

# КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

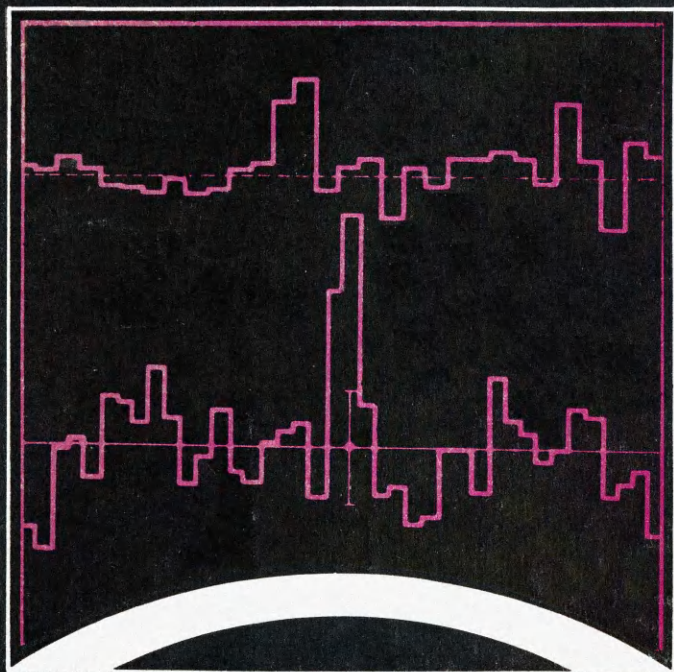
ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1983 1

**А.А.Степанян**

## ГАММА-АСТРОНОМИЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ



**ЗНАНИЕ**

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

**КОСМОНАВТИКА,  
АСТРОНОМИЯ**

1/1983

Издается ежемесячно с 1971 г.

**А. А. Степанян,**

доктор физико-математических наук

**ГАММА-АСТРОНОМИЯ  
СВЕРХВЫСОКИХ  
ЭНЕРГИЙ  
И КОСМИЧЕСКИЕ  
ЛУЧИ**

**в приложении этого номера:**

**НОВОСТИ АСТРОНОМИИ**

**Степанян А. А.**

- С79** Гамма-астрономия сверхвысоких энергий и космические лучи. — М.: Знание, 1983. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия», № 1).

11 к.

Популярно излагаются сведения о самой молодой отрасли астрономии — гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Показано, как результаты в этом диапазоне спектра существенно повлияли на наши представления о космических лучах, их генерации и источниках.

Брошюра рассчитана на всех интересующихся современными проблемами астрофизики.

**1705040000**

**ББК 22.632**  
**530.4**

## ВВЕДЕНИЕ

Современная астрофизика изучает Вселенную в целом и отдельные ее части — от звезд, межзвездного газа, туманностей до галактик и квазаров, скоплений галактик и Метагалактики (наблюдаемой части Вселенной). Астрофизика занимается исследованиями физических процессов в различных объектах (и самых малых, и самых больших) — от самых быстрых, длящихся всего несколько тысячных долей секунды, до самых медленных, протекающих миллиарды лет. Объектом ее изучения являются и такой разреженный газ, в котором на один кубометр приходится всего лишь один атом (массой  $10^{-24}$  г), и такое плотное вещество, где один кубический сантиметр содержит массу во многие миллиарды тонн.

Температура межзвездного газа составляет порою лишь десятки кельвинов, тогда как в недрах звезд и на их поверхности она может достигать десятков миллионов кельвинов. Отдельные же частицы, в том числе электроны и ядра атомов водорода (протоны), могут обладать такой большой энергией, которую имеют атомы в газе, нагретом до температуры  $10^{13}$  К, а иногда и  $10^{23}$  К. Для некоторых астрофизических объектов характерны магнитные поля всего в  $10^{-6}$  Гс, т. е. в миллион раз слабее, чем магнитное поле Земли, а для других — до  $10^{12}$  Гс, т. е. напряженность которых в тысячи миллиардов раз больше магнитного поля Земли.

Уже из этого краткого перечисления становится ясно, как велико разнообразие физических условий во Вселенной. И, конечно, все это многообразие на Земле мы воспроизвести не в состоянии. Однако на Земле человек, производя опыты, может их повторять, менять физические условия и т. д. Проведение экспериментов

над неживой природой как раз и привело к развитию таких наук, как физика и химия. Используя полученные знания, человек расширил свои технические возможности и стал искусственно создавать такие физические условия, которые были раньше недоступны. Так, ученые научились получать вакуум с концентрацией атомов меньше  $10^8 \text{ см}^{-3}$ , давление в сотни тысяч атмосфер, температуру в 1 млн. К, магнитные поля с напряженностью в сотни тысяч гаусс, научились ускорять заряженные элементарные частицы, протоны, до энергий в несколько тысяч миллиардов электронвольт<sup>1</sup>.

Однако если сравнить диапазон физических условий, доступных человеку на Земле, с диапазоном, характерным для Вселенной, то можно убедиться, насколько еще слабы наши возможности. И астрофизические исследования как раз позволяют глубже изучать природу, находить в ней новые закономерности. Именно поэтому в последние десятилетия астрофизические исследования привлекают все большее внимание ученых многих стран.

В основе всей астрофизики лежит астрономия, одна из древнейших наук, еще тысячелетия назад помогавшая человеку решать такие важные жизненные задачи, как составление календаря, прогноз сезонов года, разливов рек, мореплавания и т. д. Большой толчок развитию астрономии дало появление телескопов, роль которых в астрономических и астрофизических исследованиях сейчас трудно переоценить. Вместе с тем не следует забывать, что оптический диапазон составляет лишь ничтожную часть всего спектра электромагнитных излучений, доступного для современной науки, — от  $10^7$  до  $10^{27}$  Гц и более (частота колебаний оптического излучения охватывает диапазон от  $4 \cdot 10^{14}$  до  $8 \cdot 10^{14}$  Гц).

Можно только удивляться, какую массу информации можно получить, изучая всего лишь оптическое излучение различных объектов Вселенной. Но все дело в том, что основными объектами здесь являются звезды. А они, хотя и имеют различную температуру поверхности (от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч

---

<sup>1</sup> Поскольку мы и в дальнейшем будем часто пользоваться этой единицей энергии, то следует сказать, что энергию в один электронвольт получает однократно заряженная частица, если она пройдет разность потенциалов в 1 В. Примерно такую же энергию имеют частицы газа, нагретого до 11 000 К.

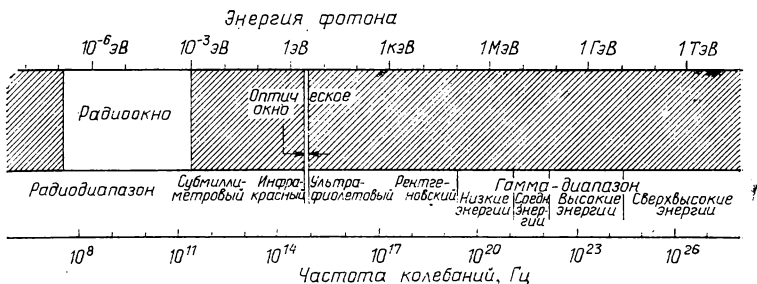


Рис. 1. Схема расположения диапазонов в электромагнитном спектре

кельвинов), все излучают в видимом, оптическом, диапазоне.

В оптическом диапазоне многие атомы излучают свет или поглощают его в отдельных довольно узких интервалах длин волн — в спектральных линиях. Изучение как всего спектра, так и отдельных линий дает богатейшую информацию о физических условиях, имеющих на поверхности звезд. Достаточно упомянуть, что изучение линий дает возможность определить скорость движения звезды относительно нас, температуру, химический состав, плотность вещества. (Желающим более подробно ознакомиться со спектрами звезд и той информацией, которую они несут, советуем прочитать книгу: Шкловский И. С. Звезды, их рождение, жизнь и смерть. М., Наука, 1975.)

Но все-таки звездами не исчерпывается все многообразие Вселенной, да, кроме того, звезды излучают не только в видимой области спектра. Первой здесь на помощь пришла радиоастрономия, использующая область радиочастот, которая показана на рис. 1 (низкочастотный край электромагнитного спектра). Развитие радиоастрономии в значительной степени обусловлено прикладным значением радиометодов, особенно в связи с широким применением радаров в авиации, мореплавании, в комплексах дальней космической связи.

В настоящее время в распоряжении радиоастрономии имеется большое количество гигантских радиотелескопов с диаметрами антенн до 100 м и более и с такой высокой чувствительностью, которая позволяет им «ви-

деть» в радиолучах объекты, даже более удаленные, чем обнаруживаемые с помощью оптических телескопов.

Первые успехи радиоастрономии были неожиданны — никто не мог предположить, что во Вселенной имеются такие мощные источники радионизлучения, какие были обнаружены первыми радиотелескопами. Как выяснилось позднее, эти радиоволны излучают элементарные частицы — электроны, ускоренные до очень высокой энергии (0,1—10 ГэВ). По существу, они являются частицами космических лучей, которые были обнаружены на Земле еще в начале века физиками, интересовавшимися радиоактивностью. Электроны и протоны высоких энергий, как было установлено из исследований космических лучей (КЛ), наблюдаются и на Земле, и в стратосфере, а вторичные продукты их взаимодействия — и на поверхности Земли и даже глубоко под землей.

Более подробно о том, что представляют собой КЛ, будет сказано в следующем разделе, а сейчас отметим лишь, что электроны высоких энергий, находясь в магнитном поле, излучают радиоволны. Именно это излучение и было принято первыми радиотелескопами. Хотя в дальнейшем радиоастрономы зарегистрировали радионизлучение горячей разреженной плазмы — так называемое тепловое излучение, а также радионизлучение среды в различных спектральных линиях, доминирующим во Вселенной является нетепловое излучение, испускаемое частицами высоких энергий, входящими в состав КЛ. Как выяснилось впоследствии, частицы КЛ могут излучать и излучают не только в радиодиапазоне, но и в оптическом, рентгеновском и даже гамма-диапазонах.

Иначе говоря КЛ вносят вклад в космическое электромагнитное излучение во всем доступном современной технике электромагнитном спектре: от радиоволн до сверхжестких гамма-квантов. Следует отметить, что роль КЛ в астрофизике, хотя и не отрицается, но все же слишком медленно признается специалистами в области радиоастрономии и астрофизики. При написании этой брошюры автор как раз и ставил перед собой задачу показать роль КЛ в различных астрофизических явлениях.

Исторически сложилось так, что под астрофизикой высоких (но не сверхвысоких) энергий сейчас понимает-

ся область исследований, занимающаяся рентгеновским излучением астрофизических объектов. Следует отметить, что попытки обнаружить рентгеновское излучение Солнца велись вполне сознательно, так как исследование самой внешней оболочки Солнца—короны—оптическими методами указывало на существование там температур, достигающих нескольких миллионов кельвинов (только при этой температуре могут наблюдаться спектральные линии высокоионизованных атомов<sup>2</sup>). Однако никто не ожидал возможности обнаружить рентгеновское излучение от других астрофизических объектов.

Когда в поле зрения детектора, предназначавшегося для регистрации рентгеновского излучения Солнца, случайно попал один из самых сильных рентгеновских источников — Скорпион X-1, это произвело огромное впечатление на всех астрофизиков. Вскоре было обнаружено рентгеновское излучение и от Крабовидной туманности, известной также как и один из сильных источников радиоизлучения. Несомненно, дальнейшее развитие рентгеновской астрономии принесло и продолжает приносить большое число открытий. Рентгеновская астрономия существенно расширила наши представления о Вселенной и о процессах, происходящих в ней. (Всех, кто желает подробнее ознакомиться с успехами рентгеновской астрономии, мы рекомендуем прочитать брошюру: Тиндо И. П. Рентгеновская астрономия. М., Знание, 1975.)

Здесь мы хотели бы отметить, однако, что, как и в случае радиоастрономии, механизмы рентгеновского излучения можно разбить на две группы. К первой из них надо отнести излучение плазмы, нагретой до высокой (в несколько миллионов кельвинов) температуры, т. е. тепловое излучение. Ко второй следует отнести излучение, вызываемое частицами высоких энергий, электронами и протонами, которое по своей природе не является тепловым. Однако в отличие от радиоастрономии современная рентгеновская астрономия имеет дело, как правило, с тепловым излучением вещества, нагретого до

---

<sup>2</sup> Атом, у которого под действием столкновений с другими частицами или в результате поглощения излучения отсутствует один или более электронов, называется ионизованным, а сам процесс — ионизацией. Под высокоионизованным газом понимается газ, у которого атомы лишены большей части электронов.



высокой температуры. С этой точки зрения рентгеновскую астрономию правильнее было бы называть «астрономией высоких температур».

## ЧТО ТАКОЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ!

Многие, наверное, уже знают, что атомы состоят из положительно заряженных ядер, в которых сосредоточена почти вся масса атома, и вращающихся вокруг них электронов, заряженных отрицательно. Чтобы оторвать электрон от ядра, нужно затратить энергию, называемую энергией связи. В атоме водорода, легчайшем из всех атомов и состоящем из обладающего единичным зарядом ядра (протона) и одного электрона, эта энергия равна 13,5 эВ, но с ростом заряда  $Z$  у ядра эта энергия может возрасти до 0,1 МэВ.

Открытие КЛ последовало за обнаружением радиоактивности. Суть радиоактивности заключается в том, что некоторые ядра оказываются неустойчивыми и распадаются, излучая частицы и гамма-кванты<sup>3</sup>. В состав ядер входят положительно заряженные протоны и нейтральные частицы примерно той же массы — нейтроны (протон и нейтрон объединяются общим названием нуклоны). Ядро, состоящее из положительно заряженных частиц, не разваливается из-за взаимного отталкивания протонов только потому, что между нуклонами существуют и силы притяжения. Чтобы вырвать из ядра протон или нейтрон, нужно, следовательно, затратить, так же как при вырывании электрона из атома, определенную энергию связи. Эта энергия также меняется от ядра к ядру, но в значительно меньшей степени — ее среднее значение равно примерно 7 МэВ.

Характер взаимодействия протонов и нейтронов в ядре весьма сложен. Если ядро состоит из  $A$  нуклонов, оно включает в себя  $Z$  протонов и  $A-Z$  нейтронов. В тех случаях, когда ядро имеет  $Z+1$  протонов и  $(A-Z)-1$  нейтронов или  $Z-1$  протонов и  $(A-Z)+1$  нейтронов, законы ядерных взаимодействий допускают изменение заряда  $Z$  ядра с испусканием соответственно электрона или позитрона (частицу той же массы, что и электрон, но заряженную положительно). Кроме того,

<sup>3</sup> Под гамма-квантом подразумевается квант электромагнитного поля высокой частоты —  $10^{19}$  Гц и более.

в этом случае испускается еще одна частица — нейтрино, масса которого много меньше массы электрона.

Эти две частицы каждый раз уносят весь избыток энергии, и ядро вновь переходит в устойчивое состояние. Как правило, эта избыточная энергия составляет примерно 1 МэВ. Для электрона такая энергия очень велика, и его скорость мало отличается от скорости света. Обладая такой энергией, электрон способен пройти сквозь металлические пластинки толщиной 1—2 мм, а в воздухе — расстояние в десятки сантиметров. Причем он выбивает электроны из атомов той среды, в которой движется, т. е. ионизирует атомы среды. Эта ионизация среды, возникающая вдоль траектории частицы, позволяет их регистрировать. Способность ионизировать атомы среды, через которую проходят частицы, используется для регистрации и электронов, и заряженных ядер КЛ (хотя их энергия существенно выше, чем у частиц, образующихся в результате радиоактивного распада).

История изучения КЛ весьма интересна, но мы здесь не можем подробно останавливаться на этом аспекте. Интересующимся можем рекомендовать прочитать книгу: Жданов Г. Б. Лучи из мировых глубин. М., Знание, 1974.

Рассмотрим кратко результаты многолетнего изучения КЛ. Они состоят в основном из ядер водорода, гелия и более тяжелых элементов, а также из электронов и позитронов. Изучение зарядового состава КЛ продолжается до сих пор, ибо с улучшением аппаратуры удается обнаружить все более тяжелые ядра. Трудность их обнаружения заключается в том, что их потоки составляют очень малую долю потока протонов и ядер гелия. Во всяком случае, в настоящее время вряд ли кто может решиться утверждать, что в КЛ нет устойчивых ядер каких-либо элементов.

Абсолютная величина потока ядер равна примерно двум частицам на  $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . В основном это протоны (88%) и ядра гелия ( $\geq 10\%$ ). Ядра элементов углерода, азота и кислорода (CNO-группа) составляют 1% от всего потока, а ядра более тяжелых элементов присутствуют в еще меньших количествах. В КЛ есть и электроны, но их поток примерно в 100 раз меньше, причем чем выше энергия, тем меньше поток частиц с этой энергией. Зависимость числа частиц с данной энергией  $N(E)$  от величины энергии  $E$  называют энерге-

тическим спектром, или кратко спектром частиц. Спектр частиц КЛ имеет, вообще говоря, сложный вид, но в большей своей части он степенной:  $N(E) = k \cdot E^{-\gamma}$ , где  $k$  — постоянная, определяющая абсолютную величину потока частиц, а  $\gamma$  — показатель спектра (обычно  $\gamma \approx 2,6$ ).

Мы уже говорили, что энергия частиц КЛ велика. Так, большая часть ядер имеет энергию 1 ГэВ и выше, т. е. в 1000 раз больше, чем радиоактивные частицы. В этом случае протон, например, может пройти в воздухе расстояние около 1 км. Если протон такой энергии столкнется с ядром атома, входящего в состав воздуха, то он может вызвать расщепление ядра на составные части. При этом вылетают не только протоны и нейтроны, но образуются и вторичные частицы (в частности, мезоны). Чем выше энергия налетающей частицы, тем больше «рождается» новых частиц. Для того чтобы первичная частица КЛ столкнулась с атомом воздуха, ей нужно пролететь на уровне моря примерно 500 м.

У ядер гелия и ядер более тяжелых элементов этот «пробег» еще меньше. Вот почему первичные частицы КЛ не достигают поверхности Земли, а взаимодействуют с ядрами атомов воздуха на большой высоте — 25—35 км. До поверхности Земли доходят лишь вторичные частицы, которые образуются в результате целого каскада взаимодействий. Именно это взаимодействие чрезвычайно заинтересовало физиков, занимающихся изучением строения атомного ядра. В то время, когда были обнаружены эти взаимодействия, еще не было ускорителей частиц, способных сообщить им такую энергию, какую имеют они в КЛ. Но и с развитием ускорительной техники до сих пор не удается получить частицы с теми энергиями, которые наблюдаются в КЛ, —  $10^{11}$  ГэВ!

Это направление исследования КЛ составило так называемый ядерно-физический аспект.

Несколько позднее возникло и другое направление в исследовании КЛ. Приборы, непрерывно регистрировавшие на Земле ионизацию, вызванную КЛ, указали на то, что их поток меняется со временем. Детальное изучение этого явления показало, что оно вызвано рядом причин: изменением атмосферного давления, магнитными бурями и различными проявлениями солнечной активности. Интенсивные исследования, взаимосвя-

зи потока КЛ с явлениями в Солнечной системе ведутся и в настоящее время. Обычно этот раздел исследований называют «модуляционными эффектами в космических лучах». По существу, данный аспект является астрофизическим, но относится он лишь к ближайшей к нам звезде — Солнцу.

Что же касается происхождения КЛ, то этот вопрос волновал ученых, занимающихся изучением космических лучей, постоянно. Теории происхождения КЛ выдвигались уже давно: Высказывались предположения, что источником всех КЛ является наше Солнце. Однако эта гипотеза никогда не имела большого числа сторонников.

Измерения показали, что поток КЛ изотропен. Высокая степень изотропии потока КЛ делает очевидной гипотезу галактического происхождения космических лучей. Дело в том, что изучение прохождения света в межзвездной среде указало на наличие магнитного поля в межзвездной среде. Заряженные частицы КЛ (как ядра, так и электроны) движутся в магнитном поле по спирали. При этом шаг спирали может меняться вследствие изменения как напряженности магнитного поля, так и направления силовой линии. Все это вместе и приводит к той изотропии КЛ, которая наблюдается.

Поэтому измерения направлений прихода частиц КЛ не дают возможности определить источник космических лучей. Изотропия приводит нас еще к одному выводу, а именно: КЛ заполняют всю нашу Галактику или большую ее часть. Этот вывод подкрепляется и непосредственными наблюдениями радиоизлучения Галактики. Как уже говорилось во введении, электроны высоких энергий, двигаясь в магнитных полях, излучают радиоволны. Исследование радиоизлучения Галактики позволило установить, что она более или менее равномерно заполнена электронами высоких энергий.

Но траектории движения электронов и протонов одинаковых энергий практически не отличаются. Следовательно, естественно предположить, что и протоны равномерно заполняют Галактику. В настоящее время это уже не предположение, а скорее экспериментальный факт, и получен он на основании данных гамма-астрономии. Однако, поскольку мы еще ничего не говорили о гамма-излучении, отложим более подробное обсуждение этого вопроса до следующего раздела.

Итак, наша Галактика заполнена КЛ. Оценки показывают, что общая энергия всех КЛ в Галактике составляет громадную величину — примерно  $10^{56}$  эрг. Эта энергия сравнима с общей энергией магнитного поля всей Галактики и с общей энергией электромагнитного поля оптического излучения всех звезд Галактики.

Для построения теории происхождения КЛ гораздо важнее знать, как быстро они теряют свою энергию, а стало быть и сколько энергии источники передают космическим лучам. При этом естественно предположить, что плотность КЛ со временем не изменяется (это предположение подтверждается наблюдениями).

Чтобы определить энергию, теряемую частицами во время движения в межзвездном пространстве, изучают зарядовый и изотопный состав КЛ. Сопоставляя расчеты с наблюдениями, находят вероятность взаимодействия частиц КЛ с ядрами атомов межзвездной среды. Оказывается, что эта вероятность меньше 0,1. Но в таком случае это означает, что частицы с большой вероятностью уходят из Галактики или по крайней мере из диска Галактики.

С целью определить время выхода частиц из Галактики уже в течение длительного времени делаются попытки найти количество радиоактивного изотопа  $Be^{10}$  в КЛ. Изотопный состав бериллия, образующегося при взаимодействии более тяжелых ядер с ядрами межзвездного газа, можно рассчитать. Наблюдаемое количество  $Be^{10}$  значительно меньше расчетного и, следовательно, ядра этого изотопа распадаются за время своего движения. Отсюда было недавно определено время жизни КЛ в Галактике; как оказалось, оно равняется 15 млн. лет.

Теперь, зная время пребывания ядер КЛ в Галактике, уже можно подсчитать общую мощность источников космических лучей. Она оказалась порядка  $10^{40}$ — $10^{41}$  эрг/с. Где же найти такие источники, которые могли бы обеспечить необходимую мощность генерации частиц, т. е. энергию, передаваемую частицам в единицу времени?

Наибольшее распространение в настоящее время получила гипотеза Гинзбурга—Сыроватского о генерации КЛ при взрывах Сверхновых. Согласно этой гипотезе во время взрыва Сверхновой создаются условия, при которых возможно ускорение частиц до высоких энер-

гий в разлетающейся после взрыва оболочке Сверхновой. Эта гипотеза выгодно отличается от предшествующих тем, что она основана на наблюдательных данных, касающихся оболочек Сверхновых. Во время взрыва Сверхновой выделяется громадное количество энергии, одной из основных форм которой является кинетическая энергия расширяющегося газа после взрыва Сверхновой. Скорость его достигает 10 000 км/с, масса оболочки — порядка массы Солнца (масса взрывающейся звезды при этом, естественно, в несколько раз больше). Было подсчитано, что даже если только 1% этой энергии будет передан частицам высокой энергии, то и этого достаточно, чтобы Сверхновые обеспечили необходимую мощность генерации КЛ.

Следует, однако, отметить, что генерация КЛ определено происходит во время самых различных нестационарных процессов. В первую очередь источником КЛ является Солнце. Как уже говорилось, оно не может быть ответственным за КЛ в целом, однако во время так называемых хромосферных, или солнечных, вспышек постоянно наблюдается генерация КЛ.

Наблюдения частиц ведутся различными способами. Первые наблюдения КЛ, генерирующихся в сильных солнечных вспышках, были проведены с помощью наземной аппаратуры, когда наблюдался рост вторичных КЛ. Оказалось, что энергия частиц, ускоренных в этих вспышках, достигает 10 ГэВ. Характер изменения потока наблюдаемых на Земле частиц (быстрый рост и медленный спад) соответствовал случаю инъекции, т. е. впрыскиванию, частиц в межпланетное пространство с последующей их диффузией.

Измерения в стратосфере, на высоких геомагнитных широтах, показали, что КЛ с энергией протонов больше 100 МэВ генерируются гораздо чаще. Если на Земле вспышки КЛ регистрировались раз в 5—10 лет, то в стратосфере они наблюдались в годы максимума солнечной активности чуть ли не ежемесячно. Еще чаще можно наблюдать потоки заряженных частиц высоких энергий с помощью спутников, выведенных за пределы магнитосферы Земли, когда пороговая, т. е. минимальная, еще доступная наблюдениям, энергия частиц понижается до 5—10 МэВ.

Одновременно с протонами и ядрами более тяжелых, чем водород, элементов во время вспышек регистри-

руются и электроны с достаточно высокой энергией, порядка 0,5 МэВ. Получать сведения о вспышках КЛ на Солнце можно и косвенно — из регистрации жесткого электромагнитного излучения. Жесткое рентгеновское излучение интерпретируется как тормозное излучение электронов КЛ, а протоны и другие ядра КЛ, взаимодействуя с солнечной атмосферой, вызывают потоки гамма-излучения, в том числе и в спектральных линиях. Изучение гамма-линий, или гамма-спектроскопия, так же как и оптическая спектроскопия, дает ряд сведений о химическом составе солнечной атмосферы, об энергии частиц, возбуждающих эти линии, и многое другое.

Как показали наблюдения особого типа звезд — красных карликов, время от времени там также происходят вспышки, близкие по своему характеру к солнечным. И в таких вспышках тоже происходит генерация частиц высоких энергий. Об этом говорят наблюдения радиоизлучения красных карликов во время их вспышек. Это радиоизлучение обязано своим происхождением электронам высоких энергий, т. е. является нетепловым. Регистрация радиоизлучения от Новых и Сверхновых указывает на то, что и в этих процессах происходит генерация частиц высоких энергий.

О генерации частиц высоких энергий свидетельствуют и наблюдения пульсаров. Пульсары — это, по-видимому, ядра звезд, взорвавшихся как Сверхновые. При взрыве центральная часть ядра сжимается, образуя так называемую нейтронную звезду. Плотность вещества этих звезд так велика, что ядра различных атомов почти «соприкасаются» друг с другом. При этом электронных оболочек в обычном смысле этого слова уже нет. Характер электрических полей таков, что электроны как бы помещаются между ядрами. А в центре звезды плотность вещества настолько велика, что оно может состоять в основном только из нейтронов. При такой плотности масса вещества, равная солнечной, вмещается в сферу радиусом 10 км, в то время как радиус Солнца составляет 700 000 км. Отличительной особенностью пульсаров, как нейтронных звезд, является то, что они обладают довольно сильным магнитным полем  $10^{12}$  Гс и вращаются с периодом примерно в 1 с.

Построение теории пульсаров представляет собой интереснейшую и многогранную задачу для астрофизи-

ков и физиков. Эта теория еще далека от завершения, и мы здесь не будем на ней останавливаться. Нас же интересует лишь то, генерирует ли пульсар частицы высоких энергий? На этот вопрос можно совершенно уверенно ответить положительно, о чем свидетельствуют как данные о радиоизлучении пульсаров, так в особенности и данные о гамма-излучении пульсаров. На последнем аспекте мы еще остановимся подробнее, а сейчас отметим, что к уже упомянутым источникам КЛ можно прибавить еще один — пульсары.

Но не только в нашей Галактике есть источники КЛ. Наша Галактика в этом смысле вполне рядовая. Наблюдения радиоизлучения показывают, что и другие галактики содержат КЛ. Их радиоизлучение в значительной степени является нетепловым и свидетельствует о движении электронов высокой энергии в магнитных полях межзвездной среды. Но некоторые галактики по своему радиоизлучению на несколько порядков более мощные, чем наша Галактика. Такие объекты называют радиогалактиками, и их легче обнаружить в радиолучах, чем в оптике. От одной из этих радиогалактик — Центавр А — обнаружено излучение гамма-квантов сверхвысокой энергии (1000 ГэВ), а это еще раз подтверждает, что в этой галактике идут мощные процессы генерации КЛ.

И, наконец, еще более мощными источниками КЛ являются так называемые квазары. Их радиоизлучение так велико, что современные радиотелескопы могут обнаруживать его на расстоянии в миллиарды световых лет. Оптическое излучение этих объектов, безусловно, тоже велико. Оно существенно больше, чем у нашей Галактики, но на таких расстояниях, на которых их обнаруживают радиотелескопы, они представляются практически неотличимыми от слабых звезд. От одного из квазаров удалось обнаружить и гамма-излучение с энергией квантов 100 МэВ.

Таким образом, мы видим, что, с одной стороны, КЛ в ряде явлений природы играют немаловажную роль, а с другой — в очень многих нестационарных явлениях в звездах и в галактиках происходит передача существенной части энергии частицам КЛ: электронам, протонам и ядрам различных элементов. Несомненно, роль КЛ в различных астрофизических процессах велика. Но можно смело сказать, что она еще далеко не понята и,



как правило, недооценивается специалистами в области астрофизики.

Исследование удаленных объектов, где происходит генерация КЛ, возможно только через регистрацию электромагнитного излучения этих объектов. Мы уже говорили, что частицы КЛ в принципе могут быть источниками излучения любой частоты от радио- до гамма-диапазона. Однако читатель, наверное, уже успел заметить, что практически нужная информация преимущественно поступает в виде либо радиоизлучения, либо гамма-квантов. Поэтому, прежде чем переходить к изложению конкретных явлений, связанных с КЛ, нам хотелось бы кратко изложить механизмы, которые приводят к излучению радиоволн и гамма-квантов.

### **МЕХАНИЗМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ И НЕТЕПЛОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ**

Мы уже говорили, что электроны высокой энергии, движущиеся в магнитном поле, излучают радиоволны. Излучение подобных релятивистских частиц (т. е. обладающих высокой скоростью, близкой к скорости света), движущихся в магнитном поле, называется синхротронным. Частота синхротронного излучения может быть самой различной: она зависит от напряженности магнитного поля  $H$ , энергии частицы  $E$  и ее массы покоя  $m$ . Однако, хотя каждая частица излучает в широком диапазоне частот, существует частота  $\nu_m$ , на которой поток энергии максимален.

Эта частота для электронов определяется по формуле  $\nu_m = 1,22 \cdot 10^6 \cdot H_{\perp} (E/mc^2)^2$ . Здесь частота дается в герцах, энергия — в электронвольтах,  $H_{\perp}$  — это перпендикулярная к скорости частицы составляющая напряженности магнитного поля,  $c$  — скорость света. Из этой формулы видно, что если частица будет двигаться вдоль силовой линии, то  $\nu_m = 0$ , т. е. при этом не будет происходить излучения. Ясно также, что частота сильно зависит от энергии. Кроме того, частота  $\nu_m$  обратно пропорциональна квадрату массы  $m$ , а это значит, что частота излучения у протонов в 4 000 000 раз меньше, чем у электронов.

Рассмотрим, на каких частотах излучают электроны КЛ, заполняющие нашу Галактику. Как уже говорилось, большая часть электронов в КЛ имеет энергию

примерно 1 ГэВ, а напряженность магнитного поля в Галактике можно принять равной  $2 \cdot 10^{-6}$  Гс. Тогда получается, что электроны с энергией 1 ГэВ будут излучать в основном на частоте 10 МГц. Но в КЛ есть электроны и с большей энергией: электроны с энергией 10 ГэВ должны излучать уже на частоте 1 ГГц ( $10^9$  Гц), с энергией 100 ГэВ — на частоте 100 ГГц (т. е. на длине волны 3 мм), а с энергией 1000 ГэВ — на длине волны 30 мкм, т. е. в инфракрасном диапазоне.

А если напряженность магнитного поля  $10^{12}$  Гс, как на пульсаре? Тогда электрон с энергией всего 2 МэВ должен испускать кванты рентгеновского излучения с энергией 70 кэВ. Энергия квантов синхротронного излучения может быть и сравнима с энергией самой частицы, т. е. быть в диапазоне гамма-квантов. Отметим, что протоны имеют гораздо более низкую частоту и практически не теряют на излучение свою энергию.

Одной из важнейших особенностей излучения электронов высокой энергии, т. е. значительно превышающей энергию покоя, равную  $mc^2 = 0,5$  МэВ, в магнитном поле является его линейная поляризация. Под поляризацией понимается направленность колебаний вектора электрического поля электромагнитной волны. В естественном свете нет такой направленности: направление вектора электрического поля хаотически меняется. В случае поляризации вектор электрического поля чаще лежит в какой-то плоскости. Синхротронное излучение частиц высокой энергии в магнитном поле как раз и имеет линейную поляризацию.

Максимальная степень поляризации синхротронного излучения может достигать 75%. В действительности же не наблюдается излучения ни от одного объекта с такой поляризацией. Дело в том, что направление плоскости поляризации связано с направлением магнитного поля, а в любом реальном объекте магнитное поле не может быть однородным. Поэтому степень поляризации редко достигает нескольких десятков процентов. Тем не менее наличие поляризации излучения нередко является существенным аргументом в пользу синхротронной природы наблюдаемого излучения, с чем мы еще столкнемся дальше.

Таким образом, синхротронное излучение в зависимости от условий, точнее, от напряженности магнитного поля и энергии частицы, может иметь практически лю-

бую частоту и попадать в любой диапазон спектра. Для понимания явлений, происходящих в астрофизических объектах, необходимо уметь по регистрируемому излучению и его характеристикам определять процессы, приводящие к его образованию. Перечислим же некоторые основные механизмы образования гамма-квантов.

*Тормозное излучение.* При прохождении электрона высокой энергии в непосредственной близости от ядра он может потерять значительную часть энергии в результате кулоновского взаимодействия. Основная часть энергии передается гамма-кванту: чем выше энергия частицы, тем больше может быть энергия кванта. В случае «лобового» столкновения почти вся энергия электрона передается гамма-кванту. Однако гораздо чаще на излучение уходит лишь небольшая часть (в процентном отношении) энергии.

*Рассеяние электронов на фотонах.* При взаимодействии электрона высокой энергии с электромагнитным полем излучения возможна передача части энергии электрона кванту электромагнитного поля. При этом его энергия может существенно возрасти. При некоторых условиях, зависящих от энергии частицы и частоты кванта, энергия кванта, рассеянного на электроне, может составлять значительную долю энергии частицы. Такое явление называют еще обратным комптоновским рассеянием. Если для тормозного излучения значение имеет плотность вещества на пути частицы, то для обратного комптоновского рассеяния — концентрация фотонов электромагнитного поля.

*«Излучение кривизны».* Это очень специфическое излучение заряженной частицы. Оно возникает при движении частицы высокой энергии в сильном магнитном поле. Ранее мы говорили, что частицы не испускают синхротронного излучения, если они движутся вдоль магнитного поля. Но если силовая линия изогнута, т. е. имеет кривизну, то частица, двигаясь вдоль линии, подвергается переменному ускорению. А в этом случае все заряженные частицы излучают. Специфичность этого вида излучения заключается в том, что для его возникновения необходимы сильное магнитное поле (иначе частица начнет двигаться поперек поля и испускать синхротронное излучение) и высокая энергия частицы (мощность излучения пропорциональна 4-й степени энергии). Такие условия имеются на пульсарах, где

есть и сильное магнитное поле,  $10^{12}$  Гс, и частицы высоких энергий.

Рассмотренные здесь механизмы (включая и синхротронное излучение) приводят к образованию непрерывного излучения. Вместе с тем электроны могут испускать и линейчатый спектр излучения. Так, линия 0,511 МэВ возникает при аннигиляции позитрона с электроном, при которой появляются 2 гамма-кванта. Такая линия действительно возникает в космических условиях — она излучается центральной частью нашей Галактики.

А что же протоны? Какое они дают излучение?

Ранее упоминалось, что синхротронное излучение протонов весьма слабо и его регистрация маловероятна. То же самое относится и к их тормозному излучению. Более вероятным является излучение от ядерных взаимодействий протонов. Если энергия налетающего протона достаточно велика (1 ГэВ), при столкновении с другим протоном образуются пи-мезоны, как заряженные, так и нейтральные. Нейтральные пи-мезоны быстро распадаются (за  $10^{-16}$ — $10^{-15}$  с), образуя два гамма-кванта с энергией около 100 МэВ.

Спектр такого гамма-излучения обладает интересной особенностью. Какую бы энергию ни имел нейтральный пи-мезон, произведение энергий гамма-квантов постоянно:  $E_1 \cdot E_2 = (\sim 70 \text{ МэВ})^2$ . Это приводит к тому, что спектр гамма-излучения от распада нейтральных пи-мезонов имеет максимум при энергии около 70 МэВ. Эта особенность дает, в принципе, возможность определить, в каких процессах образовалось излучение (позже мы рассмотрим случай, когда эта особенность спектра была использована).

Если энергия ядер, в том числе и протонов, значительно выше 1 ГэВ, то пи-мезоны образуются в еще больших количествах. При этом средняя энергия гамма-квантов (а точнее, одного из гамма-квантов, образующихся в результате распада нейтрального пи-мезона) возрастает. Безусловно; при взаимодействии ядер или протона с другим ядром образуются вторичные ядра различных элементов, которые, как правило, оказываются возбужденными. Это значит, что общая энергия протонов и нейтронов в ядре выше, чем в спокойном, или стационарном, состоянии. Ядра довольно быстро отдают лишнюю энергию, испуская либо частицу,

либо гамма-квант. Энергия этих гамма-квантов порядка 1 МэВ.

Таковы, в основном, механизмы генерации электромагнитного излучения частицами высоких энергий. Именно благодаря электромагнитному излучению, которое распространяется практически прямолинейно, мы можем узнать о том, в каком объекте происходят те или иные процессы, связанные с генерацией и распространением КЛ. Необходимо обратить внимание на то, что электронный компонент КЛ может излучать (и это действительно наблюдается) во всем доступном для наблюдений диапазоне частот электромагнитного спектра от радиоволн до гамма-квантов, а протоны излучают преимущественно в гамма-диапазоне.

Читатель, по-видимому, уже знает, что радиоизлучение регистрируется радиотелескопами — огромными металлическими параболами, фокусирующими все падающее на них радиоизлучение в одно небольшое пятно, в котором расположен приемник радиоволн. Конечно, известно также, что оптическое излучение регистрируется оптическими телескопами. Но не все знают, как регистрируется гамма-излучение.

Прежде чем ответить на этот вопрос, заметим, что гамма-диапазон — самый широкий. Действительно, радиодиапазон, используемый в астрономии, охватывает полосу от  $10^7$  до  $10^{11}$  Гц (т. е. четыре декады), рентгеновский диапазон от  $\sim 100$  до  $10^5$  эВ (т. е. три декады), а гамма-диапазон от  $10^5$  до  $10^{13}$  эВ (т. е. восемь декад!). Естественно, что методы регистрации гамма-квантов в различных интервалах несколько отличаются. Но отметим сначала, что в отличие от света и радиоизлучения гамма-кванты поглощаются в атмосфере и не могут достичь поверхности Земли. Поэтому для измерений потоков гамма-квантов относительно низких энергий приборы надо выносить за пределы атмосферы с помощью баллонов, летающих на высоте 30—40 км, или спутников.

Гамма-кванты низких энергий (до 10 МэВ) измеряются с помощью сцинтилляционного счетчика (рис. 2). Он состоит из кристалла, в котором гамма-квант поглощается, и фотоумножителя. При поглощении гамма-кванта в кристалле возникает пара частиц (электрон и позитрон) или одна частица (электрон), которые, имея некоторую энергию, возбуждают свечение кристалла

вдоль траектории своего движения. Этот свет попадает на катод фотоумножителя. В результате на аноде фотоумножителя образуется электрический импульс.

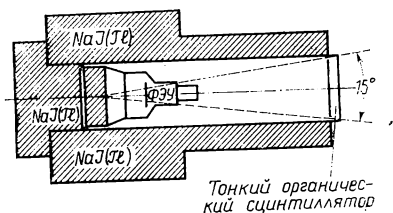


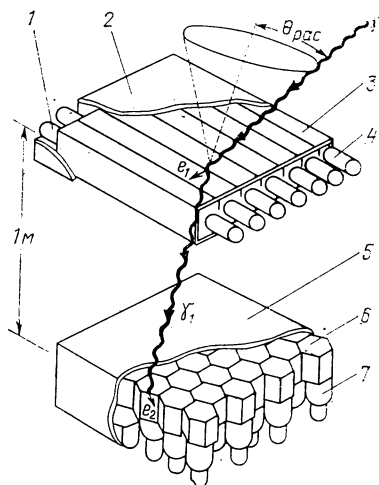
Рис. 2. Схема детектора гамма-квантов низких энергий

Поскольку точно такую же вспышку может дать и заряженная частица КЛ, счетчик необходимо окружать со всех сторон различными детекторами заряженных частиц. Если импульс в кристалле возникает одновременно с импульсом в одном из окружающих его счетчиков, то, по всей видимости, он связан с заряженной частицей. Если же такого импульса в окружающих счетчиках нет, то можно надеяться, что он вызван гамма-квантом.

Детекторы гамма-квантов низкой энергии не обладают хорошей направленностью, т. е. они не могут дать сведения о точном направлении прихода гамма-квантов. Несколько лучше обстоит дело при энергиях 10—20 МэВ. В этом случае можно устроить пусть не очень направленный, но все же телескоп (рис. 3). Дело в том, что гамма-кванты не только поглощаются, но и рассеиваются. Иначе говоря, они отдают часть энергии электрону, несколько отклоняются от первоначального направления и могут рассеиваться во втором детекторе (см. рис. 3). При этом с помощью различных ухищрений, на которых мы не будем останавливаться, можно определить направление прихода гамма-квантов.

Такой прибор получил название двойного Комптона-телескопа, так как явление рассеяния гамма-квантов называется комптоновским рассеянием. Точность определения направления гамма-квантов низких энергий по порядку величины равна  $10^\circ$ .

С гораздо лучшей точностью определяется направление прихода гамма-квантов с энергиями 0,1—1 ГэВ. В этом случае пробеги заряженных частиц гораздо больше. Для регистрации гамма-квантов высоких энергий используются так называемые искровые камеры. Мы не будем подробно описывать этот достаточно сложный прибор. Основная идея его заключается в том, что в объеме с разреженным газом располагаются тон-



Р и с. 3. Схема двойного Комптон-телескопа: 1 — фотоумножитель; 2 — слой для антисовпадений; 3 — сцинтилляционные детекторы; 4 — фотоумножитель; 5 — слой для антисовпадений; 6 — сцинтиллятор; 7 — фотоумножитель, ( $e_1$  и  $e_2$  — электроны,  $\gamma$  и  $\gamma_1$  — гамма-кванты).

кие слои вещества, сильно поглощающего гамма-кванты.

При поглощении гамма-кванта, как уже говорилось, довольно часто образуются пары частиц — электрон + позитрон. Эти частицы проходят все слои газа и пластины на пути движения, и газ ионизуется. Если теперь подать на пластины достаточно большую разность потенциалов, то возникнет искровой пробой вдоль траектории частиц. Остается только сфотографировать эти следы в двух плоскостях и проанализировать фотоснимки.

В искровых камерах можно регистрировать гамма-кванты, начиная с энергии примерно 40 МэВ и доходя до очень высоких энергий. Точность определения направления

прихода гамма-кванта в этом случае составляет 2—5°.

Детекторы гамма-квантов, имея рабочую площадь порядка 0,1 м<sup>2</sup>, способны обнаружить поток гамма-квантов в 10<sup>-6</sup> см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Можно себе представить искровые камеры с площадью в 1 м<sup>2</sup> и даже несколько больше. Такие приборы, по-видимому, позволят регистрировать потоки меньше 10<sup>-7</sup> см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Но это же и означает, что вряд ли в ближайшее время за пределами атмосферы можно будет регистрировать гамма-кванты с энергией больше 10 ГэВ.

Как же регистрируются гамма-кванты с более высокой энергией?

Гамма-кванты высокой энергии при прохождении через вещество образуют с большой степенью вероятности пару частиц электрон + позитрон, которым и отда-

ют почти всю свою энергию. Среднее расстояние, которое проходит гамма-квант, зависит от свойств среды, а точнее, от величины заряда ядер атомов  $Z$ , из которых состоит вещество. Вероятность взаимодействия гамма-кванта с ядром, в результате которого и образуются пары частиц, пропорциональна  $Z^2$ .

Среднюю толщину вещества, которую проходит частица, — ее пробег, удобно охарактеризовать количеством вещества в столбе площадью  $1 \text{ см}^2$ , т. е. в граммах на квадратный сантиметр. В этом случае число атомов на траектории движения частицы не зависит от плотности вещества. То же относится и к гамма-квантам. Пробег для взаимодействия гамма-квантов с энергией больше  $100 \text{ МэВ}$  практически не зависит от энергии и равен в воздухе  $34 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ . На уровне моря это соответствует примерно  $300 \text{ м}$ , а на высоте  $20 \text{ км}$  — около  $5 \text{ км}$ .

В свою очередь, электроны и позитроны, проходя через вещество, теряют энергию не только на ионизацию, но и на тормозное излучение (о котором говорилось раньше), когда часть энергии частицы отдается гамма-кванту. Но что же получается? Гамма-квант достаточно высокой энергии, попадая в атмосферу Земли, образует пару частиц. Пройдя некоторое расстояние (которое приблизительно также равно  $34 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ ), электрон и позитрон образуют два гамма-кванта, каждый из которых может, в свою очередь, образовать две частицы, т. е. теперь мы уже будем иметь  $4$  частицы. До каких же пор это может продолжаться?

До тех пор, пока энергия частицы не уменьшится настолько, что электрон скорее потеряет свою энергию на ионизацию, чем даст «тормозной» гамма-квант. В воздухе такая энергия, которую называют критической, равна примерно  $70 \text{ МэВ}$ .

Весь этот процесс называется лавинным, или электромагнитным, каскадом. Чтобы получить представление о том, при каких энергиях происходит лавина, укажем, что при энергии гамма-кванта  $10 \text{ ГэВ}$  максимальное число образующихся частиц равно примерно  $15$ , а при энергии  $1000 \text{ ГэВ}$  — больше тысячи. Таким образом, при попадании гамма-кванта сверхвысокой энергии в атмосферу образуются электроны и позитроны высоких энергий, число которых сначала растет, достигает максимума, а затем падает.

Но что это нам дает? Может быть, нам установить



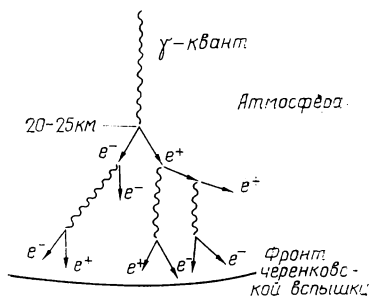


Рис. 4. Схематическое изображение электронно-фотонного ливня в атмосфере ( $e^-$  и  $e^+$  — соответственно электроны и позитроны)

зуюется тем, что в атмосфере оно направлено в узком конусе — с углом раскрыва около  $1^\circ$ . Примерно на такие же углы рассеиваются электроны и позитроны высоких энергий за счет кулоновского взаимодействия.

Световая вспышка достигает поверхности Земли и может быть зарегистрирована. Если использовать большие (диаметром 1,5 м) параболические зеркала, то собираемого ими света будет достаточно для регистрации световой вспышки от ливня, порожденного гамма-квантом с энергией 1000 ГэВ. Надо отметить, что количество квантов черенковского света, испускаемое одной частицей, практически пропорционально ее энергии. Следовательно, и общее количество света от всего ливня пропорционально энергии первичного гамма-кванта.

Длительность световой вспышки черенковского света весьма мала: она составляет несколько миллиардных долей секунды — от 3 до 5 нс. Объясняется это тем, что черенковское свечение излучают лишь те частицы, скорость которых больше скорости света в среде, где они движутся. Скорость света в воздухе отличается от скорости света в вакууме на несколько долей процента. В результате и скорость частицы, и скорость распространения света практически одинаковы, и весь черенков-

большое число счетчиков и регистрировать заряженные частицы? Однако, как показывают расчеты, электромагнитные каскады даже для гамма-квантов с энергией 1000 ГэВ затухают высоко в атмосфере — на высоте 4 км.

Но есть и другой, более удобный и практичный способ регистрации гамма-ливней. Дело в том, что электроны и позитроны, имеющие энергию больше 100 МэВ, излучают свет на высоте 8—10 км. Это световое излучение называется черенковским и характеризуется тем, что в атмосфере оно направлено в узком конусе — с углом раскрыва около  $1^\circ$ . Примерно на такие же углы рассеиваются электроны и позитроны высоких энергий за счет кулоновского взаимодействия.

Световая вспышка достигает поверхности Земли и может быть зарегистрирована. Если использовать большие (диаметром 1,5 м) параболические зеркала, то собираемого ими света будет достаточно для регистрации световой вспышки от ливня, порожденного гамма-квантом с энергией 1000 ГэВ. Надо отметить, что количество квантов черенковского света, испускаемое одной частицей, практически пропорционально ее энергии. Следовательно, и общее количество света от всего ливня пропорционально энергии первичного гамма-кванта.

Длительность световой вспышки черенковского света весьма мала: она составляет несколько миллиардных долей секунды — от 3 до 5 нс. Объясняется это тем, что черенковское свечение излучают лишь те частицы, скорость которых больше скорости света в среде, где они движутся. Скорость света в воздухе отличается от скорости света в вакууме на несколько долей процента. В результате и скорость частицы, и скорость распространения света практически одинаковы, и весь черенков-

ский свет ливня концентрируется в распространяющемся фронте толщиной 1—2 м. А это и соответствует длительности вспышки 3—5 нс.

Основное преимущество регистрации черенковского света заключается в том, что этот метод позволяет регистрировать гамма-кванты с большой площади. Вспышка света на Земле покрывает круг диаметром более 200 м, и где бы ни располагался наш детектор (рис. 4), он зарегистрирует эту вспышку, если направление распространения гамма-кванта совпадает с направлением оси детектора. Таким образом, эффективная площадь регистрации составляет  $4 \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>. В принципе можно было бы регистрировать сколь угодно малые потоки. Но, так же как и за пределами атмосферы, помехой при регистрации гамма-квантов является заряженный компонент КЛ.

Дело в том, что заряженные частицы КЛ, попадая в атмосферу, взаимодействуют с ядрами атомов воздуха. При таком взаимодействии, как уже было сказано, образуются заряженные и нейтральные пи-мезоны. Последние, распадаясь на два гамма-кванта, фактически дают начало электромагнитному каскаду. Причем возникает не один, а несколько электромагнитных каскадов. И все они генерируют вспышки черенковского света, которые по своим характеристикам мало отличаются от вспышек черенковского света, вызванных чисто электромагнитным каскадом.

Однако, как мы знаем, поток заряженных частиц КЛ обладает высокой изотропией. Пользуясь этим свойством, можно обнаружить направленный поток гамма-квантов, если проводить так называемое сканирование предполагаемого источника гамма-квантов. Суть сканирования заключается в том, что детекторы, т. е. зеркала с фотоумножителями в фокусе, направляются в определенный участок небесной сферы таким образом, чтобы через некоторое время в поле зрения детектора за счет вращения Земли попал подозреваемый источник гамма-квантов.

Число вспышек черенковского свечения от заряженных частиц, зарегистрированное в единицу времени, т. е. скорость счета, должно оставаться постоянным вследствие изотропии. При попадании источника в поле зрения детектора скорость счета должна возрасти. Затем, когда источник уйдет из поля зрения, она должна восста-

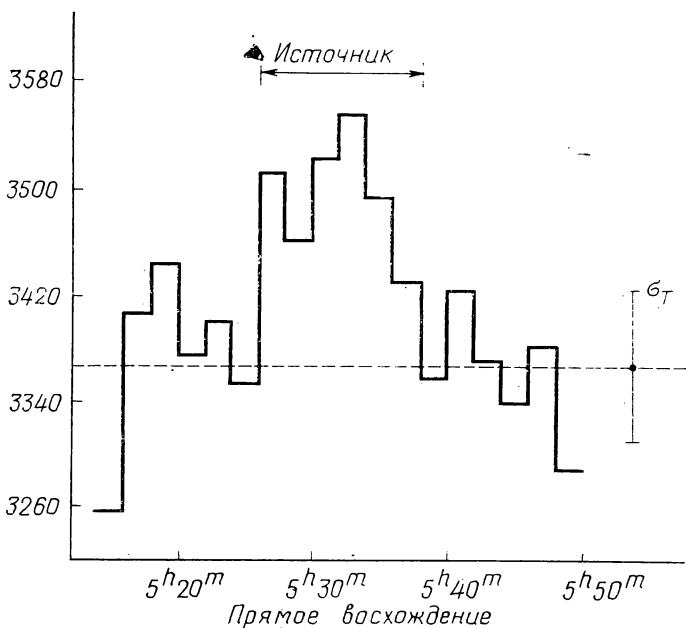


Рис. 5. Пример регистрации источника гамма-квантов сверхвысокой энергии методом сканирования ( $\sigma$  — точность измерений). По вертикальной шкале указано суммарное число вспышек черенковского света, зарегистрированных за период 2 мин

новиться. На рис. 5 в качестве примера представлены результаты наблюдений Крабовидной туманности, полученные на высокогорной станции на Тянь-Шане.

Нужно сказать, что, несмотря на очень большую эффективную площадь регистрации, скорость счета довольно низкая. Так, при энергии 1000 ГэВ скорость счета вспышек от КЛ, регистрируемых этим методом, равна примерно  $1 \text{ с}^{-1}$  (одна вспышка в 1 с) при угле раствора приемного конуса детектора в  $1^\circ$  (рис. 6). Потoki гамма-квантов в лучшем случае составляют 1% или менее от фона КЛ. При такой низкой скорости счета статистические флуктуации, как правило, превосходят приращение скорости счета от гамма-квантов.

Поэтому для уверенной регистрации столь слабых потоков необходимо проводить большое число сканирований. Поскольку за одну ночь можно провести только несколько сканирований источника, на обнаружение

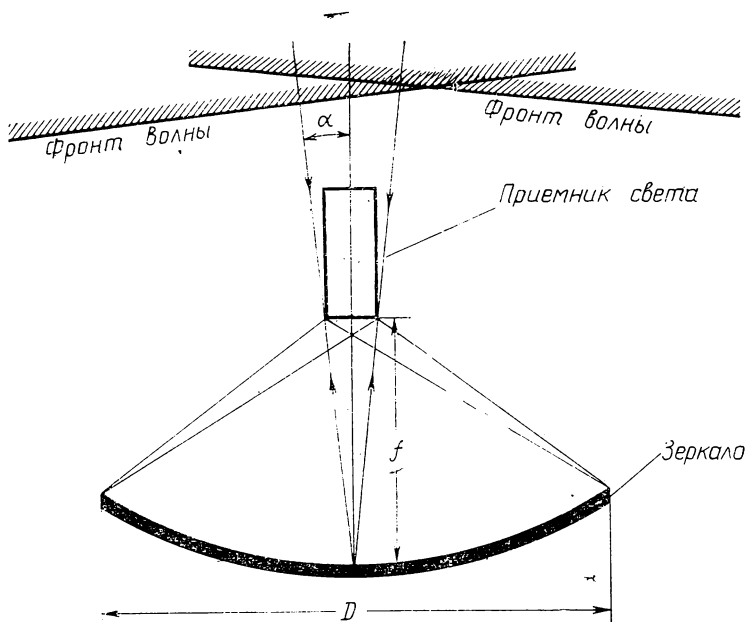


Рис. 6. Детектор черенковской вспышки

потоков уходят месяцы и годы постоянных наблюдений. Следует отметить, что черенковские вспышки от частиц и квантов сверхвысоких энергий можно регистрировать лишь в безлунные ночи и в ясную погоду. Тем не менее этот метод является пока единственным, позволяющим регистрировать слабые потоки гамма-квантов с энергиями 100—10 000 ГэВ. И именно этим методом обнаружены источники гамма-квантов сверхвысоких энергий.

Таковы основные методы регистрации гамма-квантов.

#### **АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕСЯ ГЕНЕРАЦИЕЙ КЛ**

Ранее уже упоминалось, что КЛ генерируются во время хромосферных вспышек на Солнце. Солнце — ближайшая к нам звезда, и поэтому не удивительно, что образование КЛ на Солнце было замечено задолго до возникновения рентгеновской и гамма-астрономий и да-

же до появления радиоастрономии. Солнце находится так близко от нас, что КЛ, возникающие во время хромосферной вспышки, непосредственно доходят до Земли, и притом в значительных количествах.

Приборы, регистрировавшие ионизацию на уровне Земли, не раз показывали во время вспышек резкое возрастание ионизации и медленный ее спад. Первые такие вспышки были зарегистрированы 28 февраля и 7 марта 1942 г. Возрастание началось сразу после прекращения радиосвязи на коротких волнах и длилось несколько десятков минут. Детекторы, расположенные в различных точках земного шара, показывали несколько разный ход изменения интенсивности: находящиеся на экваторе и вовсе не показали никакого роста ионизации. Продолжительность же спада интенсивности составляла несколько часов.

Как выяснилось позднее, прекращение радиосвязи было вызвано потоком рентгеновского излучения, возникающего на ранней стадии хромосферной вспышки. Тот факт, что на экваторе возрастание не наблюдалось, говорит о практическом отсутствии частиц с энергией 15 ГэВ при вспышке (магнитное поле Земли препятствует попаданию на Землю, на экваторе, частиц с энергией меньше 15 ГэВ).

Впоследствии вспышки КЛ наблюдались с помощью наземной аппаратуры в 1946 г., 1949 г., 1956 г. и т. д., т. е. один раз в несколько лет. Их анализ показал, что источником этих КЛ, несомненно, являются хромосферные вспышки на Солнце.

Интенсивные наблюдения вспышек КЛ начались во время Международного геофизического года, когда группа сотрудников Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР под руководством А. Н. Чарахчяна начала систематические запуски шаров-зондов в стратосферу. На этих шарах-зондах поднимались счетчики заряженных частиц. О каждом прохождении заряженной частицы узнавали на Земле с помощью приемника, принимавшего сигналы передатчика, запущенного в стратосферу и управляющегося счетчиком частиц. Эти измерения, проводившиеся в течение многих лет, существенно расширили наши представления о явлении вспышек КЛ.

Впервые хромосферная вспышка наблюдалась в 1859 г. Ученые, следившие на экране за Солнцем в бе-

лом свете, заметили, к своему удивлению, что в одном месте яркость поверхности Солнца повысилась. Увеличение яркости Солнца в белом свете соответствовало очень мощной хромосферной вспышке, подобные вспышки наблюдаются крайне редко — один раз в 10 лет и реже.

Систематические наблюдения вспышек начались после создания Ж. Лио солнечного телескопа со светофильтром, пропускавшим свет в узкой полосе, соответствовавшей линии излучения водорода  $H\alpha$ . Для вспышки характерно быстрое возрастание поверхностной яркости небольшой области на Солнце с последующим медленным спадом. Как правило, солнечные вспышки наблюдаются в активной области, вблизи темных пятен, в которых напряженность магнитного поля достигает 3—4 кГс.

Однако солнечные вспышки проявляются не только в оптическом диапазоне.

Уже на заре развития радиоастрономии стало ясно, что Солнце — сильный источник радиоизлучения. Радиоизлучение «спокойного» Солнца носит в основном тепловой характер. При этом не следует забывать, что самые внешние слои Солнца (солнечная корона) имеют довольно высокую кинетическую температуру — до нескольких миллионов кельвинов. Во время солнечных вспышек на Солнце наблюдаются быстрые движения, некоторая часть вещества приобретает скорость больше параболической, т. е. отрывается от Солнца и летит в межпланетное пространство. Причем это вещество, естественно, возбуждает в хромосфере и короне различного рода колебания, в том числе и радиоволны. (Мы не будем подробно останавливаться на всех проявлениях хромосферных вспышек потому, что это заняло бы слишком много времени. Интересующимся рекомендуем прочитать брошюру: Северный А. Б., Степанян Н. Н. Солнечные вспышки. М.; Знание, 1976.)

Больше всего нас сейчас интересуют те явления в солнечных вспышках, которые связаны с генерацией КЛ. Мы уже говорили о возникновении рентгеновского излучения во время хромосферных вспышек. Связано ли это излучение с генерацией частиц высоких энергий?

И да, и нет. Как уже говорилось ранее, хотя рентгеновскую астрономию принято называть «астрофизикой высоких энергий», даже солнечные вспышки лишний раз указывают на то, что это название не вполне оправ-

дано. Действительно, во время хромосферных вспышек увеличивается поток мягкого рентгеновского излучения от Солнца с длиной волны больше нескольких десятых долей нанометра. Но мягкое рентгеновское излучение свойственно и «спокойному» Солнцу (ведь температура короны более миллиона кельвинов). Поэтому тепловое излучение короны простирается до рентгеновской области.

Во время хромосферной вспышки повышается температура в области нижней короны, что приводит к возрастанию потока излучения. Что же касается жесткого рентгеновского излучения, то оно, безусловно, связано с электронами высоких энергий, хотя еще остается не до конца ясно, каков механизм ускорения электронов. Совсем другое дело — гамма-излучение атомных ядер. Здесь уже речь идет об энергиях в несколько миллионов электронвольт.

В спектре гамма-излучения солнечных вспышек обнаружены линии, соответствующие возбужденным состояниям ядер дейтерия, углерода, кислорода и других элементов. Эти линии возбуждаются при столкновении протонов или ядер, ускоренных до десятков и сотен мегаэлектронвольт, с ядрами атомов солнечной атмосферы. Кроме того, в спектре гамма-излучения присутствуют линия аннигиляции электронов 0,511 МэВ и непрерывный фон, свидетельствующие о наличии электронов и тяжелых частиц высокой энергии в солнечной вспышке.

Все эти данные говорят о генерации КЛ на Солнце. Но мы уже знаем об этом из данных, полученных в результате наблюдений с помощью шаров-зондов и спутников. Действительно, измерения в стратосфере показали, что во время сильных хромосферных вспышек на Солнце генерируются протоны с энергией больше 100 МэВ. Получены энергетические спектры ускоренных частиц. Однако временной ход интенсивности КЛ и связь между амплитудой эффекта и мощностью хромосферной вспышки, оцениваемой по оптическому излучению, сильно искажаются влиянием межпланетного магнитного поля.

Это поле имеет довольно сложную структуру, поэтому распространение частиц высокой энергии от места их генерации на Солнце до Земли определяется в основном именно межпланетным магнитным полем. Тем

не менее удалось установить, что ускорение частиц происходит в начальной стадии вспышки.

Гораздо более определенные данные о процессе ускорения получены по регистрации временного хода гамма- и жесткого рентгеновского излучений. Поскольку области генерации этих излучений отстоят от места генерации частиц на значительно меньшем расстоянии, чем расстояние от Солнца до Земли, то и искажения временного хода генерации частиц существенно меньше. Исследования последних лет подтверждают вывод о том, что генерация частиц происходит на ранних стадиях солнечных вспышек.

Таковы кратко результаты наблюдений. Как же в целом можно представить явление вспышки? Безусловно, в настоящее время все еще нет четкого представления о взаимосвязях различных проявлений в этом процессе. Однако некоторые стороны этого процесса, видимо, прояснились.

Нет сомнения в том, что вспышки связаны с магнитными полями на Солнце. Но, естественно, сами по себе магнитные поля не могут быть причиной этого явления. Причина кроется в движении носителей, или, точнее, источников магнитного поля. Эти источники и кинетическая энергия их движения являются резервуарами, откуда черпается энергия. Происходит же само явление в верхних слоях хромосферы или в нижних слоях короны, где плотность вещества существенно меньше, чем в источниках магнитного поля пятен.

Сложный характер магнитного поля, получающийся в результате взаимодействия нескольких пятен, имеющих разный знак магнитного поля, приводит в ряде случаев к возникновению быстрых процессов диссипации энергии (т. е. ее рассеяния, превращения в тепло) магнитных полей и токов. При этом происходят нагрев разреженной плазмы и ускорение частиц до высоких энергий. Все остальные явления по отношению к только что рассмотренным являются вторичными.

Такова в общем картина явления солнечной вспышки. Главное для нас здесь то, что генерация КЛ является одной из существенных сторон этого процесса, его необходимым элементом. Из энергетических же соображений также ясно, что КЛ забирают существенную долю энергии, выделяемой во вспышке. Эта доля энер-



гии больше, чем энергия радио-, оптического и даже рентгеновского излучений.

Но ведь Солнце — это рядовая звезда, и такое явление, как солнечная вспышка, должно быть свойственно и другим звездам, вряд ли Солнце является исключением в этом смысле.

Мы уже упоминали ранее, что на красных карликах, одном из наиболее распространенных типов звезд в Галактике, происходят явления, по характеру близкие к солнечным вспышкам, но по масштабу значительно большие. Наблюдения в оптической области показали, что яркость этих звезд может увеличиваться в несколько раз как в непрерывном спектре, так и в излучении водородных линий. Мощность оптического излучения красных карликов во время вспышки в 100—1000 раз больше, чем у солнечных вспышек. В радиоизлучении мощность вспышки на карликах по сравнению с солнечной в миллион раз больше. Это обстоятельство говорит о том, что излучение носит синхротронный характер, о чем также свидетельствует и обнаруженная линейная поляризация радиоизлучения.

Безусловно, масштаб вспышек на красных карликах значительно больше, чем на Солнце. По-видимому, такая вспышка захватывает значительную часть поверхности звезды. Поток радиоизлучения можно объяснить только наличием там электронов высокой энергии в магнитных полях. Так же, как и солнечные вспышки, вспышки на красных карликах сопровождаются излучением в рентгеновской области. К сожалению, пока еще не проводились наблюдения красных карликов в гамма-диапазоне, но имеющиеся уже наблюдения в диапазонах от радио- до рентгеновского указывают, что и в этом явлении происходит генерация электронов высоких энергий.

Кроме вспышек на красных карликах, нестационарные процессы наблюдаются и на звездах других типов. Однако вплоть до настоящего времени их исследования проводились в основном в оптическом диапазоне, что не дает возможности судить о генерации КЛ.

Очень мощные вспышки происходят на Новых звездах. При этом яркость звезды за несколько суток возрастает в несколько тысяч и даже миллионов раз. При взрыве Новой звезды сбрасывается внешняя часть оболочки, которая разлетается со скоростью в несколько

тысяч километров в секунду. Нередко за первым сбросом оболочки следует второй и с еще большей скоростью. Дело в том, что все Новые являются компонентами двойной системы: одна из звезд — белый карлик, другая — карлик поздних спектральных классов, т. е. с более низкой температурой. Согласно существующим представлениям в результате перетекания вещества с одной звезды на другую, а именно на белый карлик, как раз и происходит взрыв Новой. Это вызвано тем, что когда вещества накопится достаточно много, начинает развиваться термоядерная реакция, приводящая к сильному разогреву вещества, возникновению ударной волны и сбросу оболочки.

В последнее время получены данные о радиоизлучении во время вспышек Новых. Эти данные говорят о том, что во время вспышек генерируются электроны высокой энергии, которые в магнитном поле оболочки и излучают радиоволны.

Энергия, выделяемая во время взрыва Новой, составляет  $10^{45}$ — $10^{46}$  эрг (в основном это кинетическая энергия оболочки). Масса оболочки равна примерно  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  массы Солнца. Но и энергия ускоренных электронов достаточно велика — примерно  $10^{43}$  эрг. В нашей Галактике взрывы Новых происходят достаточно часто — 30 раз в год. Однако для того чтобы Новую можно было обнаружить, звезда должна располагаться сравнительно недалеко от нас, на расстоянии 3—4 кпс. Поэтому практически не каждый год удается пронаблюдать достаточно яркую Новую.

В этом отношении наиболее перспективными являются взрывы Сверхновых. Взрыв Сверхновой представляет собой еще более грандиозное явление, чем взрыв Новой. Яркость Сверхновых в максимуме блеска в миллиарды раз выше, чем яркость Солнца, и сравнима с яркостью целой галактики.

Что же происходит во время взрыва Сверхновой?

Во время взрыва ядро звезды сжимается, а оболочка разлетается, причем с довольно большой скоростью, приблизительно 10 000 км/с. В одних случаях масса этой оболочки немного больше 0,1 массы Солнца (также Сверхновые называются Сверхновыми I типа), в других — порядка 1—10 масс Солнца (Сверхновая II типа). Кинетическая энергия оболочки для Сверхновых

I типа  $10^{48}$ — $10^{50}$  эрг, а Сверхновых II типа —  $10^{51}$ — $10^{52}$  эрг.

Все оболочки Сверхновых являются источниками не-теплого радиоизлучения, которое представляет собой не что иное, как синхротронное излучение электронов высокой энергии. Полная энергия электронов, ответственных за это радиоизлучение, составляет  $10^{48}$ — $10^{49}$  эрг. Любопытно; что полная энергия электронов в оболочках Сверхновых II типа того же порядка, что и в оболочках Сверхновых I типа.

Взрывы Сверхновых II типа происходят в нашей Галактике довольно часто — приблизительно один раз в 50 лет. Сверхновые I типа появляются в 10 раз реже. Оказывается, что энергии, передаваемой во взрывах Сверхновых электронам, вполне достаточно для обеспечения всей Галактики электронами высоких энергий. А как же обстоит дело с протонами и ядрами других элементов? Ускоряются ли они во взрывах Сверхновых? Ведь общая энергия КЛ, заключенная в атомных ядрах, на два порядка больше, чем в электронах.

С энергетической точки зрения дело обстоит сравнительно благополучно. В настоящее время еще нет, правда, ясности, на какой стадии взрыва Сверхновой происходит ускорение частиц до высоких энергий. То ли они получают основную часть энергии в начальной стадии, то ли образующийся после взрыва пульсар постепенно передает энергию своего вращательного движения через посредство электромагнитного поля частицам, то ли возникающая после взрыва Сверхновой ударная волна в межзвездной среде ускоряет частицы до более высокой энергии. Эта проблема является ключевой при выяснении происхождения КЛ, и на эту тему есть достаточно много теоретических изысканий.

А что же говорят данные наблюдений?

Радиоастрономические данные совершенно определенно указывают лишь на то, что в оболочке Сверхновых имеется достаточно высокая концентрация электронов (а это свидетельствует о их генерации на какой-то из ранних стадий). В одной из оболочек, в Крабовидной туманности, определенно и в настоящее время происходит генерация электронов высокой энергии (до  $10^5$  ГэВ), хотя после взрыва прошло почти 1000 лет. Ясно, что ускорителем здесь является пульсар. Обо всем этом, однако, стало возможным судить лишь после об-

наружения рентгеновского излучения Крабовидной туманности.

Дело в том, что анализ наблюдательных данных показывает, что рентгеновское излучение этой туманности по своей природе есть синхротронное излучение электронов. Но электроны высокой энергии (вспомним, что характерная частота синхротронного излучения пропорциональна  $E^2$ ) очень быстро ее теряют и в любом случае попали в туманность не более нескольких лет назад. А попали они туда не из внешних районов, а из центра туманности — от пульсара.

В других туманностях дело обстоит гораздо сложнее. Мы здесь не будем вдаваться в эту чрезвычайно интересную, но еще далекую от разрешения проблему. Обратимся вновь к результатам наблюдений.

Итак, достоверно известно, что в Сверхновых электроны генерируются. К сожалению, данных, которые говорили бы об ускорении там и ядер, пока нет. Каким же образом их можно получить? Ведь протоны практически не дают синхротронного излучения.

По-видимому, только изучая спектры гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий. Такие наблюдения уже проводились с помощью искровых камер, размещенных на спутниках. Они показали, что только два объекта, пульсар в Крабовидной туманности и пульсар в созвездии Парусов, определенно являются источниками гамма-квантов высокой энергии. Но из этих данных еще нельзя утверждать, что это гамма-излучение вызвано протонами.

Наблюдения показали, что гамма-излучение почти полностью является пульсирующим. В этом случае его можно вполне объяснить как излучаемый электронами и пульсирующий с той же частотой, что и радиоизлучение. Однако никто не предлагал для такого объяснения привлечь протоны. Безусловно, здесь далеко не все ясно.

Другие источники гамма-квантов с энергией 100 МэВ или не отождествлены ни с какими астрофизическими объектами, или отождествляются с молекулярными облаками, содержащими большое количество газа (порядка  $10^4$ — $10^6$  масс Солнца). При таких больших массах для объяснения гамма-излучения достаточно предположить, что плотность КЛ в них такая же, как и в

окружающей межзвездной среде, т. е. нам не нужно предполагать наличие в них источников КЛ.

Раньше говорилось о методе регистрации гамма-квантов сверхвысоких энергий ( $10^2$ — $10^4$  ГэВ). Что же дают наблюдения этим методом?

Они привели к обнаружению гамма-квантов сверхвысоких энергий от пульсаров в Крабовидной туманности (NP 0532) и в созвездии Парусов (PSR 0833—45), от рентгеновского источника Лебедь X-3 и от радиогалактики Центавр А. Таким образом, спектр гамма-излучения пульсаров тянется до 1000 ГэВ. Каким механизмом испускается это излучение, пока неясно. Объект Лебедь X-3 почти единодушно признается двойной системой, один из компонентов которой является пульсаром. И опять легче объяснить излучение этого объекта, если предположить, что он ускоряет в основном электроны, а не протоны или атомные ядра. Что же касается обнаружения гамма-излучения сверхвысокой энергии от радиогалактики, то здесь имеются очень различные варианты объяснения этого излучения.

В последнее время высказываются предположения о том, что в двойных звездах имеются условия для генерации частиц КЛ (причем и протонов, и ядер) до энергии 1000 ГэВ. Если система тесная, т. е. звезды расположены близко друг от друга, то должно происходить перетекание газа с одной звезды на другую. В этих условиях возможно возникновение ударных волн, особенно если звезда обладает магнитным полем. На примере Солнца можно убедиться, что в природе действительно генерируются КЛ, если имеется движение плазмы с магнитными полями. То же самое характерно (речь идет о наблюдательных фактах) и для пульсаров.

Таким образом, и в двойных системах можно ожидать ускорения частиц до высоких энергий. Хотя энерговыделение в каждой двойной системе и не очень велико, но в нашей Галактике их очень много. Конечно, не во всех системах есть условия, необходимые для генерации КЛ, но тем не менее этим объекты могли бы внести существенный вклад в энергетику КЛ.

Подводя итог этого раздела, можно сказать, что пока мы не имеем экспериментального подтверждения генерации ядерного компонента КЛ на каком-либо объекте, кроме Солнца.

## **ВЛИЯНИЕ КЛ НА СТРУКТУРУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОТДЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ И В МЕЖЗВЕЗДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Итак, данные гамма-астрономии убедительно свидетельствуют о том, что пульсары могут быть источниками гамма-квантов. Пульсары — это объекты, которые являются источниками пульсирующего радиоизлучения (поэтому их часто называют радиопульсарами). При открытии пульсаров было замечено, что интервалы времени между импульсами, или пиками, в потоке радиоизлучения строго постоянны. Это и навело на мысль, что стабильность периода связана с вращением звезды, причем звезда должна быть нейтронной.

Рассмотрим несколько подробнее основные характеристики пульсаров. Их масса согласно теории не должна превышать 1,5—2 массы Солнца, так как при большей массе объект может превратиться в черную дыру. Наблюдения позволили оценить для ряда пульсаров их массы, хотя и со сравнительно малой точностью. Во всяком случае, оценки лежат в пределах от 1,0 до 1,5 массы Солнца.

Второй важной характеристикой пульсара является угловая скорость вращения (или период). Самый быстровращающийся пульсар имеет период 0,033 с, а самый медленный — 3,7 с. Радиусы пульсаров, как и вообще для звезд, вычисляются из теоретических моделей. Оказалось, что радиус нейтронной звезды в определенных пределах слабо зависит от массы и приблизительно равен 10 км. Из теории же определяется и момент инерции звезды: кинетическая энергия вращательного движения у различных пульсаров меняется в пределах от  $10^{45}$  до  $10^{49}$  эрг.

Еще одной важной характеристикой пульсара является напряженность магнитного поля. При ее вычислении используются формулы, связывающие потери энергии нейтронной звезды на электромагнитное излучение с изменением угловой скорости вращения. Речь идет не о тепловом излучении поверхности звезды, а об излучении низкочастотного электромагнитного поля. Тепловое излучение относительно мало, о нем мы скажем несколько позднее, низкочастотное же излучение связано с вращением магнитного поля звезды.

Если ось магнитного поля звезды наклонена к оси

вращения, то при этом в окружающем пространстве возникает переменное электромагнитное поле. Вообще говоря, энергия излучения пропорциональна четвертой степени частоты колебаний и она была бы мала, если бы значение напряженности магнитного поля не было столь огромно. Если считать, что потери кинетической энергии вращения звезды идут на излучение низкочастотного поля, то можно определить значение напряженности магнитного поля на звезде.

В начале этого раздела уже говорилось, что пульсары были обнаружены как объекты, излучающие с высокой стабильностью радиоимпульсы. И это действительно так. Однако более длительные наблюдения показывают, что период пульсаров все-таки изменяется. Скорость этих изменений очень мала, но если мы подсчитаем потери вращательной энергии звезды, то получится довольно значительная величина — порядка  $10^{33}$ — $10^{38}$  эрг/с. Напомним, что мощность теплового излучения Солнца равна  $4 \cdot 10^{33}$  эрг/с.

В этом случае магнитное поле должно быть равным примерно  $10^{11}$ — $10^{12}$  Гс. Однако при этом возникает вопрос, какая же имеется связь между частицами высоких энергий и высокой напряженностью магнитного поля?

Пульсар, как уже говорилось, может излучать низкочастотное электромагнитное поле. При этом, естественно, напряженность как магнитного, так и равного ему электрического поля достигает высоких значений. Напряженность магнитного поля в волне может превосходить 100 000 Гс, а электрического поля — 30 МВ/см. Оказывается, что в таких электрических полях заряженные частицы могут ускоряться до  $10^6$  ГэВ, т. е. до очень высоких энергий. Причем могут ускоряться и электроны, и протоны, но протоны набирают энергию, в 10 раз большую, чем электроны.

Но что самое существенное в случае пульсаров, так это наличие счастливой возможности наблюдать результаты работы пульсара как ускорителя частиц. Такая возможность нам предоставлена природой в Крабовидной туманности. Ее пульсар (NP 0532) окружает область плазмы с магнитным полем, занимающую очень большую часть пространства, имея в диаметре несколько световых лет. Частицы, ускоренные пульсаром, по-

падают в область, занимаемую магнитным полем, и начинают испускать синхротронное излучение.

Как мы помним, частота синхротронного излучения зависит от напряженности магнитного поля и энергии частиц. Изучая распределение яркости на различных частотах, можно определить как напряженность магнитного поля, так и энергетический спектр легких частиц, т. е. электронов (и, по-видимому, позитронов), ответственных за синхротронное излучение. Оказалось, что спектр частиц для единичного интервала энергий имеет вид:  $N(E) = A \cdot E^{-2,0}$ . Естественно, что спектр частиц ограничен как со стороны высоких энергий, так и со стороны низких.

Верхний предел энергии определяется по максимальной частоте, на которой регистрируется синхротронное излучение туманности. Эта частота лежит в области энергий между диапазоном жесткого рентгеновского излучения и гамма-диапазоном. Соответствующая этому максимальная энергия частиц превышает  $10^5$  ГэВ. Нижний предел энергии можно определить лишь после сложных расчетов, и оказалось, что он находится в области энергии 1 ГэВ.

Напряженность магнитного поля в центральной части туманности близка к  $10^{-3}$  Гс, а на краю падает до  $10^{-5}$  Гс. Что же заставляет нас считать, что пульсар в центре туманности ускоряет частицы и в настоящее время?

Для того чтобы понять это, рассмотрим, как меняется со временем энергия частиц, излучающих в магнитном поле Крабовидной туманности. Согласно теории эта энергия вначале пропорциональна начальному значению, но по прошествии достаточного количества времени уже не зависит от начальной энергии. Как оказалось, в Крабовидной туманности частицы, излучающие в рентгеновской области, теряют свою энергию и перестают излучать в этой области спустя несколько лет независимо от своей начальной энергии. Но рентгеновское излучение от Крабовидной туманности наблюдается постоянно, а это означает, что частицы постоянно генерируются и «впрыскиваются» в туманность.

Есть и другие данные, которые подтверждают вывод о том, что пульсар в настоящее время генерирует частицы высоких энергий. Из них наиболее существенные получены из наблюдений потока гамма-квантов. Он ока-



зался пульсирующим, что и подтверждает существование частиц очень высоких энергий в непосредственной близости от пульсара — в его магнитосфере. Совершенно определенно можно сказать также и о том, что энергия гамма-квантов, генерируемых в окрестности пульсара, превосходит 1 ГэВ, а возможно, достигает 1000 ГэВ. Но раз так, то энергия частиц, генерирующих эти кванты, по крайней мере не меньше.

Итак, пульсары ускоряют частицы до высоких энергий. Какую же долю своей энергии пульсары отдают частицам?

Об этом мы можем узнать, вновь обратившись к данным наблюдений электромагнитного излучения туманности. Из них следует, что мощность, уносимая частицами высокой энергии, равна приблизительно  $2 \cdot 10^{38}$  эрг/с. Это составляет не меньше половины всей энергии, теряемой пульсаром в 1 с. Именно такая энергия уходит на рентгеновское и более длинноволновое излучение. Энергия же, затрачиваемая на генерацию пульсирующего гамма-излучения, равна  $2 \cdot 10^{36}$  эрг/с, т. е. в 100 раз меньше, чем энергия, передаваемая частицам.

Из всего этого, однако, нельзя ничего заключить о генерации атомных ядер высоких энергий. Известный нам спектр пульсирующего гамма-излучения пока не дает возможности решить эту проблему.

Можно ли сказать, что пульсары вносят существенный вклад в генерацию частиц КЛ в нашей Галактике?

Пока и на этот вопрос нельзя ответить утвердительно. Одна из причин — отсутствие ясности в генерации частиц пульсарами. Ведь мы рассмотрели только самый быстровращающийся пульсар. Примерно то же мы могли бы сказать еще об одном пульсаре — в созвездии Парусов (PSR 0833—45). Но каково поведение других пульсаров, мы пока не знаем.

С помощью спутника «КОС-Б» получены данные о 25 источниках гамма-квантов, и лишь два из них являются определенно пульсарами. Правда, большая часть источников еще не отождествлена с какими-либо астрофизическими объектами. Какую долю своей энергии передают частицам другие пульсары, поэтому неясно. И совершенно неизвестно, ускоряют ли они протоны и ядра. Очевидно только, что по той мощности, которую передают частицам пульсары, они играют во много раз большую роль, чем другие рассмотренные

источники КЛ (за исключением Сверхновых). Поскольку же пульсары, по всей видимости, образуются во взрывах Сверхновых, то остается заключить, что взрывы Сверхновых являются основными «поставщиками» КЛ в нашей Галактике.

До сих пор речь шла в основном о том, где и в каких процессах генерируются КЛ. Однако еще во введении мы говорили о том, что КЛ, в свою очередь, влияют на различные астрофизические процессы. Обычно проследить влияние КЛ на движение газа, его свечение и т. п. не очень легко, так как существует много других факторов, конкурирующих в этом смысле с КЛ. Тем не менее детальное изучение солнечных вспышек показало, например, что нагрев хромосферы происходит от рентгеновского излучения, которое возникает как тормозное излучение электронов высокой энергии.

Влияние КЛ на движение газа хорошо прослеживается на примере Крабовидной туманности. Дело в том, что Крабовидная туманность относится к разряду «исторических» Сверхновых, т. е. дата ее вспышки известна нам из прошлого. Из различных документов установлено, что вспышка произошла в 1054 г. Туманность включает в себя газовые конденсации, которые хорошо видны, если использовать фильтры, пропускающие яркую водородную линию  $H\alpha$ . Используя фотографии Крабовидной туманности, снятые с интервалом в несколько десятков лет, мы можем заметить смещение волокон и определить составляющие их скорости (выраженные в угловых величинах, конечно) в картинной плоскости, т. е. в плоскости, перпендикулярной к лучу зрения.

Расчеты показали, что если волокна двигались бы с постоянной скоростью, то они должны были бы иметь скорость меньшую, чем та, которая получается в настоящее время по фотографиям Крабовидной туманности. Такое несовпадение скоростей волокон объясняется тем, что они постоянно ускорялись. Как показал известный советский астрофизик С. Б. Пикельнер, это ускорение возникает в результате давления КЛ на волокна.

В тех областях Крабовидной туманности, где нет газовых (или, точнее, плазменных) конденсаций, магнитное поле перемещается с большей скоростью. При этом магнитные силовые линии, которые в туманности расположены преимущественно на сфере, начинают изгибаться, образуют дуги. В этих местах напряженность

магнитного поля уменьшается, и такая область излучает практически уже только радиоизлучение.

КЛ движутся в магнитном поле спиральных рукавов. Мы уже говорили, что КЛ примерно через 15 млн. лет покидают Галактику. Поскольку плотность КЛ в межгалактическом пространстве ниже, чем в Галактике, то образуется перепад давления КЛ. Если где-либо в спиральном рукаве плотность газа выше, чем в соседнем участке, то действие этого перепада приведет к выпячиванию силовой линии в противоположную сторону от галактической плоскости — в область гало. Эта идея, в свою очередь, была выдвинута С. Б. Пикельнером.

Напряженность магнитного поля в этом участке будет падать. Кроме того, ионизованный газ, «вмороженный» в магнитное поле, будет опускаться вдоль силовой линии ближе к галактической плоскости. Этот процесс развивается и может привести к образованию сильно вытянутой области. В общих чертах картина данного явления очень напоминает то, что происходит в Крабовидной туманности, только масштаб существенно больше. Безусловно, можно было бы привести и другие примеры влияния КЛ на ход различных астрофизических явлений. Однако уже из этих примеров ясно, что без КЛ многие процессы в Галактике протекали бы совершенно иначе. Вопрос этот весьма сложный и изучение его, по-видимому, находится на самой начальной стадии.

Одним из наиболее интересных объектов в нашей Галактике является источник гамма-квантов сверхвысоких энергий Лебедь X-3. По мощности гамма-излучения этот объект пока что является самым сплывшим в Галактике. Такие известные объекты, как Крабовидная туманность и пульсар в Парусах, излучают потоки гамма-квантов на 1—2 порядка ниже, чем это делает Лебедь X-3.

До 1972 г. Лебедь X-3 был известен как рентгеновский источник. В сентябре 1972 г. радиоастрономы обнаружили мощную вспышку радиоизлучения от этого объекта. Потоки радиоизлучения за несколько часов возросли в 1000 раз, а затем медленно спадали в течение нескольких суток. Мощность радиоизлучения в максимуме вспышки была сравнимой с мощностью радиоизлучения молодого остатка Сверхновой. При этом, однако, размеры объекта были существенно меньше размеров

остатка. Так, если размеры остатков Сверхновых порядка 1 пс, т. е.  $3 \cdot 10^{18}$  см, то размеры радиоизлучающей области во вспышке Лебеда X-3 не превосходили  $10^{15}$  см, а в спокойном состоянии размер объекта равен  $2 \cdot 10^{14}$  см.

Такое мощное излучение могло быть связано только с электронами высоких энергий, да к тому же наблюдения показали, что во вспышках степень поляризации излучения достигала 10% и более. Причем анализ результатов наблюдений показал, что уменьшение интенсивности радиоизлучения связано не с потерями на синхротронное излучение, а с потерями энергии на тормозное излучение. А это означало, что область, где находятся частицы высоких энергий, занята относительно плотным газом.

Одним словом, этот объект сразу же привлек внимание своей необычностью. Его исследования велись во всех диапазонах электромагнитного излучения, начиная от радио- и кончая гамма-квантами сверхвысоких энергий. Что же показали эти наблюдения?

Оказалось, что объект излучает во всех диапазонах спектра, доступных наблюдениям. Были измерены потоки Лебеда X-3 в инфракрасном, рентгеновском и гамма-диапазонах высокой и сверхвысокой энергии. Спектр излучения оказался весьма похож на спектр Крабовидной туманности. Была обнаружена периодичность сначала излучения в рентгеновском, а затем в инфракрасном диапазонах и в области гамма-квантов (период излучения оказался близким к 4,8 ч).

Все эти данные говорили о том, что мы имеем дело с источником частиц высоких энергий, причем генерация их происходит постоянно, так как иначе частицы из-за высокой плотности окружающей среды очень быстро потеряли бы свою энергию. Все это привело большинство исследователей к мнению, что объект Лебедь X-3 должен содержать пульсар, и притом активный, способный генерировать частицы очень высоких энергий.

Наличие периодичности в излучении наводило на мысль, что объект является двойной системой. Аналогичная система уже была обнаружена в нашей Галактике. Это пульсар PSR 1913+16, имеющий период обращения всего 59 мс. Орбитальный период системы равен 7,75 ч, т. е. весьма близок к периоду Лебеда X-3.

По своей скорости вращения пульсар PSR 1913+16 — второй после пульсара в Крабовидной туманности. Однако изменение его периода показывает, что он теряет на излучение очень мало энергии — около  $10^{33}$  эрг/с, т. е. в  $10^5$  меньше, чем пульсар в Крабовидной туманности.

Что же касается объекта Лебедь X-3, то от него были зарегистрированы потоки гамма-квантов как сверхвысоких, так и высоких (больше  $10^8$  эВ) энергий. Средний за несколько лет поток гамма-квантов с энергией больше 1000 ГэВ равен  $3 \cdot 10^{-11}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ , а средний поток гамма-квантов с энергией больше 40 МэВ —  $8 \cdot 10^{-5}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ . Оценка полной энергии, теряемой пульсаром в Лебедь-X-3 на ускорение частиц,  $(1-2) \cdot 10^{38}$  эрг/с, весьма близка к потерям энергии на ускорение частиц пульсаром в Крабовидной туманности.

К сожалению, непосредственная регистрация радиоизлучения этого пульсара невозможна из-за окружающего этот объект плотного и к тому же ионизованного облака газа. Такое количество ионизованного газа делает область непрозрачной не только для радио-, но, по-видимому, и для инфракрасного и рентгеновского излучений. Правда, последнее все-таки пронизывает облако, и поэтому мы можем наблюдать периодичность рентгеновского излучения. Временами периодичность наблюдается и в инфракрасном диапазоне.

Что же представляет собой объект Лебедь X-3? Откуда у него такое большое количество газа, и как связаны изменения потока гамма-квантов со строением этого объекта?

Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо иметь точную модель объекта, т. е. знать его структуру, динамику и т. п. Наши представления о природе этого объекта еще далеки от истины, но чтобы выяснить взаимосвязь между генерацией КЛ, электромагнитным излучением и структурой объекта, рассмотрим пока гипотетическую модель. Во всяком случае мы уже знаем, что Лебедь X-3, по-видимому, представляет собой двойную систему, состоящую из пульсара и еще одной звезды. Вторая звезда не должна быть очень большой, поскольку период системы мал, а это значит, что центры масс обеих звезд близки (они должны находиться на расстоянии примерно  $10^{11}$  см).

Многие авторы предпочитают считать, что вторая

звезда в этой системе является красным карликом. О красных карликах мы уже говорили раньше. Именно на этих звездах происходят вспышки, похожие на хромосферные вспышки на Солнце. Весьма знаменательно, что в последнее время обнаружено рентгеновское излучение у этих карликов. Все это говорит о том, что красный карлик может быть источником газа, с «вмороженным» в него магнитным полем. Истечение этого газа к тому же может быть усилено из-за поглощения низкочастотного электромагнитного поля, излучаемого пульсаром.

Если мы еще вспомним, что обе звезды вращаются вокруг общего центра масс, то схематически можно представить следующую картину, которая изображена на рис. 7. Зачерненная область — это область газа, истекающего из звезды и удаляющегося от центра масс под действием центробежной силы и давления электромагнитной волны. Речь идет о низкочастотном магнитодипольном излучении пульсара, т. е. излучении, возникающем вследствие вращения магнитного диполя.

Будучи поглощенным, это излучение, естественно, повышает температуру газа. Ну и, конечно, пульсар ускоряет частицы, причем до очень высоких энергий —  $10^6$  ГэВ (частицы ускоряются электромагнитной волной, о чем говорилось раньше). Достигнув области газа, частицы, обладая очень высокой энергией, всеми возможными способами начинают ее терять. В первую очередь на синхротронное излучение (напряженность магнитного поля должна быть порядка  $10$ — $100$  Гс в начале газового потока). Частицы с энергией  $1000$  ГэВ и меньше теряют очень много энергии также и при обратном комптоновском рассеянии. А частицы с энергией меньше  $1$  ГэВ в основном теряют энергию на тормозное излучение.

Спектр электромагнитного излучения такого объекта объяснить непросто. Сложность решения такой задачи заключается в том, что этот спектр зависит не только от энергии частиц, генерируемых излучением, и от напряженности магнитного поля, но и от концентрации фотонов, уже излученных ранее. Более того, и энергетический спектр частиц меняется со временем, причем его вид существенно зависит от электромагнитного поля излучения. Здесь мы имеем дело с так называемой самоогласованной задачей. Именно на примере ее решения

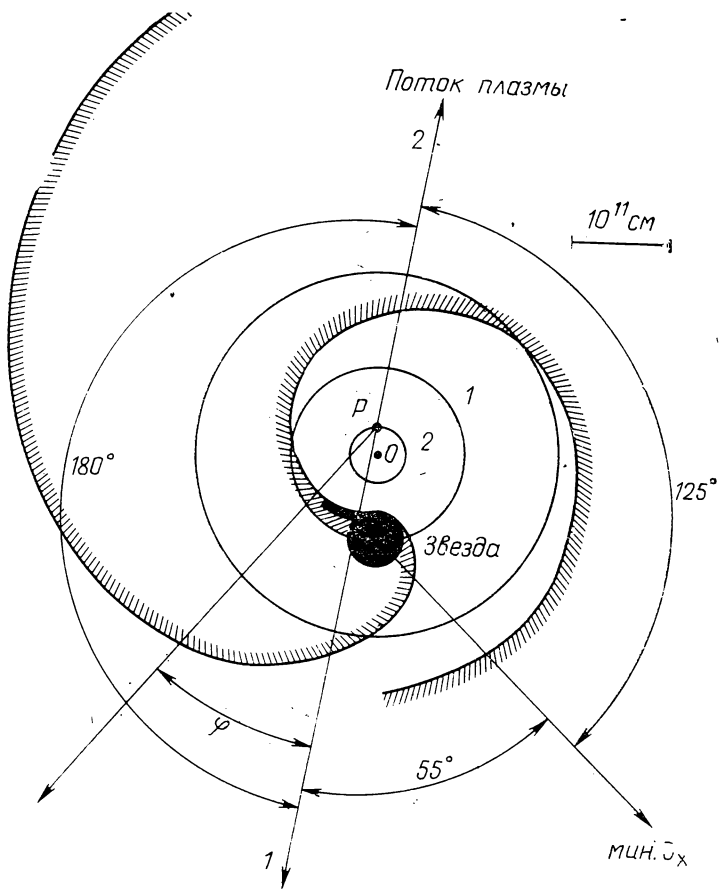


Рис. 7. Модель объекта Лебедь X-3

можно убедиться, насколько сложной может быть связь между спектром электромагнитного излучения (в том числе гамма-квантов), спектром частиц высоких энергий и физическими условиями в объекте, характеристиками и структурой не только магнитного поля, но и плотности среды и динамики газовых облаков.

Однако для достаточно ясного представления об объекте Лебедь X-3 не хватает еще наблюдательных данных. Особенно важны наблюдения в области гамма-квантов, ибо именно они характеризуют динамику

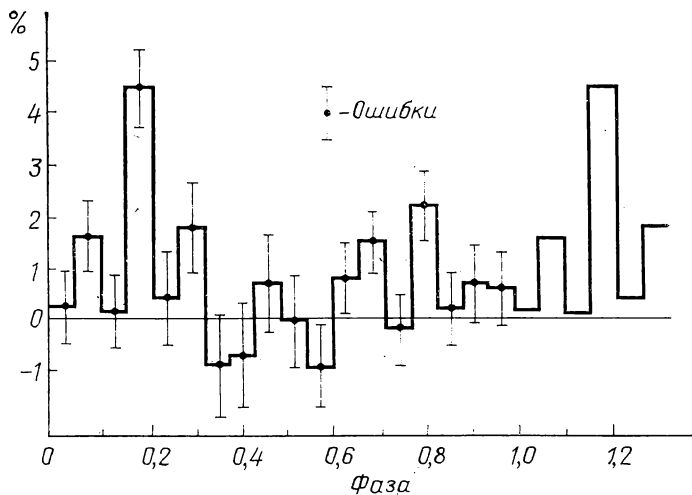


Рис. 8. Световая кривая для Лебедя X-3

потерь энергии частицами, а стало быть и структуру объекта. На примере пульсаров мы уже убедились, что основные, наиболее существенные в энергетическом отношении процессы проявляются там в гамма-излучении высоких и сверхвысоких энергий. Правда, техника, которой пользуются в гамма-астрономии, еще существенно уступает по чувствительности применяемой в радиоастрономии. Именно поэтому радиоизлучение пульсаров является основным видом излучения, регистрируемого на Земле, хотя потоки радиоизлучения на много порядков ниже, чем потоки гамма-излучения.

Очень важную информацию о структуре объекта можно получить, сопоставляя так называемые световые кривые, полученные для разных диапазонов частот излучения. Световая кривая — это зависимость потока излучения от фазы периодического процесса (например, орбитального вращения пульсара). На рис. 8 представлена полученная из наблюдений световая кривая для потока гамма-квантов от Лебедя X-3 с энергией больше 1000 ГэВ. При фазе  $55^\circ$  (за нулевую фазу взят минимум рентгеновского излучения) наблюдается импульс потока гамма-квантов. Его длительность составляет при-



мерно 15 мин (или  $20^\circ$  по фазе). Согласно теоретической модели Лебеда X-3 такое поведение потока гамма-квантов с энергией 1000 ГэВ можно объяснить только лишь синхротронным излучением частиц высоких энергий.

Мы упомянули, что минимум рентгеновского излучения принят за нулевую фазу. На рис. 7 это направление было указано стрелкой. Предложенная модель объекта Лебеда X-3 объясняет его рентгеновский поток свечением нагретой до высокой температуры наиболее плотной части звезды, обращенной к пульсару (см. рис. 7). В направлении минимума эта область закрывается от наблюдателя телом звезды. Таким образом, находит естественное объяснение наблюдаемый сдвиг между минимумом рентгеновского излучения и пиком гамма-излучения.

Безусловно, предлагаемую модель Лебеда X-3 следует рассматривать лишь в качестве рабочей гипотезы. Она много объясняет, но есть и много неясного.

1. Модель показывает, что необходимая для объяснения наблюдаемых потоков гамма-квантов, инфракрасного излучения и излучений в других диапазонах мощность энергии, передаваемая пульсаром частицам, должна быть равна  $(1-2) \cdot 10^{38}$  эрг/с, т. е. примерно такой же, как и у пульсара в Крабовидной туманности. Таким образом, оказывается, что при одинаковой мощности источников КЛ эффективность преобразования их энергии в гамма-кванты может отличаться на два порядка. Надо полагать, что возможны и другие источники КЛ, в которых эффективность преобразования энергии в гамма-кванты еще ниже.

2. На примере рассмотренной модели можно видеть, что энергетический спектр частиц в компактном объекте существенно перерабатывается и должен иметь весьма сложный вид.

3. В компактном объекте энергия КЛ перерабатывается в электромагнитное излучение практически всего электромагнитного спектра: от радио- до гамма-квантов с энергией 1000 ГэВ.

4. Частицы высоких энергий в известной степени влияют на процессы, происходящие в системе, — ускоряют, например, газовые облака (то же наблюдается и в Крабовидной туманности).

Рассмотрением объекта Лебедь X-3 мы завершаем обзор галактических источников КЛ. По-видимому, читатель догадывается, что очень многие вопросы еще далеки от своего решения. Но надо полагать, что уже из сказанного ясно, какую большую роль в эволюции различных объектов в нашей Галактике играют КЛ.

Перейдем теперь к изложению роли КЛ в далеких от нас радиогалактиках и квазарах. Эти объекты из-за своей удаленности еще менее изучены, чем объекты нашей Галактики, и у нас нет возможности сказать о них так много, как, например, о Крабовидной туманности и ее пульсаре. Но и умолчать об этих объектах было бы нецелесообразно. Их изучение показывает, что энерговыделение у них на несколько порядков больше, чем в нашей Галактике, и КЛ в этих процессах играют еще большую роль.

### **РАДИОГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ—МОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ КЛ**

Наша Галактика относится хотя и к крупным, но все же к рядовым галактикам. Ее светимость (т. е. полный поток излучения) составляет  $10^{38}$  эрг/с в радиодиапазоне,  $4 \cdot 10^{43}$  эрг/с в оптическом,  $10^{39}$  эрг/с в рентгеновском и  $10^{38}$  эрг/с в гамма-лучах (с энергией больше 35 МэВ). Радиоизлучение наблюдается у многих галактик. Это означает, что не только в нашей Галактике генерируются КЛ, но и в других галактиках. Однако некоторые галактики по мощности своего радиоизлучения на несколько порядков превосходят нашу Галактику. Так, источник радиоизлучения Лебедь А испускает только в радиодиапазоне  $3 \cdot 10^{44}$  эрг/с (примерно столько же галактика испускает в оптическом диапазоне). Оценка общей энергии КЛ приводит к величине  $10^{60}$  эрг.

Радиоизлучение от мощных радиогалактик идет в основной своей части от областей, удаленных от галактик на сравнительно большие расстояния — в десятки и сотни тысяч килопарсек, а иногда и до 1 Мпс. При этом, как правило, областей радиоизлучения две, и они расположены на противоположных сторонах галактики. В том, что это излучение вызвано электронами высоких энергий, нет сомнения. Вызывает удивление лишь способ переноса частиц высоких энергий в эти области.

Предполагается, что источниками частиц высоких

энергий являются сами галактики, и даже более определенно можно сказать, что они образуются в ядрах галактик. Об этом говорят данные наблюдений. В ядрах галактик, часто в относительно малой области, размером в 1 пс и меньше расположены мощные источники радиоизлучения, причем нередко переменные. Из ядер галактик наблюдаются выбросы газа — частиц высоких энергий, которые дают непрерывное излучение в радио-, а иногда и в оптическом диапазоне. Такие ядра галактик называют активными, и именно они обеспечивают частицами высоких энергий области радиоизлучения, удаленные от галактик. Без сомнения, частицы в этих протяженных областях удерживаются благодаря магнитным полям, без которых, собственно говоря, мы не могли бы наблюдать синхротронного радиоизлучения.

В настоящее время еще нет единого мнения о структуре магнитного поля в этих областях. Но, скорее всего, магнитные поля в этих областях более или менее упорядочены, так как иначе трудно было бы ожидать (5—10) %-ной поляризации излучения, которая характерна для многих источников. Если к тому же принять, что магнитное поле связано с ядром галактики, то этим значительно упрощается вопрос о транспортировке частиц высоких энергий из ядра галактики в протяженные области. Однако этот вопрос достаточно сложен и еще далек от разрешения.

Энергия электронов, ответственных за радионизлучение, порядка 1—10 ГэВ. Можем ли мы говорить о том, что в радиогалактиках имеются частицы и более высоких энергий?

В некоторых случаях спектр непрерывного излучения, к тому же линейно поляризованного, простирается до области оптического излучения. В этом случае здесь необходимо наличие электронов с энергией 100 ГэВ. Такое излучение наблюдается в радиогалактике Дева А, причем «выбросы» излучающей материи выходят за пределы звездной составляющей (т. е. собственно галактики) и видны в оптическом диапазоне.

Еще более определенный ответ получен при наблюдении потока гамма-квантов от ближайшей к нам радиогалактики Центавр А. Эти наблюдения проводились методом регистрации черенковских вспышек света, о котором говорилось раньше. Радиогалактика Центавр А видна лишь в Южном полушарии, поэтому ее наблюде-

ния велись на южных широтах совместной американо-австралийской группой исследователей с помощью двух 7-метровых зеркал. Трехлетние наблюдения позволили установить, что средний поток гамма-квантов с энергией больше 300 ГэВ от радиогалактики составляет  $4,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Мощность, теряемая частицами на это излучение, близка к  $10^{41}$  эрг/с. Отметим, что и радиоизлучение этого объекта по мощности лишь немного превосходит  $10^{41}$  эрг/с.

Потоки инфракрасного излучения и радиоизлучения радиогалактики Центавр А подвержены значительным вариациям. Сильно изменяется поток и в рентгеновской области. Причем эти изменения происходят нередко в течение 1—2 сут. Совершенно ясно, что такие изменения не могут быть вызваны тепловыми механизмами и за эти излучения могут быть ответственны частицы высокой энергии. Изменчивость потоков излучения говорит и о том, что они генерируются в относительно малой центральной области радиогалактики, и время жизни частиц из-за потерь энергии на излучение мало.

Полученные данные позволили оценить напряженность магнитного поля в центральной части ряда радиогалактики диаметром  $3 \cdot 10^{16}$  см. Она оказалась равной примерно 2 Гс. Безусловно, эти оценки можно рассматривать лишь как первые шаги гамма-астрономии в изучении далеких галактик.

Возникает вопрос, каким же образом генерируется такое большое количество частиц высоких энергий? Ведь ни один из известных нам источников КЛ не может иметь мощность, намного превышающую  $10^{38}$  эрг/с.

Правда, во взрывах Сверхновых частицам высоких энергий может быть передано много энергии. Но тогда в Центавре А каждые три года должен наблюдаться взрыв Сверхновой, а в Лебеде А, одной из наиболее мощных радиогалактик, — каждые сутки. Но этого не наблюдается. По-видимому, существует другой механизм передачи энергии частицам. Однако прежде чем перейти к этому вопросу, следует рассказать еще об одном виде объектов, в которых происходит еще большее выделение энергии и не без участия КЛ.

В 1963 г. радиоастрономы отождествили со звездopodobными объектами сильные радиоисточники. В течение длительного времени не удавалось понять, что это за объекты, пока не удалось расшифровать спектры их

оптического излучения. Оказалось, что спектральные линии в них смещены в красную сторону. Это могло означать, что объекты весьма удалены от нас и их светимости в радио- и оптическом диапазонах существенно превосходят все известные до сих пор.

Мы не будем вдаваться сейчас в историю решения этого вопроса. Квазары, как называли эти источники, оказались чрезвычайно удаленными галактиками с очень ярким ядром (собственно мы наблюдаем только ядра этих галактик). Светимость квазаров в оптическом диапазоне на 1—2 порядка выше, чем у обычных галактик, т. е. составляет  $10^{46}$  эрг/с. Причем линейные размеры области, где генерируется основная часть излучения, в  $10^6$ — $10^7$  раз меньше размеров галактик и равны  $10^{16}$  см. Полная светимость квазаров,  $10^{47}$ — $10^{48}$  эрг/с, в 1000 раз выше, чем у самых ярких радиогалактик. Радиосветимость квазаров того же порядка, что и у радиогалактик.

Несомненно, что радиосветимость квазаров обязана синхротронному свечению электронов высоких энергий. Об этом говорит и высокая яркостная температура, и линейная поляризация, и т. п. Вообще по своим радиосвойствам квазары весьма похожи на радиогалактики. У них, так же как у радиогалактик, наблюдается двойственная структура, а переменность в радиоизлучении иногда проявляется за время меньше суток. В отличие от радиогалактик максимум радиоизлучения, однако, лежит в области более коротких волн — в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Кроме того, если переменность радиогалактик существенна лишь в центральной части галактики, которая, как правило, вносит незначительный вклад в общее излучение, то у квазаров общий поток излучения меняется существенно (например, в 2 раза) за годы и даже месяцы. Таким образом, среднее время жизни частиц в квазарах заметно меньше, чем в радиогалактиках, а стало быть и мощность генерации КЛ выше.

Хотя лишь один квазар наблюдался в гамма-лучах с помощью спутника, но уже это дает нам основания утверждать, что КЛ в квазарах генерируются в относительно плотных областях. Поток гамма-квантов с энергией больше 100 МэВ, зарегистрированный с помощью искровых камер от квазара 3С 273, составил  $1,6 \cdot 10^{-6}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Однако вследствие громадного расстояния об-

шая энергия гамма-излучения квазара достигает величины  $3 \cdot 10^{45}$  эрг/с. Но это порядка 1% мощности излучения целой галактики. Ведь даже в пульсаре Крабовидной туманности переходит в гамма-кванты лишь  $10^{-3}$  всей мощности излучения. В этом случае остается лишь предположить, что существенная доля энергии квазара (а она почти полностью сосредоточена в его ядре) идет на ускорение КЛ.

Что же еще известно нам о квазарах? Какие процессы происходят в них?

Мы уже говорили, что они излучают линейчатый спектр. Практически все это излучение идет от центральной части квазара радиусом примерно  $10^{19}$  см. Газовые облака, дающие линейчатый спектр, имеют температуру примерно  $2 \cdot 10^4$  К и плотность газа  $10^7$  атомов в  $1 \text{ см}^3$ . В общем, можно представить себе клочковатую «туманность», в которой газовые облака занимают примерно  $10^{-3}$  всего объема; общая масса «туманности» около  $10^5$  масс Солнца, а облака движутся со скоростями 3000 км/с. Эти свойства квазаров весьма близки к свойствам всех активных ядер галактик.

Относительно того, что же находится в самом центре квазара, еще много неясного. Но, видимо, там находится массивное тело или много независимых тел, или одна большая черная дыра. Масса этого тела должна быть порядка  $10^7$ — $10^{10}$  масс Солнца, т. е. сравнима с массой галактики (такая большая масса необходима для обеспечения расходов энергии). В настоящее время мнения исследователей расходятся в том, каким образом выделяется эта энергия. Наиболее распространены два варианта: черная дыра и магнетонд. Мы, естественно, не будем вдаваться в дискуссию по этому вопросу. Обратим лишь внимание на то обстоятельство, что существенную долю энергии (около 0,1%) квазары теряют на гамма-излучение.

Ранее рассматривались два объекта в нашей Галактике, которые столь же эффективны в смысле генерации гамма-квантов: пульсар в Крабовидной туманности и Лебедь X-3. В Крабовидной туманности на гамма-излучение уходит 0,1% всего энерговыделения, а в Лебеде X-3 — не менее 1%. Как ни странно, но эти галактические объекты весьма схожи с квазарами.

Обратимся к фактам. В Крабовидной туманности имеются газовые облака (волокна), и масса их доволь-

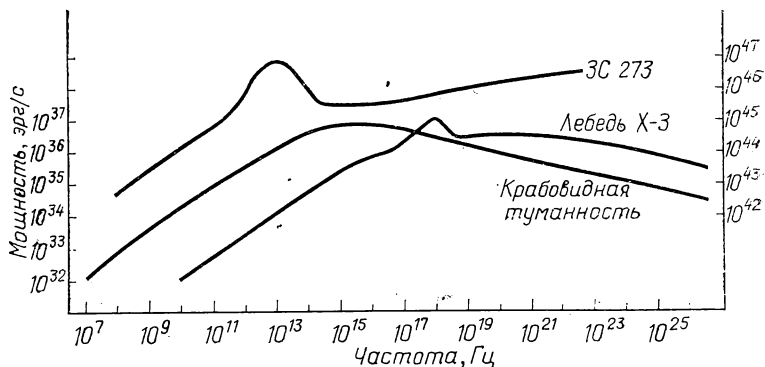


Рис. 9. Спектры излучения трех источников гамма-излучения (вертикальная шкала справа указывает мощность для квазара)

но велика (порядка массы Солнца). В системе Лебедь X-3 тоже есть газовая оболочка: ее существование следует хотя бы из данных, полученных во время вспышек радиоизлучения. Наконец, и у квазаров есть газовая оболочка — газовые облака, которые движутся со скоростями порядка несколько тысяч километров в секунду (видимо, они во всех случаях разлетаются). Рассмотрим теперь спектры излучения (рис. 9). Сходство здесь выражается хотя бы в том, что они охватывают весь диапазон электромагнитного излучения — от радиоволн до гамма-квантов.

Откуда же берется энергия для ускорения частиц до высоких энергий во всех этих объектах?

В случае пульсаров эта энергия черпается из вращательного движения нейтронных звезд. Конечно, в качестве «рычага» здесь используется магнитное поле, даже, строго говоря, электрическое поле, возникающее вследствие вращения магнитного. В случае солнечных вспышек ускорение частиц также возникает в результате движения магнитных полей и плазмы, или газа в солнечной атмосфере. Таким образом, наиболее естественным механизмом ускорения частиц и в квазарах можно считать движение магнитных полей в ядре квазара.

Наблюдения периодического характера изменения излучения в квазарах указывают на характер этого движения. Можно предположить, что массивное ядро

квазара вращается, и период обращения может быть порядка месяца. Если квазар обладает достаточно сильным магнитным полем (например,  $10^5$  Гс), то энергии его вращения хватит на много миллионов лет, а вращающееся магнитное поле может привести к условиям, когда частицы и ускоряются до высоких энергий.

Безусловно, только новые наблюдения могут помочь в решении сложного вопроса о генерации КЛ в квазарах и радиогалактиках. И в этом плане наблюдения гамма-квантов высоких и сверхвысоких энергий могли бы дать принципиально новую информацию. Однако для получения новых данных об излучении гамма-квантов уже известных объектов и для обнаружения новых источников необходимо существенно продвинуться в технике регистрации этих потоков, повысить чувствительность детекторов. О возможных перспективах развития этих исследований говорится дальше.

#### **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГАММА-АСТРОНОМИИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Ранее говорилось об источниках КЛ. Как читатель уже, видимо, понял, гамма-кванты дают весьма важную информацию о спектре КЛ, о скорости их генерации и т. п. Успехи гамма-астрономии пока еще не очень велики, но они внесли много нового в понимание процессов генерации и распространения КЛ, а также привели к открытию новых явлений, которые в других диапазонах электромагнитного излучения не проявлялись.

Среди первых результатов надо отметить обнаружение с помощью сцинтилляционного счетчика, установленного на спутнике, диффузного потока гамма-квантов с энергией больше 100 МэВ от галактического диска. Это доказало, что наша Галактика действительно заполнена не только электронами высоких энергий, но и протонами. Более того, выяснилось, что в центральной части Галактики плотность КЛ повышена.

Измерен поток гамма-квантов с энергией около 1 МэВ от хромосферных вспышек. Получены данные о гамма-линиях, возникающих в ядерных реакциях различных элементов, и аннигиляционной линии взаимодействия электрона с позитроном. Обнаружен поток



гамма-квантов с энергией 0,511 МэВ от области центра Галактики. Источник этого излучения не отождествлен.

Выявлены короткие, длительностью в несколько секунд и меньше, вспышки гамма-излучения. По всей видимости, они возникают в нейтронных звездах при термоядерных вспышках на их поверхности.

Зарегистрированы потоки гамма-квантов с энергией около 100 МэВ от пульсара в Крабовидной туманности, от пульсара в Парусах, от массивных облаков газа, от квазара 3С 273 и еще ряда других, но неотожествленных объектов (общим числом 25). Неотожествленных объектов так много, что возникла идея объявить о существовании гамма-звезд, т. е. объектов, излучающих только в гамма-диапазоне. Поскольку, однако, угловое разрешение искровых камер пока еще мало (около  $2^\circ$ ), остается надежда со временем отождествить эти объекты с известными по наблюдениям в других диапазонах электромагнитного излучения.

Гамма-излучение сверхвысоких энергий ( $10^2$ — $10^4$  ГэВ) обнаружено от пульсаров Крабовидной туманности и в Парусах, объекта Лебедь X-3, радиогалактики Центавр А и неотожествленного объекта Кассиопея  $\gamma$ -1. Кроме того, обнаружено, что весь галактический диск светится в гамма-лучах с энергией квантов около 1000 ГэВ.

Результаты в области сверхвысоких энергий получены путем регистрации черенковских вспышек. Кроме метода сканирования, описанного ранее, применялся также метод разложения моментов прихода черенковских вспышек по фазе пульсара с целью выявления периодической составляющей гамма-излучения. Таким методом наблюдались пульсары в Крабовидной туманности и в созвездии Парусов. Кроме этих пульсаров, наблюдались и другие, однако, хотя они и давали указания на наличие потоков гамма-квантов, исключить случайный характер выбросов на фазовой гистограмме полностью не удавалось.

На первой странице обложки приведены фазовые гистограммы, полученные при наблюдениях для пульсаров PSR 0833—45 (вверху) и NP 0532 (внизу). Стоит, по-видимому, отметить, что и при простом сканировании удается надежно зарегистрировать потоки гамма-квантов.

Слабость потоков (они редко превосходят  $10^{-10}$

$\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ), а также их изменчивость приводят к тому, что только длительные наблюдения (в течение нескольких лет) какого-либо объекта дают возможность обнаружить поток гамма-квантов. Но самой неприятной помехой является фон заряженных частиц КЛ. Попытки избавиться от него ведутся уже давно, и некоторых успехов здесь добились американские специалисты.

Чтобы понять идею их метода, необходимо более подробно остановиться на различиях в характеристиках черенковских вспышек, образуемых как первичными гамма-квантами, так и КЛ. Ранее уже говорилось о развитии электронно-фотонного ливня, о том, в частности, что пробег взаимодействия гамма-квантов в воздухе равен  $34 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ . Таким образом, получается, что при равной первичной энергии электронно-фотонный ливень развивается быстрее, его максимум находится в атмосфере выше, а ливень от протонов КЛ имеет максимум ниже и проникает глубже в атмосферу. Отсюда и различия в характере распределения света в черенковских вспышках.

Безусловно, расчеты распределения весьма сложны, и вплоть до настоящего времени не проводилось сопоставления деталей характера распределения (как пространственного, так и углового) для черенковских вспышек от электронно-фотонных и ядерных ливней. Чтобы, однако, читатель яснее представил себе некоторые свойства вспышек, на рис. 10 приводятся результаты приближенных расчетов количества света в черенковской вспышке, падающего на Землю, в зависимости от высоты, на которой частицы излучают (при различных расстояниях детектора от оси ливня). Под осью ливня понимается направление движения первичной частицы или гамма-кванта.

Из рис. 10 видно, что если в случае гамма-квантов кривые имеют один максимум на высоте около 7 км, то в случае первичных протонов на малых расстояниях от оси ливня довольно много света попадает на детектор с малых высот — 2—3 км. Именно это различие было использовано в американо-австралийской установке. Она состояла из двух 7-метровых зеркал, раздвинутых на 120 м, в фокусе которых располагались по два фотоумножителя. Одна пара фотоумножителей находилась в фокальной плоскости и регистрировала черенковскую вспышку, генерированную электронами на боль-

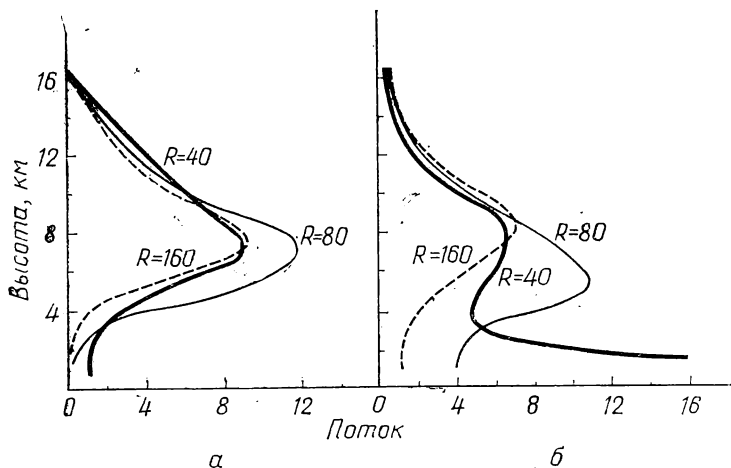


Рис. 10. Изменение потока черенковского света от высоты, на которой находятся испускающие его электроны: а — для гамма-ливней; б — для ливней протонов ( $R$  — расстояние от оси ливня)

ших высотах (6—10 км). Другая пара принимала свет примерно с высоты 3 км.

Очевидно, что импульс света от первичного протона регистрировался во второй паре фотоумножителей с гораздо большей вероятностью, чем вспышка от первичного гамма-кванта. Регистрируя отдельно совпадения в обеих парах фотоумножителей, можно было исключать случаи, когда регистрировались световые вспышки с высоты 3 км. Из рассмотрения исключались 40—50% всех вспышек.

Анализ результатов наблюдений Центавра А показал, что метод, по-видимому, действует. Однако большинство специалистов не считает отсечение половины фона заряженных частиц существенным улучшением. Группа индийских специалистов по гамма-астрономии сверхвысоких энергий провела анализ результатов эксперимента, когда детекторы были распределены по большой площади. Ими было показано, что применение их метода позволяет уточнить направление прихода первичной частицы с точностью до  $0,3^\circ$ . Обычно же детекторы не могут отличать направление прихода точнее  $0,5$ — $1^\circ$ .

Поскольку фон заряженных частиц КЛ изотропен,

то это дает возможность уменьшить его в 4—10 раз, т. е. пропорционально квадрату углового разрешения. При этом число регистрируемых вспышек от направленных гамма-квантов практически не должно измениться. Пока, однако, какие-либо конкретные источники этим методом не наблюдались.

Поиски эффективных методов отбора ливней продолжаются. Предложены методы, которые должны отсеять не менее 90% фона КЛ. Это означает, что резко возрастает эффективность наблюдений. По-видимому, удастся зарегистрировать потоки  $10^{-12}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Объекты, уже известные как источники, можно будет исследовать подробнее, изучить их временные вариации. В настоящее же время изучение вариаций затруднено из-за необходимости длительных наблюдений для получения надежных (с точки зрения статистик) результатов. С уменьшением фона время накопления данных сократится, и можно будет изучать более быстрые вариации.

В Советском Союзе, в Крымской астрофизической обсерватории, ведется строительство гамма-телескопа для регистрации черенковских вспышек широких атмосферных ливней с энергией больше 500 ГэВ. С его помощью будут проводиться исследования с целью выяснения возможности отделения фона заряженных частиц от гамма-квантов. В Великобритании создана система, которая по идее должна получать информацию о направлении первичной частицы с точностью до 0,1°. В этом случае фон заряженных частиц будет снижен до нескольких процентов. Аналогичные работы ведутся в Индии и в США.

Все эти группы исследователей обладают высококвалифицированными кадрами, имеющими большой опыт в гамма-астрономии. Поэтому надо надеяться, что в ближайшие годы произойдет резкое увеличение результативности исследований гамма-излучения сверхвысоких энергий, и это даст возможность существенно продвинуться в решении проблем, связанных с происхождением КЛ.

# НОВОСТИ АСТРОНОМИИ

## ЕЩЕ ОДИН ДВОЙНОЙ КВАЗАР

Сравнительно недавнее обнаружение первого двойного квазара Q 0957+561 было с удовлетворением встречено многими астрономами, посчитавшими, что наконец получено свидетельство в пользу существования групп квазаров, которое подтверждало бы их ассоциацию с ядрами чрезвычайно удаленных галактик. Однако ряд теоретиков (П. Янг и др.) неожиданно выдвинули предположение о том, что двойной квазар Q 0957+561, как и вскоре обнаруженный тройной квазар Q 1115+080, вызваны действием эффекта гравитационной линзы (см.: *Новости астрономии*, 1982, № 2). Этот эффект заключается в том, что в каждом случае кратного квазара наблюдается несколько изображений одного квазара вследствие искривления лучей его света гравитационным полем более близкой к нам галактики. Эта гипотеза сейчас стала весьма популярной, несмотря на то что интенсивные поиски так и не привели к обнаружению галактик, искривляющих лучи света от обоих кратных квазаров. Имеется некоторое рассогласование и с теорией, согласно которой в первом случае должны были бы наблюдаться три изображения квазара, а во втором — пять. Споры продолжались, а между тем появилось сообщение об обнаружении еще одного двойного квазара Q 2345+007. Его выявил Д. Уидман, анализируя пластинки Паломарского обзора неба. Наблюдения, проведенные им вместе с Р. Уейманном, Р. Грином и Т. Хекманом (*Astrophys. J. Letts.*, 1982, т. 255, № 1), позволили определить, что красные смещения обоих компонентов квазара совпадают в пределах ошибок измерений. В отличие от первого двойного квазара интенсивность компонентов Q 2345+007 весьма отличается, что говорит в пользу предположения о гравитационной линзе, предсказывающего такое различие в интенсивностях изображений квазара. Но в то же время опять наблюдается четное число компонентов, что противоречит этому предположению.

## КАКОВЫ ЗВЕЗДЫ В КВАЗАРАХ?

Представление о том, что квазары являются ядрами чрезвычайно далеких галактик, разделяется сейчас большинством ученых. Однако пока не существует непосредственных наблюдательных данных, которые подтвердили бы это предположение, хотя ряд квазаров и окружен туманной оболочкой, напоминающей периферийные части галактик. Недавно появилось сообщение о спектроскопических исследованиях такой оболочки у квазара 3С 48, которые провели Т. А. Боросон и Дж. Б. Оке с помощью 5-метрового телескопа обсерватории Маунт-Паломар (*Nature*, 1982, т. 296, № 5856). Полученные ими спектры излучения оболочки 3С 48 весьма напоминают спектры горячих звезд класса А7 (типичным представителем таких звезд является Альтаир). По мнению ученых, периферийные части галактики, в которую вложен квазар 3С 48, должны состоять из относительно молодых звезд и значительной газовой среды. В этом случае галактика с квазаром 3С 48 должна напоминать спиральные галактики, хотя по своей светимости она сравнима с яр-

чайшими гигантскими эллиптическими галактиками и в 100 раз ярче нашей Галактики. Это противоречие вполне разъяснимо особым типом галактик, активные ядра которых наблюдаются как квазары. Однако вполне возможно, что спектральный класс звезд оболочки ЗС 48 может быть иным вследствие затруднений с учетом света от самого квазара.

## КОМПАЬОН Т ТЕЛЬЦА

Переменная звезда Т Тельца уже давно стала эталоном при изучении процесса звездообразования. «Имя» этой звезды входит в название молодых звездных скоплений — Т-ассоциаций. Согласно бытующим представлениям звезды типа Т Тельца обладают сравнительно малой массой (до 2 масс Солнца) и находятся на стадии превращения в звезду главной последовательности, т. е. в центре которых еще не происходит ядерного горения водорода, но уже синтезируется дейтерий в гелий при аккреции вещества из газопылевой оболочки на звезду. Теория утверждает, что на этой стадии эволюции недр звезд типа Т Тельца подвержены сильному перемешиванию вещества, благодаря чему эти звезды и обладают определенным типом переменности. Оценки указывают на значительную потерю массы этими звездами, вызванную тем, что мощное инфракрасное излучение «сдувает» внешние оболочки в окружающее пространство. Однако существующая теория, основанная во многом на поведении звезд типа Т Тельца, по-видимому, потребует коренного исправления вследствие открытия, сделанного Х. Диком, Т. Симоном и Б. Цукерманом (*Astrophys. J. Letts.*, 1982, т. 255, № 2). Исследуя Т Тельца в инфракрасных лучах, они обнаружили, что звезда является двойной, состоящей, по всей видимости из оптического и инфракрасного компонентов. Ученые исключают возможность истечения вещества из двойной системы под влиянием одного из компонентов (согласно их расчетам, компоненты разделены расстоянием 145 а. е. и обращаются около общего центра масс с периодом около 1000 лет или более). Оба компонента находятся на стадии превращения в звезду главной последовательности, однако в теоретические представления об этой стадии должны быть внесены соответствующие поправки из-за новой оценки массы компонентов Т Тельца и потери ими массы. Во всяком случае, сделанное открытие инициирует более тщательные исследования звезд типа Т Тельца в инфракрасных лучах, поскольку не исключено теперь, что многие из них являются двойными.

## НОВЫЙ ПУЛЬСАР В ОСТАТКЕ СВЕРХНОВОЙ

Современные представления о том, что пульсары представляют собой звездные остатки взрыва Сверхновой звезды, являются вполне устоявшимися и разделяются большинством ученых. И это несмотря на то, что ни теория, ни эксперимент не вполне подтверждают такое предположение. Согласно современной теории эволюции звезд вполне допустима и даже более реальна ситуация, когда при взрыве Сверхновой никакого звездного остатка не образуется. А после открытия пульсаров лишь двое из них оказались связанными с газовыми остатками Сверхновых — Крабовидной туманностью и туманностью Паруса Х. Прошло почти 15 лет, но больше пульсаров

так и не было обнаружено в других остатках Сверхновых. Последнее еще объяснимо тем, что эффект пульсара наблюдаем с Земли только при определенной ориентации магнитного поля нейтронной звезды-пульсара и в том случае, когда остаток Сверхновой достаточно молод. Исследование остатков Сверхновых с помощью рентгеновского телескопа орбитальной обсерватории «Эйнштейн» также привело к удручающему результату: только один пульсар был зарегистрирован в рентгеновских лучах (в Крабовидной туманности), а в остальных остатках не обнаружилось и следа пульсаров. Однако недавно появилось сообщение (*Astrophys. J. Letts.*, 1982, т. 256, № 2), что отождествление рентгеновских источников, обнаруженных этой орбитальной обсерваторией, привело к открытию пульсара в остатке Сверхновой MSH 15—52. Итак, еще один, третий, пульсар в остатке Сверхновой, но в отличие от первых двух он не является радиосточником. Это открытие несколько улучшает статистику пульсаров в остатках Сверхновых и вместе с тем ставит ряд вопросов перед теоретиками, в частности, о том, почему нет радиоизлучения от этого пульсара, хотя теорией допустима обратная ситуация, когда радиопулсар может и не быть рентгеновским источником. Кроме того, оценка возраста рентгеновского пульсара, имеющего период 0,15 с, дает 1600 лет, тогда как возраст туманности MSH 15—52 — около 10 000 лет.

## РАДИОЛОКАЦИЯ КОМЕТЫ ЭНКЕ

До последнего времени была успешно осуществлена радиолокация планет земной группы (Меркурия, Венеры и Марса), Луны и колец Сатурна (эксперимент с радиолокацией Юпитера дал сомнительный результат). Относительно недавно с помощью радиотелескопа Национального управления по авиации и космическим исследованиям США удалась радиолокация астероида Аполлона. И совсем новые достижения радиолокации тел Солнечной системы были сделаны с помощью радиотелескопа в Аресибо. Причем наибольший интерес вызывает успешно проведенная под руководством П. Камонна радиолокация кометы Энке, имеющей период обращения около Солнца 3,33 года и подошедшей к Земле на расстояние 0,33 а. е. в ноябре 1980 г. (*Science*, 1982, т. 216, № 4543). Это первая радиолокация кометы, так как предпринятая в 1974 г. попытка радиолокации кометы Когоутека была неудачной. Поскольку кома и хвост кометы не могли отражать сигнал, то практически радиолокация осуществлялась лишь ядра кометы, размеры которого, согласно полученным данным, не должны превышать 7 км, а скорее всего, составляют около 3 км. В связи с успешной радиолокацией кометы Энке указывается на возможность радиолокации кометы Джакобини—Циннера в октябре 1985 г., когда она подойдет к Земле на расстояние 0,06 а. е., а также еще ранее — знаменитой кометы Галлея. Помимо радиолокации ядра кометы Энке в Аресибо проводилась радиолокация ряда астероидов, в результате чего С. Осоро, Д. Кэмпбелл и И. Шапиро смогли получить данные не только о размерах, форме, вращении астероидов, но и о их поверхностных характеристиках. В частности, исследования показали, что Ирис, Психея и Клота содержат довольно много неметаллического вещества (по крайней мере, вблизи поверхности).

## КОЛЬЦО ЮПИТЕРА

Одним из самых неожиданных открытий, сделанных американским аппаратом «Вояджер-1», стало обнаружение кольца Юпитера — яркой полосы, простирающейся до 58 тыс. км над облаками планеты. Однако еще задолго до этого киевский профессор С. К. Всехсвятский сообщил о наблюдении им кольца Юпитера, правда многие тогда посчитали, что это нельзя было осуществить при наблюдениях с Земли. После же того как приборы «Вояжера-1» зарегистрировали кольцо Юпитера, были предприняты попытки пронаблюдать это явление с Земли и с еще большим разрешением, чем это было доступно аппаратуре «Вояжера-1». Недавно появилось сообщение Т. Дунхэма, Дж. Эллиота, Д. Минка (*Sky and Telescope*, 1982, т. 63, № 1) о результатах их самолетных наблюдений этого кольца при покрытии им звезды SAO 179756. Более длительная экспозиция, чем во время пролета «Вояжера-1» около Юпитера, позволила получить в 30 раз более лучшее разрешение (до 20 км). Никаких деталей кольца в пределах точности измерений не обнаружилось, что свидетельствует о его чрезвычайно однородном составе. По всей видимости, кольцо Юпитера состоит из мельчайших однородных частиц, поступающих в кольцо с внешнего его края или скапливающихся там со временем, а затем медленно опускающихся к планете под действием торможения при обращении около Юпитера.

## КОМЕТА ГАЛЛЕЯ ОБНАРУЖЕНА!

Предстоящее очередное приближение знаменитой кометы к Солнцу, повторяющееся каждые 75 лет, вызывает повышенный интерес у астрономов всего мира. К этому событию разработана обширная международная программа исследований кометы, готовятся к запуску космические аппараты, которым предстоит пройти в непосредственной близости от ядра кометы. Что же касается наблюдателей, то они уже давно пытаются найти на небе приближающуюся к нам комету с помощью крупнейших оптических инструментов. И вот, наконец, появилось сообщение (*Circ. IAU*, 1982, № 3737) о том, что 16 октября 1982 г. Д. Джюит и Э. Даниельсон обнаружили комету Галлея при наблюдениях при помощи 5-метрового телескопа обсерватории Маунт-Паломар. Блеск кометы при этом составлял 24,2 звездной величины, т. е. она была в 500 000 000 раз слабее самых слабых звезд, еще видимых невооруженным глазом. Впервые ядро кометы наблюдалось на столь огромном удалении от Земли: в момент обнаружения ядро кометы Галлея находилось на расстоянии 10,93 а. е. от Земли и 11,04 а. е. от Солнца. Оценки показывают, что ядро кометы Галлея действительно имеет очень малые размеры, составляя около 3 км при альбедо (отражательной способности) 0,5 и несколько больше при меньшем альбедо, которое предполагают для ядер комет.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
Что такое космические лучи? . . . . .	8
Механизмы излучения гамма-квантов и нетеплового радиоизлучения . . . . .	16
Астрофизические явления, сопровождающиеся генерацией КЛ	27
Влияние КЛ на структуру магнитного поля в отдельных объектах и в межзвездном пространстве . . . . .	37
Радиогалактики и квазары — мощные источники КЛ . . . . .	49
Перспективы развития гамма-астрономии сверхвысоких энергий . . . . .	55
НОВОСТИ АСТРОНОМИИ	60

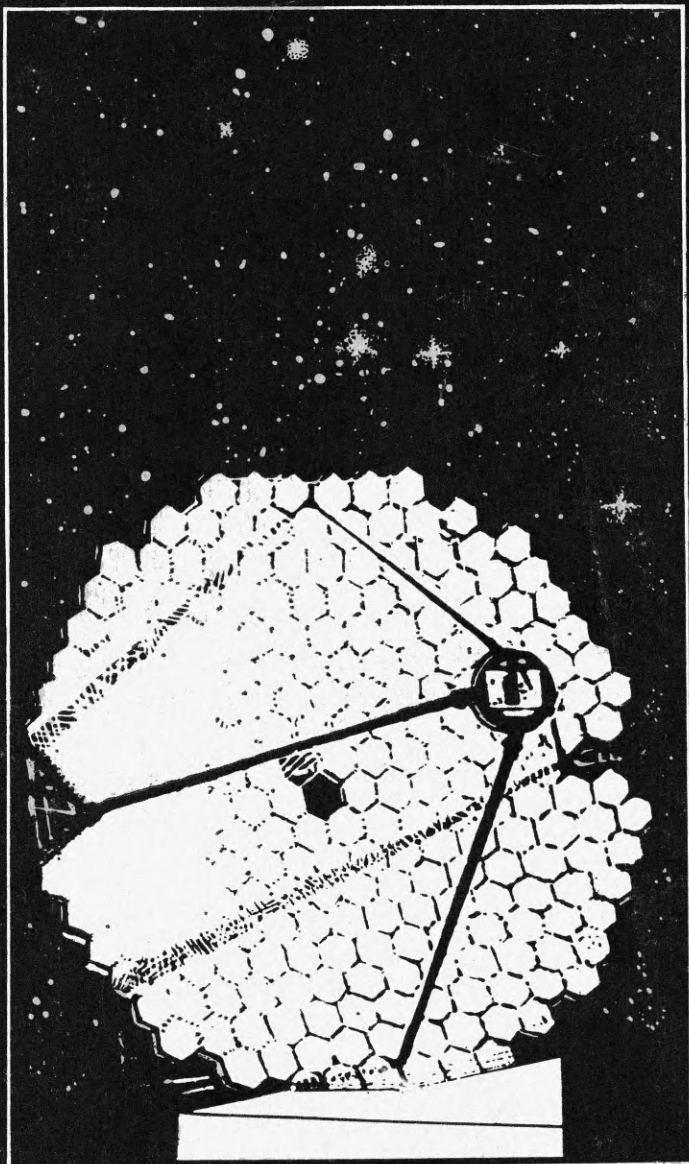
**Арнольд Аргашесович Степанян**

### ГАММА-АСТРОНОМИЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

**Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин. Редактор Е. Ю. Ермаков.**  
**Мл. редактор Г. И. Родкина. Обложка художника Л. П. Ромасенко.**  
**Худож. редактор М. А. Гусева. Техн. редактор Н. В. Лбова. Кор-**  
**ректор Е. И. Альшевская.**

ИБ № 5869

Сдано в набор 14.10.82. Подписано к печати 27.12.82. Т 23708. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,50. Тираж 27 990 экз. Заказ 1904. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 834201. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



СЕРИЯ **КОСМОНАВТИКА,  
АСТРОНОМИЯ**