

УДК 524.354.4

## О СТРУКТУРЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПУЛЬСАРАХ

И. Ф. МАЛОВ

Поступила 24 мая 1982

Принята к печати 27 января 1983

Для 4 пульсаров, на основе модели полярной шапки, путем сравнения хода позиционного угла вдоль среднего профиля на частотах 400—1665 МГц найдено, что изменение наклона оси магнитного диполя к оси вращения нейтронной звезды в области генерации этих частот меньше  $2^\circ$ . Показано, что у пульсаров с двухкомпонентными средними профилями искажение магнитного поля из-за вращения нейтронной звезды несущественно. На основе полученных результатов делается вывод о том, что в области генерации радионизлучения у пульсаров, описываемых моделью полярной шапки, магнитное поле близко к дипольному.

1. В [1—3] указывалось, что наблюдаемое изменение позиционного угла линейной поляризации вдоль среднего профиля позволяет оценить наклон оси магнитного диполя к оси вращения пульсара. Таким способом по поляризационным данным на разных частотах, предполагая, что излучение заданной частоты генерируется на фиксированном уровне в магнитосфере пульсара, можно установить, сохраняется ли указанный наклон с удалением от поверхности нейтронной звезды. Этому вопросу и посвящена настоящая работа.

Для оценок использовались данные о позиционных углах в средних профилях четырех пульсаров (PSR 0823+26, 0950+08, 1133+10, 1929+10) на частотах 410, 630 и 1665 МГц [4—5]. Знания одних позиционных углов недостаточно для однозначного определения взаимного расположения магнитной оси и оси вращения, поэтому здесь привлекались данные о средних профилях, полученные в работе [3]. Наблюдаемые позиционные углы  $\psi$  сравнивались с углами, вычислявшимися по формуле [1]:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \beta \sin \varphi}{\sin \zeta \cos \beta - \cos \zeta \sin \beta \cos \varphi} \quad (1)$$

где  $\varphi$  — долгота, соответствующая углу  $\psi$ ,  $\beta$  — угол между магнитной осью и осью вращения,  $\zeta$  — угол между лучом зрения и осью вращения.

Для рассматриваемых пульсаров из работы [3] брались значения  $\zeta - \beta$  и  $\beta$  на одной частоте. Положение луча зрения относительно оси вращения с изменением расстояния от поверхности нейтронной звезды не меняется, т. е.  $\zeta = \text{const}$ . С учетом этого обстоятельства при фиксированном  $\zeta$  можно из (1) определить  $\beta$  по данным на других частотах.

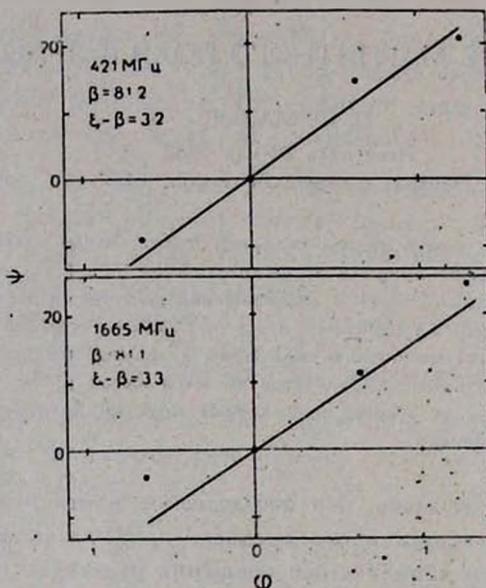


Рис. 1. Наблюдаемый (крестики) и вычисленный при указанных значениях параметров ход позиционного угла в PSR 0823+26. Все углы измерены в градусах. Аналогичный смысл имеют рис. 2—4.

2. Результаты проведенных вычислений представлены на рис. 1—4 и в табл. 1. Ошибки определения  $\beta$  оценивались следующим образом. Для исследуемых пульсаров значения угла  $\varphi$  заключены в пределах  $\pm 15^\circ$ , что соответствует  $0.97 \lesssim \cos \varphi \lesssim 1$ , и поэтому из (1)

$$\operatorname{tg} \psi \approx \frac{\sin \beta}{\sin (\zeta - \beta)} \sin \varphi. \quad (2)$$

По наблюдаемым значениям  $\{\varphi_k, \psi_k\}$  методом наименьших квадратов можно определить величину  $z = -\frac{\sin \beta}{\sin (\zeta - \beta)}$ , а также ее ошибку  $\sigma_z$ .

Из уравнения (2) нетрудно получить выражение:

$$\Delta \beta = \operatorname{tg} \psi \left[ 57^\circ.3 \sigma_z \frac{\sin \beta}{\sin (\zeta - \beta)} + \frac{\Delta (\zeta - \beta)^\circ}{\operatorname{tg} (\zeta - \beta)} \right]. \quad (3)$$

Величина  $\Delta(\zeta - \beta)$  принималась равной  $0.^\circ 1$  (с такой точностью она приведена в [3]).

Таблица 1

| PSR       | $P$ (сек) | $\nu$ (МГц) | $\beta'$            | $(\zeta - \beta)$ |
|-----------|-----------|-------------|---------------------|-------------------|
| 0823 + 26 | 0.531     | 421         | $81.2 \pm 29.4$     | 3.2               |
|           |           | 1665        | $81.1 \pm 37.9$     | 3.3               |
| 0950 - 08 | 0.253     | 410         | $1.8 \pm 0.3$       | -0.8              |
|           |           |             | $(13.2 \pm 0.5)$    | (-7.0)            |
|           |           | 1665        | $3.0 \pm 0.6$       | -2.0              |
|           |           |             | $(38.0 \pm 5.3)$    | (-31.8)           |
| 1133 + 16 | 1.188     | 410         | $21.2 \pm 4.0$      | 1.7               |
|           |           | 638         | $21.0 \pm 3.7$      | 1.9               |
|           |           | 1665        | $19.4 \pm 2.6$      | 3.5               |
| 1929 + 10 | 0.226     | 392         | $6.7 \pm 0.6$ (7.5) | -3.8 (-4.6)       |
|           |           | 1665        | $8.1 \pm 0.4$ (7.5) | -5.2 (-4.6)       |

Из полученных данных следует, что в PSR 0823 и 1133 в пределах ошибок наклон магнитного диполя к оси вращения нейтронной звезды остается неизменным при переходе от уровня генерации радиоизлучения с частотой 400 МГц к уровню, соответствующему частоте 1665 МГц.

У PSR 1929 изменение наклона больше ошибок, однако, как показывают вычисления, сумма квадратов отклонений вблизи минимума меняется очень медленно, и наблюдаемый ход позиционного угла может быть достаточно хорошо описан одним значением  $\beta$ , которое указано в табл. 1 в скобках (см. также рис. 4b).

В любом случае для PSR 0823, 1133 и 1929 изменение  $\beta$  на расстояниях, соответствующих диапазону частот от 400 до 1665 МГц, меньше  $2^\circ$ .

У PSR 0950 значению  $\zeta = 6.^\circ 2$  соответствует  $\beta = 38^\circ$  на уровне, где генерируется излучение частоты 1665 МГц. Однако при  $\zeta - \beta = -31.^\circ 8$  радиус конуса излучения должен быть  $\sim 34^\circ$ , что соответствует уровню  $R/R_L \sim 0.5$ , который оказывается существенно выше уровня генерации излучения с частотой 410 МГц ( $R/R_L \approx 0.065$  [3]). В рамках положенной в основу расчетов модели полярной шапки картина должна быть обратной. Поэтому одна из возможностей объяснения полученного результата связана с отказом от модели полярной шапки и привлечением для PSR 0950 механизма релятивистского формирования луча. Как отмечалось в [7], этот механизм должен быть эффективен именно в короткопериодических пульсарах. Если наблюдаемый профиль и его поляризационные характеристики описываются релятивистским механизмом, рассмотренную методику нельзя применять для определения угла  $\beta$ . Можно, однако, описать наблю-

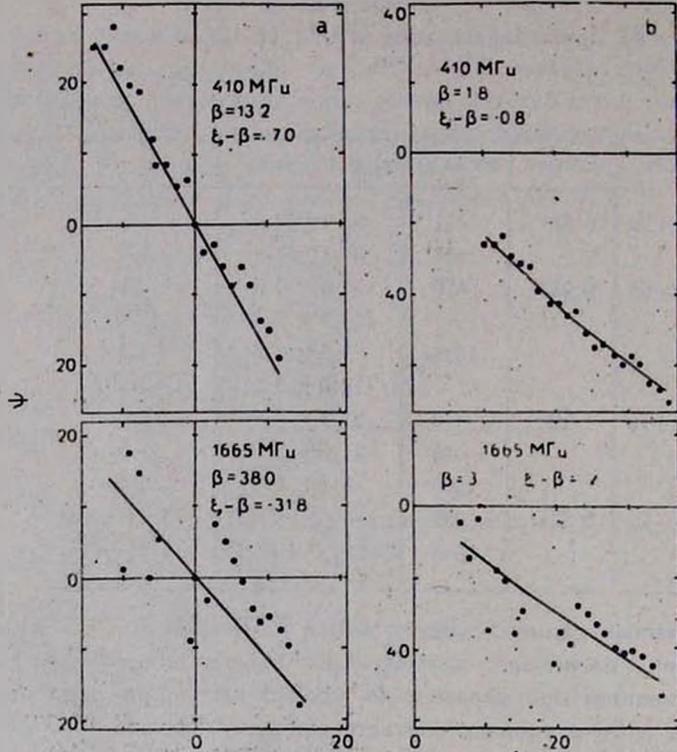


Рис. 2. Позиционный угол в PSR 0950+08 для однокомпонентного (а) и двухкомпонентного (б) профилей (см. пояснения в тексте):

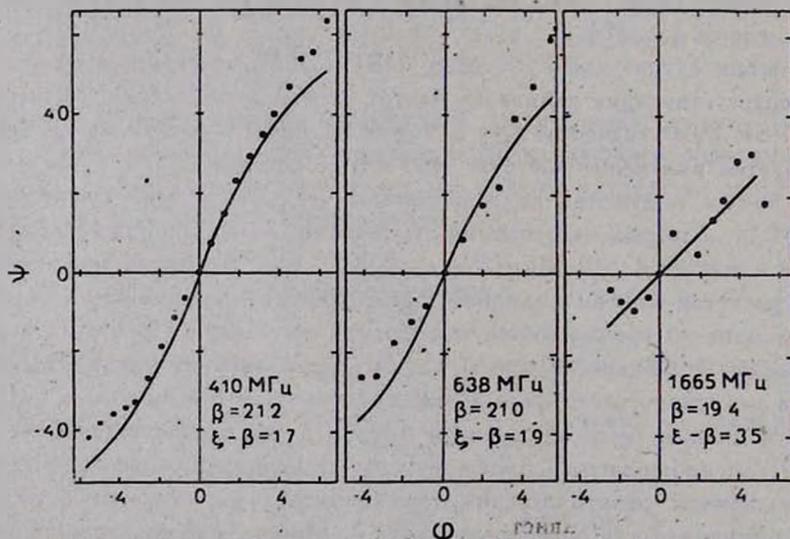


Рис. 3. Позиционный угол в PSR 1133+16.

дения и не отказываясь от модели полярной шапки, но предполагая, что средний профиль в PSR 0950 не является однокомпонентным, а представляет собой часть двухкомпонентного профиля, в котором второй компонент сильно подавлен. В этом случае луч зрения должен проходить вблизи центра конуса излучения и, как показывают вычисления, на уровне, соответствующем частоте 410 МГц,  $\zeta - \beta = -0.8$ . При этом угол  $\beta$  (табл. 1)

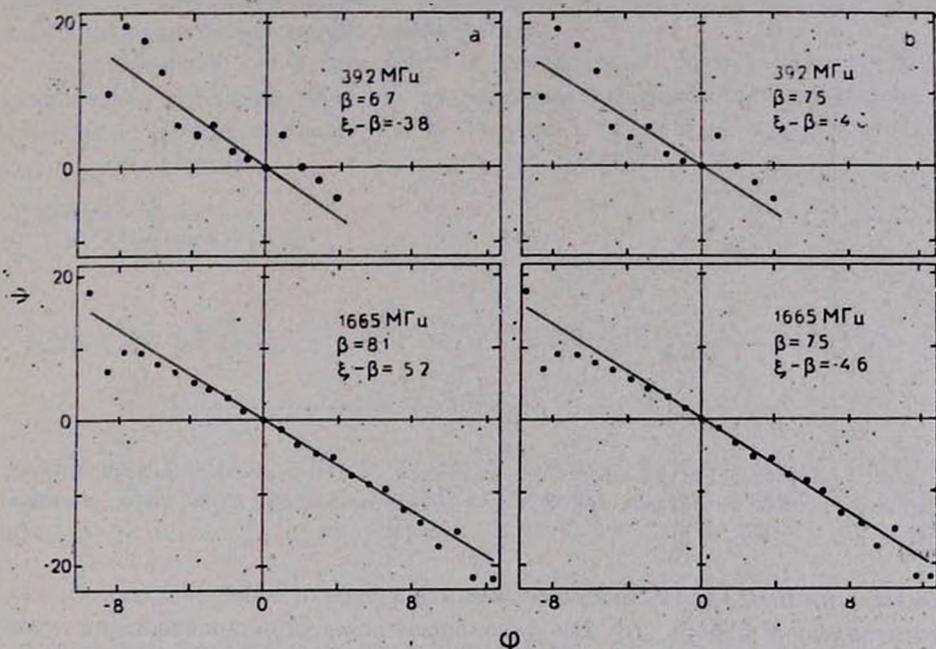


Рис. 4. Позиционный угол в PSR 1929+10 при вычисленных значениях  $\beta$  (а) и при  $\beta = -7.5$ (b).

несколько изменяется при переходе от частоты 410 МГц к частоте 1665 МГц. Однако, как и в случае PSR 1929, сумма квадратов уклонений вблизи минимума изменяется довольно медленно, а наблюдательные данные можно описать одним значением  $\beta$ , заключенным в промежутке между  $1.8$  и  $3.0$ . Малое значение угла  $\beta$  для PSR 0950 уже предполагалось в работе [8], чтобы объяснить сложную картину излучения в этом пульсаре. Таким образом, если модель полярной шапки работает в PSR 0950, то и здесь, как в трех других пульсарах, изменение угла  $\beta$  для соответствующих уровней меньше  $2^\circ$ .

3. Остановимся на вопросе о том, почему вообще может меняться с высотой наклон магнитного поля к оси вращения нейтронной звезды. Прежде всего причиной такого изменения может быть наличие мультиполюсных составляющих магнитного поля. Следует подчеркнуть, что про-

неденные выше оценки относились к искривлению оси конуса излучения в меридиональном направлении. Возможно также искривление этой оси вследствие вращения магнитосферы вместе с нейтронной звездой. Структура магнитного поля в этом случае практически не изучена. Однако, если предположить, что каждая точка дипольной силовой линии движется по архимедовой спирали и принять механизм излучения кривизны вдоль от-

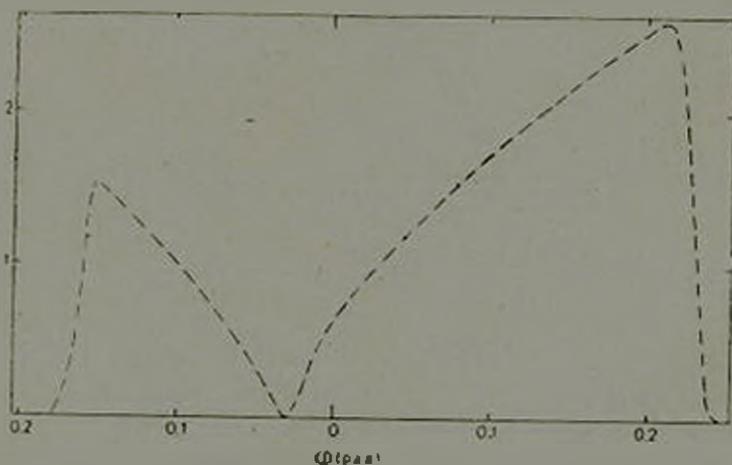


Рис. 5. Характерный вид импульса в магнитном поле, искаженном вращением. Приведенный профиль вычислен при  $P = 1$  с,  $\gamma$  (лоренц-фактор излучающих электронов) =  $10^3$ ,  $\nu = 100$  МГц.

крытых силовых линий, можно вычислить профиль импульса так же, как это делалось в работе [6] для дипольного поля. При прохождении луча зрения через центр конуса излучения для всех значений параметров профиль будет иметь вид, изображенный на рис. 5. Можно утверждать, что и при других уравнениях силовой линии, а также при нецентральной позиции луча зрения структура профиля будет подобной: первый (по времени прохождения) компонент всегда будет слабее. Связано это с тем, что «фронтальные» силовые линии будут при наличии вращения уменьшать, а «хвостовые» — увеличивать свою кривизну. Кроме того искажение поля вследствие вращения должно быть сильнее с удалением от поверхности звезды, поэтому различие интенсивности компонентов должно возрастать с уменьшением частоты. Эти эффекты у конкретного пульсара могут быть замазаны различием условий возбуждения или различием интенсивности испускания частиц для первого и второго компонентов, но статистически для большой группы пульсаров они должны быть отчетливо видны. Для опубликованных двухкомпонентных профилей (см., например, [1, 4, 5]) эти эффекты отсутствуют. Следовательно, и искажение маг-

нитного поля вследствие вращения нейтронной звезды на уровнях, соответствующих наблюдаемым частотам, несущественно.

Таким образом, на основе модели полярной шапки с привлечением механизма излучения кривизны и имеющихся наблюдательных данных можно сделать вывод о том, что отклонения магнитного поля от дипольного в магнитосферах пульсаров малы. Поэтому для пульсаров, описываемых моделью полярной шапки, искривлением оси конуса излучения в области генерации радиочастот можно пренебрегать.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам группы исследования пульсаров ФИАН за полезные замечания при обсуждении результатов работы, а также Э. А. Марченко за помощь при подготовке материалов к печати.

Физический институт  
им. П. Н. Лебедева АН СССР

## ON THE STRUCTURE OF MAGNETIC FIELD IN PULSARS

I. F. MALOV

On the basis of the polar cap model and observational data it is shown that the magnetic field in regions of generation of radio emission in pulsars is nearly dipolar.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Манчестер, Дж. Тейлор, Пульсары, Мир, М., 1980.
2. И. Ф. Малов, Астрон. цирк., № 1110, 1980.
3. И. Ф. Малов, Астрофизика, 10, 161, 1983.
4. R. N. Manchester, Ap. J., Suppl. ser., 23, No. 199, 283, 1971.
5. P. M. McCulloch, P. A. Hamilton, R. N. Manchester, J. G. Ables, M.N.RAS. 183, 645, 1978.
6. И. Ф. Малов, Астрофизика, 16, 751, 1980.
7. И. Ф. Малов, С. А. Сулейманова, Астрофизика, 18, 107, 1982.
8. T. H. Hankins, J. M. Cordes, Ap. J., 249, 241, 1981.