

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

На правах рукописи

УДК 524.354.4

Малов Олег Игоревич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ ПО  
НАБЛЮДЕНИЯМ В МЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

01.03.02 - астрофизика и звёздная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Москва

2010

Работа выполнена в филиале «Пушинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН» учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ПРАО АКЦ ФИАН)

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук В.М. Малофеев, ПРАО АКЦ ФИАН

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук М.В. Попов, АКЦ ФИАН

доктор физико-математических наук Г.С. Бисноватый-Коган, ИКИ РАН

Ведущая организация: Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

Защита состоится 21 февраля 2011 года в 15 час. 00 мин.

на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д.53.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

д. ф.-м. н.

Ю.А. Ковалёв

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

С момента открытия пульсаров прошло более 40 лет, но увеличивающийся поток работ говорит о важности исследования этих необычных объектов. Интенсивные исследования пульсаров ведутся в радио диапазоне, оптике, рентгене и гамма-диапазоне. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию пульсаров, многие важные области пульсарной физики остаются плохо изученными. В частности, это относится к исследованию энергетических характеристик (спектров, светимостей, профилей), классификации пульсаров и изучению аномальных источников, радиоизлучение от которых было зарегистрировано в последние несколько лет. До сих пор нет единого взгляда на механизм излучения пульсаров, структуру магнитосферы, а также их эволюцию. В частности, спорными являются вопросы о том, с какими периодами рождаются пульсары, и о различии в физике нормальных и миллисекундных пульсаров.

Исследование пульсаров в метровом диапазоне длин волн вызывает особенный интерес с точки зрения их энергетики, так как большинство наблюдаемых низкочастотных завалов в спектрах пульсаров начинается в районе частоты 100 МГц. Кроме того, в последние годы обнаружено несколько аномальных радиопульсаров с очень крутыми спектрами и максимумом также в районе частоты 100 МГц, в частности, Геминга, радиоизлучение от которой до сих пор не обнаружено на высоких частотах. Высокая чувствительность наших наблюдений обеспечивается Большой синфазной антенной ФИАН с

эффективной площадью около  $30000 \text{ м}^2$ . БСА является самой крупной в мире антенной в метровом диапазоне длин волн и является уникальным инструментом для исследования пульсаров.

Дефицит наблюдений пульсаров на низких частотах, связанный с отсутствием чувствительных радиотелескопов, обеспечивает большинству наших исследований мировой приоритет.

### Цели и задачи исследования

Основной задачей работы является исследование энергетических характеристик пульсаров в радиодиапазоне для получения новых данных о механизме их радиоизлучения и эволюции. Эта задача, в частности, включает в себя исследование различий в энергетике нормальных и миллисекундных пульсаров на основе богатого статистического материала, накопленного за последние годы. Обнаружение радиоизлучения от аномальных источников, а также исследование его характеристик также является целью настоящей работы.

### Научная новизна

В диссертации получен ряд новых результатов. Обзор пульсаров, проведённый на радиотелескопе БСА на частотах 102 и 111 МГц является к настоящему времени самым большим низкочастотным обзором. Благодаря этому вычислены плотности потоков более 200 пульсаров и впервые получены средние профили ряда слабых пульсаров на частотах 102 и 111 МГц.

На основе новых спектров (Малофеев, 1999), полученных с использованием измеренных плотностей потоков, вычислены

интегральные радиосветимости более 300 пульсаров. Подтверждено различие в физике быстрых (миллисекундных) и нормальных (секундных) пульсаров.

Зарегистрировано пекулярное радиоизлучение от пульсара в Геминге, характеризующееся очень крутым спектром, большим разбросом в ширине и фазе прихода импульсов, вспышечным характером импульсов излучения. Есть указания на то, что этот пульсар может излучать в течение всего периода.

Обнаружена вспышка отдельного компонента импульса пульсара B0643+80. Этот эффект отличается по своим свойствам как от гигантских импульсов, так и от переключения мод.

Обнаружено радиоизлучение от пульсара J0205+6449 в остатке сверхновой 3C58 и измерены его основные характеристики.

#### Достоверность результатов

Результаты диссертации получены с использованием апробированных методов наблюдений, обработки и анализа данных. Полученные результаты сопоставлены с имеющимися на сегодняшний день результатами работ других авторов.

На опубликованные работы, содержащие основные результаты диссертации, к настоящему моменту имеется 88 положительных ссылок, многие из которых - в ведущих зарубежных журналах (например: Kramer M., Bell J.F., Manchester R.N., Lyne G., Camilo F. et al., 2003, MNRAS, 342, 1299; McLaughlin, M. A., Cordes, J. M., Hankins, T. H., Moffett, D. A., 1999, ApJ, 512, 929; Ramachandran, R., Deshpande, A. A., Indrani, C., 1998, AAp, 339, 787; Mattox, J. R., Halpern, J. P., Caraveo, P. A., 1998, ApJ, 493, 891; van Leeuwen, J.,

Stappers, B. W., 2010, AAp, 509, id. A7; Seiradakis, J. H., Wielebinski, R., 2004, AAp Review, 12, 239).

### Практическая значимость

Результаты работы широко используются ведущими наблюдателями и теоретиками во всем мире, например: Bell J., Manchester R., Lyne A., Lorimer D., Graham-Smith F., Seiradakis J., Kramer M., Hankins T., Rankin J., Machabeli G., Camilo F., Ramachandran R., Deshpande A., Cordes G., Caraveo D., Halpern J., Stinebring D., Stappers B., Wielebinski R., Ransom S., Stairs I., Mitra D.

Измерения плотностей потоков используются при построении спектров пульсаров и исследовании низкочастотных завалов в спектрах, наблюдающихся на низких частотах.

Интегральные радиосветимости используются при исследовании природы рентгеновских пульсаров, источников с повторяющимся мягким гамма-излучением и пульсаров с очень большими периодами.

Характеристики радиоизлучения от пульсара в Геминге и пульсара J0205+6449 используются при исследованиях радиоизлучения других аномальных источников. Кроме того, данные по пульсару J0205+6449 используются при оптических исследованиях остатка сверхновой 3C58.

Выявленные особенности в распределениях параметров пульсаров используются в работах по исследованию механизма радиоизлучения пульсаров.

Вариант кластерного анализа, описанный в настоящей диссертации, используется при исследованиях гигантских импульсов пульсаров.

Разработанный автором пакет программ для обработки наблюдений пульсаров используется сотрудниками ПРАО АКЦ ФИАН при исследовании данных, получаемых на радиотелескопе БСА ФИАН.

### Основные результаты, выносимые на защиту

1. Построены средние профили 180 пульсаров на частотах 102 и 111 МГц. Измерены плотности потоков 235 пульсаров на частоте 102 МГц. С использованием новых данных по плотностям потоков, вычислены интегральные радиосветимости 311 пульсаров с периодами более 0.1 с и 27 пульсаров с периодами менее 0.1 с.

2. Выявлен ряд зависимостей энергетических характеристик (светимости, коэффициента трансформации энергии вращения в радиоизлучение) от других параметров пульсаров (таких, как период, магнитное поле на световом цилиндре, угол между направлением магнитного момента и осью вращения пульсара, скорость потерь энергии вращения). Построена функция светимости, оценено число активных пульсаров в Галактике и скорость их рождения. Проведен анализ зависимости светимости и коэффициента трансформации энергии вращения в радиоизлучение от различных параметров пульсаров с короткими и длинными периодами. Полученные результаты не противоречат модели генерации излучения у пульсаров с короткими периодами вблизи светового цилиндра.

Исследованы распределения ряда параметров (в частности, светимости, периода, расстояний от плоскости и от центра Галактики) более 500 пульсаров. Проведен кластерный анализ параметров пульсаров. Показано, что пульсары с периодами больше 1 с и с периодами меньше 0.1 с образуют два отдельных класса объектов.

3. Измерена полная ширина импульса 125 пульсаров на нескольких частотах, обнаружено ее существенное отличие от применяемой в каталогах величины  $W_{10}$ .

4. Проведены многочастотные наблюдения радиоизлучения от пульсара в Геминге. Впервые получены индивидуальные импульсы этого пульсара, проведен детальный анализ форм, длительностей импульса этого пульсара и фаз его прихода на частоте 102.5 МГц. Обнаружен вспышечный характер радиоизлучения, большой разброс длительностей и фаз прихода индивидуальных и интегральных импульсов. Есть указание на то, что пульсар в Геминге излучает в течение всего периода. Обнаружена вспышка радиоизлучения отдельного компонента импульса пульсара (PSR B0643+80). Этот и предыдущий результаты свидетельствуют о переменном характере излучения пульсаров.

Обнаружено радиоизлучение от пульсара J0205+6449 в остатке сверхновой 3C58. Измерена ширина импульса на частоте 111 МГц и плотность потока этого пульсара на двух частотах.

5. Создан пакет программ для обработки многоканальных наблюдений пульсаров на телескопах ПРАО с учетом методических особенностей наблюдений этих объектов. С помощью этих программ обработано большое число наблюдений нескольких сотен пульсаров.

#### Публикации и личный вклад автора

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 13 статьях и 2 циркулярах МАС:

1. Малов И.Ф., Малов О.И., Соснов С.Л. «О полной ширине



импульса и структуре магнитосферы пульсара». Астрон. Журн., 1993, т. 70, вып.1, с. 47-60.

2. Малов И.Ф., Малов О.И. «Энергетические характеристики долгопериодических и короткопериодических пульсаров». Астрон. Журн., 1995, т. 72, № 4, с. 567-573.

3. Малов И.Ф., Малов О.И. «О некоторых особенностях в распределениях параметров пульсаров». Астрон. Журн., 1995, т. 72, № 4, с. 574-579.

4. Malov I.F., Malov O.I., Malofeev V.M. «The investigations of pulsar integrated radio luminosities». Astron. Astrophys. Transactions, 1996, Vol. 10, pp. 205-210.

5. Малов И.Ф., Малов О.И. «Кластерный анализ параметров пульсаров». Астрон. Журн., 1997, т. 74, № 1, с. 63-74.

6. Malofeev V.M., Malov O.I. «Detection of Geminga as a radio pulsar». Nature, Vol. 389, 16 october 1997, p. 697-699.

7. Shitov Yu.P., Malofeev V.M., Malov O.I., Pugachev V.D. «PSR J0633+1746». IAU Circular № 6775, 1997.

8. Малофеев В.М., Малов О.И., Щеголева Н.В. «Обнаружение вспышки компонента импульса у пульсара PSR B0643+80». Астрон. Журн., 1998, т. 75, № 2, с. 275-280.

9. Малофеев В.М., Малов О.И. «Необычный профиль радиопульсара Геминги». Астрон. Журн., 2000, т. 77, № 1, с. 52-63.

10. Малофеев В.М., Малов О.И., Щеголева Н.В. «Плотности потоков 235 пульсаров на частоте 102.5 МГц». Астрон. Журн., 2000, т. 77, № 7, с. 499-509.

11. Тюльбашев С.А., Малов О.И. «Исследование слабых компактных радиоисточников». Астрон. Журн., 2000, т. 77, № 10,

с. 737-742.

12. V. Malofeev, O. Malov, A. Glushak. «PSR J0205+6449». IAU Circular № 7775, 2001.

13. Малофеев В.М., Малов И.Ф., Малов О.И., Глушак А.П. «Радиопульсар J0205+6449 в остатке сверхновой 3C58». Астрон. Журн., 2003, т. 80, № 5, с. 449-457.

14. Малов И.Ф., Малов О.И. «Интегральные радиосветимости пульсаров». Астрон. Журн., 2006, т. 83, № 6, с. 542-555.

15. Малов О.И., Малофеев В.М. «Формы средних профилей импульсов радиопульсаров на частотах 102 и 111 МГц». Астрон. Журн., 2010, т. 87, № 3, с. 238-256.

В этих работах автором проведены измерения и исследования полной ширины импульсов пульсаров, средних профилей импульсов и интегральных радиосветимостей. Автор разработал алгоритмы для обработки многоканальных наблюдений пульсаров, для проведения кластерного анализа параметров пульсаров и вычисления интегральных радиосветимостей и провёл необходимые расчёты. Наблюдения на БСА ФИАН, в результате которых, в частности, обнаружено радиоизлучение пульсара в Геминге и пульсара J0205+6449, вспышка компонента импульса пульсара B0643+80, вычисление плотностей потоков пульсаров, анализ и интерпретация полученных данных выполнены при участии сотрудников ПРАО АКЦ ФИАН.

#### Апробация работы

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

Всероссийской радиоастрономической конференции (Санкт-Петербург, 1997);

Конференции молодых европейских радиоастрономов (Краков, 1997);

Европейском рабочем совещании «Исследование и сравнение нормальных и миллисекундных пульсаров» (Пушино, 1998);

Школе-семинаре молодых радиоастрономов «Радиоастрономия в космосе» (Пушино, 1998);

Школе-семинаре молодых радиоастрономов «Сверхвысокое угловое разрешение в радиоастрономии» (Пушино, 1999);

Конференции молодых европейских радиоастрономов (Манчестер, 1999);

Конференции молодых европейских радиоастрономов (Гранада, 2000);

Международной гаммовской научной школе (Одесса, 2002);

Конференции молодых европейских радиоастрономов (Корк, 2004);

Конференции молодых европейских радиоастрономов (Кальяри, 2005);

Конференции молодых европейских радиоастрономов (Далфсен, 2006);

Рабочем совещании «Низкочастотные исследования пульсаров» (Лейден, 2008);

Конференции молодых европейских радиоастрономов (Порто, 2009).

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 192 страницы, включая список литературы из 238 библиографических ссылок и 55 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дан краткий обзор исследований пульсаров. Коротко рассмотрены основные наблюдательные особенности пульсаров и теоретические модели. Особо выделены представления об энергетике пульсаров. Это связано с тем, что благодаря анализу энергетических характеристик получены основные результаты диссертационной работы. Также обоснована актуальность темы диссертации, представлены основные цели работы, научная новизна, практическая значимость и основные результаты, выносимые на защиту.

Глава I посвящена измерению плотностей потоков пульсаров на антенне БСА ФИАН (102, 111 МГц). Необходимость такой работы связана с малым числом наблюдательных данных на низких частотах. Наблюдения пульсаров с целью измерения плотностей потоков проводятся с записью калибровочного сигнала, величина которого определяется с помощью точечных дискретных источников с известными плотностями потоков. Для обработки наблюдений была разработана специальная методика, необходимая для выделения слабого сигнала с неизвестной фазой появления внутри периода. Эта методика включает поиск нулевого уровня, выравнивание усиления, чистку каналов, пораженных помехами, суммирование сигнала по

каналам (с учетом меры дисперсии). В дальнейшем можно использовать суммирование сигнала за несколько дней наблюдений (в том числе и в разнесенных по времени сериях наблюдений). С помощью указанной методики измерены плотности потоков более 200 пульсаров. Результаты измерений показывают, что измеренные плотности потоков лежат в широком диапазоне от 16 мЯн (PSR 0643+80) до  $10^4$  мЯн (PSR 0531+21, пульсар в Крабовидной туманности), с основной долей от 30 до 300 мЯн. Обнаружен дефицит слабых пульсаров, который может быть связан как с ещё не обнаруженными, слабосветящимися пульсарами, так и с завалом в

28

функции интегральной радиосветимости на светимостях ниже 10 эрг/с и отсутствием пульсаров со светимостями менее  $10^{26}$  эрг/с. Ещё не обнаруженные пульсары должны, в основном, иметь крутые спектры, чтобы объяснить их отсутствие в результате поисковых работ на частотах 400, 600 и 1400 МГц. Распределение спектральных индексов в диапазоне 102-400 МГц близко к нормальному со средним значением по 175 пульсарам, равным 1.47. Это значение спектрального индекса существенно больше, чем полученное ранее значение 0.91 для более сильных объектов. Это означает, что увеличение спектрального индекса произошло за счёт крутых спектров новых слабых пульсаров.

В главе II исследуются другие энергетические характеристики пульсаров. Обсуждаются измерения средних профилей примерно 200 пульсаров на частотах 102 и 111 МГц. Зависимость ширины профиля от периода пульсара ( $W_{10} \times P \sim^{0.45} \pm^{0.08}$ ) с точностью до ошибок измерений характерна для дипольного поля. При этом средний индекс длительности (показатель степени в зависимости ширины профиля от частоты) оказывается равным 0.15. В рамках дипольной модели такое

значение можно получить в предположении, что излучение генерируется на циклотронных частотах.

Получены значения полных ширин профилей для 125 пульсаров. Оказывается, что полная ширина профиля может значительно отличаться от значения  $W_{10}$ , используемого в каталогах. Отношение полной ширины  $W_0$  к величине  $W_{10}$  падает с увеличением частоты и с увеличением величины  $W_{10}$ . Это даёт основания предполагать, что на более низких частотах (на больших расстояниях от поверхности нейтронной звезды) излучение относительно сильнее концентрируется к центральной части конуса излучения.

С использованием измеренных плотностей потоков вычислены интегральные радиосветимости более 300 пульсаров. Проанализированы зависимости интегральной радиосветимости и коэффициента трансформации энергии вращения в радиоизлучение от периода пульсара, а также зависимость светимости от скорости потерь энергии вращения. Оказалось, что как для нормальных, так и для миллисекундных пульсаров имеет место зависимость  $L \propto E^{-7/5}$ , где  $E$  - скорость потерь энергии вращения. Это означает, что во всех пульсарах действует одинаковый основной источник энергии, связанный с потерей энергии вращения нейтронной звезды.

Построена функция светимости для 640 пульсаров, оценено число пульсаров в Галактике ( $2.9 \times 10^5$ ) и скорость их рождения ( $1/35$  год<sup>-1</sup>).

Глава III посвящена исследованию различий двух групп пульсаров: долгопериодических и короткопериодических. Это исследование представляет особый интерес, так как физика излучения указанных групп пульсаров может сильно различаться. На это

указывает, в частности, обнаруженная у короткопериодических пульсаров корреляция между светимостью  $L$  и величиной магнитного поля на световом цилиндре  $B_{\text{Lc}}$ , которая практически однозначно свидетельствует в пользу формирования излучения миллисекундных пульсаров вблизи светового цилиндра. Об этом же свидетельствуют два максимума в распределении пульсаров по периодам, соответствующих нормальным и миллисекундным пульсарам. Распределение пульсаров по расстояниям от плоскости Галактики показывает, что миллисекундные пульсары, в среднем, моложе нормальных.

Проведён кластерный анализ параметров пульсаров с помощью метода главных компонент и метода кластеризации по евклидовым расстояниям в пространстве параметров пульсаров. Показано, что короткопериодические и долгопериодические пульсары образуют два разных класса объектов.

Глава IV посвящена поиску и исследованию радиоизлучения от аномальных пульсаров. Описывается обнаружение радиоизлучения от пульсара в Геминге, проявляющего вспыхивающий характер. Исследован необычный характер радиоизлучения этого пульсара, в частности, разброс длительностей импульса и фаз его прихода. Оказалось, что радиоизлучение Геминги имеет самый крутой спектр и самую низкую радиосветимость среди всех известных пульсаров. Исследованы индивидуальные импульсы на частотах 102, 87, 60 и 40 МГц. В некоторые дни наблюдений пульсар излучал в течение всего периода. Предполагается, что Геминга - почти соосный ротатор с неоднородной областью излучения. Луч зрения находится длительное время внутри

конуса излучения и пересекает в течение одного периода несколько областей излучения.

Обнаружена вспышка компонента импульса пульсара B0643+80, отличающаяся по своим свойствам как от гигантских импульсов (сохранение формы вспыхнувшего компонента), так и от эффекта переключения мод (сохранение длительности импульса и фазы прихода компонентов). Плотность потока во вспышке примерно в 10 раз превышает среднюю плотность потока пульсара. Детальные исследования распределения плотностей потоков компонентов импульса показывают, что увеличение плотности потока происходит за счёт роста плотности потока центрального (вспыхнувшего) компонента. Сравниваются плотности потоков по измерениям на других частотах. Разовые наблюдения на более высоких частотах показывают, что бывают дни наблюдений, когда плотность потока значительно возрастает, что позволяет сделать предположение о наличии вспышек излучения и на других частотах.

Обнаружено и проанализировано радиоизлучение от пульсара J0205+6449 в остатке сверхновой (ОСН) 3С58, измерены его основные характеристики. ОСН 3С58 по своим свойствам напоминает Крабовидную туманность. Возраст и угловые размеры обоих объектов в радиодиапазоне близки и, учитывая, что расстояния до них сравнимы, можно говорить, что физические размеры их почти равны. Однако, при этом светимость Крабовидной туманности в 10 раз больше в радиодиапазоне, чем светимость 3С58. Это может быть связано с разностью в периодах и, соответственно, в масштабах магнитосфер, вследствие чего магнитное поле на световом цилиндре у пульсара J0205+6449 оказывается в 8 раз меньше. По данным, полученным в



настоящей работе, светимость растёт с увеличением магнитного поля примерно как  $B^{1.5}$ , что, в конечном счёте, объясняет разницу в светимостях указанных объектов.

В заключении кратко сформулированы результаты диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате самого обширного к настоящему моменту низкочастотного обзора пульсаров, проведённого на антенне БСА ФИАН на частотах 102 и 111 МГц, получены средние профили 180 пульсаров и измерены плотности потоков 235 пульсаров. С использованием новых данных по плотностям потоков, вычислены интегральные радиосветимости 311 пульсаров с периодами более 0.1 с и 27 пульсаров с периодами менее 0.1 с. Для нескольких пульсаров обнаружено сужение средних профилей при переходе к более низким частотам. Подтверждается тот факт, что различные части профиля импульса могут иметь различные спектры. Среднее значение светимости для пульсаров с  $P < 0.1$  с примерно в 6 раз больше, чем подобное значение для пульсаров с длинными периодами.

Выявлен ряд зависимостей светимости и коэффициента трансформации энергии вращения пульсара в радиоизлучение от периода пульсара, магнитного поля на световом цилиндре, угла между направлением магнитного момента и осью вращения пульсара, скорости потерь энергии вращения. Оказывается, что среднее значение коэффициента трансформации и потерь энергии вращения в

радиоизлучение у пульсаров с  $P > 1$  с ( $\lg \eta = -3.73$ ) значительно выше, чем у пульсаров с  $P < 0.1$  с ( $\lg \eta = -4.85$ ). Кроме того, для долгопериодических пульсаров величина коэффициента трансформации  $\eta$  растёт примерно как  $P$ , а для объектов с короткими периодами падает, как  $P^{-1}$ . Для обеих рассматриваемых групп пульсаров светимость  $L$  растёт с увеличением потерь энергии вращения  $E'$  примерно как  $E'^{1/3}$ . Это означает, что во всех пульсарах действует одинаковый основной источник энергии, связанный с потерей энергии вращения нейтронной звезды.

Для пульсаров с короткими периодами обнаружена высокая степень корреляции ( $K = 0.87 \pm 0.20$ ) между светимостью и магнитным полем вблизи светового цилиндра. Для 4 пульсаров с  $P < 0.1$  с известными значениями угла  $b$  между магнитным моментом и осью вращения точки на диаграмме " $\lg L - b$ " ложатся почти точно на прямую линию  $\lg L = 0.05b + 27.49$  ( $K = 1.0$ ). При этом основным механизмом генерации является синхротронный механизм, и согласие с наблюдаемыми особенностями излучения достигается при степенном распределении релятивистских частиц по энергиям  $N = N_0 e^{-\dots}$ .

Распределение периодов пульсаров не может быть представлено одной гауссианой и предполагает наличие, по крайней мере, еще одной особой группы объектов с периодами  $P < 0.1$  с. Среди одиночных пульсаров с короткими периодами нет объектов, удаленных от плоскости Галактики более, чем на 700 пк. В то же время несколько десятков долгопериодических пульсаров имеют  $|z| > 1$  кпк. Это означает, что только в этой группе наблюдаются старые объекты с возрастом более 10 лет. Распределения пульсаров с  $P < 0.1$  с и  $P > 0.1$  с по

расстояниям от центра Галактики близки друг к другу, т.е. положение этих объектов в диске одинаково.

Наблюдается высокая корреляция светимостей пульсаров с величиной  $B/P$ , пропорциональной разности потенциалов в зоне ускорения вблизи поверхности нейтронной звезды и мощности магнитодипольных потерь  $W_{\text{md}}$ . Оказалось, что  $L \propto (W_{\text{md}})^{1/3}$ .

Выделен класс пульсаров с короткими (миллисекундными) периодами и очень низкими производными. Это объекты с длительной эволюцией в двойной системе и вторичной вспышкой сверхновой. Обычно их называют раскрученными пульсарами, поскольку быстрое вращение нейтронной звезды обусловлено процессами перетекания вещества от компаньона. Первый максимум на гистограмме  $N(P)$  обязан своим происхождением именно этим объектам. Полученные результаты не противоречат модели генерации излучения у пульсаров с короткими периодами вблизи светового цилиндра.

Измерения полной ширины импульса  $W_0$  125 пульсаров на нескольких частотах показали, что величина  $W_0$  может отличаться от применяемой в каталогах величины  $W_{10}$  в несколько раз. Оказалось, что среднее значение отношения  $W_0/W_{10}$  уменьшается с повышением частоты. Этот результат может быть интерпретирован как следствие более сильной концентрации излучения к центру конуса на низких частотах.

Многочастотные наблюдения радиоизлучения пульсара в Геминге выявили необычный характер радиоизлучения этого пульсара. В сравнении с большинством радиопулсаров длительность индивидуальных и интегральных импульсов Геминги изменяется в очень широких пределах: от 15 мс (0.1 периода) до уникальных случаев

(~0.1% импульсов), когда излучение занимает весь период. Среднее значение длительности интегрального импульса -  $73 \pm 31$  мс или 0.3 периода на частоте 102.5 МГц, а среднее значение длительности интеримпульса -  $44 \pm 27$  мс или 0.19 периода. Изменение фазы прихода как главного, так и интеримпульса может достигать трети периода. Интеримпульс на частоте 102.5 МГц отстоит от главного импульса на интервал, равный  $0.51 \pm 0.09$  периода. В излучении Геминги наблюдаются сильные вспышки длительностью от одного до нескольких десятков периодов, когда поток возрастает в десятки и, возможно, сотни раз. Интенсивности излучения интеримпульса и главного импульса близки, и они могут присутствовать как поочередно, так и вместе.

Такое необычное поведение длительности, формы и фазы прихода главного импульса и интеримпульса можно объяснить моделью почти соосного ротатора, когда луч зрения наблюдателя почти не выходит из конуса излучения пульсара. При этом форму индивидуального импульса определяют ширина и интенсивность излучения отдельных пятен, расположенных внутри конуса, форму же интегрального профиля, кроме этих параметров, определяют еще их число, возможные движения пятен и их эволюция.

Обнаружена вспышка компонента в импульсе пульсара PSR B0643+80. Это, возможно, новый эффект в радиоизлучении пульсаров, так как он не похож на переключение мод и на гигантские импульсы. Отличие от переключения мод состоит в редком появлении этого события ( $< 4\%$  от всего времени наблюдения) и сильном увеличении потока одного компонента без какого-либо изменения его длительности и фазы прихода внутри периода. Также он не похож и на

гигантские импульсы, так как вспыхивает только один компонент импульса и при этом не искажается его форма. Если предположить, что вспышка произошла в одном импульсе, то это будет не гигантский импульс, а гигантский компонент, что также пока не наблюдалось ни у миллисекундных, ни у "нормальных" пульсаров.

В результате наблюдений по программе поиска радиоизлучения от пульсаров в остатках сверхновых (ОСН), проведённых на радиотелескопах БСА ФИАН (частота 111 МГц) и ДКР-1000 ФИАН (88 МГц), обнаружено импульсное радиоизлучение от рентгеновского пульсара J0205+6449 в ОСН ЗС58, по своим характеристикам напоминающем Крабовидную туманность. Измерена плотность потока этого пульсара на указанных частотах. Показаны возможные причины отличий в характеристиках пульсаров в ОСН ЗС58 и в Крабовидной туманности. В частности показано, что причиной отличий в светимостях указанных пульсаров может быть различие в масштабах их магнитосфер.

Автором созданы алгоритмы программ для обработки многоканальных наблюдений пульсаров на телескопах ПРАО с учётом методических особенностей наблюдений этих объектов, а также для проведения кластерного анализа и вычисления интегральных радиосветимостей пульсаров по заданным спектрам. В настоящее время эти программы с успехом используются сотрудниками ПРАО.