

**В. Л. Гинзбург. Пульсары (общий обзор)**

Об открытии пульсаров было сообщено 24 февраля 1968 г. (перевод соответствующей работы был помещен в УФН <sup>1</sup>). Через год после этого (к началу марта 1969 г.) появилось уже 214 статей, посвященных пульсарам (в их числе 12 статей советских авторов). Возможно, что используемые здесь библиографические данные <sup>2</sup> не совсем полны, но они в общем характеризуют масштабы и темпы исследования пульсаров. Представленный обзорный доклад, помимо введения, состоит из следующих разделов:

1. Основные данные о пульсарах.
2. Использование пульсаров в астрономии и физике.
3. Природа пульсаров.
4. Механизм излучения пульсаров.

Проблема пульсаров уже несколько раз была освещена на страницах УФН<sup>1, 3, 4</sup>. В связи с этим ниже внимание концентрируется на новых результатах.

1. Докладчику известно об обнаружении 37 пульсаров. При этом период  $\tau_1$  вновь открытых пульсаров не выходит за пределы, известные к концу 1968 г. Так, самыми короткими периодами 0,033 и 0,089 сек обладают пульсары NP 0532 и PSR 0833-45, находящиеся в оболочках сверхновых звезд (речь идет соответственно о Крабовидной туманности — оболочке сверхновой 1054 г. и туманности Парус (Вела) X). Самым длинным периодом  $\tau_1 = 3,75$  сек обладает пульсар NP 0527. Специально поставленные измерения свидетельствуют о том, что пульсаров с более длинными периодами и доступной для наблюдения мощностью совсем нет или, во всяком случае, их весьма мало. Имеются основания полагать, что такой результат связан с уменьшением радиосветимости (мощности радиоизлучения) пульсаров с увеличением их периода. Для пульсаров — вращающихся нейтронных звезд (возможно, что таковы все пульсары; см. ниже) период  $\tau_1$ , чаще обозначаемый через  $P$  или  $P_1$ , есть период вращения, и он увеличивается с течением времени в связи с уменьшением кинетической энергии вращения. Тем самым пульсары с большими  $\tau_1$  являются старыми. Что же касается, например, пульсара NP 0532, то ему всего 915 лет и он действительно обладает наименьшим значением  $\tau_1$  и наибольшим значением  $d\tau_1/dt = 1,35 \cdot 10^{-5}$  сек/год. Для старых пульсаров  $d\tau_1/dt \sim 10^{-8} - 10^{-7}$  сек/год. «Время жизни» пульсаров, наблюдаемых существующими методами радиосточников, порядка  $10^7$  лет.

Общее количество пульсаров в Галактике  $N_p \sim 10^5$  (в случае квазизотропной или «ножевой» диаграммы направленности излучения) и  $N_p \sim 10^6$  для «карадашной» диаграммы направленности. Эти данные не противоречат предположению о том, что пульсары образуются при каждом или при значительной части взрывов сверхновых звезд (сверхновые появляются в Галактике в среднем раз в 30—60 лет).

У пульсара PSR 0833-45 между 19 февраля и 13 марта 1969 г. произошло уменьшение периода вращения на  $1,96 \cdot 10^{-7}$  сек (до и после указанных дат период пульсара возрастал на  $10,65 \cdot 10^{-9}$  сек за сутки). Подобное уменьшение периода пытаются объяснить уменьшением момента инерции звезды (в связи с изменением уравнения состояния и формы звезды) или наличием дифференциального вращения, которое может оказаться неустойчивым.

Для того же пульсара PSR 0833-45 в оболочке Парус (Вела) X проведены наблюдения поляризации излучения на высоких частотах: 1420, 1720 и 2700 Мгц. Поляризация оказывается линейной и, например, на частоте 1720 Мгц ( $\lambda = 17,4$  см) составляет  $95 \pm 5\%$ . При этом электрический вектор в течение импульса поворачивается примерно на  $90^\circ$ .

Особенно важные данные получены для пульсара NP 0532 в Крабовидной туманности, находящейся от нас на расстоянии  $R = 1500 \pm 200$  пс. Радиопульсар в Крабовидной туманности, видимо, окружен радиоизлучающей оболочкой с размером  $r \sim 10^{16}$  см, и именно эта оболочка представляет собой обнаруженный ранее компактный радиосточник. Спектры радиоизлучения самой туманности, компактного источника и пульсара ясны из рис. 1, предоставленного нам Л. И. Матвеевко и Н. А. Лотовой<sup>5</sup>.

Пульсар NP 0532 или, точнее, отвечающий ему объект обнаружен также в оптическом и рентгеновском диапазонах (см. рис. 2 и 3, взятые соответственно из работ<sup>6, 7</sup>). В оптике (интервал 3400—8300 Å), согласно<sup>7</sup>, спектр пульсара почти не зависит от частоты, средняя по времени светимость объекта  $L_0 \approx 6 \cdot 10^{33}$  эрг/сек, что в полтора раза выше светимости Солнца ( $L_\odot = 3,86 \cdot 10^{33}$  эрг/сек). Обнаружена линейная поляризация оптического излучения, составляющая 15—20%. В рентгеновской области

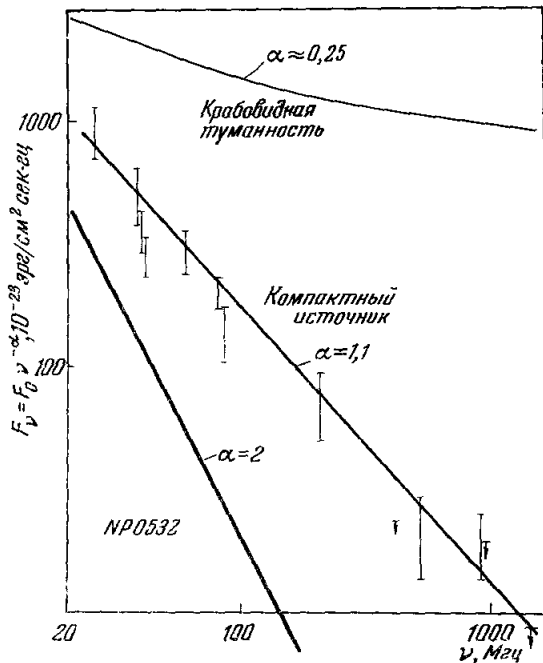


Рис. 1.

(энергия фотонов  $E_x$  в интервале 1,5—10 кэв)  $L_x \approx 6 \cdot 10^{35}$  эрг/сек, что составляет 9% светимости всей туманности (в том же диапазоне; отметим также, что светимость пульсара везде вычислена в предположении об изотропности его излучения; об учете диаграммы направленности см. в 4). Полная светимость Крабовидной туманности

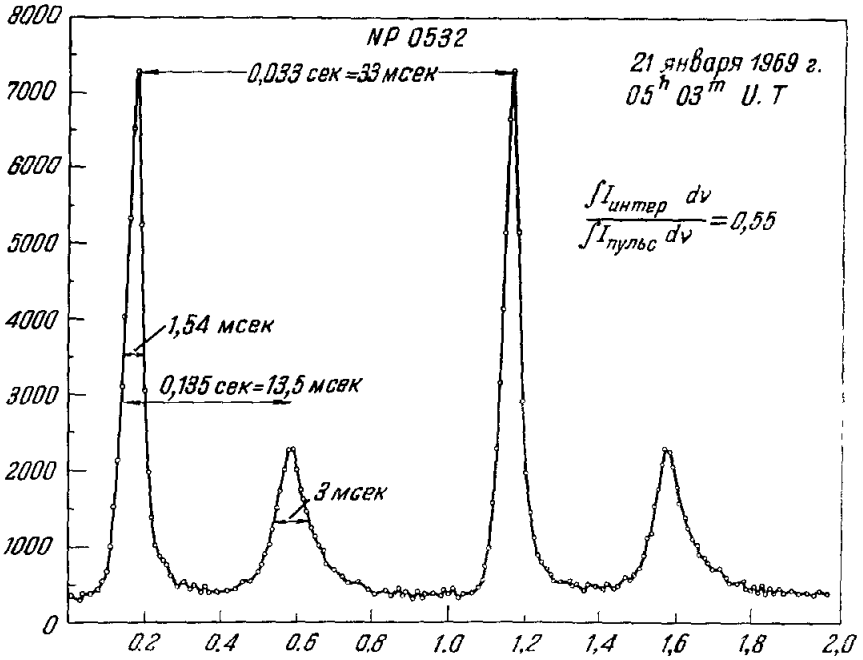


Рис. 2.

$L = 9 \cdot 10^{37}$  эрг/сек, причем на область  $1 \text{ кэв} < E < 500 \text{ кэв}$  приходится светимость  $L_x = 10^{37}$  эрг/сек. Таким образом, пульсар в Крабе излучает в основном (в смысле мощности излучения) рентгеновские лучи, причем за период излучаются два импульса.

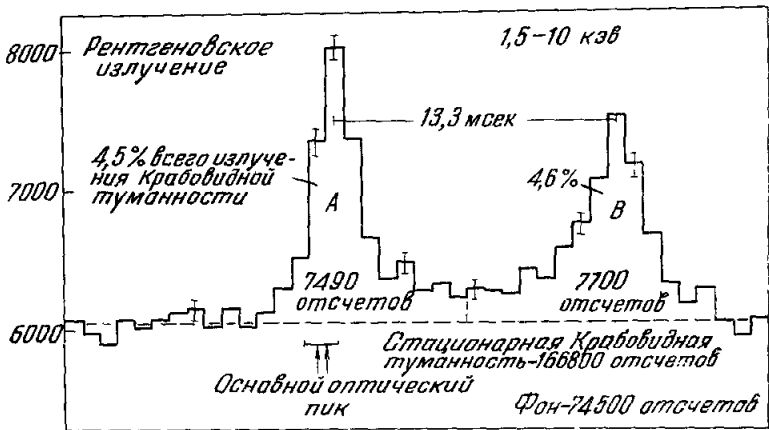


Рис. 3.

или, как их часто называют, пульса (в оптической части спектра один из импульсов существенно слабее другого, как это ясно из рис. 2, и называется «интерпульсом»). Отметим в заключение, что оптический пульсар в Крабе (несомненно, это же относится к радио- и рентгеновскому пульсарам в связи с точным совпадением их периодов) отождествлен со звездой, расположенной вблизи центра Крабовидной туманности. При

этом речь идет именно о той звезде, которую Бааде и Минковский, начиная с 1942 г., считали остатком сверхновой 1054 г.

Пульсар NP 0527 находится на расстоянии около  $1^\circ$  от Крабовидной туманности. Если эти данные будут подтверждены (а это необходимо, так как еще не вполне исключено, что пульсар NP 0527 находится значительно ближе к Крабовидной туманности), то скорее всего пульсары NP 0532 и NP 0527 не связаны между собой. Решающая проверка возможности того, что пульсар NP 0527 выброшен из Крабовидной туманности, состояла бы в измерении его угловой скорости (если пульсар NP 0527 был выброшен из Крабовидной туманности в 1054 г. и находится сейчас на расстоянии в  $1^\circ$  от туманности, то его скорость равна 0,1 с, что отвечает перемещению на небесной сфере, равному  $4''$  за год).

2. Использование пульсаров в астрономии в первую очередь связано с возможностью определять  $\int n_e dl$  и  $\int n_e H_{||} dl$  на пути между пульсаром и Землей ( $n_e$  — электронная концентрация,  $H_{||}$  — параллельная лучу зрения слагающая магнитного поля). Далее следует упомянуть возможность в известных пределах исследовать неоднородности концентрации  $n_e$  в межзвездном пространстве и в солнечной сверхкороне, а также получать сведения о движении этих неоднородностей. Особо нужно указать на некоторые астрометрические и геодезические задачи, к решению которых можно привлечь наблюдение пульсаров<sup>8</sup>.

При прохождении вблизи Солнца электромагнитный импульс не только отклоняется, но и претерпевает дополнительное запаздывание. Этот эффект общей теории относительности уже наблюдали (с незначительной точностью) при радиолокации планет. Для той же цели и, возможно, более успешно можно использовать пульсары (так, для пульсара CP 0950 обусловленное гравитационным полем Солнца запаздывание импульса должно составлять  $5 \cdot 10^{-5}$  сек/год<sup>8</sup>). Отметим, наконец, такой результат: из одновременности (точность  $\sim 10^{-4}$  сек) пульсов света разной частоты от пульсара NP 0532 следует, что в видимом диапазоне скорость света в высокой степени не зависит от частоты ( $\Delta c/c < 5 \cdot 10^{-16}$ ).

3. Природу пульсаров как астрономических объектов определяют два обстоятельства: высокое постоянство периода  $\tau_1$ , лежащего в интервале 0,033—3,75 сек, и малая длительность импульсов  $\Delta\tau \sim 1-50$  мсек. По последней причине характерный для пульсаров размер (область усиления<sup>4</sup>, а в оптическом диапазоне, видимо, и сам размер пульсара)  $l \sim c \Delta\tau$  составляет  $3 \cdot 10^7$  см (это значение получается при  $\Delta\tau \sim 1$  мсек; фактически в некоторых случаях заметны и более мелкие детали и, следовательно,  $l \ll 10^7$  см). Период колебаний звезд белых карликов, вообще говоря, выше или порядка 1 сек (для основного тона). Вращаться с существенно большей частотой белый карлик также не может. Для нейтронных звезд период колебаний  $\tau_p \ll 10^{-2}$  сек, а период вращения  $\tau_r \gg 10^{-3}$  сек. Уже отсюда ясно, что по крайней мере часть пульсаров представляет собой вращающиеся нейтронные звезды. Встречающаяся в литературе гипотеза о том, что речь идет о двойной системе, причем период пульсаров  $\tau_1$  есть период орбитального движения, представляется совершенно неприемлемой. Дело в том, что двойная система с нужным периодом должна давать мощное гравитационное излучение, приводящее к быстрому уменьшению периода. Допущение же об отсутствии гравитационного излучения противоречит не только общей теории относительности, но и другим сколько-нибудь реалистическим теориям гравитационного поля.

Могут ли пульсары оказаться объектами нового типа, аналогичного квазарам (речь идет, например, о квазистационарных вращающихся массивных звездах с сильными магнитными полями<sup>4</sup>)? Хотя такое допущение не полностью исключено, для него не видно пока никаких оснований. Могут ли существовать пульсары разных типов (нейтронные звезды, белые карлики)? Такая возможность не исключена (конкретно, пульсары с  $\tau_1 \gg 1$  сек могли бы оказаться вращающимися белыми карликами или пульсирующими и вращающимися белыми карликами). Однако в настоящее время ничто не противоречит, видимо, отождествлению всех известных пульсаров с вращающимися намагниченными нейтронными звездами.

Сейчас известен лишь один оптический и рентгеновский пульсар NP 0532 (для пульсара в Парусе X имеется лишь довольно неуверенное указание на существование очень слабого оптического сигнала). Возможно, что оптическое (и рентгеновское) излучение пульсаров достаточно сильно лишь на ранних стадиях их эволюции и притом всегда сопровождается достаточно мощным радиоизлучением. Если это так, то оптические пульсары должны быть большой редкостью (здесь существенно также наличие межзвездного поглощения света, препятствующего оптическим наблюдениям весьма большого количества источников). Нам не представляется, однако, исключенной и другая возможность — существование оптических и рентгеновских пульсаров, практически не заметных в радиодиапазоне. Даже пример пульсара в Крабовидной туманности не противоречит этому допущению, ибо его радиосветимость на несколько порядков ниже оптической и рентгеновской светимостей (см. выше). Радиоволны, веро-

ятно, исходят от областей, более удаленных от поверхности звезды; при соответствующих условиях радиосветимость этих областей может быть небольшой. Таким образом, несомненно, следует искать оптические и рентгеновские пульсары не только среди радиопульсаров. Подтверждение этой точки зрения можно видеть в том, что рентгеновский пульсар в Крабовидной туманности фактически наблюдался<sup>9</sup> еще в 1967 г. Однако авторы измерили лишь средний поток и не обработали своих наблюдений с точки зрения поиска пульсаций потока рентгеновских лучей. Они сделали это только после открытия рентгеновского пульсара в апреле 1969 г. Другим аргументом в том же отношении может служить аналогия с квазарами (КЗР). Квазары были открыты как радиоисточники, а затем отождествлены с оптическими квазизвездными объектами (ОКЗО). В дальнейшем оказалось, однако, что только около 1% ОКЗО дают мощное радиоизлучение. Большинство же ОКЗО (их называют также КЗГ — квазизвездными галактиками) наблюдается лишь в оптическом диапазоне. Наконец, нужно отметить, что и открытие радиопульсаров было обусловлено применением адекватной методики — радиотелескопа, обладающего очень высокой чувствительностью на метровых волнах и, что не менее важно, приспособленного для регистрации быстропеременных сигналов (т. е. обладающего малой постоянной времени). В случае оптических наблюдений методика, с помощью которой можно обнаружить оптические пульсары, в прошлом не применялась (да это было и нелегко сделать).

4. Отождествление пульсаров с нейтронными звездами, с одной стороны, является открытием первостепенной важности. С другой стороны, это только начало пути. Для сколько-нибудь полного понимания проблемы пульсаров, даже если оставаться только на базе модели вращающейся нейтронной звезды, предстоит еще решить целый ряд задач.

а) Необходимо развить теорию нейтронных звезд с учетом их вращения и наличия магнитного поля. Существенен вопрос об угле между магнитным моментом звезды и ее осью вращения, о зависимости поля от времени (релаксации). Возникает проблема колебаний в атмосфере и магнитосфере вращающейся звезды. Нужно иметь, кроме того, в виду, что теория нейтронных звезд без учета влияния вращения и поля также далека от завершения в связи с недостаточной ясностью вопроса об уравнении состояния вещества с плотностью  $\rho > 10^{12}$  г/см<sup>3</sup> (упомянем, в частности, о возможной сверхтекучести и сверхпроводимости этого вещества<sup>10</sup>, что обычно не учитывалось).

б) Если обладающая магнитным полем звезда вращается, то в известных условиях ее магнитосфера не может следовать за звездой и будет «отрываться». Именно рассмотрение такого «отрыва» и сопутствующих ему явлений лежит в основе наиболее популярных сейчас моделей пульсаров<sup>11</sup>. Нужно, однако, подчеркнуть, что вопрос здесь лишь поставлен. Как условия отрыва (например, скорость  $v_c$  на поверхности разрыва в зависимости от поля звезды и плотности плазмы), так и процессы в области разрыва остаются неизвестными. Мощное ускорение частиц вплоть до сверхвысоких энергий (последнее важно для теории происхождения космических лучей), излучение волн различного диапазона, выброс потоков плазмы и т. п. — все эти процессы возможны, но их количественные характеристики не ясны. Известные в литературе оценки, например мощности магнитного дипольного излучения вращающейся звезды с несовпадающими направлениями оси вращения и магнитного диполя, сделаны без должного учета влияния окружающей звезду плазмы и поэтому вполне могут оказаться совершенно непригодными. Делать на основе имеющихся данных и расчетов заключения о характере ускорения частиц и плазмы вблизи пульсаров — значит принимать возможное за действительное. В области теории магнитосферы вращающихся нейтронных звезд предстоит еще проделать гигантскую по своим масштабам и трудности работу.

в) Задаваясь определенной моделью магнитосферы и ее характеристиками, можно проанализировать вопрос о механизме излучения пульсаров и параметрах излучающих (и, в частности, радиоизлучающих) областей. Этот круг вопросов разумно рассматривать особо.

Механизм излучения пульсаров, правда без учета некоторых последних данных, обсуждался в<sup>4</sup>. Из достаточно общих соображений ясно, что радиоизлучение пульсаров не может быть некогерентным, но оно вполне допускает интерпретацию в рамках известных представлений о когерентных механизмах радиоизлучения. Оптическое и рентгеновское излучение пульсаров, напротив, естественно считать некогерентным (во всяком случае, такое допущение представляется нам непротиворечивым)\*).

\*) Интенсивность теплового излучения с температурой  $T$  равна  $I_\nu = (2k\nu^3/c^2) T$  (область частот  $h\nu \ll kT$ ). Для наиболее сильного возможного некогерентного излучения частиц с энергией  $E$  роль  $T = T_{эфф}$  играет  $E/k$ . В связи с относительной малостью частоты  $\nu$  в радиодиапазоне и, главное, малыми размерами пульсаров, в радиодиапазоне для них  $T_{эфф} \sim 10^{20} - 10^{25}$  градусов, т. е.  $\sim 10^{16} - 10^{21}$  эв. Тем самым ясно, что излучение не может быть некогерентным. При переходе к видимым и рентгеновским лучам частота  $\nu$  возрастает на много порядков, а  $T_{эфф}$  падает как  $\nu^{-2}$  (при том же  $I_\nu$ ). Отсюда как раз и можно прийти к заключению о непротиворечивости некогерентных механизмов оптического и рентгеновского излучения пульсаров.

Реалистическая модель пульсара-излучателя должна находиться в соответствии с имеющимися данными об интенсивности, поляризации и диаграмме направленности излучения пульсаров.

В модели пульсара — вращающейся звезды растровая диаграмма направленности  $\varphi \sim 2\pi\Delta\tau/\tau_1$  (где  $\Delta\tau$  — ширина импульса и  $\omega = 2\pi/\tau_1$  — угловая частота вращения пульсара). Для пульсаров в Крабовидной туманности и в Парусе X, а также пульсара CP 0328 угол  $\varphi$  порядка  $30-40^\circ$ ,  $8^\circ$  и  $3^\circ$  соответственно. Если диаграмма направленности излучения является «ножевой», то за период пульсар «виден» из телесного угла  $\Omega_n \sim 4\pi$  (предполагается, что плоскость диаграммы составляет угол  $\theta \ll 1$  с осью вращения; для угла  $\theta = \pi/2$  пульсары пропадают, а при  $\theta \rightarrow \pi/2$  пульсар «виден» лишь в малом телесном угле). Для «карандашной» диаграммы  $\Omega_n \sim 2\pi\varphi$  и число пульсаров в  $4\pi/\Omega_n = 2/\varphi \sim 5-30$  раз больше, чем в случае «ножевой» диаграммы. В случае «ножевой» диаграммы за период, вообще говоря, должны наблюдаться два импульса. Но два ясно выраженных импульса присутствуют лишь для пульсаров NP 0532 и NP 0527 (странное совпадение!?). А для пульсара CP 0950 имеется слабый второй импульс. Как отсутствие второго импульса, так и поляризационные наблюдения 12 для пульсара PSR 0833-45 в Парусе X совместимы с «карандашной» диаграммой направленности с осью вдоль магнитной оси. Поляризационные измерения<sup>12-14</sup> могут оказаться ключом для понимания характера диаграммы и механизма излучения.

В настоящее время мы (В. В. Железняков, В. В. Зайцев и докладчик) развиваем свою работу<sup>4</sup> в первую очередь для случая когерентного синхротронного механизма (в радиодиапазоне) и некогерентного синхротронного механизма (для оптического и рентгеновского диапазонов). Конкретно, для пульсара в Крабовидной туманности представляется подходящей модель излучателя с «ножевой» диаграммой, плоскость которой совпадает с плоскостью магнитного экватора вращающейся нейтронной звезды (ось вращения составляет угол  $\theta \sim 1$  с плоскостью диаграммы). Рентгеновское и оптическое излучение исходит из тороидального радиационного пояса, расположенного в области магнитного экватора. Механизм излучения — синхротронный, некогерентный. Направленность излучения связана с аннизотропным распределением скоростей релятивистских электронов в поясе. Два импульса за период при этом получаются автоматически (как указывалось, это есть свойство «ножевой» диаграммы). Совпадение угла раствора диаграммы  $\varphi$  в оптическом и рентгеновском диапазонах также естественно, а для радиодиапазона оно связано, возможно, с тем, что значительно более мощное коротковолновое излучение создает в атмосфере звезды как бы волновод. Параметры области, из которой излучаются свет и рентгеновские лучи (например,  $H \sim 10^6$  э,  $E/mc^2 \sim 10^2$ ,  $N \sim 10^{15}$  релятивистских электронов/см<sup>3</sup>, объем  $V \sim L^3 \sim 10^{20}$  см<sup>3</sup>; подробнее см. доклад В. В. Железнякова, стр. 524), представляются вполне разумными. В случае пульсара в Парусе X, если его диаграмма является «карандашной» (на это указывает, но отнюдь еще не доказывает отсутствие второго импульса), картина менее ясна. Главное же, если осуществляются диаграммы разных типов, то нужно понять причину и условия появления каждой из них. В области теории механизмов излучения пульсаров также предстоит, очевидно, еще очень большая работа.

Несмотря на наличие многих неясных моментов и подчеркивание масштаба предстоящих исследований, в заключение следует отметить, сколь впечатляющим является прогресс, достигнутый в изучении пульсаров менее чем за полтора года.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Хьюитт, С. Белл, Дж. Пилкингтон, П. Скотт, Р. Коллис, УФИ 95 (4), 705 (1968).
2. S. P. Maran, A. G. W. Cameron, Progress Report on Pulsars. Preprint, 1969.
3. Э. Хьюитт, УФИ 97 (4), 715 (1969).
4. В. Л. Гинзбург, В. В. Железняков, В. В. Зайцев, УФИ 98 (2), 201 (1969).
5. Л. И. Матвеевко, И. А. Лотова, Астрон. журн. (1969); Препринт ФИАН № 103 (1969).
6. R. Lynds, S. P. Maran, D. E. Trumbo, Astrophys. J. 155, L121 (1969).
7. H. Bradt, S. P. Maran, W. Mayer et al., Nature 222, 728 (1969).
8. C. C. Counselman, I. I. Shapiro, Science 162, 352 (1968).
9. G. J. Fishman, F. R. Harnden, R. C. Haymes, Astrophys. J. Lett. 156, L107 (1969).
10. В. Л. Гинзбург, УФИ 97 (4), 601 (1969).
11. T. Gold, Nature 218, 731 (1968); 221, 25 (1969).
12. V. Radhakrishnan, D. J. Cooke, M. M. Komisaroff, D. Morris, Nature 221, 443 (1969); V. Radhakrishnan, D. J. Cooke, Astrophys. Lett. 3, 225 (1969).
13. R. R. Clark, F. G. Smith, Nature 221, 724 (1969).
14. B. Warner, R. E. Nather, M. MacFarlane, Nature 222, 233 (1969).

**Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов, В. И. Проник.** Поляризация пульсара Крабовидной туманности в оптическом диапазоне

Пульсар NP 0532 недавно отождествлен<sup>1</sup> с южным компонентом двойной звезды в центре Крабовидной туманности. 13 марта 1969 г. мы измерили линейную поляризацию оптического излучения обоих компонентов этой двойной и близких к ней точек туманности.

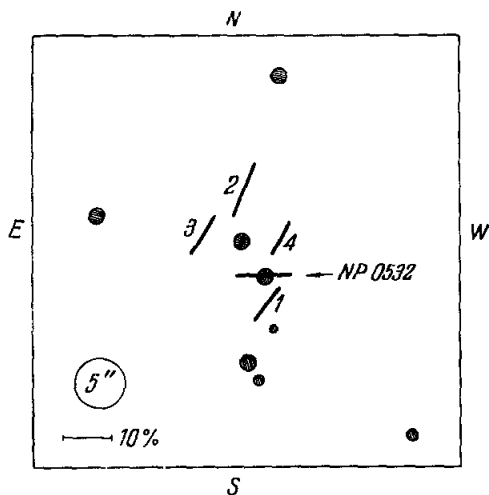
Наблюдения проводились на 2,6-м телескопе ЗТШ с помощью интегрирующего поляриметра со счетом фотопоп. Использовалась диафрагма диаметром 5" при изображении звезд порядка 1",5. Все наблюдения проведены без светофильтров в полосе 3500—8000 Å при  $\lambda_{эфф} \approx 5500$  Å. Каждый объект наблюдался со временем накопления (экспозицией) 50 сек. Временная селекция импульсов пульсара не проводилась.

На рисунке схематически показано расположение звезд в центральной области Крабовидной туманности. Цифрами отмечены измерявшиеся нами точки туманности. Выбор этих точек был сделан на основе рассмотрения старых<sup>2</sup> и новых<sup>3</sup> фотографий Крабовидной туманности. Кроме того, при учете фона туманности мы

принимали во внимание полученное в<sup>3</sup> отношении яркостей северной звезды и пульсара и данные о контрасте импульсов пульсара над фоном из<sup>4</sup>.

Инструментальная поляризация учитывалась по наблюдениям ярких звезд из каталогов<sup>5,6</sup>. Приводимые ниже данные о поляризации обеих звезд уже освобождены от влияния излучения туманности и от инструментальной поляризации.

В результате мы нашли, что степень линейной поляризации интегрального излучения пульсара равна  $12,6 \pm 1,6\%$  при позиционном угле плоскости колебаний  $91 \pm 4^\circ$ . Аналогичные данные для северной звезды составляют  $1,9 \pm 0,7\%$  и  $166 \pm 11^\circ$ . Степень поляризации в измеренных точках туманности меняется от 8 до 15%, а позиционный



углы плоскости колебаний заключены в число указана его среднеквадратичная ошибка, найденная с учетом как внутренней сходимости измерений, так и ошибок в исключении инструментальной поляризации.

Полученные результаты показывают, что излучение южной звезды имеет линейную поляризацию около 13%. При обычно принимаемых значениях расстояния до Крабовидной туманности и межзвездного поглощения столь большая поляризация не может иметь межзвездного происхождения.

Так как, согласно<sup>4</sup>, практически все излучение южной звезды наблюдается в виде импульсов, полученные параметры поляризации относятся к собственному излучению пульсара, усредненному по всему периоду (суммарное излучение главного и вторичного импульсов). Наличие значительной линейной поляризации, по-видимому, подтверждает синхротронную природу оптического излучения пульсара.

После окончания нашей работы нам стали известны результаты поляризационных наблюдений пульсара в Крабовидной туманности, выполненных в США<sup>7</sup> и Австралии<sup>8</sup>. В обеих работах измерения проводились с временной селекцией импульсов пульсара: последовательно регистрировалась кривая блеска пульсара при различных положениях анализатора (поляроида).

Группой Уорнера<sup>7</sup> найдено, что средняя степень линейной поляризации главного импульса пульсара составляет около 14%, а направление плоскости колебаний отличается на  $60^\circ$  от соответствующего направления для центральной части Крабовидной туманности. Эти данные очень хорошо согласуются с нашими измерениями. В<sup>7</sup> отмечено также изменение положения плоскости колебаний в ходе импульса.

Австралийские исследователи<sup>8</sup> нашли, что степень линейной поляризации импульсов пульсара, вероятно, не превышает 15%, а степень круговой поляризации составляет  $13 \pm 11\%$ .

ЛИТЕРАТУРА

1. R. E. Nather, B. Warner, M. MacFarlane, Nature 221, 527 (1969).
2. L. Wolter, Bull. Astron. Inst. Netherlands 13, 301 (1957).
3. В. И. Проник, И. И. Проник, К. К. Чуваев, Астрон. циркуляр, № 502, I (1969).
4. R. Lynds, S. P. Maran, D. E. Trumbo, Astrophys. J. 155, L121 (1969).
5. A. Behr, Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, II. math.-phys. Kl., Nr. 7, 185 (1959).
6. G. V. Coyne, T. Gehrels, Astrophys. J. 71, 355 (1966); 72, 887 (1967).
7. B. Warner, R. E. Nather, M. MacFarlane, Nature 222, 223 (1969).
8. K. C. Freeman, A. W. Rodgers, P. T. Rudge, G. Lynga, Nature 222, 459 (1969).

**В. И. Проник, И. И. Проник, К. К. Чуваев.** Распределение энергии в спектре пульсара в Крабовидной туманности

В феврале — марте месяце этого года в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР была предпринята попытка получить распределение энергии в спектре пульсара NP 0532 в оптическом диапазоне длин волн. Наблюдательный материал представлял собой обычные фотографии Крабовидной туманности, полученные на телескопе ЗТШ с разными фильтрами  $\lambda_{эфф}$  от 3600 до 7400 Å и экспозициями от нескольких секунд до нескольких минут. По снимкам, полученным в феврале, оценена яркость пульсара на разных длинах волн по отношению к яркости ближайшей северной звезды (спектрального класса G) и найдено, что помимо ультрафиолетового избытка в спектре пульсара, по-видимому, имеется избыток излучения и в близкой инфракрасной области. В начале марта на телескопе ЗТШ повторно получены фотографии пульсара очень хорошего качества. Чтобы избежать влияния газового волокна, проектирующегося на пульсар, фотографии, сделанные с фильтрами, пропускающими эмиссионные линии волокна, не обрабатывались. Яркость пульсара в каждом фильтре определялась по отношению к яркости прилегающего фона туманности, спектр которого принимался равным спектру туманности в целом. Последний был настроен по данным наблюдений разных авторов (○ — 1, □ — 2, ● — 3) и приведен на рис. 1. Наблюдения в инфракрасной области спектра представлены только

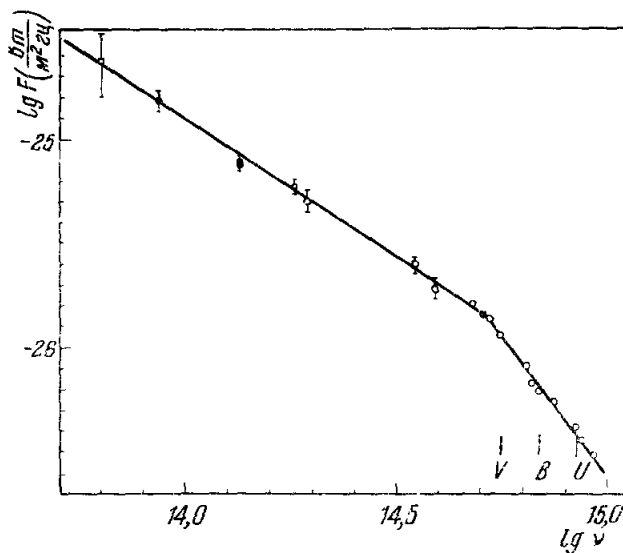


Рис. 1.

Для левой, верхней, части графика  $\alpha = -1,3$ , для правой, нижней, части  $\alpha = -2,8$ .

для того, чтобы убедиться в реальности излома спектра около  $\lambda$  5500 Å. На рис. 2 приведен спектр пульсара (2): светлые кружки — наши измерения пульсара с разными фильтрами относительно туманности, относящиеся к суммарному эффекту от обоих импульсов; темные кружки — измерения Оука<sup>2</sup>, относящиеся к главному импульсу. Для сравнения на этом же рисунке приведен интегральный спектр Крабовидной туманности (1) и спектр фона туманности под пульсаром, измеренный Оуком



в моменты между пульсами (3). Величина отклонения отмеченных точек на кривой 3 дает представление об интенсивностях линий в спектре газового волокна, проектирующегося на пульсар. Нулевой пункт шкалы по вертикали различный для разных кривых.

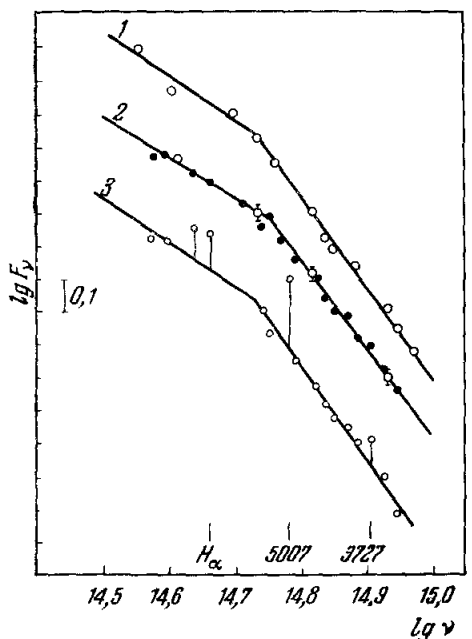


Рис. 2.

Хорошее согласие наших результатов с результатами наблюдений Оука подтверждает правильность принятого выше предположения о том, что спектр фона от туманности около пульсара такой же, как и спектр Крабовидной туманности в целом. Из рис. 2 отчетливо видно, что спектр пульсара в оптическом диапазоне длин волн идентичен спектру Крабовидной туманности, возможно, лишь с той небольшой разницей, что спектр пульсара сдвинут по отношению к спектру туманности в сторону больших частот на величину  $\Delta \lg \nu \sim 0,025$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. R. O'Dell, *Astrophys. J.* **136**, 809 (1962).
2. E. E. Becklin, D. E. Kleinman, *Astrophys. J.* **152**, 391 (1968).
3. E. P. Ney, W. A. Stein, *Astrophys. J.* **152**, 383 (1968).
4. J. V. Oke, *Astrophys. J.* **156**, L49 (1969).

**Ю. И. Алексеев, В. В. Виткевич, Ю. П. Шитов.** Тонкая структура импульсов пульсара CP 0808 и вариации периодов второго класса

В докладе сообщается о сделанном на Радиоастрономической станции ФИАН открытии у пульсара CP 0808 периодических пульсаций второго класса с периодом  $P = 53,6$  мсек. Исследование временных вариаций этого периода показали сравнительно невысокую стабильность пульсаций второго класса, фаза которых меняется до  $180^\circ$  примерно через 3000 периодов второго класса. Это не может быть эффектом влияния межзвездной среды на положение субимпульсов во времени, так как наблюдается хорошая корреляция вариаций на нескольких частотах одновременно.

Одновременные исследования на частотах 60, 86, 110 Мгц, проведенные в ФИАН, выявили линейную зависимость ширины диаграммы излучения (диаграммы «окна») пульсара CP 0808 от длины волны, вследствие чего на частоте 60 Мгц часто наблюдаются 3 субимпульса, в то время как на частоте 110 Мгц — редко 2 субимпульса. На основе полученных результатов в докладе обсуждаются две возможные модели распределения радиояркости излучающей области пульсара CP 0808.

Ю. И. Алексеев, Б. В. Виткевич, В. Ф. Журавлев, Ю. П. Шитов. Новый пульсар PP 0943

В сообщении приводятся данные о новом пульсаре PP 0943, открытом авторами в декабре 1968 г. на Радиоастрономической станции ФИАН в г. Пущино. Основные параметры пульсара PP 0943: прямое восхождение  $9^h 43^m 15^s \pm 30^s$ , склонение около  $8^\circ$ , средний период  $1,093 \pm 0,003$  сек, полное число электронов на луче зрения  $17,5$  рс.см<sup>3</sup>. Сдвиги импульсов пульсара относительно среднего периода наводят на мысль о существовании периода второго класса со значением около 60 мсек.

В. В. Виткевич, Н. А. Лотова, Ю. П. Шитов, В. И. Шипов. О мерцаниях пульсаров на неоднородностях межзвездной плазмы

В сообщении обсуждаются мерцания пульсаров (в частности, CP 0808), которые выражаются в наличии тонкой структуры по частоте. Характерный частотный масштаб тонкой спектральной структуры зависит от частоты слабее, чем  $\nu^4$  (эта зависимость предсказывалась теорией). По наблюдаемым характеристикам мерцаний оценены параметры неоднородностей межзвездной плазмы: характерный размер неоднородностей  $\sim 10^{12}$  см и характерное значение флуктуаций электронной концентрации  $\Delta N_e \sim 10^{-4}$  электронов/см<sup>3</sup>.

А. А. Степанов, Б. М. Владимирский, И. В. Павлов, В. П. Фомин. О возможности существования потока  $\gamma$ -квантов с энергией  $10^{13}$  эв от пульсара CP 1133.

В последнее время на установках, регистрирующих вспышки черенковского излучения от широких атмосферных ливней, было предпринято несколько попыток обнаружить высокоэнергичные  $\gamma$ -кванты от пульсаров. В<sup>1</sup> обнаружено увеличение интенсивности в направлении на пульсар CP 1133, причем величина эффекта составляет  $\sim 100 \pm 35\%$  (поток для энергии  $\geq 3 \cdot 10^{12}$  эв около  $5 \cdot 10^{-11}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>). Указание на наличие эффекта от этого же объекта получено в<sup>2</sup> для энергии  $\geq 10^{14}$  эв. В измерениях<sup>3</sup>, однако, получено, что в пределах ошибок потока  $\gamma$ -квантов от CP 1133 не наблюдается.

В течение марта — апреля 1969 г. в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР также проводились измерения предполагаемого потока  $\gamma$ -квантов от пульсаров CP 1133 и HP 1507. Были использованы четыре детектора. Детекторы КАО представляют собой параболические зеркала с диаметром 1,5 м и фокусным расстоянием 650 мм. В фокусе помещается фотоумножитель ФЭУ-52. Телесный угол поля зрения составляет  $10^{-3}$  стер. Детекторы попарно включены на совпадения. Разрешающее время схемы совпадений 5 нсек. Средняя скорость счета ливней для одной пары детекторов 15—25 в 1 мин. Ток ФЭУ, обусловленный свечением ночного неба, стабилизирован. Граничная энергия регистрации ливней  $\sim 10^{13}$  эв. Предполагаемый источник последовательно проходил через поле зрения неподвижных пар детекторов. Было проведено восемь таких «сканирований» для пульсара CP 1133 и четыре — для HP 1507. Средняя скорость счета при прохождении источника через поле зрения приемника сравнивалась со средней скоростью счета в отсутствие источника в поле зрения, т. е. с фоном. В направлении на пульсар CP 1133 наблюдалось увеличение интенсивности на  $7 \pm 3\%$ . Для пульсара HP 1507 измеримого эффекта не обнаружено ( $1,5 \pm 9\%$ ). Поскольку аппаратура, используемая различными авторами, несколько отличается по своим характеристикам и ввиду недостаточной точности измерений, в настоящее время трудно решить, с чем связано различие полученных до сих пор результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. P. O. Mongain, N. A. Porter, J. White, D. J. Fegan, D. M. Jennings, B. G. Lawless, Nature 219, 1348 (1968).
2. W. N. Charman, J. V. Jolley, P. R. Orman, R. W. P. Drever, B. M. Green, Nature 220, 565 (1968).
3. G. G. Fazio, H. F. Helmen, G. H. Rieke, T. C. Weekes, Nature 220, 892 (1968).

Л. М. Ерухимов. О колебаниях интенсивности радиоизлучения пульсаров

В докладе обсуждается влияние эффектов распространения радиоволн в межзвездной среде и «короне» пульсара на характеристики его радиоизлучения<sup>1, 2, 4, 5</sup>. В<sup>1, 2</sup> были рассмотрены ожидаемые характеристики флуктуаций интенсивности радиоизлучения, рассеянного на неоднородностях межзвездной плазмы. Там же по-

казано, что минутные вариации (МВ) радиоизлучения пульсаров с длительностью  $\tau \sim 1-10^4$  минут и вариации их излучения с  $\tau_0 \sim 1-30$  дней могут быть вызваны неоднородностями межзвездной среды с размерами  $l \sim 10^9-10^{14}$  см. МВ межзвездного происхождения должны при этом иметь очень малый радиус корреляции  $\Delta\nu$  по частоте, который зависит от параметров межзвездной среды (в частности, от интегральной концентрации  $N_{\text{tot}}$  электронов до пульсара) и увеличивается с ростом длительности вариаций  $\tau$ . Полученная недавно в эксперименте <sup>3</sup> зависимость  $\Delta\nu \propto N_{\text{tot}}^{-2}$  согласуется с результатами <sup>1, 2</sup>. Вместе с тем проведенный в <sup>4</sup> анализ экспериментальных данных показал, что длительность МВ  $\tau$  также может существенно зависеть от  $N_{\text{tot}}$  и рабочей частоты  $\nu$  ( $\tau \propto N_{\text{tot}}^{-n} \nu^k$ ,  $n \sim 1-2$ ,  $k \sim 2-3$ ). Такие зависимости  $\tau$ , в частности, можно объяснить, если учесть влияние на МВ (которые вызваны неоднородностями с размерами  $l \sim 10^{10}-10^{11}$  см) более крупных неоднородностей с  $l \sim (1-5) \cdot 10^{13}$  см, перемещающихся (относительно мелких неоднородностей и источника) со скоростью  $v \gtrsim 5 \cdot 10^7$  см/сек и ответственных в свою очередь за колебания интенсивности радиоизлучения пульсаров с  $\tau_0 \sim 10^5-10^6$  сек <sup>4</sup>. При этом более хорошее соответствие с совокупностью данных о МВ получается в предположении, что основной вклад в вариации вносят неоднородности, расположенные в НII-областях, окружающих пульсары.

Рассматривается возможное влияние неоднородностей «короны» пульсара на флуктуации интенсивности, тонкую структуру и форму импульсов излучения пульсаров <sup>5</sup>. Показано, что в ряде случаев характеристики рассеянного в короне пульсара сигнала могут очень слабо зависеть от частоты (например, в случае, когда излучение возникает или отражается от уровней, где частота близка к плазменной, а изменение концентрации плазмы с высотой близко к экспоненциальному). Отмечается, что при определенных предположениях о характере излучения в статистически-неоднородной среде колебания интенсивностей излучения пульсаров с характерным временем  $\tau \lesssim 1$  сек могут быть распределены по логарифмически-нормальному закону.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ерухимов, В. В. Писарева, Доклад на совещании по околосолнечной плазме (Москва, апрель 1968 г.); то же: Изв. вузов (Радиофизика) **12** (6), 900 (1969).
2. Л. М. Ерухимов, В. В. Писарева, Астрон. циркул. № 489 (1968).
3. B. J. Rickett, Nature **221**, 158 (1969).
4. Л. М. Ерухимов, Астрон. циркул. № 513, 3 (1969).
5. Л. М. Ерухимов, Изв. вузов (Радиофизика) (1969).

#### В. В. Железняков. О механизмах излучения пульсаров

При объяснении радиоизлучения пульсаров, а для пульсара NP 0532 в Крабовидной туманности также оптического и рентгеновского излучения исходным является весьма вероятное представление о пульсаре как о вращающейся плотной (нейтронной) звезде с сильным магнитным полем. Механизм радиоизлучения с  $T_{\text{эфф}} \sim 10^{21}$  К должен быть когерентным, так как в противном случае нужны частицы с энергией  $\mathcal{E} \gtrsim 10^{17}$  эв и условия, при которых максимум их излучения лежит в радиодиапазоне. Для оптического ( $T_{\text{эфф}} \sim 10^{13}$  К) и рентгеновского диапазонов такой необходимости нет: здесь достаточно  $\mathcal{E} \sim 10^8$  эв. Оптическое и рентгеновское излучения заведомо не создаются в горячей изотропной фотосфере; излучение тогда будет ненаправленным и вращение звезды не приведет к появлению импульсов.

В модели, предложенной В. Л. Гинзбургом, В. В. Зайцевым и автором <sup>1</sup>, излучение пульсара NP 0532 связывается с синхротронным механизмом; источником излучения являются релятивистские частицы в составе радиационных поясов звезды. Наблюдаемый уровень оптического излучения ( $f \sim 5 \cdot 10^{14}$  гц) тогда можно объяснить некогерентным синхротронным излучением электронов с энергией  $\mathcal{E}_0 \sim 10^2$  mc<sup>2</sup> и концентрацией  $N_0 \sim 5 \cdot 10^{15}$  электронов-см<sup>-3</sup>, сосредоточенных в объеме  $V \sim 10^{19}$  см<sup>3</sup> (магнитное поле  $H \sim 2 \cdot 10^8$  э). При этом параметр  $\delta = H^2/8\pi\mathcal{E}_0 N_0 \sim 1$ , оптическая толщина системы  $\mu L \sim 1$  и максимум излучения приходится на частоты  $f_{\text{max}} \sim 5 \cdot 10^{16}$  гц. Время жизни электронов из-за синхротронных потерь  $t_m \sim 10^{-6}$  сек \*).

\*) В магнитосфере пульсаров благодаря высокой плотности энергии излучения существенную роль может играть обратный комптон-эффект. При этом в некоторых случаях (как отметил И. С. Шкловский во время обсуждения доклада) величина комптоновских потерь может превзойти магнитотормозные. Последнее относится и к рассматриваемой модели с указанными параметрами, при которых комптоновские потери сокращают время жизни электронов до  $10^{-7}$  сек. Средняя энергия комптоновских квантов тогда составит  $2 \cdot 10^8$  эв. Мощность возникающих при этом  $\gamma$ -лучей достигает

Существенно, что мощность излучения этих же электронов на частотах  $\sim 10^{18}$  гц достаточна для объяснения излучения в рентгеновском диапазоне. Характер частотного спектра (для простейшего моноэнергетического спектра электронов) качественно соответствует наблюдаемому: он пологий для оптического (индекс спектра  $\alpha = -1/3$ ) и падающий для рентгеновского излучения, хотя и слишком крут ( $\alpha \approx 4,5$ ).

Для когерентного синхротронного механизма в радиодиапазоне ( $f \sim 3 \cdot 10^8$  гц) оптимальными являются следующие параметры системы с  $\delta \sim 1$  и линейным размером  $L \sim 10^8$  см:  $N_0 \sim 10^7$  электронов·см<sup>-3</sup>,  $\xi_0 \sim 7,5$  тс<sup>2</sup>,  $H \sim 30$  э, концентрация «холодной» (нерелятивистской) плазмы  $N \sim 3 \cdot 10^8$  электронов·см<sup>-3</sup>, ее температура  $T > 10^4$  °К. При этом усиление на размерах системы  $\mu L \sim 40$  достаточно, чтобы объяснить (без учета эффекта насыщения) радиоизлучение наблюдаемой интенсивности.

Для дипольного магнитного поля ( $H \propto 1/R^3$ ,  $R$  — расстояние от центра звезды) отношение магнитных полей в источниках оптического и радиоизлучения характеризует отношение радиусов этих источников  $R_{\text{рад}}/R_{\text{опт}} \sim 50$ . Величина  $R_{\text{рад}}$  для пульсара NP 0532 ограничена значением  $10^8$  см, определяемым шириной импульса  $\Delta t \sim 3$  мсек. Если  $R_{\text{рад}} \approx 10^8$  см, то  $R_{\text{опт}} \sim 2 \cdot 10^6$  см. Таким образом, оптическое и рентгеновское излучения исходят из ближайшей окрестности нейтронной звезды, а величина  $H \sim 2 \cdot 10^6$  э в источнике дает оценку магнитного поля  $H_0$  на поверхности звезды (вероятно,  $H_0$  несколько больше; если радиус нейтронной звезды  $R_0 \sim 10^6$  см, то  $H_0 \sim 10^7$  э).

Если релятивистские электроны локализованы вблизи поверхности магнитного экватора и распределены по импульсам в интервале углов  $\Delta\theta \sim 20-40^\circ$ , включающем магнитный экватор, то диаграмма направленности излучения станет «ножевой» (с раствором  $\Delta\theta$ ), а длительность импульсов  $\Delta t$ , возникающих при вращении пульсара, будет отвечать наблюдаемой (1,5—3 мсек). Одинаковые  $\Delta t$  для оптического и рентгеновского излучений объясняются генерацией обоих излучений одними и теми же электронами. Аналогичный профиль импульсов на радиочастотах, возможно, связан с тем, что распределение релятивистских электронов, ответственных за радиоизлучение, поpitch-углам формируется под воздействием мощного оптического и рентгеновского излучения.

Импульсный характер принимаемого излучения возникает, если угол  $\beta$  между осью вращения  $\omega$  и магнитным диполем  $M$  не равен нулю. Когда

$$\beta = \pi/2,$$

импульсы излучения, которые дважды регистрируются за один оборот, следуют через одинаковые интервалы времени (этот случай типичен для большинства пульсаров). Если же  $0 < \beta < \pi/2$ , то при наблюдении под углом  $\gamma$  к оси  $\omega$  ( $\pi/2 - \alpha < \gamma < \pi/2$ ) интервалы между тремя последовательными импульсами станут неодинаковыми (ситуация, характерная для пульсаров NP 0532, а также для NP 0527 и CP 0950).

При вращении звезды, обладающей магнитным моментом  $M \nparallel \omega$ , возникает сложное взаимодействие магнитного поля с плазмой в магнитосфере звезды и окружающей среде (эффекты увлечения плазмы, сброса материи и излучения низкочастотных волн, которые, в принципе, могут быть ответственны за изменение периода вращения объекта). Частота вращения  $\omega = 2\pi/\tau \sim 2-2 \cdot 10^2$  удовлетворяет неравенствам  $\omega < \omega_{H_i}$  или  $\omega_{H_i} < \omega < \sqrt{\omega_{H_i}\omega_{H_c}}$ , где  $\omega_{H_i}$ ,  $\omega_{H_c}$  — ионная и электронная гирочастоты в окружающей пульсар плазме, т. е. в межзвездной среде или в оболочке сверхновой. Поэтому излучаемые низкочастотные волны соответствуют альвеновским волнам или волнам в области, переходной от магнитогидродинамических волн к волнам типа свистов в земной магнитосфере. По оценкам В. П. Докучаева и Ю. В. Чугунова, мощность магнитного дипольного излучения вращающейся звезды в среде  $W \sim W_0 n^3$  будет значительно выше (в  $10^6$  и более раз) соответствующей мощности в вакууме  $W_0$  (из-за высоких значений  $n$  — показателя преломления этих волн). Не исключено, что излучение низкочастотных волн служит основной причиной наблюдаемого роста периода вращения пульсара.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, В. В. Железняков, В. В. Зайцев, УФН 98 (2), 201 (1969); то же: Astrophys. and Space Sci. (1969).

$10^{37}$  эрг·сек<sup>-1</sup>. В то же время возможен такой выбор параметров модели, при котором мощность  $\gamma$ -лучей заметно снизится. Отсюда ясно, что измерение потока  $\gamma$ -лучей от пульсара NP 0532 позволит более определенно судить о физических характеристиках излучающей области.

### Н. С. Кардашев. О возможности наблюдения внегалактических пульсаров

В сообщении:

1. Рассматривается возможность наблюдения пульсаров, образующихся при вспышках сверхновых звезд в ближайших галактиках. В момент вспышки мощность излучения пульсара может быть сравнима с мощностью излучения оболочки сверхновой. В дальнейшем излучение пульсара превышает мощность излучения оболочки. Отмечается необходимость постановки наблюдений за переменностью излучения сверхновых звезд, вспыхивающих в ближайших галактиках. Наблюдения целесообразны в  $\gamma$ -, рентгеновском, оптическом и радиодиапазонах и для разных моментов после вспышек сверхновых звезд.

2. Рассматривается вероятная роль пульсаров в радиогалактиках и квазарах. Имеются три возможности: 1) в радиоисточниках определяющую роль играет сверхмассивная звезда — «суперпульсар»; 2) наряду со сверхмассивной звездой в источнике имеется большое количество обычных пульсаров, обеспечивающих генерацию космических лучей; 3) радиоисточник состоит из большого скопления пульсаров. Предлагается метод определения числа пульсаров в источнике, излучение которого в значительной степени обусловлено излучением этих пульсаров.

3. Рассматриваются перспективы исследования внегалактических пульсаров для определения космологических параметров: измерение плотности межгалактической среды по запаздыванию, измерение параллакса на космологических расстояниях и измерение расширения Вселенной по изменению периодов далеких пульсаров.

### В. И. Слыш. Рассеяние рентгеновского излучения пульсаров в межзвездной среде

Рассчитано влияние межзвездной пыли на рентгеновское излучение пульсара в Крабовидной туманности NP 0532. Это влияние сводится к чистому рассеянию на малые углы. Сферические частицы радиусом 0,5  $\mu\text{м}$  рассеивают рентгеновское излучение с длиной волны 5  $\text{\AA}$  «вперед» в конус шириной около  $1'5$ . В случае NP 0532 вокруг пульсара образуется ореол с угловым размером  $1-2'$ , в котором содержится около 90% полного излучения пульсара. Так как структура рентгеновского источника Tau XR-1 имеет такой же характер (источник импульсного излучения содержит 5—10% потока протяженной туманности), можно полагать, что излучение самой Крабовидной туманности в рентгеновском диапазоне мало, а наблюдаемая туманность представляет собой лишь ореол рассеянного излучения пульсара NP 0532. В этом случае должны наблюдаться: во-первых, увеличение доли импульсного излучения при переходе в более жесткую область; во-вторых, увеличение углового размера туманности на более длинных волнах ( $\sim 15'$  на волне 50  $\text{\AA}$ ); в-третьих, соответствие поляризационных характеристик пульсара и туманности. Аналогичные туманности с потоком, пропорциональным межзвездному поглощению в видимой области, должны наблюдаться и у других рентгеновских источников. Если рассеянное рентгеновское излучение не будет обнаружено, это будет означать, что за оптическое межзвездное поглощение ответственны частицы значительно меньшего размера.

### И. С. Шкловский. О пульсарах

1. Определенный из периода  $T$  и его производной  $dT/dt$  возраст пульсара PSR 0833-45 оказывается равным  $\sim 10\,000$  лет, между тем как возраст радиотуманности Вела X, с которой этот пульсар отождествляется, должен быть не меньше 30—40 тысяч лет. Вероятность случайного совпадения координат пульсара PSR 0833-45 и радиотуманности очень мала. Наблюдаемое расхождение возрастов пульсара и туманности можно объяснить большим количеством ( $\sim 10^4$ ) «сбоев» периода и связанными с такими «сбоями» изменениями  $dT/dt$ . Аналогичная ситуация (но с противоположным знаком), по-видимому, имеет место в случае CP 0950, для которого  $dT/dt$  аномально мало ( $\sim 3 \cdot 10^{-16}$ ), и поэтому «возраст» оказывается неправдоподобно большим для пульсара со сравнительно коротким периодом. Такой же эффект, по-видимому, имеет место и в случае пульсара NP 0532 в Крабовидной туманности.

2. Обращается внимание на то, что тангенциальная скорость NP 0532 аномально велика,  $\sim 150$  км/сек. Возможно, что тангенциальная скорость PSR 0833-45 также порядка 100—200 км/сек. Это подкрепляет результат В. В. Виткевича, полученный из анализа флуктуаций амплитуды импульсов некоторых пульсаров, что их тангенциальные скорости могут достигать до 1000 км/сек. Причиной столь больших скоростей пульсаров может быть «эффект пращи» или асимметрия выброса вещества во время вспышек сверхновой.

3. Сделана попытка в рамках модели вращающейся нейтронной звезды получить общее представление о диаграмме направленности только из анализа результатов наблюдений, не привлекая никаких гипотез о механизме излучения пульсаров. Полное количество пульсаров в Галактике можно оценить  $\sim 3 \cdot 10^4$ . Если средний возраст пульсаров (периоды которых  $\sim 1^s$ )  $\sim 10^7$  лет, то частота образования пульсаров в Галактике  $\sim 1$  раз за несколько сот лет, в хорошем согласии с частотой вспышек сверхновых. Если бы диаграмма излучения была «карандашной» с углом раствора  $\sim 10^\circ$ , то полное число пульсаров было бы на порядок больше и частота их образования была бы неправдоподобно велика. Этот аргумент говорит в пользу «ножевой» диаграммы. Другим аргументом в пользу такой диаграммы является сам факт наличия *наблюдаемых* пульсаров у таких давно известных пекулярных объектов, как Вела X и Крабовидная туманность. Ведь странно было бы считать, что вдобавок ко всем своим удивительным особенностям эти пульсары обладают еще одной, пожалуй, самой любопытной: оси их «карандашных» диаграмм смотрят на Землю. Недавно предложенная Радхакришнаном модель PSR 0833-35 с «карандашной» диаграммой некорректна, так как не обеспечивает наблюдаемую почти 100%-ную линейную поляризацию этого пульсара.

Наконец, тот факт, что интерпульсы никогда не наблюдаются точно посредине периода, является серьезным аргументом против модели Радхакришнана и в пользу «ножевой» диаграммы. Трудностью последней является интерпретация неодинаковой величины амплитуды импульса и интерпульса. Эту трудность можно снять, введя представление о наличии некоторой полярной диаграммы в плоскости «ножа», которая в свою очередь должна быть перпендикулярна к магнитной оси пульсара. Таким образом, предлагаемая модель соответствует излучению в двух почти параллельных плоскостях, перпендикулярных к пучку силовых линий, выходящих соответственно из северного и южного магнитных полюсов.

4. Механизм радиоизлучения пульсаров должен сводиться к некоторому когерентному процессу. Если это плазменные колебания, то из простых энергетических соображений следует, что плазма должна быть релятивистской. Трансформация продольных плазменных волн в поперечные электромагнитные путем индуцированного рассеяния означает, что пульсары можно рассматривать как мазеры. В реальных условиях эти мазеры всегда насыщены. При таких условиях мощность радиоизлучения определяется мощностью механизма «накачки». Так как в случае NP 0532 этот механизм должен также обеспечить излучение, в миллионы раз более интенсивное в оптическом и рентгеновском диапазонах, то простой транспорт частиц от поверхности нейтронной звезды в область генерации, как можно показать, оказывается недостаточным. «Накачка» может быть обеспечена только мощным и весьма эффективным механизмом ускорения, компенсирующим огромные потери релятивистских электронов на излучение. Таким механизмом может быть, например, рассмотренное Острикером и Ганом ускорение частиц плазмы магнитным дипольным излучением вращающейся нейтронной звезды.

5. Наиболее естественным механизмом оптического и рентгеновского излучений NP 0532, по нашему мнению, является обратный эффект Комптона релятивистских электронов (ответственных за когерентное радиоизлучение) на радиоквантах. В пользу этого предположения говорит, в частности, практическое отсутствие запаздывания между началом радио- и оптических импульсов. Энергия релятивистских электронов, полученная из условия трансформации радиоквантов с частотой  $\sim 5 \cdot 10^7$  гц в оптические кванты, равна  $E \sim 10^9$  эв. При этом концентрация плазменных электронов будет  $\sim 3 \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$ . Для обеспечения наблюдаемой мощности оптического излучения надо, чтобы время жизни таких электронов было  $\sim 10^{-7}$  сек, что  $\sim$  в 1000 раз больше значения, следующего из простой теории с учетом значения поля радиоквантов в NP 0532. Однако при больших плотностях энергии радиоквантов большую роль может играть *индуцированный* обратный эффект Комптона. Это приведет к мазерным эффектам и обеспечит достаточную направленность оптического излучения.

Теория должна ответить на вопрос, почему оптическое излучение наблюдается только у NP 0532. Ответ, по-видимому, состоит в том, что у NP 0532 плотность энергии поля радиоизлучения в области генерации в сотни и тысячи раз больше, чем у других пульсаров. Это обстоятельство способствует трансформации радиоквантов в оптические путем индуцированного обратного эффекта Комптона.

**В. В. Виткевич, И. Ф. Малов, Ю. П. Шятов.** К вопросу о модели пульсара как вращающейся и пульсирующей нейтронной звезды.

В сообщении указывается на невозможность объяснения периодов второго класса пульсаров исходя из гипотезы пульсирующей нейтронной звезды, так как наблюдаемые периоды больше допустимых периодов пульсаций (например, период второго класса у CP 0808 равен 53 мсек, допустимые периоды  $\sim 10$  мсек). Делается попытка представить пульсар как неустойчивый сжимающийся объект. Показывается, что в этой модели

получается противоречащее наблюдениям уменьшение периода вращения. Возможно или отказаться от гипотезы пульсаций для всего пульсара как единого целого для объяснения периодов второго класса в пульсарах, или найти другие уравнения состояния нейтронных звезд.