

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Е. Г. Бережко

Введение

Космические лучи, как физическое явление, были открыты почти столетием назад, в 1912 г. (см. например, [1,2]). Несколько необычный термин – «космические лучи» – явился следствием того, что в то время и многие годы спустя неясна была их природа. Тогда было только известно, что космические лучи – это потоки проникающего излучения, приходящего из космоса и производящего ионизацию в атмосфере. Кстати, именно космические лучи создают радиационный фон, уровень которого растет с высотой, так что на высоте 10 км от уровня моря, он примерно в 10 раз выше, чем у поверхности Земли.

В настоящее время природа космических лучей хорошо изучена. Установлено, что они представляют собой потоки ядер химических элементов. Состав космических лучей сходен с химическим составом вещества Вселенной: водород – преобладающий элемент (~ 90%); гелий (~ 8%); ядра более тяжелых элементов (~ 2%).

Одна из главных характеристик космических лучей – их энергетический спектр, или зависимость потока от энергии. Он представлен широким диапазоном энергий: от 10^3 до 10^{20} эВ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг). Для сравнения: ускорители заряженных частиц – наиболее сложные, объемные и дорогие устройства – способны разгонять частицы только до энергий 10^{12} эВ.

Чем обусловлен интерес к исследованию космических лучей

В исследованиях свойств космических лучей существует целый ряд аспектов. Среди них, с некоторой долей условности, можно выделить два основных: ядерно-физический и астрофизический. Первый связан с изучением фундаментальных свойств материи, исследованием свойств «кирпичиков» – элементарных частиц, из которых построен материальный мир.

Стандартный способ практического решения этой задачи в общих чертах состоит в следующем. Экспе-



Евгений Григорьевич Бережко, доктор физико-математических наук, академик АН РС(Я), директор Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

На фото сверху – вспышка сверхновой в одной из соседних галактик [www.wonderingearth.com].

риментатор с помощью специальных устройств – ускорителей – создает пучок частиц определенного сорта, разгоняя (ускоряя) их до высокой скорости. Этот пучок направляется на частицы мишени, и с помощью других устройств – детекторов – исследуется результат взаимодействия пучка с мишенью. Чем выше энергия частиц пучка, тем более широкие возможности имеет экспериментатор: он может не только исследовать структуру сталкивающихся частиц, раскалывая их на составляющие (для чего как раз и требуются затраты энергии), но и наблюдать рождение новых частиц.

Получение достаточно интенсивных пучков частиц с высокими энергиями в лабораторных условиях стало возможным в 50-е годы прошлого века благодаря развитию ускорительной техники. До той поры основным источником новых сведений о свойствах частиц и их взаимодействиях являлись космические лучи. Попадая в земную атмосферу, частицы космических лучей поглощаются в верхних ее слоях, передавая свою энергию множеству вторичных частиц. Именно среди них в 30–40-х годах прошлого века был открыт целый ряд фундаментальных частиц. В качестве примера достаточно упомянуть позитрон, который является античастицей по отношению к электрону.

Экспериментальные исследования свойств фундаментальных частиц в лабораторных условиях обладают несомненными преимуществами в сравнении с аналогичным изучением процессов, вызываемых космическими лучами. Главные достоинства лабораторных экспериментов – управляемость и повторяемость – недостижимы в случае, когда исследователь имеет дело с естественным источником высокоэнергичных частиц. Именно по этой причине, по мере развития ускорительной техники, ядерно-физический аспект в исследовании космических лучей постепенно утрачивает свое значение. Однако, поскольку энергии частиц, достижимые на современных ускорителях ($\epsilon \sim 10^{12}$ эВ), все еще на многие порядки меньше энергий частиц в составе космических лучей, это направление в физике космических лучей еще многие годы будет оставаться актуальным.

Астрофизическое направление в исследовании космических лучей имеет в качестве главной цели объяснение их происхождения, то есть отыскание астрофизических объектов, в которых генерируется спектр космических лучей, а также выяснение тех процессов, которые приводят к формированию этого спектра.

На первый взгляд, установление источников космических лучей – задача несложная: достаточно определить направление преимущественного их прихода к наблюдателю и найти астрофизический объект, расположенный в этом направлении. Скорее всего, он и будет источником космических лучей. Именно так мы без труда определяем положение Солнца на небосводе в ясный день. Однако эта простая задача становится практически неразрешимой в туманный или облачный день. Из-за большого количества рассеяний, которые испытывают фотоны в земной атмосфере в таких условиях, их распределение вблизи земной поверхности становится близким к изотропному, что делает невозможным определение направления на источник этих частиц.

Такого рода ситуацию мы имеем и в случае космических лучей. Будучи заряженными частицами, эти лучи испытывают воздействие магнитного поля, которое повсеместно присутствует в межзвездном пространстве.

Магнитное поле искривляет траекторию движения космических лучей, делая их угловое распределение близким к изотропному. Другими словами, частицы космических лучей приходят на Землю почти равномерно с разных направлений. По этой причине невозможно определить местоположение источника космических лучей по угловому распределению.

Как найти источники космических лучей

Поиск объектов, которые являются источниками космических лучей, ведется непрерывно с момента их открытия. Для решения этой актуальной задачи нет нужды подвергать проверке каждую из имеющихся в Галактике звезд. Такой путь бесперспективен – звезд в ней более ста миллиардов. В то же время хорошо известен ряд весьма существенных требований, которым должны удовлетворять источники космических лучей. Это позволяет значительно сузить круг «подозреваемых», отбрасывая как бесперспективные объекты, не соответствующие этим требованиям. Главное из них – энергетическое. Дело в том, что из эксперимента известно общее энергосодержание космических лучей и среднее время их пребывания в Галактике, по истечении которого они выходят в межгалактическое пространство. Это позволяет вычислить необходимое энерговыделение, которым должны обладать источники космических лучей. Определенное таким образом энергетическое требование оказывается столь жестким, что ему удовлетворяют только объекты с самым большим энерговыделением. Таковыми в Галактике являются вспышки сверхновых (см. фото на стр. 3).

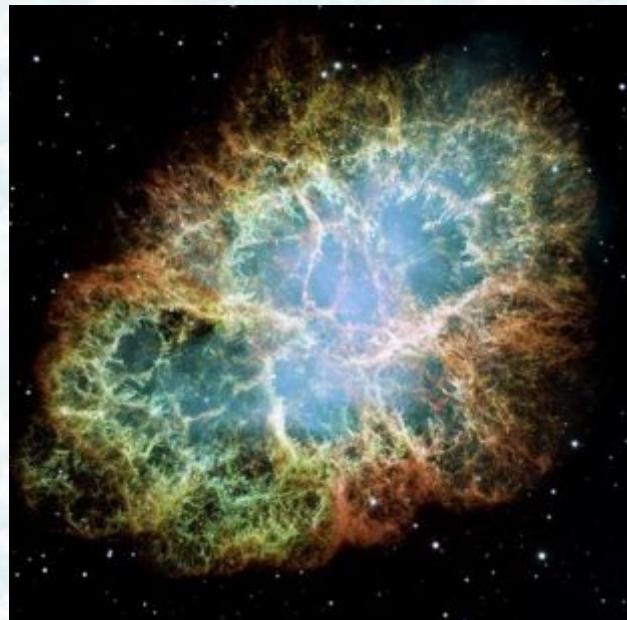


Рис. 1. Остаток сверхновой Крабовидная туманность. Изображение получено космическим телескопом Хаббла [astro.websib.ru].

Стороннему наблюдателю вспышка сверхновой представляется как появление на небосводе новой звезд

ды. Яркость ее в десятки миллиардов раз превосходит яркость обычной звезды, типа Солнца. Первоначально предполагалось, что вспышка сверхновой – это рождение новой звезды. В действительности же этот процесс – взрыв относительно старой звезды, в результате которого она прекращает свое существование. Физика процессов, приводящих к вспышке сверхновой, сама по себе очень интересна. Однако с точки зрения проблемы происхождения космических лучей главным является величина энерговыделения (E_{SN}), которая в типичном случае составляет 10^{51} эрг. Такая энергия высвечивается Солнцем или другой подобной звездой за 10 млрд. лет.

В нашей звездной системе – Галактике – в среднем вспыхивает одна сверхновая в 30 лет. Их суммарного энерговыделения вполне достаточно, чтобы наводнить Галактику космическими лучами с наблюдаемой интенсивностью. Этот факт известен астрофизикам с 30-х годов прошлого века. С тех пор сверхновые являются главным кандидатом на роль источников космических лучей.

Определение объектов – потенциальных источников космических лучей – далеко не решает проблему их происхождения. Дело в том, что при вспышке сверхновой энергия (E_{SN}) выделяется в форме кинетической энергии разлетающихся осколков звезды. Несмотря на то, что эти осколки разбегаются с довольно большой скоростью $V = (1-10) \cdot 10^3$ км/с, энергия отдельных частиц ($E < 10^6$ эВ), отвечающая этой скорости, мала в сравнении с энергиями, представленными в спектре космических лучей. Это означает, что выделившаяся при вспышке энергия осколков звезды (совокупность последних принято называть оболочкой сверхновой) должна каким-то образом частично перерабатываться в энергию популяции ультрарелятивистских частиц, то есть частиц космических лучей.

Расширяющаяся оболочка сверхновой как бульдозер сгребает окружающий межзвездный газ. Со временем объем этого образования, которое принято называть остатком сверхновой, многократно возрастает, а яркость уменьшается. По прошествии нескольких сотен лет остаток сверхновой представляет собой протяженный слабосветящийся объект – туманность (рис. 1). Вместе с тем остатки сверхновых такого возраста относятся к классу молодых. Они надежно идентифицируются и детально изучаются современными экспериментальными средствами. Предполагается, что именно в остатках сверхновых на этапе их эволюции от нескольких сотен до нескольких тысяч лет осуществляется наиболее интенсивная генерация космических лучей.

Поиск подходящего физического процесса (механизма) ускорения космических лучей усиленно велся многими исследователями несколько десятилетий. Решающий успех в решении этой проблемы достигнут в Институте космофизических исследований и аэронауки (ИКФИА) СО РАН: в 70-х годах прошлого века был открыт эффективный механизм ускорения космических лучей удар-

ными волнами [3], который, как стало ясно в дальнейшем, эффективно действует в остатках сверхновых, порождая популяцию космических лучей за счет энергии расширяющейся оболочки.

В последующие два десятилетия усилия исследователей многих стран были направлены на изучение свойств этого механизма, на создание всеобъемлющей теории, способной давать детальные предсказания, которые можно было бы проверить экспериментально. Как выяснилось в ходе исследований, ускоряемые частицы аккумулируют существенную часть энергии системы. Поэтому соответствующее теоретическое описание должно учитывать нелинейные эффекты обратного влияния космических лучей на систему, то есть на структуру и динамику остатка сверхновой. Определяющий шаг в этом направлении был сделан также в ИКФИА: в начале 90-х годов разработана нелинейная теория ускорения космических лучей в остатках сверхновых, созданы и реализованы алгоритмы, предназначенные для получения численных решений соответствующей системы нелинейных уравнений [4]. Попытки получения аналогичных результатов неоднократно предпринимались в течение последнего десятилетия учеными других стран, включая США. Несмотря на то, что зарубежные исследовательские центры располагают высокопроизводительными компьютерами, все эти попытки, вплоть до недавнего времени, оказывались нерезультативными. Только в 2006 г. одной из групп в США удалось повторить расчеты, выполненные ранее в нашем институте. Было констатировано идеальное согласие с этими расчетами [5].

Создание теории, даже очень прогрессивной, еще не означает окончательного решения проблемы. Результат становится явным, как правило, после детальной проверки соответствия теоретических предсказаний экспериментальным данным.

Соотношение теории и эксперимента

Как уже отмечалось, наиболее тщательные измерения могут быть произведены в лабораторных экспериментах. К сожалению, в силу ряда причин моделирование процесса ускорения космических лучей в лаборатории невозможно. Главным препятствием здесь является то обстоятельство, что межзвездная среда, в которой протекают эти процессы, чрезвычайно разрежена: типичная ее концентрация – 1 частица/см³ (в атмосфере 10^{19} частиц/см³). В то же время размер объектов – остат-



Рис. 2. Стереоскопическая система гамма-телескопов HESS (High Energy Stereoscopic System – стереоскопическая система высоких энергий). Намибия.

ков сверхновых – огромен: средний их радиус составляет несколько парсек (пк), при этом $1 \text{ pk} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$ (сравните с расстоянием от Земли до Солнца – $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}$).

С другой стороны, большая удаленность изучаемых объектов от наблюдателя (ближайшие остатки сверхновых расположены на расстояниях 100–1000.pk от Земли) делает невозможным проведение измерений в самом объекте. Такая ситуация является типичной для астрофизики. В этом, как и в других аналогичных случаях, экспериментальная проверка теоретических построений состоит в регистрации излучения, порождаемого космическими лучами, и сравнении его свойств с теоретически предсказанными.

Космические лучи производят электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн – от радио до гамма-диапазона включительно. Это излучение, которое принято именовать нетепловым, по своим свойствам и механизму формирования существенно отличается от теплового, исходящего от любого нагретого тела, в частности, от звезд.

Особый интерес представляет наиболее коротковолновая часть спектра нетеплового излучения – гамма-излучение, высокая энергия которого, согласно расчетам, достигает энергии фотонов ($\epsilon_\gamma = 10^{12} \text{ эВ}$) и даже выше. Факт регистрации такого излучения от того или иного объекта уже говорит о содержании в нем большого количества космических лучей с энергией $\epsilon \sim 10^{13} \text{ эВ}$, что само по себе представляет ценную информацию.

Следует отметить, что возможность регистрации гамма-излучения высоких энергий появилась сравнительно недавно благодаря созданным в ряде стран сложным детектирующим устройствам, называемым гамма-телескопами. Лишь отдаленно они напоминают по устройству своих старших собратьев – обычные оптические телескопы. Гамма-телескоп, как и оптический, имеет зеркало большого диаметра (около 10 метров) с той разницей, что оно не сплошное, а состоит из сегментов размером 0,5 м. Зеркало служит для регистрации короткой световой вспышки, которую одиночный гамма-квант создает в ночной атмосфере. Сами гамма-кванты до поверхности Земли не доходят, поглощаясь в верхних слоях атмосферы. Потoki гамма-излучения, исходящие от астрофизических источников, относительно невелики, поэтому их можно надежно фиксировать устройствами только большого размера. Для повышения чувствительности и точности регистрации на практике используют систему, состоящую из нескольких идентичных гамма-телескопов.

Одна из подобных установок показана на рис. 2. Она находится в Намибии (Африка) и принадлежит международной коллаборации, в которую входят более десяти исследовательских центров западноевропейских стран. Аналогичная

система телескопов CANGAROO японско-австралийской коллаборации работает в Австралии.

Необходимость международной кооперации для создания и эксплуатации таких устройств диктуется их сложностью и высокой стоимостью (порядка 100 млн. долларов).

Гамма-телескопы – приборы узконаправленные. Поэтому их использование предполагает заблаговременное определение конкретных объектов, наиболее интересных для наблюдения. Выявление потенциальных источников гамма-излучения – задача теории. Поскольку наш институт является исследовательским центром, в котором могут быть выполнены наиболее надежные теоретические предсказания ожидаемых потоков нетеплового излучения из остатков сверхновых, осуществляется тесное сотрудничество между Институтом космофизических исследований и аэронауки СО РАН и упомянутыми выше коллаборациями.

Одним из самых ярких источников гамма-излучения является остаток сверхновой RXJ 1713. На рис. 3 представлено сравнение рассчитанного спектра нетеплового излучения этого объекта [6] с данными измерений в радиодиапазоне (выполнены радиотелескопом ATCA), в рентгеновской области (космической обсерваторией ASCA) и в гамма-диапазоне (гамма-телескопом HESS). Как видно из рисунка, теоретические результаты хорошо согласуются со всеми имеющимися экспериментальными данными. Этот факт говорит о многом.

Во-первых, он констатирует надежность сделанных теоретических предсказаний. Во-вторых, экспериментальные измерения подтверждают наличие в данном объекте соответствующего теоретическим расчетам количества космических лучей. Согласно расчетам, в сверхновых производится в точности такое количество космических лучей, которое требуется для объяснения наблюдаемого на Земле их спектра. Следовательно, можно заключить, что остаток сверхновой RXJ 1713 является собой прямое подтверждение того, что сверхновые – основные источники космических лучей в Галактике.

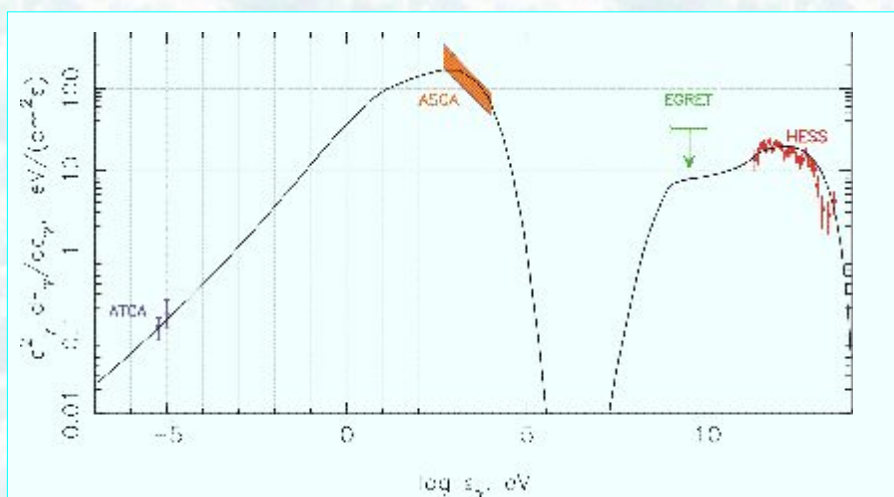


Рис. 3. Поток нетеплового излучения остатка сверхновой RXJ 1713 как функция энергии [6]. Показаны результаты измерений, выполненные радиотелескопом ATCA, рентгеновской космической обсерваторией ASCA, космическим гамма-телескопом EGRET и системой наземных гамма-телескопов HESS.

Таким образом, проблему происхождения космических лучей в значительной мере можно считать решенной.

Для констатации окончательного решения этой проблемы необходимо следующее. На сегодня имеются три сверхновые (включая RXJ 1713), от которых, помимо радио- и рентгеновского, зарегистрировано также гамма-излучение. Хотя во всех случаях согласие теории и эксперимента близко к представленному на рис. 3, для надежного заключения требуется существенно большее количество подобных объектов – не менее десятка. Помимо этого, считается необходимым, чтобы данные, полученные одним инструментом, были подтверждены другими независимыми измерениями.

И, наконец, весьма существенную роль должны сыграть измерения гамма-излучения относительно низких энергий – 10^9 – 10^{10} эВ. Такого рода работа может быть выполнена только детекторами, установленными на космических аппаратах. В настоящее время на околоземной орбите нет действующих гамма-обсерваторий. Вывод на орбиту очередной обсерватории GLAST предполагается в 2008 году. Предыдущая, Compton GRO, отработала на орбите почти десятилетие – с 1991 по 2000 г. Однако чувствительность ее аппаратуры была недостаточной для измерения потоков гамма-излучения от остатков сверхновых. Это обстоятельство подтверждает рис. 3, на котором приведен верхний предел энергии, отмеченный прибором EGRET обсерватории Compton GRO. Аппаратура обсерватории GLAST будет примерно в 30 раз более чувствительной. Поэтому можно ожидать, что выполненные на ней измерения подтвердят теоретические предсказания.

Заключительные замечания

К сказанному следует добавить, что в спектре космических лучей сверхновые представлены энергиями до 10^{17} эВ. В то же время в наблюдаемом спектре космических лучей фиксируется энергия до 10^{20} эВ. Хотя о происхождении наиболее высокоэнергичных космических лучей сегодня можно говорить гораздо менее определенно, есть основания предполагать, что они внегалактического происхождения, то есть производятся в других галактиках. Дальнейшие экспериментальные и теоретические разработки в этой области, несомненно, дадут в ближайшем будущем более определенный ответ на этот вопрос.

Необходимо отметить, что из-за низкой интенсивности космических лучей сверхвысоких энергий их экспериментальное изучение возможно только с помощью наземных установок гигантских размеров. Это так называемые установки широких атмосферных ливней (ШАЛ). Крупнейшая в России установка ШАЛ принадлежит ИКФИА и расположена в Якутии близ пос. Октмцы. Ее детекторы контролируют площадь размером около 10 квадратных километров. Существующие представления

о космических лучах сверхвысоких энергий сложились в значительной мере на основе кропотливых исследований, ведущихся на якутской установке ШАЛ уже более 30 лет. Вместе с тем, для обеспечения прогресса в этой области исследований, требуются установки гораздо больших размеров. Поэтому сейчас строятся установки ШАЛ, контролирующие площади в несколько тысяч квадратных километров. Вопрос о реализации подобных проектов ставился и в нашей стране, в том числе представителями ИКФИА еще в конце 80-х годов прошлого столетия. Однако, к сожалению, в этот период времени наше государство оказалось не в состоянии решать задачи подобного рода. В то же время тот факт, что зарубежными странами отпускаются большие средства на исследования космических лучей, лишний раз говорит о большой актуальности таких работ.

Следует также отметить, что с установлением происхождения космических лучей астрофизическое направление в их исследовании не утрачивает своей актуальности. Дело в том, что нетепловое излучение, порождаемое космическими лучами в удаленных астрофизических объектах, несет на себе отпечаток их физических свойств. Поэтому такое излучение становится важным источником информации о строении и свойствах подобных объектов.

В заключение подчеркнем, что значительные успехи последних нескольких лет в решении проблемы происхождения космических лучей обусловлены не только прогрессом в разработке экспериментальной техники, но и в неменьшей степени достижениями в области теоретических исследований. Можно констатировать, что этот пример является подтверждением умозаключения Л. Ландау: «Нет ничего более практичного, чем хорошая теория».

Литература

1. Росси Б. Космические лучи. – М.: Атомиздат, 1966. – 236 с.
2. Панасюк М.И. Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. – Фрязино: Век 2, 2005. – 272 с.
3. Крымский Г.Ф. Регулярный механизм ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны // ДАН СССР. – 1977. – Т. 234. – С. 1306–1308.
4. Бережко Е.Г., Ёлшин В.К., Ксенофонтов Л.Т. Ускорение космических лучей в остатках сверхновых // ЖЭТФ. – 1996. – Т. 109. – С. 3–43.
5. Kang H., Jones T. Numerical studies of diffusive shock acceleration at spherical shocks // *Astropart. Phys.* – 2006. – V. 25. – P. 246–248.
6. Berezhko E.G., Volk H.J. Theory of cosmic ray production in the supernova remnant RXJ 1713.7-3946 // *Astron. Astrophys.* – 2006. – V. 451. – P. 981–990.

АРХИВ МУДРЫХ МЫСЛЕЙ

Истинная и законная цель всех наук состоит в том, чтобы наделять человеческую жизнь новыми изобретениями и богатствами.

Фрэнсис Бэкон