

Ожидается открытие

Б.А.Хренов,

доктор физико-математических наук

П.А.Климов

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына
МГУ им. М.В.Ломоносова

Два года назад сообщество ученых, занимающихся исследованием космологии, физики элементарных частиц и космических лучей, отмечало 40-летие проблемы, которая возникла в связи с открытием микроволнового фонового электромагнитного излучения, оставшегося после Большого Взрыва (рождение Вселенной). В 1966 г. К.Грейзен в США и независимо Г.Т.Зацепин и В.А.Кузьмин в СССР опубликовали свои расчеты, убедительно показывающие: это реликтовое излучение закрывает доступ к наблюдателю на Земле протонов и ядер космического излучения с энергией выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ, идущих от удаленных источников (с расстояний более 50–100 Мпк). Астрономы уже тогда знали, что размеры Вселенной значительно превышают этот масштаб. Стало очевидным, что если источники космических лучей столь высокой энергии (выше предела ГЗК, как называли впоследствии по именам первооткрывателей значение энергии $5 \cdot 10^{19}$ эВ) равномерно распределены по Вселенной, энергетический спектр космических лучей должен испытывать излом при пределе ГЗК. Возможно, вблизи Земли частиц космических лучей с энергией заметно выше этого предела и вообще нет («обрыв» спектра космических лучей).

К тому времени уже был разработан метод наблюдения частиц такой высокой энергии на больших площадях, необходимых для подобных исследований: космические частицы с энергией, приближающейся к пределу ГЗК, встречаются крайне редко, с частотой порядка нескольких раз в год на площади 100 км². Метод заключается в том, что регистрируется не сама частица, а каскад вторичных частиц в атмосфере — «широкий атмосферный ливень» (ШАЛ), генерируемый первичной частицей*.

Два года назад результаты 40-летнего изучения все еще оставались неутешительными. Одна группа авторов (сотрудничество японских университетов, построивших установку AGASA в Японии) утверждала, что обрыва энергетического спектра при пределе ГЗК нет. Другие группы (сотрудничество американских университетов, построивших

установку HIRES в США, и сотрудничество российских университетов и институтов РАН, построивших установку около Якутска, РФ), напротив, получали данные, подтверждающие излом спектра. В 2006 г. самой большой установкой ШАЛ стала новая обсерватория «Пьер Оже», созданная в Аргентине силами международной коллаборации физиков из 17 стран мира (к сожалению, Россия в этой работе не участвует). Там детекторы частиц ШАЛ располагаются с шагом 1.5 км на площади около 3000 км².

В 2007 г. достоянием общественности стали первые результаты новой установки. На международной конференции по космическим лучам в Мексике в июле 2007 г. были представлены предварительные данные об энергетическом спектре космических лучей в области предела ГЗК [2] (для получения окончательных результатов потребуются несколько лет работы установки), которые говорят в пользу излома спектра при пределе ГЗК, рис. 1.

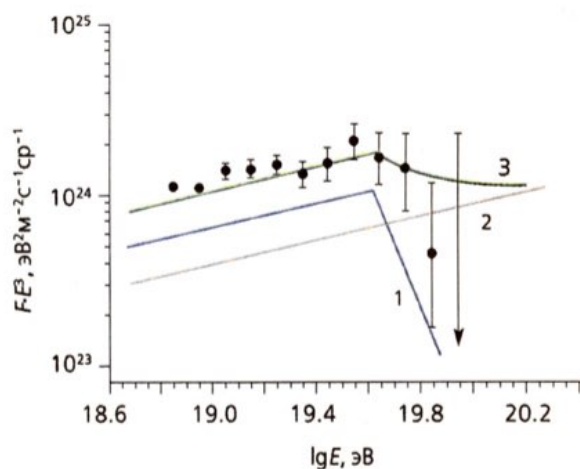


Рис. 1. Энергетический спектр космических лучей в области предела ГЗК. Точки — данные обсерватории «Пьер Оже» [2] (зенитные углы ШАЛ меньше 60°). F — интенсивность потока частиц, E — энергия частицы. Кривые — энергетические спектры, обсуждаемые в тексте. 1 — спектр с изломом при пределе ГЗК, ожидаемый для «далеких» источников, 2 — спектр без излома, ожидаемый для «местных» источников, 3 — сумма двух предыдущих спектров.

* Подробнее о методе наблюдения ШАЛ, истории создания экспериментальных установок с площадью в десятки и сотни квадратных километров см. [1].

Казалось бы, торжествует теория рождения космических лучей в источниках, находящихся на самых далеких, «космологических» расстояниях (энергетический спектр частиц с изломом при пределе ГЗК, спектр 1 на рис.1). Но позже, в ноябре 2007 г., публикуется информация обсерватории «Пьер Оже» [3] относительно направления прихода частиц с энергией выше предела ГЗК (используемое пороговое значение энергии — $5.7 \cdot 10^{19}$ эВ), указывающая на сравнительно малые расстояния до источников, которые вносят основной вклад в наблюдаемый поток частиц. Оказывается, в Южном полушарии, где находится обсерватория, направление прихода большинства частиц предельной энергии совпадает с направлением на источники, называемые «активными галактическими ядрами», которые расположены на расстоянии от Земли не более 75 Мпк (по каталогу [4]). Авторы [3] приводят рисунок (рис.2 в настоящей статье), который очень удачно иллюстрирует метод анализа экспериментальных данных. Каждое событие прихода первичной частицы с заданной пороговой энергией изображено в виде овала, размеры которого характеризуют экспериментальную ошибку в определении направления прилета частицы. Эта ошибка, к сожалению, значительно больше, чем погрешность астрономических измерений положения источника, поэтому поиск корреляции между направлением прихода частиц и положением потенциально источника частиц проводится лишь статистически, путем сравнения вероятности совпадения координат источника и частицы. Авторы [3] показали, что распределение направлений прихода выбранных частиц предельных энергий явно не изотропно (вероятность создания эксперимен-

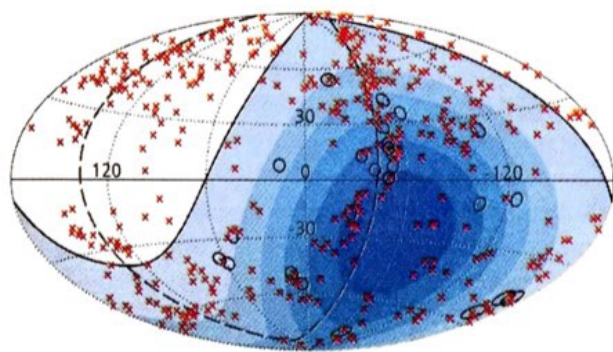


Рис.2. Экспериментальное распределение направления прихода 27 частиц с энергией выше $5.7 \cdot 10^{19}$ эВ (овалы) в сравнении с распределением 428 активных ядер галактик (красные крестики) по каталогу [4] с расстоянием менее 75 Мпк от Земли. Используются галактические координаты, галактическая плоскость — центральная горизонтальная прямая; значения галактической широты приведены при нулевом значении долготы. Штриховая кривая — плоскость местного скопления галактик.

тального набора направлений при изотропном распределении источников менее 1%). Вместе с тем выбор типа источников (активные галактические ядра), которые дают удовлетворительное согласие с экспериментом, пока неоднозначно; не исключено, что и другие источники, распределенные примерно так же, как все «местные», т.е. близкие, галактики, могут объяснить наблюдаемую анизотропию прихода частиц. На рис.3 приведено распределение галактик, находящихся на расстоянии менее 100 Мпк, согласно работе [5]. Легко заметить, что карта расположения активных галактических ядер (рис.2) в значительной степени повторяет карту «местных» галактик (рис.3), и сегодня можно говорить только о корреляции между распределением «местных» галактик и направлением прихода частиц предельных энергий (такой осторожный вывод и сделан в работе [3]).

Для частиц, ускоренных в «местных» источниках, не следует ожидать излома в энергетическом спектре, так как на расстояниях от источника до Земли менее 50—100 Мпк частицы не успевают потерять значительную часть своей энергии. Чтобы излом при пределе ГЗК все-таки проявил себя, как это оказывается в опытах на установках «Якутск», «HIRES» и «Пьер Оже», следует предположить, что в области излома вклад в спектр наблюдаемых частиц дают как «местные» источники, так и «далекие». На рис.1 приведен пример суммы вкладов близких и далеких источников (кривая 3), когда можно объяснить как вид наблюдаемого энергетического спектра, так и корреляцию направления частиц предельной энергии с положением источников, расположенных в местном скоплении галактик. Вместе с тем ясно, что крайне важно продолжить изучение энергетического спектра в области энергий 10^{20} — $3 \cdot 10^{20}$ эВ, где разница между спектрами частиц от далеких и местных источников особенно велика.

Возможности действующей установки в Аргентине далеко не исчерпаны, но без привлечения новых установок и методов наблюдения проблему происхождения космических лучей предельно высоких энергий полностью не решить. На рис.2 показана область небесной сферы, доступная для наблюдения с помощью обсерватории «Пьер Оже» в Южном полушарии (область закрашена голубым цветом и ограничена сплошной линией). События с различными зенитными углами отвечают разным областям на небе, области с разным оттенком голубого цвета соответствуют равной экспозиции установки в выбранных диапазонах зенитных углов. Видно, что обсерватория «Пьер Оже» не позволяет наблюдать достаточно долго многие участки неба с большой плотностью активных галактических ядер. Возможно, поэтому сегодня там не зарегистрировано столько частиц, сколько ожидается в гипотезе о главной роли активных галактических ядер в рождении частиц

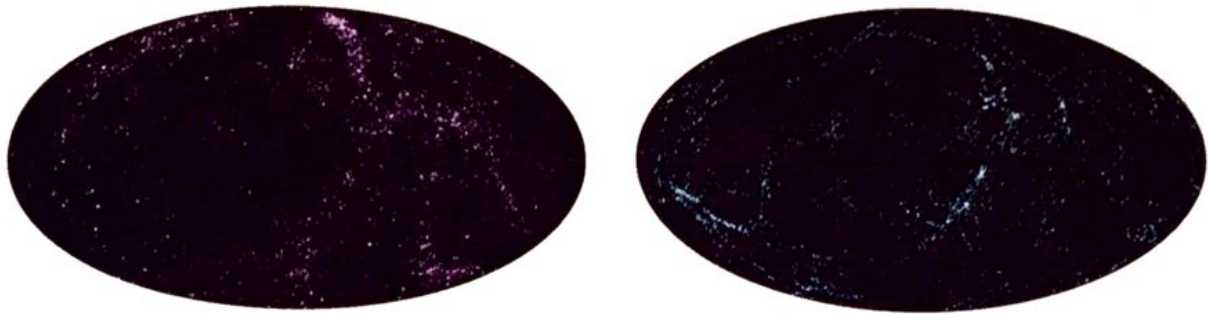


Рис.3. Распределение «местных» галактик в галактических координатах (те же координаты, что на рис.2): слева — на расстояниях менее 40 Мпк, справа — на расстояниях 40—80 Мпк. Данные работы [5].

ультравысокой энергии. Кроме того, установка в Южном полушарии совсем не «видит» значительную часть галактик, принадлежащих Северной части местного скопления. Международное сотрудничество обсерватории «Пьер Оже» планирует создание установки, идентичной аргентинской, в Северном полушарии, чтобы вести измерения сразу в двух полушариях Земли.

Другой путь к равномерной регистрации частиц предельных энергий, приходящих из разных частей небесной сферы, — наблюдение флуоресценции атмосферы на ночной стороне Земли с борта спутника Земли. Одним из первых орбитальных детекторов будет детектор ТУС, о котором в журнале «Природа» уже рассказывалось [1]. Орбитальный детектор, который отслеживает свечение в ночной атмосфере каскада ШАЛ, генерируемого первичной частицей предельно высокой энергии, за год работы, в принципе, равномерно «просматривает» всю небесную сферу. Орбитальный детектор имеет еще одно замечательное преимущество: наблюдение по всему небу проводится одним и тем же прибором, так

что систематическая ошибка в измерении энергии (которой трудно избежать при использовании даже близких по конструкции, но разных детекторов в двух полушариях Земли) не сказывается при сравнении числа зарегистрированных событий с заданной энергией в различных областях небесной сферы. С помощью подготавливаемых орбитальных детекторов [6—8] есть шанс проверить, повторяет ли распределение направлений прихода первичных частиц предельной энергии глобальное распределение «светящейся материи» [9].

* * *

На наших глазах разворачивается грандиозная экспериментальная работа по изучению происхождения космических лучей «предельной» энергии — проблемы, фундаментально важной для понимания рождения Вселенной. В ближайшие годы следует ожидать открытий в этой области астрофизики и интересных теоретических обобщений, стимулируемых новыми экспериментальными данными. ■

Литература

1. Хренов БА., Панасюк М.И. // Природа. 2006. №2. С.17—25.
2. The Pierre Auger Collaboration, Proceedings of ICRC-30 (Merida), 2007, arXiv:0706.2096 [astro-ph].
3. The Pierre Auger Collaboration // Science. 2007. V.318. P.938—943.
4. Véron-Cetty M-P., Véron P. // Astronomy&Astrophysics. 2006. V.455. P.773—777.
5. Jarrett T. arXiv:astro-ph/0405069. V.1. 4 May 2004.
6. Abrashkin V., Alexandrov V., Arakcheev Y. et al. // Advances in Space Research. 2006. V.37. P.1876—1883.
7. Ebisuzaki T. for JEM-EUSO Collaboration // Nuclear Physics B (Proceedings Supplements). 2008. V.175—176. P.237—240.
8. Takahashi Y. for JEM-EUSO Collaboration // J. Phys.: Conference Series. 2007. V.65. P.012022.
9. Kalashev O.E., Khrenov B.A., Klimov P.et al. arXiv:0710.1382 [astro-ph], 2007.