

ПУЛЬСАРЫ

§ 1. Общий обзор; излучение пульсаров

Открытие Хьюишем, Белл, Пилкингтоном, Скоттом и Коллинзом (1968) пульсирующих радиоисточников широко известно как астрономам, так и неспециалистам. Период повторения радиовсплесков лежит у известных на начало 1971 г. пульсаров в пределах от $T = 3,7$ сек для самого «медленного» до $T = 0,033$ сек для самого «быстрого». Приведенные значения периодов округлены; фактически они известны с точностью вплоть до $10^{-8} - 10^{-9}$.

В первые месяцы после открытия пульсаров для «часового механизма», обеспечивающего постоянство их периодов, обсуждались теории двух типов: радиальные колебания белых карликов и вращение нейтронных звезд. Тогда были известны лишь пульсары с периодами ~ 1 сек. Расчетам периодов осцилляций белых карликов посвящено огромное число работ. Идеализированная теория приводит к $T_{\text{осц}} \geq 2$ сек; для объяснения более коротких периодов рассматривалось влияние вращения, предполагались высшие гармоники колебаний (вплоть до 5 й) и т.п. Открытие пульсара с $T = 0,033$ сек в Крабовидной туманности явилось той «последней каплей, переполнившей чашу», которая положила конец этому направлению мысли. Выжила лишь теория вращающейся нейтронной звезды. Нейтронная звезда — единственный известный теоретикам тип небесного тела, для которого экваториальная скорость вращения, соответствующая $T = 0,033$ сек, достаточно мала (2000 км/сек при $R = 10$ км; для белого карлика с $R = 6000$ км, $v = 120\,000$ км/сек), а гравитационный потенциал достаточно велик, чтобы центробежные силы не разрушили звезду.

Предполагают, что каждый пульсар является источником электромагнитного излучения, характеризующегося резкой угловой зависимостью. Направление луча жестко связано со звездой и вращается вместе с нею. Каждый раз, когда луч пересекает Землю, наблюдатель видит всплеск излучения. В момент, когда писался этот раздел, еще не было выяснено, подобен ли луч ка-

рандашу или же он напоминает нож [см. Гинзбург, Железняков, Зайцев (1969)]. Обычно полагают, что сильная угловая зависимость излучения связана с магнитным полем пульсара.

Предположим, что это поле подобно полю диполя, магнитная ось которого не совпадает с осью вращения. Излучение, генерируемое вблизи полюсов вдоль магнитных силовых линий, будет иметь карандашную диаграмму (возможно, два карандаша, из которых в большинстве случаев только один задевает Землю). Генерация излучения частицами, удерживаемыми (в плоскости) вблизи магнитного экватора, даст пример ножевой диаграммы. Суммарный телесный угол, захватываемый ножевым лучом, в 10—20 раз больше чем угол, описываемый карандашом. Значит, указанным предположениям о характере диаграммы соответствуют разные вероятности наблюдения пульсара и разные оценки числа пульсаров в нашей Галактике.

Таким образом, одно возможное объяснение направленности излучения непосредственно связывает ее с наличием магнитного поля. Электроны, движущиеся с релятивистскими энергиями и со скоростью, весьма близкой к скорости света, по вытянутым спиральям, под очень малым углом к магнитному полю, излучают преимущественно в направлении магнитного поля.

При наличии лазерного механизма усиления излучения анизотропным распределением электронов в магнитном поле также можно ожидать преимущественного направления излучения, связанного с направлением магнитного поля. Однако есть и другая точка зрения, которая направленность излучения только косвенно связывает с магнитным полем. Особенно подробно ее разработал Железняков (1971).

Предполагается, что определенная область, заполненная плазмой, является источником изотропного излучения.

Магнитное поле увлекает эту плазму так, что она вращается вместе со звездой; излучающая плазма находится на таком расстоянии от звезды (точнее, от оси вращения), что ее скорость вращения равна $0,8 \div 0,9$ скорости света. Это расстояние равно ~ 1300 км для пульсара в Крабовидной туманности (кратко «Кр») и $\sim 65\,000$ км для пульсара с периодом $1,3$ сек.

За счет эффекта Доплера наблюдаемая частота максимальна, когда источник движется к наблюдателю. Резко меняется (пропорционально 4-й степени частоты) и общая интенсивность излучения. В результате получается карандашная диаграмма излучения пульсара как целого.

Такое кинематическое объяснение направленности особенно привлекательно в свете того, что пульсар «Кр» испускает не только радиоизлучение, но и оптическое и рентгеновское излучение. Во всех этих диапазонах длительность излучающей фазы приблизительно одинакова и составляет около 6% длительности всего

цикла, что соответствует одинаковому углу раскрытия диаграммы направленности порядка $0,3$ радиана.

В первой точке зрения приблизительное совпадение диаграмм направленности в разных спектральных участках требует специ-

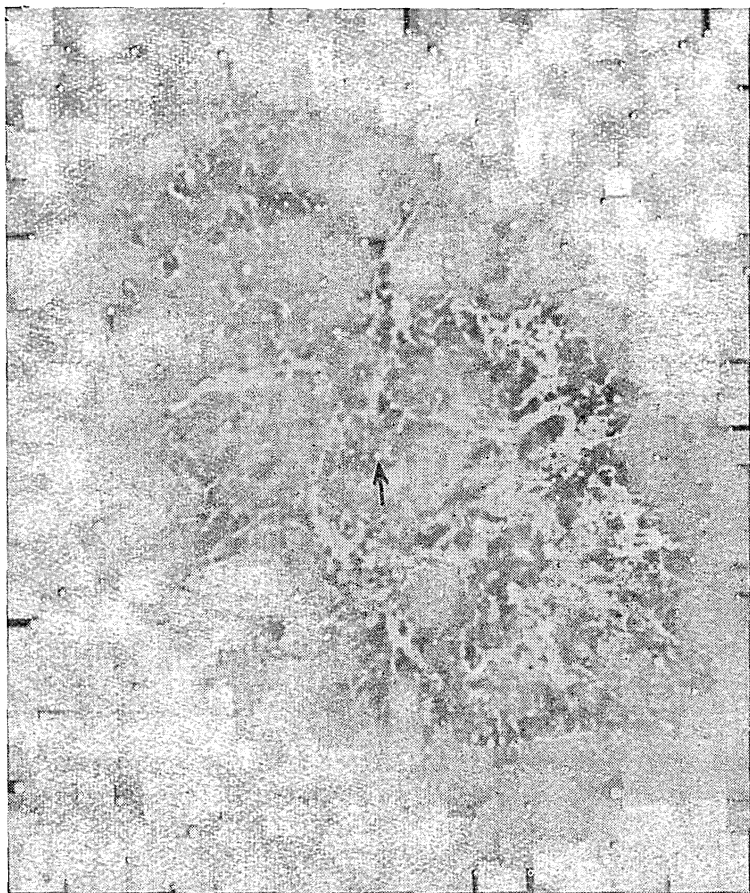


Рис. 62. Пульсар в Крабовидной туманности.

ального доказательства. Вместе с тем поляризация радиоизлучения пульсара доказывает, что вторую точку зрения нельзя понимать буквально: если бы мы имели дело с движущимся источником хаотического излучения, доплер-эффект мог бы сделать излучение направленным, но не поляризованным. Между тем закономерно изменяющаяся поляризация наблюдается как в радиодиапазоне,

так и в оптическом. Таким образом, наиболее вероятно, что все эффекты (влияние магнитного поля на движение и излучение отдельных электронов, влияние поля на коллективное излучение и общее движение излучающей области, связанное с вращением пульсара) принимают участие в формировании диаграммы направленности. Измерение поляризации рентгеновского излучения весьма желательно!

Абсолютная интенсивность излучения, принимаемого на поверхности Земли, характеризуется для пульсара «Кр» следующими величинами: на радиочастоте $\nu = 10^8$ гц $F = 10$ единиц потока, в оптической области (10^{15} гц) 10^{-2} единицы и в рентгеновской области (10^{18} гц) 10^{-4} единицы. Единица потока равна 10^{-26} ватт/м²·гц. Пересчет на полную мощность $L = 4\pi r^2 \int F d\nu$ дает для трех диапазонов, приведенных выше, $L_{\text{радио}} = 10^{31}$ эрг/сек, $L_{\text{опт}} = 10^{34}$ эрг/сек, $L_{\text{рентг}} = 10^{36}$ эрг/сек. Наконец, задаваясь размером излучающей области, можно найти эффективную яркостную температуру излучения. Пока $h\nu < kT_b$, имеет место формула $kT_b = \frac{c^2 F(\nu)}{2\pi\nu^2} \left(\frac{R}{r}\right)^2$. По этой формуле Гинзбург (1971) (оттуда же заимствованы и предыдущие оценки) получает $T_b, \text{радио} = 10^{26}$ °К, $T_b, \text{опт} = 10^9$ °К, $T_b, \text{рентг} = 10$ °К, принимая размер излучающей области $5 \cdot 10^7$ см. Для рентгеновского излучения условие $h\nu < kT_b$ нарушено, и следовало бы истинную (а не условную «рэлей-джинсовскую») температуру искать по формуле Планка, $T_{\text{Плнк}} = \frac{h\nu}{k} \left[\ln \left(1 + \frac{h\nu}{kT_{\text{рэл.-дж.}}} \right) \right]^{-1} = 6 \cdot 10^5$ °К. Впрочем, так как рентгеновское излучение явно не тепловое, спектр его степенной, а не экспоненциальный, $T_b, \text{Плнк}$ имеет не больше физического смысла, чем $T_b, \text{рэл.-дж.}$

Отметим, что потоки излучения, принимаемые на Земле, усреднены по циклу, таким образом, максимальные (пиковые) значения по крайней мере в 30 раз больше. С другой стороны, при подсчете L не принималась во внимание направленность излучения, что приблизительно компенсирует неравномерность во времени. Для всех других известных пульсаров радиоизлучение того же порядка, что и для пульсара «Кр», однако оптическое и рентгеновское излучение у них не обнаружено. В частности, не обнаружено оптическое излучение пульсара «Вела» с периодом 0,089 сек. В последнее время сообщается об открытии пульсации рентгеновского источника Суг XI с периодом 0,072 сек; тщательные поиски не обнаружили ни пульсирующего, ни постоянного оптического или радиоизлучения в соответствующем направлении.

Необычайно высокие температуры радиоизлучения с несомненностью указывают на коллективный механизм возбуждения радиоволн. Температура излучения не может быть выше эффективной

температуры излучающих единиц, иначе поглощение излучения («самопоглощение в источнике») превышает излучение. Очевидно однако, что энергия отдельных частиц — электронов, протонов — не достигает 10^{22} эв. Здесь возможны два решения. В первом варианте по-прежнему излучают отдельные частицы; средняя энергия их порядка 10^8 или 10^{11} эв и гораздо скромнее указанной выше, но распределение по энергии не максвелловское, $\frac{\partial \ln f}{\partial E} > -\frac{1}{kT_b}$;

в частности, может быть $\frac{\partial \ln f}{\partial E} > 0$ (инверсия) в какой-то области спектра. Здесь f — плотность электронов в фазовом пространстве. Выписанное условие соответствует «активной» среде, усиливающей излучение, как в лазере. Другой вариант заключается в том, что плазменные неустойчивости вызывают возбуждение мощных колебаний (например, при прохождении тока, т.е. при встречном движении электронов и протонов), в которых в одной фазе колеблются и излучают большие группы электронов, и T_b характеризует энергию целых групп. Тем не менее, для рентгена число заполнения фотонами состояний электромагнитного поля $n = (e^{h\nu/kT} - 1)^{-1}$ мало по сравнению с единицей. Число заполнения является инвариантом, оно одинаково в любой системе координат и, в частности, не меняется при доплеровском изменении частоты.

Малое число заполнения исключает участие лазерного механизма усиления рентгеновского излучения (E — энергия электрона).

Вопрос о механизме радиоизлучения обсуждается в обзорах Гинзбург, Железняков, Зайцев (1969), Каплан и Цытович (1970).

Обратимся к рентгеновскому излучению. Из приведенных чисел видно, что у пульсара «Кр» это излучение превосходит по выходу энергии как радио-, так и оптическое излучение. Господствующая точка зрения заключается в том, что излучают отдельные электроны в магнитном поле («синхротронное излучение»). Эффективная частота, на которой происходит излучение и его интенсивность (на один электрон) даются формулами (E — энергия электрона)

$$\nu_m = 10^8 H_{\perp} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 \text{ эц}, \quad P(\nu_m) = 10^{-22} H_{\perp} \text{ эрг/сек} \cdot \text{эц}.$$

Электрон теряет половину энергии за время $t_1 = 5 \cdot 10^8 \frac{mc^2}{EH_{\perp}^2}$.

Для объяснения рентгеновского излучения нужно выбрать значения поля, размеров области l , энергии электронов и их концентрации n .

Гинзбург (1974) полагает, что $H \sim H_{\perp}$ (отмечая, что это не обязательно) и что поле удерживает электроны, так что $\frac{H^2}{8\pi} = \delta \cdot nE$, $\delta > 1$. При этом, в зависимости от выбора δ , получается набор

параметров (единицы CGSE):

$$H = 10^8 \delta^{1/17}, \quad l = 5 \cdot 10^8 \delta^{1/17}, \quad E = mc^2 \cdot 10^{28} \delta^{-2/17}, \\ n = 5 \cdot 10^{14} \cdot \delta^{-7/17}, \quad ct_1 = 1,5 \cdot 10^4 \delta^{-9/17}.$$

Шкловский (1969а, б) считает, что электроны движутся под весьма малым углом к полю, так что $H \sim 10^8$ гс, но $H_{\perp} \sim 3 \cdot 10^3$ гс в области излучения. При этом необходима более высокая энергия электронов $\sim 3 \cdot 10^4 mc^2$, плотность $n \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. При этом $ct_1 \sim 5 \cdot 10^7$ см. Шкловский полагает, что электроны обильно выходят из магнитосферы пульсара в окружающую область с полем $H \approx 10^{-3}$ гс и в сходстве формы спектра пульсара и окружающей туманности видит подтверждение своих оценок. С этой точки зрения допустимо нарушение условия удержания, соотношение между l и ct не противоречит модели. Наконец, так как l порядка радиуса, на котором вращение пульсара дает световую скорость, то работает и доплер-эффект, т. е. механизм Железнякова.

§ 2. Энергетика пульсаров; их гравитационное излучение

В качестве источника энергии излучения (а также для подпитки туманности в случае Краба) обычно рассматривают энергию вращения нейтронной звезды. Измерения замедления пульсаров (увеличение T со временем) согласуются с этой гипотезой. В качественной форме мысль о том, что Крабовидной туманности необходимую энергию поставляет центральное вращающееся тело, была высказана Уилером (1966), а в другой связи Кардашевым (1964).

Согласно грубым оценкам в ньютоновском приближении у звезды с $M = 1,2M_{\odot}$ и $R = 1,2 \cdot 10^8$ см момент инерции $I = 1,4 \cdot 10^{45}$ г/см². Период $T = 0,033$ сек соответствует угловой скорости $\omega \sim 200 \text{ сек}^{-1}$, так что сегодня в энергии вращения пульсара запасено $3 \cdot 10^{49}$ эрг. Наблюдаемое замедление $\left(\frac{1}{\omega}\right)\left(\frac{d\omega}{dt}\right) = -\frac{1}{\tau_0} = -\frac{1}{2340}$ лет, следовательно, $\frac{dE}{dt} = -\frac{2E}{\tau_0} = 10^{39}$ эрг/сек.

Еще перед открытием пульсаров отмечалось, что Крабовидной туманности требуется $\sim 10^{38}$ эрг/сек в форме инъекции релятивистских электронов [Шкловский (1966, 1969а), Хеймс и др. (1968)]. Таким образом, проблема энергетического баланса в Крабовидной туманности нашла свое решение.

Для других пульсаров энергетические потребности существенно меньше. Для них также измерено замедление; во всех случаях уменьшение вращательной энергии во много раз больше светимости.