1981 г. Декабрь *Том 135, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.038

КОСМИЧЕСКАЯ ГАММА-СПЕКТРОСКОПИЯ*)

М. Левенталь, К. Дж. Мак-Каллум

В результате астрофизических процессов в космосе возникает квазимонохроматическое электромагнитное излучение с энергиями, превышающими даже энергию рентгеновских лучей. Линейчатые спектры, отвечающие этому гамма-излучению, можно теперь детектировать с помощью аппаратуры, установленной на баллонах и спутниках.

Строение Вселенной было выяснено почти исключительно с помощью фотонов (квантов электромагнитной энергии), достигающих окрестностей Земли. Еще около пятидесяти лет назад астрономы могли детектировать лишь фотоны с энергиями между 1,5 и 3,5 эВ, т. е. фотоны видимого света. Затем граница энергетической области наблюдаемых фотонов начала сдвигаться как ниже в инфракрасную и радиочасти спектра, так и выше — до близкой ультрафиолетовой области. С появлением ракет, высотных баллонов и спутников удалось продвинуться значительно дальше — до энергий фотонов, не проходящих через атмосферу Земли, т. е. до фотонов далекой ультрафиолетовой области, рентгеновских и гамма-лучей.

Гамма-лучи — электромагнитное излучение с самой высокой энергией. Энергия гамма-фотонов измеряется обычно в миллионах электронвольт (МэВ) и, в принципе, не имеет верхнего предела. Космические гамма-фотоны впервые удалось детектировать около двадцати лет назад. На ранних стадиях наблюдений просто фиксировали пролет фотонов, не имея возможности определить их энергии, как это делается при спектральном анализе в оптической области. Теперь, однако, созданы приборы, могущие детектировать спектральные линии в гамма-диапазоне. В результате начинает поступать соответствующая информация о высокоэнергетических процессах в таких привлекающих внимание современных астрономов объектах, как сверхновые и нейтронные звезды, а также центральные области галактик.

В то время как линии оптического спектра обусловлены переходами атомных электронов с одних энергетических уровней на другие, линии гамма-спектра связаны с переходами на разные энергетические уровни в атомных ядрах. Рассмотрим ядро неона-22, которое состоит из 10 протонов и 12 нейтронов. Ядро обычно находится в своем основном состоянии, когда заполнены уровни с наинизшей энергией, но оно может также находиться в возбужденном состоянии. Если ядро неона-22 находится

*) Leventhal M., MacCallum C. J. Gamma-Ray-Line Astronomy.— Scientific American, July 1980, v. 243, pp. 50—58.— Перевод Н. И. Гинзбург.

М. Левенталь — сотрудник технического управления «Bell Laloratories», «Sandia Laboratories»; К. Дж. Мак-Каллум работает в «Sandia Laboratories», США.

© Scientific American, Inc., 1980.
© Перевод на русский язык, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1981

в наинизшем возбужденном состоянии, то за несколько триллионных долей секунды произойдет его переход в основное состояние. Этот переход будет сопровождаться испусканием гамма-кванта с энергией, равной точно 1,2746 МэВ. Это количество энергии соответствует разнице между двумя упомянутыми состояниями. Таким образом, гамма фотон характеризует определенный ядерный переход.

Этот переход может возникнуть в результате различных событий. В одном случае ядро натрия-22, которое является радиоактивным, переходит с периодом полураспада 2,6 года в возбужденное ядро неона-22. Полагают, что такой распад обычен для процессов, происходящих после взрыва новой. В другом случае ядро неона-22, находящееся в своем основном состоянии, переходит на более высокий энергетический уровень в результате столкновения с внутриатомной частицей высокой энергии. В третьем случае возбужденное ядро неона-22 образуется в результате

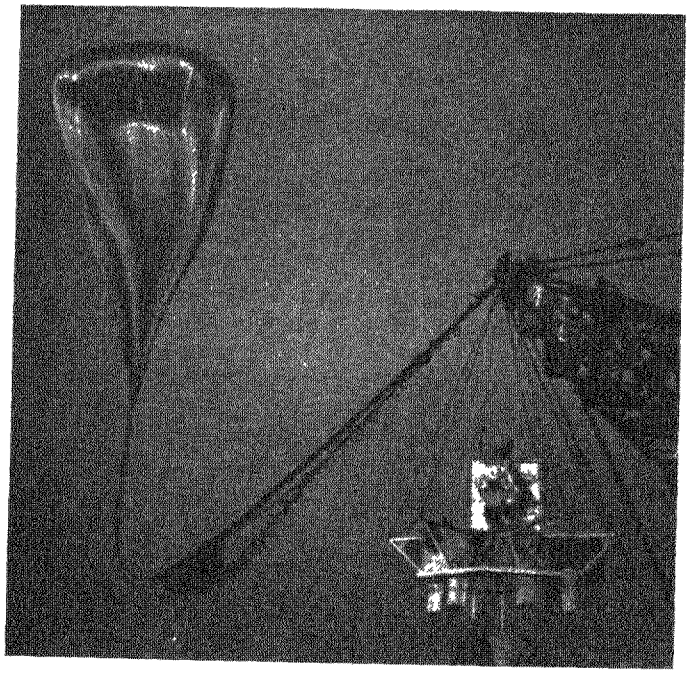

Рис. 1. Запуск баллона с созданным авторами гамма-спектроскопом (вечер 9 октября 1975 г.) для пробного полета над Аламогордо (Нью-Мексико, США).

Баллон прикреплен к парашюту, соединенному с краном (справа), на котором подвешена платформа. На днище платформы расположены амортизаторы. Конус под ними — балласт. В ящике на платформе размещена электроника. Перед ящиком виден цилиндр с жидким азотом, необходимым для охлаждения. Телескоп находится между ними и не виден. В конце полета парашют со всей платформой отделяется от баллона, баллон разрывается, так что они оба спускаются на Землю.

захвата нейтрона ядром неона-21. Каждый раз почти немедленно происходит распад с переходом ядра в основное состояние, сопровождаемое испусканием гамма-фотона с характерной энергией.

Гамма линии могут также быть обусловлены процессами, не связанными с атомными ядрами. Один из таких процессов — столкновение электрона с позитроном (антиэлектроном). Обе частицы обладают идентичными свойствами, за исключением электрического заряда, который отрицателен у электрона и положителен у позитрона. При столкновении электрон и позитрон аннигилируют, а их масса (энергия покоя) «осво-

бождается», переходя в электромагнитную энергию, которая излучается от места аннигиляции обычно в виде двух гамма-фотонов с энергией 0,511 МэВ каждый. По-видимому, процессы аннигиляции электрона с позитроном особенно часто происходят вблизи нейтронных звезд и в центре Галактики.

Второй, отличный от ядерного, процесс, приводящий к возникновению гамма-линий,— циклотронное излучение электронов. Движущийся в магнитном поле электрон испытывает ускорение, заставляющее его испускать фотоны с характерной энергией. Эта энергия пропорциональна напряженности поля, и поэтому при достаточно сильном и однородном поле (таком, как поле у магнитных полюсов нейтронной звезды) электрон испускает гамма-лучи.

Первые детектированные гамма-лучи, несомненно пришедшие из космоса, образовались в результате нескольких из вышеописанных механизмов. Они возникли при гигантской солнечной вспышке, произошедшей в августе 1972 г., и были зарегистрированы Э. Л. Чаппом и его коллегами (Нью-Хемпширский университет), которые поместили небольшой детектор гамма-лучей на борт спутника OSO-7 (седьмая орбитальная солнечная обсерватория НАСА). В наблюдаемом спектре присутствовала линия с энергией 0,511 МэВ, связанная с аннигиляцией позитронов, образовавшихся в солнечной атмосфере при вспышке. Источником другой линии с энергией 2,2 МэВ был захват нейтронов протонами с излучением гамма-фотона каждым возникающим в результате захвата ядром дейтерия. И, наконец, две слабые линии с энергиями 4,4 и 6,1 МэВ возникали в результате распада с переходом в основное состояние ядер углерод-12 и кислород-16, которые в солнечной атмосфере перешли в возбужденное состояние в результате соударений с протонами, ускоренными при вспышке.

За восемь лет, прошедших после первых наблюдений, появилось несколько исследовательских групп, включая нашу группу в лабораториях компаний «Белл» и «Сандия» (Bell and Sandia Laboratories). Гамма-телескопы стали помещать в основном на баллонах (но иногда и на спутниках) с целью поднять аппаратуру выше почти всей земной атмосферы и детектировать гамма-линии космического происхождения. Исследования все еще находятся в своей ранней стадии. В настоящем обзоре мы остановимся на некоторых перспективах, опишем спектральные гамма-телескопы и приведем некоторые из ранних результатов.

□

Важнейшая перспектива, по-видимому,— проведение наблюдений, приносящих сведения о синтезе химических элементов в космосе. Предполагается, что в результате «большого взрыва» в основном возникли водород и гелий, которые переходят в более тяжелые элементы в результате термоядерного синтеза в глубине звезд. Однако при термоядерном синтезе ядер тяжелее железа-56 не освобождается никакой энергии. Поэтому образование этих элементов должно быть связано с механизмом, отличным от термоядерного синтеза внутри звезд. Конкретно, предполагают, что большое количество промежуточных и самых тяжелых элементов образуется при взрывах звезд.

Остановимся на этом подробнее. Звезда представляет собой газовую сферу, в которой образующееся в результате термоядерных реакций тепло противодействует сжатию газа. В конце концов, однако, ядерное горючее звезды истощается. Согласно общепринятой гипотезе при массе звезды, сравнимой с массой Солнца, звезда постепенно сжимается, пока ее радиус не достигнет примерно радиуса Земли. Таким образом звезда превращается в белый карлик; ядерное горючее звезды истощено и она охлаждается.

Если масса звезды значительно больше, то она сжимается не постепенно, а катастрофически коллапсирует и взрывается. Согласно проведенным оценкам, за время от 10 до 300 лет одна из сотен миллиардов звезд в типичной галактике достигает в процессе своей звездной эволюции конечной стадии. Свет такого взрыва в течение времени, исчисляемого днями или даже неделями, может оказаться ярче света, испускаемого всей галактикой. Именно такое событие называют взрывом сверхновой. После взрыва

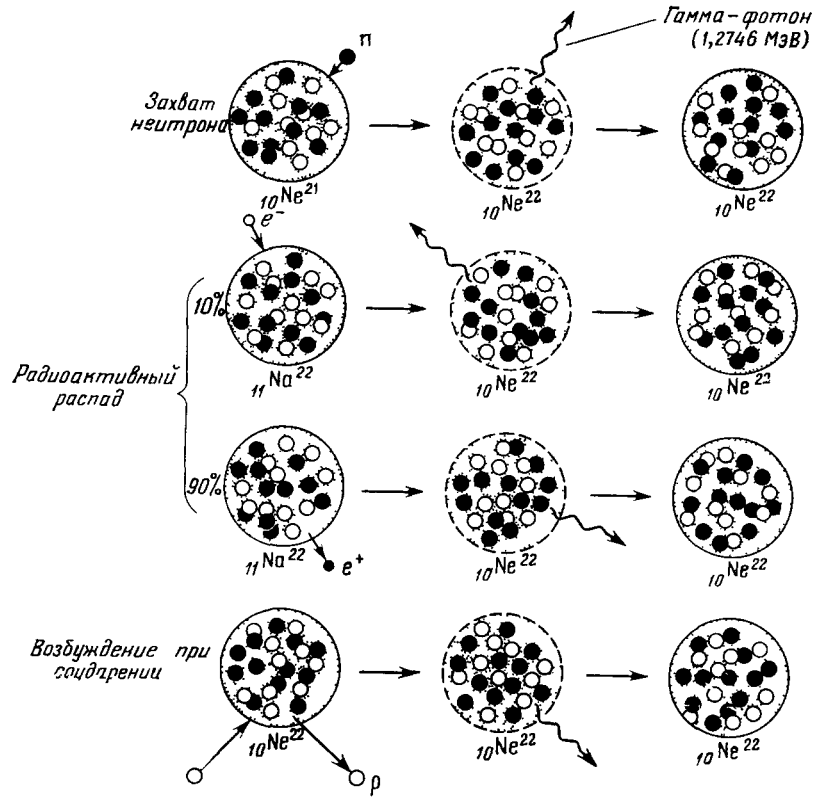

Рис. 2. Атомное ядро при переходе из возбужденного состояния в основное (низшее) испускает гамма-фотон.

На рисунке на примере ядра неона-22 схематически изображены три типа излучения При захвате нейтрона (верхний ряд) неон-21 переходит в возбужденный неон-22 в результате добавления нейтрона (n) При радиоактивном распаде (второй и третий ряды) натрий-22 переходит в возбужденный неон-22 в результате захвата электрона (e^-) (обычно захватывается электрон с собственной орбиты атома) или при испускании позитрона (e^+) Второй случай более обычен, но в результате каждого из них протон переходит в нейтрон При столкновении (нижний ряд) быстрая частица передает неону-22 часть энергии (здесь p — протон), переводя ядро в возбужденное состояние Во всех случаях при распаде возбужденного ядра освобождается фотон (квант электромагнитного излучения) с характерной энергией, точно равной 1 2746 МэВ

остается расширяющаяся оболочка. Самым известным примером сверхновой в нашей Галактике является Крабовидная Туманность в созвездии Тельца.

Астрофизики — теоретики У. Д. Арнетт, Д. Д. Клейтон и С А. Колгейт одними из первых построили схемы для расчета на ЭВМ течения ядерных реакций, происходящих в первые несколько секунд взрыва, когда процессы звездного ядерного синтеза совершенно отличны от протекающих миллиарды лет до момента взрыва. Они предположили, что в результате взрыва возникает тенденция к образованию тяжелых элементов

из более легких. В частности, представляется возможным, что в результате взрыва сверхновых образовалось большинство промежуточных и тяжелых элементов с той относительной распространенностью, которая наблюдается в космосе.

Было бы хорошо проверить эти теории, и в принципе это можно сделать. Спектральные линии в оптической и рентгеновской областях показывают, какие атомы присутствуют в оболочке, образующейся после взрыва сверхновой. Однако излучающие атомы могут частично входить в состав звезды до взрыва, а некоторые из них поступать в оболочку из межзвездного пространства. С другой стороны, многие из синтезируемых в процессе взрыва ядер должны быть радиоактивными, и распад таких ядер будет сопровождаться испусканием гамма-лучей с соответствующей характерной энергией. (Правда, в некоторых случаях эта энергия будет несколько ниже типичной для гамма-лучей и отвечает жестким рентгеновским лучам.) Детектирование даже одной гамма-линии, испускаемой с места взрыва сверхновой, внесет, таким образом, существенный вклад, способствующий нашему пониманию образования элементов.

Вторым типом звездного взрыва является взрыв новой. Взрывы новых не так мощны, как взрыв сверхновых, но они происходят значительно чаще: в каждой галактике за год возникает, возможно, 25 новых. Они также могут вносить существенный вклад в ядерный синтез. Согласно распространенной в настоящее время гипотезе, взрыв новой происходит в двойной звездной системе, в которой одна из звезд является обычной, а вторая белым карликом, т. е. звездой, которая израсходовала свое ядерное горючее без взрыва. Белый карлик не имеет собственных источников энергии. Однако полагают, что вращаясь в двойной системе, белый карлик медленно аккрецирует вещество (в основном водород) от своего компаньона. В конце концов температура и давление в глубине такой аккрецирующей газовой оболочки достигает критических величин, и оболочка взрывается.

Группа астрофизиков под руководством Клейтона и Дж. У. Трурана мл. провела вычисления синтеза ядер при вспышках новых. Они предположили, что образуется большое количество ядер натрия-22, причем почти все они распадаются с переходом в возбужденные ядра неона-22 со временем полураспада 2,6 года. Тогда самой яркой линией гамма-излучения от новой через несколько месяцев после взрыва должна быть линия с энергией 1,2746 МэВ, соответствующая переходу недавно синтезированных ядер неона в их основное состояние. Для астрономов период времени в несколько месяцев вполне достаточен для того, чтобы организовать запуск высотного баллона с гамма-телескопом. Новые вспыхивают часто, и поэтому вполне вероятно, что одна из них окажется недалеко от Солнечной системы. Тогда гамма-линия с энергией 1,2746 МэВ вполне может оказаться первой, принятой от взорвавшейся звезды.

□

На месте взрыва той же сверхновой, которая служит источником промежуточных и тяжелых ядер, иногда остается звезда с массой, равной примерно массе Солнца, сжатая до радиуса размером около 10 км. Плотность в центре этой звезды-«остатка» согласно вычислениям составляет примерно 10^{15} г/см^3, что превышает плотность внутри атомных ядер. В случае такой большой плотности можно полагать, что электроны в атомах «внедряются» в протоны, превращая их в нейтроны. Эта остаточная звезда называется нейтронной.

Согласно имеющимся данным, свойства молодых и старых нейтронных звезд весьма различны. Молодые быстро вращающиеся нейтронные звезды

являются радиопульсарами — открытыми в 60-х годах источниками пульсирующего электромагнитного излучения на радиочастотах. Источником энергии излучения пульсара является, по-видимому, постепенная потеря нейтронной звездой кинетической энергии вращения, поскольку у всех известных пульсаров период между следующими друг за другом импульсами медленно растет.

Истинный механизм превращения энергии вращения в наблюдаемое излучение пока остается недостаточно ясным. В общем, однако, можно

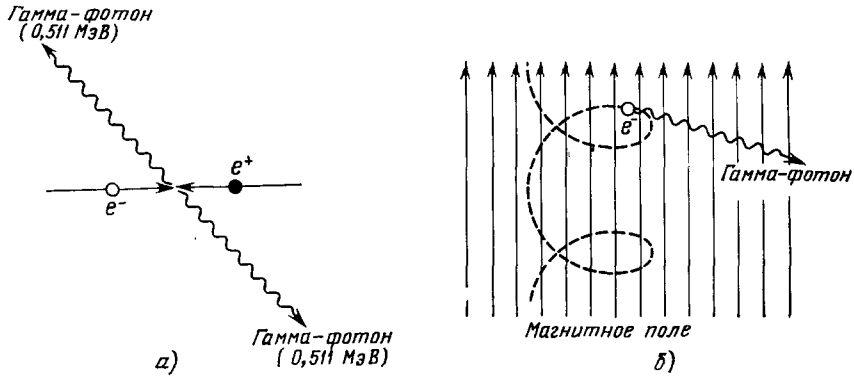

Рис. 3. Схема двух неядерных процессов испускания гамма-линий.

При аннигиляции электрон — позитрон (*а*) позитрон встречает электрон, в результате чего образуется два гамма-фотона, каждый с энергией 0,511 МэВ. При циклотронном излучении электрона (*б*) сильное однородное магнитное поле (обозначено параллельными линиями) заставляет электрон двигаться по винтовой траектории. Частота вращения равна частоте (а следовательно, и энергии) каждого фотона, испущенного электроном. Если частота достаточно высока, фотоны представляют собой гамма-лучи.

полагать, что нейтронная звезда обладает магнитным полем, образующимся из поля первоначальной звезды в процессе формирования остаточной звезды. Поскольку эта остаточная звезда сильно сжалась, то же самое произошло и с магнитным полем, которое в связи с этим, согласно оценке, достигает значений порядка 10^{13} Гс (напряженность магнитного поля Земли составляет доли гаусса). Остаточная звезда вращается, а следовательно, вращается ее магнитное поле. В результате магнитное поле индуцирует на поверхности звезды электрическое поле. Электрическое поле отрывает заряженные частицы от поверхности звезды и ускоряет их до высоких энергий. Траектории частиц изгибаются магнитным полем. В результате изгиба траекторий частицы излучают фотоны.

Пульсацию наблюдаемого на Земле излучения можно объяснить, предполагая, что магнитная ось нейтронной звезды не совпадает с осью ее вращения. Тогда при вращении нейтронной звезды каждый магнитный полюс, вблизи которого напряженность поля особенно велика, будет то появляться, то исчезать при наблюдении с данного направления. Излучение, таким образом, детектируется в виде импульсов, что отвечает модели «маяка».

Почему все это важно для космической гамма-спектроскопии? На одну из причин впервые обратил внимание П. А. Стуррок из Стэнфордского университета. Согласно большинству из принятых теоретических моделей, в магнитном поле нейтронной звезды образуются большие потоки позитронов. Они возникают забавным образом. Магнитное поле столь сильно, что при изгибе траектории частицы с высокой энергией последняя испускает гамма-фотоны. Если энергия такого фотона больше 1,022 МэВ, то при взаимодействии с магнитным полем он может образовать пару

электрон-позитрон (энергия гамма-фотона должна превышать 1,022 Мэв, поскольку масса электрона или позитрона равна 0,511 МэВ, согласно формуле $E = Mc^2$). Когда возникший таким образом позитрон встречается с другим электроном, они аннигилируют, образуя гамма-фотоны с энергией 0,511 Мэв. Детектирование линии этого квазимонохроматического излучения даст возможность получить некоторые сведения об образовании позитронов пульсарами, а следовательно, наложить существенные ограничения на модели пульсаров.

□

Даже самая быстро вращающаяся нейтронная звезда замедляется примерно за миллион лет. Она перестает существовать как радиопульсар, но и «в старости» все еще представляет интерес. В нашей Галактике были обнаружены сотни точечных рентгеновских источников. Полагают, что большинство из них — старые нейтронные звезды, входящие в двойные

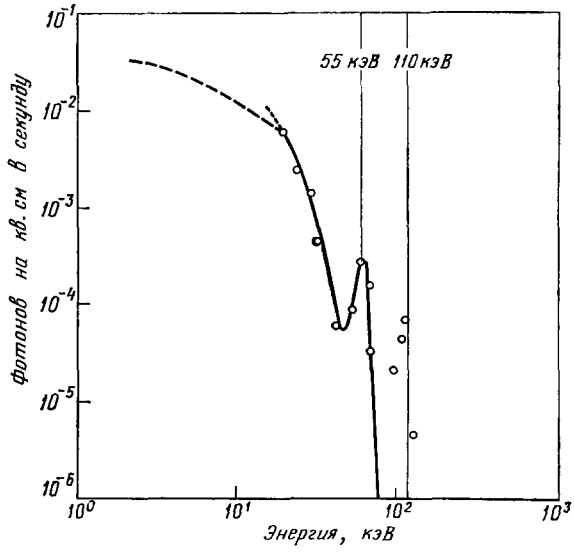

Рис. 4. В гамма-спектре известного рентгеновского источника Her X-1 имеются два пика или напоминающие линию особенности при 55 и 110 кэВ. Линию при 55 кэВ связывают с циклотронным излучением электронов в сильном магнитном поле нейтронной звезды — сверхплотного остатка взрыва звезды. Линия при 110 кэВ является, по-видимому, второй гармоникой циклотронной частоты. Данные получены 3 мая 1976 г. с помощью аппаратуры, поднятой на баллоне над Палестиной (Техас) группой западногерманских астрофизиков, руководимой И. Трюмпером. Полагают, что остальная часть спектра, включая штриховую линию слева, полученную на спутнике, является верхним пределом непрерывного рентгеновского спектра, испускаемого атомами, соударяющимися внутри диска вещества, окружающего нейтронную звезду.

системы и аккрецирующие вещество от звезды-компаньона. Поскольку аккрецирующее вещество ускоряется гравитационным полем нейтронной звезды, оно приобретает высокую энергию и образует горячие аккреционные диски. Столкновения частиц внутри диска генерируют детектируемые на Земле рентгеновские лучи с широким спектром.

Можно думать, что аккрецируемое вещество сильно ионизовано и состоит в основном из быстрых протонов и электронов. Поэтому, быть может, в спектре удается обнаружить также и гамма-линии, поскольку быстрые протоны, падая на поверхность нейтронной звезды, будут возбуждать образующие поверхностный слой ядра, а распад этих ядер с переходом в основное состояние должен происходить, в частности, с испусканием гамма-лучей. По энергии соответствующих гамма-фотонов можно будет составить представление о природе поверхности старой нейтронной звезды.

Как ясно уже из основ общей теории относительности, выходящий из области с гравитационным полем фотон теряет энергию, и отвечающая ему длина волны соответственно растет. В случае света говорят, что фотон «краснеет». Сдвиг длины волны пропорционален изменению гравитацион-

ной потенциальной энергии, которая для случая излучения фотона с поверхности звезды пропорциональна массе звезды, деленной на ее радиус. Поскольку масса нейтронной звезды велика, а радиус мал, ее гравитационный потенциал огромен. То же, следовательно, характерно для изменения (потери) энергии фотонами, покидающими поверхность звезды. Можно поэтому ожидать существенного сдвига всех гамма-линий в область более низких энергий (т. е. более длинных волн). Параметр поверхностного красного смещения обозначим через z_s. Для каждой данной линии он равен разности между наблюдаемой энергией одного фотона и энергией фотона (которую детектировали бы, если бы излучение происходило на Земле), деленной на энергию наблюдаемого фотона.

Перейдем к другому ряду аргументов, независимо развитому К. Бречером и Р. Боуэрсом. Некоторые из известных нейтронных звезд движутся по таким орбитам в двойной системе, что происходит периодическое их затмение звездой-компаньоном. Для каждой из таких нейтронных звезд наблюдаемые перерывы при регистрации рентгеновского излучения на Земле дают сведения о природе вращения и о времени затмения. Вместе с тем, движение по орбите звезды-компаньона то приближает, то отдаляет ее от Земли, что приводит к доплеровскому сдвигу излучаемых ею линий. Кроме того, интенсивность света модулирована, поскольку форма звезды-компаньона меняется под действием приливных сил в гравитационном поле нейтронной звезды. Объединенные вместе эти различные данные позволяют определить параметры орбиты нейтронной звезды; когда же известна орбита, можно вычислить и массу звезды.

□

Нужно иметь в виду также возможность того, что нейтронная звезда состоит в основном из субъядерных частиц, более экзотических, чем нейтроны. В литературе детально обсуждалось много разных вариантов состава звезды, включая даже звезды из кварков; при этом некоторые теоретики отметили, что различные составы звезды приводят к различным радиусам (R) при данной массе (M). Для любой нейтронной звезды определение M и измерение параметра z_s, который пропорционален отношению M/R, дает возможность определить R. Это накладывает сильные ограничения на предположения о составе звезды. Гамма-астрономия, следовательно, непосредственно связана с физикой сверхплотного вещества.

В этой связи может оказаться существенным недавнее открытие нового класса астрономических объектов. Эти объекты за время порядка секунд или минут испускают огромные потоки гамма-излучения, после чего излучение прекращается. Об этих объектах известно немного. Пока неизвестно даже, расположены они в нашей Галактике или вне ее. Наиболее вероятно, что эти всплески связаны с резкими изменениями энерговыделения на поверхности нейтронной звезды или вблизи ее. Такой всплеск может, например, возникать, когда в двойной системе эпизодически происходит падение (аккреция) на нейтронную звезду вещества звезды-компаньона.

10 июня 1974 г. группа под руководством А. С. Джекобсона из лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического Института запустила установленный на баллоне и предназначенный для гамма-спектроскопии телескоп с широким полем зрения. При этом ось телескопа была направлена на галактический антицентр (т. е. в направлении, противоположном направлению на центр Галактики). При этом были зарегистрированы гамма-всплески продолжительностью в 20 минут. Согласно интерпретации упомянутой группы, всплески имеют астрофизическое происхождение. В спектре всплеска обнаружили напоминающие линию

особенности. Было предположено, что гамма-излучение вызвано несколькими простыми механизмами с учетом, что все линии обладают одинаковым красным смещением (одинаковым значением параметра z_s) к более низким энергиям. Например, напоминающая линию особенность в спектре всплеска вблизи 0,4 МэВ была интерпретирована как линия аннигиляции позитрона с энергией 0,511 МэВ, сдвиг которой характеризуется значением $z_s = 0{,}28$. В этой области электромагнитного спектра очень трудно найти

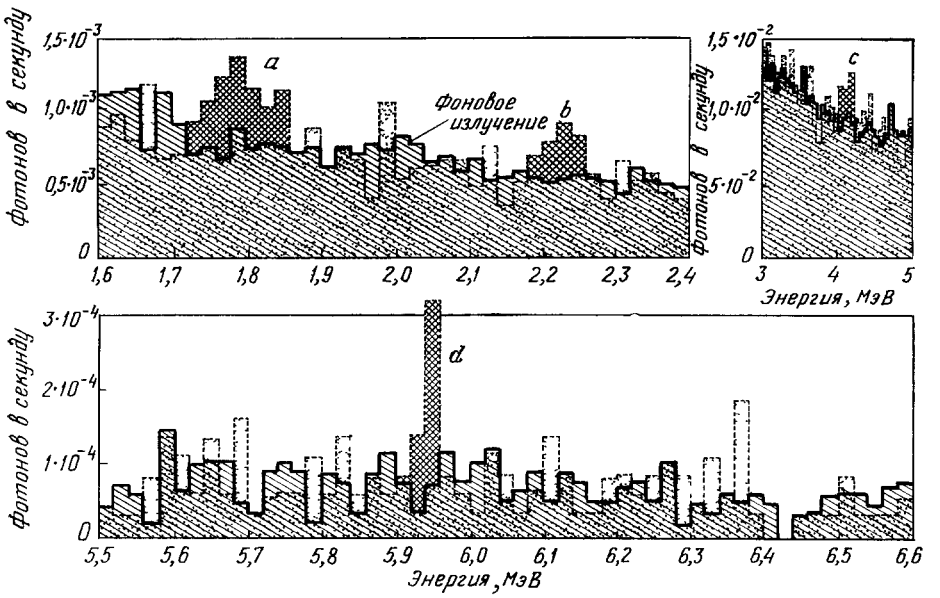

Рис. 5. Гамма-всплеск из направления, противоположного центру Галактики, произошедший 10 июня 1974 г. и продолжавшийся 20 мин.

Изображены три различные энергетические области спектра всплеска. Четыре напоминающие линию особенности четко выступают над фоновым излучением, когда телескоп направлен на рассматриваемую часть небосвода. Две из них, обозначенные *a* и *b*, могут отражать образование гамма-фотонов в результате реакции соединения нейтрона с протоном с образованием ядра дейтерия. Смещение особенности *a* в область меньших энергий объясняется при предположении, что вносящие вклад в *a* фотоны образовались вблизи поверхности нейтронной звезды и при выходе из мощного гравитационного поля звезды потеряли часть своей энергии. Особенность *c* связывают с аннигиляцией электрон-позитрон, причем здесь энергия фотона также ниже своего нормального значения, равного 0,511 МэВ. Особенность *d* связывают с захватом нейтронов ядрами железа-56, которые переходя при этом в возбужденные ядра железа-57, а последние распадаются в нормальное состояние, испуская фотон. Ядра железа-56 — самые стабильные атомные ядра, и поэтому во многих теоретических моделях именно из них состоит поверхность нейтронной звезды. Энергия фотонов снова меньше нормальной. Данные получены группой, руководимой А. С. Джейкобсоном (Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технологического института).

другой простой ядерный переход, могущий привести к возникновению такой линии. С другой стороны, значение поверхностного параметра красного смещения, равное 0,28 для нейтронной звезды, хорошо согласуется с теоретическими вычислениями.

В результате наблюдений, независимо проводившихся в дальнейшем нашей группой, также была обнаружена возможная линия с энергией 0,4 МэВ, когда наш находящийся на баллоне гамма-телескоп был направлен на антицентр. Поле зрения аппаратуры было широким, но включало Крабовидную Туманность с нейтронной звездой в ее центре. Еще позже Б. Д. Тигарден и Т. Л. Клайн из Годдаровского Центра Космических полетов НАСА опубликовали данные о первых измерениях спектра гамма-всплеска с помощью установленной на спутнике аппаратуры с высоким разрешением. Они также получили некоторые указания на существование гамма-линий с гравитационным красным смещением. Вполне вероятно,

таким образом, что первые измерения гравитационного красного смещения от нейтронной звезды уже выполнены.

Находящиеся вблизи поверхности нейтронной звезды электроны вращаются в магнитном поле звезды и поэтому излучают фотоны Если это происходит вблизи магнитных полюсов звезды, где поле очень сильное и однородное, циклотронное излучение квазимонохроматично и, таким образом, приводит к появлению гамма-линий. Такую возможность впервые отметили советский астрофизик Р. А. Сюняев и его коллеги. Обнаружение

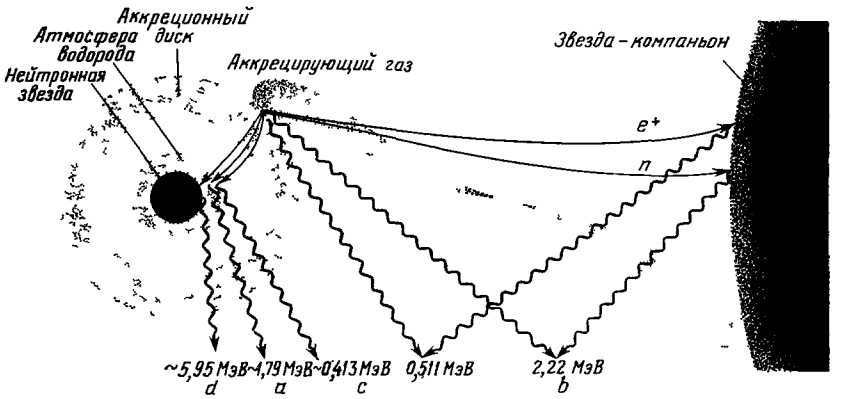

Рис 6 Эпизодическая аккреция газа на нейтронную звезду от ее компаньона в двойной системе может вызвать гамма-всплеск, спектр которого изображен на рис 5

Согласно такой гипотезе, результат столкновения падающего газа с окружающим звезду газовым диском возникают нейтроны и позитроны Следующие затем события включающие захват нейтронов водородом и железом-56 и взаимную аннигиляцию позитронов и электронов, приводит к образованию фотонов, из которых состоит всплеск Фотоны, излучаемые с поверхности нейтронной звезды и вблизи нее, при выходе из гравитационного поля звезды теряют энергию Буквами *a* — *d* обозначены гамма-линии, изображенные на рис 5 При составлении рисунков использованы данные Р. Е. Лингенфельтера, Д. С Хигдона и Р. Рамати

таких линий позволяет измерить напряженность поля. Оно явилось бы также доказательством и самого существования такого исключительно сильного магнитного поля.

В мае 1976 г. группа из Института Физики и Астрофизики им.Макса Планка в Гаршинге (ФРГ), работая совместно с группой из Тюбингенского университета (обеими группами руководил И. Трюмпер), произвела запуск баллона над Палестиной (Техас). На баллоне была установлена аппаратура, с помощью которой получили спектр гамма-лучей с небольшой энергией от медленно вращающегося рентгеновского пульсара Геркулес X-1 (Her X-1). Гамма-излучение с очень низкой энергией обладает не линейчатым, а непрерывным спектром. Этот спектр был интерпретирован как верхняя область рентгеновского спектра, испускаемого аккреционным диском, окружающим пульсар. Однако в области энергии 55 кэВ возникает напоминающая линию особенность. Вторая такая особенность лежит в области энергии 110 кэВ. Обе особенности детектируются в виде импульсов с периодом 1,24 с, что соответствует периоду пульсара. Полагают, что это — линия циклотронного излучения электронов вместе с гармоникой на двойной циклотронной частоте. Существование особенности с энергией 55 кэВ было подтверждено при вторичном полете баллона и еще раз в прошлом году с помощью аппаратуры на спутнике НАСА HEAO-1 (The first High Energy Astronomical Observatory — первая астрономическая обсерватория высоких энергий). Если эта линия действительно обусловлена циклотронным излучением, то наблюдения групп Трюмпера впервые

позволили измерить магнитное поле нейтронной звезды. Согласно этим данным напряженность магнитного поля пульсара Her X-1 равна примерно $5{,}3 \cdot 10^{12}$ Гс.

□

Диффузное гамма-излучение с энергией, соответствующей гамма-линиям, пронизывает нашу Галактику и поэтому оно могло бы исходить из плоскости Млечного Пути. Для его наблюдения нужны телескопы более чувствительные, чем существуют в настоящее время. Оно связано с тем, что частицы космических лучей (в основном ядра с высокой энергией) соударяются с частицами пыли, атомами и молекулами межзвездной среды. В результате этого образуются возбужденные ядра. При распаде возбужденных ядер возникают гамма-лучи. Ядра межзвездной среды, соударяясь с быстрой космической частицей, испытывают отдачу, в результате чего гамма-фотоны испускаются движущимися ядрами. Возникающий доплеровский сдвиг энергии фотона имеет разный знак в зависимости от того, движется ли ядро в направлении Солнечной системы или от нее. Следовательно, для хаотически движущихся ядер гамма-линии уширяются.

Это уширение пропорционально скорости ядер. Поэтому, как отметили Р. Рамати, Б. Козловский, Р. Е. Лигенфельтер и др., каждая гамма-линия может представлять собой комбинацию трех различных компонент. Узкая компонента каждой данной линии должна быть связана с излучением фотонов ядрами атомов межзвездной пыли, которые, по-видимому, теряют сообщенную им энергию и испускают излучение, находясь еще внутри пылинки. Поэтому исследование узкой компоненты линий может предоставить хорошую возможность для определения состава и пространственного распределения межзвездной пыли.

Несколько более широкий вклад в каждую данную линию должен возникать в результате излучения фотонов ядрами атомов, не входящих в состав пыли. Тогда по этой уширенной компоненте можно определять состав и пространственное распределение частиц межзвездного газа. Безусловно, для достижения этой цели могут служить и другие астрономические методы. В случае оптической астрономии, однако, межзвездная

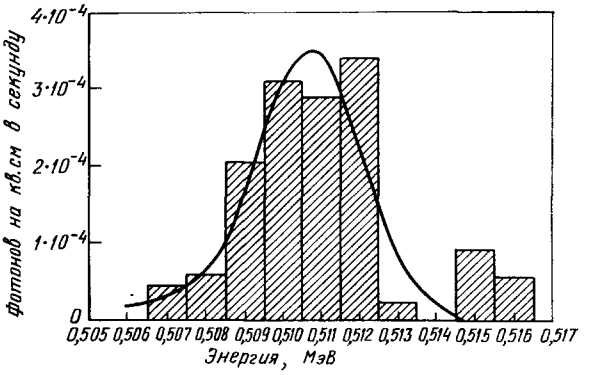

Рис. 7. В спектре гамма-излучения от галактического центра (или, по крайней мере, в направлении на галактический центр) имеется напоминающая линию особенность на 0,511 МэВ.

Мощность линии соответствует аннигиляции 10^{43} позитронов в секунду. Механизм образования позитронов еще не известен. На рисунке приведены данные, которые были получены авторами с помощью гамма-телескопа, запущенного на баллоне над Алис-Спрингс в Австралии в ноябре 1977 г.

пыль ограничивает наблюдения в направлении центра Галактики расстояниями лишь от 10 000 до 13 000 световых лет для галактик с радиусом более 30 000 св. лет. Для гамма же фотонов межзвездная среда весьма прозрачна. Кроме того, свет и рентгеновские лучи испускаются атомными электронами. В связи с этим испускание света и рентгеновских лучей зависит от состояния вещества, например, от степени его ионизации. Гам-

ма-спектр не зависит от химического состояния вещества, поскольку гамма-фотоны испускаются ядрами атомов.

Наконец, широкая компонента в каждой данной линии должна быть связана с излучением фотонов ядрами самих космических лучей. Скорости этих ядер сравнимы со скоростью света. Следовательно, по широкой компоненте можно изучать космические лучи, столкновения которых с межзвездным веществом ответственны, как полагают, за возникновение горячих областей межзвездного газа. Предполагается также, что соударение космических лучей с ядрами атомов межзвездного газа приводит к образованию таких легких элементов, как литий и бериллий (можно предполагать, что эти элементы возникают в толще звезд в результате термоядерных реакций, но они исчезают при других реакциях). Сложность при детектировании прибывающих на Землю космических лучей заключается в том, что эти лучи отклоняются магнитными полями Солнечной системы, и поэтому достигающая Земли частица может и не обладать характеристиками космических лучей межзвездного пространства. Детектирование же характерного гамма-излучения космических лучей должно быть свободно от такого осложнения.

□

Другими важными объектами космической гамма-спектроскопии являются целые галактики или их центральные области. Полагают, например, что квазары — молодые галактики, невероятно далекие от Земли, но при этом необычно яркие. Предложены два типа моделей квазаров. В моделях первого типа исходят из того, что в центре квазаров происходит большое количество взрывов сверхновых. В моделях второго типа предполагают, что гравитационные силы огромной черной дыры разрывают звезды в центре квазаров, причем звездное вещество образует горячий аккреционный диск. В этом втором случае можно было бы надеяться наблюдать спектр гамма-излучения, обусловленный столкновениями внутри диска. При этом гравитационное поле черной дыры должно приводить к смещению и уширению линий.

Даже центр нашей Галактики — область таинственная, частично в силу того, что с помощью оптических телескопов нельзя выяснить ее структуру. В ноябре 1977 г. (и позже в апреле) мы подняли нашу аппаратуру на баллоне над Алис Спрингс (Alice-Springs) в Австралии с целью детектирования гамма-фотонов от центра Галактики. Еще до этого группа, руководимая Р. С. Хаймсом (Rice University), получила заманчивые данные о наличии гамма-линий вблизи 0,5 МэВ. При полете в 1977 г. мы обнаружили линию с энергией, точно равной 0,511 МэВ. Она была расположена среди непрерывного гамма-спектра. Мы подтвердили существование линии в 1979 г. Она соответствует аннигиляции 10^{43} позитронов в секунду в центре Галактики или вблизи него. Возможность существования такой линии от галактического центра была указана два десятилетия назад Ф. Моррисоном из Массачузетского технологического института и позже Ф. У. Штекером из Годдардского центра космических полетов, а также одним из авторов (Левенталь).

Научная литература изобилует предположениями о том, как возникают позитроны. Согласно одной из гипотез, являющейся, возможно, наиболее правдоподобной, предполагается, что позитроны являются побочным продуктом сверхновых. Идея заключается в том, что при распаде радиоактивных ядер, образующихся при взрывах звезд, освобождаются позитроны, которые вылетают из ядер с энергиями порядка сотен тысяч электрон-вольт. Могут пройти тысячи лет, прежде чем позитрон аннигилирует при встрече с электроном. Тогда наблюдаемая на Земле линия

может быть продуктом взрывов сверхновых, произошедших довольно давно. В пользу такой гипотезы свидетельствует тот факт, что в галактическом центре находится множество звезд.

Вторая возможность заключается в том, что космические лучи, сталкиваясь с межзвездным веществом, образуют радиоактивные ядра, которые при распаде испускают позитроны. В результате соударений могут возникнуть и π-мезоны, распад которых также приводит к образованию позитронов. Однако из недавно проведенных вычислений следует, что при принятых в настоящее время значениях потока космических лучей и плотности межзвездного вещества для объяснения наблюдаемой линии с энергией 0,511 МэВ недостает двух порядков величины. Отвечающая этой линии мощность весьма велика: она в 10 000 раз больше светимости Солнца, сконцентрированной на одной частоте.

Третья возможность такова: в центре галактики находится большое количество радиопульсаров, испускающих в межзвездное пространство

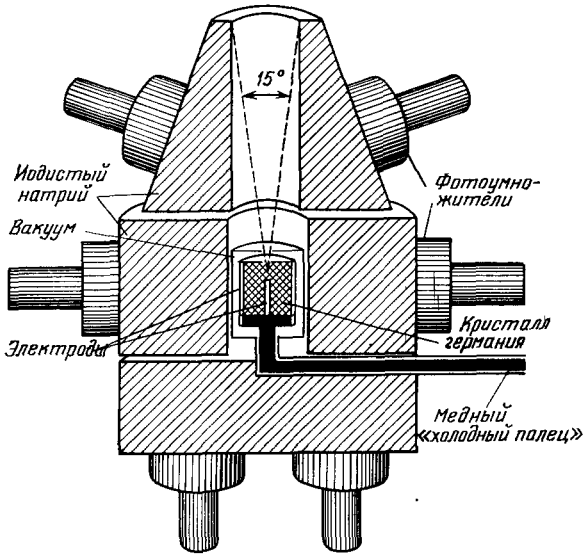

Рис. 8. Гамма-телескоп спектроскопического типа, использованный авторами и их сотрудниками для полета на баллоне·

В телескопе один детектор помещен внутри другого. В центре находится кристалл германия, внутри которого гамма-фотоны рассеиваются на электронах. Испытывающие отдачу электроны создают импульс электрического тока. Германий охлаждается с помощью медного «холодного пальца», который в свою очередь охлаждается жидким азотом (иначе спонтанные токи в германии будут сильнее тока, вызываемого гамма-фотонами). Кристалл окружен блоками (камерой) из йодистого натрия с присадкой небольшого количества атомов теллура. Попадающий в эти блоки гамма-фотон поглощается электроном, который сталкивается затем с атомами теллура. Излучаемый атомами свет усиливается фотоумножителями. Процесс детектирования гамма-фотона детальнее изображен на рис. 9.

огромные потоки позитронов. Другие обсуждаемые механизмы в настоящее время не представляются вероятными. Так, согласно одной из гипотез, предполагается существование в центре Галактики большой черной дыры, окруженной аккреционным диском. Другое предположение связано с возможностью образования на ранней стадии эволюции Вселенной огромного числа маленьких (мини) черных дыр, которые в результате квантово-механических процессов «испаряются»— выделяют энергию в основном в форме электронно-позитронных пар. Вероятно, наименее правдоподобная гипотеза — предположение о наличии в центре Галактики большого количества антивещества.

Важно, однако, что с помощью наблюдений можно выяснить механизм образования позитронов в центре Галактики в ближайшие десять или даже пять лет. Это можно сделать, составив подробные карты излучающих областей. Если область является точечной, тогда наиболее вероятный источник излучения — черная дыра. Если максимумы интенсивности излучения появляются вблизи радиопульсаров, то, по-видимому, последние и являются источником излучения. Кроме того, во многих моделях естественно появление других линий, помимо линии 0,511 МэВ; тогда

детектирование таких линий ограничит выбор между разными моделями.

При создании гамма-спектроскопа решающим является тот факт, что гамма-фотоны не могут отражаться от зеркал. Для создания гамма-

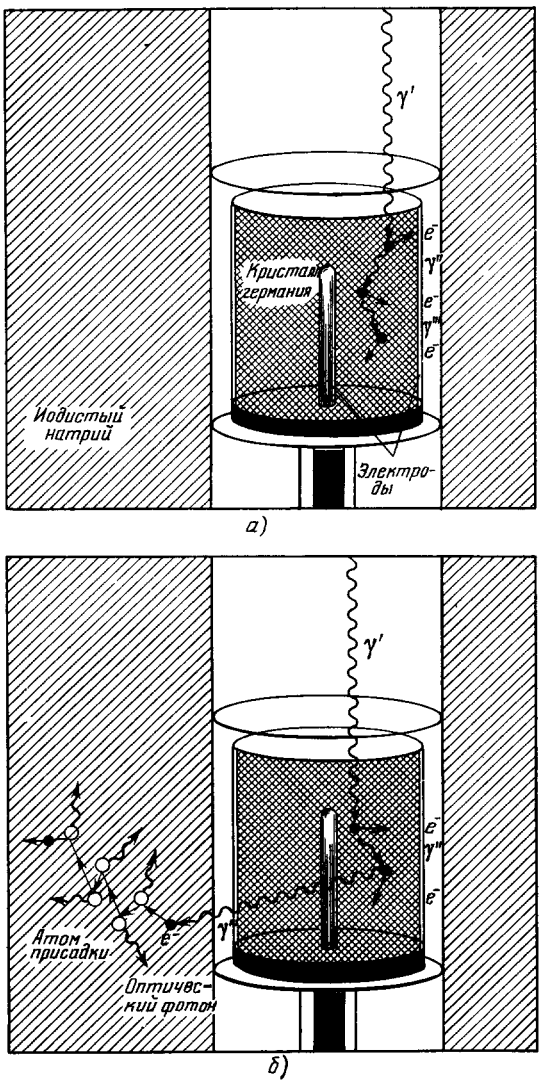

Рис. 9. Схема детектирования одного гамма-фотона (см. рис. 8).

На рис. *а*) попавший в детектор фотон (γ') последовательно рассеивается, но остается внутри германиевого кристалла. При движении электронов, возникающих в результате рассеяния, появляется ток, сила которого точно определяется энергией фотона. На рис *б*) при рассеянии фотон попадает в блоки из йодистого натрия, где вызывает световое излучение. Фотон в этом случае оставляет в германиевом детекторе лишь часть своей энергии. Прибор устроен так, что детектирование такого события не считается (схема антисовпадений). События *б*) происходят чаще событий *а*).

телескопа можно, однако, воспользоваться тем, что при прохождении через вещество гамма-фотоны теряют некоторое количество энергии при рассеянии на электронах. В центре используемого нами телескопа расположен кристалл германия объемом 130 см^3. Проникая в такой кристалл, гамма-фотон обычно претерпевает несколько последовательных актов рассеяния на электронах. Образующиеся электроны отдачи возбуждают слабый ток, амплитуда которого пропорциональна энергии гамма-фотона. Это дает возможность детектировать каждый гамма-фотон.

Центральный детектор помещен внутрь камеры весом 400 фунтов, состоящей из йодистого натрия с присадкой атомов теллура. Вещество камеры также чувствительно к гамма-фотонам. Соударения гамма-фотона

с электроном приводят к появлению электронов отдачи, которые в свою очередь сталкиваются со многими атомами теллура. Последние испускают импульсы света в форме фотонов с оптическими энергиями.

Энергетическое разрешение кристалла германия при 1 МэВ равно примерно 2 кэВ. Это означает, что фотоны с энергией 1 МэВ можно детектировать в виде спектральной линии шириной 2 кэВ. Разрешение детектора из йодистого натрия меньше примерно в 30 раз. Однако камера из йодистого натрия выполняет три важных функции. Во-первых, она оставляет открытым вход к центральному детектору, что определяет поле зрения телескопа. Во-вторых, она экранирует центральный кристалл от сильного гамма-фона, образующегося в земной атмосфере под действием космических лучей. И, в-третьих, импульсы света усиливаются фотоумножителем и поэтому используются для дискриминации тех гамма-фотонов, которые при рассеянии проникли из кристалла германия в йодистый натрий. Такой фотон оставляет некоторое количество своей энергии в обоих веществах, и поэтому ток в центральном детекторе не пропорционален истинной энергии фотона.

В процессе полета баллона, продолжающегося один или два дня, управление телескопом осуществлялось с наземной телеметрической станции. Если телескоп следовал за источником гамма-излучения, на квадратный сантиметр поверхности центрального детектора за каждые несколько минут поступал один гамма-фотон космического происхождения. Более вероятно, однако, что фотоны будут рассеиваться с выходом из центрального кристалла. Но детектирование таких фотонов будет сопровождаться почти одновременным возникновением света в окружающем экране из йодистого натрия. Такие события можно поэтому исключить. В результате «работает» лишь центральный детектор, регистрирующий количество гамма-фотонов как функцию энергии фотона. В конце полета телескоп отделяется от баллона на высоте примерно 40 км и с помощью парашюта спускается на Землю.

□

Мы полагаем, что эксперименты с помощью баллонов остаются существенными для космической гамма-спектроскопии. Во-первых, на высотах полета спутников в радиационных поясах находится много быстрых частиц. Эти частицы генерируют сильный фон гамма-излучения. Более того, эксперименты на баллонах дешевле, чем на спутниках. Далее, время с момента планирования экспериментов с помощью спутников и до получения данных занимает от 5 до 10 лет при стоимости, равной десяткам миллионов долларов. Для экспериментов на баллонах может понадобиться менее двух лет при стоимости около одного миллиона долларов. Наконец, на баллонах производятся прекрасные предварительные испытания будущей аппаратуры для спутников. С другой стороны, спутник находится в полете дольше и накапливает значительно больше данных.

В настоящее время создана сеть спутников, способных точно определять направление гамма-всплеска с помощью триангуляции. 5-го марта 1979 г. эти спутники детектировали самый мощный из известных всплеск в направлении центра оболочки сверхновой в Большом Магеллановом Облаке, являющемся галактикой-спутником нашей Галактики. Спектр всплеска получили Е. П. Мазец и его коллеги в Физико-техническом институте им. Иоффе в Ленинграде. Спектр содержит напоминающую линию особенность с энергией 0,4 МэВ. Это отвечает линии аннигиляции позитронов, смещенной в красную сторону. Местонахождение всплеска и детектирование линии убедительно свидетельствует в пользу предпо-

ложения, что источником гамма-всплеска действительно является нейтронная звезда *).

Осенью 1979 г. в США был произведен запуск спутника HEAO-3. На борту спутника находится гамма-телескоп, содержащий четыре германиевых детектора, заэкранированных оболочкой из йодистого цезия. Этот телескоп, созданный руководимой Джекобсоном группой из Лаборатории Реактивного Движения, должен работать в течение года и сканировать большую часть неба с целью детектирования резких гамма-линий. Чувствительность телескопа составляет 10^{-4} фотонов на квадратный сантиметр поверхности детектора в секунду. Телескоп функционирует исправно, но пока еще рано сообщать о результатах.

В дальнейшие планы НАСА входит запуск в середине 80-х годов спутника — гамма-обсерватории. На спутнике будут расположены пять чувствительных гамма-телескопов, из которых три предназначены для детектирования непрерывного спектра. Два других телескопа, один с детектором из германия (конструкция группы, руководимой Э. Петерсоном из университета в Сан Диего, штат Калифорния), а другой с детектором из йодистого натрия (конструкция группы, руководимой Д. Д. Курфессом из Морской исследовательской лаборатории), предназначены для поисков гамма-линий. В группу Петерсона входят сотрудники из Белл-лабораторий, из Годдардского центра космических полетов, из Лаборатории реактивного движения, из лабораторий Сандиа, а также из двух французских институтов (Центр ядерных исследований в Сакле и Центр по исследованию космических лучей в Тулузе). В работе, руководимой Курфессом, принимают участие сотрудники Северо-Западного университета, университета Райс и английского колледжа Королевского флота. В продолжении запроектированных двух лет полета аппаратура, сканирующая большую часть неба, должна иметь чувствительность в гамма-линиях, равную 10^{-5} фотонов в секунду на квадратный сантиметр. С запуском такой обсерватории **) космическая гамма-спектроскопия достигнет своей зрелости.

ЛИТЕРАТУРА

Chupp E. L. Gamma-Ray Astronomu.— Amsterdam: D. Reidel, 1976.
Trümper J., Pietsch W., Reppin C., Voges W., Staubert R., Kentsiorra E.— Astrophys. L. Lett., 1978, v. 219, p. L105.
Lingenfelter R. E., Ramaty R.— Phys. Today, March 1978, v. 31, p. 40.
Розенталь И. Л., Усов В. В., Эстулин И. В.— УФН, 1979, т. 127, с. 135. — (Добавлено переводчиком.)

*) По мнению авторов этих работ (см.: Мазец Е. П. и др.— Письма Астрон. ж., 1980, т. 6, с. 609, 706; Nature, 1981, v. 290, p. 378), источником всплеска является нейтронная звезда, расположенная в нашей Галактике. (*Прим. перев.*).

**) О советской гамма-обсерватории см.: УФН, 1980, т. 132, с. 704 (*Прим. перев.*)