1968 г. Август **Том 95, вып. 4**

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

523.164

НАБЛЮДЕНИЕ БЫСТРО ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РАДИОИСТОЧНИКА *)

В июле 1967 г. большой радиотелескоп, работающий на частоте 81,5 *Мгц*, был передан для использования Маллардской радиоастрономической обсерватории. Этот инструмент предназначался для изучения угловой структуры компактных радиоисточников методом наблюдения их мерцаний, вызываемых неоднородной структурой межпланетной среды [1]. Первоначальный обзор охватывал значительную область неба со склонением в пределах 08° — 44°, и эта область сканировалась раз в неделю. Таким образом, бóльшая часть неба находилась под регулярным наблюдением. Вскоре после того как инструмент был приведен в действие, было замечено, что сигналы, которые казались вначале результатом слабой спорадической интерференции, наблюдаются многократно при фиксированном склонении и прямом восхождении. Этот результат показал, что происхождение источника излучения не может быть земным.

Систематические исследования были начаты в ноябре. Скоростные записи показали, что сигналы, в том случае, когда они имеют место, состоят из последовательности импульсов, каждый из которых имеет продолжительность $\sim 0{,}3$ *сек* и повторяется с периодом около 1,337 *сек*. Вскоре было установлено, что этот период выдерживается исключительно точно. Дальнейшие наблюдения показали, что истинный период остается постоянным с точностью, превышающей 10^{-7}, хотя имеются систематические изменения, которые могут быть отнесены к орбитальному движению Земли. Импульсная природа записанных сигналов выяснилась при периодическом прохождении сигнала через полосу приемника в 1 *Мгц* при изменении частоты настройки приемника. Необычный характер этих сигналов наталкивает прежде всего на мысль об их происхождении, связанном с передачами, производимыми человеком. Эти сигналы могли бы возникнуть от далеких ракет, от планетных радаров, а также вследствие отражения земных сигналов от Луны. Но ни одно из этих объяснений не может быть принято из-за отсутствия параллакса, что доказывает, что этот источник расположен далеко, за пределами Солнечной системы. Предварительное изучение возможного существования других пульсирующих источников уже привело к обнаружению трех других источников, обладающих весьма похожими свойствами. Это позволяет предположить, что такой тип источников может быть характерным для потоков малой плотности. Исходя из высокой стабильности колебаний, предлагается предварительное объяснение таких необычных источников, как колебаний белых карликов или нейтронных звезд.

КООРДИНАТЫ И ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА

Антенна состоит из прямоугольно расположенных волновых диполей, образующих 16 рядов из 128 элементов. Каждый ряд имеет длину 470 *м* в восточно-западном направлении, а в северо-южном направлении размер ряда равен 45 *м*. Для выставления антенны на заданное склонение применяется фазовое устройство, и используются четыре приемника, так что одновременно можно наблюдать четыре различных склонения. Используются приемники с фазовой модуляцией, причем две половины антенны

*) A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, R. A. Collins, Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source, Nature **217** (No. 5130), 709 (1968). Перевод Н. А. Лотовой.

В оригинале имеется резюме: «Маллардской радиоастрономической обсерваторией были зарегистрированы необычные сигналы пульсирующих радиоисточников. Это излучение, по всей вероятности, приходит от локальных объектов, расположенных в пределах нашей Галактики. Оно может быть вызвано колебаниями белых карликов или нейтронных звезд».

соединяются, образуя интерферометр в восточно-западном направлении. Каждый ряд диполей переотражается с помощью наклонного отражающего экрана, чем достигается максимальная чувствительность при склонении, равном примерно $+30°$. При

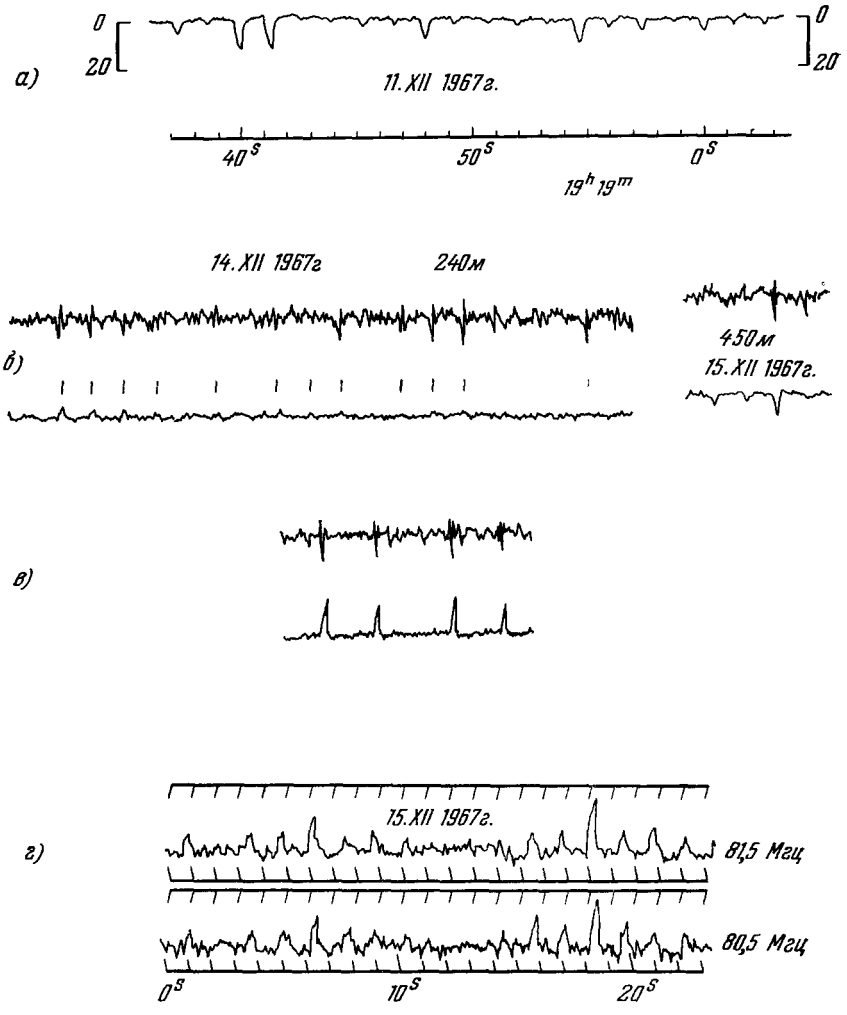

Рис. 1, *а*) Запись пульсирующего радиоисточника в случае сильного сигнала (постоянная времени приемника 0,1 *сек*). Величина максимального отклонения соответствует $20 \cdot 10^{-26}$ *вт·м*$^{-2}$ *гц*$^{-1}$. *б*) Верхняя кривая: записи, полученные с дополнительным удлинением пути в одном из плеч интерферометра (240 и 450 *м*). Нижняя кривая: обычная интерференционная запись. (Импульсы малы при $l = 240$ *м*, так как они расположены вблизи нуля интерференционной картины; на верхней кривой—это результат изменения фазы, а не амплитуды.) *в*) Смодулированные импульсы, полученные при использовании генератора сигналов. *г*) Одновременный прием импульсов при использовании одинаковых приемников, настроенных на разные частоты. Импульсы на наименьшей частоте отстают на 0,2 *сек*.

выставлении антенны на склонение свыше $+90°$ и ниже $-5°$ чувствительность уменьшается более чем на половину. Ширина диаграммы антенны по половине мощности равна примерно $\pm 30'$ для прямого восхождения и $\pm 3°$ в склонении. Фазовое устрой-

ство предназначено для получения диаграммы примерно с 3°-ными интервалами в склонении. Приемники имеют полосу шириной 1 *Мгц*, настроенную на частоту 81,5 *Мгц*. Обычные записи делаются с постоянной времени 0,1 *сек*. Среднеквадратичные шумовые флуктуации соответствуют плотности потока $0{,}5 \cdot 10^{-26}$ *вт/м*^{2} *гц*.

Для подробного изучения пульсирующих источников обычно использовалась постоянная времени 0,05 *сек*. Сигналы выводились на многоканальный самописец «Rapidgraph» с постоянной времени 0,03 *сек*. Точность измерения момента появления импульсов достигалась путем записи секундных меток времени от радиостанции MSF Rugby.

Записи, полученные, когда пульсирующий источник был необычно сильным, приведены на рис. 1, *а*. Они отчетливо иллюстрируют регулярную периодичность сигналов, а также характер нерегулярных изменений амплитуды импульсов. В этих примерах наиболее мощные импульсы достигают максимальной плотности потока (усредненной по полосе 1 *Мгц*) $20 \cdot 10^{-26}$ *вт·м*$^{-2}$ *гц*$^{-1}$, в то время как средняя плотность потока, усредненная за 1 *мин*, примерно равна лишь $1{,}0 \cdot 10^{-26}$ *вт·м*$^{-2}$ *гц*$^{-1}$.

Более характерный случай для средней плотности потока соответствует величине, которая в несколько раз меньше приведенной в предыдущем примере. Поэтому не удивительно, что этот источник не был обнаружен раньше, поскольку в прежних наблюдениях эта средняя плотность потока была ниже уровня, доступного для наблюдений в обзорах на метровых волнах.

Координаты источника при прямом восхождении легко получить по точным измерениям точек пересечения лепестков интерференционной картины, когда импульсы непрерывно заполняют весь интервал. Калибровочная ошибка инструмента определялась по аналогичным измерениям близлежащего источника 3С 409, который проходил спустя 52 *мин*.

На обычных записях, где источник был обнаружен впервые, точность составляла лишь $\pm 10^s$. Поэтому первые записи, пригодные для определения координат, были получены только 13 августа 1967 г. Эти и все последующие измерения находятся в пределах необходимой точности. Координата склонения определена не очень точно. Она определена при наблюдении сигналов, когда принимающая антенна была направлена на склонение 20, 23 и 26°. Объединяя результаты всех измерений, можно получить следующие координаты:

$$\alpha_{1950} = 19^h 19^m 38^s \pm 3^s,$$
$$\delta_{1950} = 22°00' \pm 30'.$$

Отметим, что измерения допплеровского смещения наблюдаемой частоты импульсов, связанного с орбитальным движением Земли, позволяют определить склонение другим, независимым способом. Такие наблюдения в течение одного года обеспечивают точность $\pm 1'$. Величина, которая получена в настоящее время по наблюдениям в декабре-январе, равна $\delta = 21°58' \pm 30'$, что согласуется с предыдущими результатами.

ЗАВИСИМОСТЬ ФЛУКТУАЦИЙ ОТ ВРЕМЕНИ

Как уже отмечалось, величина сигналов испытывает значительные ежедневные изменения. Обычно сигналы наблюдаются на протяжении около 1 *мин*, которая расположена совершенно случайно в 4-минутном интервале, доступном для принимающей антенны. Помимо этого, амплитуда импульсов, как показано на рис. 1, *а*, может существенно изменяться на секундном масштабе времени. По-видимому, изменения за время около одного периода могут быть объяснены за счет межпланетных мерцаний [1]. Но ими нельзя объяснить минутные флуктуации средней амплитуды импульсов. Были осуществлены длительные, на протяжении 30 *мин*, наблюдения за источником путем сопровождения источника в восточно-западном направлении рефлектором 470 × 20 *м* обычно используемым в программе лунных затмений. На протяжении 30 *мин* максимум амплитуды импульсов усреднялся по десяти последовательным импульсам, как показано на рис. 2, *а*. Этот график позволяет предположить наличие периодичности продолжительностью в несколько минут, однако корреляционный анализ не подтвердил это предположение. Если бы сигнал был линейно поляризован, то фарадеевское вращение в ионосфере могло бы вызвать случайные изменения интенсивности. Но форма кривой не согласуется с таким механизмом. Ежедневные изменения интенсивности источника, которые были обнаружены впервые, приведены на рис. 2, *б*. Для изучения этой зависимости была выбрана величина, характерная для каждого дня. В качестве такой величины принимается максимальная плотность потока от наиболее мощного импульса. Зависимость изменения этой величины от дня наблюдения является статистической, и совершенно очевидно, что нет никаких систе-

матических изменений, однако имеется предположение о том, что в течение октября-ноября источник был значительно слабее. По-видимому, несмотря на регулярный

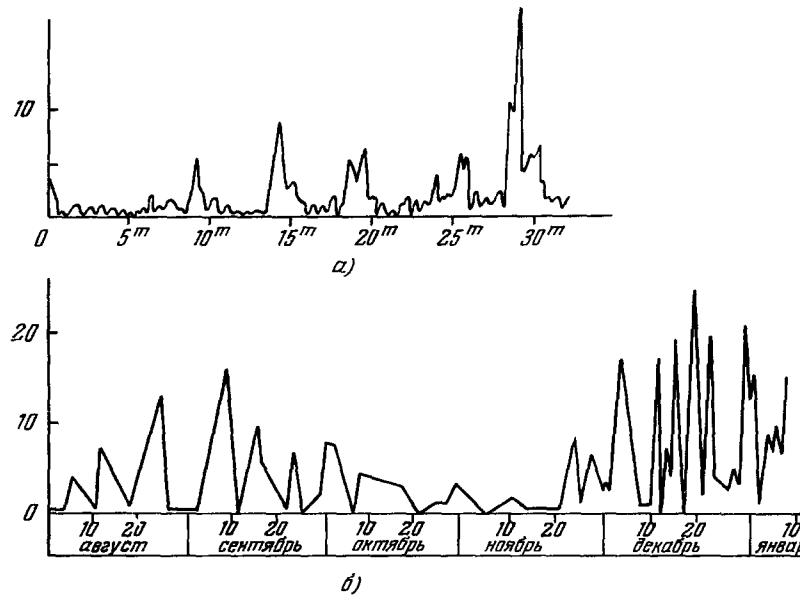

Рис. 2, *а*) Зависимость изменения усредненной (по 10 импульсам) амплитуды импульса от времени. *б*) Ежедневные изменения максимальной амплитуды импульса (ордината отсчитана в единицах *вт·м*$^{-2}$ *гц*$^{-1}$).

характер появления импульсов, величина излучаемой интенсивности испытывает изменения с коротким и длинным периодами.

МГНОВЕННАЯ ШИРИНА ЛИНИИ СИГНАЛА И ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО ЧАСТОТЫ

Два разных эксперимента показали, что импульсы представляют собой узкополосные сигналы с убывающей частотой, которая попадает в полосу приемника шириной 1 *Мгц*. В первом методе использовались два одинаковых приемника, настроенные на частоты 80,5 и 81,5 *Мгц* соответственно. Рис. 1, *г* иллюстрирует записи, полученные с помощью такой системы. Он показывает, что импульсы с наименьшей частотой запаздывают на 0,2 *сек*. Это соответствует изменению частоты ~5 *Мгц/сек*. Во втором методе время задержки сообщалось сигналам, поступающим в приемник от одной половины антенны. Это достигалось благодаря подключению одного плеча интерферометра к особому кабелю с известной длиной *l*. Кабель обеспечивал фазовый сдвиг, пропорциональный частоте, так что от сигнала, у которого когерентный путь превышал *l*, на выходе приемника получались колебания с периодом

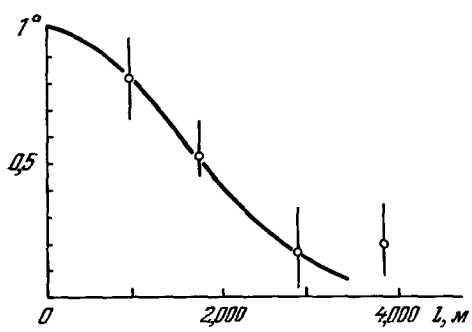

Рис. 3. Отклик как функция дополнительного пути в одном из плеч интерферометра.

$$t_0 = \frac{c}{l}\left(\frac{d\nu}{dt}\right)^{-1},$$

где $\frac{d\nu}{dt}$ — скорость изменения частоты сигнала. Записи, полученные для $l = 240$ и 450 *м*, приведены на рис. 1, *б* наряду с одновременной записью импульсов, полученной на приемнике с фазовой модуляцией, работающем от такого же кабеля обычным образом. На рис. 1, *в* показана также смоделированная запись, полученная при помощи точно такого же устройства, только работающего не от источника, а от генератора

сигналов. При наблюдении с $l > 450$ *м* периодические колебания смещались постепенно вниз, до наименьшей частоты при помощи устройства, дополнительно сдвигающего фазу, чтобы воспрепятствовать сильному поглощению сигнала на выходе за время, равное постоянной приемника. Скорость изменения частоты сигнала, полученная для требуемого дополнительного смещения фазы, равна $\frac{d\nu}{dt} = -4{,}9 \pm 0{,}5$ *Мгц·сек*$^{-1}$. Направление дрейфа частоты может быть определено по колебаниям фазы на записи. Оно направлено в сторону уменьшения частоты и находится в полном соответствии с первым результатом.

Мгновенная ширина линии сигнала тоже может быть определена из записей типа приведенных на рис. 1, *б*, так как колеблющийся отклик, завися от времени задержки, является мерой корреляционной функции и, следовательно, для разложения Фурье — спектром интенсивности излучения. Результаты измерений представлены на рис. 3, откуда мгновенная ширина линии сигнала для $1/e$, в предположении гауссова распределения энергетического спектра, получается равной 80 ± 20 *кгц*.

ЧАСТОТА ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ И ДОППЛЕРОВСКИЙ СДВИГ

При появлении импульсов и меток времени от радиостанции MSF Rugby на некоторых записях время появления переднего края импульса, имеющего характерный размер, может быть определено с точностью до 0,1 *сек*. Наблюдения на протяжении шести часов, проведенные при помощи следящей системы, о которой упоминалось выше, позволяют получить период между импульсами $P_{\text{набл}} = 1{,}33733 \pm 0{,}00001$ *сек*. Эта величина является средней и относится к 18 декабря 1967 г. к 14^h18^m по всемирному времени. Исследование регулярного смещения частоты импульсов было выполнено по данным ежедневного измерения временнóго интервала T между меткой времени и непосредственно следующим за ней импульсом, как это показано на рис. 4. Стандартная метка времени была выбрана равной $14^h01^m00^s$ всемирного времени для 11 декабря (что соответствует центральной точке у приемной антенны). Последующие стандартные метки времени находились в интервале до $23^h56^m04^s$ (что соответствует одному звездному дню). График ежедневных изменений T показан на рис. 4. Постоянство частоты повторения импульсов должно сказаться в линейном возрастании или убывании T, если позаботиться о добавлении или вычитании одного периода там, где это необходимо. Однако наблюдения обнаруживают заметную кривизну в зависимости постепенного возрастания частоты.

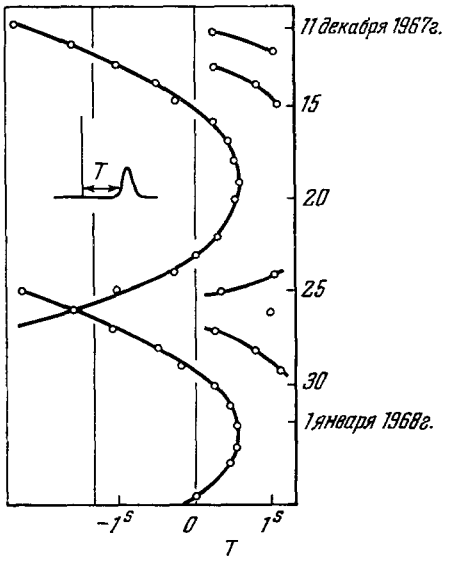

Рис. 4. Ежедневные изменения времени прихода импульса.

Если принять, что допплеровский сдвиг связан только с движением Земли, то число импульсов, принятых за один день, будет равно

$$N = N_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos\varphi \cdot \sin\frac{2\pi n}{366 \cdot 25}\right),$$

где N_0 — число импульсов, излучаемых источником за один день, v — орбитальная скорость Земли, φ — широта источника относительно плоскости эклиптики и n — число произвольного дня, которое вычисляется из условия $n = 0$ для 17 января 1968 г., когда скорость Земли в направлении луча зрения на источник была равной нулю. Это соотношение является приближенным, так как оно предполагает круговую орбиту Земли. Кроме того, начало $n = 0$ не является точным. Тем не менее, это соотношение вполне пригодно для того, чтобы показать, что наблюдаемое возрастание N в пределах достижимой точности может быть объяснено только движением Земли. Для этого удобно найти такие значения n, для которых $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$. Это имеет место при $n_1 = 15{,}8 \pm 0{,}1$ и $n_2 = 28{,}7 \pm 0{,}1$, и, так как между этими датами N возрастает

на один импульс, мы получим

$$1=\frac{N_0 v}{c}\cos\varphi\cdot\left(\sin\frac{2\pi n_2}{366\cdot 25}-\sin\frac{2\pi n_1}{366\cdot 25}\right),$$

что дает $\varphi = 43°36' \pm 30'$. Это соответствует склонению $21°58' \pm 30'$, что согласуется со значением, полученным непосредственно. Истинная периодичность источника, вычисленная с учетом допплеровского смещения, равна

$$P_0 = 1{,}3372795 \pm 0{,}0000020 \text{ сек}.$$

Если наблюдать момент появления импульсов на протяжении года, то можно определить постоянную N_0 с точностью до $1/3\cdot 10^8$. Если N_0 действительно является постоянной величиной, то склонение источника может быть определено с точностью до $\pm 1'$, причем на этот результат не влияет ионосферная рефракция.

Интересно отметить также, что в принципе существует возможность обнаружения изменений допплеровского смещения, которое связано с движением самого источника. Такого рода эффект мог бы иметь место, если источник представлял бы собой одну из компонент двойной системы или если сигналы посылались бы с планеты, которая вращается вокруг основной звезды. Пока что систематическое возрастание N является регулярным с точностью до $1/2\cdot 10^7$ не имеется данных о дополнительном орбитальном движении источника, аналогичном движению Земли.

ПРИРОДА РАДИОИСТОЧНИКА

Отсутствие параллакса, превышающего $2'$, означает, что источник расположен на расстоянии, большем 10^3 а.е. Энергия, излучаемая источником в одном импульсе на частоте 81,5 *Мгц*, в полосе 1 *Мгц* превышает 10^{17} *эрг* при изотропном излучении источника. Кроме этого, можно определить еще верхний предел физических размеров источника. Малая мгновенная ширина линии сигнала (80 *кгц*) и скорость изменения частоты ($-4{,}9$ *Мгц·сек*$^{-1}$) показывают, что продолжительность излучения на любой заданной частоте не превышает 0,016 *сек*. Поэтому размеры источника не могут превышать $4{,}8\cdot 10^3$ *км*.

Верхний предел расстояния до источника может быть определен по наблюдаемой скорости изменения частоты, так как пульсирующее излучение, какова бы ни была его природа, должно испытывать дисперсию вследствие прохождения его сквозь ионизованный водород межзвездной среды. Для однородной плазмы изменение частоты, связанное с дисперсией, определяется соотношением

$$\frac{d\nu}{dt}=-\frac{c}{L}\frac{\nu^3}{\nu_p^2},$$

где L — путь в межзвездном пространстве, ν_p — собственная частота плазмы. Задаваясь средним значением плотности 0,2 *эл·см*$^{-3}$, легко показать, что наблюдаемый дрейф частоты ($-4{,}9$ *Мгц·сек*$^{-1}$) соответствует расстоянию $L \sim 65$ *псек*. Конечно, некоторая дисперсия может возникать в самом источнике. В этом случае дисперсия в межзвездной среде должна быть меньше, поэтому вычисленное значение L является верхним пределом. Хотя межзвездная плотность электронов в районе Солнца не известна достаточно точно, тем не менее полученный результат является очень важным. Он показывает, что пульсирующие радиоисточники являются локальными объектами, которые расположены в пределах галактического масштаба расстояний. Точность определения координат не позволяет сколько-нибудь серьезно произвести оптическое отождествление. Исследуемая область неба расположена вблизи галактической плоскости и содержит 2 звезды 12-й величины, а также огромное число более слабых объектов. Отсутствие других данных позволяет сделать только самое предварительное высказывание относительно природы этих удивительных источников.

Наиболее существенная особенность, которая должна быть объяснена, состоит в исключительной стабильности импульсов. Это наводит на мысль о том, что их происхождение скорее связано с колебаниями всей звезды в целом, а не с локальными возмущениями в атмосфере звезды. В этой связи интересно отметить, что, как уже говорилось [2,3], радиальные пульсации нейтронных звезд могут играть важную роль в истории сверхновых и их остатков.

Недавно Мельцером и Торном [4] было проведено исследование обычных мод для радиальных пульсаций компактных звезд. Ими были вычислены периоды для звезд, у которых плотность в центре изменялась в пределах от 10^5 до 10^{19} *г·см*$^{-3}$. Рис. 4 статьи [4] означает, что для наблюдаемых периодов порядка 1 *сек* могут иметь место две возможности. Для плотности 10^7 *г·см*$^{-3}$, которая соответствует звезде белого карлика, основная мода имеет минимальный период около 8 *сек*. При незначительном увеличении плотности период возрастает, при этом система переходит вследствие гравитационного коллапса в нейтронную звезду. Так как основной период слишком

велик, для объяснения наблюдений можно было бы привлечь более высокие моды, которые имеют меньшие периоды. Однако, если принять эту модель, то трудно понять, почему отсутствует основной период. В наших наблюдениях такой период был бы легко обнаружим, и его отсутствие не может быть приписано эффектам наблюдения. Другая возможность может иметь место при плотности 10^{13} *г·см*$^{-3}$, что соответствует нейтронной звезде. При такой плотности основной период будет порядка 1 *сек*, однако при плотностях, превышающих 10^{13} *г·см*$^{-3}$, период быстро убывает до 10^{-3} *сек*.

Если допустить, что излучение связано с радиальными колебаниями белых карликов или нейтронных звезд, то возможны несколько механизмов, с помощью которых можно объяснить радиоизлучение. Естественно предположить, что радиальные колебания генерируют на поверхности звезды гидромагнитные ударные фронты, которые должны сопровождаться всплесками рентгеновских лучей и энергичных электронов [2, 3]. В этом случае излучение будет напоминать радиовсплески от солнечных вспышек, которые будут охватывать всю поверхность звезды. Такая модель должна быть согласована с тем, что верхний предел размера источника $5\cdot10^3$ *км*, что не противоречит средней величине $9\cdot10^3$ *км*, приводимой для белых карликов Гринстейном [5]. Энергетические требования к такой модели могут быть легко определены, исходя из того, что полная энергия, излучаемая в полосе 1 *Мгц* солнечным всплеском III типа, вызывает требуемый радиопоток в том случае, когда источник удален на расстояние $\sim 10^3$ а.е. Если предположить, что энергия радиоизлучения связана с общей энергией выброса $\sim 10^{32}$ *эрг*[6] так же, как у солнечных всплесков, и предположить еще, что каждый импульс соответствует одному выбросу, то требуемая энергия будет равна $\sim10^{39}$ *эрг/год*. Для расстояния 65 *псек* соответствующая величина будет равна $\sim10^{47}$ *эрг/год*. Было установлено, что нейтронная звезда может содержать в модах колебания $\sim10^{51}$ *эрг*, так что требуемая энергия является, по-видимому, приемлемой, хотя, если учитывать время жизни источника[4], вероятно, должны играть важную роль другие механизмы.

Характерный дрейф частоты излучения напоминает солнечные всплески II и III типов, однако кажется маловероятным, чтобы он происходил таким же образом. Для белых карликов и нейтронных звезд масштаб высоты для любой атмосферы мал, и следует ожидать, что прохождение возмущения вызовет значительно более быстрый дрейф частоты, чем наблюдаемый в действительности. Как уже отмечалось, более вероятная возможность заключается в том, что импульсное излучение претерпевает дисперсию во время прохождения межзвездной среды.

Совершенно очевидно, что для бо́льшего понимания этого поразительного, нового класса радиоисточников, необходимо больше данных наблюдений. Если подтвердится предполагаемое происхождение излучения, то можно ожидать, что прольется свет на свойства компактных звезд, а также на свойства материи с огромной плотностью.

Маллардская радиоастрономическая обсерватория,
Кавендишская лаборатория,
Кембриджский университет, Великобритания

Э. Хьюиш, С. Белл,
Дж. Пилкингтон,
П. Скотт, Р. Коллинс

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. Hewish, P. F. Scott, D. Wills, Nature **203**, 1214 (1964).
2. A. G. W. Cameron, Nature **205**, 787 (1965).
3. A. Finzi, Phys. Rev. Lett. **15**, 599 (1965).
4. D. W. Meltzer, K. S. Thorne, Astrophys. J. **145**, 514 (1966).
5. J. L. Greenstein, Handb. Phys., **50**, 161 (1958).
6. C. E. Fichtel, F. B. McDonald, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. **5**, 351 (1967).

523.038

НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О МЕЖПЛАНЕТНОМ ПОЛЕ И МАГНИТОСФЕРЕ

I. СТРУКТУРА МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ. РАЗРЫВЫ

Среди всех характеристик космической плазмы наиболее точно измеряется в настоящее время магнитное поле. И для количественного описания космической плазмы на уровне дифференциальных уравнений и их решений теория сопоставляется прежде всего с измерениями поля.