

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

# **НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР**

**(30—31 марта 1983 г.)**

30 и 31 марта 1983 г. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

*30 марта*

1. В. С. Бескин, А. В. Гуревич, Я. Н. Истомин. Электродинамика магнитосферы пульсаров.
2. Е. П. Мазец. Космические гамма-всплески.

*31 марта*

3. Ю. М. Каган. Квантовая диффузия в неидеальных кристаллах.
4. В. А. Михеев. Квантовая диффузия и локализация атомов  $\text{He}^3$  в твердом  $\text{He}^4$ .

Ниже приводится краткое содержание трех докладов.

523.84(048)

**В. С. Бескин, А. В. Гуревич, Я. Н. Истомин. Электродинамика магнитосферы пульсара.** Пульсар представляет собой быстро вращающуюся нейтронную звезду с очень сильным магнитным полем  $B_0 \sim 10^{12}$  Гс. Благодаря вращению возникает и электрическое поле, достигающее вблизи звезды значения  $E_0 \sim (v/c) B_0 \sim 10^{11}$  В/см. Важно, что электрическое поле имеет при этом компоненту, параллельную магнитному. Частицы, попавшие в столь сильное поле, ускоряются, излучают жесткие  $\gamma$ -кванты, которые, поглощаясь в магнитном поле, генерируют электрон-позитронные пары<sup>1</sup>. Так формируется магнитосфера, образованная электрон-позитронной плазмой, вращающейся в магнитном поле звезды.

Наличие плазмы оказывает определяющее влияние на структуру магнитного поля на больших расстояниях от звезды. Если при сравнительно небольших значениях  $r$  поле имеет дипольный характер, то при  $r \sim c/\Omega$  ( $c$  — скорость света,  $\Omega$  — угловая частота вращения звезды) благодаря движению плазмы силовые линии резко деформируются, вытягиваются и уходят на бесконечность. Следовательно, силовые линии, выходящие из областей в окрестности магнитных полюсов, в магнитосфере пульсара разомкнуты, так же как в магнитосферах Земли или других планет.

Электронно-позитронная плазма уходит вдоль разомкнутых силовых линий. Поэтому в приполюсных областях она должна генерироваться непрерывно. Это и служит причиной возникновения активных областей в окрестности полюсов, позволяющих обнаруживать пульсары. Для поддержания активных процессов необходим источник энергии. Им является энергия вращения звезды. Замедление вращения, наблюдаемое на опыте у всех пульсаров<sup>2</sup>, обусловлено пондеромоторным действием электрических токов, которые протекают на поверхности звезды, стекают в магнитосферу и возвращаются обратно. Электрические токи определяют, таким образом, не только структуру магнитного поля, но и энергетику основных процессов, протекающих в магнитосфере пульсара, а также динамику звезды.

В нашей работе исследуется структура магнитосферы пульсара с учетом возникающих в ней электрических полей и продольных токов при произвольном угле наклона оси вращения к оси магнитного диполя. Исходя из общей системы кинетических

уравнений и уравнений Максвелла, можно прийти к замкнутым нелинейным уравнениям, описывающим квазистационарные электродинамические процессы в магнитосфере пульсара, которые имеют вид

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \{ \mathbf{B} (1 - \beta_r^2) + \beta_r (\beta_r \mathbf{B}) + [\beta_r \nabla \psi] \} = & \frac{4\pi}{1 - \beta_r^2 + \beta_r [\nabla \psi \mathbf{B}] / B^2} \left\{ \frac{i_{\parallel}}{c} [(1 - \beta_r^2) \mathbf{B} + [\beta_r \nabla \psi]] + \right. \\ & \left. + \frac{[\nabla \psi \mathbf{B}]}{B^2} \left[ \frac{\Omega \mathbf{B}}{2\pi c} + \frac{1}{4\pi} (\Delta \psi - \beta_r \nabla (\beta_r \nabla \psi)) \right] \right\}, \quad (1) \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \beta_r = & \frac{[\Omega \mathbf{r}]}{c}; \end{aligned}$$

здесь  $\mathbf{B}$  — напряженность магнитного поля,  $-\nabla \psi$  — отклонение электрического поля в магнитосфере от поля, которое обеспечивает полную коротацию плазмы (т. е. ее вращение с угловой скоростью  $\Omega$ ),  $i_{\parallel} = i_{\parallel} \mathbf{B}$  — продольный ток. Электрический потенциал  $\psi$  и продольный ток  $i_{\parallel}$  служат как бы источниками поля  $\mathbf{B}$  в уравнении (1). При выводе уравнений (1) кроме квазистационарности использовались лишь определенные ограничения эффективности источника, генерирующего электронно-позитронную плазму; реально эти условия обычно хорошо выполняются. Описание движения электронов и позитронов в (1) проводилось в рамках дрейфового приближения.

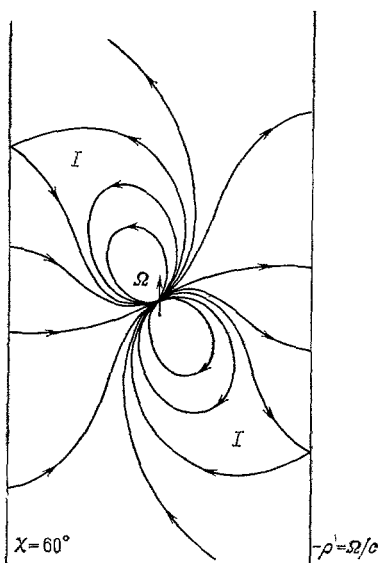


Рис. 1. Структура магнитного поля при угле наклона оси магнитного диполя к оси вращения  $\chi = 60^\circ$  ( $\psi = 0$ ,  $i_{\parallel} = 0$ ). Область  $I$  — область замкнутых силовых линий.

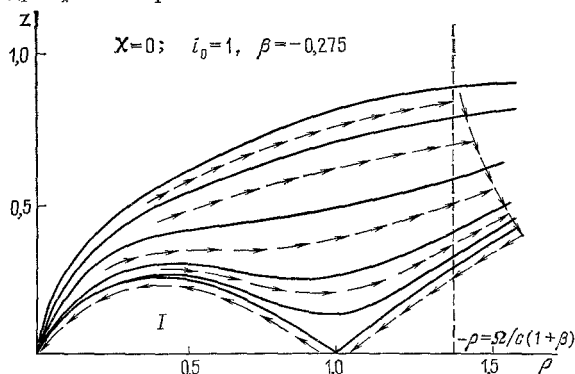


Рис. 2. Структура магнитного поля при наличии продольного тока ( $i_0 = 1$ ).

Величина электрического поля  $\beta = -0,275$  соответствует условию согласования (2). Область  $I$  — область замкнутых силовых линий. Стрелками показано направление текущих в магнитосфере токов.

Характер структуры магнитосферы, определенной согласно (1), виден из примеров, показанных на рис. 1, 2. В отсутствие источников ( $\psi = 0$ ,  $i_{\parallel} = 0$ , рис. 1) вся магнитосфера вращается вместе со звездой с угловой скоростью  $\Omega$ . При этом дрейфовые скорости частиц достигают скорости света  $c$  на «световом цилиндре» — цилиндре радиуса  $\rho = c/\Omega$  (т. е. при  $\beta_r = 1$ ). При наличии источников (рис. 2) совместное со звездой вращение совершается лишь в области замкнутой магнитосферы. Область разомкнутых силовых линий вращается с меньшей угловой скоростью. При этом «световая поверхность», на которой  $E = B$ , уже не совпадает со световым цилиндром.

Вблизи световой поверхности возникает особый пограничный слой. Здесь нарушается дрейфовое приближение, так что требуется более точное описание движения электронов и позитронов. Решение задачи в пограничном слое показывает, что в нем сильно ускоряются электроны и позитроны, достигая очень высокой энергии

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_m j_{\parallel}}{nec}, \quad \varepsilon_m = \frac{eB_0 \Omega^2 R^3}{4c^2} \approx 10^{13} \text{ эВ}.$$

Видно, что максимальная энергия частиц пропорциональна плотности продольного тока  $j_{\parallel}$  и обратно пропорциональна плотности плазмы  $n$ . В пограничном слое образуется, кроме того, сильная токовая струя, текущая вдоль световой поверхности поперек

силовых линий магнитного поля (см. рис. 2). Дойдя до сепаратрисы, разделяющей области замкнутых и разомкнутых силовых линий, токовая струя поворачивает и вдоль сепаратрисы возвращается на поверхность звезды. Так возникает замыкание продольных электрических токов в магнитосфере пульсара.

Решение нелинейных уравнений (1) возможно лишь при выполнении важного условия «согласования», связывающего величину безразмерного продольного тока  $i_0 = j_{||} \cdot 4\pi/\Omega B$  и электрического поля  $\beta$

$$\beta = -b(\chi) (1 - \sqrt{1 - a(\chi) i_0^2}). \quad (2)$$

Здесь  $\beta a \propto |\nabla \phi|$  — безразмерная напряженность электрического поля, а  $a(\chi)$  и  $b(\chi)$  — постоянные, зависящие от  $\chi$ , т. е. от угла наклона оси магнитного диполя к оси вращения. Соотношение согласования (2) играет роль нелинейного закона Ома для магнитосферы пульсара. При малых токах  $i_0 \ll 1$  электрическое поле  $\beta \sim -i_0^2$ . Отрицательный знак  $\beta$  означает, что вращение разомкнутой магнитосферы всегда затормаживается при наличии тока. Продольный ток, как видно из (2), ограничен по величине  $i_0 \leq i_{0c}(\chi) = a^{-1/2}(\chi)$ .

Продольные токи замыкаются током  $I_s$ , текущим по поверхности звезды. Пондеромоторное действие тока  $I_s$  приводит к торможению вращения звезды и к изменению со временем угла наклона осей  $\chi$ :

$$\frac{dP}{dt} \approx \frac{B_0^2 R^6}{P c^3 J_r} i_0 \cos \chi, \quad \sin \chi = \frac{P}{P_0} \sin \chi_0, \quad P = \frac{2\pi}{\Omega}. \quad (3)$$

Видно, что увеличение периода вращения звезды  $P$  пропорционально величине продольного тока  $i_0$ . Угол наклона осей  $\chi$  растет с увеличением периода. Если продольного тока нет (т. е. при полной коротации  $\psi = 0$ ,  $i_0 = 0$ ; рис. 1), торможение пульсара отсутствует, независимо от угла наклона осей  $\chi$ .

Полученные результаты (в рамках модели «завора» Рудермана — Сазерленда<sup>1)</sup>) использовались для анализа наблюдаемых параметров пульсаров. Несмотря на то, что при эволюции угол  $\chi$  у каждого пульсара стремится к  $90^\circ$ , число пульсаров, у которых в настоящее время возможно наблюдать оба магнитных полюса, согласуется с числом пульсаров, у которых наблюдается интеримпульс. С другой стороны, теория предсказывает, что при увеличении чувствительности существующей приемной аппаратуры на 1—3 порядка количество пульсаров, у которых будут наблюдаться интеримпульсы, должно резко возрасти.

Показано также, что в рамках нашей модели магнитное поле у каждого пульсара можно считать постоянным. Этот вывод согласуется со следующим из теории малым временем жизни пульсаров  $\tau \sim 3$ —10 млн. лет, которое находится в хорошем согласии также с наблюдаемым распределением пульсаров в Галактике<sup>2)</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ruderman M. A., Sutherland P. G. — *Astrophys. J.*, 1975, v. 196, p. 51.
2. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. — М.: Мир, 1980.