УДК 524.354:6—337

АСТРОФИЗИКА

А. Г. Мовсисян, член-корреспондент АН Армянской ССР Д. М. Седракян, В. В. Усов

Изменение угла между магнитной и вращательной осями пульсаров
 в процессе их эволюции

(Представлено 25/IV 1989)

В процессе торможения вращения пульсара угол Ψ между его магнитной осью и осью вращения может меняться. Различные механизмы торможения пульсаров предсказывают как уменьшение ⁽¹⁾, так и увеличение ⁽²⁾ угла Ψ со временем под влиянием электромагнитных сил, действующих на вращающуюся магнитную нейтронную звезду. Наблюдательные данные о пульсарах указывают на сближение их магнитной и вращательной осей ⁽³⁾. В данной статье обсуждается эффект, который может приводить к наблюдаемому сближению магнитной и вращательной осей независимо от того, стремятся ли электромагнитные силы, действующие на пульсар, увеличить или уменьшить величину Ψ .

Общепринято, что нейтронная звезда имеет жидкое ядро и твердую кору ⁽⁴⁾. Ядро звезды состоит из нейтронов и небольшой примеси ($\sim 1\%$) протонов и электронов («пре»-фаза). Кора нейтронной звезды имеет относительно небольшую толщину ($\sim 10^5$ см) и состоит, в основном, из ядер и электронов («Ае»-фаза). Нижние слои коры обогащены нейтронами («Аеп»-фаза). Протоны в «пре»-фазе и нейтроны в «пре»- и «Аеп»-фазах внутри всех известных сейчас пульсаров, скорее всего, сверхтекучие жидкости ^(4, 5) (см. ниже).

В работах ⁽⁶⁻⁸⁾ был предложен механизм генерации магнитного поля нейтронных звезд, основанный на так называемом эффекте увеличения. В этом механизме генерация магнитного поля $\vec{B}$ обусловлена квантовым взаимодействием нейтронного и протонного конденсатов в «пре»-фазе. Поле $\vec{B}$ внутри ядра сильно неоднородно: в большей части ($> 80\%$) объема «пре»-фазы оно равно нулю, а вблизи стволцов нейтронных вихревых нитей оно порядка $10^{14} - 10^{15}$ Гс ⁽⁹⁾. Среднее значение магнитного поля ядра зависит от структуры нейтронной звезды и составляет $\sim 10^9 - 10^{13}$ Гс. В момент образования нейтронной звезды температура внутри нее очень высока ($\geq 10^{11}$ К) ⁽¹⁾. Стандартные расчеты охлаждения нейтронных звезд показывают, что примерно через сутки внутренняя температура падает до $\sim 10^9 - 10^{10}$ К, а спустя несколько сот лет приближается к $\sim 10^8$ К (см., например, ⁽⁹⁻¹¹⁾). Независимо от механизма охлаждения внутренняя температура всех наблюдаемых сейчас пульсаров должна быть меньше 2×10^8

К⁽¹²⁾. Значение температуры T , сверхтекучих переходов нуклонов равно: для нейтронов $T \approx 10^{10}$ К (1S_0 —спаривание) и $9 \cdot 10^8$ К (3P_2 —спаривание), а для протонов $T \approx 2 \cdot 10^9$ К (^{13,14}). Следовательно, через короткий промежуток времени ($\ll 10^3$ лет—возраст самого молодого из известных пульсаров) нейтронная и протонная жидкости переходят в сверхтекучее состояние, и включается механизм увлечения, приводящий к генерации магнитного поля внутри жидкого ядра нейтронной звезды. Если бы у нейтронной звезды отсутствовала твердая кора, то внешнее магнитное поле звезды, генерируемое за счет эффекта увлечения, имело бы дипольную конфигурацию с магнитным моментом, направленным вдоль оси вращения нейтронной звезды. Однако вследствие высокой проводимости вещества коры нейтронной звезды (¹⁵) магнитное поле, генерируемое в «пре»-фазе, будет сначала полностью экранироваться токами, текущими во внутренних слоях коры пульсара. Таким образом, возможно образование следующей конфигурации магнитного поля нейтронной звезды: внутри звезды имеется магнитное поле, симметричное относительно оси вращения, которое экранировано токами, текущими в коре звезды, а в ней имеется свое магнитное поле, создаваемое обычными токами проводимости, которое выходит наружу и имеет магнитную ось, не совпадающую с осью вращения.

Известно, что характерное время омического затухания магнитного поля определяется выражением

$$\tau = \frac{4\pi L^2}{\pi c^2} = 5 \cdot 10^9 \left(\frac{\sigma}{10^{25} \text{с}^{-1}} \right) \left(\frac{L}{10^5 \text{см}} \right)^2 \text{ лет,}$$

где σ —проводимость вещества, а L —характерный размер, на котором меняется величина $\vec{B}$. Для типичных нейтронных звезд с массой $M \approx 1.4 M_\odot$ проводимость вещества в основании коры, т. е. на глубине $L \sim 10^5$ см, порядка 10^{25}с^{-1} (¹²).

Внешнее магнитное поле пульсара, генерируемое токами, текущими в коре, затухает с характерным временем τ . С таким же характерным временем внутреннее магнитное поле, генерируемое в жидком ядре нейтронной звезды, будет «просачиваться» через ее твердую кору. Рассмотрим поведение угла Ψ между магнитной и вращательной осями пульсара.

Если электромагнитные силы, действующие со стороны магнитного поля на пульсар, стремятся выровнять магнитную и вращательную оси, то рассмотренный выше эффект «просачивания» внутреннего магнитного поля лишь увеличит скорость уменьшения угла Ψ , поскольку этот эффект приводит к увеличению компоненты магнитного момента нейтронной звезды вдоль ее оси вращения. Если же эти силы стремятся сделать магнитную и вращательную оси перпендикулярными, то угол Ψ сначала будет возрастать, а по прошествии времени τ возрастание Ψ сменится падением. Следовательно, независимо от характера электромагнитных сил, тормозящих вращение пульсара и стремящихся изменить угол Ψ , внешнее магнитное поле пульсара становится соосным ($\Psi \rightarrow 0$).

В заключение отметим, что для выбора между различными меха-