

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н.ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

УДК 524.354.4-77-337

Никитина Елена Борисовна

**СТРУКТУРА МАГНИТОСФЕРЫ РАДИОПУЛЬСАРОВ
ПО ДАННЫМ ОБ УГЛАХ МЕЖДУ ИХ
МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ И ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2014

Работа выполнена в Филиале «Пушкинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В.Виткевича АКЦ ФИАН» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук И. Ф. Малов, ПРАО АКЦ ФИАН

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «__» _____ 201__ года в __ час. __ мин.

на заседании диссертационного совета Д 002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53. и на сайте <http://www.prao.ru/Disser/dissert.html>

Отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д 002.023.01.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д. ф.-м. н.

Ю. А. Ковалёв

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Пульсары являются одной из ранних стадий жизни нейтронной звезды, и благодаря их изучению получены сведения о магнитных полях, скорости вращения и о дальнейшей судьбе нейтронных звезд. Пульсары - идеальные зонды для исследования межзвездной среды и широко используются в этом качестве, поскольку распространены по всей Галактике, а их излучение имеет импульсный характер и сильно поляризовано. Исследования пульсаров подтвердили многие теоретические предсказания относительно нейтронных звезд. Сегодня теория и наблюдения нейтронных звезд развиваются бурными темпами: ежегодно появляется более тысячи посвященных им публикаций, раз в несколько лет происходит открытие нового класса астрономических объектов, содержащих нейтронные звезды.

Одним из важнейших параметров, определяющих геометрию магнитосферы пульсара и протекающие в ней физические процессы, следует считать угол β между осью вращения и вектором магнитного момента μ .

Этот параметр позволяет понять специфику излучения конкретного пульсара, а распределение углов для объектов с разными возрастами – сделать выводы о путях их эволюции. Выявление источников с малыми значениями угла β и с углами порядка 90° дает возможность предсказать наличие у них межимпульсного излучения и интеримпульсов. Вычисление углов на разных уровнях в магнитосфере по данным наблюдений на разных частотах может быть использовано для проверки гипотезы о дипольности магнитного поля. Существует также возможность по этим данным оценить распределение уровней генерации соответствующего излучения, т.е. провести картографирование (mapping) этих уровней.

Анализ всех результатов по определению углов β в радиопульсарах служит одним из путей выбора адекватной модели для этих объектов и механизма их излучения, что является одной из важных задач современной астрофизики.

Полученные более 20 лет назад оценки угла β были проведены по данным из различных каталогов, ограниченных и разнородных выборок радиопульсаров. За это время число известных радиопульсаров превысило 2300. Также были проведены измерения поляризационных характеристик для значительной части этих объектов, построены качественные профили импульсов в нескольких частотных диапазонах. Поэтому возникла необходимость новых вычислений угла β на базе накопившихся материалов и проведения анализа структуры магнитосферы по значительно большей выборке пульсаров.

Прежде, чем проводить исследования максимально возможного числа этих объектов, необходимо проверить работу как известных, так и новых методов оценки различных углов в магнитосфере пульсара по ограниченной, но, по возможности, однородной выборке источников. На основе полученных результатов использованные ранее методы могут быть подкорректированы, уточнены и развиты.

Цели и задачи исследования

Основными задачами исследования являются вычисление углов между различными осями в радиопульсарах без интеримпульсов и с интеримпульсами несколькими методами, проверка, уточнение и корректировка этих методов с целью определения уровней генерации излучения на разных частотах, получения выводов о физических процессах в магнитосферах пульсаров и возможных путях эволюции этих объектов.

Научная новизна

В диссертации получен ряд новых результатов. Выведены уравнения для определения угла β при различной форме наблюдаемого профиля. Выявлено, что по наблюдаемым значениям ширины профиля W_{10} и максимальной производной S позиционного угла поляризации в среднем

профиле можно достаточно точно вычислить отношение радиуса конуса излучения к минимальному расстоянию до луча зрения от центра конуса. Подтверждено, что радиопульсары с интеримпульсами можно разделить на две подгруппы: ортогональные и соосные ротаторы. Показано, что пульсары с интеримпульсами и $\beta \sim 90^\circ$ в несколько раз моложе соосных пульсаров с интеримпульсами. Отличие полученной нами зависимости $W(P)$ от обычно принимаемой в модели полярной шапки может быть объяснено темпом развития плазменных неустойчивостей вблизи поверхности нейтронной звезды (в области генерации высоких частот).

Достоверность результатов

Представленные в диссертации результаты получены как с помощью существующих, так и с помощью новых методов, которые дают возможность уточнения полученных ранее значений углов, вычислить их средние величины и по ним сделать выводы о структуре магнитосферы пульсаров.

Практическая значимость

В ходе выполнения работы были опробованы новые методы вычисления угла β , а также подкорректированы и уточнены уже существующие. Вычислены значения углов для нескольких сотен пульсаров. Подтверждено существовавшее ранее предположение о существовании двух типов пульсаров с интеримпульсами: ортогональных и соосных ротаторов. Выявлено, что пульсары с интеримпульсами и $\beta \sim 90^\circ$ в несколько раз моложе соосных пульсаров с интеримпульсами. Оценка возраста пульсаров может быть основанием для отнесения пульсара к группе соосных или ортогональных ротаторов в тех случаях, когда прямые вычисления угла β не дают однозначного результата. Результаты проделанной работы могут послужить дальнейшему развитию теоретических представлений о пульсарах и лучшему пониманию их природы.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. На основе данных о структуре импульсов и ходе позиционного угла линейной поляризации на частотах около 1 ГГц для 80 пульсаров проведены оценки угла β между осью вращения и магнитным моментом нейтронной звезды. Вычисления проведены с использованием нескольких методов. Выведены уравнения для определения угла β при различной форме наблюдаемого профиля. Получены их решения для 34 пульсаров. Проведено сравнение величин β , вычисленных различными способами.
2. Вычислены значения углов по данным на 10 и 20 см для более 300 пульсаров.
3. Определены отношения радиуса конуса излучения к минимальному расстоянию луча зрения от центра этого конуса для нескольких десятков пульсаров по данным на 10 и 20 см. Оценены абсолютные значения расстояний от центра нейтронной звезды до уровней генерации излучения на данных частотах. Эти оценки хорошо согласуются между собой и дают радиусы генерации порядка нескольких десятков радиусов нейтронной звезды. При проведении вычислений учтено возможное изменение размеров полярной шапки, связанное с наклоном конуса излучения к оси вращения пульсара, т.е. влияние угла β .

4. Проведено исследование пульсаров с интеримпульсами.

В ряде пульсаров $\beta < 20^\circ$, и для них можно ожидать не только интеримпульсы, но и межимпульсное излучение и корреляции в поведении интеримпульсов и главных импульсов. В других пульсарах этот угол больше 60° , и при достаточно широком конусе излучения и благоприятной ориентации луча зрения наблюдателя возможно появление интеримпульсов. Таким образом, подтверждается высказанное ранее предположение о двух типах пульсаров с интеримпульсами – соосных и ортогональных.

5. Обнаружено, что возраст пульсаров с интеримпульсами и $\beta > 60^\circ$ в несколько раз меньше, чем у пульсаров, имеющих интеримпульсы и $\beta < 30^\circ$.
6. В результате проведенных исследований сделаны выводы о структуре магнитосферы пульсаров: определены углы, характеризующие эту структуру; оценены уровни генерации излучения на разных частотах; подтверждена дипольность магнитного поля пульсара.

Публикации и личный вклад

Во всех результатах, вынесенных на защиту, вклад автора является существенным. Соискатель совместно с соавтором участвовал в постановке задач и формулировке выводов из проделанной работы.

Результаты вычислений, представленные в таблицах 1-4, 7, 8 и в таблицах Приложений, получены автором самостоятельно. Рисунки 4-7, 10, 12-15, 23, 25 выполнены также автором. Программа для вписывания модельной кривой в наблюдаемые значения позиционного угла линейной поляризации написана соискателем на языке программирования *Python*. Автором совместно с его научным руководителем предложен новый метод вычисления углов между осями в магнитосферах пульсаров на основе системы из трех уравнений. Результаты вычислений для таблиц 6, 9 – 12 и рисунки 8, 9, 16, 18 – 22 выполнены также совместно с соавтором. Рисунки 1 – 3 и 17 заимствованы из монографии [1], рисунок 11 из [2].

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем.

Изложенные в диссертации результаты опубликованы в работах:

1. E.B.Nikitina, I.F.Malov. Estimations of angles between some axes in radio pulsars from catalog at 1000 MHz // 17th Open Young Scientists' Conference in Astronomy and Space Physics, Kyiv, 2010, Abstracts, p. 25.

2. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Определение углов 80 радиопульсаров по данным наблюдений на частотах около 1 ГГц // Тезисы докладов XVI ВНКСФ, Волгоград, 2010, с. 379-380.
3. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Определение углов у радиопульсаров из каталога на частотах около 1 ГГц // Тезисы ВАК-2010, с.99-100.
4. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Определение углов у 80 радиопульсаров из каталога на частотах около 1 ГГц // НЕА-2010, с. 34-35, 21-24 декабря 2010, Москва.
5. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Углы между осью вращения и магнитным моментом в 80 радиопульсарах по данным наблюдений на частотах около 1 ГГц // Астрономический журнал, 2011, т. 88, с. 22–33.
6. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. О геометрии магнитосферы радиопульсаров // Астрономический журнал, 2011, т. 88, с.954-965.
7. E.B.Nikitina, I.F.Malov. Estimations of angles between some axes in radio pulsars from catalog at 1000 MHz // Advances in Astronomy and Space Physics. Kyiv, 2011, p. 9-12.
8. E.B.Nikitina, I.F.Malov. On the structure of pulsar magnetosphere // 18th Open Young Scientists' Conf. on Astronomy and Space Physics. Kyiv, 2011, Abstracts, p.38.
9. E.B.Nikitina, I.F.Malov. On the structure of pulsar magnetosphere // 41st Young European Radio Astronomers Conference (YERAC), Manchester, UK, 18-20 July, 2011.
10. I.F.Malov, E.B.Nikitina. On the structure of pulsar magnetosphere // Physics of Neutron Stars - 2011, St. Petersburg, 2011, July 11-15, p. 91.
11. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Распределение областей генерации излучения на разных частотах в магнитосферах пульсаров // Астрономический журнал, 2012, т. 89, с.769–777.

12. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Распределение областей генерации излучения на разных частотах в магнитосферах пульсаров // Тезисы докладов конференции, НЕА-2011, Москва, с.59.
13. I.F.Malov, E.B.Nikitina. On the structure of pulsar magnetospheres // Advances in Astron. Sp. Phys. 2012, v.2, p.28-30.
14. I.F.Malov, E.B.Nikitina. The distribution of areas of radiation generation at the different frequencies in the pulsar magnetospheres // Abstracts of the 19th Open Young Scientists Conf. Kyiv, Abstracts, 2012, p.44-45.
15. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Ориентация осей в пульсарах и распределение излучающих областей в их магнитосферах // Резюме докладов на конференции Астрономического общества, Москва, 2012, с.33.
16. I.F.Malov, E.B.Nikitina. The distribution of areas of radiation generation at different frequencies in the pulsar magnetospheres // Advances in Astron. Sp. Phys. 2012, v.2, p.125-127.
17. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Бимодальность радиопульсаров с интеримпульсами // Тезисы докладов конференции НЕА-2012, Москва, с.54-55.
18. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Структура магнитосфер в радиопульсарах с интеримпульсами. Астрономический журнал, 2013, т.90, №11, с.907-918.
19. И.Ф.Малов, Е.Б.Никитина. Структура магнитосфер в радиопульсарах с интеримпульсами // Тезисы ВАК-2013, С.-П., 2013, с.176.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на ежегодных научных сессиях АКЦ ФИАН, а также на следующих российских и международных конференциях:

1. 17th Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 2010);
2. 17-я Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых России (Волгоград, 2010);
3. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК - 2010) (Специальная астрофизическая обсерватория (САО) Российской академии наук, пос.Нижний Архыз, 2010);
4. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2010);
5. 18th Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 2011);
6. 41st Young European Radio Astronomers Conference (YERAC) (Manchester, UK, 18-20 July, 2011);
7. International Conference «Physics of Neutron Stars - 2011» (July 11-15, 2011, St. Petersburg, Russia);
8. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2011);
9. 18-я Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых России (Красноярск, 2012);
10. 19th Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 2012);
11. XI отчетно-перевыборный съезд Международной общественной организации "Астрономическое Общество" и научная конференция "Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы" (Москва, 2012)

12. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2012);
13. Всероссийская астрономическая конференция (БАК-2013) (Санкт-Петербург, 2013).
14. International Conference «Physics of Neutron Stars - 2014» (July 28 - August 1, 2014, St. Petersburg, Russia);
15. 44st Young European Radio Astronomers Conference (YERAC) (Torun, Poland, 8-12 September, 2014).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей четыре главы, и заключения, а также двух приложений. В диссертации 124 страницы, включая 25 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 81 ссылку.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** кратко изложена история открытия и начала исследования радиопульсаров.

Рассмотрены основополагающие работы в развитии теоретических представлений о природе пульсаров и механизме их излучения. Обоснована актуальность темы диссертации, представлены основные цели работы, научная новизна, практическая значимость и основные результаты, выносимые на защиту.

В **Главе 1** описываются результаты вычислений угла между осью вращения пульсара и осью конуса излучения для однородной выборки радиопульсаров, для которых данные наблюдений получены с помощью 64-метрового радиотелескопа в Парксе на частоте около 950 МГц и на

телескопе Тасманийского университета диаметром 26 м на частоте 800 МГц [3]. При проведении вычислений использовалась стандартная модель магнитосферы пульсара, в которой излучение пульсара ограничено конусом открытых силовых линий. Вычисления углов между различными осями в радиопульсарах проводились с помощью трех методов, один из которых предложен нами впервые.

Первый метод основан на предположении прохождения луча зрения через центр конуса излучения пульсара. При проведении расчетов мы использовали ширины профилей пульсаров по уровню 10%. Данные взяты нами из работы [3]. Вычисленные данным способом углы β между осью вращения пульсара и направлением магнитного момента оказались довольно малыми, при среднем значении $\langle \beta_1 \rangle = 27^\circ, 1$ (среднеквадратичный разброс β_1 равен $13^\circ, 6$). Это связано с тем, что в данном случае не учитывается возможность прохождения луча зрения на значительных расстояниях от центра конуса излучения.

Второй метод позволяет использовать данные о ходе позиционного угла линейной поляризации и отказаться от представлений о прохождении луча зрения через центр конуса излучения. При этом мы полагаем, что излучение генерируется достаточно высоко в магнитосфере пульсаров на уровне, выше которого распространение излучения не вносит существенных искажений в его поляризационные характеристики. Предполагается, что видимое уширение импульса при приближении к оси вращения и уменьшение наблюдаемой ширины из-за углового расстояния, на котором луч зрения сечет конус излучения, равны и взаимно компенсируют друг друга. Это позволяет применять метод наименьших квадратов при построении статистических зависимостей $\theta(P)$. Далее схема сводится к решению уравнения четвертой степени. Это уравнение имеет четыре решения, из которых находятся четыре значения β_2 . Комплексные решения были отброшены. Однако знак производной C по наблюдениям только в пределах главного импульса определить нельзя, поэтому решения получены при $C > 0$ и при $C < 0$. Найденные таким способом углы β_2 для большей части пульсаров оказались больше, чем углы, найденные первым способом: $\langle \beta_2 \rangle = 36^\circ, 4$

(среднеквадратичный разброс равен $19^\circ, 2$) при $C > 0$ и $\langle \beta_2 \rangle = 49^\circ, 1$ (среднеквадратичный разброс равен $15^\circ, 5$) при $C < 0$. В случаях, когда $\beta_2 < \beta_1$, причиной может оказаться неуверенные оценки величины C .

В основе третьего метода лежит отказ от статистических зависимостей. В данном методе предложено использовать внешний вид профиля пульсара. Для определения величины угла β необходимо решить систему из трех уравнений, в одно из которых входит n - отношение полуширины конуса излучения к угловому расстоянию, на котором луч зрения сечет этот конус. Выбор значений n в значительной мере произволен. Он определяется формой профиля (наличием одного или двух компонентов, глубиной минимума в двухкомпонентном профиле), неизвестными нам радиусами внутреннего и внешнего колец в полом конусе и другими факторами. Если луч зрения проходит близко к краю конуса, величина n становится близкой к единице. Для иллюстрации работы метода мы использовали дискретные значения $n = 5/4, 3/2, 2$ и 4 и при помощи тригонометрических преобразований из системы трех уравнений вывели уравнение для нахождения угла ζ (угол между лучом зрения наблюдателя и осью вращения пульсара). Зная этот угол, легко можно определить угол β . Однако, для ряда пульсаров решения не существует. Это значит, что в рамках использованной модели принятое значение n неверно. В ряде случаев причиной отсутствия решения могут быть также неуверенные оценки C и неверные значения ширины профиля по уровню 10%, что вызвано, в частности, неучетом эффекта рассеяния. Одним из примеров таких объектов служит пульсар PSR B1641-45 с затянутым правым хвостом в наблюдаемом импульсе [3]. Средние значения вычисленных углов равны: $\langle \beta_3 \rangle = 54^\circ, 5$ при $C > 0$ (среднеквадратичный разброс равен $12^\circ, 9$), $\langle \beta_3 \rangle = 68^\circ, 7$ при $C < 0$ (среднеквадратичный разброс равен $19^\circ, 4$).

В **Главе 2** для проведения исследования были использованы данные наблюдений, выполненные на длинах волн 10 и 20 см [4]. Вычисления углов между различными осями в радиопулсарах проводились с помощью методов, представленных в Главе 1. Основной задачей данного этапа работы была проверка этих методов для значительно большей выборки пульсаров. Также рассмотрены основные эффекты, оказывающие влияние на результат

вычислений.

При расчетах угла β в случае прохождения луча зрения через центр конуса излучения нами было отобрано 283 пульсара, наблюдения которых проведены на 20 см, и 132 пульсара, которые наблюдались на 10 см. Анализировались пульсары только с монотонным ходом позиционного угла. Использована стандартная модель магнитосферы пульсара, в которой предполагается, что излучение ограничено конусом открытых силовых линий. Из рассмотрения были исключены пульсары с периодом $P < 0,1$ с. Также были исключены пульсары с интеримпульсами и признаками рассеяния излучения.

Значения углов, полученные первым методом, описанном в Главе 1, для большей части пульсаров заключены в интервале от 10 до 40 градусов при среднем значении $\langle \beta_1 \rangle = 18^\circ, 0$ (среднеквадратичный разброс $9^\circ, 8$) для пульсаров, данные которых получены на 10 см, и $\langle \beta_1 \rangle = 13^\circ, 7$ (среднеквадратичный разброс $13^\circ, 2$) для пульсаров, данные которых получены на 20 см. Этот результат также связан с предположением о том, что наблюдаемое уширение импульса определяется только приближением конуса излучения к оси вращения и не учитывается возможность прохождения луча зрения на значительных расстояниях от центра конуса.

Полученные значения являются нижним пределом для величины угла β на данных длинах волн для каждого из пульсаров в использованных выборках. Для дипольного поля значения угла β на всех частотах должны совпадать, поскольку в этом случае ось конуса — прямая линия. При использовании углов β_1 в каких-либо вычислениях необходимо брать их средние значения.

Для анализа вторым способом (см. Глава 1, п. 2.2), основанном на использовании поляризационных данных, были отобраны 40 пульсаров на волне 20 см и 31 на волне 10 см из [4]. Так как ход позиционного угла измерен не для всех пульсаров, их количество для оценки угла β вторым способом значительно меньше.

Так как знак максимальной производной по одним наблюдениям главного импульса определить нельзя, то решать уравнения следует при

$C > 0$ и $C < 0$. Однако не для всех пульсаров можно получить решение уравнений, что связано либо с неуверенным определением параметров, входящих в уравнения, либо с неприменимостью используемой в работе модели. Найденные значения угла β , обозначены как β_2 .

Средние значения углов:

$\langle \beta_2 \rangle = 33^\circ, 9$ для длины волны 10 см (среднеквадратичный разброс $17^\circ, 7$) при $C > 0$;

$\langle \beta_2 \rangle = 33^\circ, 9$ для длины волны 20 см (среднеквадратичный разброс $15^\circ, 8$) при $C > 0$;

$\langle \beta_2 \rangle = 52^\circ, 1$ для длины волны 10 см (среднеквадратичный разброс $12^\circ, 8$) при $C < 0$;

$\langle \beta_2 \rangle = 54^\circ, 1$ для длины волны 20 см (среднеквадратичный разброс $11^\circ, 5$) при $C < 0$.

Величины углов для разных длин волн при обоих значениях максимальной производной практически равны (в пределах ошибок), что и должно быть в дипольной геометрии. Сравнение вычисленных углов β_1 и β_2 показывает, что для большей части пульсаров $\beta_2 > \beta_1$. Это особенно хорошо заметно в вычислениях с $C < 0$. Этого и следовало ожидать, поскольку учет прохождения луча зрения не по центру конуса излучения должен приводить к увеличению оценки угла β .

В ходе выполнения работы мы получили отличие зависимости $W(P)$ от обычно принимаемой в модели полярной шапки. Это может быть объяснено темпом развития плазменных неустойчивостей вблизи поверхности нейтронной звезды (в области генерации высоких частот). Роль квадрупольной составляющей магнитного поля при этом оказывается несущественной. О том же свидетельствует и близость вычисленных нами углов β на двух частотах, ожидаемая для дипольного магнитного поля.

Глава 3 посвящена анализу возможности метода вычисления углов между различными осями в магнитосферах пульсаров, в основе которого лежит использование отношения полуширины конуса излучения к угловому расстоянию, на котором луч зрения сечет этот конус. Это отношение мы предлагаем использовать для определения уровней генерации излучения на

различных частотах в магнитосферах пульсаров.

При дипольной структуре магнитного поля минимальное угловое расстояние $\zeta - \beta$ луча зрения относительно центра конуса излучения для конкретного пульсара остается одинаковым на всех частотах, а угловой радиус θ самого конуса увеличивается с удалением от поверхности нейтронной звезды (на более низких частотах). Поэтому с уменьшением частоты величина $n = \theta/(\zeta - \beta)$ будет возрастать. На это обращалось внимание в работе [5], однако там использовались данные, полученные разными авторами на разных телескопах и в разное время. Здесь мы предлагаем проанализировать выборки пульсаров, для которых проведены измерения на 10 и 20 см и получены однородные данные на этих волнах [4].

Для конкретного пульсара при дипольном магнитном поле величины $\zeta - \beta$ и β фиксированы и значение производной C на всех уровнях магнитосферы (на всех частотах) должно быть одинаковым. Однако, измеренные величины C на двух волнах не всегда совпадают. При вычислении n бралось среднее из значений C на 10 и 20 см. В тех случаях, когда величину C удавалось измерить лишь на одной частоте, считалось, что на другой частоте эта величина имеет то же значение. При любых парах величин ζ и β вычисленное значение n изменяется очень слабо, поэтому и для него можно использовать среднее.

Полученные из непосредственных наблюдений превышения W_{20} над W_{10} для подавляющего большинства пульсаров подтверждают справедливость основного вывода, следующего из всех моделей радиопульсаров, о генерации более низких частот на больших расстояниях от нейтронной звезды.

В проведенном нами рассмотрении сечение конуса считалось круговым, и уменьшение его углового радиуса с увеличением угла β оказывается одинаковым по всем направлениям.

При попытке оценить абсолютные значения расстояний, на которых генерируются частоты 1,5 ГГц и 3 ГГц, мы рассмотрели две возможности. Одна из них связана с использованием статистических зависимостей, полученных в Главе 2 п. 3.2, а другая основана на предположении

о том, что генерация излучения на данном уровне осуществляется на плазменной частоте в результате развития двухпоточковой неустойчивости. Для использованных длин волн (при $B_{12} = 1$ и $P = 1$ с) $(\frac{r}{R_*})_{3\text{ГГц}} = 40$, $(\frac{r}{R_*})_{1,5\text{ГГц}} = 63$.

В **Главе 4** проводится обсуждение результатов оценки углов между осями у 42 радиопульсаров с интеримпульсами. Здесь при вычислениях и анализе использованы значения ширины наблюдаемого импульса W_{10} по уровню 10% и модель полярной шапки, описанная ранее. Предполагается, что размеры конуса излучения в тех объектах, где наблюдаются оба полюса, равны между собой (для МР и IP) и описываются одинаковыми статистическими зависимостями между W_{10} и периодом пульсара P из работ [6, 7]. Как и в этих работах, из рассмотрения исключены пульсары с $P < 0,1$ с.

Из 42 объектов, рассмотренных в предположении о центральном прохождении луча зрения, у 21 пульсара угол β , обозначенный как β_1 , оказывается меньше 30° , у 8 пульсаров он близок к 90° (отличие меньше 30°). Для 6 пульсаров $\beta > 90^\circ$. Это связано с использованием выражения, в которое входит $\cos \beta$, и решение одного из уравнений получается при $\cos \beta < 0$. В большей части таких пульсаров β близко к 90° , т.е. эти объекты принадлежат к ортогональным ротаторам. Что касается пульсаров с величиной β в интервале от 30° до 60° , то для них необходимо провести дополнительные исследования. Возможно, что для конкретных пульсаров необходимо брать различные значения параметра γ_b . Кроме того, было использовано условие $\beta = \zeta$, отказ от которого может привести к коррекции значений β .

К сожалению, не для всех пульсаров с интеримпульсами существуют качественные поляризационные измерения. Поэтому количество пульсаров, для которых применим метод с использованием максимальной производной позиционного угла, значительно меньше, чем для предыдущего метода. Для 10 из 21 объекта с измеренным значением C (примерно для половины источников) углы оказываются меньше 30° , т.е. они должны быть отнесены к соосным пульсарам. 7 пульсаров с большими значениями C имеют и большие углы β_2 . В некоторых объектах β_2 и β_1 отличаются друг от друга. Для них можно попытаться получить значения углов другими методами.

Для ряда пульсаров имеются поляризационные измерения как в главном импульсе, так и в интеримпульсе. В таких объектах можно вписать модельную зависимость $\psi(\Phi)$ при разных значениях β и ζ в массив наблюдаемых точек и по наилучшему их согласию получить наиболее вероятную величину β . Такая аппроксимация проводилась ранее неоднократно другими авторами (см., например, [8, 9]), но для некоторых объектов это сделано впервые. По знаку производной позиционного угла в главном импульсе ($\Phi = 0^\circ$) и в интеримпульсе ($\Phi = 180^\circ$) можно определенно сказать, расположен ли луч зрения наблюдателя ближе к оси вращения или дальше от нее, чем ось магнитного диполя. Независимо от направления вращения нейтронной звезды, если знаки производных C_1 и C одинаковы, то $\zeta < \beta$, т.е. луч зрения ближе к оси вращения, и, наоборот, при $\zeta > \beta$ знаки у C_1 и C будут различными. Обе положительные производные свидетельствуют об обратном вращении нейтронной звезды. Этот вывод использован при вписывании модельных кривых в наблюдаемый ход позиционного угла. Также существует возможность провести аппроксимацию модельной кривой отдельно для главного импульса и интеримпульса.

Наибольшие разночтения в принадлежности к соосным или ортогональным объектам существуют в отношении PSR B0950+08 (J0953+0755), B1055-52 (J1057-5226) и B1822-09 (J1825-0935). По нашим данным PSR B0950+08, B1055-52 и B1822-09 относятся к соосным ротаторам.

По характеристическим возрастам, светимостям и z-расстояниям пульсаров исследуемой выборки оценены их возрасты. Согласно полученным результатам, ортогональные ротаторы систематически моложе соосных.

В **Заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В **Приложениях** приведены средние значения углов β для основной выборки пульсаров и для пульсаров с интеримпульсами.

Список литературы

- [1] Малов И. Ф. Радиопульсары. М.: Наука, 2004. 192 с.
- [2] Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. М.: Мир, 1980.
- [3] van Ommen T. D. et al. Polarimetric observations of southern pulsars at 800 and 950 MHz // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1997. V. 287. P. 307-327.
- [4] Weltevrede P., Johnston S. Profile and polarization characteristics of energetic pulsar // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2008. V. 391. P.1210-1226.
- [5] Малов И. Ф. Распределение излучающих областей в магнитосферах пульсаров // Письма в Астрономический журнал. 1991. Т. 17. С. 595-604.
- [6] Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. М.: Мир, 1980.
- [7] Малов И. Ф. Модель пульсара PSR 1822-09 // Астрономический журнал. 1995. Т. 72. С. 185-189.
- [8] Manchester R. N., Lyne A. G. Pulsar interpulses - Two poles or one // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1977. V. 181. P. 761-767.
- [9] Blaskiewicz M., Cordes J. M., Wasserman I. A relativistic model of pulsar polarization // Astrophysical Journal. 1991. V. 370. P. 643-669.