

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Проведённые исследования позволяют в общих чертах описать радиопульсар.

В его основании находится нейтронная звезда с сильным магнитным полем (порядка 10^{12} Гс в пульсарах с периодами вращения $P \geq 0,1$ с и $\sim 10^8$ Гс в раскрученных пульсарах с $P < 0,1$ с). Торможение вращения за счёт различных механизмов приводит к высвобождению энергии, которая обеспечивает все процессы, протекающие внутри звезды и в её магнитосфере, включая развитие плазменных неустойчивостей и излучение во всех диапазонах электромагнитного спектра. Этот источник энергии одинаков для всех радиопульсаров. Он приводит к генерации мощных электрических полей, вызывающих вырывание заряженных частиц с поверхности нейтронной звезды и их ускорение до релятивистских скоростей. Анализ наблюдаемых профилей свидетельствует о неоднородном (уменьшающемся к краям полярной шапки) электрическом поле в зоне ускорения. Действительно, численные расчёты показывают (рис. 67 [100, 136]), что при однородном в пределах полярной шапки электрическом поле профили получаются с очень крутыми внешними крыльями, в то время как при спадающем к краям шапки поле они имеют вид, близкий к наблюдаемым формам.

Релятивистские заряды испускают в искривлённом магнитном поле гамма-кванты, которые, распадаясь в таком поле на электрон и позитрон, приводят к появлению вторичной плазмы. Этот процесс считается базовым во всех рассматривавшихся до сих пор моделях радиопульсаров. В результате образуется двухкомпонентная плазма, и именно она определяет специфику магнитосферы пульсара. В частности, перестройка функции распределения может обеспечить переключение мод [256], а выключение основного процесса образования пар приводит к нуллингу – замиранию наблюдаемого радиоизлучения.

Микроструктура наблюдаемого профиля может быть связана с микрорельефом поверхности нейтронной звезды [140] или

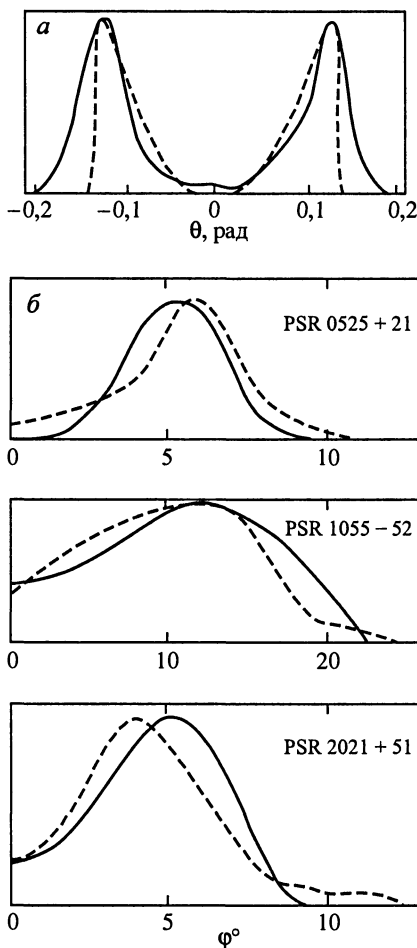


Рис. 67. Сравнение наблюдаемых (сплошные линии) профилей с модельными (штриховые линии), вычисленными в предположении об однородном в пределах полярной шапки электрическом поле [136] (а) и для поля, спадающего к краям шапки [100] (б)

к поверхности нейтронной звезды. В этом случае должно наблюдаться запаздывание высокочастотного импульса по отношению к импульсу на низких частотах. Эффект абберации и ретардации действительно был нами обнаружен у пульсара PSR B0329+54 [259]. Центр тяжести среднего профиля этого пульсара смещает-

с тонкой структурой плазменных неоднородностей. Дрейф субимпульсов можно объяснить вращением неоднородной области формирования излучения относительно нейтронной звезды [91] или дрейфовыми волнами в магнитосфере пульсара [252].

Образовавшаяся вблизи поверхности анизотропная плазма, распространяясь в магнитосфере пульсара, инициирует развитие плазменных неустойчивостей. В известных нам работах исследованы ленгмюровская [91, 132, 257, 258], изгибно-плазменная [126], циклотронная и черенковская [106] неустойчивости. Каждая из них может вносить свой вклад в генерацию наблюдаемого излучения. Общей особенностью для всех типов неустойчивостей является то, что их развитие, достаточное для наблюдаемых проявлений, происходит на расстояниях от поверхности нейтронной звезды $r \sim 10^8 \div 10^9$ см.

В пульсарах с $P \sim 1$ с соответствующие уровни находятся глубоко в магнитосфере ($r \ll \ll r_{LC}$). Такие объекты описываются моделью полярной шапки, и в них генерация излучения с более высокими частотами происходит ближе

Относительное положение компонентов, градус

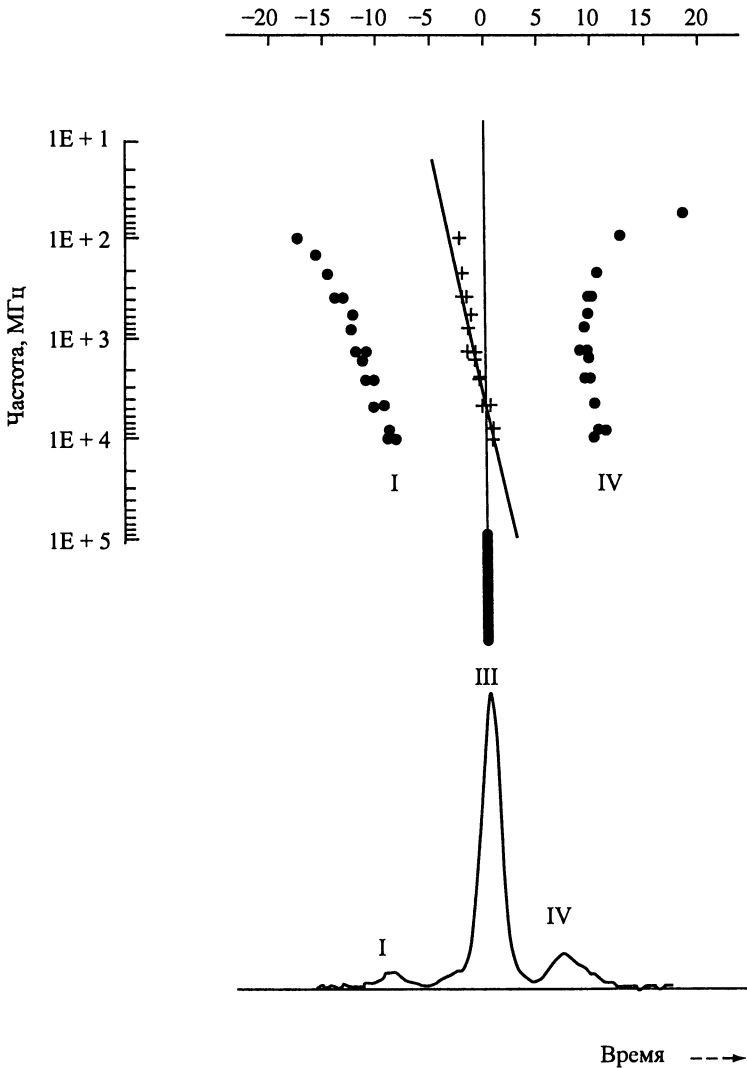


Рис. 68. Положение боковых компонентов I и IV (кружки) и их центра симметрии (крестики) относительно центрального компонента на разных частотах в среднем профиле пульсара PSR B0329+54. Схематично показано более низкое расположение области генерации центрального компонента. Представлен средний профиль импульса на частоте 103 МГц

ся с изменение частоты, указывая на формирование низкочастотных импульсов на больших высотах в магнитосфере (рис. 68).

В быстрых пульсарах ($P < 0,1$ с) развитие неустойчивостей происходит вблизи границы магнитосферы ($r \sim r_{LC}$). В отличие от долгопериодических пульсаров в этих объектах не должно быть эффекта ретардации. Действительно, как показали наблюдения PSR B1937+21, временное запаздывание импульсов на частотах от 0,3 до 1,4 ГГц отсутствует [260]. При этом всё излучение на этих частотах должно генерироваться вблизи светового цилиндра при различии уровней генерации крайних частот $\Delta r \leq 2$ км. Генерируемое в этих областях радиоизлучение может свободно выходить из пульсара.

Взаимодействие возбуждаемых волн с релятивистскими частицами во внешних слоях магнитосферы приводит к появлению у частиц заметного питч-угла и испусканию ими синхротронного излучения. Вычисления показывают, что соответствующие частоты попадают в оптический [261] и рентгеновский [229] диапазоны. Таким способом естественно объясняется наблюдаемое в пульсарах с короткими периодами излучение вне радиодиапазона и ряд их других особенностей.

Синхротронная модель позволяет также описать пекулярные объекты типа Геминги [262] и пульсары с уплощением спектра на высоких радиочастотах [49], а также понять различия объектов внутри популяции быстрых пульсаров.

Вблизи светового цилиндра может играть роль синхротронная неустойчивость [263], приложение которой к физике пульсаров остаётся неисследованным, а также может проявляться специфика синхротронного механизма, свойственная случаю малых питч-углов [264].

* * *

Важнейшим параметром, определяющим свойства радиопулсара, помимо его периода, оказывается угол β между осью вращения и магнитным моментом нейтронной звезды. Для углов $\beta \sim 90^\circ$ при одинаковой активности областей вблизи магнитных полюсов должен наблюдаться интеримпульс, а в случае малых углов $\beta (< 10^\circ)$ кроме возможного интеримпульса следует ожидать появления межимпульсного излучения и заметного уширения главного импульса. К таким пульсарам относится по-видимому PSR B0826–34.

В пульсарах с короткими периодами ($P \leq 0,1$ с) и малыми углами $\beta (< 10^\circ)$ возможно проявление дрейфовых волн на периферии магнитосферы, что приводит к феномену «магнетара».

* * *

В ряде мест отдельные формулы и выражения повторяются, чтобы не вынуждать читателя обращаться к другим главам книги и сделать восприятие приводимой информации более удобным.

* * *

В предисловии подчеркивалось, что предлагаемую книгу следует рассматривать как избранные главы из науки о пульсарах. Помимо уже упоминавшихся и оставшихся за пределами книги вопросов, в ней вообще не обсуждались проблемы ускорения частиц за границей магнитосферы, не затрагивалось происхождение туманностей, связанных с пульсарным ветром, взаимодействие нейтронных звёзд с окружающими их остатками сверхновых. Автор сознательно не касался вопросов рассеяния импульса в межзвёздной среде и мерцаний пульсаров на неоднородностях плазмы между источником и наблюдателем. Выпало из книги рассмотрение обычных рентгеновских пульсаров и вообще двойных систем, включающих в себя нейтронные звёзды. Обсуждение этих проблем предполагает привлечение других областей физики (в частности, гидродинамики, взаимодействия излучения с веществом, распространения волн в случайных средах и др.), что, во-первых, сделало бы объём книги непомерно большим, а, во-вторых, заставило бы автора пересказывать результаты, полученные в сферах, где его вклад отсутствует или является минимальным. Поэтому здесь он ограничился рассмотрением основных физических процессов внутри магнитосферы пульсара и описанием её геометрии в свете собственных работ и тех результатов, что делают изложение в какой-то мере полным и законченным.

Следует однако подчеркнуть, что исследование двойных систем, представляющее собой самостоятельную задачу, очень важно и для понимания природы и эволюции радиопульсаров. Действительно, для решения проблемы пульсара необходимо знать распределения начальных периодов, скоростей, магнитных полей и углов между осью вращения и магнитным моментом, которые могут быть получены в результате изучения двойных систем. Кроме того, как было показано в гл. IV, процессы аккреции, протекавшие на стадии двойственности, могут быть существенными для замедления вращения нейтронной звезды и после распада системы. В связи с этим отметим одну из пионерских работ Бисноватого-Когана и Комберга [265], в которой анализируются процессы раскрутки нейтронной

звезды, входящей в двойную систему, и ослабления её магнитного поля вследствие аккреции вещества из второго компаньона. Авторы сделали, в частности, вывод о том, что рассмотренная модель допускает образование системы, состоящей из двух нейтронных звёзд. Недавно открытый двойной пульсар J0737–3039 [266] свидетельствует о правильности основных выводов, следующих из этой модели.

* * *

Здесь уместно упомянуть, что кроме двух компактных звёздных конфигураций – белых карликов и нейтронных звёзд, в последнее время для описания некоторых особенностей пульсаров привлекаются «странные звезды» – объекты, внутри которых или на их поверхности присутствует кварковая материя. Так, в работах [267, 268] такие звёзды использованы для объяснения феномена «магнетара». В первой из них предлагается рассмотреть гравитационный коллапс пульсара в странную звезду. Выделяемая при таком коллапсе энергия оказывается достаточной, чтобы объяснить происхождение коротких гамма-всплесков, пекулярную форму остатков сверхновых вокруг AXP и SGR и необычно большие скорости этих объектов. Усов использовал для описания гигантских гамма-всплесков в SGR 0526–66 и 1900+14 модель кварковой поверхности, разогреваемой столкновениями с массивными кометообразными объектами. Само существование свободного кваркового вещества остаётся проблематичным, а указанные выше модели слабо разработаны, и мы их не рассматривали.

* * *

Говоря о нестандартных моделях для описания пульсаров, мы должны признать, что в настоящее время, по-видимому, становится неизбежным вывод о необходимости применения новых физических принципов, по крайней мере, на космологических масштабах. Действительно, свой вызов естествоиспытателям посылает «тёмная материя» – вещество, не наблюдаемое ни в одном из электромагнитных диапазонов, но проявляющееся в динамике галактик и их скоплений. До сих пор остаётся неясной природа «тёмной энергии» (Λ -члена в уравнении Эйнштейна). Наблюдения показывают, что около 70% материи во Вселенной связано с этой составляющей, приводящей к «отрицательной гравитации». Современная физика не даёт ответа на вопрос о возможном составе тёмной материи и тёмной энергии.

В этой связи заслуживает внимания теория Ю.А. Баурова, изложенная в монографии [269]. Исходя из самых общих предпосылок, автор пришёл к выводу о существовании элементарных частиц материи (названных им буюнами) с «врождённым» векторным потенциалом A_r . Из буюнов можно сконструировать все известные микрочастицы. Оказалось, что влияние A_r проявляется в лабораторных опытах с пульсирующим излучением плазмотрона [270] и в экспериментах по измерению скорости β -распада [271]. На основе этих экспериментов можно определить направление космологического потенциала. Во второй экваториальной системе координат прямое восхождение A_r равно $293^\circ \pm 10^\circ$, склонение $36^\circ \pm 10^\circ$. Совершенно очевидно, что в пространстве, заполненном плазмой и магнитными полями, влияние векторного потенциала $A_r = 1,95 \cdot 10^{11}$ Гс · см должно быть существенным.

Первые оценки анизотропии пространственных скоростей пульсаров показали [272], что они сосредоточены в основном в конусе вокруг A_r . К сожалению, лишь у 100 из известных 1400 пульсаров есть определения тангенциальных скоростей, и эта работа должна быть продолжена в будущем. Поскольку сам радиопульсар представляет собой объект с очень сильным магнитным полем (настоящий «плазмотрон»), в нём должно быть существенным влияние A_r . Соответствующие вопросы остаются совершенно неисследованными, хотя их важность как для проверки теории Баурова, так и (в случае, если она верна) для понимания процессов, наблюдаемых в пульсарах, не вызывает сомнений.

* * *

Изложенные в книге материалы показывают, что, если в общих чертах феномен пульсара можно считать изученным, то большое число конкретных процессов и явлений остаётся в начальной стадии своего исследования и требует приложения новых творческих сил. Автор надеется на то, что его книга заинтересовала молодые умы, и, значит, можно быть уверенным в окончательном решении проблемы радиопульсаров в недалёком будущем.