параметров (единицы CGSE):

$$H = 10^6\delta^{4/17},\quad l = 5\cdot 10^6\delta^{1/17},\quad E = mc^2\cdot 10^2\delta^{-2/17},$$
$$n = 5\cdot 10^{14}\cdot\delta^{-7/17},\quad ct_1 = 1{,}5\cdot 10^4\delta^{-6/17}.$$

Шкловский (1969a, b) считает, что электроны движутся под весьма малым углом к полю, так что $H \sim 10^6$ *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 $n \approx 3\cdot 10^{14}$ *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 $R = 1{,}2\cdot 10^6$ *см* момент инерции $I = 1{,}4\cdot 10^{45}$ *г/см*^{2}. Период $T = 0{,}033$ *сек* соответствует угловой скорости $\omega \sim 200$ *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 инжекции релятивистских электронов [Шкловский (1966, 1969a), 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.

Предполагается, что скорость отдачи энергии пропорциональна четвертой степени угловой скорости вращения. Такой закон получается, в частности, при вращении тела с постоянным магнитным дипольным моментом. Об этом см. ниже, в § 3, где рассматривается электродинамика пульсара. Пока зададимся этим законом, как эмпирическим. Сравнение различных пульсаров с сильно различающимися периодами в первом приближении подтверждает это предположение.

Итак, пусть

$$\frac{dE}{dt} = I\omega\frac{d\omega}{dt} = -B\omega^4; \qquad (13.2.1)$$

полагая I и B постоянными, получим

$$\frac{d\omega}{dt} = -a\omega^3, \quad \left(\frac{2}{\omega^2}\right) - \left(\frac{2}{\omega_0^2}\right) = at, \quad \omega = \left(2at + \frac{1}{\omega_0^2}\right)^{-1/2}. \qquad (13.2.2)$$

Здесь t — время, отсчитанное от момента возникновения пульсара, ω_0 — его начальная угловая скорость. Когда $\omega_0^2 \gg \omega^2$, то

$$\omega = \frac{1}{(2at)^{1/2}}, \quad \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega}{2t}. \qquad (13.2.3)$$

Этот закон довольно хорошо подтверждается наблюдениями; первоначальная скорость вращения, которая может быть разной у разных пульсаров, в формулы не входит. Константа a меняется не более, чем в десять раз, $\frac{dT}{dt} = \frac{3\cdot 10^{-15}}{T}$, что означает $\frac{d\omega}{dt} = -10^{-13}\omega^3$.

Для пульсара в Крабе известна точная дата рождения, поэтому есть возможность проверить закон торможения. Имеем $\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega}{2370}$ лет $= -\frac{\omega}{2t}$. В действительности взрыв произошел в 1054 г., $t = 916$ лет. Согласие неплохое. Существует и другая причина замедления: гравитационные волны, испускаемые вращающейся звездой. Излучения не будет, конечно, если звезда симметрична относительно оси вращения.

Предположим, что звезда обладает квадрупольным моментом K_*, который постоянен во вращающейся системе координат. Тогда

$$\frac{dE_r}{dt} = I\omega\omega = -\operatorname{const}\left(\frac{d^3K_*}{dt^3}\right)^2 = -\operatorname{const} K_*^2\omega^6. \qquad (13.2.4)$$

Соответствующий закон замедления таков:

$$\omega = \left(at + \frac{1}{\omega_0^4}\right)^{-1/4} \to bt^{-1/4}, \qquad (13.2.5)$$

т. е.

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega}{4t}, \tag{13.2.6}$$

что хуже согласуется с наблюдениями, причем отклонение имеет обратный предыдущему случаю знак. Очевидно, можно подобрать такую комбинацию гравитационного и магнитно-дипольного излучения, которая бы точно давала возраст и наблюдаемую скорость замедления пульсара. Полагая первоначальную угловую скорость $\omega_0 = 10^4$ *сек*$^{-1}$, легко получить $L_{0\,\text{грав}} = 3\cdot 10^{48}$ *эрг/сек*, $L_{0\,\text{маг}} = 5\cdot 10^{45}$ *эрг/сек*; для настоящего момента: $L_{\text{грав}} = 2\cdot 10^{38}$ *эрг/сек*, $L_{\text{маг}} = 10^{39}$ *эрг/сек*.

Что могло бы быть причиной квадрупольного момента? Определенную деформацию должно вызывать магнитное поле, направленное под углом к оси вращения. Однако, как показали Острикер и Ганн, величина магнитного поля, выведенная из магнитного замедления, слишком мала, чтобы обеспечить необходимую деформацию. Для этого надо предполагать внутренние поля порядка 10^{15} *гс* с силовыми линиями, спрятанными внутри звезды *). Хотя приведенные числа правдоподобны, очевидно, необходима осторожность в их применении. Возможны однако и многие другие причины отклонения от схематизированного предположения формулы (13.2.1), так что гравитационное излучение пульсара указанной выше мощности отнюдь не доказано.

Гравитационное излучение свободно покидает пульсар и его окрестности. В связи с экспериментами Вебера (1969) (см. гл. 1) любопытно отметить, что существует верхний предел для величины A_ω — спектральной плотности гравитационных волн от возникшего вращающегося пульсара. От этой величины A_ω зависит возбуждение резонансного детектора.

Особо отметим, что A_ω не зависит от квадрупольного момента нейтронной звезды K_*, т. е. от величины, о которой ничего не известно. В самом деле, при увеличении K_* увеличивается скорость излучения, но в той же пропорции уменьшается время, в течение которого пульсар проходит единичный интервал частоты, так что $A_\omega = F\dfrac{dt}{d\omega}$ не зависит от K_*. В отсутствие других механизмов замедления вращения пульсара общее количество энергии, испускаемое в виде гравитационных волн на единичный интервал частот, есть, очевидно,

$$\frac{\Delta E_\omega}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\left(\frac{1}{2} I\omega_r^2\right)}{\Delta\omega} = \frac{I\omega_2\Delta\omega_r}{\Delta\omega} = \frac{1}{4} I\omega. \tag{13.2.7}$$

*) К мысли о том, что сильное магнитное поле, намного превосходящее внешнее дипольное поле, может существовать внутри обычных звезд, давно привыкли.

Здесь учтено, что частота испускаемых волн в два раза больше угловой частоты вращения ω_r. Максимально возможный момент инерции нейтронной звезды $I = 3{,}5\cdot 10^{45}$ *г·см²*, поэтому для собственной частоты прибора Вебера $\omega = 10^4$ *сек*$^{-1}$ найдем

$$\frac{\Delta E_\omega}{\Delta\omega} = \frac{1}{4}\cdot 3{,}5\cdot 10^{45}\cdot 10^4 = 10^{49}\ \textit{эрг/гц}. \tag{13.2.8}$$

Усредненный поток, соответствующий этой величине, при расстоянии $r = 10\ 000$ *пс* (ядро Галактики), есть

$$A_\omega = \frac{\Delta E_\omega}{\Delta\omega 4\pi r^2} = 10^3\ \textit{эрг/см}^2\cdot\textit{гц}. \tag{13.2.9}$$

Рассмотрим образование пульсара, начальная скорость вращения которого больше, чем это соответствует частоте детектора. Предполагаем, что соответствующий взрыв сверхновой звезды произошел в ядре нашей Галактики и поэтому не наблюдается оптически. В ходе замедления вращения частота гравитационных волн проходит через резонансную, и в это время происходит возбуждение детектора. Однако для регистрации волн веберовским детектором необходимо, чтобы $A_\omega = 10^6$ *эрг/см²·гц* (Брагинский, 1970).

§ 3. Электродинамика пульсара

Исследования в области электродинамики пульсаров в основном ограничиваются решением модельных задач о вращении в вакууме тел с заданным вмороженным магнитным полем [Дойч (1955), Пачини (1968), Ганн и Острикер (1969), Голдрейх и Юлиан (1969)].

Кроме того, даются ориентировочные оценки для плазмы, увлекаемой магнитным полем и вращающейся вместе с пульсаром вплоть до радиуса, где линейная скорость вращения начинает превосходить скорость света [Голд (1968; 1969); Голдрейх (1969)]. Два этих разных подхода дают величины одного порядка для скорости потери энергии и углового момента.

Объяснение этого важного совпадения будет дано ниже. Начнем с рассмотрения диполя с магнитным моментом $\mathfrak{M}$ с осью, перпендикулярной к оси вращения.

Излучение энергии дается формулой

$$W = \frac{2}{3c^2}\mathfrak{M}^2\omega^4; \tag{13.3.1}$$

момент силы, тормозящей вращение, равен

$$m = \frac{1}{\omega}\frac{dE}{dt} = \frac{2}{3c^3}\mathfrak{M}^2\omega^3. \tag{13.3.2}$$