

где

$$\lambda \equiv \frac{\gamma \Omega_0^2}{\beta}, \quad \mu \equiv \frac{\Omega_0^2}{\Omega_i^2}. \quad (10.5.24)$$

б) Используя значения $t = 918$ лет, $T = 2486$ лет, покажите, что решением уравнения (10.5.23) является $\lambda = 0,271$ и что оно нечувствительно к μ для $\mu \leq 0,01$.

в) Отсюда покажите, что

$$\varepsilon = 2,9 \cdot 10^{-4}, \quad B_p \sin \alpha = 4,6 \cdot 10^{12} \text{ Гс}. \quad (10.5.25)$$

г) Покажите, что гравитационное излучение преобладает в потерях энергии в течение первых 130 лет жизни пульсара.

д) Полная энергия, излучаемая в виде электромагнитных волн, равна

$$\Delta E_{\text{em}} = \int \frac{\beta \Omega^4}{\Omega} d\Omega. \quad (10.5.26)$$

Выберите для определенности $\Omega_i = 10^4 \text{ с}^{-1}$ и покажите, что

$$\Delta E_{\text{em}} = 5,9 \cdot 10^{50} \text{ эрг}, \quad (10.5.27)$$

в то время как

$$\Delta E_{\text{GW}} = \frac{1}{2} I (\Omega_i^2 - \Omega_0^2) - \Delta E_{\text{em}} \approx \frac{1}{2} I \Omega_i^2 = 7 \times 10^{52} \text{ эрг}. \quad (10.5.28)$$

е) Покажите, что в настоящее время

$$\dot{E}_{\text{GW}} = 1,4 \cdot 10^{38} \text{ эрг/с}, \quad \dot{E}_{\text{em}} = 5,1 \cdot 10^{38} \text{ эрг/с}$$

в то время как при $\Omega_i = 10^4 \text{ с}^{-1}$

$$\dot{E}_{\text{GW}} = 2,9 \cdot 10^{48} \text{ эрг/с}, \quad \dot{E}_{\text{em}} = 3,9 \cdot 10^{45} \text{ эрг/с}$$

в начальный момент.

Упражнение 10.4. Каково значение эксцентricности e и отношения $T/|W|$ для пульсара в Крабовидной туманности в начальный момент, если $\Omega_i = 10^4 \text{ с}^{-1}$? Устойчива ли эта конфигурация? (Примите соотношения для сфероидов Маклорена; сравните с разд. 7.3.)

10.6. ПОКАЗАТЕЛЬ ТОРМОЖЕНИЯ

Для любой степенной модели замедления типа модели магнитного диполя можно записать

$$\dot{\Omega} = - (\text{const}) \cdot \Omega^n, \quad (10.6.1)$$

где параметр n называется *показателем торможения*. Для модели магнитного диполя $n = 3$. В общем случае можно определить

$$n \equiv - \frac{\Omega \dot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2}, \quad (10.6.2)$$

куда входит и случай (10.6.1). Таким образом, показатель торможения может в принципе быть измерен непосредственно по значениям частоты пульсара и ее производных. В настоящее время надежные определения существуют только для пульсара в Крабовидной туманности, для которого получено [249]:

$$n = 2,515 \pm 0,005. \quad (10.6.3)$$

Целый ряд факторов может нести ответственность за отклонение n от «канонического» значения $3^{1)}$. Например, приводились доводы [378] в пользу того, что установление магнитной оси пульсара параллельно («выравнивание») или перпендикулярно («противовыравнивание») оси его симметрии (которая не обязательно должна быть осью вращения) может происходить, если магнитная ось блуждает по звезде (сравните с «блужданием» магнитных полюсов на Земле). В моделях с «противовыравниванием» n может снизиться до 2 во время процесса установления магнитной оси, даже с учетом того, что торможение обусловлено магнитно-дипольным излучением. Но когда «противовыравнивание» завершается, то $n = 3$.

Заметим, что если бы гравитационное излучение являлось основной причиной торможения, то n было бы равно 5. В комбинированной модели Ганна-Острайкера для пульсара в Крабовидной туманности, которая обсуждалась в предыдущем разделе,

$$n = \frac{3 + 5\lambda}{1 + \lambda} = 3,43 \text{ (в настоящее время)}. \quad (10.6.4)$$

10.7. НЕВАКУУМНЫЕ МОДЕЛИ ПУЛЬСАРОВ. СООСНЫЙ РОТАТОР

Существенно, что уравнение (10.5.4)

$$\dot{E} \sim - \frac{B_p^2 R^6 \Omega^4}{c^3}, \quad (10.7.1)$$

может сохранять силу также в моделях, отличных от вакуумной модели наклонного магнитного диполя. В действительности, как впервые указали Голдрайх и Джулиан [230] и как мы увидим ниже, сильные электрические поля, параллельные магнитным полям на поверхности пульсара, неизбежно должны «отрывать» заряженные частицы от звезды. Следовательно, пульсар должен обладать плотной *магнитосферой*. Изучая случай, когда магнитный дипольный момент параллелен оси вращения звезды, Голдрайх и Джулиан доказали, что те заряженные частицы в магнитосфере, которые «нанизаны» на магнитные силовые линии, замыкающиеся внутри *светового цилиндра*, должны вращаться синхронно с пульсаром. Световой

¹⁾ Более полное обсуждение см. в книге Манчестера и Тейлора «Пульсары» [380].