

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АСТРОФИЗИКИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Предсказание. Нейтронные звезды были предсказаны теоретически в начале 30-х гг. Л.Д. Ландау.

Равновесие обычных звезд обеспечивается силами давления, возникающими из-за теплового движения ионов и электронов. Для поддержания такого равновесия в течение времени, большего, чем время остывания звезды (тепловое время), необходимы дополнительные источники энергии внутри нее. (Тепловое время Солнца, например, порядка 10^7 лет.) Отсюда немедленно следует, что звезды не вечны. Это стало совершенно ясно к началу 40-х гг. нашего столетия, когда в основном была построена теория внутреннего строения звезд.

Между тем, вокруг нас много объектов, равновесие которых вовсе не зависит от количества тепла в них. (Например, планета, на которой мы живем.) Возникают два вопроса: какова конечная судьба звезд? Не может ли звезда быть устойчивой даже после того, как внутри нее исчерпались все источники энергии? По этому поводу замечательные мысли высказал К.Э. Циолковский (1893). Рассматривая процессы сжатия звезд, он выдвинул идею о том, что при некоторой достаточно большой плотности упругость их вещества может резко возрасти и уже не будет подчиняться закону идеального газа. Сжатие звезды остановится, она начнет остывать и отвердевать. Скачок упругости должен "... сопровождаться новым понижением температуры и — кто знает — может быть, его будет достаточно для образования туманов и коры на нашем Солнце, которое тогда и замрет, сохраняя свои запасы энергии неизвестно для кого и для чего. Но тут уже начинается область гипотез — и настолько смелых, что мы умолкаем".

Лишь через 35 лет выяснилось, что в природе действительно должно существовать нечто похожее. Английский физик Р. Фаулер показал, что так называемые белые карлики (звезды, обладающие дефицитом светимости и, следовательно, малыми размерами) — это объекты, равновесие которых обеспечивается равенством силы гравитации и силы давления вырожденного электронного газа.

Давление вырожденного электронного газа, определяемое законами квантовой механики (принцип Паули), не исчезает даже при нулевой температуре. Напрашивается ответ на поставленные вопросы: все звезды после исчерпания в них запасов внутренней (термоядерной) энергии сжимаются до размеров в несколько тысяч километров и превращаются в белые карлики.

Однако это совершенно не так. Независимо друг от друга Я.И. Френкель (1928 г.), С. Чандрасекар (1931 г.) и Л.Д. Ландау (1932 г.) показали, что

масса белого карлика не может быть сколь угодно большой! В белые карлики могут превращаться лишь звезды достаточно малой массы. Максимальное значение массы белого карлика сейчас называется пределом Чандрасекара. Существование чандрасекаровского предела можно пояснить следующим образом.

Давление холодного вырожденного электронного газа подчиняется закону $P \sim \rho^\gamma$, где $\gamma = 5/3$ для нерелятивистского газа и $\gamma = 4/3$ в релятивистском случае. Градиент давления электронного газа по порядку величины равен силе гравитации:

$$\frac{\rho^\gamma}{R} \sim \frac{M^\gamma}{R^{3\gamma+1}} \sim \frac{GM^2}{R^5}.$$

Получаем, во-первых, что $R \sim M^{(\gamma-2)/(3\gamma-4)}$. Для нерелятивистского электронного газа $R \sim M^{-1/3}$. При возрастании массы радиус белого карлика уменьшается. (Это свойство вообще характерно для вырожденных звезд.) При увеличении массы белого карлика электроны упаковываются плотнее, а запрет Паули приводит к росту энергии электронов. Электронный газ становится релятивистским и $\gamma = 4/3$. При этом обе силы в уравнении равновесия изменяются одинаково в зависимости от радиуса, так что равенство их может реализоваться лишь при одном, и только одном, значении массы, которое и есть чандрасекаровский предел. Точный расчет (см. дальше) максимальной массы показывает, что

$$M_{\text{Ch}} \approx \frac{3,1}{\mu_e^2} \left[\frac{hc}{G} \right]^{3/2} \approx 5,83 \mu_e^{-2} M_\odot, \quad (1.B)$$

где μ_e — среднее количество нуклонов, приходящихся на один электрон. Для тяжелых ядер $\mu_e \rightarrow 2$ и, следовательно, чандрасекаровский предел $\rightarrow 1,46 M_\odot$ (кстати, соотношение (1.B) показывает, что масса звезд может быть выражена только через фундаментальные константы: h, c, G).

Что же будет со звездой, у которой нет источников внутренней энергии и масса которой превосходит чандрасекаровский предел? По-видимому, первый, кто поставил этот вопрос и ответил на него, был Л.Д. Ландау.

Звезда должна коллапсировать до тех пор, пока ядра атомов не придут в соприкосновение: возникнет гигантское атомное ядро с плотностью $\sim 10^{14}$ г/см³ — 10^{15} г/см³ и размерами порядка 10 км.

Буквально через год американские астрономы В. Бааде и Ф. Цвикки (1934) высказали предположение, что взрывы сверхновых есть не что иное, как катастрофический процесс образования сверхплотных звезд, состоящих из нейтронов. Нейтроны были открыты Дж. Чэдвиком в 1932 г.

Первые расчеты внутреннего строения нейтронных звезд были проведены американскими физиками Дж. Оппенгеймером и Г. Волковым (1939). Надо отметить, что на эти исследования большое влияние оказала работа Л.Д. Ландау (1932). Простая физическая аргументация, которую использовал Л.Д. Ландау при выводе верхнего предела массы белого карлика (названного ими пределом Ландау), позволила им без каких-либо предварительных расчетов сделать важный вывод о существовании верхнего предела массы нейтронных звезд M_{Ov} (предел Оппенгеймера — Волкова). За четыре года до этого А. Эддингтон (1935) фактически пришел к тому

же выводу, но не признал его реальным. Он считал существование черных дыр абсурдом и предполагал, что звезды каким-то образом избегают полного гравитационного коллапса. (Сейчас мы можем сказать, что отчасти Эддингтон был прав – звезды действительно сопротивляются коллапсу и большинство из них превращаются в белые карлики или нейтронные звезды.)

Расчеты Оппенгеймера – Волкова проиллюстрировали, что структура нейтронной звезды существенным образом зависит от уравнения состояния материи при ядерных плотностях (до сих пор надежно не известных). Особенно сильно характер упругости нейтронного вещества влияет на значение критической массы. Например, в ранней модели вырожденного идеального нейтронного газа, которую использовали Оппенгеймер и Волков, оказалось, что $M_{OV} \approx 0,7 M_{\odot}$, т.е. меньше чандрасекаровского предела (!). Современные расчеты в разных моделях дают $M_{OV} \approx 1,5 - 3 M_{\odot}$. При большей массе звезда необратимо коллапсирует в состояние, которое Дж. Уилер назвал черной дырой (название это появилось в 60-е гг.).

Таким образом, к концу 30-х гг. выяснилось, что все звезды после исчерпания в них ядерных источников энергии превращаются в зависимости от своей массы в белые карлики, нейтронные звезды или черные дыры.

Следует упомянуть еще одну важную работу, выполненную до начала второй мировой войны Ландау (1938), в которой высказана идея о том, что внутри звезд могут существовать плотные нейтронные ядра. Аккреция вещества звезды на ядро могла бы приводить к мощному энерговыделению. Сейчас мы знаем, что подавляющее большинство звезд светят за счет термоядерной энергии. Тем не менее, как идея о нейтронных ядрах, так и идея об аккреции на них стали актуальны в 70-е гг. (Бисноватый-Коган и Ламзин, 1984).

Итак, хотя существование нейтронных звезд было предсказано более 50 лет назад, их открытие произошло лишь в 1967 г. Почему?

Будем рассуждать с точки зрения довоенного астронома. Единственный диапазон электромагнитных волн, доступный для исследования, – видимый свет. Сколь яркой может быть нейтронная звезда в оптическом диапазоне? Положим, что она излучает по закону абсолютно черного тела. При одинаковой, например, с Солнцем температуре светимость ее будет в 10^{10} раз меньше (из отношения площадей поверхностей). Абсолютная величина Солнца $\sim 5^m$, значит, на расстоянии 10 пк такая нейтронная звезда выглядела бы как звездочка 30^m , что недоступно даже для современных наземных телескопов. Никто не хотел заниматься объектами, которые нельзя обнаружить.

В исследованиях нейтронных звезд наступило двадцатилетнее затишье. Интерес к нейтронным звездам возобновился в конце 50-х гг. Развитие физики элементарных частиц и физики низких температур привело к пониманию совершенно новых явлений. Физика стремилась в область высоких энергий и плотностей. Возникло ставшее сейчас банальным (хотя в большей степени теоретическим) представление о нейтронной звезде как о рекордной по своим возможностям физической лаборатории.

В 1959 г. советский физик А.Б. Мигдал высказал идею, согласно которой вещество нейтронной звезды должно представлять собой сверхтекучую жидкость. Хотя точной микроскопической квантовой теории сверхтекучести нейтронной жидкости нет, можно предполагать, что она состоит из спаренных нейтронов и напоминает по своим свойствам He^3 . Атом He^3

содержит нечетное число частиц и, следовательно, как и нейтрон, является ферми-частицей. Сверхтекучесть He^3 наступает при температуре 0,00265 К (для давления 30 атм). При плотности $\sim 10^{14}$ г/см³ критическая температура оказывается равной $\sim 10^{11}$ К. Если нейтронная звезда "охладится" до температуры ниже $\sim 10^{11}$ К, ее вещество станет сверхтекучим!

Примерно в это же время советские астрофизики В.А. Амбарцумян и Г.С. Саакян (1960) провели расчеты внутреннего строения нейтронных звезд с учетом новых данных об элементарных частицах.

И все же астрофизика нейтронных звезд начала развиваться лишь после открытия первых рентгеновских источников и квазаров.

Аккреция. Начало космической эры открыло перед астрономами возможность серьезного исследования Вселенной в рентгеновских лучах, для которых атмосфера Земли полностью непрозрачна. Плотность воздуха 10^{-3} г/см³, высота атмосферы $\sim 10^6$ см. Взяв сечение томсоновского рассеяния для воздуха $\kappa_T \approx 0,2$ г/см², получим, что оптическая толщина атмосферы $\tau_T = \rho H \kappa_T \approx 200$. Ясно, что рентгеновские счетчики необходимо поднимать над атмосферой.

18 июня 1962 г. группа американских астрофизиков (Джиаккони и др., 1962) осуществила запуск ракеты Аэробы с тремя гейгеровскими счетчиками на борту. Самым ярким рентгеновским источником в диапазоне 1 – 10 кэВ оказался объект в созвездии Скорпиона: Sco X-1. Ракета поднялась на высоту 225 км и находилась в полете 350 с. Один из трех гейгеровских счетчиков вышел из строя. Два других, вращаясь вокруг своей оси, продолжали "осматривать" небо. Оба счетчика обнаружили яркий источник в направлении на созвездие Скорпиона. Запись рентгеновского потока показана на рис. 1.

Годом позже М. Шмидт (1963) (Маунт Паломар, США) отождествил спектральные линии квазаров. Квазары оказались самыми мощными объектами во Вселенной (их светимости достигают 10^{46} – 10^{47} эрг/с). Эти открытия "подстегнули" теоретиков в исследованиях новых эффективных источников энергии.

В 1964 г. советский физик Я.Б. Зельдович и американский астрофизик Е.Е. Солпитер независимо указали такой источник – аккрецию вещества на релятивистские звезды.

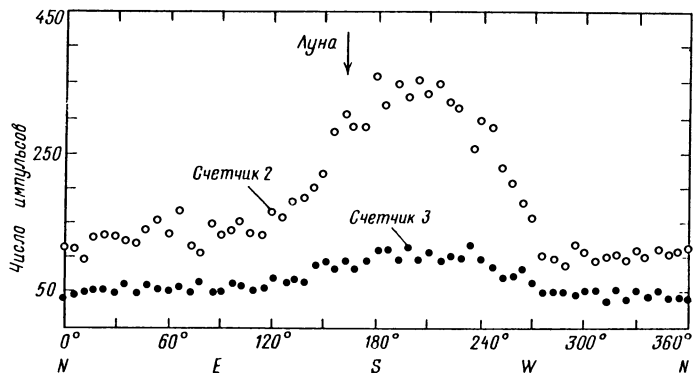


Рис. 1 Запись рентгеновского потока источника Sco X-1 (Джиаккони и др., 1962)

Высокая эффективность аккреции газа поясняется следующим простым соображением. Пусть релятивистский объект имеет радиус поверхности R_x , на котором высвечивается вся кинетическая энергия падающего вещества. Пусть, далее, вещество падает свободно, тогда единица массы будет обладать кинетической энергией GM_x/R_x . Если в единицу времени на поверхность падает \dot{M} г, то полная светимость аккрецирующей звезды, очевидно, равна

$$L = \dot{M} \frac{GM_x}{R_x} \equiv \eta \dot{M} c^2. \quad (2.B)$$

Здесь M — масса релятивистской звезды, а η — так называемая эффективность аккреции. Введем гравитационный радиус

$$R_g = \frac{2GM_x}{c^2}. \quad (3.B)$$

Тогда

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{R_g}{R_x}. \quad (4.B)$$

Для нейтронной звезды $R_x = 10$ км, а $R_g = 3$ км. Значит, $\eta \approx 10\%$. Это примерно в 100 раз больше, чем эффективность термоядерных реакций.

В работе Зельдовича (1964) впервые подчеркивалось, что особенно благоприятные условия для обнаружения релятивистской звезды возникают в том случае, когда она входит в состав двойной системы, где соседняя звезда может поставлять аккрецируемое вещество. В этом же году вышла работа японских астрофизиков С. Хаякавы и М. Матсуоки (1964), в которой обсуждалось возникновение рентгеновского излучения в двойных системах, состоящих из обычных звезд.

В том, что аккреция вещества в двойной системе действительно приводит к мощному наблюдательному эффекту, легко убедиться на следующих простых оценках. Нормальные звезды способны терять вещество с темпом до $10^{-5} M_\odot/\text{год}$. Положим, что лишь 0,1% этого потока перехватывается релятивистской звездой. Темп аккреции $10^{-8} M_\odot/\text{год}$ при эффективности 10% приведет к возникновению источника со светимостью $\sim 10^{38}$ эрг/с $\approx 4 \cdot 10^5 L_\odot$ (формула (2.B)). Ясно, что такое гигантское количество энергии может уноситься с крошечной поверхности релятивистской звезды только очень энергичными квантами — излучение должно быть рентгеновским.

Новиков и Зельдович (1966) и независимо Шкловский (1967) предположили, что рентгеновский источник Sco X-1 является аккрецирующей нейтронной звездой в тесной двойной системе. По иронии судьбы, самый яркий источник оказался одним из наиболее неподдающихся прямым наблюдением объектов. Понадобилось немало времени, чтобы доказать, что он является тесной двойной системой, а природа вырожденной звезды до сих пор вызывает сомнения.

Важный идейно-психологический барьер был преодолен советскими астрофизиками Амнузлем и Гусейновым (1968). Они первыми обратили внимание на необходимость учета магнитного поля нейтронных звезд. Из общих соображений (см. дальше) следовало, что нейтронные звезды

должны обладать мощными магнитными полями, а аккрецируемое вещество в реальных условиях — это плазма, хорошо проводящая электрический ток. Характер падения вещества может сильно исказиться магнитным полем. В результате даже при сферическом падении вблизи нейтронной звезды возникнет анизотропия в распределении вещества, а, следовательно, и излучения. Вращение же нейтронной звезды должно приводить к тому, что для наблюдателя излучение будет периодически пульсирующим.

Все шло ко вполне "запланированному" открытию нейтронных звезд как аккрецирующих объектов.

Но судьба распорядилась по-другому.

Вращение и магнитное поле. В. Бааде и Ф. Цвикки связали образование нейтронных звезд со вспышками сверхновых. Понятен тот интерес, который астрономы испытывали к остаткам вспышек сверхновых.

Наиболее "продуктивным" оказался остаток вспышки сверхновой, наблюдавшейся китайскими астрономами в 1054 г. Механизм свечения туманности стал понятен в 50-е гг. благодаря работам И.С. Шкловского (1953), который предложил синхротронный механизм для объяснения свечения туманности, В.Л. Гинзбурга и независимо от него И.М. Гордона, предсказавшим поляризацию излучения. Вскоре поляризация была действительно обнаружена (Домбровский (1954), Вашакидзе (1954)). Расчет концентрации и энергии релятивистских электронов в Крабовидной туманности, проведенный Пикельнером (1956), прямо указывал на постоянную подкачку энергии в туманность $\sim 10^{38}$ эрг/с.

Источник этой энергии был найден Кардашевым (1964). Его работа содержала ряд новых идей о процессе образования нейтронных звезд и их свойствах. Важнейшей здесь была идея об ускорении вращения коллапсирующего объекта и усилении напряженности магнитного поля.

Хорошо известно, что при сжатии тела с сохранением вращательного момента энергия его вращения растет:

$$E_{\text{rot}} = \frac{I\omega^2}{2} \sim R^{-2}, \quad (5.B)$$

где $I\omega$ — момент вращения, ω — угловая скорость вращения, R — радиус звезды. Энергия растет за счет работы силы гравитации.

Рост же напряженности магнитного поля во время коллапса при условии полной мороженности идет с сохранением магнитного потока:

$$B \cdot R^2 = \text{const}, \quad (6.B)$$

где B — напряженность магнитного поля на поверхности звезды. Эффект роста магнитного поля при коллапсе впервые рассмотрел В.Л. Гинзбург (1964). При сжатии в 10^5 раз поле возрастет в 10^{10} раз. При напряженности 1 — 100 Э на поверхности нормальной звезды получим в результате сжатия на поверхности нейтронной звезды 10^{10} — 10^{12} Э. К этому эффекту может добавиться дополнительное усиление поля за счет "накручивания" силовых линий при вращении звезды.

Строго говоря, при коллапсе звезды магнитное поле не усиливается, а наоборот, исчезает. Наблюдатель, находящийся на фиксированном расстоянии от сжимающейся звезды, может заметить (например, с помощью магнитометра), как напряженность магнитного поля в месте наблюдения

падает. Это ясно: дипольный момент μ пропорционален $B \cdot R^3$ и, следовательно, при коллапсе происходит уменьшение $\mu \sim R$. Кстати, более высокие мультипольные моменты исчезают еще быстрее — магнитное поле "очищается". При коллапсе в черную дыру существенными становятся к тому же эффекты ОТО, так что магнитное поле исчезает не при $R \rightarrow 0$, а при $R \rightarrow R_g$ (Гинзбург, 1964).

Итак, Н.С. Кардашев предположил, что источником свечения Крабовидной туманности является вращательная энергия молодой нейтронной звезды, а механизмом передачи энергии служит магнитное поле.

Отметим также, что быстрое вращение сверхплотных звезд рассматривали Хойл и др. (1964), Чуруга и Камерон (1966), а мощные магнитные поля нейтронных звезд — Хойл и др. (1964) и Волтгер (1964). Ф. Пачини отмечал, что быстро вращающееся магнитное поле нейтронной звезды способно разгонять частицы, "приклеенные" к силовым линиям магнитного поля, до ультрарелятивистских энергий.

Когда статья Ф. Пачини находилась в печати, английские радиоастрономы совершенно случайно открыли нейтронную звезду.

Радиопульсары. Открытие нейтронных звезд представляет собой, по выражению Д. Тер Хаара, пример serendipity — сказочно случайного события. Наблюдая мерцания радиисточников, аспирантка А. Хьюиша Дж. Белл обнаружила радиисточник, пульсирующий с периодом 1,377 с на частоте 81,5 МГц (рис. 2). После непродолжительной, но "ожесточенной" дискуссии (см. Зельдович и Новиков, 1971) все сошлись на интерпретации этого

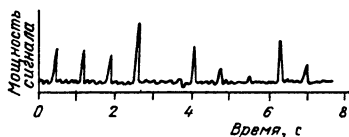


Рис. 2. Запись излучения одного из первых радиопульсаров

явления, предложенной Голдом (1968), которая фактически была приложением идей Н.С. Кардашева и Ф. Пачини. Напомним, что о пульсирующем характере излучения нейтронных звезд писали П.Р. Амнуэль и О.Х. Гусейнов.

В том, что радиопульсар — это замагниченная нейтронная звезда, теряющая свою вращательную энергию, убеждали два наблюдательных факта: с одной стороны, высокая стабильность периода, а с другой — медленное увеличение периода пульсара (рис. 3). Последнее было вполне естественно, так как "излучается" именно вращательная энергия.

Однако решающим аргументом в пользу модели вращающейся нейтронной звезды оказалось открытие радиопульсара в Крабовидной туманности. Период его был на то время рекордно малым — 0,033 с. Так быстро могла вращаться только нейтронная звезда.

Но почему вращение? В этом нас убеждает следующая простая оценка Голда (1968). Вспомним, что согласно анализу С.Б. Пикельнера (1956) в Крабовидной туманности должна происходить постоянная инжекция энергии мощностью $\sim 10^{38}$ эрг/с.

Потери вращательной энергии тела связаны с изменением частоты:

$$L_{\text{rot}} = I\omega\dot{\omega} = 4\pi^2 I p^{-3} \dot{p}, \quad (7.В)$$

где $p = 2\pi/\omega$ — период вращения. Наблюдаемая величина изменения перио-

Рис. 3. Замедление периода вращения радиопульсара в Парусах

да пульсара в Крабовидной туманности $p \approx 4 \cdot 10^{-13}$. Подставим в (7.В) это значение и найдем, что необходимый для подпитки туманности поток получится, если положить $I \approx 10^{45} \text{ г} \cdot \text{см}^2$. Это значение великолепно совпадает с тем, что ожидается для нейтронных звезд: $2 \cdot 10^{33} \cdot 10^{12} \approx 10^{45} \text{ г} \cdot \text{см}^2$ (!).

В модели Пачини (1967) и Голда (1968, 1969) магнитное поле нейтронной звезды принималось дипольным, а потери вращательной энергии нейтронной звезды — точно такими же, какими были бы потери энергии вращающегося магнита на магнитно-дипольное излучение (Ландау и Лифшиц, 1973):

$$L_m = \frac{2}{3} \frac{\mu^2 \sin^2 \beta}{c^3} \omega^4, \quad (8.В)$$

где μ — магнитный дипольный момент на магнитном полюсе, β — угол между осью вращения и магнитной осью диполя. Для замагниченного шара магнитный дипольный момент равен

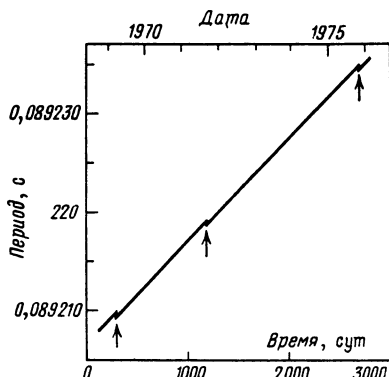
$$\mu = \frac{B_0 R_x^3}{2}, \quad (9.В)$$

где B_0 — напряженность магнитного поля на магнитном полюсе. При $L_m \approx 10^{38}$ эрг/с и радиусе нейтронной звезды $R_x = 10^6$ см получаем, что напряженность магнитного поля на поверхности пульсара $B_0 \approx 10^{12}$ Э, что и ожидалось для нейтронных звезд.

Итак, не оставалось никаких сомнений в том, что А. Хьюиш и его сотрудники обнаружили нейтронные звезды. В 1974 г. за это открытие А. Хьюишу была присуждена Нобелевская премия по физике.

Сразу после открытия радиопульсаров было обнаружено явление сбоя периода (рис. 3). Монотонное увеличение периода пульсара Vela (PSR 0833–45) вдруг было прервано сравнительно небольшим, но резким уменьшением периода: $\Delta p/p \approx 2 \cdot 10^{-6}$ (см. Даунс, 1981). Позже такое же явление было обнаружено у пульсара в Крабовидной туманности.

Интерпретацию этого явления дал Рудерман (1969). Он обратил внимание на то, что в верхних слоях нейтронной звезды энергетически более выгодным оказывается кристаллическое, а не жидкое состояние. Нейтронные звезды покрыты твердой корой (невольно вспоминаются идеи К.Э. Циолковского). Тогда наблюдаемые скачки ускорения вращения могли бы быть связаны с резкими изменениями момента инерции коры, вызванными, например, звездотрясениями. Характерно, что после скачка (длящегося несколько дней) в течение нескольких недель происходила своеобразная релаксация — производная периода не сразу, а постепенно выходила на свое



прежнее значение. Это доказывало, что идея Мигдала (1959) о сверхтекучести внутри звезды действительно верна!

В 1964 г. П. Голдрайх и У. Джулиан обратили внимание на то, что вращающаяся замагниченная нейтронная звезда напоминает униполярный индуктор. В системе отсчета, связанной с вращающейся нейтронной звездой, обладающей магнитным полем B , возникает электрическое поле, равное

$$E \approx \frac{\omega R_x}{c} B_0.$$

Для пульсара с периодом $p = 1$ с и магнитным полем $B_0 = 10^{12}$ Э, $E \approx 2 \cdot 10^8$ В · см⁻¹. Сила, с которой электрическое поле действует на ион или электрон, в миллиарды раз превосходит силу гравитации. Такое поле способно разогнать частицы до ультррелятивистских энергий.

Особый интерес представляет нетепловое радиоизлучение радиопульсаров (см. Гинзбург, 1971). Яркостная температура излучения большинства радиопульсаров составляет фантастическую величину 10^{27} К, что не оставляет сомнений в когерентной природе этого излучения (Гинзбург и Железников, 1970а, б).

Новые идеи. Открытие и исследование радиопульсаров показало, что коллапс нормальных звезд приводит не только к вспышкам сверхновых и образованию нейтронных звезд, как это предсказывали В. Бааде и Ф. Цвикки, но также к быстрому вращению и генерации мощных магнитных полей (рис. 4).

Эти два последних параметра позволили отнести нейтронные звезды к качественно новому классу объектов Вселенной. Нейтронные звезды, лишенные начисто внутренних источников энергии (см., однако, Бисноватый-Коган и др., 1975), тем не менее, благодаря своим сильным гравитационным и магнитным полям способны активно проявлять себя и, более того, эволюционировать, но в совершенно новом смысле.

Понимание этого важного обстоятельства пришло после работ советского астрофизика Шварцмана (1970, 1971). Понятие эволюции и подход, раз-

витый им, оказались весьма эффективными. Без особо точных расчетов удалось предсказать совершенно новый класс астрофизических объектов — рентгеновские пульсары.

Представим себе, что молодая нейтронная звезда родилась в двойной системе рядом с обычной звездой. Вначале нейтронная звезда, обладая большой частотой вращения, является мощным источником электромагнитного излучения и релятивистских частиц наподобие радиопульсара. Давление частиц, эжектируемых нейтронной звездой, разго-

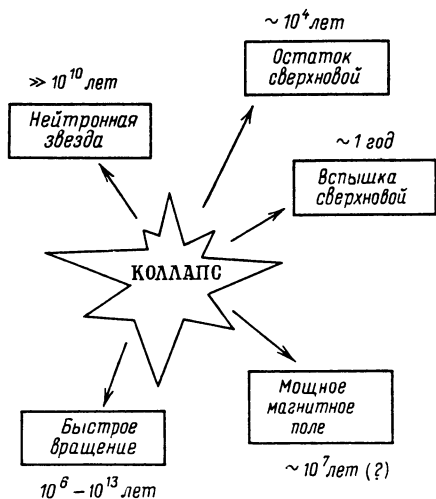
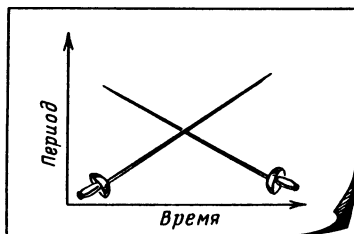


Рис. 4. Следствия коллапса

няет окружающую плазму – вокруг пульсара образуется каверна. Но со временем мощность излучения падает (как ω^4) и каверна "схлопывается". Плазма проникает под световой цилиндр, пульсар тухнет. Но аккреция по-прежнему невозможна – ей препятствует быстро вращающееся магнитное поле (позже это было названо эффектом пропеллера (Илларионов и Сюняев, 1975)). Нейтронная звезда продолжает замедляться. Наконец, аккрецируемое вещество проникает на поверхность нейтронной звезды. Наступает новая стадия – стадия аккрецирующей нейтронной звезды. Как показали Зельдович и Шакура (1969), аккрецирующая нейтронная звезда излучает

Рис. 5. Experimentum crucis



в рентгеновском диапазоне. А по идее Амнузля и Гусейнова (1968) излучение должно пульсировать. Из этого немедленно следовало, что в двойных системах должны наблюдаться рентгеновские пульсары.

Но как отличить аккрецирующий пульсар от эжектирующего? Решающий тест (experimentum crucis) (рис. 5) был предложен В.Ф. Шварцманом. Дело в том, что в двойной системе аккрецируемое вещество всегда обладает вращательным моментом относительно нейтронной звезды. Он возникает из-за орбитального движения. (В этом легко убедиться, перейдя в систему отсчета, связанную с нейтронной звездой.) Падая на поверхность нейтронной звезды, вещество должно ускорять ее вращение. Значит, в отличие от эжектирующего пульсара, аккрецирующий пульсар должен (или, по крайней мере, может) ускоряться. При этом его энерговыделение никак не связано с вращением.

Рентгеновское излучение аккрецирующих нейтронных звезд должно быть подвержено нескольким периодическим модуляциям (Гусейнов, 1970): 1) коротким пульсациям, вызванным вращением нейтронной звезды; 2) изменениям с орбитальным периодом, связанным, во-первых, с затмениями рентгеновского источника, а во-вторых, с переменностью темпа аккреции, вызванной изменением расстояния между компонентами двойной системы.

И такие источники действительно вскоре были открыты американским спутником "Ухуру". Подчеркнем, что в предсказание свойств и выяснение природы рентгеновских пульсаров решающий вклад внесли советские ученые. Достаточно сказать, что все работы по теории аккреции на нейтронные звезды, вышедшие до запуска "Ухуру", были выполнены советскими исследователями (Новиков и Зельдович, 1966; Шкловский, 1967; Амнузль и Гусейнов, 1968; Зельдович и Шакура, 1969; Бисноватый-Коган и Фридман, 1969; Амнузль и Гусейнов, 1969; Гусейнов, 1970; Шварцман, 1970, 1971; Шакура, 1972; Амнузль и Гусейнов, 1972).

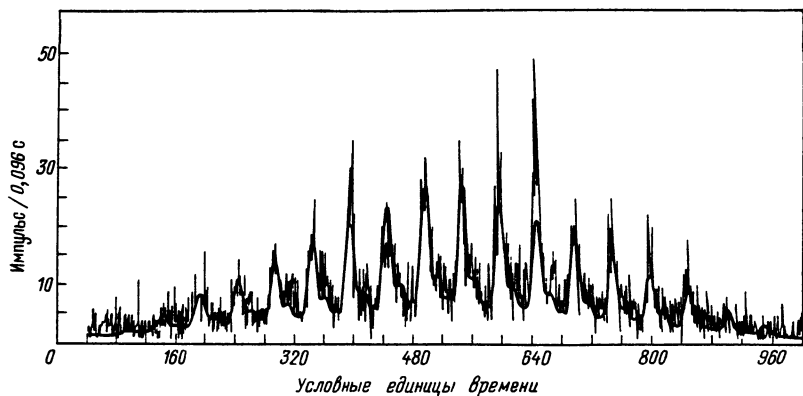


Рис. 6. Запись рентгеновского потока пульсара Cen X-3 (Шриер и др., 1972)

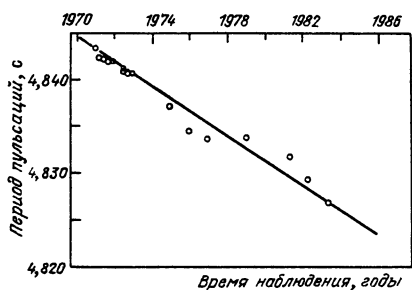


Рис. 7. Уменьшение периода рентгеновского пульсара Cen X-3

“Рентгеновские пульсары”. 12 декабря 1970 г. был запущен первый специализированный рентгеновский спутник “Ухуру”^{*}). На борту его были установлены две системы рентгеновских детекторов с общей площадью $\sim 840 \text{ см}^2$ для регистрации излучения в диапазоне от 2 до 20 кэВ, с угловым разрешением в несколько градусов. Быстрое вращение с периодом 12 минут и медленное изменение ориентации орбиты спутника в пространстве позволили просмотреть почти все небо. Чувствительность в эксперименте достигала $10^{-10} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

За 429 дней наблюдений было открыто более 300 рентгеновских источников. Большинство из них сконцентрировано к плоскости Млечного Пути (Форман и др., 1978). Самым впечатляющим было открытие рентгеновских пульсаров в двойных системах (рис. 6) (Шриер и др., 1972), поведение которых точно соответствовало выводам В.Ф. Шварцмана: они ускорялись, а не замедлялись (рис. 7)! Это означало, что они являются аккрецирующими нейтронными звездами. Одними из первых были обнаружены рентгеновские пульсары Cen X-3 и Her X-1. Периоды их равны соответственно 4,8 и 1,24 секунды. Спектр их излучения сильно отличается от не-теплового спектра радиопулсаров и явно напоминает тепловое излучение плазмы с температурой 10^8 К (см. также рис. 8).

^{*} Запуск производился с территории Кении. “Ухуру” на языке суахили означает “свобода”. Такое название было дано в честь 10-летия независимости Кении.

Факт принадлежности рентгеновских пульсаров к двойным системам устанавливался по рентгеновским затмениям и по изменению периода следования импульсов, вызванному орбитальным движением, т.е. по тем эффектам, которые были отмечены Гусейновым (1970).

Оптическими двойниками рентгеновских пульсаров оказались голубые сверхгиганты (у пульсаров типа Cen X-3) или звезды малой массы, заполняющие свои полости Роша (пульсары типа Her X-1). В обоих случаях для систем характерны сильные газовые потоки либо в виде звездного ветра, либо в виде струй.

Открытия "Ухуру" послужили стимулом для большого числа теоретических работ, посвященных аккреции вещества на замагниченные нейтронные звезды и аккреции вещества в двойных системах вообще.

Интерпретация рентгеновских пульсаров как аккрецирующих нейтронных звезд была дана в работах Прингла и Риса (1972), Дэвидсона и Острайкера (1973), Лэмба и др. (1973), Шакуры и Сюняева (1973), Дэвидсона (1973). Ю.Н. Гнедин и Р.А. Сюняев в 1974 г. обратили внимание на то, что спектр излучения аккрецируемого вещества в мощном магнитном поле должен содержать спектральные линии, соответствующие переходам между уровнями Ландау. Как известно (Ландау и Лифшиц, 1974), в нерелятивистском приближении энергетические уровни электрона в магнитном поле

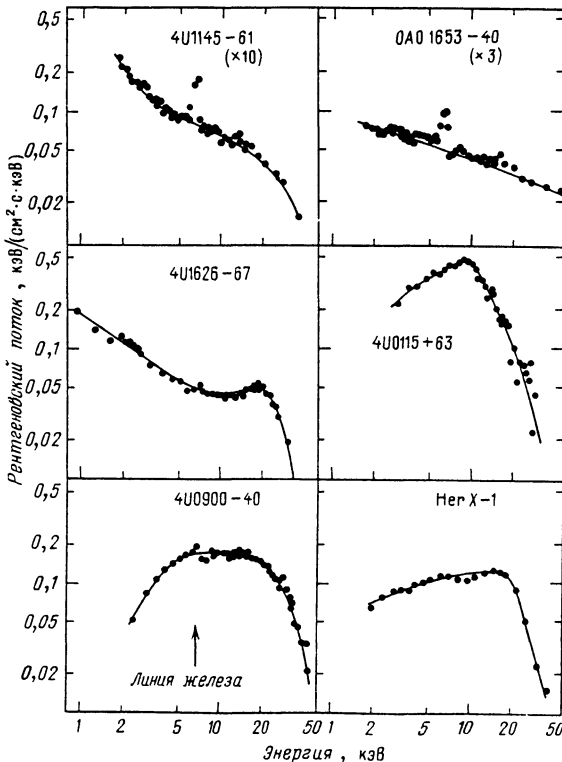


Рис. 8. Спектры рентгеновских пульсаров (Раппапорт и Джосс, 1983)

отличаются друг от друга на $\hbar \omega_g$, где

$$\omega_g = \frac{eB}{mc}$$

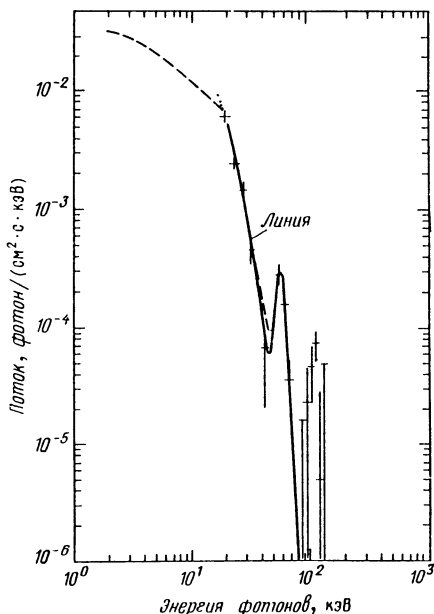
есть гирочастота. При поле $B \approx 10^{12}$ Э соответствующая энергия перехода равна ~ 10 кэВ, т.е. находится в стандартном рентгеновском диапазоне.

В 1976 г. И. Трюмпер с коллегами с помощью рентгеновского детектора, поднятого на баллоне, обнаружили спектральную деталь в спектре рентгеновского пульсара Нег X-1 (рис. 9) (Трюмпер и др., 1978). Положение линии соответствовало напряженности магнитного поля $(3-5) \cdot 10^{12}$ Э.

Сценарий эволюции нейтронной звезды в двойной системе, в значительной степени напоминающий тот, что был описан в пионерских работах В.Ф. Шварцмана, впоследствии был рассмотрен в работах Бисноватого-Жогана и Комберга (1974), Илларионова и Сюняева (1975), Фабиана (1975), Шакуры (1976), Липунова и Шакуры (1976), Кундта (1976), Савонье и Ван ден Хёвела (1977).

Особенно подчеркивалось (Дэвидсон и Острайкер, 1973), что в процессе эволюции рентгеновский пульсар приходит в квазиравновесное состояние, при котором в среднем вращательный момент нейтронной звезды не меняется. Критическим тестом для проверки этого предположения было предсказание эпизодов замедления у рентгеновских пульсаров (Липунов и Шакура, 1976), которые вскоре были открыты у пяти рентгеновских пульсаров.

В 70-е гг. были запущены десятки детекторов на различных спутниках, баллонах и ракетах, на которых к настоящему времени обнаружено около 20 рентгеновских пульсаров (см. табл. 8).



Почему мы уверены в том, что рентгеновские пульсары являются нейтронными звездами? Конечно, для самых короткопериодических пульсаров такой вопрос не возникает. Например, период рентгеновского пульсара А 0538-66 равен 0,069 с (всего лишь в 2 раза больше периода пульсара в Крабовидной туманности). С таким периодом может вращаться только нейтронная звезда. Действительно, из равенства центробежной и гравитационной сил

$$\frac{GM}{R^2} \approx \omega^2 R$$

Рис. 9. Спектральная деталь, обнаруженная Трюмпером и др. (1978) в спектре рентгеновского пульсара Нег X-1 и объясненная как гирочастота в магнитном поле напряженностью $(3-5) \cdot 10^{12}$ Э

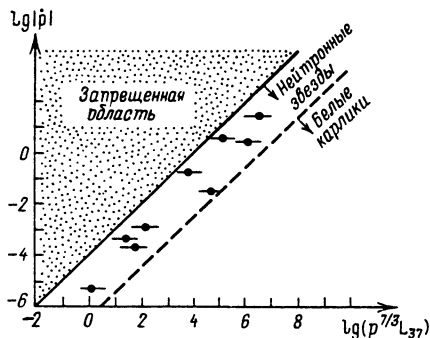
получаем оценку минимального периода

$$p_{\min} \approx 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \approx \frac{2\pi}{\sqrt{G\rho}}. \quad (10.B)$$

Для нейтронных звезд $M \approx 1 M_{\odot}$, $R = 10^6$ см и $p_{\min} \approx 10^{-3}$ с, а для белых карликов — $R = 10^8$ см, $p_{\min} \approx 1$ с.

Но большинство рентгеновских пульсаров имеют периоды значительно больше 1 с. Они вполне могли бы быть и белыми карликами. Ситуация стала особенно жесткой, когда в середине 70-х гг. было открыто рентгеновское излучение белых карликов (оно тоже пульсировало!). Нужен был

Рис. 10. Зависимость ускорения рентгеновских пульсаров от комбинации наблюдаемых характеристик: $L_{3,7}$ — рентгеновской светимости (в ед. 10^{37} эрг/с) и p — периода (в с). Точками показаны данные наблюдений. Прямые линии соответствуют максимально возможному ускорению для нейтронной звезды и белого карлика (Липунов, 1981а)



решающий тест, который при минимальном количестве предположений показывал бы, что тот или иной рентгеновский пульсар является нейтронной звездой, а не белым карликом.

В 1977 г. С. Раппапорт и П. Джонс предложили в качестве такого теста сравнение теоретической и наблюдаемой величин ускорения рентгеновских пульсаров. В рамках определенных предположений о режиме аккреции и величине магнитного поля наблюдения лучше согласуются с моделью нейтронной звезды.

Более простой и более надежный тест был найден несколько позже (Липунов, 1981). Автор показал, что существует универсальный верхний предел для величины ускорения, зависящий только от комбинации двух наблюдаемых величин — радиуса и рентгеновской светимости — и не зависящий ни от предположений о характере аккреции, ни от величины магнитного поля (см. гл. V). Единственным параметром является некоторый фактор, определяемый структурой звезды, точнее, ее массой, моментом инерции и радиусом. Сравнение максимального верхнего предела ускорения с наблюдениями не оставило сомнений в том, что рентгеновские пульсары, у которых измерено ускорение, являются аккрецирующими нейтронными звездами (рис. 10) Ни один из наблюдаемых пульсаров не показывал ускорения, превышающего предельное для нейтронных звезд. Это является независимым подтверждением того, что мы имеем дело с аккреционным ускорением.

Наряду с рентгеновскими пульсарами были обнаружены так называемые транзитные (или новоподобные) рентгеновские источники. Первый

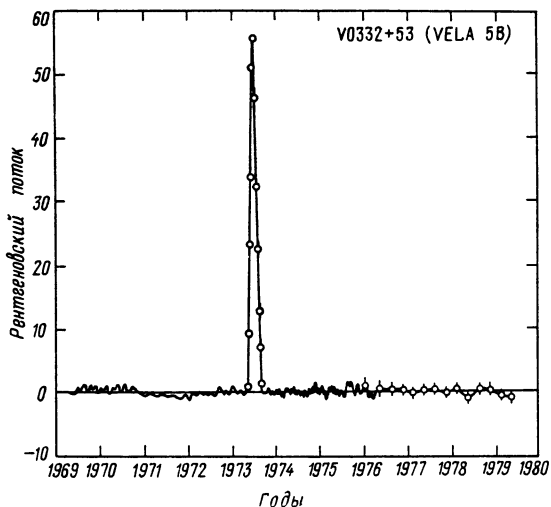


Рис. 11. Данные многолетних наблюдений транзитного рентгеновского источника V 0332+53 с борта специализированного спутника "Vela 5B" (Терел и Предгорски, 1984)

транзитный источник был обнаружен еще в 1967 г. С борта ракеты был зарегистрирован ранее не известный рентгеновский источник ярче Sco X-1. Через несколько месяцев источник погас. На рис. 11 показана запись рентгеновского потока от одного из наиболее ярких транзитных источников, V 0332+53. Источник был открыт на спутнике серии "Vela". Одним из спутников ("Vela 5B") источник наблюдался регулярно в период с 1969 по 1979 г. - Таким образом, была получена уникальная по своей продолжительности, полноте и однородности кривая рентгеновского потока (рис. 11) (Терел и Предгорски, 1984). Впоследствии (1974 год) был запущен специальный рентгеновский спутник "Ариэль" для наблюдений таких транзитных источников. На спутнике было открыто еще несколько таких источников. Следует подчеркнуть, что класс транзитных источников не представляет собой однородную группу и, по-видимому, содержит источники, в которых работают совершенно разные механизмы. Тем не менее, некоторые из них оказались рентгеновскими пульсарами и несомненно являются аккрецирующими нейтронными звездами хотя бы уже поэтому.

Рентгеновские барстеры. В 1975 г. был открыт совершенно новый тип рентгеновских источников — рентгеновские барстеры (Гриндлей и др., 1976). Приборы, установленные на голландском спутнике ANS, зарегистрировали вспышку рентгеновского излучения, продолжавшуюся всего 20 секунд, в направлении на шаровое скопление NGC 6624 (рис. 12). Этот источник принадлежал к классу рентгеновских источников, называемых источниками "балджа". Главной особенностью этих источников является их пространственное распределение — они концентрируются к центру Галактики, подобно звездам сферической составляющей и

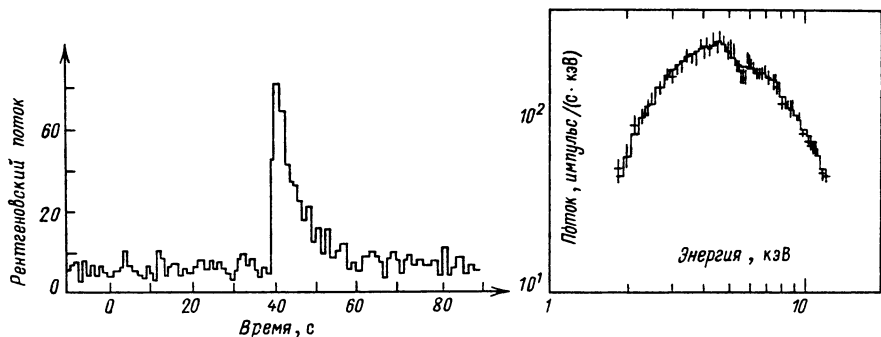


Рис. 12. Запись потока первого рентгеновского барстера, открытого Гриндлеем и др. (1976) с борта голландского спутника "ANS" в направлении на шаровое скопление NGC 6624

Рис. 13. Спектр рентгеновского барстера X 1636 – 53 (Танака, 1984)

шаровым скоплениям. Рентгеновские барстеры (а их сейчас известно более 20 – см. табл. 11) обладают более мягкими спектрами, чем рентгеновские пульсары (см. также обзор Льюин и Кларк, 1980). При аппроксимации их спектров тепловыми спектрами получаются температуры порядка нескольких кэВ.

Вспышки от барстеров приходят квазипериодически и накладываются на более или менее постоянный "фон" рентгеновского потока (рис. 12). Различают два типа вспышек. Для вспышек первого типа характерное время повторения заключено в интервале от нескольких часов до нескольких дней и спектр излучения по мере развития вспышки становится более мягким. Большинство барстеров демонстрируют вспышки только первого типа. Вспышки второго типа характеризуются очень коротким временем повторения – от десятков секунд до десятков минут. Вспышки второго типа (как и первого) наблюдаются у так называемого "быстрого" барстера МХВ 1730–335*) (рис. 14). Феномен рентгеновских вспышек первого типа был вскоре объяснен термоядерными вспышками на поверхности слабозамагнитных нейтронных звезд (см. Мараски и Кавальерс, 1977). Решающим аргументом в пользу этой модели явилось то, что у большинства барстеров отношение энергии, выделяемой во время вспышки, к энергии, выделяемой между вспышками, было примерно одинаково и равно $\sim 1/100$. Именно это и должно наблюдаться, если излучение между вспышками представляет собой излучение в результате аккреции на поверхности нейтронной звезды с $\eta \approx 10\%$ (см. формулу (2.В)), а энергия излучения во вспышке – это энергия термоядерного горения всего накопленного вещества с эффективностью $\eta \approx 0,1\%$.

Модель нейтронной звезды хорошо согласуется и с наблюдаемыми потоками, и со спектрами барстеров. Светимость большинства из них оце-

*) МХВ – аббревиатура: М – Массачусетский технологический институт; X – X-ray; В – burster (барстеп).

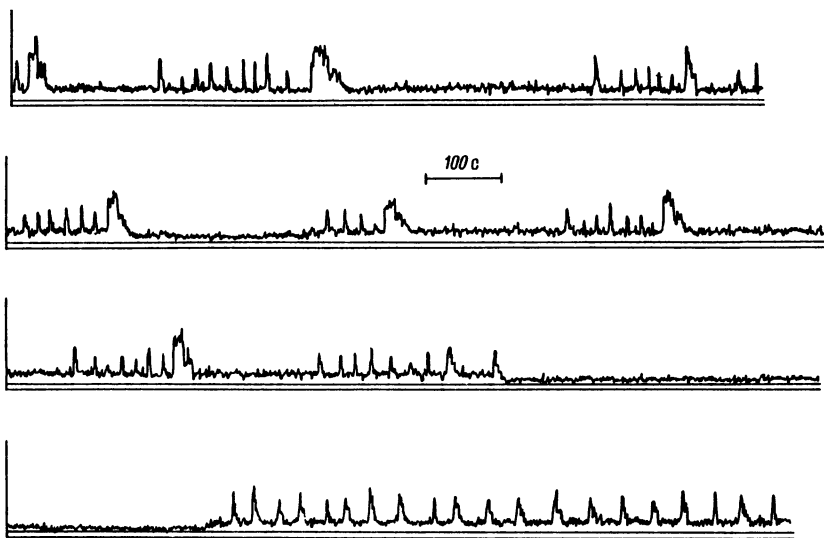


Рис. 14. Запись излучения быстрого рентгеновского барстера MXB 1730 – 335

нивается как 10^{37} эрг/с, а температура излучения $\sim 10^7$ К ≈ 1 кэВ. Применяя закон Стефана – Больцмана, получаем

$$R_x = \sqrt{\frac{L_x}{4\pi\sigma T^4}}.$$

Отсюда $R_x \approx 10^6$ см, что находится в отличном согласии с предсказаниями теории.

Численные и аналитические расчеты показали, что термоядерная вспышка гелия в накопленном веществе действительно может объяснить наблюдаемые свойства барстеров (см. подробнее обзор Эргма, 1982).

Наряду с моделью нейтронной звезды выдвигалась модель массивной ($\sim 100 - 1000 M_\odot$) черной дыры (Бакал и Острайкер, 1975), но эта идея окончательно поблекла после запуска в 1979 г. рентгеновской обсерватории "Эйнштейн". Аппаратура обсерватории "Эйнштейн" обладала не только рекордной чувствительностью, но и рекордным для рентгеновского диапазона угловым разрешением ($\sim 1'' - 2''$). Наблюдения показали, что положения рентгеновских источников вовсе не совпадают с центрами шаровых скоплений (что ожидалось в случае большой массы барстеров). Величина среднего "разброса" указывала на массу $\sim 2 M_\odot$ (Лайтман и др., 1980).

После запуска этой специализированной обсерватории резко возросли возможности наблюдательной рентгеновской астрономии. Достаточно сказать, что общее число открытых рентгеновских источников возросло более чем на порядок. Особую роль в понимании процессов образования и внутреннего строения нейтронных звезд сыграл поиск звездообразных рентгеновских источников в остатках вспышек сверхновых. С одной стороны, излучение должно быть пульсарного типа (типа излучения пульсара в Крабо-

видной туманности), а с другой — оно должно включать тепловое излучение еще не остывшей после образования нейтронной звезды (см. Эйнштейновский сборник, Джаккони, 1981).

Первые расчеты охлаждения нейтронных звезд были проведены Бакалом и Вольфом (1965), Сурутой и Камероном (1965). В основе этих работ лежали идеи Чиу и Солпитера (1964) о возможном тепловом рентгеновском излучении горячих нейтронных звезд. Скорость остывания существенным образом зависит от состояния вещества нейтронной звезды. Интерпретация новых данных с обсерватории "Эйнштейн" позволила получить дополнительные ограничения температур нейтронных звезд (см. Гельфанд, 1981).

Гамма-всплески и другие источники гамма-излучения. Открытие гамма-всплесков — это еще один пример неожиданного открытия.

В 1967 г. на нескольких американских спутниках "Vela", запущенных для контроля за ядерными испытаниями, были зафиксированы короткие (несколько секунд) вспышки гамма-излучения (1 МэВ). Записи были обработаны лишь через несколько лет и об этом открытии стало известно только в начале семидесятых годов (Клебесадель и др., 1973).

О природе этих источников долгое время вообще ничего не было известно. Наблюдения гамма-всплесков весьма специфичны. Узконаправленный детектор малоэффективен, так как явления гамма-всплесков очень редки (по-видимому, они происходят реже, чем несколько раз в год). Всенаправленный детектор не дает информации о положении источника. Спасает лишь "взрывной" характер явления. Если всплеск зарегистрировать с нескольких спутников, то по времени задержки можно определить направление прихода гамма-излучения.

Первый эксперимент (эксперимент "Конус"), проливший свет на природу гамма-всплесков, был проведен советской группой под руководством Е.П. Мазеца. Эксперимент был осуществлен в 1978 г. на трех космических аппаратах "Венера-11", "Венера-12" и "Прогноз-7". Благодаря рекордному порогу включения за 1,5 года было зарегистрировано порядка 150 гамма-всплесков — больше, чем за все время наблюдения с момента их открытия.

Самым уникальным было событие 5 марта 1979 г. (рис. 15). За время менее одной миллисекунды поток возрос до значения 10^{-3} эрг/(см² · с). Если бы такая вспышка произошла в оптическом диапазоне, то ее можно было бы видеть днем невооруженным глазом. Но самое главное, были обнаружены периодические изменения излучения с периодом ~8 с. Это сразу сделало модель нейтронной звезды наиболее вероятной (например, по сравнению с моделью черной дыры). Форма импульса и спектр излучения, в особенности в пульсирующей компоненте, напоминали излучение рентгеновских пульсаров. Положение этого всплеска было определено с огромной точностью. Всплеск накладывался на остаток вспышки сверхновой в Малом Магеллановом Облаке. Но связь эта, очевидно, случайна. При расстоянии до Магелланового Облака ~50 кпк светимость источника оказывается ~ 10^{44} эрг/с, что сравнимо со светимостью всей галактики. Это совершенно не согласуется с тем фактом, что впоследствии от этого источника были зарегистрированы еще всплески, хотя и более слабые.

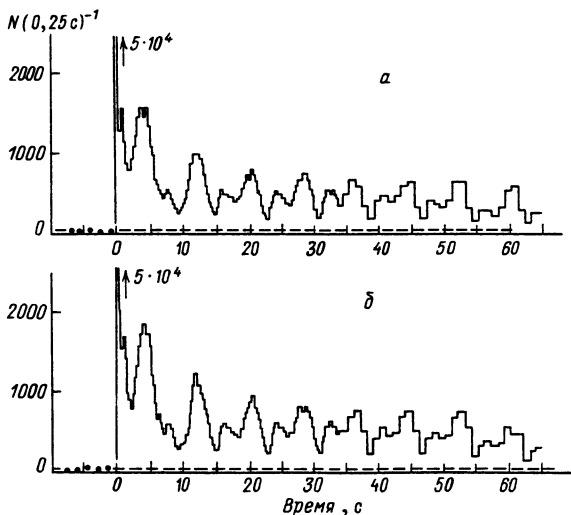


Рис. 15. Гамма-всплеск 5 марта 1979 г. Запись получена с борта советских космических аппаратов "Венера-12" (а) и "Венера-11" (б) (Мазец и др., 1980)

Но если принять связь с остатком за случайное наложение, то оказывается, что всплеск возник на пустом месте!

Хотя к настоящему времени предложено большое число моделей этого явления, природа его по-прежнему остается загадочной. Детальные исследования постоянных гамма-источников в диапазоне ~ 100 МэВ были начаты после запуска американского специализированного спутника "COS-B". Наряду с диффузными источниками были открыты "точечные" источники. Кавычки стоят потому, что угловое разрешение аппаратуры составляет $0,5^\circ$. Наиболее ярким из них оказался источник в созвездии Близнецов — GEMINGA *). Этот объект в последние годы привлек к себе большое внимание (см. Nature, V.310, August 1984). Появилось большое число моделей, часть которых связывают Гемингу с нейтронной звездой.

Еще один диапазон, в котором наблюдаются нейтронные звезды, — это гамма-диапазон сверхвысоких энергий $\geq 10^{15}$ эВ. Кванты в этом диапазоне наблюдают с поверхности Земли по вторичному черенковскому излучению (см. Степанян, 1984). В последние годы появились сообщения о том, что источниками гамма-квантов с энергиями $\geq 10^{15}$ эВ являются не только активные радиопульсары типа пульсара в Крабовидной туманности (например, Суг X-3), но и классические рентгеновские двойные системы типа Vela X-1.

Следует подчеркнуть, что гамма-астрономия сверхвысоких энергий делает свои первые шаги, и к большинству результатов нужно относиться

*) GEMINGA (Геминга): это название было придумано итальянскими астрономами. Расшифровывается оно двояко: как сокращение от GEMINI (Близнецы) и GAMMA (Гамма), и заодно на миланском диалекте означает "чепуха" (желающие могут читать это вслед за чеховским героем по-латыни).

осторожно. Ведь полное количество квантов, зарегистрированных в этом диапазоне за последние 10 лет, исчисляется несколькими сотнями.

Общая картина. Открытие нейтронных звезд явилось одним из самых замечательных событий астрофизики 60 – 70-х гг. Наряду с такими событиями, как открытие реликтового излучения и квазаров, оно является частью того, что называется современной революцией в астрономии.

К середине 80-х гг. нам известно более 300 радиопульсаров, около 20 рентгеновских пульсаров и примерно такое же количество рентгеновских барстеров. Открыты сотни источников гамма-всплесков, которые, по-видимому, тоже являются нейтронными звездами. В табл. 1 дана общая картина наших знаний о нейтронных звездах.

Изучение нейтронных звезд содержит два аспекта: во-первых, это исследование физических процессов, протекающих вблизи конкретных источников или типов источников, а во-вторых, установление эволюционной связи между разными типами нейтронных звезд и между нейтронными звездами и нормальными звездами.

Большое различие в характере поведения разных типов объектов, открытых в последние десятилетия, наводит на мысль о безнадежности каких-либо попыток описать все эти наблюдаемые явления с единых позиций. Действительно, это непростое дело, и, по-видимому, легкомысленно было бы предполагать, что существует единственная "формула", объясняющая все.

Но все же мы попытаемся свести задачу к наименьшему числу параметров. Дальнейшее повествование (за исключением гл. I) будет вестись именно по этому принципу. В основу будут положены наши современные представления о характере взаимодействия нейтронных звезд с окружающим веществом. При этом под эволюцией нейтронной звезды мы будем понимать именно медленное изменение характера этого взаимодействия.

Т а б л и ц а 1

Наблюдательные проявления нейтронных звезд

Название источника	Наблюдаемое число	Общее число в Галактике	Излучаемая энергия, эрг/с	Надежность идентификации с нейтронной звездой
Радиопульсары	~ 300	~ 10 ⁵	10 ³¹ – 10 ³⁸	+
Рентгеновские пульсары	~ 20	~ 100	10 ³³ – 10 ³⁹	+
Рентгеновские барстеры	~ 30	100	10 ³⁷ – 10 ³⁸	+ -
Гамма-барстеры	~ 300	?	?	+
Источники типа SS 433	1	?	?	+
Геминга	1	?	?	-
Источники балджа: типа Sco X-1, Sgr X-2, "шумовики"	~ 30	~ 100	10 ³⁸ – 10 ³⁷	+ -