



Рис. 89. Стабильность периодов радиопульсаров позволяет наложить ограничения на их двойственность. Двойные системы с параметрами, попадающими в заштрихованную область, исключаются (братья Лэмб, 1976)

ципе можно было бы обнаружить даже планету типа Земли, вращающуюся вокруг пульсара на расстоянии  $\sim 1$  астрономической единицы. Тем не менее, за исключением четырех случаев, двойственность радиопульсаров не обнаружена. Ограничения, накладываемые наблюдениями на двойственность пульсаров, демонстрируются рис. 89 (Лэмб и Лэмб, 1976). Нет ни одного радиопульсара в паре с видимым компонентом. Четыре радиопульсара – PSR 1913 + 16, 0655 + 64, 0820 + 02 и 1953 + 29 – имеют спутники, которые ничем не проявляют себя в оптической области и, скорее всего, представляют собой вырожденные звезды (см. § 9 этой главы).

## § 2. Радиопульсары – эжектирующие нейтронные звезды

Итак, радиопульсары – это в подавляющем большинстве одиночные нейтронные звезды, так что окружающей средой для них является межзвездная среда. Это верно даже для тех четырех пульсаров, которые входят в состав двойных систем. Ясно, что их компаньоны не могут поставлять вещество в сколько-нибудь заметном количестве.

Оценим радиус Шварцмана (см. гл. III), на котором давление эжектируемого излучения и релятивистских частиц уравнивается с давлением межзвездной среды. Будем полагать, что вращательные потери полностью идут на излучение низкочастотных электромагнитных волн и релятивистских частиц. Тогда радиус Шварцмана определяется из равенства

$$\frac{L_{\text{rot}}}{4\pi R^2 c} = \rho_{\infty} v_{\infty}^2, \quad (10.VII)$$

где  $\rho_{\infty}$  – плотность межзвездной среды,  $v_{\infty}$  – скорость движения звезды. Подставляя сюда  $L_{\text{rot}} = -I\omega\dot{\omega}$ , получим

$$R_{\text{Sh}} \approx 10^{16} I_{45}^{1/2} \rho_{-24}^{-1/2} v_6^{-1} p^{-3/2} \dot{p}_{-15}^{1/2} \text{ см.} \quad (11.VII)$$

В то же время радиус гравитационного захвата  $R_G$  равен

$$R_G \approx 2,7 \cdot 10^{14} m_x v_6^{-2} \text{ см.} \quad (12.VII)$$

Как следует из рис. 86, изменение периода пульсаров  $\dot{p} \gtrsim 10^{-18}$ , так что  $R_{\text{Sh}} > R_G$  и гравитация не играет существенной роли – радиопульсары действительно являются эжектирующими нейтронными звездами.

Если предположить, что вращательные потери пульсара описываются магнитодипольной формулой, то из равенства  $R_{\text{Sh}} = R_G$  получаем

критический период (52. III):

$$p_E \approx 6\mu_{30}^{1/2} v_6^{1/2} \rho_{-24}^{-1/4} m_x^{-1/2} \text{ с.} \quad (13.VII)$$

Периоды всех известных радиопульсаров заведомо удовлетворяют неравенству (13.VII). Более того, максимальные периоды пульсаров достаточно близки к значению  $p_E$  и факт затухания радиопульсаров можно было бы объяснить именно тем обстоятельством, что межзвездная среда, проникающая под радиус захвата, "гасит" пульсар. Надо сказать, что это естественное объяснение отсутствия радиопульсаров с периодами более 5 – 10 с не является общепринятым.

Отметим слабую зависимость  $p_E$  от магнитного поля нейтронной звезды, скорости ее движения и основных параметров межзвездной среды.

Конечно, при выводе формулы (13.VII) мы не учитывали ряда обстоятельств, которые могут изменить значение критического периода в ту или другую сторону в несколько раз. Например, необходимо учитывать, что излучение пульсара (имеется в виду в основном излучение магнитодипольных волн и релятивистских частиц) не изотропно (учет анизотропии уменьшит критический период). Не учитывалось также обратное влияние пульсарного излучения на параметры межзвездной среды. Далее мы рассмотрим такое влияние. Оно, по-видимому, увеличивает значение критического периода.

Гипотеза, объясняющая "затухание" радиопульсаров проникновением межзвездной среды под радиус захвата, кажется, противоречит неоспоримому факту – пульсары располагаются в тонком слое размером в несколько сотен парсек, где, собственно, сосредоточено все межзвездное вещество. И наоборот, практически нет радиопульсаров высоко над плоскостью Галактики, где межзвездная среда не мешает "работе" эжекции. Однако здесь нет противоречия. Концентрация радиопульсаров к плоскости связана с тем, что они появляются в ней. Остается вопрос, почему пульсары не "зажигаются" вновь – когда попадают в менее плотные слои высоко над плоскостью Галактики.

Ответ состоит в следующем. Вспомним, что эжекцию трудно подавить. Но как только плазма проникла под радиус захвата, а затем – под световой цилиндр, то эжекция начинается в более разреженной среде (Шварцман, 1970в). Этот своеобразный гистерезис объясняется тем, что под радиусом захвата давление аккрецируемой плазмы растет быстрее, чем давление эжектируемого потока. Короче говоря, переход из эжекции в состояние "пропеллера"  $E \rightarrow P$  определяется равенством (13.VII), а вот обратный переход  $P \rightarrow E$  происходит при гораздо меньшем критическом периоде.

### § 3. Электродинамика пульсаров и генерация релятивистских частиц

Приведенные выше оценки показывают, что межзвездная среда не влияет на физическую ситуацию внутри светового цилиндра. Анализ работы радиопульсара можно начать с так называемого вакуумного приближения. Как правило, вращающийся в вакууме магнитный диполь является излучателем магнитодипольных волн с частотой, равной частоте вращения диполя. Однако более интересным является возникновение статических электри-