**Пульсары**

**Введение**

На протяжении веков единственным источником сведений о звездах и Вселенной был для астрономов видимый свет. Наблюдая невооруженным глазом или с помощью телескопов, они использовали только очень небольшой интервал волн из всего многообразия электромагнитного излучения, испускаемого небесными телами. Астрономия преобразилась с середины нашего века, когда прогресс физики и техники предоставил ей новые приборы и инструменты, позволяющие вести наблюдения в самом широком диапазоне волн – от метровых радиоволн до гамма-лучей, где длины волн составляют миллиардные доли миллиметра. Это вызвало нарастающий поток астрономических данных. Фактически все крупнейшие открытия последних лет – результат современного развития новейших областей астрономии, которая стала сейчас всеволновой. 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 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 радио-потока 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 были замечены 28 ноября 1967 г. аспиранткой кембриджской группы Дж. Белл. Импульсы следовали один за другим с четко выдерживаемым периодом в 1,34 с. Это было совершенно непохоже на обычную хаотическую картину случайных нерегулярных мерцаний. Принимаемые сигналы напоминали скорее помеху земного происхождения. Например, 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 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 меньше ускорения силы тяжести

Если взять период пульсара Крабовидной туманности P=0,033 с, то соответствующая ему частота вращения Q=2 /Р, составит приблизительно 200 рад/с. На этом основании найдем нижний предел его плотности.

Это очень значительная плотность, которая в миллионы раз. превышает плотность белых карликов самых плотных из наблюдавшихся до того звезд. Оценка плотности по периоду “миллисекундного” пульсара, P=0,00155 с, Q=4000 рад/с, приводит к. еще большему значению:

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 (которое и представляет собой - с точностью до несущественного числового множителя - момент импульса). В этом произведении Q - 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 , и, значит, с уменьшением размера тела частота его вращения возрастает по закону:(1.3)

Нейтронная звезда образуется путем сжатия центральной области, ядра звезды, исчерпавшей запасы ядерного топлива. Ядро успевает еще предварительно сжаться до размеров белого карлика,

Дальнейшее сжатие до размера нейтронной звезды, 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 созвездий Центавра — открыты в 1972 г. (за три года до обнаружения барстеров) с помощью американского исследовательского спутница “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 на 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 приблизительно на 6 часов, потом снова появляется, и так каждые 1,7 дня.

(Между прочим, наблюдение рентгеновских затмений для барстеров допоследнего 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 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 затменного барстера был, наконец, обнаружен.)Длительные наблюдения позволили установить еще один -третий - период рентгеновского пульсара в Геркулесе: этот период составляет 35 дней, из которых II дней источник светит, а 24 дня нет. Причина этого явления остается пока неизвестной. Пульсар в созвездии Центавра имеет период пульсаций 4,8 с . 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 Солнц. 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 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). В большинстве же случаев звезда-гигант теряет вещество в виде звездного ветра - исходящего от ее поверхности во все стороны потока плазмы, ионизированного 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, где и захватывается ею.

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 несферически-симметричным, а направленным. Как мы сейчас 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 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 В поля, силовые линии. которого пронизывают данную массу вещества, усиливается при уменьшении геометрических размеров R этой массы.

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.

При уменьшении радиуса звезды от значения, равного, например, радиусу Солнца , до радиуса нейтронной звезды, магнитное поле усиливается на 10 порядков. Магнитное поле с индукцией 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: у него имеются два полюса, из которых в разные стороны расходятся силовые линии. Такое поле называют дипольным.

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-Коганта. 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 вращение, 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 магнитной индукцией 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 топливо, 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 позволяет заключить прежде всего, что эти источники принадлежат нашей Галактике: они очевидным образом концентрируются к ее плоскости служащей, экватором галактической координатной сетки. Объекты, которые никак не связаны о галактикой, никогда не показали бы никакой, преимущественной ориентации такого рода. Распределение по направлениям говорит в этом случае о реальном пространственном расположении источников: такая картина 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 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 заслуживает названия гамма-пульсара); принимаемый гамма-поток в рентгеновской области в 5—10 раз меньше. В области видимого света он еще в десять раз меньше. Слабее всего поток в радиодиапазоне:

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: , 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:

(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 удается; Действительная светимость может быть, вообще говоря, и больше, и меньше; чем

Неопределенность все же не катастрофически велика; так что значение светимости находится, вероятно, между

**Источник энергии**

Периодичность импульсов радиопульсара 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 радиопульсары 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

где М — масса звезды, V —характерная скорость вращения, в качестве которой можно взять линейную скорость вращения на экваторе звезды. При типичном периоде Р==1 с и радиусе нейтронной звезды 10000 м находим :

Таков запас энергии вращения. Оценим теперь темп ее использования. Если период пульсара увеличивается вдвое за время t, то за то же время кинетическая энергия вращения нейтронной звезды уменьшается в 4 раза

Значит, за время t теряется ? начального запаса энергии вращения. Средняя потеря энергии в единицу времени:(1.5) Мы приняли здесь в качестве t характерное время, равное одному миллиону лет , и воспользовались предыдущей оценкой энергии вращения Е. Величина W-средняя мощность, связанная с расходованием энергии вращения, что для типичного пульсара на несколько порядков выше его радиосветимости

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 Ж окажется в миллион раз больше, чем по соотношению (1.5); 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 превращается 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 Система силовых линий магнитного поля вращается с той угловой скоростью, с какой вращается сама нейтронная звезда. 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. 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. Отношение электрической силы к силе тяжести, испытываемой электроном, очень велико:

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, действующая в поле на частицу о зарядом , совершает на пути частицы работу. Значит проходя в электрическом поле расстояние, сравнимое с радиусом нейтронной звезды (например, от экватора до одного из полюсов), частица приобретает энергию

Это действительно огромная энергия, на много порядков превышающая даже энергии покоя электрона и протона. Гигантская энергия частиц соответствует их скоростям движения, приближающимся к скорости света, а фактически совпадающим с ней. Частицы высоких энергий, отрываемые 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 о 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 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 движений 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 совпадают 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 частота 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 радиопульсар 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) радиопульсары - 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 радиопульсар. Излучению такого происхождения отвечает светимость, и большая часть испускаемых квантов принадлежит гамма-диапазону. Поиски таких бывших пульсаров, а ныне гамма-звезд - одна из интересных задач гамма-астрономии.

**Пульсары и космические лучи.**

Еще в 1934г. 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: тогда как на лучших современных ускорителях достигаются энергии на 8 порядков меньше. Частицы высоких энергии, 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 и 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

Средняя концентрация частиц космических лучей в межзвездном пространстве нашей Галактики оценивается величиной

Средняя энергия частицы

Плотность энергии космических лучей, т. е. энергия частиц в единице объема,

Последняя величина сравнима с плотностью энергии магнитного поля Галактики и близка к средней плотности кинетической энергии хаотических движении облаков межзвездного газа. Электронов в космических лучах не более 1-2 %. Поток космических лучей изотропен - он приходят к Земле равномерно со всех сторон (кроме, конечно, частиц, испускаемых Солнцем).

Космические лучи, распространяясь в межзвездных магнитных полях, способны создавать синхротронное излучение. Общее радиоизлучение Галактики известно с конца 40-х годов. Его мощность составляет

Напомним, что мощность оптического излучения Галактики

эквивалентна свету приблизительно

солнц. Однако радиомощность Галактики несравненно больше. 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.

**Список литературы**

А. Д. Чернин “Звезды и физика”

Р. Киппенхан “100 миллиардов солнц”

У. Корлисс “Загадки вселенной”