

насыщению ($n_e \approx (\omega n \omega B)/(2\pi c e)$), получим, что полный поток числа релятивистских частиц, генерируемых звездой, есть

$$\frac{dn}{dt} \approx k_{amp} \cdot 2\pi n c \left(\frac{R_x}{\sqrt{\omega R_x/c}} \right)^2 c^{-1}. \quad (36.VII)$$

Для типичного пульсара с периодом $p = 1$ с, магнитным полем $B = 10^{12}$ Э и $k_{amp} = 3 \cdot 10^5$ темп эжекции равен $\sim 10^{36}$ частиц/с.

Так выглядит предварительный сценарий ускорения релятивистских частиц в зазоре. Интересны новые эффекты, возникающие в сверхсильном поле $B \gg 10^{13}$ Э. Например, Усов и Шабат (1982) показали, что в таких полях возникает эффективный показатель преломления, приводящий к тому, что γ -кванты начинают двигаться вдоль силовых линий магнитного поля. Этот эффект подавляет рождение электронно-позитронных пар.

Завершая краткое описание основных процессов, происходящих в магнитосфере пульсара, рассмотренных в литературе, отметим работу Бескина и др. (1983), в которой получено решение самосогласованной задачи о структуре магнитосферы пульсара.

§ 4. Механизмы излучения

Та энергия, которую мы принимаем в виде радиоизлучения на частотах ≤ 400 МГц ($\lambda \geq 75$ см), представляет собой ничтожную часть от полной энергии, теряемой нейтронной звездой и определяемой нами по замедлению пульсаров. Единственным источником информации о подавляющем числе радиопулсаров фактически служит слабый эффект второго порядка малости. Это все равно, что пытаться изучать обычные звезды, используя, например, только их рентгеновское излучение. Поэтому было бы крайне заманчиво обнаружить основной поток энергии от радиопулсаров.

В каком виде уносится почти вся энергия радиопулсаров — до сих пор неясно. Обычно считается, что носителями этой энергии могут быть релятивистские частицы и магнитодипольные волны. Но в каких пропорциях распределяется энергия между двумя этими каналами, непонятно. Магнитные поля в Галактике запутывают траектории релятивистских частиц, и мы лишены возможности принимать их от радиопулсаров. Магнитодипольные волны имеют слишком малую частоту и обычно считается, что наблюдать их в принципе невозможно.

Действительно, в плазме могут распространяться электромагнитные волны с частотой выше плазменной:

$$\nu_p \approx 870 n_{-2}^{1/2} \text{ Гц,}$$

где $n_{-2} = n/10^{-2} \text{ см}^{-3}$ — концентрация свободных электронов. Напомним, что до 1982 г. самым быстрым был пульсар в Крабовидной туманности, частота вращения которого $\nu \approx 30$ Гц. В таких условиях об обнаружении магнитодипольного излучения не может быть и речи. "Работа" пульсара напоминает работу радиолокационной станции в холостом режиме, когда все излучение сбрасывается в тепло.

Однако после открытия миллисекундного пульсара, когда стало ясно, что в Галактике существуют долгоживущие быстро вращающиеся нейтронные звезды, забрезжила надежда на обнаружение магнитодипольных волн

(Липунов, 1983а). Частота миллисекундного пульсара $\nu = 642$ Гц и уже приближается к плазменной при $n_{-2} \approx 1$.

В принципе нейтронные звезды могут вращаться быстрее (см. гл. V, § 13). Их частоты могут быть даже выше 1 кГц. Кроме того, если магнитное поле нейтронной звезды обладает мультипольным моментом, то можно ожидать магнитомультипольного излучения на более высоких частотах. Например, плотность потока энергии магнитодипольных волн от миллисекундного пульсара (расстояние принято равным 2,5 кпк):

$$F_{1937+21} \approx 8 \cdot 10^{16} I_{45} \Delta\nu_1^{-1} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц}), \quad (37.VII)$$

где $\Delta\nu_1$ — ширина полосы приемника в кГц. Это примерно на два порядка превышает чувствительность современных магнетометров.

В (37.VII) не учтено поглощение, обусловленное свободно-свободными переходами, которое может существенно снизить принимаемый поток. Поэтому (37.VII) носит скорее иллюстративный характер. Как отмечалось (Липунов, 1983а), для обнаружения излучения в области нескольких килогерц необходимо удалиться от Солнца, чтобы избавиться от поглощения в солнечном ветре. В этой связи особый интерес приобретает открытие, сделанное недавно на космических аппаратах "Вояджер" (Курс и др., 1985). С помощью бортовых магнетометров было обнаружено низкочастотное электромагнитное излучение на частоте ~ 3 кГц. Природа его окончательно не выяснена, хотя авторы считают наиболее вероятным источником его границу гелиопаузы, возникающей при взаимодействии солнечного ветра с межзвездным газом. Тем не менее, крайне заманчиво было бы проверить пульсарное происхождение этого излучения.

Однако вернемся к надежно наблюдаемому диапазону.

Высокие яркостные температуры радиопульсаров можно объяснить в предположении о когерентном характере механизма излучения (Гинзбург и Железняков, 1970, 1971). Рассматривалось два типа когерентных механизмов — антенный и мазерный. Антенный механизм, например, может реализоваться при излучении сгустка частиц, имеющего размеры, значительно меньшие длины волны излучения. При этом складываются не квадраты амплитуд, а амплитуды, и в результате полная светимость оказывается пропорциональной квадрату числа частиц, а не числу частиц, как это обычно бывает. Однако такие сгустки слишком быстро расползнутся из-за дисперсии скоростей частиц и плазменных неустойчивостей (Гинзбург, 1971; Тер Хаар, 1972).

Мазерный механизм излучения работает в том случае, если по каким-то причинам создается инверсная заселенность по импульсам и энергиям. Фазировка при этом достигается автоматически под действием самого излучения. Рассматривались два типа мазеров — в первом из них усиливается сразу радиоизлучение (Гинзбург, 1971); в другом мазер работает на плазменных волнах, а радиоволны являются вторичным продуктом превращения плазменных волн в электромагнитные (Каплан и Цытович, 1973).

Любой механизм излучения должен объяснить главную особенность излучения — высокую направленность. Так как ширина импульсов примерно в 10 раз меньше расстояния между ними, то диаграмма направленности должна иметь угол раскрытия не более $\sim 10^\circ$.

В мазерных механизмах направленность возникает естественно. Рассматривались две возможности. Одна — мазерное излучение вблизи поверхности нейтронной звезды (Чиу и Кануто, 1971; Гинзбург и др., 1969). В последней работе предполагается, что наблюдаемая частота радиовсплеска близка к плазменной частоте в потоке плазмы. Вторая возможность — излучение вне светового цилиндра (см., например, Мичел, 1971). Однако в последнем случае трудно понять устойчивость формы импульса, а главное, фазировку импульсов в оптической, рентгеновской и радиообластях, как это наблюдается у пульсара в Крабовидной туманности.

К настоящему времени излучение вне радиодиапазона обнаружено только у трех радиопулсаров. Наиболее хорошо изученным в различных диапазонах (от радио- до гамма-диапазона) является пульсар в Крабовидной туманности. Оптическое и рентгеновское излучение пульсара в Крабовидной туманности поляризовано, и главное, имеет степенной спектр с индексом, близким к индексу спектра излучения самой туманности. На этом основании Шкловский (1970) выдвинул гипотезу, что механизм излучения как туманности, так и пульсара есть синхротронное излучение одних и тех же электронов. Острый пик оптических импульсов в Крабовидной туманности свидетельствует о том, что некоторые частицы излучают пучок с шириной меньше 10^{-2} радиан.

Сравнение пульсара в Крабовидной туманности и пульсара в Парусах показывает, что мощность оптического излучения очень сильно уменьшается с увеличением периода пульсаций — примерно как $\sim P^{-1.2}$. Этот факт не имеет пока удовлетворительного объяснения.

Рентгеновское излучение быстро вращающихся пульсаров, по-видимому, тоже имеет синхротронную природу. Однако конкретный механизм пока также не выяснен (Манчестер и Тейлор, 1980).

§ 5. Каверны вокруг нейтронных звезд

У эжектирующих звезд окружающая плазма останавливается свободными электронами волн и релятивистскими частицами. Каковы форма и свойства границы в этом случае?

Рассмотрим эту задачу, следуя работе Липунова и Прохорова (1983). Удобно начать с ситуации, когда нейтронная звезда находится в двойной системе. Здесь речь идет, конечно, о двойных системах, в которых нейтронная звезда находится в паре с нормальной звездой, теряющей вещество. Как показало численное моделирование эволюции нейтронных звезд, доля эжектирующих звезд в массивных системах с нормальными компонентами достигает нескольких десятков процентов от общего числа двойных систем (см. гл. X). До сих пор нет "надежных" кандидатов среди наблюдаемых источников в такие объекты. Тем не менее, нет сомнений в том, что они должны быть. В § 9 этой главы мы рассмотрим источники с подходящими свойствами.

Каверны в двойных системах. Пусть нейтронная звезда, обладающая магнитовращательной светимостью L_m , входит в состав двойной системы (большая полуось a) с нормальной звездой, теряющей вещество в виде звездного ветра (темп потери \dot{M}_0).