

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1974 г.

523.84

ПУЛЬСАРЫ И ФИЗИКА ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ*)**A. Хьюиши****ОТКРЫТИЕ ПУЛЬСАРОВ**

Путь, который в конце концов привел к открытию первого пульсара, начался в 1948 г., когда я присоединился к маленькой исследовательской группе Райла и заинтересовался общей проблемой распространения излучения в неоднородной прозрачной среде. Нам всем знакомо мерцание видимых звезд, моей же задачей было понять, почему мерцают радиозвезды. Мне повезло — я учился у Ратклиффа, который первым продемонстрировал мощь фурье-анализа при рассмотрении подобных явлений дифракции. В результате небольшого обобщения уже существующей теории мне удалось показать, что мерцания наблюдавшихся радиозвезд связаны с облаками плазмы, расположенными в ионосфере на высотах порядка 400 км, и я смог также измерить скорость ионосферных ветров в этой области¹.

Увеличение возможностью использовать внеземные радиоисточники для изучения находящейся на пути радиоволн плазмы привело меня затем к исследованию солнечной короны. Наблюдая с помощью простых радиоинтерферометров угловое рассеяние проходящего через корону излучения, я смог постепенно «просветить» атмосферу Солнца вплоть до расстояния, равного половине радиуса земной орбиты².

В моей тетради 1954 г. есть замечание о том, что если бы угловой размер радиоисточников был достаточно мал, они могли бы освещать солнечную атмосферу с достаточной когерентностью, чтобы дать интерференционные картины на Земле. Эти картины могли бы детектироваться как очень быстрые флуктуации интенсивности. К сожалению, из существующих в то время данных следовало, что размер всего нескольких известных тогда радиоисточников более чем в сто раз превышал требуемый, и я, к сожалению, оставил эту идею. Явление это случайно обнаружила Маргарет Кларк почти восемь лет спустя, когда я уже забыл о своих соображениях. М. Кларк входила в группу, занимающуюся в Кембридже обзором радиоисточников, и заметила, что у трех определенных источников наблюдаются вариации интенсивности. Она отметила, что угловой размер двух из этих источников по существовавшим данным должен быть меньше 2",

*) A. Hewish, Pulsars and High Density Physics. Нобелевская лекция по физике 1974 г. Перевод Н. И. Гинзбург.

© The Nobel Foundation 1975.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1975 г.

и оценила, что для объяснения механизма мерцаний плазменные неоднородности должны находиться на расстояниях порядка тысяч километров³. Во время коллективного обсуждения я вдруг вспомнил о моих давнишних соображениях и понял, что если угловой размер радиоисточников меньше 1", то их мерцания с предсказываемой интенсивностью могут быть обусловлены плазменными облаками в межпланетной среде. С помощью Скотта и Коллинза были проведены специальные наблюдения источника 3С 48 и других квазизвездных радиоисточников, которые немедленно подтвердили этот механизм мерцаний⁴.

Поскольку эти мерцания, которые мы назвали межпланетными, можно наблюдать в любом направлении, я их использовал для изучения солнечного ветра, который к тому времени был обнаружен космическими зондами, запущенными на орбиты далеко за пределы магнитосферы. Было интересно проследить за межпланетными дифракционными картинами, когда они проносились над Англией со скоростью, превышающей 300 км/сек, и узнать поведение солнечного ветра далеко от плоскости эклиптики, где еще не побывали космические приборы⁵.

Методика мерцаний оказалась также предельно простым и полезным способом выделения радиоисточников, размер которых лежит в пределах 0,1"—1,0". Первый действительно необычный источник был обнаружен этим методом в 1965 г., когда я вместе со своим студентом Окой исследовал радиоизлучение Крабовидной туманности. Мы обнаружили внутри туманности заметную «мерцающую» компоненту, размер которой был слишком мал, чтобы ее можно было объяснить обычным синхротронным излучением. Тогда мы предположили, что мерцания могут быть обусловлены остатками звезды, которая уже взорвалась, но ее активность все еще проявляется в форме радиоизлучения вспышечного типа⁶. Этот источник оказался позже не чем иным, как знаменитым пульсаром в Крабовидной туманности.

В 1965 г. я составил план создания радиотелескопа, с помощью которого намеревался провести обширный обзор более чем 1000 радиогалактик, используя для достижения высокого углового разрешения метод межпланетных мерцаний. Для получения требуемой чувствительности необходимо было охватить площадь в 18 000 м², и поскольку обусловленные плазмой мерцания наиболее заметны на длинных волнах, я выбрал $\lambda = 3,7$ м. В итоге был создан проект устройства из 2048 дипольных антенн. Позже в этом же году ко мне присоединилась новая аспирантка Жаклин Белл, которая отвечала за электрокабельную сеть, соединяющую диполи. Вся система была построена местными силами, и в ее создании добровольно участвовали многие члены Кембриджской группы.

Радиотелескоп был закончен и опробован к июлю 1967 г., и мы немедленно начали обзор неба. Наш метод использования мерцаний для количественного измерения угловых размеров требовал повторных наблюдений при многих различных угловых расстояниях каждого источника от Солнца. Фактически мы наблюдали всю доступную часть неба с интервалами в одну неделю. Чтобы обеспечить непрерывность составления обзора, мы решили наносить положения мерцающих радиоисточников на карту неба и добавлять к ним точки, полученные из повторных наблюдений через каждую неделю. Таким образом, истинные источники можно было отличить от электрических помех, поскольку последние вряд ли повторялись бы для одних и тех же небесных координат. Надо отдать должное Жаклин Белл, которая смогла справиться с потоком бумаги, сходящей с четырех самописцев.

Однажды, в середине августа 1967 г., Жаклин показала мне запись флюктуирующего сигнала, который мог быть слабым источником, мер-

цающим при наблюдении в противоположном Солнцу направлении. Это было необычно, поскольку в этом направлении сильные мерцания наблюдаются редко, и мы сначала подумали, что полученный сигнал может быть связан с электрическими помехами. К концу сентября источник детектировали несколько раз, хотя видели его не всегда. Я подозревал, что мы

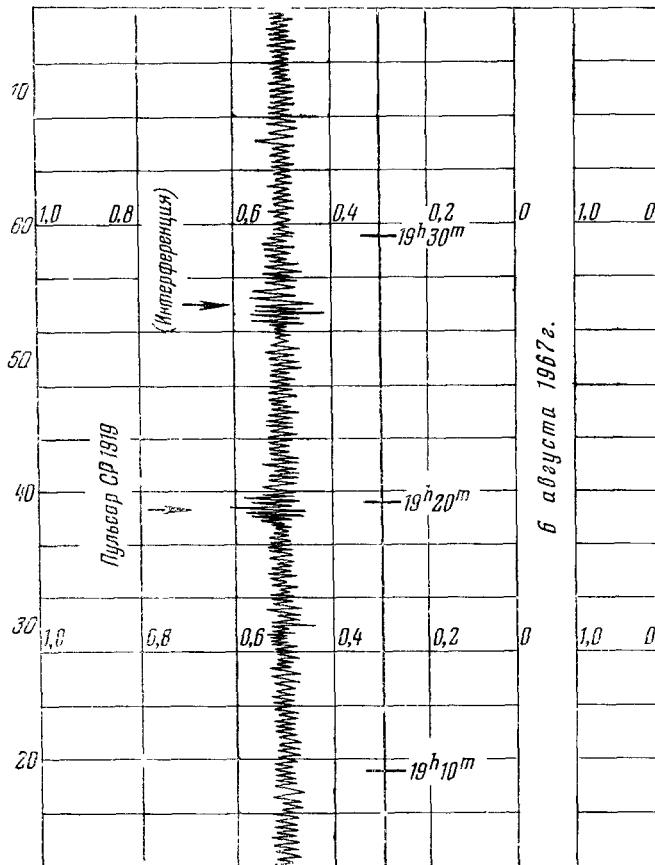


Рис. 1. Первый сигнал от пульсара CP 1919.

обнаружили вспыхивающую звезду, аналогичную, возможно, карликовым звездам M-типа, которые исследовал в это время Ловелл. Мы подключили высокоскоростной самописец для изучения природы флюктуирующих сигналов, но успеха не достигли, поскольку интенсивность источника лежала ниже предела детектирования.

В течение октября самописец понадобился для запрограммированных заранее наблюдений другого источника (3С 273) с тем, чтобы проверить некоторые аспекты теории мерцаний, и только 28 ноября мы получили первое доказательство, что наш таинственный источник испускает регулярные импульсы излучения с интервалом немного больше одной секунды. Я не мог поверить, что какой-либо естественный источник способен излучать таким образом, и немедленно обратился к астрономам других обсерваторий с вопросом, не работают ли они с приборами, которые могли бы генерировать электропомехи в определенное звездное время около 19 часов 19 мин.

В начале декабря интенсивность источника увеличилась, и импульсы четко были видны на фоне шума. Относясь к этому все еще скептически, я наладил устройство, которое через каждую секунду делало точные отметки, используя сигналы службы времени (MSF Rugby Time Service). Ежедневные измерения начались с 11 декабря. К моему удивлению, в пределах ошибки наблюдения, равной 0,1 сек, мы получили регулярный график, показывающий, что пульсирующий источник дает сигналы с точностью лучше $1 \cdot 10^{-6}$. В это время мои коллеги Пилкингтон, а также Скотт и Коллинз совершенно независимыми методами нашли, что сигнал

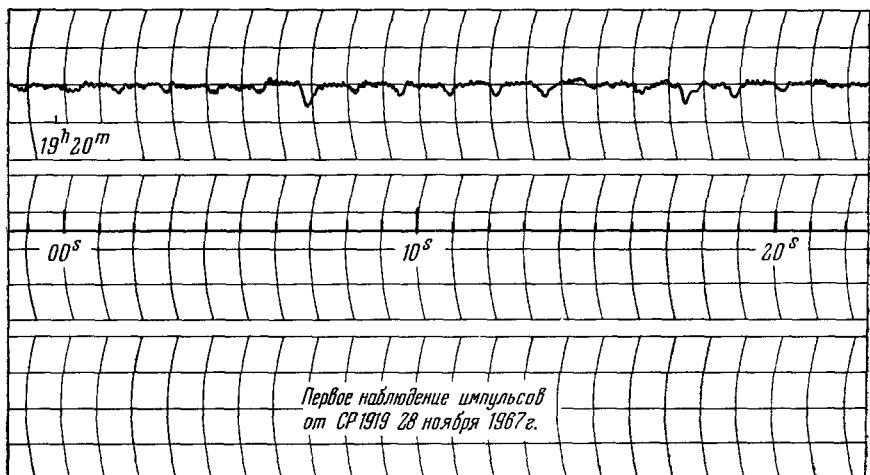


Рис. 2. Первые сигналы пульсирующего характера от CP 1919.

характеризуется быстрыми изменениями частоты порядка — 5 Мгц/сек. Из этого следовало, что продолжительность каждого импульса при данной радиочастоте равна примерно 16 мсек.

Не найдя никаких убедительных земных объяснений для этих импульсов, мы начали теперь верить, что их может генерировать только какой-либо источник, находящийся далеко за пределами солнечной системы, а короткая продолжительность каждого импульса наводила на мысль, что источник излучения не может быть больше маленькой планеты. Не исключена была возможность, что сигналы были искусственными и действительно приходили с планеты, обращающейся вокруг какой-либо далекой звезды. Я знал, что если измерения времени продолжить несколько недель, то в силу допплер-эффекта будет выявлено любое орбитальное движение источника, и поэтому до получения такого результата я должен был хранить полнейшее молчание. Эти недели в декабре 1967 г. были несомненно самыми волнующими в моей жизни.

Оказалось, что допплеровский сдвиг точно соответствует движению одной лишь Земли, и мы начали искать объяснений, связанных с карликовыми звездами или с гипотетическими нейтронными звездами. Мои друзья в библиотеке оптической обсерватории были удивлены, увидев радиоастронома, проявляющего такой пристальный интерес к книгам по эволюции звезд. Наконец, я решил, что возможным механизмом, объясняющим периодическое излучение, могут служить гравитационные колебания всей звезды, но что основная частота колебаний белых карликов слишком низка. Я предположил, что в случае белого карлика нужно

рассматривать более высокие собственные колебания. В случае же нейтронной звезды с наименьшей допустимой плотностью основные колебания могут дать требуемую частоту. Мы оценили также расстояние до источника в предположении, что изменение частоты вызывается дисперсией импульса в межпланетной плазме, и получили значение, равное 65 парсек, т. е. типичное звездное расстояние.

В январе 1968 г. пока я старался связно изложить наши несколько сумбурные результаты, Жаклин Белл с характерными для нее настойчивостью и трудолюбием расшифровала все записи обзоров неба и определила возможные положения других пульсаров. Чтобы получить доказательства импульсного характера их излучения, мы провели повторные наблюдения, и к моменту отправки статьи в печать 8 февраля были уверены, что существует три новых пульсара, хотя их параметры были известны нам лишь приблизительно. Я хорошо помню то утро, когда Жаклин пришла в мою комнату с записями сигналов возможного пульсара, которые она сделала предыдущей ночью при прямом восхождении 09 час 50 мин. Сначала Жаклин думала, что флюктуации на полученном графике не означали ничего существенного, но когда мы развернули ленту самописца на полу и поверх нее положили линейку, то сразу стали заметны регулярные импульсы с периодом 0,25 сек. Позже это значение подтвердилось, когда приемник настроили на более узкую полосу. Малость периода этого пульсара весьма затруднила интерпретацию данных с помощью модели белого карлика.

Месяцы, последовавшие за сообщением о нашем открытии⁷, были весьма напряженными как для экспериментаторов, так и для теоретиков. Радиотелескопы всего мира были направлены на первый пульсар, и новая информация поступала с феноменальной скоростью. Голд⁸ первый предположил, что вращение нейтронных звезд представляет собой простейший и наиболее гибкий механизм для объяснения периодичности пульсаров, и его предсказание, что период пульсара должен расти со временем, вскоре получило драматическое подтверждение в результате открытия пульсара в Крабовидной туманности^{9, 10}. Дальнейшей впечатительной поддержкой гипотезы, связанной с нейтронными звездами, было обнаружение импульсов света от звезды, которую ранее считали остатками взрыва. Согласно теории звездной эволюции именно в результате таких взрывов должны возникать молодые нейтронные звезды.

Голд показал также, что потеря вращательной энергии, вычисленная для модели нейтронной звезды по увеличению периода, точно равна энергии, необходимой для создания наблюдаемого синхротронного излучения туманности.

Теперь, в 1974 г., когда на небе обнаружено уже 130 пульсаров, существуют неопровергимые доказательства правильности модели нейтронной звезды — «маяка». Никакая другая звезда не может оставаться целой,

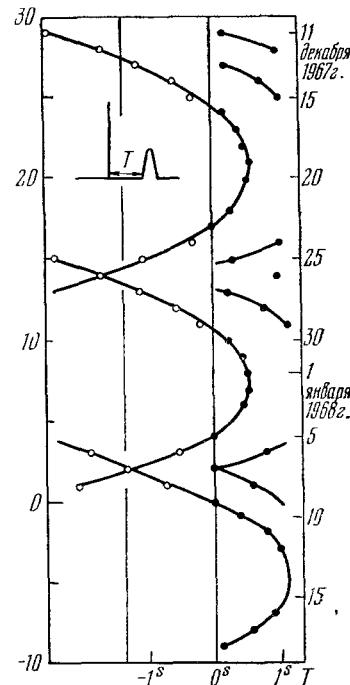


Рис. 3. Временные измерения, показывающие, что доплеровский сдвиг частоты обусловлен орбитальным движением Земли.

вращаясь с такой высокой скоростью, которая отвечает наиболее коротко-периодическим пульсарам. Все периоды, лежащие в пределах от 33 мсек до 3,5 сек, с легкостью объясняются упомянутой моделью. В то же время

CP 0808 Период $P=1,232241325$ сек 81,5 Мгц 31. 3. 1970 г.

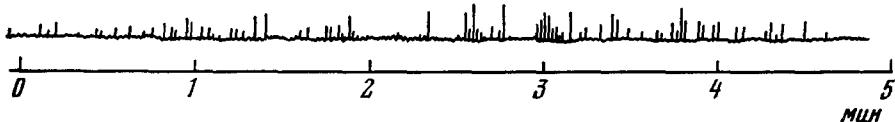


Рис. 4. Излучение типичного пульсара.

нет, к сожалению, удовлетворительной теории, объясняющей радиоизлучение, генерируемое этими крошечными звездами с радиусом только 10 км.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ В НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗДАХ

Вскоре после открытия Чедвиком нейтрона в 1932 г., Ландау¹¹ первым предсказал, что в результате гравитационного сжатия внутри звезды может образоваться вещество с почти невообразимой плотностью 10^{18} кг/см³. При такой плотности остается лишь небольшая часть исходных протонов и электронов и вещество почти полностью должно состоять из нейтронов. Именно давление, связанное с вырождением нейтронов, подчиняющихся статистике Ферми, уравновешивает дальнейшее гравитационное сжатие, хотя в конце концов, если энергия Ферми становится релятивистской, происходит дальнейший гравитационный коллапс. Внутри горячих звезд, где велико тепловое давление, в результате термоядерных реакций образуются сложные ядра. Вырожденное нейтронное состояние может возникнуть только после окончания термоядерных реакций, когда остается лишь оставающий «пепел» звездной эволюции. Масса звезд, из которых образуются нейтронные звезды, больше массы Солнца, и считают, что образование нейтронных звезд связано со взрывом сверхновых.

С момента открытия пульсаров во всем мире очень активно включились в работу физики, проводящие исследования в области твердого тела, поскольку нейтронное вещество при любой температуре меньше 10^9 °К ведет себя как обычное вещество вблизи абсолютного нуля. Общепризнанная модель нейтронной звезды состоит из концентрических оболочек с очень различными физическими свойствами (см. обзор Рудермана¹²).

Очень вероятно, что на поверхности звезды существует железная оболочка, поскольку ядра ^{56}Fe наиболее устойчивы. В отсутствие магнитного поля атомы должны быть нормальными. В астрофизике не следует игнорировать магнитные явления, и возможно, что гравитационный коллапс, следующий за взрывом сверхновой, сжимает пронизывающий звезду первоначальный магнитный поток с образованием поля, напряженность которого на поверхности составляет 10^8 тл или больше. В полях такой силы гиорадиус электронов на атомных уровнях становится меньше боровского радиуса и электронные волновые функции становятся цилиндрическими. Искаженные атомы такого типа ионизовать значительно труднее, и это существенно при рассмотрении образования магнитосферы, окружающей нейтронную звезду.

Под железной оболочкой увеличивающееся сжатие заставляет электроны переходить во все более высокие энергетические состояния, пока они полностью не освободятся от положительных ядер. Затем пеэкранированные ядра образуют жесткую решетку с температурой плавления

около 10^9 °К. Еще глубже энергия электронов становится релятивистской, и они начинают объединяться с протонами в ядрах, увеличивая количество нейтронов. Это и есть процесс обратного β -распада.

При достаточно большой глубине почти все электроны и протоны должны исчезнуть, а ядра должны пополнить нейтронное море.

Энергетическая щель для образования нейтронных пар по порядку величины равна нескольким M_{\odot} , что соответствует температуре сверхтекучего перехода 10^9 — 10^{10} К, и поскольку молодые нейтронные звезды быстро остывают до температур ниже 10^9 °К, можно ожидать, что нейтронное море будет вести себя как квантовая сверхтекучая жидкость. Небольшое количество оставшихся протонов также образует пары и перейдет в сверхпроводящее состояние, а сохранившиеся электроны останутся

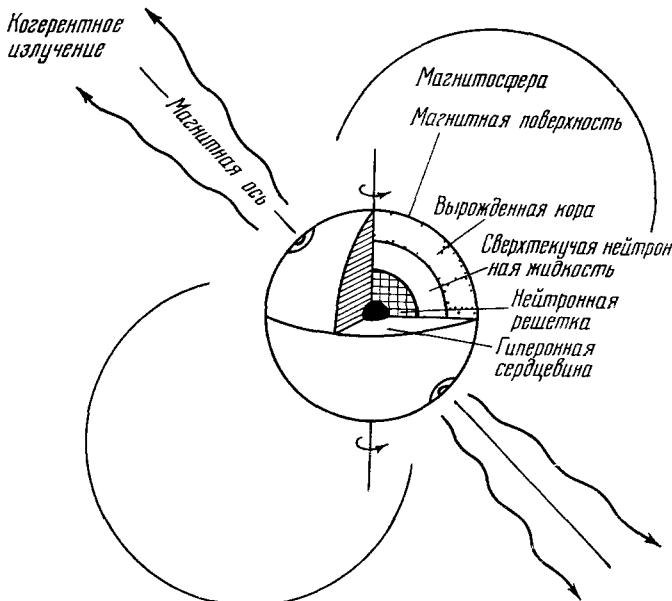


Рис. 5. Модель нейтронной звезды.

в нормальном состоянии. Макроскопическое движение нейтронной сверхтекучей жидкости должно быть безвихревым, но может возникнуть эффективное твердотельное вращение в результате соответствующего распределения квантовых вихревых нитей, содержащих небольшую часть нормальной нейтронной жидкости.

На еще более глубоких уровнях в результате нейtron-нейtronного взаимодействия может образоваться нейтронная решетка, хотя эта возможность еще обсуждается. И наконец, возникает вопрос о веществе, состоящем из устойчивых гиперонов.

В результате длительных наблюдений за периодами пульсаров были получены доказательства, что нейтронные звезды действительно обладают структурой, аналогичной упомянутой. Эти наблюдения показали, что систематическое увеличение периода, соответствующее постепенному уменьшению энергии вращения звезды, иногда нарушается скачкообразным образом. Большинство пульсаров замедляется с характерным временем 10^6 — 10^7 лет, хотя характерное время наиболее быстрых пульсаров и сверхновых Краб и Вела (созвездие Парусов) равно всего 10^3 и 10^4 лет

соответственно. При скачкообразных изменениях часто происходит резкое уменьшение периода, сопровождающееся возвращением на слегка пониженное его значение с характерным временем релаксации.

У пульсара в Крабе этот эффект можно объяснить с помощью модели с твердой корой и с жидким ядром. Молодые нейтронные звезды, зарождаясь, по-видимому, быстро, вращаются с угловыми скоростями до 10^4 рад/сек, и они должны поэтому иметь сфероидальную форму. При замедлении звезды сфероидальность будет уменьшаться, и когда напряжения превысят предел упругости, твердая кора начнет ломаться через нерегулярные интервалы. После этого кора немедленно начнет вращаться быстрее, но затем вращение должно передаться внутренним жидким слоям, содержащим основную массу звезды. Наблюдаемая времененная постоянная для передачи вращения находится в хорошем согласии со сверхтекущей моделью и была бы слишком мала для случая с сердцевиной из нормальной жидкости. Поразителен тот факт, что образование на коре неровности величиной только лишь в 10 мкм достаточно для объяснения аномалий периода у пульсара в Крабе. Если аналогичные рассуждения перенести на пульсар в Веле, у которого аномалии больше, необходимо прибегнуть к помощи модели с сердцевиной из твердой нейтронной решетки, в которой напряжения, возникшие на ранней стадии звезды скачкообразно релаксируют.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В БЛИЗИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Как ни странно, внутреннее строение нейтронных звезд более понятно, чем строение их атмосферы, где генерирует излучение, благодаря которому звезду можно детектировать. Обзор электродинамических проблем содержится в статье Гинзбурга и Железнякова¹³. В основном внимание теоретиков сконцентрировано на модели наклонного «магнитного ротора»,

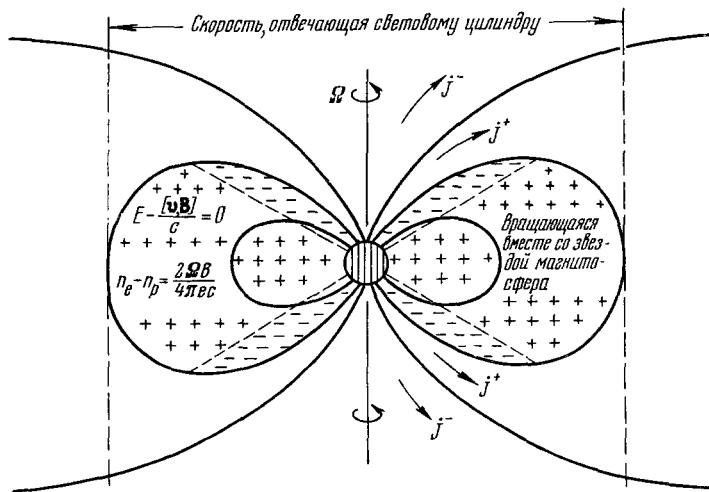


Рис. 6. Магнитосфера нейтронной звезды — магнитного ротора с осью вращения, совпадающей с магнитной осью.

в котором пульсар можно рассматривать, как динамомашину, питаемую первоначальным запасом кинетической энергии вращения и превращающей ее с помощью сильного магнитного поля в излучение вместе с потоком релятивистских частиц. Еще до открытия пульсаров Пачини первым

рассмотрел модель наклонного ротатора¹⁴, а Голд⁸ предположил, что главную роль играет обширная, вращающаяся вместе со звездой магнитосфера.

Гольдрайх и Джулиан¹⁵ показали, что электрических сил, возникающих в результате униполярной индукции, было бы достаточно, чтобы снять заряды с поверхности звезды и распределить их во вращающейся вместе со звездой магнитосфере. Еще неизвестно, устойчиво ли такое распределение, а рассматриваемая плазма отличается от лабораторных плазм тем, что в ней происходит почти полное разделение заряда. Инерциальные силы должны доминировать, когда скорость вращения магнитосферы приблизится к c , а когда скорость превышает c , т. е. за пределами светового цилиндра, плазма отрывается с образованием звездного ветра. Считают, что в таких моделях решающую роль играют полярные области, поскольку частицы могут выходить вдоль «открытых» линий поля.

В этой общей модели учитывается также существование упорядоченного движения зарядов, генерирующих пучки радиоволн, которые мы наблюдаем, а также областей, испускающих световые и рентгеновские лучи, как это имеет место у самого молодого пульсара в Крабе. Необычайное богатство характеристик и процессов — поляризация, форма импульсов, радиоспектр, вариации интенсивности и вторичные сложные периодичности — должно в конце концов предоставить важные сведения, которые позволят устранить существующие пока неясности. Однако есть все основания предполагать, что общая картина правильна. Из простых соображений следует, что напряженность магнитного поля на поверхности B_0^2 пропорциональна $P \frac{dP}{dt}$, где P — период пульсара. Если пользоваться существующими моделями нейтронной звезды, то из наблюдений многих пульсаров следует, что $B_0 \sim 10^8$ т.л. Дополнительную информацию дает возраст пульсаров, который равен приблизительно $P (dP/dt)^{-1}$. Типичный возраст составляет 10^6 — 10^7 лет, хотя возраст пульсара в Крабе равен 10^3 лет, что находится в хорошем согласии с известным возрастом сверхновой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описав в общих чертах физику нейтронных звезд и ту удачу, которая столкнула меня с ними, я дал, надеюсь, некоторое представление о том, как интересна и щедра физика, выходящая за пределы лабораторий. Сейчас хорошее время для того, чтобы быть астрофизиком. Я также глубоко сознаю, сколь многим я обязан моим коллегам из Кембриджской лаборатории. Прежде всего сэру Мартину Райлу за его уникальное чутье при подборе группы сотрудников, столь единодушных и вдохновляющих друг друга. Затем Жаклин Белл за внимательность, трудолюбие и настойчивость, которые привели к нашему открытию уже на весьма ранней стадии осуществления программы исследования мерцаний. И, наконец, моим друзьям, великодушно помогавшим мне на разных стадиях исследований.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. Hewish, Proc. Roy. Soc. **214**, 494 (1952).
2. A. Hewish, J. D. Wyndham, Mon. Not. RAS **126**, 469 (1963).
3. M. E. Clarke, Ph. D. Thesis (Cambridge, 1964).
4. A. Hewish, P. F. Scott, D. Williams, Nature **203**, 1214 (1964).
5. P. A. Dennison, A. Hewish, Nature **213**, 343 (1967).
6. A. Hewish, S. E. O��oye, Nature **207**, 59 (1960).

7. A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, R. A. Collins, *Nature* **217**, 709 (1968).
8. T. Gold, *Nature* **218**, 731 (1968).
9. D. H. Staelin, E. C. Reifenstein, *Science* **162**, 1481 (1968).
10. J. M. Comella, H. D. Craft, R. V. E. Lovelace, J. M. Sutton, G. L. Tyler, *Nature* **221**, 453 (1969).
11. L. Landau, *Phys. Zs. Sowjetunion* **1**, 285 (1932).
12. M. Ruderman, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **10**, 427 (1972).
13. V. L. Ginzburg, V. V. Zheleznyakov, *ibid.* **13** (1975).
14. F. Pacini, *Nature* **219**, 145 (1968).
15. P. Goldreich, W. H. Julian, *Astrophys. J.* **157**, 869 (1969).