

## Уточнить обратный адрес. Физики близки к разгадке тайны происхождения космических лучей.

**Поиск** - еженедельная газета научного сообщества  
Наука № 39(2013) от 27.09.2013, Янчилин Василий



**Наша планета с самого начала своего существования постоянно атакуется космическими лучами. Они, впрочем, не причиняют особого вреда ее обитателям благодаря наличию атмосферы. Но эти "незваные гости" могут поведать о том, что творится в глубинах Вселенной. Важными данными эту область знаний пополняют работы кандидата физико-математических наук Григория РУБЦОВА и его коллег из Института ядерных исследований РАН. Молодой ученый награжден в этом году медалью РАН с премией.**

- Космические лучи - это частицы высоких энергий, прилетающие в атмосферу Земли из космоса, - рассказывает нашему корреспонденту Григорий Игоревич. - В основном они представлены протонами, электронами, ядрами химических элементов, а также фотонами и нейтрино. Кроме того, сегодня нельзя исключать возможности существования частиц тяжелой или сверхтяжелой темной материи. Такие частицы разрешили бы ряд противоречий в астрономических и космологических наблюдениях. Космические лучи с энергиями ниже 100 ТэВ (тераэлектронвольт -  $10^{12}$  эВ) могут быть зарегистрированы непосредственно в экспериментах на спутниках и воздушных шарах. Прямое наблюдение позволяет исследовать состав космических лучей достаточно точно. Примерно три четверти от общего потока составляют протоны. На втором месте - ядра гелия, чуть меньше ядер азота, кислорода, магния, кремния, железа и других химических элементов. Интенсивность космических лучей быстро уменьшается по мере роста их энергии, поэтому высокоэнергичных частиц (миллионы ТэВ) прилетает очень мало. Для их регистрации

нужны детекторы большой площади вне земной атмосферы. Такой эксперимент можно было бы провести, например, на Луне, что пока невозможно.

Сейчас для исследования высокоэнергичных космических лучей используется так называемый метод широких атмосферных ливней (ШАЛ). При этом земная атмосфера сама выступает в качестве детектора: прилетевшая частица, сталкиваясь, например, с ядром атмосферного азота, порождает множество частиц с меньшей энергией, каждая из которых также порождает свой поток и т.д. В результате вторичные частицы могут покрыть площадь в несколько километров и больше. Регистрируются они с помощью детекторов заряженных частиц, а также за счет вторичного флуоресцентного и черенковского излучений. Оборудование ШАЛ может содержать наземную решетку детекторов (она занимает значительную площадь на поверхности планеты), флуоресцентные телескопы и приборы по улавливанию черенковского излучения. Наибольшая точность достигается гибридными методами, при которых регистрация одного и того же ШАЛ производится одновременно несколькими способами.

Считается, что космические лучи с энергиями приблизительно до 1 ЭэВ ( $10^{18}$  эВ) имеют галактическое происхождение. Основная гипотеза их образования - ускорение заряженных частиц на остатках относительно молодых (десятки тысяч лет) сверхновых. Эта точка зрения имеет косвенные подтверждения при наблюдении таких объектов в гамма-диапазоне. Точно подтвердить гипотезу пока не удается из-за того, что космические лучи с такими энергиями удерживаются в Галактике магнитными полями и, значит, их траектория далека от прямолинейной. Неточность данных о величинах межзвездного магнитного поля не позволяет "проследить" эту траекторию назад до источника. Доля тяжелых ядер по результатам нескольких экспериментов растет при увеличении энергии до 0,1 ЭэВ. Это подтверждает представление об "ускорительном" происхождении галактических космических лучей: ядра с большим зарядом разгоняются электрическим полем до больших энергий, а также лучше удерживаются магнитным полем Галактики (масса покоя ядра здесь не играет роли, так как речь идет об ультрарелятивистских частицах).

- Какие еще особенности у космических лучей сверхвысоких энергий?

- Они - одни из самых интересных объектов исследования фундаментальной физики. Интерес к их изучению связан с несколькими аспектами. Со стороны физики он обусловлен тем, что они несут макроскопическую энергию (26 ЭэВ равно одной калории) и, следовательно, информацию о наиболее мощных и значимых процессах во Вселенной. Взаимодействие таких частиц с межзвездной средой и атмосферой - процессы с самым высоким Лоренц-фактором (отношение энергии к массе покоя), что позволяет проверить специальную теорию относительности с точностью, не достижимой иными способами. Интерес со стороны астрономии связан с тем, что отклонения частиц с такой высокой энергией в галактическом магнитном поле невелики (несколько градусов для протона с энергией 50 ЭэВ), поэтому направление прихода должно "указывать на источник". Подобные наблюдения открывают новую область науки - астрономию заряженных частиц.

- О каких последних интересных результатах в этой области вы могли бы рассказать? Было ли открыто нечто такое, чего мало кто ожидал?

- Замечательно, что большинство задач, связанных с космическими лучами высоких энергий, доступно для исследования уже сегодня. Но они еще не решены. В последнее десятилетие был подтвержден так называемый эффект ГЗК, который предсказали в 1966 году американский ученый Кеннет Грейзен и независимо от него советские астрофизики Георгий Зацепин и Вадим Кузьмин. Эффект состоит в том, что поток космических лучей должен уменьшаться до нуля при энергиях выше 100 ЭэВ. "Низкий поток" частиц в этом диапазоне энергий (1 частица в год на сотни квадратных километров) долгое время не позволял установить эту особенность спектра. А результат японского эксперимента AGASA даже указывал на отсутствие ГЗК-обрезания.

Сегодня обрезание спектра подтверждено в трех независимых экспериментах. Тем не менее состав и источники космических лучей ультравысоких энергий остаются неустановленными. Различные исследования дают противоречивые результаты. Данные экспериментов HiRes (Университет Юты, США) и Telescope Array (международная коллаборация, объединяющая три флуоресцентных телескопа и наземную решетку детекторов, расположенных на территории США) говорят о протонной природе космических лучей выше 10 ЭэВ. Тогда как данные Якутской установки ШАЛ и Аргентинской обсерватории им. Пьера Оже указывают на увеличение доли тяжелых ядер с ростом энергии. Несмотря на небольшую статистику (тысячи событий), противоречие достаточно серьезное.

Неожиданным оказалось то, что источники таких космических лучей до сих пор не проявили себя. Распределение направлений прихода близко к изотропному, а отклонения наблюдаются только на самых высоких энергиях (выше 10 ЭэВ). Такая картина указывает на то, что либо плотность источников, способных ускорить частицы до такой энергии, необычно высока, либо отклонения в магнитном поле Галактики больше, чем это ожидается. Второй вариант возможен, если велика доля тяжелых ядер, так как угол отклонения в магнитном поле пропорционален заряду частицы. Получается, проблема поиска источников напрямую связана с проблемой определения состава.

- "Вписывается" ли состав космических лучей в современную картину Вселенной?

- В случае обнаружения источников станут доступными для исследования астрономические объекты, реализующие эффективное ускорение частиц. Можно будет исследовать процессы, протекающие внутри космических ускорителей, и взаимодействие космических лучей с межзвездной средой. Появится возможность существенно уточнить конфигурацию магнитного поля Галактики, а также, используя данные по Фарадеевскому вращению, определить плотность электронов в различных ее частях. Лоренц-инвариантность будет проверена до Планковских масштабов энергии, что исключит многие варианты построения квантовой теории гравитации.

- В чем особенность вашей работы?

- В том, что направленно изучается состав космических лучей. За основу взяты данные Якутской установки ШАЛ, предоставленные для совместного исследования коллективом Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН и американской обсерватории Telescope Array (в работе которой я участвую в составе российской группы из Института ядерных исследований РАН). Мы с коллегами предложили статистический метод анализа химического состава космических лучей, применимый даже при небольшом наборе данных. Этот метод использует результаты компьютерного моделирования широких атмосферных ливней, вызванных частицами различного типа. Получены ограничения на долю фотонов ультравысоких энергий в первичном спектре при энергиях выше 1 ЭэВ (по данным Якутской установки), ограничения при энергиях выше 10 ЭэВ (по данным эксперимента Telescope Array). "Якутские ограничения" оказались наиболее сильными в мире на момент публикации, а ограничения Telescope Array сегодня самые жесткие в Северном полушарии. Вывод - распад сверхтяжелой темной материи не может быть основным источником космических лучей с такими энергиями. Наш научный альянс провел статистический анализ данных мюонных детекторов якутской установки, который указал на значительную долю тяжелых ядер среди первичных частиц с энергиями выше 20 ЭэВ. Цикл этих работ как раз и был выдвинут на медаль РАН.

Моя мечта - обнаружить фотоны ультравысоких энергий. Работа ведется в нескольких направлениях. Разрабатываются новые методы анализа данных, повышающих чувствительность экспериментов. Мы также планируем исследовать область более низких энергий (0,1 ЭэВ) благодаря данным, полученным якутской установкой, и низкоэнергетическому расширению Telescope Array - TALE. Ведем поиск нейтрино ультравысоких энергий. Шансы их обнаружения на порядок ниже, но они есть.

- Что могут дать исследования?

- В ближайшем будущем, возможно, будут решены проблемы состава и происхождения космических лучей, удастся обнаружить несколько ближайших их источников. Сами высокоэнергичные частицы могут использоваться для фундаментальных исследований. Сегодня среди возможных механизмов называют ускорение в электромагнитных полях вблизи черной дыры, в активных ядрах галактик, остатках сверхновых, но ни один из них пока не подтвержден экспериментально.

В лучах преимущественно протонного состава ожидается обнаружение фотонов и нейтрино ультравысоких энергий, рожденных при взаимодействиях этих лучей с реликтовым микроволновым излучением. Поиск фотонов и нейтрино проводится

на многих экспериментальных установках. Одним из открытий последнего года стало обнаружение 28 нейтрино с энергиями до 1000 ТэВ в американском эксперименте IceCube во льдах Антарктиды. Обнаруженные нейтрино могут быть проявлением "работающих" где-то во Вселенной астрофизических ускорителей космических лучей. Имеющееся на сегодня число событий и точность определения направлений не позволяют установить источники и даже сделать утверждение о галактическом или внегалактическом происхождении этих частиц. Продолжение эксперимента IceCube даст возможность прояснить этот вопрос. Кроме того, в ближайшие годы возможна регистрация фотонов или нейтрино на крупномасштабных установках, регистрирующих космические лучи: в обсерватории им. Пьера Оже и на Telescope Array.