

ПУЛЬСАРЫ

Еще с начала 30-х годов, как только возникли теоретические представления о нейтронных звездах, ожидалось, что они должны проявить себя как космические источники рентгеновского излучения. Эти ожидания оправдались через 40 лет, когда были обнаружены барстеры и удалось доказать, что их излучение рождается на поверхности горячих нейтронных звезд. Но первыми открытыми нейтронными звездами оказались все же не барстеры, а пульсары, проявившие себя — совершенно неожиданно — как источники коротких импульсов радиоизлучения, следующих друг за другом с поразительно строгой периодичностью.

Открытие

Летом 1967 г. в Кембриджском университете (Англия) вошел в строй новый радиотелескоп, специально построенный Э. Хьюишем и его сотрудниками для одной наблюдательной задачи — изучения мерцаний космических радиоисточников. Это явление подобно известному всем мерцанию звезд и возникает из-за случайных неоднородностей плотности в среде, сквозь которую проходят электромагнитные волны по пути к нам от источника. Новый радиотелескоп позволял производить наблюдения больших участков неба, а аппаратура для обработки сигналов была способна регистрировать уровень радиопотока через каждые несколько десятых долей секунды. Эти две особенности их инструмента и позволили кембриджским радиоастрономам открыть нечто совершенно новое — пульсары.

Первые отчетливо различимые серии периодических импульсов (рис. 17) были замечены 28 ноября 1967 г. аспиранткой кембриджской группы Дж. Белл (ныне Бернелл). Импульсы следовали один за другим с четко выделяемым периодом в 1,34 с. Это было совершенно непохоже на обычную хаотическую картину случайных,

нерегулярных мерцаний. Принимаемые сигналы напоминали скорее помеху земного происхождения — например, от системы зажигания в проезжающих мимо автомобилях. Но это и другие простые объяснения вскоре пришлось оставить. Были исключены и сигналы самолетов или космических аппаратов. Затем, когда появились основания полагать, что импульсы имеют космическое происхождение, возникло предположение о внеземной цивилизации, посылающей на Землю свои сигналы. Предпринимались

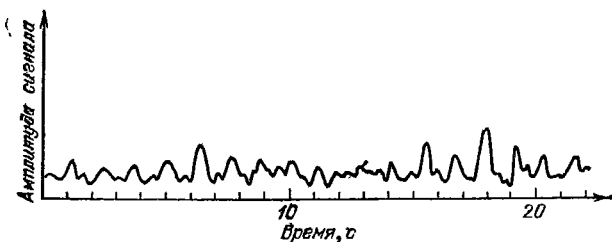


Рис. 17. Одна из первых записей излучения пульсара, сделанная в Кембридже в 1967 г.

серьезные попытки распознать какой-либо код в принимаемых импульсах. Это оказалось невозможным, хотя, как рассказывают, к делу были привлечены самые квалифицированные специалисты. К тому же вскоре обнаружили еще три подобных пульсирующих радиоисточника. Становилось очевидным, что источники излучения являются естественными небесными телами.

Первая публикация кембриджской группы появилась в феврале 1968 г., и уже в ней в качестве вероятных кандидатов на роль источников пульсирующего излучения упоминаются нейтронные звезды. Периодичность радиосигнала связывается с быстрым вращением нейтронной звезды. Источник вращается как фонарь маяка, и это создает прерывистость видимого излучения, приходящего к нам отдельными импульсами.

Открытие пульсаров отмечено Нобелевской премией по физике в 1978 г.

Интерпретация: нейтронные звезды

В астрономии известно немало звезд, блеск которых непрерывно меняется, то возрастая, то падая. Имеются звезды, их называют цефеидами (по первой из

них, обнаруженной в созвездии Цефея), со строго периодическими вариациями блеска. Усиление и ослабление яркости происходит у разных звезд этого класса с периодами от нескольких дней до года. Но до пульсаров никогда еще не встречались звезды со столь коротким периодом, как у первого «кембриджского» пульсара.

Вслед за ним в очень короткое время было открыто несколько десятков пульсаров, и периоды некоторых из них были еще короче. Так, период пульсара, обнаруженного в 1968 г. в центре Крабовидной туманности, составлял 0,033 с. Сейчас известно около четырех сотен пульсаров. Подавляющее их большинство — до 90% — имеет периоды в пределах от 0,3 до 3 с, так что типичным периодом пульсаров можно считать период в 1 с.

Но особенно интересны пульсары-рекордсмены, период которых меньше типичного. Рекорд пульсара Крабовидной туманности продержался почти полтора десятилетия. В конце 1982 г. в созвездии Лисички был обнаружен пульсар с периодом 0,00155 с, т. е. 1,55 мс. Вращение с таким поразительно коротким периодом означает 642 об/с.

Очень короткие периоды пульсаров послужили первым и самым веским аргументом в пользу интерпретации этих объектов, как вращающихся нейтронных звезд.

Звезда со столь быстрым вращением должна быть исключительно плотной. Действительно, само ее существование возможно лишь при условии, что центробежные силы, связанные с вращением, меньше сил тяготения, связывающих вещество звезды. Центробежные силы не могут разорвать звезду, если центробежное ускорение на экваторе $\Omega^2 R$ меньше ускорения силы тяжести GM/R^2 . Здесь M , R — масса и радиус звезды, Ω — угловая частота ее вращения, G — гравитационная постоянная. Из неравенства для ускорений

$$\Omega^2 R < GM/R^2 \quad (3.1)$$

следует неравенство для средней плотности звезды:

$$M/R^3 \approx \rho > \Omega^2/G. \quad (3.2)$$

Если взять период пульсара Крабовидной туманности, $P=0,033$ с, то соответствующая ему частота вращения, $\Omega=2\pi/P$, составит приблизительно 200 рад/с. На этом основании найдем по соотношению (3.2) нижний предел его плотности: $\rho > 6 \cdot 10^{14}$ кг/м³. Это очень значительная

плотность, которая в миллионы раз превышает плотность белых карликов ($\sim 10^9$ кг/м³) — самых плотных из наблюдавшихся до того звезд. Оценка плотности по периоду «миллисекундного» пульсара, $P=0,00155$ с, $\Omega \approx 4000$ рад/с, приводит к еще большему значению: $\rho > 2 \cdot 10^{17}$ кг/м³. Эта плотность приближается к плотности вещества внутри атомных ядер ($\sim 10^{18}$ кг/м³). Столь компактными, сжатыми до такой высокой степени могут быть лишь нейтронные звезды: их плотность действительно близка к ядерной.

Этот вывод подтверждается всей пятнадцатилетней историей изучения пульсаров.

Но каково происхождение быстрого вращения нейтронных звезд-пульсаров? Оно несомненно вызвано сильным сжатием звезды при ее превращении из «обычной» звезды в нейтронную.

Звезды всегда обладают вращением с той или иной скоростью или периодом. Солнце, например, вращается вокруг своей оси с периодом около месяца. Когда звезда сжимается, ее вращение убыстряется. С ней происходит то же, что с танцором на льду: прижимая к себе руки, танцор ускоряет свое вращение.

Здесь действует один из основных законов механики — закон сохранения момента импульса (или момента количества движения). Из него следует, что при изменении размеров вращающегося тела изменяется и скорость его вращения; но остается неизменным произведение $M\Omega R^2$ (которое и представляет собой — с точностью до несущественного числового множителя — момент импульса). В этом произведении Ω — частота вращения тела, M — его масса, R — размер тела в направлении, перпендикулярном оси вращения, который в случае сферической звезды совпадает с ее радиусом. При неизменной массе остается постоянным произведение ΩR^2 , и, значит, с уменьшением размера тела частота его вращения возрастает по закону

$$\Omega \propto R^{-2}. \quad (3.3)$$

Нейтронная звезда образуется путем сжатия центральной области, ядра звезды, исчерпавшей запасы ядерного топлива. Ядро успевает еще предварительно сжаться до размеров белого карлика, $R \approx 10^7$ м. Дальнейшее сжатие до размера нейтронной звезды, $R \approx 10^4$ м, означает уменьшение радиуса в тысячу раз. Соответственно в миллион раз должна возрасти частота вращения и во столько же раз должен уменьшиться его период. Вместо, скажем, месяца звезда совершает теперь один оборот вокруг своей

оси всего за три секунды. Более быстрое исходное вращение дает и еще более короткие периоды.

Сейчас известны не только пульсары, излучающие в радиодиапазоне, — их называют радиопульсарами, но и рентгеновские пульсары, излучающие регулярные импульсы рентгеновских лучей. Они тоже оказались нейтронными звездами; в их физике много такого, что роднит их с барстерами. Но и радиопульсары, и рентгеновские пульсары отличаются от барстеров в одном принципиальном отношении: они обладают очень сильными магнитными полями. Именно магнитные поля — вместе с быстрым вращением — и создают эффект пульсаций, хотя и действуют эти поля по-разному в радиопульсарах и пульсарах рентгеновских.

Мы расскажем сначала о рентгеновских пульсарах, механизм излучения которых более или менее ясен, а затем о радиопульсарах, которые изучены пока в гораздо меньшей степени, хотя они и открыты раньше рентгеновских пульсаров и барстеров.

Рентгеновские пульсары

Рентгеновские пульсары — это тесные двойные системы, в которых одна из звезд является нейтронной, а другая — яркой звездой-гигантом. Известно около двух десятков этих объектов. Первые два рентгеновских пульсара — в созвездии Геркулеса и в созвездии Центавра — открыты в 1972 г. (за три года до обнаружения барстеров) с помощью американского исследовательского спутника «Ухуру»^{*}). Пульсар в Геркулесе посылает импульсы с периодом 1,24 с. Это период вращения нейтронной звезды. В системе имеется еще один период — нейтронная звезда и ее компаньон совершают обращение вокруг их общего центра тяжести с периодом 1,7 дня. Орбитальный период был определен в этом случае благодаря тому (случайному) обстоятельству, что «обычная» звезда при своем орбитальном движении регулярно оказывается па луче зрения, соединяющем нас и нейтронную звезду, и потому она заслоняет на время рентгеновский источник. Это возможно, очевидно, тогда, когда плоскость звездных орбит составляет лишь небольшой угол с лучом зрения. Рентгеновское излучение прекращается прибли-

^{*}) Спутник запущен с побережья Кении, и на языке суахили «ухуру» значит «свобода».

зительно на 6 часов, потом снова появляется, и так каждые 1,7 дня.

(Между прочим, наблюдение рентгеновских затмений для барстеров до последнего времени не удавалось. И это было странно: если орбиты двойных систем ориентированы в пространстве хаотически, то нужно ожидать, что из более чем трех десятков барстеров по крайней мере несколько имеют плоскости орбитального движения, приблизительно параллельные лучу зрения (как у пульсара

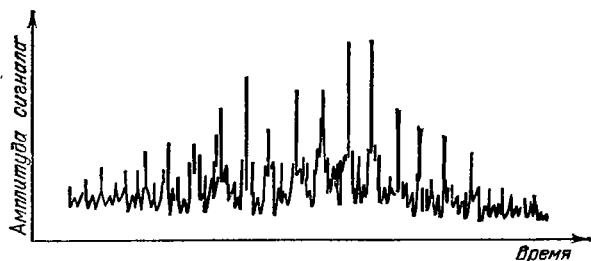


Рис. 18. Импульсы излучения от рентгеновского пульсара в созвездии Центавра. Постепенный рост, а затем падение амплитуды импульсов отражают изменение ориентации источника и приемника; сначала источник входит в поле зрения рентгеновского телескопа, а потом уходит из него; регистрируемый сигнал сильнее всего, когда источник находится в направлении оси телескопа.

в Геркулесе), чтобы обычная звезда могла периодически закрывать от нас нейтронную звезду. Только в 1982 г., т. е. через 7 лет после открытия барстеров, один пример затмненного барстера был, наконец, обнаружен.)

Длительные наблюдения позволили установить еще один — третий — период рентгеновского пульсара в Геркулесе: этот период составляет 35 дней, из которых 11 дней источник светит, а 24 дня нет. Причина этого явления остается пока неизвестной.

Пульсар в созвездии Центавра имеет период пульсаций 4,8 с (рис. 18). Период орбитального движения составляет 2,087 дня — он тоже найден по рентгеновским затмениям. Долгопериодических изменений, подобных 35-дневному периоду пульсара в созвездии Геркулеса, у этого пульсара не находят.

Компаньоном нейтронной звезды в двойной системе этого пульсара является яркая видимая звезда-гигант с массой (10–20) M_{\odot} .

В большинстве случаев компаньоном нейтронной звезды в рентгеновских пульсарах является яркая голубая звезда-гигант. Этим они отличаются от барстеров, которые содержат слабые звезды-карлики. Но как и в барстерах, в этих системах возможно перетекание вещества от обычной звезды к нейтронной звезде, и их излучение тоже возникает благодаря нагреву поверхности нейтронной звезды потоком аккрецируемого вещества. Это тот же

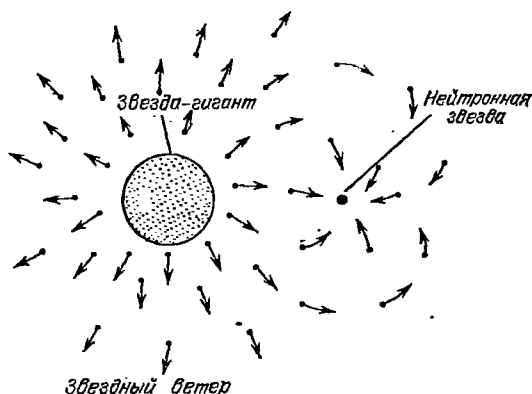


Рис. 19. Звездный ветер и аккреция в рентгеновском пульсаре.

физический механизм излучения, что и в случае фонового (не вспышечного) излучения барстера.

У некоторых из рентгеновских пульсаров вещество перетекает к нейтронной звезде в виде струи (как в барстерах — см. рис. 15). В большинстве же случаев звезда-гигант теряет вещество в виде звездного ветра — исходящего от ее поверхности во все стороны потока плазмы, ионизованного газа. (Явление такого рода наблюдается и у Солнца, хотя солнечный ветер и слабее — Солнце не гигант, а карлик.) Часть плазмы звездного ветра попадает в окрестности нейтронной звезды, в зону преобладания ее тяготения, т. е. в полость Роша нейтронной звезды, где и захватывается ее полем тяготения (рис. 19).

Однако при приближении к поверхности нейтронной звезды заряженные частицы плазмы начинают испытывать воздействие еще одного силового поля — магнитного поля нейтронной звезды-пульсара. Магнитное поле способно перестроить аккреционный поток, сделать его не сферически-симметричным, а направленным. Как мы сей-

час увидим, из-за этого и возникает эффект пульсаций излучения, эффект маяка.

Есть все основания полагать, что нейтронные звезды рентгеновских пульсаров обладают очень сильным магнитным полем, достигающим значений магнитной индукции 10^8 — 10^9 Тл, что в 10^{12} — 10^{13} раз больше среднего магнитного поля Солнца. Но такие поля естественно получаются в результате сильного сжатия при превращении обычной звезды в нейтронную. Согласно общим соотношениям электродинамики магнитная индукция B поля, силовые линии которого пронизывают данную массу вещества, усиливается при уменьшении геометрических размеров R этой массы:

$$B \propto R^{-2}. \quad (3.4)$$

Это соотношение следует из закона сохранения магнитного потока. Стоит обратить внимание на то, что магнитная индукция нарастает при сжатии тела точно так же, как и его частота вращения Ω .

При уменьшении радиуса звезды от значения, равного, например, радиусу Солнца, $R_0 \approx 10^9$ м, до радиуса нейтронной звезды, $R \approx 10^4$ м, магнитное поле усиливается на 10 порядков. Магнитное поле с индукцией $B \approx 10^8$ Тл, сравнимое с полем Солнца, считается более или менее типичным для обычных звезд; у некоторых «магнитных» звезд обнаружены поля в несколько тысяч раз большие, так что вполне можно ожидать, что определенная (и не слишком малая) доля нейтронных звезд действительно должна обладать очень сильным магнитным полем.

К такому заключению пришел советский астрофизик Н. С. Кардашев еще в 1964 г.

По своей структуре, т. е. по геометрии силовых линий, магнитное поле пульсара похоже, как можно ожидать, на магнитное поле Земли или Солнца (рис. 20): у него имеются два полюса, из которых в разные стороны расходятся силовые линии. Такое поле называют дипольным.

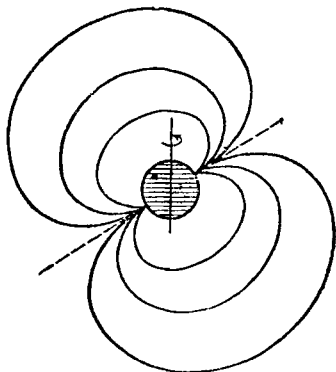


Рис. 20. Вращающаяся нейтронная звезда с дипольным магнитным полем, ось которого наклонена к оси вращения.

Вещество, аккрецируемое нейтронной звездой,— это звездный ветер, оно ионизовано, и поэтому взаимодействует при своем движении с ее магнитным полем. Известно, что движение заряженных частиц поперек силовых линий поля затруднено, а движение вдоль силовых линий происходит беспрепятственно. По этой причине аккрецируемое вещество движется вблизи нейтронной звезды практически по силовым линиям ее магнитного поля. Магнитное поле нейтронной звезды как бы создает воронки у ее магнитных полюсов, и в них направляется аккреционный поток. На такую возможность указали еще в 1970 г. советские астрофизики Г. С. Бисноватый-Коган и А. М. Фридман. Благодаря этому нагрев поверхности нейтронной звезды оказывается неравномерным: у полюсов температура значительно выше, чем на всей остальной поверхности.

Горячие пятна у полюсов имеют, согласно расчетам, площадь около одного квадратного километра; они и создают главным образом излучение звезды — ведь светимость очень чувствительна к температуре — она пропорциональна температуре в четвертой степени.

Как и у Земли, магнитная ось нейтронной звезды наклонена к ее оси вращения. Из-за этого возникает эффект маяка: яркое пятно то видно, то не видно наблюдателю. Излучение быстро вращающейся нейтронной звезды представляется наблюдателю прерывистым, пульсирующим. Этот эффект был предсказан теоретически советским астрофизиком В. Ф. Шварцманом за несколько лет до открытия рентгеновских пульсаров. На самом деле излучение горячего пятна происходит, конечно, непрерывно, но оно не равномерно по направлениям, не изотропно, и рентгеновские лучи от него не направлены все время на нас, их пучок вращается в пространстве вокруг оси вращения нейтронной звезды, пробегая по Земле один раз за период.

От рентгеновских пульсаров никогда не наблюдали вспышек, подобных вспышкам барстеров. С другой стороны, от барстеров никогда не наблюдали регулярных пульсаций. Почему же барстеры не пульсируют, а пульсары не вспыхивают?

Все дело, вероятно, в том, что магнитное поле нейтронных звезд в барстерах заметно слабее, чем в пульсарах, и потому оно не влияет сколько-нибудь заметно на динамику аккреции, допуская более или менее равномерный прогрев всей поверхности нейтронной звезды. Ее враще-

ние, которое может быть столь же быстрым, как и у пульсаров, не сказывается на рентгеновском потоке, так как этот поток изотропен.

С другой стороны, предполагают, что поле с магнитной индукцией $B \approx 10^8$ Гл способно как-то — хотя, правда, и не вполне ясно пока, как именно, — подавлять термоядерные взрывы в приполярных зонах нейтронных звезд.

Различие в магнитном поле связано, вероятно, с различием возраста барстеров и пульсаров. О возрасте двойной системы можно судить по обычной звезде-компаньону. Нейтронные звезды в рентгеновских пульсарах имеют компаньонами яркие звезды-гиганты; в барстерах же компаньонами нейтронных звезд являются слабые по блеску звезды малых масс. Возраст ярких гигантов не превышает нескольких десятков миллионов лет, тогда как возраст слабых звезд-карликов может насчитывать миллиарды лет: первые гораздо быстрее расходуют свое ядерное тепло, чем вторые. Отсюда следует, что барстеры — это старые системы, в которых магнитное поле успело со временем в какой-то степени ослабнуть, а пульсары — это относительно молодые системы и потому магнитные поля в них сильнее. Может быть, барстеры когда-то в прошлом пульсировали, а пульсарам еще предстоит вспыхивать в будущем.

Известно, что самые молодые и яркие звезды Галактики находятся в ее диске, вблизи галактической плоскости. Естественно поэтому ожидать, что и рентгеновские пульсары с их яркими звездами-гигантами располагаются преимущественно у галактической плоскости. Их общее распределение по небесной сфере должно отличаться от распределения барстеров, старых объектов, которые — как и все старые звезды Галактики — концентрируются не к ее плоскости, а к галактическому центру. Наблюдения подтверждают эти соображения: рентгеновские пульсары действительно находятся в диске Галактики, в сравнительно узком слое по обе стороны галактической плоскости.

Такое же распределение на небе обнаруживают и пульсары, излучающие радиоимпульсы, — радиопульсары.

Радиопульсары

Распределение радиопульсаров на небесной сфере (рис. 21) позволяет заключить прежде всего, что эти источники принадлежат нашей Галактике: они очевидным образом концентрируются к ее плоскости, служа-

щей экватором галактической координатной сетки. Объекты, которые никак не связаны с Галактикой, никогда не показали бы никакой преимущественной ориентации такого рода. Распределение по направлениям говорит в этом случае о реальном пространственном расположении источников: такая картина, как на рис. 21, может возникнуть лишь тогда, когда источники находятся в диске Галактики. Некоторые из них лежат заметно выше или ниже экватора; но они тоже расположены в диске, около

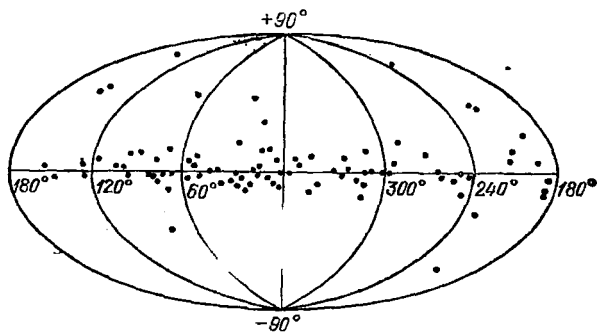


Рис. 21. Распределение пульсаров на небесной сфере (в галактических координатах). В отличие от барстеров (рис. 12), пульсары концентрируются не к центру галактики, а к ее плоскости.

плоскости Галактики, только ближе к нам, чем большинство остальных пульсаров. Ведь вместе с Солнцем мы находимся почти точно в галактической плоскости, и потому направление от нас на близкие объекты внутри хотя бы и узкого слоя может быть, вообще говоря, любым. Близких пульсаров сравнительно мало и они не затемняют общую картину.

Если радиопульсары располагаются вблизи галактической плоскости, среди самых молодых звезд Галактики, то разумно полагать, что и сами они являются молодыми. Об одном из них, пульсаре Крабовидной туманности, определенно известно, что он существует всего около тысячи лет — это остаток вспышки сверхновой 1054 года; его возраст значительно меньше времени жизни ярких звезд-гигантов, ~10 миллионов лет, не говоря уже о звездах-карликах, средний возраст которых еще в 1000 раз больше.

Строгая периодичность следования импульсов, расположение в плоскости Галактики и молодость — все это сближает радиопульсары с рентгеновскими пульсарами. Но во многих других отношениях они резко отличаются друг от друга.

Дело не только в том, что одни испускают радиоволны, а другие — рентгеновские лучи. Важнее всего то, что радиопульсары — это одиночные, а не двойные звезды. Известно всего три радиопульсара, имеющих звезду-компаньона. У всех остальных, а их более трехсот пятидесяти, никаких признаков двойственности не замечается. Отсюда немедленно следует, что физика радиопульсаров должна быть совсем иной, чем у барстеров или рентгеновских пульсаров. Принципиально иным должен быть источник их энергии — это во всяком случае не аккреция.

Другой важнейший факт: спектр излучения радиопульсаров очень далек от какого-либо подобия универсальному чернотельному спектру, который характерен для излучения нагретых тел. Это означает, что излучение радиопульсаров никак не связано с нагревом нейтронной звезды, с температурой, с тепловыми процессами на ее поверхности.

Излучение электромагнитных волн, не связанное с нагревом тела, называют нетепловым. Такое излучение не редкость в астрофизике, физике и технике. Вот простой пример. Антенна радиостанции или телецентра — это проводник определенного размера и формы. В нем имеются свободные электроны, которые под действием специального генератора совершают согласованные движения вдоль проводника туда и обратно с заданной частотой. Так как электроны колеблются «в унисон», то и излучают они согласованно: все излучаемые в пространство электромагнитные волны имеют одинаковую частоту*) — частоту колебаний электронов. Так что спектр излучения антенны содержит только одну частоту или длину волны.

Сведения о спектре излучения радиопульсаров удалось получить прежде всего благодаря наблюдениям самого яркого из них — пульсара Крабовидной туманности. Замечательно, что его излучение регистрируется во всех диапазонах электромагнитных волн — от радиоволн до гамма-лучей. Больше всего энергии он испускает именно в области гамма-лучей (так что пульсар вполне заслужи-

*) Одинакова и их фаза: максимумы и минимумы всех волн совпадают.

вает названия гамма-пульсара); принимаемый гамма-поток $\sim 10^{-11}$ Вт/м². В рентгеновской области поток в 5—10 раз меньше: $\sim 10^{-12}$ Вт/м². В области видимого света он еще в десять раз меньше: $\sim 10^{-13}$ Вт/м². Слабее всего поток в радиодиапазоне: $\sim 10^{-20}$ Вт/м². Можно проверить, что ни при какой температуре излучение нагретого тела не может обладать таким распределением энергии по областям спектра.

Кроме пульсара Крабовидной туманности, «миллисекундного» пульсара в созвездии Лисички и еще одного пульсара в созвездии Парусов, все остальные радиопульсары регистрируются лишь благодаря излучению в радиодиапазоне. Не исключено, что они излучают и в других областях спектра — в видимом свете, в рентгеновских и гамма-лучах, подобно пульсару Крабовидной туманности (хотя, вероятно, и не так интенсивно, как он); но они находятся дальше от нас, а чувствительность существующих радиотелескопов выше чувствительности оптических, рентгеновских и гамма-телескопов.

Интересно, что, уже и одних только данных о светимости пульсаров в радиодиапазоне — без каких-либо сведений об излучении на более коротких длинах волн — достаточно, чтобы убедиться в нетепловом, нечернотельном характере их излучения.

Расстояние до Крабовидной туманности известно: $d=2$ кпк $=6 \cdot 10^{19}$ м, поэтому с помощью данных о потоке излучения можно найти светимость пульсара. Полная светимость во всех диапазонах получается умножением полного потока на площадь сферы радиуса d : $L=f \cdot 4\pi d^2 \approx 3 \cdot 10^{29}$ Вт. (В качестве потока f взят фактически поток в гамма-диапазоне.) Светимость этого пульсара приблизительно в тысячу раз больше светимости Солнца на всех длинах волн.

Здесь, однако нужно сделать одно замечание. Наша оценка была бы вполне справедлива, если бы пульсар излучал одинаково во всех направлениях. На самом деле его излучение не изотропно, оно обладает определенной направленностью. Мы не знаем, как выглядит луч этого «маяка»: какова его ширина и как ось вращения пульсара ориентирована относительно Земли. Поэтому учесть направленность излучения точно не удастся. Действительная светимость может быть, вообще говоря, и больше, и меньше, чем $3 \cdot 10^{29}$ Вт. Неопределенность все же не катастрофически велика; скорее всего, она вносит в полученное значение множитель, лежащий в пределах от

10^{-2} до 10, так что значение светимости находится, вероятно, между $3 \cdot 10^{27}$ и $3 \cdot 10^{30}$ Вт.

Светимость среднего пульсара в радиодиапазоне оценивается — с той же неопределенностью — значением $\sim 10^{19} - 10^{22}$ Вт.

Источник энергии

Периодичность импульсов радиопулсара выдерживается с удивительной точностью. Это самые точные часы в природе. И все же для многих пульсаров удалось зарегистрировать и регулярные изменения их периодов. Конечно, это исключительно малые изменения и происходят они крайне медленно, так что регулярность следования импульсов нарушается лишь очень слабо. Характерное время изменения периода составляет для большинства пульсаров приблизительно миллион лет; это означает, что только за миллион лет можно ожидать заметного — скажем, вдвое — изменения периода.

Во всех известных случаях радиопулсары увеличивают, а не уменьшают свой период. Иными словами, их вращение замедляется со временем. Что-то тормозит вращение нейтронной звезды, на что-то тратится ее энергия вращения. Так не служит ли вращение источником, питающим излучение пульсара?

Чтобы это проверить, нужно сделать прежде всего энергетическую оценку. Если пульсар действительно излучает за счет вращения, то кинетическая энергия вращения должна обеспечивать наблюдаемую мощность излучения, его светимость. Ориентировочную оценку кинетической энергии вращения звезды можно получить по простой формуле $E = \frac{1}{2} M v^2$, где M — масса звезды, v — характерная скорость вращения, в качестве которой можно взять линейную скорость вращения на экваторе звезды: $v = 2\pi R/P$. При типичном периоде $P = 1$ с и радиусе нейтронной звезды $R = 10^4$ м находим $E = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} M (2\pi R/P)^2 \approx 3 \cdot 10^{39}$ Дж. Таков запас энергии вращения. Оценим теперь темп ее использования.

Если период пульсара увеличивается вдвое за время τ , то за то же время кинетическая энергия вращения нейтронной звезды уменьшается в 4 раза (так как $E \propto v^2 \propto P^{-2}$). Значит, за время τ теряется $\frac{3}{4}$ начального запаса энергии вращения. Средняя потеря энергии в единицу времени

$$W = E - \frac{1}{4} E / \tau \approx \frac{3}{4} E / \tau \approx 10^{26} \text{ Вт.} \quad (3.5)$$

Мы приняли здесь в качестве τ характерное время, равное одному миллиону лет ($3 \cdot 10^{13}$ с), и воспользовались предыдущей оценкой энергии вращения E . Величина W — средняя мощность, связанная с расходом энергии вращения, что для типичного пульсара на несколько порядков выше его радиосветимости ($\sim 10^{19} - 10^{22}$ Вт).

Для пульсара Крабовидной туманности, период которого составляет одну тридцатую секунды, оценку нужно сделать отдельно. У него и характерное время увеличения периода не миллион лет; как показывают наблюдения, оно сравнимо с его возрастом, т. е. близко к тысяче лет. В этом случае мощность W окажется в миллион раз больше, чем по соотношению (3.5); она превышает на несколько порядков полную светимость этого пульсара во всех диапазонах волн.

Можно, таким образом, сказать, что предположение о вращении как источнике энергии пульсара выдерживает первую проверку: кинетическая энергия вращения нейтронной звезды достаточно велика и она способна служить резервуаром, из которого излучение черпает свою энергию. При этом на излучение тратится только небольшая доля общего расхода энергии.

Магнитно-дипольное излучение

Каким же образом энергия вращения преобразуется в энергию электромагнитных волн? Согласно идее, выдвинутой итальянским астрофизиком Ф. Пачини и английским теоретиком Т. Голдом, решающая роль в этом должна принадлежать магнитному полю нейтронной звезды. Как мы уже говорили, нейтронная звезда может обладать очень значительным магнитным полем. Скорее всего, поле имеет дипольный характер, а его ось наклонена к оси вращения нейтронной звезды, как и у рентгеновского пульсара (рис. 20).

Система силовых линий магнитного поля вращается с той угловой скоростью, с какой вращается сама нейтронная звезда. Соответствующая линейная скорость вращения возрастает пропорционально увеличению расстояния от оси вращения. Но на достаточном удалении от оси линейная скорость приближается к скорости света. Линейная скорость вращения силовых линий поля будет равна скорости света на расстоянии от оси, равном

$$R_c = \frac{1}{2\pi} cP. \quad (3.6)$$

(P — период вращения нейтронной звезды.) Величину R_c называют радиусом светового цилиндра. При типичном периоде $P=1$ с, $R_c=5 \cdot 10^7$ м. Для пульсара Крабовидной туманности $R_c=2 \cdot 10^8$ м. Для самого быстрого «миллисекундного» пульсара $R_c=7 \cdot 10^4$ м, что всего в несколько раз превышает радиус нейтронной звезды.

Вне светового цилиндра магнитное поле вращающегося наклонного диполя уже не может оставаться тем же, что и внутри его. На световом цилиндре происходит превращение дипольного магнитного поля в электромагнитные волны, которые распространяются вовне, унося с собой определенную энергию. Эта энергия черпается из энергии вращения нейтронной звезды.

Такого рода магнитно-дипольное излучение давно изучено в электродинамике. Известно, что частота излученных волн равна частоте вращения магнитного диполя, длина волны равна радиусу светового цилиндра. Излучение волн тем интенсивнее, чем больше угол θ между осью вращения и магнитной осью; при $\theta=0$, т. е. при параллельности этих осей, излучение отсутствует. Энергия, уносимая волнами в единицу времени, или мощность магнитно-дипольного излучения, дается соотношением

$$W_B = \frac{2\pi}{3c^2} \Omega^4 \frac{B^2}{\mu_0} R^6 \sin^2 \theta. \quad (3.7)$$

Здесь c — скорость света в вакууме, $\mu_0=1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная, Ω , R — угловая частота и радиус нейтронной звезды, B — магнитная индукция у ее полюсов.

Каково должно быть магнитное поле нейтронной звезды, чтобы мощность магнитно-дипольного излучения W_B соответствовала потере энергии вращения при торможении W ? Эти величины совпадают, если (при $P=1$ с, $R=10^4$ м, $\sin \theta \sim 1$) магнитная индукция $B \approx 3 \cdot 10^8$ Тл. Такие поля действительно могут возникать из-за сильного сжатия вещества в ходе формирования нейтронной звезды (см. выше).

Итак, вращающаяся нейтронная звезда с наклонным магнитным полем способна излучать электромагнитные волны. При этом энергия ее вращения преобразуется в энергию излучения.

Но магнитно-дипольные волны — это отнюдь не то излучение, которое наблюдают у пульсаров: его частота слишком мала, а длина волны слишком велика — десятки и сотни километров. Магнитно-дипольные волны должны

претерпеть какие-то очень существенные превращения, прежде чем возникнет наблюдаемое излучение пульсаров. Эти превращения происходят, по-видимому, в магнитосфере пульсара — в окружающем нейтронную звезду вращающемся облаке заряженных частиц.

Магнитосфера

Возможность и даже необходимость существования такого облака доказали американские астрофизики-теоретики П. Голдрайх и В. Джулиан. Они изучили электромагнитные явления, происходящие не на световом цилиндре, где рождается магнитно-дипольное излучение, а вблизи самой поверхности нейтронной звезды. Здесь намагниченная нейтронная звезда способна «работать» подобно динамомашине: ее вращение вызывает появление сильных электрических полей, а с ними и токов, т. е. направленных движений заряженных частиц.

Оценку напряженности электрического поля такого происхождения можно получить по формуле:

$$\mathcal{E} \approx \frac{v}{c} B, \quad (3.8)$$

где B — магнитная индукция, v — линейная скорость вращения нейтронной звезды у ее экватора.

На заряженную частицу с электрическим зарядом электрона e у поверхности нейтронной звезды это поле действует с силой $e\mathcal{E}$. Отношение электрической силы к силе тяжести, испытываемой электроном, очень велико:

$$e \frac{v}{c} B / \frac{GMm_e}{R^2} \sim 10^{12} \quad (3.9)$$

(при $v = \Omega R \approx 10^5$ м/с, $B \approx 3 \cdot 10^8$ Тл, $M \approx M_\odot$, $R \approx 10^4$ м). Такая же оценка для протона показывает, что действующая на него электрическая сила в миллиард раз больше силы притяжения к нейтронной звезде.

Это означает, что силы тяготения совершенно несущественны для заряженных частиц по сравнению с электрическими силами у самой поверхности нейтронной звезды. Электрические силы здесь необычайно велики и они способны беспрепятственно управлять движением электронов и протонов: они могут отрывать их от поверхности нейтронной звезды, ускорять их, сообщая частицам огромные энергии.

Электрическая сила $e\mathcal{E}$, действующая в поле \mathcal{E} на частицу с зарядом e , совершает на пути l работу $e\mathcal{E}l$. Эта работа сообщает частице энергию $\epsilon \approx e\mathcal{E}l$. Проходя в электрическом поле расстояние, сравнимое с радиусом нейтронной звезды (например, от экватора до одного из полюсов), частица приобретает энергию $\epsilon \approx e\mathcal{E}R \approx 1 \text{ Дж} \approx 10^{10} \text{ эВ}$ (при тех же, что и выше, значениях v , B и R).

Это действительно огромная энергия, на много порядков превышающая даже энергии покоя электрона ($m_e c^2 \approx 10^{-14} \text{ Дж} \approx 600 \text{ кэВ}$) и протона ($m_p c^2 \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \approx 10^9 \text{ эВ} = 1 \text{ ГэВ}$). Гигантская энергия частиц соответствует их скоростям движения, приближающимся к скорости света, а фактически совпадающим с ней.

Частицы высоких энергий, отрывающиеся от поверхности нейтронной звезды и ускоряемые сильным электрическим полем, создают поток, исходящий от нейтронной звезды и похожий на солнечный или звездный ветер. Магнитное поле увлекает этот поток во вращение вместе с нейтронной звездой. Так вокруг нее возникает расширяющаяся и вращающаяся магнитосфера *).

Рождение и ускорение частиц, образующих магнитосферу, требует значительной энергии, которая черпается из кинетической энергии вращения нейтронной звезды. Теоретический анализ, проделанный П. Голдрайхом и В. Джулианом, показывает, что на это тратится приблизительно столько же энергии, сколько и на магнитно-дипольное излучение. При этом и само магнитно-дипольное излучение пополняет запас энергии магнитосферы: оно практически не выходит наружу и поглощается магнитосферой, передавая свою энергию ее частицам.

Нет сомнения, что именно в магнитосфере нейтронной звезды и разыгрываются многообразные физические процессы, определяющие все наблюдаемые проявления пульсара. Полной и исчерпывающей теории этих процессов пока нет; теория радиопульсаров находится в процессе развития, и даже на главные вопросы она еще не может дать законченного и убедительного ответа.

Нас прежде всего интересует, как возникает направленность в излучении пульсара, создающая этот естественный радиомаяк. Сейчас можно изложить лишь самые

*) Это облако заряженных частиц способно существенно ослаблять (экранировать) электрическое поле, уменьшая величину \mathcal{E} в десятки и сотни раз. Из-за этого должна быть меньше и энергия частиц; но она все равно еще очень велика по сравнению с их энергией покоя.

предварительные соображения, не претендующие на строгую доказательность, но содержащие, тем не менее, ряд важных идей.

Вероятно, нужно исходить из того, что частицы высокой энергии, заполняющие магнитосферу пульсара, способны излучать электромагнитные волны очень высокой частоты, или, на квантовом языке, фотоны очень высокой энергии. Один из физических механизмов излучения связан с движением частиц в сильных магнитных полях. Частицы следуют главным образом вдоль магнитных силовых линий, а так как силовые линии изогнуты, движение частиц не может быть прямолинейным и равномерным. Отклонение же от прямолинейного и равномерного движения означает ускорение (или торможение) частицы и, следовательно, сопровождается излучением электромагнитных волн.

Согласно расчетам электромагнитные волны такого происхождения принадлежат к гамма-диапазону. В свою очередь гамма-фотоны способны рождать (в присутствии сильного магнитного поля) пары электронов и позитронов. Электроны и позитроны также излучают электромагнитные волны при своем движении в магнитном поле, а эти новые волны способны рождать новые пары частиц и т. д.

Такой каскад процессов развивается главным образом вблизи магнитных полюсов нейтронной звезды, где сходятся магнитные силовые линии и поле особенно велико. Здесь формируются, как можно полагать, направленные потоки согласованно движущихся частиц, которые — как в антенне — излучают согласованно и направленно, создавая луч пульсара. Магнитная ось звезды не совпадает с ее осью вращения, и потому этот луч вращается подобно лучу маяка. Но как в действительности это происходит, еще предстоит выяснить.

Основная доля энергии вращения, теряемой нейтронной звездой, преобразуется не в наблюдаемое излучение пульсара, а в энергию частиц, ускоряемых в магнитосфере нейтронной звезды. Радиопульсары являются, таким образом, мощным источником частиц высоких энергий. Электроны высоких энергий, рождаемые пульсаром Крабовидной туманности, непосредственно проявляют себя в свечении туманности. Об этом речь впереди, а здесь стоит сказать несколько слов об эволюции и дальнейшей судьбе радиопульсаров.

С течением времени пульсар теряет свою энергию вращения и магнитную энергию, так что постепенно и часто-

та вращения, и магнитное поле нейтронной звезды убывают. Из-за этого уменьшается электрическое поле у поверхности звезды, снижается эффективность отрыва частиц и их ускорения. Рано или поздно частицы высоких энергий перестанут рождаться и радиоизлучение пульсара прекратится. Если бы радиопулсар составлял пару вместе с обычной звездой, он мог бы тогда превратиться в барстер, излучение которого питается аккреционным потоком, увлекаемым с поверхности звезды-компаньона. Но (за очень редким исключением, как говорилось) радиопулсары — это одиночные нейтронные звезды, а не члены тесных двойных систем. И тем не менее свечение, хотя и довольно слабое, все же может возникать. По мнению советского астрофизика А. И. Цыгана оно может быть обязано аккреции нейтрального межзвездного газа, сквозь который движется потухший радиопулсар. Излучению такого происхождения отвечает светимость $\sim 10^{24}$ Вт, и большая часть испускаемых квантов принадлежит гамма-диапазону. Поиски таких бывших пульсаров, а ныне гамма-звезд — одна из интересных задач гамма-астрономии,

Крабовидная туманность

Как заметил однажды И. С. Шкловский, астрономия состоит из двух частей — это Крабовидная туманность и все остальное. Изучение этого замечательного астрономического феномена оказалось чрезвычайно плодотворным для астрономии и астрофизики. На photographиях она выглядит более или менее округлой размытой массой, на которую накладываются многочисленные протяженные волокна (рис. 9). Расстояние до нее — 2 кпк, радиус — 1 пк.

Туманность увеличивается ежесекундно на тысячу километров. Зная скорость расширения и размер, можно узнать, сколько времени это расширение продолжается: $t \approx R/v \approx 3 \cdot 10^{10}$ с ≈ 1000 лет. Но именно таков возраст сверхновой, зафиксированной в 1054 г. на том же месте китайскими астрономами, которые отразили это событие в древних летописях. Оценка времени расширения послужила в свое время решающим аргументом в пользу понимания Крабовидной туманности как остатка вспышки сверхновой.

Крабовидная туманность излучает электромагнитные волны в непрерывном спектре, изученном сейчас в широ-

ком диапазоне — от метровых радиоволн до гамма-фотонов с энергией 10^{12} эВ. Ее светимость в оптическом диапазоне $\sim 3 \cdot 10^{29}$ Вт. Приблизительно такая же светимость в рентгеновском диапазоне и в тысячу раз меньшая в диапазоне радиоволн. Оценки светимости получены на основании измеренных потоков излучения в соответствующих интервалах частот и в предположении — в данном случае вполне разумном, что излучение туманности происходит более или менее изотропно.

Сопоставление сведений о светимости в различных областях спектра приводит к выводу о нетепловом, нечернотельном характере излучения.

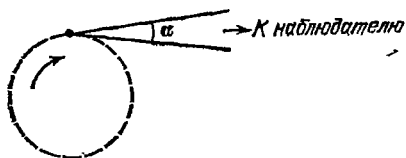


Рис. 22. Направленность излучения электрона высокой энергии, движущегося по кругу в магнитном поле. Излучение концентрируется в узком конусе с углом раствора $\alpha = m_0 c^2 / \epsilon$.

Объяснение природы излучения Крабовидной туманности дано в 1953 г. Тогда имелись лишь сведения о потоках излучения в радиодиапазоне и в оптической области спектра. Опираясь на них, И. С. Шкловский выдвинул

идею о том, что излучение Крабовидной туманности рождается при движении высокоэнергичных электронов в магнитных полях. Магнитные поля могут быть и не очень сильными ($B \approx 10^{-7}$ Тл), но энергия электронов должна значительно превышать их энергию покоя: $\epsilon \gg m_0 c^2$. Процессы излучения такого рода известны по экспериментам на синхротронах — крупных установках для ускорения электронов до больших энергий. В синхротроне электрон движется по круговой орбите под влиянием магнитного поля, перпендикулярного плоскости его орбиты. Так как движение по круговой орбите — это движение с ускорением, электрон непрерывно излучает электромагнитные волны. Такое излучение называют синхротронным.

Синхротронное излучение могут испускать любые заряженные частицы высокой энергии — например, протоны. Но это излучение тем интенсивнее, чем меньше — при той же энергии — масса частицы. Поэтому особая роль в этом процессе принадлежит электронам — самым легким заряженным частицам.

Когда энергия электрона много больше энергии покоя, излучение оказывается крайне анизотропным: он излу-

чает в направлении своего движения, как бы выталкивая фотоны вперед (рис. 22). Наблюдатель, находящийся в плоскости орбиты частицы, видит излучение, когда частица движется прямо на него; он регистрирует один короткий импульс за время оборота частицы по орбите.

Движение заряженной частицы в магнитном поле складывается в общем случае из двух перемещений: из кругового обращения поперек силовых линий поля и поступательного движения вдоль этих линий. Поэтому траекторией частицы является спиральная линия (рис. 23). Радиус орбиты определяется энергией частицы ε и магнитной индукцией поля B :

$$r_B = \varepsilon/eB, \quad \varepsilon \gg mc^2. \quad (3.10)$$

Частота обращения по этой орбите

$$\omega_B = c/r_B. \quad (3.11)$$

Как показали еще в 1945 г. советские физики Л. А. Арцимович и И. Я. Померанчук, в процессе синхротронного излучения каждый электрон испускает целый спектр электромагнитных волн различных частот. Все эти частоты представляют собой обертоны частоты обращения ω_B ,

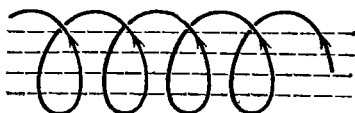
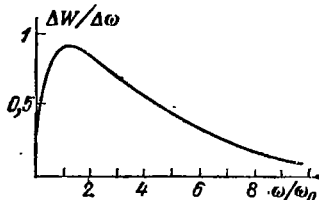


Рис. 23. Движение заряженной частицы в магнитном поле. Штриховые параллельные линии — силовые линии однородного магнитного поля.

Рис. 24. Спектр синхротронного излучения одной частицы. По вертикальной оси — мощность, излучаемая в единичном интервале частот (в относительных единицах).



так что каждая из волн имеет частоту $\omega = \omega_B n$, где n — целые числа. При больших n «частотокол» частот настолько густ, что спектр фактически является непрерывным (рис. 24). Максимум в спектре синхротронного излучения частицы лежит именно на больших частотах вблизи значения частоты

$$\omega_0 = 0,5\omega_B (\varepsilon/mc^2). \quad (3.12)$$

В области максимума спектра, в интервале частот $\Delta\omega$ от $\omega_0 - 1/2\Delta\omega$ до $\omega_0 + 1/2\Delta\omega$, частица излучает с мощностью

$$\Delta W = 0,3 \frac{e^2 B}{mc^2} \Delta\omega. \quad (3.13)$$

Если взять здесь в качестве $\Delta\omega$ величину, сравнимую с частотой ω_0 , то мощность ΔW окажется приблизительно равной полной мощности излучения частицы на всех частотах.

Важной особенностью синхротронного излучения является его поляризация, т. е. определенная ориентация электрического поля волны. Вектор электрического поля в волне перпендикулярен магнитному полю и вектору скорости частицы. Так как мы регистрируем излучение, только когда частица движется прямо на нас, ее орбита видна нам «с ребра» как отрезок прямой линии. Вдоль этой линии и ориентирован электрический вектор волны. О такой ориентации вектора электрического поля говорят как о линейной поляризации.

Поляризация — отличительная особенность синхротронного излучения. Ею не обладает, например, тепловое чернотельное излучение нагретого тела. В тепловых процессах частицы излучают хаотически при случайных столкновениях друг с другом; в таких условиях нет никакого выделенного направления, вдоль которого могло бы ориентироваться поле излучаемой электромагнитной волны. В синхротронном же излучении, даже когда имеется не одна, а много частиц, движущихся вокруг параллельных линий магнитного поля, поляризация сохраняется. «Мигания» излучения отдельных частиц в направлении наблюдателя сливаются в непрерывный поток, но электрические векторы всех волн остаются строго ориентированными.

В 1950 г. шведские физики Х. Альвен и Н. Херлофсон высказали предположение, что синхротронный механизм излучения может действовать в астрономических условиях, когда электроны высоких энергий ($\epsilon \gg m_0c^2$) движутся в космических магнитных полях. Предположение нашло дальнейшее развитие в работах И. С. Шкловского и В. Л. Гинзбурга, давших на этой основе объяснение целому ряду важнейших астрофизических явлений. Крабовидная туманность была одним из первых объектов, природа свечения которых оказалась разгаданной благодаря идее синхротронного излучения. Решающим аргументом стало обнаружение линейной поляризации ее оптического и радиоизлучения.

Излучение Крабовидной туманности складывается из излучения всех имеющихся в ней электронов. Энергии электронов различны, и потому спектр туманности не похож на спектр одной частицы; он образуется путем сложения спектров отдельных электронов, каждый из

которых вносит вклад в соответствии со своей энергией (рис. 25). Как видно из соотношения (3.13), чем больше энергия электрона, тем выше частоты, на которых он главным образом излучает.

Принимая вслед за И. С. Шкловским, что магнитное поле туманности характеризуется индукцией $B \approx 10^{-7}$ Тл, можно найти, что излучение в метровом диапазоне радиоволн создается в основном электронами с энергией $\epsilon \approx 10^{-10}$ Дж $\approx 10^9$ эВ. Действительно, метровому диапазону

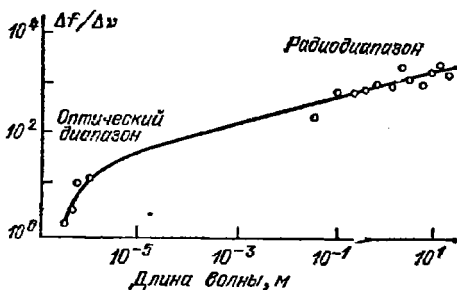


Рис. 25. Спектр Крабовидной туманности (по И. С. Шкловскому, 1953 г.). Точки — наблюдательные данные. По вертикальной оси — поток, приходящий на единичный интервал циклических частот (в единицах 10^{-26} Вт/(м²·Гц)). Циклическая частота ν связана с угловой частотой ω соотношением $\omega = 2\pi\nu$. Циклическая частота измеряется в герцах (Гц). По обеим осям логарифмическая шкала.

отвечает (угловая) частота электромагнитных волн $\omega \approx 10^{10}$ рад/с. Эта частота совпадает с частотой максимального излучения ω_0 , если (при $B \approx 10^{-7}$ Тл) энергия E имеет указанное значение.

Далее, из формулы (3.13) легко установить, что каждый электрон с энергией $\epsilon \approx 10^{-10}$ Дж $\approx 10^9$ эВ излучает в радиодиапазоне с мощностью $\Delta W \approx 10^{-23}$ Вт (принимая для оценки, что $\Delta\omega \approx \omega_0$).

Наблюдаемая светимость Крабовидной туманности в этом диапазоне составляет приблизительно $3 \cdot 10^{26}$ Вт. Деля последнюю величину на мощность излучения одного электрона, находим полное число электронов данной энергии во всем объеме туманности: $\sim 3 \cdot 10^{48}$. Их суммарная энергия $\sim 3 \cdot 10^{38}$ Дж.

Точно так же нетрудно оценить характерную энергию электронов, создающих излучение в других областях спектра туманности, подсчитать их число и полную со-

Таблица 2

Диапазон излучения	Светимость туманности, Вт	Энергия электрона, эВ	Мощность излучения электрона, Вт	Число электронов данной энергии	Полная энергия электронов, Дж
Радиоволны	$3 \cdot 10^{26}$	10^9	10^{-22}	$3 \cdot 10^{48}$	$3 \cdot 10^{38}$
Видимый свет	$3 \cdot 10^{29}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{-18}$	10^{47}	10^{40}
Рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{29}$	$2 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{-14}$	10^{43}	$2 \cdot 10^{37}$

держась в них энергию. Эти числа приведены в табл. 2. (Нужно только учесть, что часть фотонов синхротронного излучения может при определенных условиях испытать поглощение в самой туманности и не выйти из нее. Поэтому приведенные в таблице оценки числа частиц и их энергии являются минимальными.)

Посмотрим, о чем говорят нам сведения табл. 2. Как видно из последнего столбца, больше всего энергии содержится в электронах с энергией $\epsilon \approx 3 \cdot 10^{11}$ эВ, создающих оптическое, видимое глазом излучение. Ими фактически определяется полная энергия всех частиц туманности $\sim 10^{40}$ Дж. По числу же преобладают электроны меньших энергий, создающие радиоизлучение туманности.

Данные о числе частиц различных энергий позволяют составить представление об энергетическом спектре электронов, т. е. об их распределении по энергиям. Распределение принято описывать отношением $\Delta N / \Delta \epsilon$, где ΔN — число частиц с энергией между ϵ и $\epsilon + \Delta \epsilon$. Четвертый столбец таблицы дает нам величину ΔN для трех значений энергии (причем принято, что $\Delta \epsilon \sim \epsilon$). Зависимость отношения $\Delta N / \Delta \epsilon$ от энергии ϵ на основании этих данных можно описать приближенной формулой:

$$\Delta N / \Delta \epsilon \propto \epsilon^{-\alpha}, \quad (3.14)$$

где значение показателя α заключено в пределах между 2 и 3. Это, конечно, довольно грубая степенная аппроксимация, но она правильно отражает качественный характер энергетического распределения электронов: их спектр является падающим, т. е. число частиц убывает с ростом энергии.

Таблица позволяет также узнать, достаточно ли запаса энергии, содержащейся в электронах, чтобы обеспечить

светимость туманности в течение всего времени ее существования. Полная энергия частиц $\sim 10^{40}$ Дж, а полная светимость туманности, т. е. скорость расходования энергии, $\sim 10^{30}$ Вт. Делением первой величины на вторую получим оценку времени, в течение которого туманность израсходует запасенную в ней энергию; как видим, это произойдет за 10^{10} с, или за 300 лет. Это втрое меньше возраста Крабовидной туманности. Отсюда следует вывод, что внутри туманности должен существовать источник, способный постоянно пополнять ее запасы электронов высокой энергии, иначе эти запасы давно бы уже иссякли.

На основании данных таблицы можно получить представление о том, в каком темпе должны поставляться в туманность частицы разных энергий. Посмотрим, например, как долго могут излучать электроны, создающие рентгеновское излучение туманности. Каждый из них имеет энергию $\sim 2 \cdot 10^{13}$ эВ $\approx 3 \cdot 10^{-9}$ Дж и расходует ее на излучение с мощностью $2 \cdot 10^{-14}$ Вт. Значит, данный электрон может излучать в течение времени $3 \cdot 10^{-6}$ Дж / $2 \cdot 10^{-14}$ Вт $\approx 10^8$ с ≈ 3 года. Это очень мало по сравнению с возрастом туманности.

Оценка времени высвечивания для электронов, создающих оптическое излучение, дает величину в несколько сотен лет. Время высвечивания электронов, излучающих в радиодиапазоне, еще больше — несколько сотен тысяч лет.

Итак, «отключение» источника электронов высоких энергий повлекло бы за собой исчезновение рентгеновской светимости туманности уже через несколько лет; через несколько сотен лет прекратилось бы ее оптическое излучение; только в радиодиапазоне туманность светила бы без всяких изменений еще довольно продолжительное время, существенно превышающее ее современный возраст.

Другими словами, частицы самых высоких энергий ($\epsilon > 10^{13}$ эВ) должны обновляться в туманности за несколько лет; частицы средних энергий ($\epsilon \approx 10^{12}$ эВ) сменяются за несколько сотен лет и лишь частицы более низких энергий ($\epsilon \leq 10^9$ эВ) могли бы существовать в туманности изначально, будучи рожденными, например, в том же процессе вспышки сверхновой, который породил саму туманность и пульсар в ее центре.

Откуда же берутся частицы самых высоких энергий? Несомненно, их поставляет пульсар.

Открытие в 1968 г. пульсара Крабовидной туманности было вместе с тем и открытием источника высокоэнергичных электронов, создающих синхротронное излучение туманности. Естественно считать, что частицы высоких энергий, рождающиеся у поверхности нейтронной звезды и образующие магнитосферу пульсара, — это те самые частицы, которые постоянно пополняют и возобновляют запас электронов в окружающем пульсар объеме туманности. Как мы видели, большая часть энергии, отбираемая у вращающейся нейтронной звезды через ее магнитное поле, переходит в энергию частиц. Мощность, вкладываемая в частицы $W \approx W_B \approx 10^{31}$ Вт, вполне достаточна для обеспечения светимости туманности на наблюдаемом уровне, $\sim 10^{30}$ Вт.

Но этим роль релятивистских частиц, рождаемых пульсаром, не ограничивается. Возможно, пульсар Крабовидной туманности, а также и другие радиопульсары, выбрасывают частицы в межзвездное пространство, где они проявляют себя как космические лучи.

Пульсары и космические лучи

Еще в 1934 г. В. Бааде и Ф. Цвикки указали на возможную связь между вспышками сверхновых, нейтронными звездами и космическими лучами — частицами высоких энергий, приходящими на Землю из космического пространства.

Космические лучи были открыты более 60 лет назад и с тех пор служат предметом тщательного изучения. Интерес к ним связан прежде всего с возможностью использовать их для исследования взаимодействий элементарных частиц при высоких энергиях, недостижимых в лабораторных ускорительных устройствах. Наибольшая энергия частицы, зарегистрированная в космических лучах, — 10^{20} эВ ≈ 10 Дж, тогда как на лучших современных ускорителях достигаются энергии около 10^{12} эВ — на 8 порядков меньше.

Частицы высоких энергий, приходящие к Земле из межпланетного и межзвездного пространства, порождают в земной атмосфере новые, вторичные частицы, тоже обладающие немалыми энергиями. Но более всего интересны, очевидно, исходные, первичные частицы. Они представляют собою главным образом протоны; среди них имеются в небольшом числе и атомные ядра таких элементов, как гелий, литий, бериллий, углерод, кислород

в т. д., вплоть до урана. Кроме редких случаев экстремально больших энергий, энергии в космических лучах в расчете на один нуклон (протон или нейтрон) не превышают 10^{13} – 10^{15} эВ.

Распределение частиц космических лучей по энергии характеризуют энергетическим спектром. Пусть $\Delta F(\epsilon)$ — плотность потока, т. е. число частиц с энергиями от ϵ до $\epsilon + \Delta\epsilon$, проходящих в единицу времени на единицу площади приемника. Тогда, согласно наблюдениям, отношение $\Delta F(\epsilon)/\Delta\epsilon$ представляется в виде степенной функции энергии:

$$\Delta F(\epsilon)/\Delta\epsilon \propto \epsilon^{-\gamma}. \quad (3.15)$$

Показатель $\gamma=2,6$ – $2,7$ для широкого интервала энергий от 10^{10} до 10^{15} эВ. (Стоит обратить внимание на то, что по нашим оценкам показатель степени в спектре электронов Крабовидной туманности тоже лежит между 2 и 3.)

Средняя концентрация частиц космических лучей в межзвездном пространстве нашей Галактики оценивается величиной $\sim 10^{-4}$ м⁻³. Средняя энергия частицы $\sim 10^{-9}$ Дж $\approx 10^{10}$ эВ. Плотность энергии космических лучей, т. е. энергия частиц в единице объема, $\sim 10^{-13}$ Дж/м³. Последняя величина сравнима с плотностью энергии магнитного поля Галактики и близка к средней плотности кинетической энергии хаотических движений облаков межзвездного газа.

Электронов в космических лучах не более 1–2%. Их спектр представляется степенной функцией, как и у протонов, с близким по значению показателем, $\gamma \approx 3$, для изученного интервала энергий электронов от 10^{10} до 10^{12} эВ.

Поток космических лучей изотропен — они приходят к Земле равномерно со всех сторон (кроме, конечно, частиц, испускаемых Солнцем).

Космические лучи, распространяясь в межзвездных магнитных полях, способны создавать синхротронное излучение. При наблюдаемом значении магнитного поля в диске нашей Галактики, $B \approx 3 \cdot 10^{-10}$ Тл, электроны с энергией $E \approx 10^9$ – 10^{11} эВ излучают главным образом в радиодиапазоне. Чтобы в этом убедиться, достаточно вычислить частоту ω_0 , соответствующую максимуму спектра синхротронного излучения при указанных значениях B и ϵ .

Общее радиоизлучение Галактики известно с конца 40-х годов. Его мощность составляет 10^{31} Вт. Напомним, что мощность оптического излучения Галактики 10^{37} Вт

эквивалентна свету приблизительно 10^{11} солнц. Однако радиомощность Галактики несравненно больше радиомощности 10^{11} солнц (радиосветимость Солнца $\sim 10^{10}$ Вт).

Объяснение общего радиоизлучения Галактики как синхротронного излучения электронов космических лучей предложено В. Л. Гинзбургом в 1950—1951 гг.

Основной вопрос физики космических лучей с самого начала ее развития — природа их высокой энергии. Он до сих пор еще не решен. Обсуждается целый ряд интересных возможностей: ускорение частиц в межзвездных магнитных полях (как это предполагал еще в 40-е годы Э. Ферми), в оболочках, сбрасываемых при вспышках сверхновых (эта идея развивается сейчас многими авторами), в ядре Галактики или даже вне ее — в квазарах. Открытие пульсаров, анализ их электродинамики, данные о частицах высокой энергии в Крабовидной туманности, получаемые из анализа ее синхротронного излучения, — все это указывает на пульсары как на эффективный источник космических лучей. Давняя идея В. Бааде и Ф. Цвикки о единстве происхождения нейтронных звезд и космических лучей приобретает сейчас новые основания.