

ОБ АТМОСФЕРЕ МАГНИТНЫХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД (ПУЛЬСАРОВ)

В. Л. Гинзбург, В. В. Усов

Для теории нейтронных звезд и пульсаров весьма важным является заключение [1], что, несмотря на действие силы тяжести, звезда, вообще говоря, должна быть окружена протяженной "атмосферой". Дело в том, что нейтронная звезда, как это следует из естественных соображений (см., например, [2]), должна быть намагничена и вращаться, причем угловая скорость Ω и магнитное поле B (скажем, дипольное поле на магнитном полюсе) достаточно велики. В результате в вакууме у поверхности хорошо проводящей звезды возникает электрическое поле $E \sim r_0 \Omega B / c$, действие которого на частицу с зарядом eZ и массой $A m_p$ существенно превосходит действие силы тяжести при условии

$$\Omega B \gg \frac{m_p A}{e Z} \frac{c G M_0}{r_0^3} \sim 10^4 \text{ гс} \cdot \text{сек}^{-1}, \quad (1)$$

где M_0 — масса звезды, r_0 — ее радиус, m_p — масса протона и G — гравитационная постоянная; переход к численному значению сделан при $M_0 \sim M_\odot = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$, $r_0 \sim 10^6 \text{ см}$ и $A/Z \sim 1$.

Если определять поле B в "вакуумном приближении", т. е. считать пульсар излучающим магнитно-дипольное излучение как в вакууме [2], то для известных пульсаров значение ΩB лежит в пределах от $1,5 \cdot 10^{12}$ для PSR 0808 до $5 \cdot 10^{14}$ для PSR 0532 (см. [3]) и условие (1) соблюдается с огромным запасом. Поэтому, насколько нам известно, не возникало сомнений в том, что пульсары могут быть источниками частиц, заполняющих их магнитосферу и ответственных за излучение электромагнитных волн. На самом деле, однако, истечение частиц будет обеспечено только при наличии у поверхности звезды некоторого газового слоя или, если гарантировано вырывание ионов с твердой поверхности звезды. Оба эти условия могут, между тем, не соблюдаться. Конкретно, в сильном магнитном поле $B \gg B_c = 4,6 \cdot 10^9 \text{ гс}$ поверхность нейтронной звезды представляет собой нечто вроде "полимерного" (квазиодномерного) металла [4, 5] с плотностью $\rho \gtrsim 10^4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ и энергией связи в решетке (на "атом", ядро которого имеет заряд eZ)

$$W \approx 13,6 Z^3 \eta^{4/5} \text{ эв}, \quad \eta = (B/B_c Z^3)^{1/2} \gg 1$$

$$W \sim 27 Z^3 \eta^{12/5} \text{ эв}, \quad Z^{-3/2} \ll \eta \ll 1. \quad (2)$$

В поле $B = 10^{13} \text{ гс}$ энергия связи $W \approx 10^3 \text{ эв}$ для He и $W \sim 6 \cdot 10^4 \text{ эв}$ для Fe. Между тем для большинства пульсаров (возраст $\tau \gtrsim 10^5 \text{ лет}$) температура поверхности $T \lesssim 10^5 - 10^6 \text{ }^\circ\text{К} \sim 10 - 10^2 \text{ эв}$ и лишь для пульсаров PSR 0532 в Крабе ($\tau = 918 \text{ лет}$), возможно, $T \sim 2 \cdot 10^3 \text{ эв}$

(см. [6]). Таким образом в достаточно сильном поле и особенно при доминировании во внешнем слое ядер Fe, как это часто считают, для известных пульсаров тепловое испарение с поверхности не должно играть никакой роли. Что же касается вырывания ионов электрическим полем, то оно заведомо существенно при условии $E \gtrsim E_c = \alpha Q^2 / (eZ^*)^3$,

где $Q = W + \sum_{n=1}^{Z^*} I_n - Z^* \phi_0$, I_n – потенциал ионизации n -го электрона

ϕ_0 – работа выхода электрона, eZ^* – заряд вырываемого иона и α – некоторый численный коэффициент (подробнее см. [7]). Можно показать, что при условии $\eta \gg 1$ поле E_c минимально при $Z^* = Z$ и например, для He $Q \approx 2W$ (при $B \sim 10^{12}$). В результате вырывание He происходит при условии (в области $\eta \gg 1$)

$$\Omega B \gtrsim 4 \cdot 10^{13} \alpha \left\{ \left[1 + 0,3 \ln \left(\frac{B}{10^{12}} \right) \right]^2 + 0,23 \left(\frac{B}{10^{12}} \right)^{2/5} \right\}^2 \text{ гс} \cdot \text{сек}^{-1} \quad (3)$$

Коэффициент α , к сожалению, неизвестен; вероятно, $\alpha \sim 1$. Если это так, то для большинства пульсаров условие вырывания (3) не выполнено, причем "с запасом" на порядок величины (например, для PSR 0527 левая часть (3) меньше правой в 30 раз). Водород же для известных пульсаров может вырываться. Однако, согласно [8], во внешней оболочке пульсаров может присутствовать, помимо Fe, лишь He, причем в количестве порядка 10^{21} г. При концентрации истекающего вещества $n \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (см. ниже) звезда теряет He в количестве $dM/dt \sim 4m_p n c 4\pi r_0^2 \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ г/сек}$ и весь He будет потерян за 30 – 3000 лет. Для Fe оценка E_c менее надежна. Если в этом случае $Z^* \sim Z = 26$, то $Q \sim 33 (B/10^{12})^{2/5} \text{ кэВ}$ и в соот-

ношении (3) правую часть нужно заменить на $4 \cdot 10^{13} \alpha \left\{ \left(\frac{B}{10^{12}} \right)^{2/5} + 0,1 \left(\frac{B}{10^{12}} \right)^{6/5} \right\}^2$.

В результате условия вырывания Fe и He примерно одинаковы.

Таким образом для нейтронных звезд, для которых нарушается условие типа (3), истечение вещества из звезды может быть полностью заперто¹⁾. Для известных пульсаров вопрос остается недостаточно ясным (в связи с неопределенностью коэффициента α в формуле типа (3), особенно при $Z^* \gg 1$). Он заслуживает пристального внимания, в частности, в связи с проблемой применимости "ва-

¹⁾ Как подчеркнуто в [5], истечение электронов (холодная эмиссия) происходит легче, чем вырывание ионов. Однако, при истечении одних электронов звезда будет заряжаться как целое и электронная эмиссия быстро упадет до низкого уровня. Так, характерная концен-

$$\text{трация электронов вблизи поверхности } n_e(0) \sim \frac{\Omega B}{2\pi c e} \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$$

(см. [1]) при отсутствии испускания ионов убывает (при $t \gg t_0 \sim 0,1 (10^{12}/B) (10^6/r_0) \Omega^{-2} \text{ сек}$) по закону $n_e(t) = n_e(0) t_0 / t$; при $\Omega \sim 1$, $B \sim 10^{12}$ и $r_0 \sim 10^6$ концентрация n_e за сутки упадет примерно в 10^6 раз.

куумного приближения". С одной стороны, предположение [2] о непригодности вакуумного приближения сталкивается с возражениями (см., например, [9, 10]). С другой стороны, наблюдаемое замедление пульсаров, вообще говоря, отличается от замедления, обусловленного магнито-дипольным излучением в вакууме [11]. Если для данной нейтронной звезды истечение ионов с поверхности невозможно, то она может быть пульсаром только при далеко идущих дополнительных предположениях. Так, в этом случае заслуживает особого внимания гипотеза о "вулканизме" – выброс вещества из толщи звезды [12]. Другая возможность – излучение электромагнитных волн в магнитосфере медленно вращающихся пульсаров за счет аккреции [13]. Что касается возможности нагрева поверхности звезды за счет аккреции, то для наблюдаемых пульсаров (при оценке поля из вакуумного приближения) она представляется нереальной. Рассмотрения заслуживает, правда, родственная возможность – нагрев поверхности частицами, выброшенными данным пульсаром и ускоренными в его же магнитосфере.

Как нам представляется, затронутая в настоящей статье проблема, должна быть учтена в любой последовательной и самосогласованной теории пульсаров.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
24 января 1972 г.

Московский
физико-технический институт

Литература

- [1] P.Goldreich, W.H.Julian. *Astrophys. Journ.*, 157, 869, 1969.
- [2] В.М.Гинзбург. УФН, 103, 393, 1971; *Highlights of Astronomy*, 2, 20, 1971.
- [3] G.C.Hunt. *Mon. Not.*, 153, 119, 1971; D. ter Haar. *Pulsars Preprint*. 1971.
- [4] Б.Б.Каломцев, В.С.Кудрявцев. *Письма в ЖЭТФ*, 13, 15, 61, 1971.
- [5] M.Ruderman. *Phys. Rev. Lett.*, 27, 1306, 1971.
- [6] P.R.Chaudhuri. *J. Phys. A. Gen. Phys.*, 4, 508, 1971.
- [7] Автоионная микроскопия. М., Изд. Мир, 1971.
- [8] L.C.Rosen, A.G.W.Cameron. *Astrophys. and Space Sci.* 13, 274, 1971.
- [9] J.P.Ostriker, J.C.Gunn. *Astrophys. J.*, 157, 1395, 1969.
- [10] R.M.Kulsrud. *Astrophys. J.*, 163, 567, 1971.
- [11] J.A.Roberts, D.W.Richards. *Nature Phys. Sci.*, 231, 25, 1971.
- [12] F.J.Dyson *Comments Astrophys. Space Phys.*, 1, 198, 1969.
- [13] В.Ф.Шварцман. *Изв. высш. уч. зав., Радиофизика* 13, 1852, 1970.