимо предполагать сильную зависимость коэффициента диффузии от энергии – типа  $D \sim E^{0,7}$ . Возможность такого поведения  $D(E)$  на протяжении нескольких порядков исследуется в данной работе.

Для изучения процессов распространения КЛ необходимы знания о магнитных полях Галактики. В первой главе изложены современные представления об их структуре и приведены основные модели, используемые в данной работе в расчетах распространения КЛ в Галактике.



**Во второй главе** излагаются методы исследования распространения КЛ в Галактике – решение уравнения диффузии для плотности КЛ в Галактике и численное интегрирование траекторий.

Для решения уравнения движения заряженных частиц в магнитном поле Галактики использовались метод Рунге-Кутты и итерационный метод Свешникова-Якунина. Оценка точности расчета на пути 1 кпк составляет  $5 \cdot 10^{-8}$  при  $E = 10^{15}$  эВ. Таким образом, если учесть, что время удержания протонов таких энергий в Галактике составляет  $\sim 10$  млн. лет, то полная ошибка аппроксимации траектории до выхода из Галактики составляет  $\approx 2$  пк.

Метод численного интегрирования траекторий является эффективным методом расчета спектра КЛ у Земли при проверке гипотез об их источниках и моделях конфигурации магнитных полей Галактики. Но время расчета одной траектории обратно пропорционально энергии частицы; таким образом, становится затруднительным набрать достаточную статистику при малых энергиях частиц ввиду ограниченной мощности вычислительных ресурсов.

Для области меньших энергий выгоднее использовать диффузионную модель и рассчитывать энергетический спектр КЛ у Земли путем решения уравнения диффузии для концентрации КЛ в Галактике. Для этого метода нет вычислительных проблем, присущих численному счету траекторий, но диффузионное приближение имеет определенные границы применимости по энергии частиц.

На *Рис. 1* приведены расчетные спектры КЛ, полученные этими двумя методами при одинаковых предположениях о структуре магнитных полей и об источниках.

Прямым сопоставлением результатов установлена граница применимости диффузионной модели распространения КЛ в Галактике - энергия протона должна быть не более  $10^{17}$  эВ.

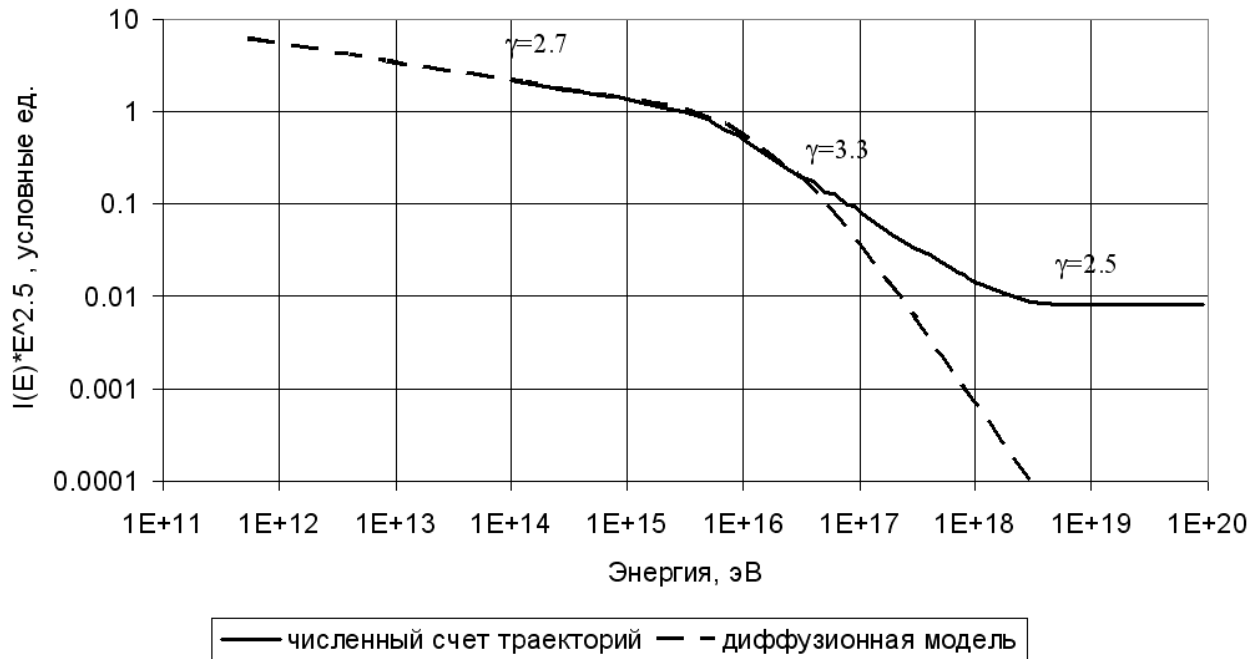


Рис. 1 Расчетные спектры протонов КЛ у Земли.

В третьей главе исследуется зависимость времени жизни КЛ в Галактике от энергии  $\tau(E)$ , которая используется для согласования спектра КЛ в источниках с экспериментальными данными о спектре у Земли. Результаты расчетов этой зависимости для диапазона энергий  $10^{14}$ - $10^{20}$  эВ представлены на Рис. 2.

Эта зависимость не может быть аппроксимирована единым законом вида

$$\tau \sim E_0^{-\alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha = 0.7$ - $0.8$  во всем рассматриваемом диапазоне энергий.

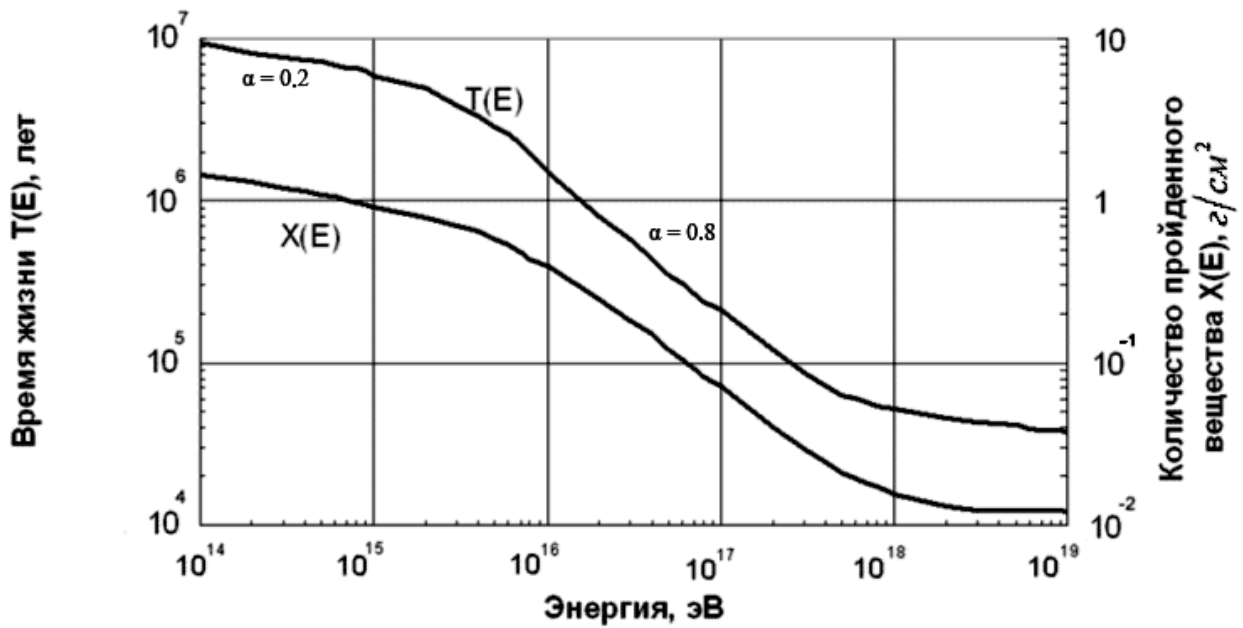


Рис. 2 Зависимость времени жизни протонов космических лучей и количества пройденного ими вещества от энергии.

Как правило, при использовании стандартной модели ускорения КЛ ударными волнами предполагается, что разность между теоретическим показателем спектра до излома ( $\gamma \approx 2$ ) и экспериментально наблюдаемым может быть скомпенсирована введением зависимости времени жизни КЛ от энергии вида (1) при  $\alpha = 0.7$  [1, 2]. Однако, полученные в настоящей работе результаты показывают, что такая зависимость имеет место лишь в очень ограниченном интервале энергий (не более 2-х порядков по энергии). Это затрудняет согласование наблюдаемого у Земли спектра КЛ с выводами стандартной модели ускорения на фронте ударной волны сверхновой.

На Рис. 2 приводятся также результаты расчетов зависимости количества пройденного вещества протонами КЛ от энергии. По расчетным данным показатель степени энергетической зависимости пройденного пути при энергиях  $< 10^{14}$  эВ не может значительно отличаться от 0.2, иначе трудно получить адекватное значение пробега в

диапазоне энергий порядка нескольких ГэВ ( $10 \text{ г/см}^2$ ). С другой стороны, если считать, что эта зависимость характеризуется показателем  $\alpha \approx 0.7$ , то уже в области «колена» в энергетическом спектре частицы КЛ должны проходить количество вещества, меньшее того, что они прошли бы при распространении по прямой от центра Галактики до Солнечной системы ( $\approx 0.04 \text{ г/см}^2$ ). Столь малая величина пробега космических лучей от источника до Солнечной системы приводила бы к заметной анизотропии их потока, что противоречит экспериментальным данным.

В третьей главе представлены и результаты расчетов энергетической зависимости времени жизни КЛ сверхвысоких энергий в Галактике при использовании различных моделей регулярного магнитного поля. Приведенные данные позволяют сделать вывод, что вид зависимости времени жизни от энергии при  $E > 10^{17}$  эВ при этом меняется слабо.

**В четвертой главе** приводятся результаты расчетов взаимодействия ядер КЛ с веществом межзвездной среды, учитывающие как поглощение ядер, так и их фрагментацию с образованием более легких ядер.

Как показывают расчеты, изменения, обусловленные фрагментацией ядер в энергетическом диапазоне  $10^{14}$ - $10^{20}$  эВ, не превосходят нескольких процентов, так что с хорошей точностью можно ограничиться только учетом поглощения ядер, если не исследовать специально группу легких ядер.

Учет поглощения ядер КЛ в результате взаимодействия с протонами межзвездной среды приводит к тому, что парциальные спектры становятся жестче (показатель парциального спектра железа меняется на  $\Delta\gamma = 0.10 \div 0.15$ ).

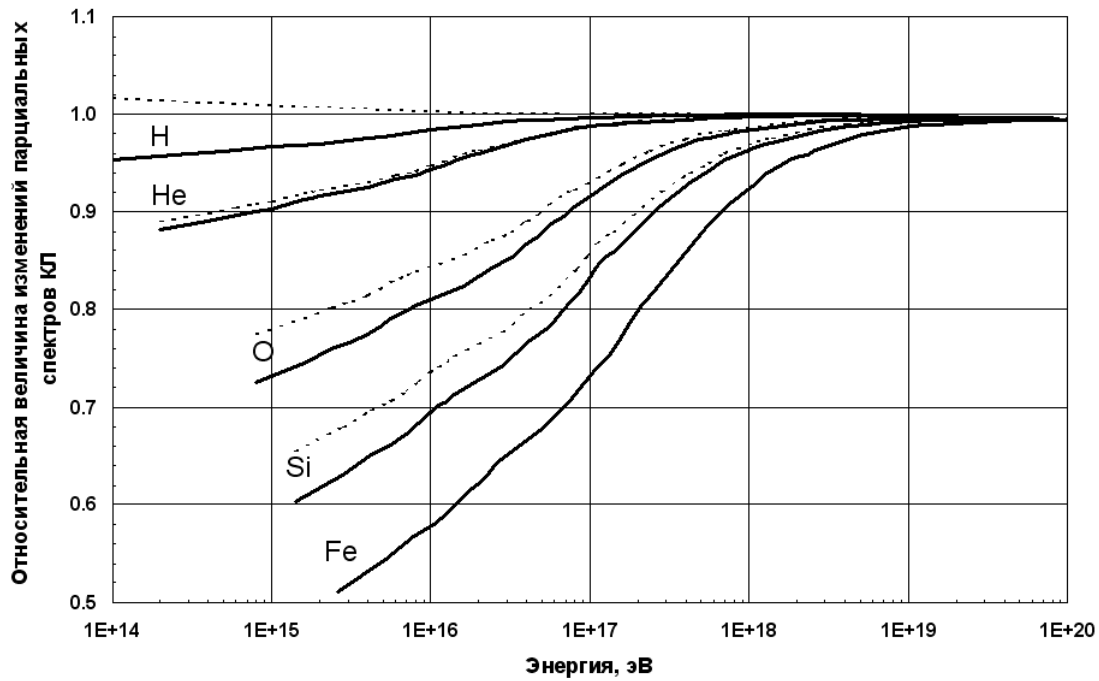


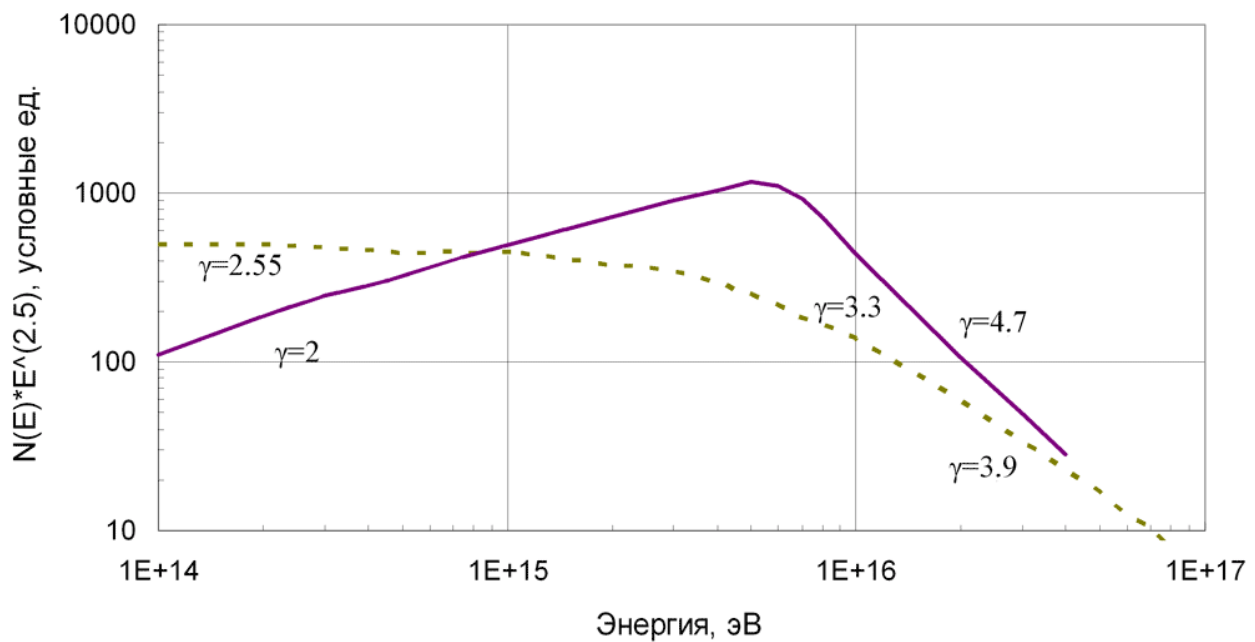
Рис. 3 Относительная величина изменений в парциальных спектрах КЛ при взаимодействии с межзвездной средой. Сплошные линии – изменения, обусловленные поглощением ядер КЛ, пунктирные – поглощение с учетом фрагментации.

В пятой главе исследуется природа излома в энергетическом спектре КЛ при энергии  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ.

Эта особенность спектра всех частиц КЛ может быть объяснена в рамках диффузионной модели изменением условий распространения КЛ в Галактике – переходом от энергетической зависимости коэффициента диффузии  $D(E) \sim E^m$  ( $m \approx 0.2$ ) к  $D(E) \sim E$  при энергии «колена». Соответствующие изменения в наклоне парциальных спектров составляют  $\Delta\gamma = 1 - m \approx 0.8$ . При учете сложного массового состава величина  $\Delta\gamma$  уменьшается до  $0.4 \div 0.5$  [3].

По данным установки KASCADE парциальные спектры ядер имеют величину излома  $\Delta\gamma \approx 2$  [4]. На Рис. 4 пунктиром показан спектр протонов в источниках, пересчитанный от спектра протонов КЛ у Земли

по данным установки KASCADE с учетом полученной методом численного счета траекторий зависимости времени жизни КЛ от энергии. Из результатов следует, что достаточно сильный излом в парциальных спектрах КЛ у Земли не может быть объяснен в рамках диффузионной модели происхождения «колена», и необходимо предполагать изменение спектра в источниках.



**Рис. 4 Энергетические спектры протонов в источниках.**

**Кривые нормированы при энергии  $10^{15}$  эВ. Пунктирная линия – спектр протонов в источнике, пересчитанный от спектра KASCADE по результатам настоящей работы; сплошная линия - спектр протонов в источнике согласно предсказаниям теории ускорения ударными волнами [5].**

Тем не менее, в данный момент этот вопрос еще не решен, так как нельзя считать окончательными результаты измерений парциальных спектров. Так, по данным эксперимента ГАММА  $\Delta\gamma$  для парциальных спектров близко к 0.4 [6]. Кроме того, результаты определения парциальных спектров по данным эксперимента KASCADE обнаруживают существенную модельную зависимость. Например, при

использовании модели QGSJET при энергии  $\sim 10^{15}$  эВ доминируют  $\alpha$  - частицы, а при использовании модели SIBYLL – ядра группы  $M$  [7].

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

1. Реализован комбинированный метод расчета спектра КЛ в диапазоне энергий  $10^{12}$ - $10^{20}$  эВ, сочетающий решение уравнения диффузии для концентрации космических лучей в Галактике и численное интегрирование траекторий, и показана его высокая эффективность.
2. Установлена граница применимости диффузионного подхода к проблеме распространения КЛ в Галактике – энергия протона должна быть не более  $10^{17}$  эВ.
3. Зависимость времени жизни КЛ от энергии вида  $\tau \sim E_0^{-\alpha}$ , где  $\alpha = 0.7$ - $0.8$ , имеет место лишь в узком интервале (не более двух порядков) по  $E_0$ . Это затрудняет согласование наблюдаемого у Земли спектра КЛ с выводами стандартной модели ускорения на фронте ударной волны сверхновой.
4. Вид зависимости времени жизни КЛ в Галактике от энергии при  $E > 10^{17}$  эВ слабо меняется при использовании различных моделей регулярного магнитного поля Галактики.
5. Учет поглощения ядер КЛ в результате взаимодействия с протонами межзвездной среды приводит к тому, что парциальные спектры становятся жестче (показатель парциального спектра железа меняется на  $\Delta\gamma = 0.10 \div 0.15$ ).
6. Излом в энергетическом спектре КЛ у Земли при энергии  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ не может быть объяснен в рамках чисто диффузионных

представлений, если считать окончательными данные эксперимента KASCADE об изломах в парциальных спектрах ядер различных групп. Изменение спектра, которое получается в рамках диффузионной модели, недостаточно, и надо предполагать изменение спектра в источниках.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

- Калмыков Н.Н., Тимохин А.В., “Время жизни космических лучей в Галактике и переход от энергетического спектра космических лучей в источниках к наблюдаемому спектру”, Известия Российской Академии наук, Серия физическая, 68 №11 (2004) 1624-1626
- Hörandel J.R., Kalmykov N.N., Timokhin A.V., “An analysis of super-high energy cosmic ray propagation in the Galaxy”, Proc. of the 29th International Cosmic Ray Conference, August 3-10, Pune, India, 2005, 3 (2005) 165-168
- Hörandel J.R., Kalmykov N.N., Timokhin A.V., “Some Aspects of the Propagation of Super-High Energetic Cosmic Rays in the Galaxy”, International Journal of Modern Physics A, 20 issue 29 (2005) 6825-6827
- Калмыков Н.Н., Тимохин А.В., “Влияние распространения космических лучей в галактике на их энергетический спектр”, Вестник Московского университета, Серия 3, Физика, Астрономия, 3 (2006) 33-37
- Hörandel J.R., Kalmykov N.N., Timokhin A.V., “The end of the galactic cosmic ray energy spectrum - a phenomenological view”, J. Phys.: Conf. Ser., 47 (2006) 132-141



- Hörandel J.R., Kalmykov N.N., Timokhin A.V., “Propagation of super high-energy cosmic rays in the Galaxy”, *Astropart.Phys.* 27 (2007) 119-126

### Ссылки на литературу:

1. Бережко Е.Г., Ксенофонтов Л.Т., “Состав космических лучей, ускоренных в остатках сверхновых”, *ЖЭТФ* 116 (1999) 737-759
2. Sveshnikova L.G., “The knee in galactic cosmic ray spectrum and variety in supernovae”, *Astron.Astrophys.* 409 (2003) 799-808
3. Ptuskin V.S., Rogovaya S.I., Zirakashvili V.N. et al., “Diffusion and drift of very high energy cosmic rays in galactic magnetic fields”, *Astron. Astrophys.* 268 (1993) 726-735
4. Ulrich H. et al., “Primary energy spectra of cosmic rays selected by mass groups in the knee region”, *Proc. 27th ICRC, Hamburg*, 1 (2001) 97-100
5. Ptuskin V.S., Zirakashvili V.N., “On the spectrum of high-energy cosmic rays produced by supernova remnants in the presence of strong cosmic-ray streaming instability and wave dissipation”, *Astron.Astrophys.* 429 (2005) 755-765
6. Тер-Антонян С.В., Галант И.А., Гаряка А.П. и др. “Энергетические спектры первичных ядер в области  $10^{15}$ - $10^{17}$  эВ по результатам эксперимента ГАММА”, 29-я Российская конференция по космическим лучам, Москва, (2006)
7. Antoni T. et al., “KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems.” *Astroparticle Physics*, 24 (2005) 1–25

Отпечатано в типографии «КДУ»  
Тел./факс: (495) 939-40-36. E-mail: [press@kdu.ru](mailto:press@kdu.ru)