

ПУЛЬСАРЫ *)

Э. Хьюитт

Эти недавно открытые загадочные астрономические объекты излучают радиоимпульсы, интервал между которыми столь постоянен, что их можно использовать в качестве часов. Пульсары могут быть пульсирующими или вращающимися звездами, в которых уже выгорело горючее.

Любопытно, что на последнее открытие в астрономии — пульсары — натолкнулись случайно при исследовании квазаров — звездоподобных радиоисточников, выяснение природы которых все еще является одной из важнейших проблем астрофизики.

Почти год назад маленькая группа исследователей, работающая с новым радиотелескопом в Кембриджском университете, с удивлением обнаружила, что слабые радиоимпульсы, приходящие из некоторой точки среди звезд, оказались при ближайшем рассмотрении последовательным рядом импульсов, следующих друг за другом с такой же регулярностью, как радиосигналы службы времени. Со скептицизмом, граничащим с недоверием, кембриджская группа радиоастрономов начала систематические наблюдения с целью выяснить природу этих странных сигналов, даже если не исключена возможность происхождения их от каких-либо земных радиоисточников. Умудренные опытом радиоастрономы не принимают каждый необычный сигнал за истинно небесный. В 99 случаях из 100 странные «переменные радиоисточники» оказываются какой-либо электрической помехой либо от плохо отрегулированной системы автомобильного зажигания, либо, например, от неправильного включения холодильника, расположенного поблизости.

С течением времени наши волнения усилились, особенно после того, как было обнаружено, что импульсы приходят от тела с размерами, не превышающими размер планеты, расположенного относительно близко — среди ближайших звезд нашей Галактики. А вдруг это сигналы, посыпаемые другой цивилизацией? Такая возможность рассматривалась только из-за отсутствия естественного объяснения причин возникновения сигналов, выглядящих столь искусственными. Но эта возможность очень скоро отпала в связи с открытием аналогичных сигналов, приходящих из еще трех различных направлений в пространстве. Кроме того, оказалось, что источники сигналов не совершают планетарных движений (предполагается, что внеземная цивилизация должна располагаться на какой-либо планете).

Наконец, мы пришли к заключению, что единственное правдоподобное объяснение природы загадочных радиоисточников состоит в том, что они каким-то образом возникают при вибрациях очень плотной звезды, такой, как белый карлик или нейтронная звезда.

*) Antonu Newish, Pulsars, Scientific American 219 (4), 25 (1968). Перевод Н. И. Гинзбург, под ред. В. Л. Гинзбурга.

Публикация этих открытий, спустя восемь недель после приема импульсов, стимулировала интенсивные теоретические и экспериментальные исследования во всем мире. Хотя истинная природа пульсаров до сих пор далека от полного понимания, настало время приглядеться к возникшей ситуации.

Напрашивается очевидный вопрос: почему пульсары не были до сих пор обнаружены, хотя мощные радиотелескопы работают по крайней мере 10 лет?

Краткий ответ состоит в том, что сигналы пульсаров не только очень слабы, но их интенсивность особенно низка для тех более коротких радиоволн, на которых обычно работают радиоастрономы, а именно на радиоволнах длиной от нескольких сантиметров до метра. Для обнаружения пульсаров необходимы чувствительные радиотелескопы, работающие на метровых волнах с дополнительным требованием, чтобы наблюдения одних и тех же участков неба могли повторно выполняться с помощью регистрирующей аппаратуры, имеющей достаточно малую постоянную времени, чтобы регистрировать радиосплески. По счастливому стечению обстоятельств такая аппаратура была создана в Кембридже для поиска квазаров. Предполагалось также с ее помощью производить исследование мерцаний в межпланетной среде.

Эффект мерцания впервые наблюдался в 1964 г. Мы нашли, что радиоволны от очень компактных радиогалактик — объектов с угловыми размерами меньше одной угловой секунды — обнаруживают характерные быстрые и нерегулярные флуктуации интенсивности излучения. Этот эффект, аналогичный мерцанию видимых звезд, вызывается искажением приходящих радиоволн при прохождении их через облака электрически заряженных частиц, выброшенных из Солнца («солнечный ветер»). Эти «плазменные облака» вызывают мерцания только в том случае, если радиоволны достаточно когерентны, т. е. если их источник имеет предельно малые угловые размеры. Обычные радиогалактики имеют угловые размеры значительно большие, чем квазары, и не мерцают; поэтому наличие мерцаний является первоклассным индикатором того, может ли данная радиогалактика оказаться квазаром.

Как известно, земная ионосфера отклоняет длинные волны больше, чем короткие; так же действуют и облака плазмы в пространстве. Это означает, что мерцания более заметны на метровых волнах, чем на сантиметровых и дециметровых, для работы на которых создано большинство радиотелескопов.

Радиотелескоп, построенный в Кембридже для поисков квазаров с помощью наблюдения мерцаний, работал на длине волны 3,7 м (частота 81,5 Мгц). В отличие от многих радиотелескопов с параболическими чашами, наш телескоп имел прямоугольную форму и состоял из 2048 дипольных антенн, расположенных на площади 4,5 акра.

Используя сканирование по фазе для изменения направления диаграммы направленности приемной антенны по высоте (по склонению) и вращение Земли для обзора неба с запада на восток (по прямому восхождению), оказалось возможным обследовать за одну неделю значительную часть неба.

Наблюдения начались в конце июля 1967 г. С этого времени анализ записей, представляющих собой бумажную ленту, достигающую за неделю длины 400 футов, был поручен молодой сотруднице Жаклин Белл. Впервые в истории радиоастрономии большой участок неба повторно наблюдался с помощью предельно чувствительного радиотелескопа, настроенного на диапазон метровых волн. Вскоре было обнаружено, что небо

обильно усыпано радиогалактиками, мерцающими на плазменных областях. Эти радиоисточники тщательно изучались неделями за неделю, чтобы установить, как изменяется мерцание по величине при сдвиге положения источника на небесной сфере в связи с вращением Земли вокруг Солнца. Поскольку облака плазмы являются частью солнечного ветра, движущегося от Солнца мимо Земли, мерцания становятся интенсивнее, когда луч зрения на радиоисточник приближается к Солнцу.

Записи в основном были такие, какими мы их ожидали, но однажды в августе мисс Белл заметила нечто странное. Это было похоже на быстрые

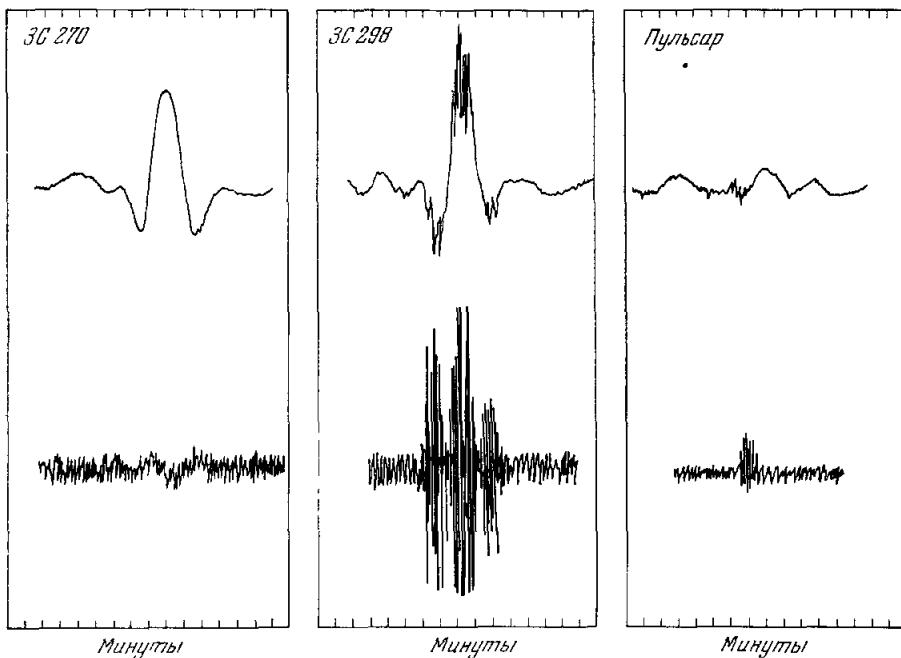


Рис. 1. Характерная запись, показывающая, как можно использовать межпланетные мерцания для того, чтобы отличать радиоисточники очень большого размера, такие, как обычные радиогалактики (слева), от радиоисточников с размерами звезд или даже меньшими (середина и справа). Записи были сделаны автором статьи и его сотрудниками на большом радиотелескопе Муллардской радиоастрономической обсерватории в Кембриджском университете. Такой телескоп может быть ориентирован только по склонению; вращение Земли переносит радиоисточник мимо поля зрения антенны. Обычная радиогалактика 3C 270 дает слаженную огибающую кривую — верхний рисунок слева. Под ним изображен усиленный сигнал флуктуаций при той же записи. В середине изображены записи флуктуаций квазизвездного радиоисточника (квазара) 3C 298. Ясно видны межпланетные флуктуации (мерцания). Они возникают, когда когерентные волны от компактного источника проходят через неоднородные облака электрически заряженных частиц, испущенных Солнцем («солнечный ветер»). Две записи справа — первые признаки радиоизлучения от объекта, ставшего впоследствии первым пульсаром CP 1919.

мерцания очень слабого источника, происходящие в середине ночи, когда мерцания обычно слабы (рис. 1). Другой странной чертой было то, что сигналы присутствовали только часть времени, в течение которого источник находился в пределах диаграммы направленности антенны. Если бы это произошло только один раз, мы бы предположили, несомненно, что эти сигналы — просто радиопомеха. Однако в конце сентября аналогичные сигналы ясно повторились в шести различных случаях, хотя в другое

время они не наблюдались. Постоянство направления прихода сигналов указывало на то, что они идут от истинно небесного источника. Это привело к предположению, что мы обнаружили какую-то вспыхивающую звезду. Когда Солнце активно, его радиоизлучение часто значительно усиливается. Мы вычислили, что если такая вспышка активности произойдет на ближайшей звезде, мы могли бы это заметить с помощью нашего радиотелескопа.

Но вот теперь, когда мы действительно заинтересовались этим явлением, источник ответил нам тем, что исчез на наших записях на последующие шесть недель. Однажды в конце ноября мисс Белл спокойно

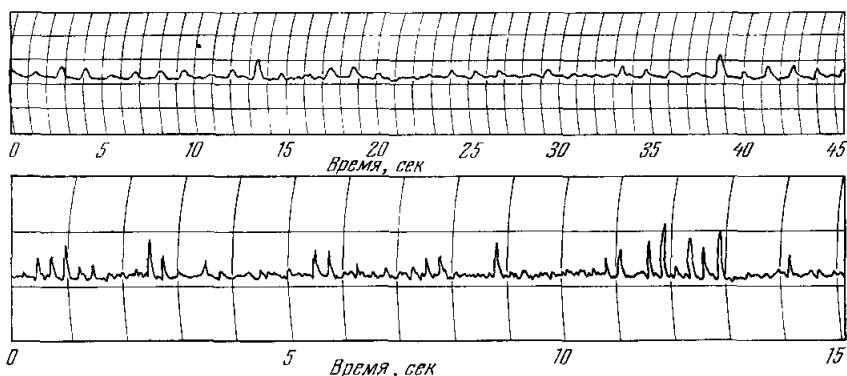


Рис. 2. Ранние записи излучения пульсаров показывают регулярные, но переменные по интенсивности импульсы от СР 1919 (вверху) и от СР 0950 (внизу). На верхнем рисунке легко различить 15 импульсов за 20 сек., что соответствует примерно одному импульсу в 1,3 сек. Теперь определено, что точный интервал между импульсами равен 1,33730113 сек. Пульсар СР 0950 испускает импульс через 0,2530646 сек.

объявила: «Он вернулся». Мы немедленно включили высокоскоростную запись, чтобы установить имеют ли эти сигналы такие же характеристики, как сигналы от Солнца. К нашему удивлению сигналы приходили с правильной последовательностью импульсов с интервалом немногим больше одной секунды (рис. 2). Невозможно было поверить, что такие сигналы могут приходить от истинно астрономического источника, но повторные наблюдения показали, что сомнений быть не может. Естественно, что этот таинственный радиомаяк всецело поглотил нас на следующие несколько недель, пока мы вели наблюдения, пытаясь понять истинную природу источника.

Одним из первых сюрпризов было открытие, что каждый импульс связан с радиосигналами с непрерывно меняющейся несущей длиной волны. Сигналы пробегали через полосу пропускания приемника шириной 1 $M\text{гц}$ от высоких частот до низких. Это было обнаружено, когда два приемника, настроенные на слегка разные частоты, вели прием одновременно и каждый импульс прибывал на долю секунды раньше в приемнике, настроенный на более высокую частоту. Измерение мгновенной ширины полосы излучения показало затем, что истинная продолжительность импульса была лишь от 10 до 20 мсек.

Это дало возможность сделать первый существенный вывод о самом источнике: тело, испускающее импульсы, должно быть предельно мало. Его радиус не может быть больше нескольких тысяч километров. Основание для такого вывода заключается в том, что большое тело не может

испускать импульс излучения, длительность которого меньше времени, требуемого для прохождения света от одного края источника до другого *). Предположим, например, что Солнце мгновенно потухло. Как это выглядело бы с Земли? Сначала мы должны были бы увидеть темное пятно в центре Солнца, так как эта часть расположена к нам ближе всего. Затем темное пятно стало бы увеличиваться, пока Солнце не превратилось бы в яркое кольцо, которое также должно исчезнуть. Перечисленные

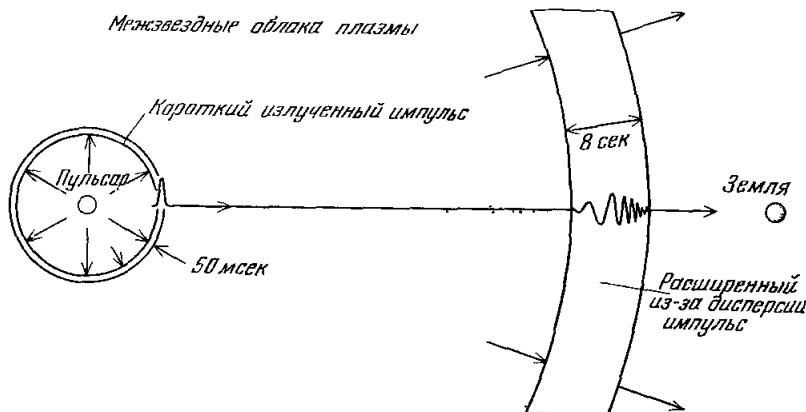


Рис. 3. Межзвездные электронные облака снижают скорость радиоволни: чем длиннее волна, тем меньше скорость. Таким образом, импульсы с широким спектром, испущенные пульсаром за 50 мсек, расширяются в пространстве, и к моменту прибытия на Землю длинные волны могут отстать от коротких на 8 сек. Измеряя такое запаздывание и делая разумные предположения о плотности электронов, можно оценить расстояние до источника.

события заняли бы время около двух секунд, так что, если бы Солнце вспыхивало, как пульсар, продолжительность вспышки не могла бы быть меньше этого времени.

Второй вывод был сделан на основании частотного распределения импульсов, которое дало возможность определить расстояние до источника. Известно, что межзвездное пространство заполнено разреженным газом, состоящим в основном из атомов водорода. Свет от горячих звезд ионизирует часть этих атомов с образованием свободных электронов. В идеальном вакууме радиоволны с любой длиной волны распространяются с одинаковой скоростью, равной скорости света, но в ионизированном газе имеет место другая ситуация. В таком газе чем больше длина волны, тем ниже ее скорость. Таким образом, острый импульс радиоволни, содержащий волны разной длины, расширяется при прохождении через ионизированный межзвездный газ, причем короткие волны прибывают на Землю несколько раньше, чем длинные (рис. 3).

Этот эффект, называемый дисперсией,— одно из общих свойств волнового движения. Дисперсия наблюдается, например, в случае ряби на поверхности водоема, когда в него брошен камень или в стучае

*) Сделанное автором утверждение не всегда справедливо. Так, оно не относится к источникам, движущимся с релятивистской скоростью. Кроме того, если речь идет о мазерном эффекте (отрицательном поглощении), произведение длительности импульса на скорость света является верхним пределом не для размера источника, а для размера области, в которой происходит существенное усиление сигнала, скажем, увеличение его интенсивности в несколько раз. (Прим. ред.)

сейсмических волн, распространяющихся от района землетрясения. Если бы плотность электронов в межзвездном пространстве была точно известна, то разность времен прибытия импульсов с различной длиной волны давала бы немедленно расстояние до источника. К сожалению, плотность электронов измерить целиком, но, вероятно, она составляет около одного электрона в объеме 10 см^3 . Если принять такую оценку, то расстояние до первого открытого пульсара оказывается равным около 130 pc (один парсек равен $3,26$ светового года). Если учесть, что диаметр нашей Галактики равен примерно $30\,000 \text{ pc}$, то становится очевидным, что этот пульсар можно рассматривать как один из наших соседей в мировом пространстве *).

Следующий большой сюрприз ожидал нас при хронометрировании импульсов, когда стало очевидно, что импульсы повторяются с поразительной точностью. Мы обнаружили, что изо дня в день время прибытия импульса может быть предсказано точнее, чем десятая доля секунды, но в то же время интервал между импульсами постепенно уменьшается. Это объяснялось тем, что в течение этого периода орбитальное движение Земли несло нас по траектории навстречу источнику. При этом возникает прогрессирующее снижение периода в результате эффекта Допплера. Когда была введена поправка на эффект Допплера, то оказалось, что время между импульсами в течение нескольких недель оставалось постоянным в пределах экспериментальной точности около 10 мсек .

Теперь мы знаем, что регулярность импульсов превышает одну стомиллионную долю, так что пульсар в самом деле можно рассматривать как очень точные часы. Период первого пульсара равен фактически $1,33730113 \text{ сек}$. Этот период слегка отличается от величины, которую мы приводили сначала; дело в том, что мы ошиблись при расчетах на один импульс в день, так как не были в состоянии следить за источником длительное время. Наша ошибка стала очевидной, когда наблюдения за источником начали большие управляемые радиотелескопы в Голдстоуне в Калифорнии и в Парксе в Австралии. Какова истинная регулярность импульсов, мы узнаем только после проведения хронометрирования в течение нескольких лет. Существующая в настоящее время точность ограничена нерегулярностью формы импульсов. Первый пульсар обозначается теперь CR 1919, что означает: Кембриджский пульсар при прямом восхождении 19 часов 19 минут ($19^h 19^m$).

Когда стало ясно, что для объяснения пульсаров нужно искать радиоизлучение от тела, не превышающего по размерам планету и расположенного относительно близко к нам в пределах нашей Галактики, нельзя было игнорировать возможность связать пульсары с другой цивилизацией. Существует, однако, сильное доказательство того, что сигналы не излучаются планетой, находящейся на орбите какой-либо звезды. Аналогично тому как орбитальное движение Земли вызывает доплеровское изменение периода, также должно действовать любое планетарное движение самого источника. Мы провели тщательные поиски таких эффектов, но после учета орбитального движения Земли никакого другого эффекта Доиплера не было обнаружено. Хотя и существует возможность того, что предполагаемая орбита расположена в плоскости, перпендикулярной лучу зрения, и при этом не будет возникать доплер-эффект, мы думаем, что это весьма маловероятно.

*) Значение электронной концентрации $n = 0,1 \text{ см}^{-3}$ в среднем завышено. В направлении по крайней мере некоторых пульсаров концентрация $n \sim 0,01 \text{ см}^{-3}$. В связи с этим расстояния до пульсаров в среднем, вероятно, в несколько раз больше, чем указано в тексте. (Прим. ред.)

Если источник представляет собой естественный излучатель, возможно, плотную звезду *), то естественно предположить существование на небе других аналогичных объектов. Тщательное исследование всех записей, сделанных при съемке квазаров, дало нам несколько направлений на небесной сфере, где возможно существование регулярных импульсов. Радиотелескоп был нацелен на эти участки, и после нескольких недель были обнаружены еще три пульсара. К этому времени мы уже были уверены, что пульсары — явление естественное. Мы опубликовали свое открытие первого пульсара, продолжая исследование свойств трех других. У одного из трех новых пульсаров интервал между импульсами равен только 0,25306 сек — самый короткий период, наблюдаемый до сих пор. К настоящему времени известны девять пульсаров **). Пятый пульсар был найден радиоастрономами Гарвардского университета, работающими с 300-футовым зеркалом в Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк. Еще два пульсара были обнаружены в Кембридже и два на южном небе групой университетского астрономического Центра Корнелл-Сидней при университете в Сиднее. Один из южных пульсаров, PSR 2045, имеет наибольший известный период, равный 1,9616633 сек (см. таблицу).

Положение, период и расстояния для 9 известных пульсаров. Часы и минуты положения по прямому восхождению и склонению дают четырехзначное число, следующее за обозначениями CP (для Кембриджского пульсара), HP (для Гарвардского пульсара) или PSR (просто для пульсара). Последнее обозначение было предложено группой из Сиднея (Австралия), которая недавно обнаружила два пульсара в Южном полушарии. Оценки расстояний основаны на предположении, что средняя плотность электронов в пространстве равна одному электрону на 10 см^3

Пульсары	Прямое восхождение	Склонение	Период, сек	Расстояние, n_c
CP 0328	03 ^h 28 ^m 52 ^s	54°23'	0,714518563	268
CP 0808	08 ^h 08 ^m 50 ^s	74°42'	1,29224126	58
CP 0834	08 ^h 34 ^m 22 ^s	06°07'	1,2737642	128
CP 0950	09 ^h 50 ^m 29 ^s	08°11'	0,2530646	30
CP 1133	11 ^h 33 ^m 36 ^s	16°08'	1,187911	49
HP 1506	15 ^h 07 ^m 50 ^s	55°41'	0,739677626	196
CP 1919	19 ^h 19 ^m 37 ^s	21°47'	1,33730113	126
PSR 1749	17 ^h 49 ^m 49 ^s	—28°06'	0,5626451	509
PSR 2045	20 ^h 45 ^m 48 ^s	—16°28'	1,9616633	114

В течение последних шести месяцев в радио- и оптических обсерваториях всего мира проводились энергичные попытки проникнуть в тайну пульсаров. Теперь известно, что пульсары излучают в широкой полосе частот от 40 до 3000 $M\text{гц}$. Спектр излучения очень трудно воспроизвести в силу больших вариаций амплитуды импульса, не связанных с различием в длинах волн. По-видимому, интенсивность излучения выше на

*) В английском тексте фигурирует термин «collapsed stars», который в нашей литературе чаще используется в применении к звездам, не могущим оставаться в равновесии и сжимающимся до пределов гравитационного радиуса и далее. Фактически же в тексте речь идет о плотных звездах типа белых карликов или нейтронных звезд, сконцентрировавшихся до некоторого устойчивого состояния. Поэтому и применен термин «плотные звезды». (Прим. ред.)

**) К середине ноября 1968 г. было обнаружено уже 13 или 14 пульсаров. (Прим. ред.)

низких частотах и круто падает на частотах больше 1000 $M\mu$. Быстрые и нерегулярные флуктуации интенсивности импульса от момента к моменту являются важным свойством пульсаров, проявляющимся для всех источников (рис. 4).

Цепочки импульсов были тщательно изучены с целью обнаружения какой-либо закономерности в колебании интенсивности, но без успеха.

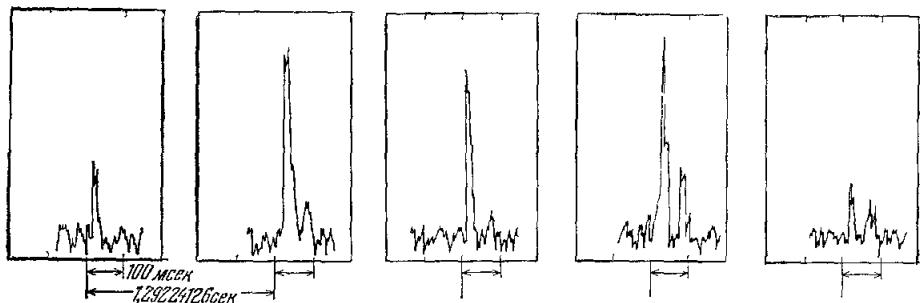


Рис. 4. Последовательные импульсы от пульсара CP 0808 показывают ярко выраженную разницу в тонкой структуре, записанной на частоте больших кембриджских антенн — 81,5 $M\mu$. Это соответствует длине волны около 3,7 м. На сантиметровых и дециметровых волнах излучение от пульсаров значительно слабее, что частично объясняет, почему они не были обнаружены ранее с помощью больших радиотелескопов, работающих обычно на более коротких волнах.

Модуляция амплитуды импульсов была бы, конечно, явным способом кодирования сигналов, если бы они были посланы внеземной цивилизацией. Общей чертой всех пульсаров является то, что вариации амплитуды импульсов происходят быстрее на низких частотах.

Например, на частоте 81,5 $M\mu$ пульсар CP 1919 излучает относительно сильные импульсы только в течение минуты, в то время как на 408 $M\mu$ всплеск интенсивного сигнала длится по крайней мере полчаса. Было предположено, что эти флуктуации интенсивности связаны с мерцаниями, вызванными облаками плазмы вблизи пульсара, и представляется весьма вероятным, что такие облака могли быть выброшены самим источником.

При детальном исследовании отдельных импульсов

Рис. 5. Тонкая структура излучения пульсара CP 0950, записанная на частоте 195 $M\mu$ (длина волны 1,55 м) на 1000-футовой чаще Аресибского телескопа в Пуэрто-Рико. (Записи сделаны Дж. М. Камиллом, Г. Д. Крафтом мл. и Д. Дрейком.)

было обнаружено, что их структура очень сложна. Каждый импульс состоит из целого ряда подимпульсов, точная форма которых может радикально меняться от одного импульса к другому (рис. 5). Подимпульсы продолжительностью только 0,2 мсек были обнаружены группой, работающей с гигантским 1000-футовым параболическим радиотелескопом в Аресибо в Пуэрто-Рико. Такое время является пределом чувствительности аресибской приемной системы, и не исключается, что существуют более тонкие структуры.

Важным свойством подыmpульсов является тот факт, что они часто обнаруживают значительную поляризацию. Сильная круговая поляризация с направлением вращения, быстро меняющимся от одного подыmpульса к другому, наблюдалась в Аресибо, а длительная линейная поляризация была обнаружена радиообсерваторией Джодрелл-Бэнк в Англии. В Кембридже мы также нашли, что пробегающий радиочастотный сигнал имеет сложную структуру. Энергия одиночного импульса может сильно отличаться на частотах, отделенных друг от друга только на 300 кгц.

Хотя форма отдельных импульсов существенно меняется, оказалось, что «огибающая» импульса — сглаженная форма импульса, получающаяся приложении импульсов в течение примерно минуты, — имеет характерный вид, отличный для каждого источника (рис. 6). Пульсар CR 0834 имеет двугорбую огибающую, а пульсар CR 0950 — медленно возрастающую огибающую с довольно узким пиком. Интересно, однако, что все огибающие кривые делятся при приеме около 50 мсек. Вспоминая наши рассуждения о размере пульсаров, мы видим, что во всех случаях их диаметр не может превышать 15 000 км. Подыmpульсы могут, конечно, излучаться яркими включениями с меньшими размерами (см. прим. ред. на стр. 719).

Безусловно, радиоастрономы будут в течение некоторого времени заниматься дальнейшими поисками пульсаров и выяснением новых свойств уже обнаруженных пульсаров. Другим направлением в исследовании является возможность наблюдения пульсаров оптическими телескопами. Трудность на этом пути заключается в том, что небо плотно усеяно звездами и для увереной идентификации пульсара необходимо очень точно знать его радио положение. Кембриджская дипольная антenna система, обнаружившая пульсары, не предназначалась для точного определения местоположения источников, но в той же обсерватории сэр Мартин Райл ведет наблюдения с помощью большого радиотелескопа, работающего на принципе апертурного синтеза. Радиотелескоп состоит из трех 60-футовых зеркал, одно из которых смонтировано на рельсах. Радиозаписи от всех зеркал поступают затем в вычислительную машину *). Такая аппаратура

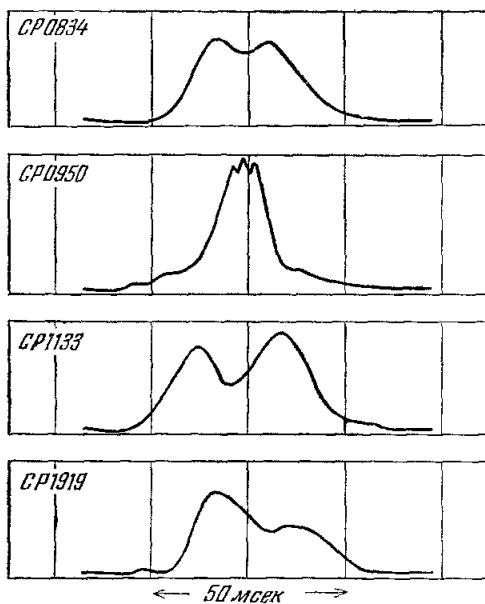


Рис. 6. Усредненные огибающие импульсов для четырех пульсаров, определенные А. Д. Лейном и Б. Дж. Рикеттом на телескопе с 250-футовым зеркалом в обсерватории Джодрелл-Бэнк в Манчестерском университете. На основании факта, что все испущенные импульсы имеют приблизительно одну и ту же продолжительность порядка 50 мсек, можно предположить, что все излучающие объекты имеют близкие размеры. Наименшим может быть пульсар CR 0950.

*) См. в ближайших выпусках УФИ перевод статьи М. Райла «Кембриджский одномильный радиотелескоп». (Прим. ред.)

в некоторых отношениях эквивалентна зеркальной чаше с диаметром в 1 милю (рис. 7).

С помощью этой аппаратуры теперь найдены точные местоположения пульсаров CP 1919, CP 0950 и CP 1133. Однако при изучении снимков, сделанных в Паломарской обсерватории, не удалось обнаружить никакого объекта внутри прямоугольников, ограничивающих возможное местоположение пульсара. Исключение составляет пульсар CP 1919 (рис. 8 и 9). Пульсары CP 0950 и CP 1133 не излучают никакого видимого света

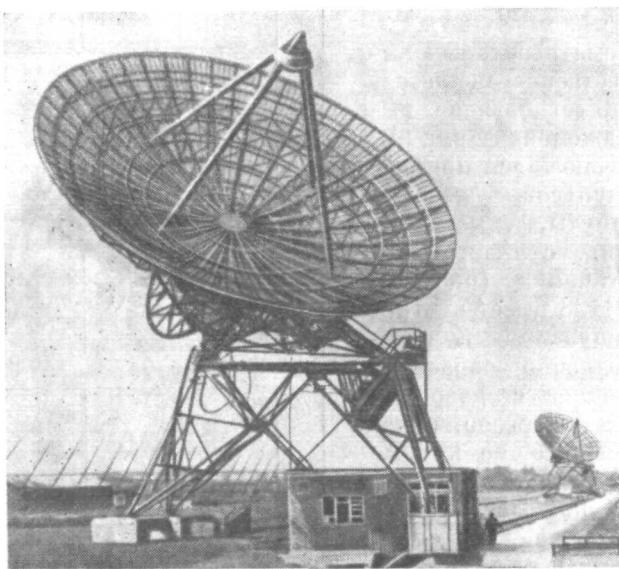


Рис. 7. Телескоп, работающий на принципе апертурного синтеза в Муллардской радиообсерватории Кембриджского университета. Два из трех 60-футовых зеркал телескопа видны на рисунке. Одна из чащ смонтирована на рельсах. Сигналы от трех зеркал поступают в вычислительную машину, где синтезируются в сигналы, эквивалентные записям управляемого телескопа с зеркалом (чашей) диаметром в 1 милю. Установка была использована сэром Мартином Райлом и его сотрудниками для установления точного местонахождения пульсаров на небе северного полушария.

в пределах чувствительности фотопластинок. В случае пульсара CP 1919 вблизи его местоположения видна слабая желтая звезда, но мы не можем быть уверены, что это просто совпадение.

Было предпринято много попыток зафиксировать световые вспышки от этой звезды. Наблюдатели из обсерватории Китт-Пик в Нью-Мехико сообщили, что они обнаружили небольшие оптические вариации с периодом вдвое больше периода пульсара. Аналогичный результат сообщили также из Ликской обсерватории в Калифорнии, но позже это сообщение было изъято. Другие наблюдения этой звезды не дали никаких флюктуаций света. В связи с отсутствием видимого излучения по крайней мере в случае двух пульсаров при их близком подобии, во всех других отношениях оптические данные, полученные до сих пор, нужно принимать с осторожностью.

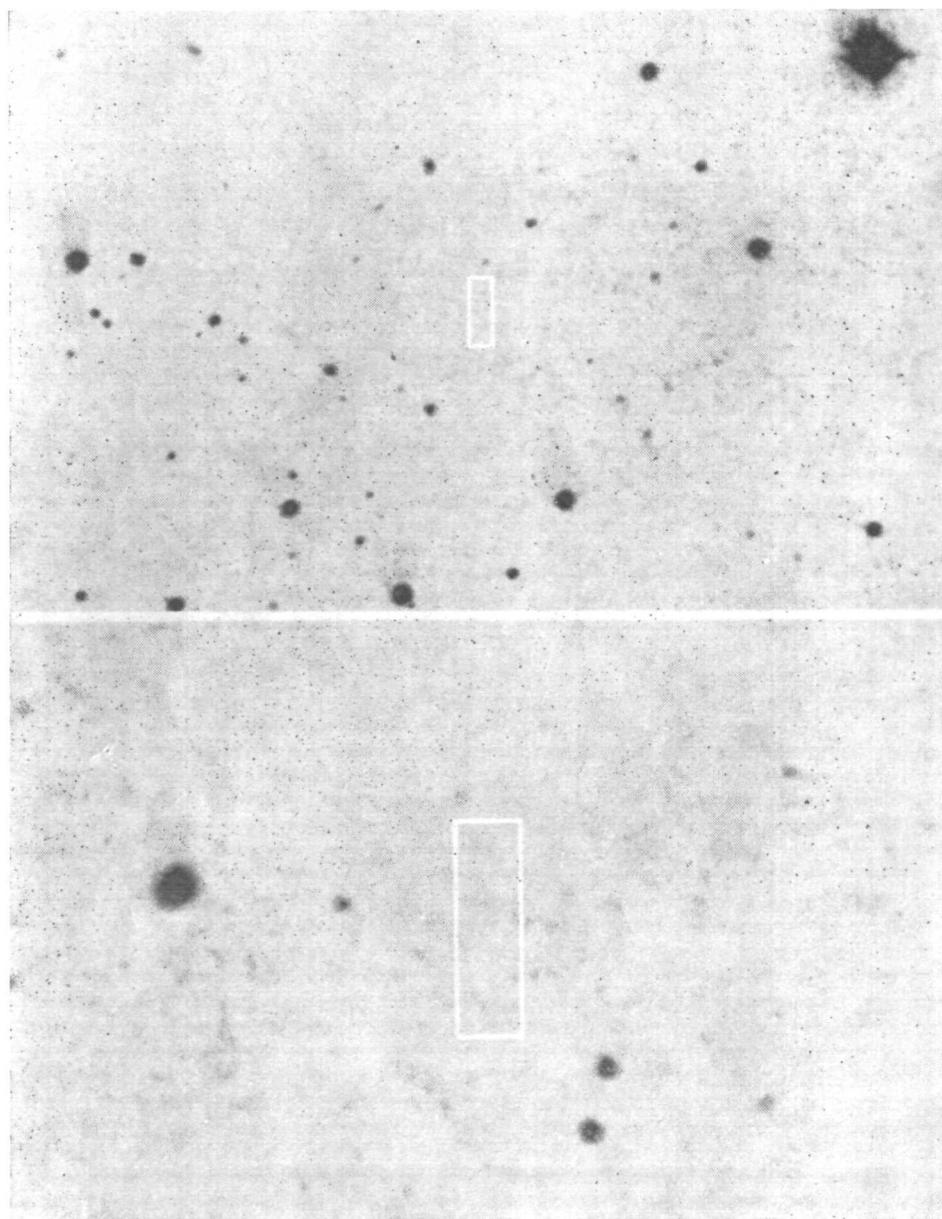


Рис. 8. Оптический поиск пульсаров пока не дал результатов. Прямоугольники на этих двух рисунках ограничивают радиопозицию пульсаров CP 0950 (вверху) и CP 1133 (внизу). Большая сторона прямоугольника соответствует двум третям угловой минуты в случае CP 0950 и одной угловой минуте для CP 1133. Если бы пульсары были обычными белыми карликами, они должны были бы быть видны на таких фотографиях при условии, что расстояние до них близко, как указывают радиосигналы (при электронной концентрации $0,1 \cdot 10^{-3}$. — Прим. ред.). (Фотографии сделаны на Паламарской обсерватории.)

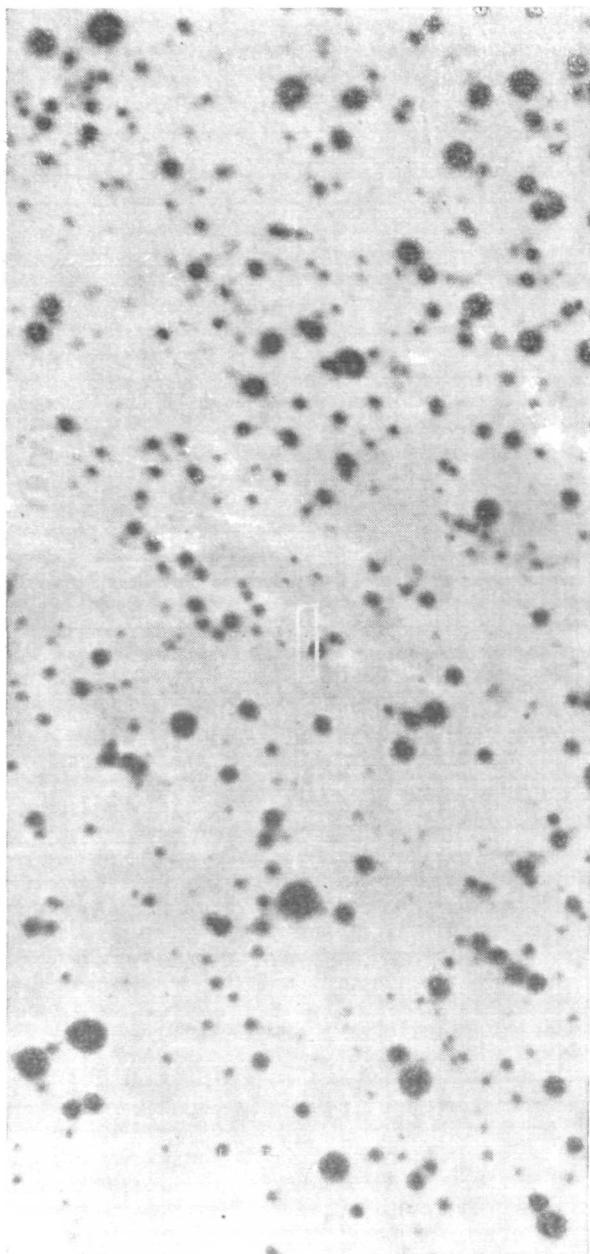


Рис. 9. Оптический поиск первого пульсара CP 1919 проводился в области, ограниченной прямоугольником. На основании неподтвержденных сообщений можно предположить, что какой-то объект в указанной области излучает свет с возможными регулярными флюктуациями. Но звезда, расположенная внутри прямоугольника, не обнаруживает никаких необычных свойств.

До сих пор для пульсаров не предложено никаких удовлетворительных объяснений. Энергетические требования в соединении с исключительной стабильностью временного механизма говорят о том, что нужно искать объект с массой звезды. Пока нам известны только два типа звезд — белые карлики и нейтронные звезды, размеры которых так малы, какими и должны быть размеры пульсаров (рис. 10). Белые карлики — звезды, скавшиеся после выгорания их ядерного горючего. Их масса, равная примерно массе Солнца, заключена в объеме с размерами планеты. Существование нейтронных звезд было предложено на теоретической основе, но пока еще ни одна из них не была обнаружена. Они должны иметь

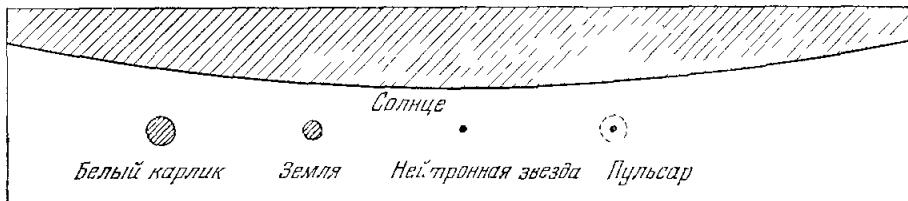


Рис. 10. Предполагаемые размеры пульсаров по сравнению с относительными размерами Солнца, Земли, белых карликов и нейтронных звезд. Диаметр Солнца равен 864 000 миль, диаметр Земли меньше 8000 миль. Масса белого карлика примерно равна массе Солнца, но эта масса заключена в объеме с размером планеты. Гипотетические нейтронные звезды также имеют массы, примерно равные массе Солнца, но их диаметр составляет только от 10 до 100 миль. Короткий интервал между импульсами дает возможность предполагать, что размер пульсаров лежит где-то между размерами белых карликов и нейтронных звезд.

примерно такую же массу, как и белые карлики, но их диаметр должен равняться только $\sim 10-100$ милям. Вычисления указывают на то, что нейтронные звезды могут быть достаточно горячими для испускания рентгеновских лучей, которые можно обнаружить.

Природа таких компактных звездных тел и причина того, почему только эти два типа звезд могут существовать, связаны со свойствами вещества очень высокой плотности. Типичная звезда, такая, как Солнце, сохраняет свои размеры в результате баланса внутреннего давления и сил гравитации. Давление возникает в результате выделения большого количества энергии излучения, освобожденной при ядерных реакциях в глубине звезды. При сгорании горючего давление излучения должно уменьшиться и силы тяготения будут скимать звезду до меньших размеров. Возможно установление нового равновесия даже в случае холодной звезды, когда силы гравитации уравновешивают давление, вызванное движением электронов. Для звезды с массой, равной массе Солнца, это происходит только тогда, когда силы тяготения скимают вещество, так что радиус звезды составляет ~ 6000 миль. Предполагается, что видимые белые карлики представляют собой старые выгоревшие звезды примерно с такими же массой и размерами.

Можно представить себе звезду значительно более массивную, чем Солнце, скавшуюся таким же образом, но интересная ситуация возникает в том случае, когда гравитационные силы скимают вещество до очень малого объема. Квантовые эффекты и вырождение электронов, вытекающее из принципа Паули, приводят к тому, что электроны могут уплотняться в меньший объем только в том случае, если их энергия увеличивается. Чем массивнее звезда, тем больше направленные внутрь силы гравитации и тем больше энергия электронов. В конце концов энергия становится такой большой, что электроны вступают в реакцию с протонами с образованием нейтронов — процесс, обратный обычному β -распаду,

при котором свободный нейтрон распадается в течение нескольких минут на протон и электрон. Когда электроны исчезают, то исчезает вызываемое их движениями давление. Теперь силы тяготения сжимают звезду еще больше, пока она не превращается в нейтронную. Согласно существующим идеям тяжелая звезда должна, по-видимому, взорваться прежде, чем она достигнет стадии белого карлика, в результате чего останется ее центр, являющийся нейтронной звездой. Попытки найти нейтронные звезды в оболочках вспыхнувших сверхновых звезд не увенчались успехом (см. прим. ред. на стр. 730).

Со временем сэра Артура Эддингтона астрофизики обдумывали возможность существования пульсирующих звезд, которые то расширяются

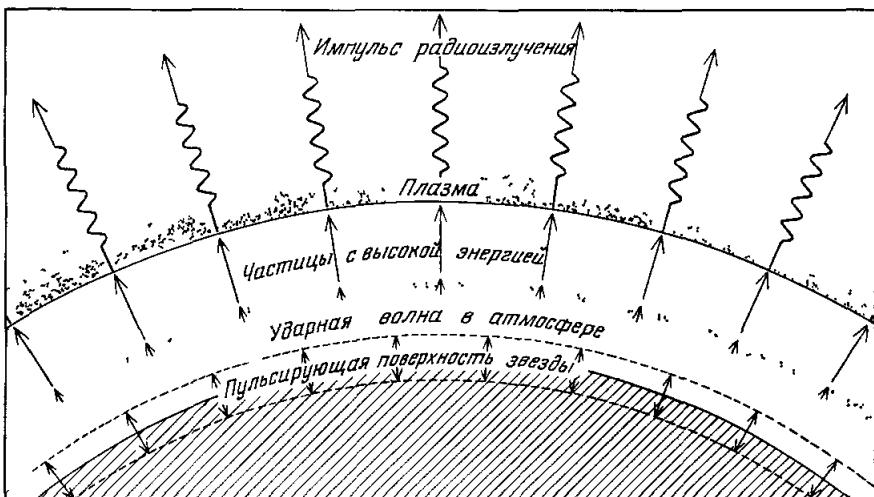


Рис. 11 Модель пульсирующей звезды, в которой предполагается, что вся поверхность белого карлика (или, возможно, нейтронной звезды) осциллирует с частотой, характерной для наблюдавших до сих пор пульсаров. Регулярное движение поверхности приводит к возникновению ударных волн, которые генерируют всплески радиоволн во всех направлениях при распространении в плазме в верхних слоях атмосферы звезды.

то сжимаются по всей своей поверхности. Эти идеи имели значение в теории переменных звезд, таких, как цефеиды и звезды типа RR Лиры. В поисках объяснения природы пульсаров мы находились под впечатлением того факта, что периоды пульсаций, вычисленные для белых карликов и нейтронных звезд, были очень близки к периоду, наблюдавшемуся для пульсаров. Для нейтронной звезды было также вычислено, что значительная энергия может сохраняться при вибрациях; это давало возможность предполагать длительное существование пульсаций. Представлялось поэтому вероятным, что пульсации всей звезды могут обеспечивать часовой механизм, регулирующий излучение радиоимпульсов.

Как в действительности происходит вибрация всей поверхности звезды, дающая радиоимпульсы, мы не знаем. Однако можно представить себе, что колеблющаяся поверхность создает в атмосфере звезды волну давления; затем при попадании волны в более разреженную атмосферу волна давления передаст в ударную волну. Движущийся наружу фронт ударных волн может ускорить электроны, которые в свою очередь при прохождении через окружающий звезду ионизированный газ могут генерировать радиоволны (рис. 11). Явления такого типа, несомненно, происходят

дят в солнечной атмосфере, что приводит к радиовспышкам. Мы можем предположить, что аналогичная активность, связанная с пульсирующей поверхностью, вызывает радиовсплески от пульсара.

Когда мы в первый раз обсуждали такую возможность, перед нами стояло существенное препятствие. Вычисления указывали на то, что нейтронные звезды должны пульсировать слишком быстро с периодами порядка миллисекунд. Белые же карлики, с другой стороны, должны пульсировать слишком медленно; если бы они сжались достаточно, чтобы вибрировать с периодами короче нескольких секунд, то под действием гравитации произошел бы коллапс. Поставленные перед лицом такой диллеммы несколько теоретиков вычислили недавно, что вращающийся

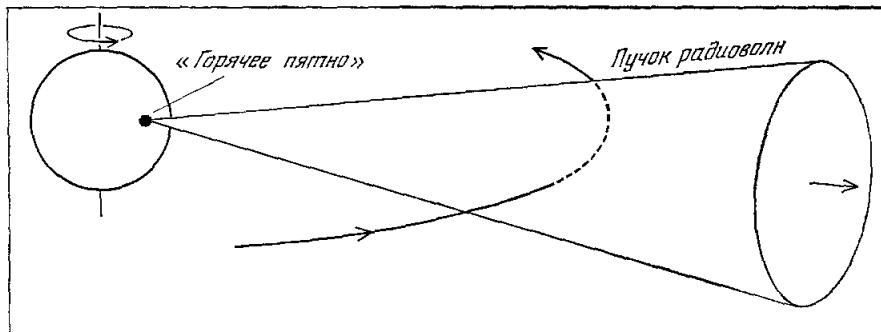


Рис. 12. Вращающийся белый карлик — одна из моделей типа «маяка», предложенных для объяснения частоты и высокой регулярности сигналов пульсаров. В этой модели, предложенной Дж. П. Острикером из Принстонского университета, радиоволны непрерывно излучаются какой-либо активной областью или «горячим пятном», расположенным на поверхности белого карлика, который вращается со скоростью соответствующей интервалу между импульсами.

белый карлик может вибрировать значительно быстрее, особенно если внутренняя часть звезды вращается быстрее, чем ее экваториальная область. Для такой модели возможны периоды порядка 0,1 сек, что вполне подошло бы для известных пульсаров.

Другие изменения в теории белых карликов состояли в предположении, что звезда пульсирует на каких-либо обертонах основного периода или что атмосфера вибрирует с более высокой частотой, связанной с более медленными вибрациями внутренней части звезды.

Для объяснения природы пульсаров было предложено много других идей, некоторые из которых можно отнести к моделям «маяка». Если радиоволны, непрерывно излучаемые какой-либо активной частью вращающейся звезды, образуют направленный пучок (диаграмму), то с Земли можно наблюдать регулярные вспышки с периодом, равным периоду вращения звезды (рис. 12). При такой точке зрения возникают трудности, если звезда является белым карликом. Если вращение белого карлика достаточно быстрое, чтобы обеспечивать наименьшие периоды для пульсаров, то он может разлететься или его поверхность будет вращаться так неравномерно, что точная последовательность импульсов станет невозможной. Однако нейтронные звезды могут вращаться со скоростями, превышающими 600 об/мин до того, как их разорвет центробежная сила.

Нейтронные звезды могут, по-видимому, иметь сильное магнитное поле, а такое поле существенно для другой модели «маяка». Магнитное поле создавало бы вокруг звезды ионизированную атмосферу (если

таковая существует), которая кружилась бы вместе со звездой, даже если эта атмосфера весьма протяжена. Томас Голд из Корнелльского университета высказал предположение, что края такой атмосферы, перед тем как «оторваться» от магнитного поля, могут двигаться со скоростью, приближающейся к скорости света. В том месте, где вращающаяся атмосфера обрывается, могут генерироваться радиоволны и образовываться, в силу релятивистских эффектов, направленные пучки (рис. 13).

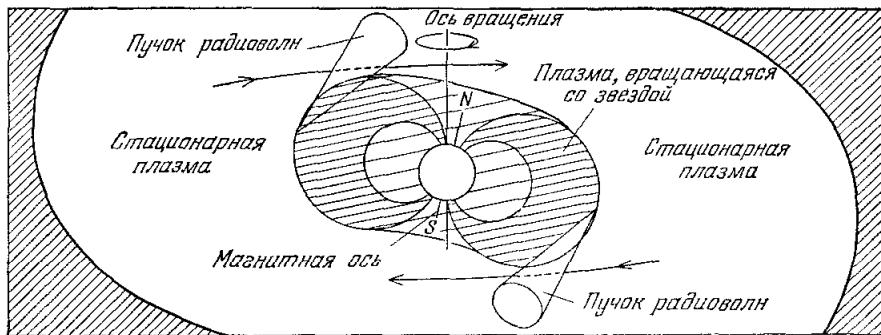


Рис. 13. Вращающаяся нейтронная звезда — модель «маяка», предложенная Томасом Голдом из Корнелльского университета. Предполагается, что магнитное поле звезды достаточно мощное, чтобы захватить окружающую плазму большой протяженности, заставив ее вращаться с такой же скоростью, как сама звезда. На периферии, где вращающаяся плазма обрывается, будут излучаться сильно направленные радиопучки.

В другой модели «маяка», предложенной У. К. Саслау, Дж. Фолкнером и Г. А. Страттматтером из Кембриджского университета, две нейтронные звезды вращаются друг относительно друга. Существует много типичных звездных пар, связанных силами гравитационного притяжения. Если нейтронные звезды вообще существуют, они также могут существовать парами. Далее, сила гравитации вблизи одиночной нейтронной звезды должна быть огромной. Это означает, что световые волны (а следовательно, и радиоволны) будут при прохождении мимо звезды отклоняться в ее сторону. Следовательно, если одна из нейтронных звезд непрерывно излучает радиоволны, то некоторые из них будут фокусироваться другой звездой пары, ее поле гравитации будет действовать как гигантская линза. В результате возникает вращающийся пучок, который может быть направлен в сторону солнечной системы (рис. 14). Большим препятствием для этой идеи является тот факт, что орбитальная скорость нейтронных звезд должна быстро падать в силу потери энергии на гравитационное излучение. Однако может быть, что тела при свободном падении не излучают гравитационных волн, — это спасло бы обсуждаемую модель *).

Можно описать еще много других предложенных моделей пульсаров. Для большинства из них возникают трудности, и ясно, что теоретикам предстоит большая работа, прежде чем выяснится природа пульсаров. В настоящее время мнение о природе пульсаров разделилось, по-видимому

*) Предположение об отсутствии гравитационного излучения при «свободном падении», высказывавшееся некоторыми авторами, может считаться строго опровергнутым, по крайней мере в рамках общей теории относительности. В этой связи, а также по другим причинам, модель пульсара — двойной нейтронной звезды представляется совершенно неприемлемой. (Прим. ред.)

му, поровну между моделями белых карликов и моделями нейтронных звезд *). Однако, независимо от того, что представляют собой пульсары, их изучение, по-видимому, становится очень существенным для различных областей астрономии. Например, значительный интерес представляет

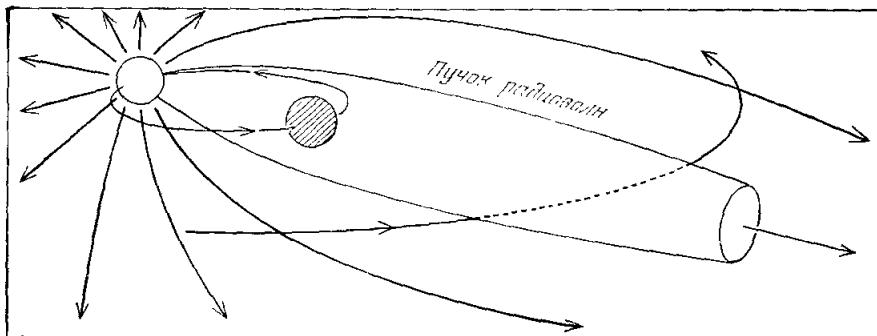


Рис. 14. Спаренные нейтронные звезды, быстро вращающиеся по орбите вокруг друг друга,— еще одна модель «маяка». Поле гравитации нейтронной звезды так велико, что оно должно отклонить и сфокусировать радиоволны, если бы они непрерывно испускались звездной парой. Различные модели «маяка» требуют, чтобы Земля оказалась случайным образом расположенной на одной линии с вращающимся радиопучком.

вопрос о том, совпадает ли астрономическое время, полученное из изучения движения небесных тел, с атомным временем, получаемым с помощью атомных часов в земных лабораториях. Может оказаться, что пульсары являются достаточно точными астрономическими часами для того, чтобы ответить на этот вопрос. Постоянство хронометра-пульсара уже достаточно для проведения непосредственной проверки общей теории относительности. Пульсары являются волнующими объектами, и мы можем ожидать от них очень многого.

Муллардская радиоастрономическая
обсерватория, Кембридж,
Великобритания

*) В середине октября 1968 г. была опубликована работа Ф. Дрейка и Г. Крафта (журнал «Nature» от 19 октября), в которой показано (по-видимому, вполне убедительным образом), что радиоизлучение пульсаров представляет собой наложение колебаний с периодом порядка 0,01 сек (речь идет об одном из пульсаров) и вращения с основным периодом, который определялся ранее и приведен в таблице на стр. 721. Смысъ этого открытия состоит в том, что подыmpульсы, наблюдаемые в пределах импульса (рис. 5 и 6), на самом деле представляют собой колебания с определенным периодом, вообще говоря, несопоставимым с основным периодом (расстоянием между импульсами). Поэтому подыmpульсы меняют свое положение в пределах импульса при переходе от одного импульса к следующим. Период порядка 0,01 сек и меньший нельзя связать с белым карликом, и речь, таким образом, идет о колебаниях нейтронных звезд (период порядка 0,01 сек имеют сравнительно менее плотные и массивные нейтронные звезды с массой порядка десятой доли массы Солнца, в то время как для нейтронных звезд с массой, близкой к массе Солнца, и ядерной плотностью период пульсаций составляет $10^{-3} - 10^{-4}$ сек). Для объяснения же основного периода остается предположить, что звезда не только пульсирует (колеблется), но и вращается. При этом излучение должно исходить только из определенных областей, скажем, магнитных полюсов или экваториальной зоны (считаем, что магнитные полюсы не совпадают с осью вращения). Тем самым приходим к комбинированной модели, в которой имеются и пульсации (предполагавшиеся в моделях пульсаров — белых карликов) и направленное излучение вращающейся звезды (предполагавшееся в моделях «маяков»). (Прим. ред.)

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Schwarzschild, *Structure and Evolution of the Stars*, Princeton University Press, 1958 (см. перевод: М., ИЛ, 1962).
2. J. D. H. Pilkington, A. Hewish, S. T. Reili, T. W. Cole, *Nature* 218 (No. 5137), 126 (1968).
3. C. D. Mackay, B. Eismore, J. A. Bailey, *Nature* 219 (No. 5149), 21 (1968).
4. B. R. Durgey, J. Faulkner, J. R. Gribbin, I. W. Roxburgh, *Nature* 219 (No. 5149), 20 (1968).
5. F. Racini, *Nature* 219 (No. 5150), 145 (1968).

Примечание редактора при корректуре. 24 февраля 1969 г. исполнился год со времени опубликования первого сообщения об открытии пульсаров. К этому времени были известны уже 28 пульсаров. Самым коротким периодом, равным соответственно 0,033 и 0,089 сек, обладают пульсары NP 0532 и PSR 0833-45. Оба они расположены внутри оболочек сверхновых звезд: пульсар NP 0532 — внутри знаменитой Крабовидной туманности, а второй упомянутый пульсар — в оболочке Веды (Паруса) X. Самый длинный период, равный 3,74 сек, имеет пульсар NP 0527, расположенный на небе вблизи Крабовидной туманности и, возможно, как-то связанный с ней.

В январе 1969 г. выяснилось, что пульсар NP 0532 в Крабе является также источником пульсирующего оптического излучения (с тем же периодом, что и в радиодиапазоне), т. е. был открыт первый оптический пульсар. Оказалось, что этот пульсар совпадает со слабой звездочкой, которая была замечена в пределах Краба и начиная с 1942 г. считалась наиболее вероятным кандидатом на роль остатка Сверхновой 1054 г., взрыв которой породил Крабовидную туманность.

Выяснилось, что период следования импульсов у пульсаров медленно возрастает. Так, для пульсара NP 0532 длительность периода возрастает на $1,4 \cdot 10^{-5}$ сек в год и период удвоится за 2400 лет. Для пульсара PSR 0833-45 период возрастает на $3,6 \cdot 10^{-6}$ сек в год и удваивается за 24 000 лет. Для ряда пульсаров с более длинными периодами также обнаружено их возрастание, но значительно более медленное: речь идет об удвоении периода за миллионы и десятки миллионов лет (например, для пульсара CP 0834 период возрастает на $1,5 \cdot 10^{-7}$ сек в год и удвоится за $8,5 \cdot 10^6$ лет).

Для короткоперiodических пульсаров NP 0532 и PSR 0833-45, находящихся в оболочках сверхновых звезд, никаких указаний на существование второго периода (периода пульсаций) не получено, и вполне возможно, что подобные колебания отсутствуют. В таком случае единственной подходящей моделью пульсаров является модель врачающейся нейтронной звезды, обладающей сильным магнитным полем. Собственно, то же можно сказать и о других случаях, но, как указывалось в примечании на стр. 731, у некоторых пульсаров, помимо вращения, появляются также пульсации с коротким периодом. Удлинение периода со временем в рамках врачающейся модели представляется вполне естественным — оно определяется просто уменьшением угловой скорости вращения звезды.