

МР
И
знаний

В.М.ЛИПУНОВ

Все нейтронные звезды



В.М.ЛИПУНОВ

Все нейтронные звезды

*Книга для внеклассного чтения
учащихся 8—10 классов средней школы*

ББК 22.63
Л61

Р е ц е н з е н т ы:

кандидат физико-математических наук,
ассистент физического факультета Московского государственного
педагогического института им. В. И. Ленина *С. А. Ламзин*,
учитель средней школы № 27 Москвы *Г. В. Юркин*

Липунов В. М.

Л61 Все нейтронные звезды: Кн. для внеклас. чтения
учащихся 8—10 кл. сред. шк.—М.: Просвещение,
1988.—63 с., 2 л. ил.: ил. — (Мир знаний).

ISBN 5-09-000428-5

Книга посвящена одной из наиболее актуальных и бурно раз-
вивающихся областей современной астрофизики — физике и эво-
люции нейтронных звезд.

Л $\frac{4306020000-739}{103(03)-88}$ 249—88

ББК 22.63

ISBN 5-09-000428-5

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая читателю брошюра посвящена нейтронным звездам. После описания истории теоретического предсказания нейтронных звезд и их открытия в ней рассказывается о становлении совершенно новой области науки о нейтронных звездах — эволюции нейтронных звезд.

В популярной литературе очень часто нейтронные звезды представлены как «мертвые» объекты — останки погибших звезд. Однако, как показали исследования последних десятилетий, это не соответствует действительности. Нейтронные звезды живут своей наполненной разнообразными событиями жизнью. Физические явления, протекающие вблизи этих звезд, не менее многообразны, чем явления, происходящие на обычных звездах.

Нейтронные звезды как астрономические объекты оказались удивительно разнообразными. Радиопульсары, рентгеновские барстеры, рентгеновские пульсары — этот список наблюдаемых проявлений нейтронных звезд можно было бы продолжить.

Теоретические исследования, проведенные в последние годы, показывают, что могут существовать по крайней мере 8 типов нейтронных звезд, из которых пока наблюдается лишь два. Это — глубокая пропасть между тем, что мы открыли, и тем, что предстоит еще открыть. Ведь подавляющее число нейтронных звезд находится именно в этих неоткрытых состояниях.

«Все нейтронные звезды» — это прежде всего качественное многообразие, с которым теоретики уже столкнулись, а экспериментаторы, по-видимому, столкнутся в ближайшем будущем.

ВЕЧНЫЕ ЗВЕЗДЫ

К началу 30-х годов нашего века в общих чертах была построена теория внутреннего строения звезд. Равновесие звезд поддерживается силой давления раскаленной плазмы, которая противостоит силе гравитации. Чтобы равновесие сохранялось, необходимы внутренние источники энергии, иначе звезда, теряя энергию на излучение потоков света в окружающее пространство, не выдержала бы сопротивления с гравитационными силами и стала бы сжиматься. Но запасы внутренней энергии ограничены. Поэтому «обычные» звезды с термоядерным источником энергии и с привычной нам плотностью (порядка 1 г/см^3) вещества рано или поздно переходят в новое состояние, характеризующееся малыми размерами и высокой плотностью.

В 20-е годы источники звездной энергии еще не были известны. Правда, английский астроном А. Эддингтон, один из создателей теории внутреннего строения звезд, уже высказал идею о ядерной природе свечения звезд. Но о структуре атомного ядра тогда еще ничего не знали и вопрос «висел в воздухе».

В свою очередь, выяснилось, что на небе есть звезды, внутри которых никакая энергия не выделяется. Эти звезды, названные позднее белыми карликами, имели довольно высокую температуру поверхности и очень малую светимость, свидетельствующую о ничтожных, по астрономическим масштабам, размерах. Природу белых карликов разгадал английский физик Р. Фаулер. Он предположил, что вещество белых карликов имеет столь громадную плотность, что подчиняется уже не закону идеального газа, а законам квантовой механики.

Средняя плотность окружающих нас предметов составляет несколько граммов в объеме 1 см^3 . Причина этого в том, что средняя плотность атома примерно равна 1 г/см^3 . Такова же средняя плотность и звезд. Но если звезду сжать в миллион раз, то среднее расстояние между ее атомами станет в 100 раз меньше их размеров. Атомы будут как бы «вжаты» друг в друга, и звезда превратится в один гигантский атом, в котором энергетические уровни отдельных атомов сцеплены воедино. Электроны тоже обобществляются, образуя единый «газ». Согласно принципу минимума энергии, электрон стремится спуститься на самый нижний уровень. В результате все нижние уровни оказываются занятыми — электронный газ становится вырожденным. Вырожденный электронный газ сопротивляется сжатию — мешает принцип запрета Паули, согласно которому два электрона не могут находиться на одном и том же уровне. Давление такого газа не зависит от его температуры, поэтому даже абсолютно холодный белый карлик может находиться в равновесии, не сжимаясь. Размеры белых карликов в 100 раз меньше размеров такой звезды, как Солнце, т. е. сравнимы с размерами планет типа Земли.

Белые карлики, лишённые ядерных источников энергии, излучают остатки тепловой энергии. Но это излучение никак не меняет баланса сил. Белые карлики вечны.

Так люди осознали тот факт, что во Вселенной существует новый тип звезд — «вечные» звезды, для жизни которых не нужны источники энергии. Казалось, что эволюция любой звезды рано или поздно должна кончаться образованием белого карлика. На самом деле это не так. Давление вырожденного газа способно сдерживать силу гравитации лишь у звезд достаточно малой массы. К такому выводу независимо пришли советский физик Я. И. Френкель в 1928 г., индийский астрофизик Субраманьян Чандрасекар в 1931 г. и советский физик Л. Д. Ландау в 1932 г.

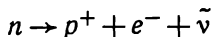
Будем мысленно увеличивать массу белого карлика. При увеличении массы M вырожденного белого карлика сила гравитации растет быстрее (пропорционально M^2), чем сила давления вырожденного газа (пропорционально $M^{5/3}$). Белый карлик поджигается, чтобы скомпенсировать возросшую силу гравитации. Электроны упаковываются все плотнее. Но нижние уровни заняты. Приходится занимать высокие, с большей энергией. Посте-

ленно электроны становятся релятивистскими (их скорость приближается к скорости света). Вспомним, что давление газа пропорционально импульсу частиц, который есть произведение массы на скорость. Скорость электрона, как и всего остального в природе, не может быть больше скорости света. Поэтому упругость релятивистского вырожденного газа слабее, чем обычного. Существует критическое значение массы, при котором равновесие белого карлика становится невозможным. Этот предел массы белого карлика называется сейчас чандрасекаровским пределом. Он слегка зависит от химического состава, но не превосходит $1,5 M_{\odot}$.

Получается, что «вечные» звезды не могут иметь массу больше чандрасекаровского предела. Но ведь обычные звезды ничего «не знают» о чандрасекаровском пределе и часто имеют массу намного больше $1,5 M_{\odot}$. Что же будет с такой звездой после исчерпания в ней внутренних источников энергии?

Л. Д. Ландау в работе 1932 г. попытался ответить на этот вопрос. Раз равновесие не может поддерживаться вырожденным электронным газом, значит, звезда будет сжиматься до тех пор, пока ядра атомов не придут во взаимное соприкосновение. Ядерное отталкивание могло бы остановить коллапс (неограниченное сжатие). И тогда ядра объединились бы в одно гигантское атомное ядро звездной массы.

Когда Ландау писал указанную работу, физики не знали строения ядра — не был еще открыт нейтрон. В 1932 г. английский физик Дж. Чэдвик, облучая бериллий альфа-частицами, открыл тяжелую нейтральную частицу — нейтрон. Буквально сразу после этого советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг предположили, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов (нуклонов). Нейтрон — удивительная частица. В ядре он находится в стабильном состоянии. А свободный нейтрон распадается на протон и электрон и, как выяснилось позже, на антинейтрино:



(характерное время полураспада 13 мин).

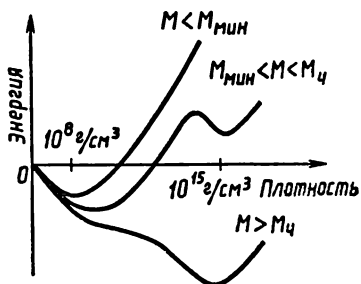
Нейтрон поразительно быстро проник в астрономию. Буквально через год после его открытия американские астрономы В. Бааде и Ф. Цвикки предположили, что грандиозное явление вспышки сверхновой связано с кол-

Рис. 1. Зависимость энергии звезды от ее плотности.

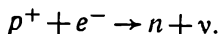
(Минимумы соответствуют устойчивым состояниям.

При $M < M_{\text{мин}}$ ($M_{\text{мин}} \approx 0,03 M_{\odot}$) есть только один минимум, соответствующий белому карлику.

При $M_{\text{мин}} < M < M_{\text{ч}}$ ($M_{\text{ч}} \approx 1,4 M_{\odot}$) имеется два минимума, соответствующих белому карлику и нейтронной звезде. При $M < M_{\text{ч}}$ остается одно устойчивое состояние, соответствующее нейтронной звезде.)



лапсом обычной звезды в сверхплотную, которую они называли нейтронной звездой. Это название твердо укоренилось и оправдывается тем, что при сжатии вещества электроны атомов соединяются с протонами, вступая в реакцию захвата и образуя нейтрон и нейтрино:



Вещество нейтронизуется. Для того чтобы шла реакция захвата, необходимо совершать работу. Эту работу в звезде производит сила тяготения. Кстати, как впервые отметил Л. Д. Ландау в 1938 г., для образования нейтронного вещества звезда должна иметь достаточно большую массу. Иначе работа силы тяготения окажется меньше необходимой и нейтронизация не наступит. Минимальный предел массы нейтронной звезды весьма невелик по звездным масштабам — меньше $0,1 M_{\odot}$. Это вовсе не означает, что любая звезда массой больше $0,1 M_{\odot}$ должна превратиться в нейтронную звезду. Если масса звезды меньше чандрасекаровского предела, то энергетически более выгодным оказывается состояние белого карлика (рис. 1). Но если каким-то гигантским прессом сдавить белый карлик, доведя его вещество до полной нейтронизации, то возможна нейтронная звезда малой массы. Если же масса звезды больше чандрасекаровского предела, то ей помогать не надо — она сама превратится в нейтронную звезду.

В 1937 г. американские физики Р. Оппенгеймер и Г. Волков провели первые расчеты внутреннего строения нейтронных звезд. Однако главный итог работы состоял не в конкретных расчетах. Стало ясно, что масса нейтронной звезды, как и масса белого карлика, не может быть больше определенной величины. Правда, точное

значение этой величины им не удалось вычислить. Более того, этот предел до сих пор не установлен. В центре нейтронных звезд плотность становится формально больше ядерной плотности ($\sim 10^{13}$ г/см³), и для расчета их равновесия нужно знать структуру элементарных частиц и характер ядерного взаимодействия. Наиболее ортодоксальные модели такого взаимодействия приводят к пределу Оппенгеймера — Волкова, равному $2\text{--}3 M_{\odot}$.

При большей массе звезда необратимо коллапсирует. Сила гравитации столь велика, что любое сколь угодно твердое вещество не может ей сопротивляться. Причина этого состоит в том, что давление тоже «весит». Ведь давление пропорционально импульсу частиц. Но чем больше импульс, тем больше энергия частиц. А согласно формуле Эйнштейна, энергия частиц пропорциональна их массе. Следовательно, давление пропорционально массе, и наоборот. Значит, давление тоже «весит»! В 60-е годы сколлапсировавшие объекты с массой больше предела Оппенгеймера — Волкова стали называть черными дырами.

Итак, к концу 30-х годов выяснилось, что все звезды после исчерпания в них ядерных источников энергии могут продолжать свое существование вечно — в виде белого карлика, нейтронной звезды или черной дыры.

В этой брошюре мы расскажем об одном из трех типов вечных звезд — нейтронных звездах.

СВЕРХ, СВЕРХ, СВЕРХ...

Интерес к нейтронным звездам вновь появился лишь через 20 лет после работ Р. Оппенгеймера и Г. Волкова. Это произошло, как ни странно, благодаря успехам одного из наиболее удаленных от звезд раздела физики — физики низких температур. В конце 50-х годов была создана квантовая теория сверхпроводимости, что открыло путь к пониманию другого, родственного со сверхпроводимостью явления — явления сверхтекучести.

Еще в 1908 г. нидерландский физик Г. Камерлинг-Оннес получил жидкий гелий, охладив его до температуры 4,2 К. Это открытие вдохновило ученого на исследование свойств вещества при сверхнизких температурах. В 1911 г. он открыл, что ртуть при низкой температуре (~ 4 К) теряет сопротивление электрическому току. Это явление Камерлинг-Оннес и назвал явлением сверхпроводимости.

Явление сверхтекучести было открыто советским физиком П. Л. Капицей в 1938 г. Пропуская гелий, охлажденный до температуры 4,2 К, через капилляр, он обнаружил, что у такого гелия нет вязкости! Точнее, она была, но в миллиарды раз меньше, чем у обычных, не очень-то вязких жидкостей, например у воды. Через три года после этого открытия Л. Д. Ландау создал феноменологическую теорию сверхтекучего гелия. Но квантовый характер обоих явлений стал проявляться лишь к концу 50-х годов.

При низкой температуре некоторые вещества переходят в новое состояние, в котором квантовое коллективное взаимодействие частиц проявляется на макроскопическом уровне. При этом возникают совершенно удивительные явления, которые невозможно понять без квантовой механики. Например, в опыте, оконченном в 1959 г. американским физиком Коллинзом, ток, пущенный по сверхпроводящему кольцу, не затухал 2,5 года.

Условия, при которых появляется сверхтекучесть и сверхпроводимость, можно грубо объяснить следующим образом. Коллективные квантовые явления возникают в тех случаях, когда поведение каждой частицы зависит не только от внешних сил, но и от остальных частиц, заполняющих данный объем. Мы уже сталкивались с такими явлениями. Вырождение электронного газа начинается тогда, когда все энергетические уровни гигантского атома оказываются заполненными. Короче, необходимо «столпотворение» частиц на энергетических уровнях. Создать такое «столпотворение» можно двумя способами: либо сильно уплотнив вещество, либо сильно охладив его (в последнем случае частицам легче переходить на низкие энергетические уровни).

Представьте себе, что у вас есть ванночка в виде террасы с глубокими впадинами (рис. 2). Нальем сверху воду. Течение воды вниз будет долгим. Жидкость не

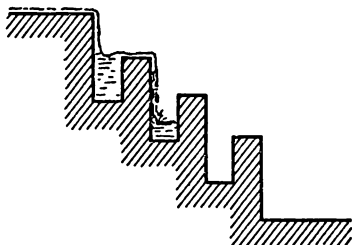


Рис. 2. Модель, иллюстрирующая переход от нормального к сверхтекучему состоянию.

вытекает из ванны до тех пор, пока не заполнятся все «щели» (энергетические уровни). Создается впечатление, что она очень вязкая. После заполнения всех энергетических уровней вода быстро потечет, будто у нее нет вязкости (аналог сверхтекучести).

Итак, охлаждая гелий, мы приводим его в сверхтекучее состояние. Но того же эффекта можно достичь, если гелий не охлаждать, а уплотнять. Именно это и происходит с веществом при образовании нейтронной звезды. В 1959 г. советский физик А. Б. Мигдал выдвинул гипотезу, согласно которой нейтронные звезды внутри должны состоять из сверхтекучей нейтронной жидкости. За счет колоссальной плотности ($\sim 10^{14}$ г/см³) сверхтекучесть в нейтронной звезде наступает при «охлаждении» ее до температуры 10^{11} К! Эта гипотеза была подтверждена через 10 лет.

Возникла цепочка, состоящая из нескольких «сверх»: вспышка сверхновой рождает сверхплотную нейтронную звезду, вещество которой обладает свойством сверхтекучести и сверхпроводимости.

Так физики в конце 50-х годов напомнили о нейтронных звездах. Понемногу стал оживать интерес к ним и у астрофизиков. В начале 60-х годов советские астрофизики В. А. Амбарцумян и Г. С. Саакян повторили расчеты внутреннего строения нейтронных звезд с учетом новых данных об элементарных частицах.

Но почему никто не пытался искать нейтронные звезды?

АККРЕЦИЯ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

Светимость звезды пропорциональна площади ее поверхности, т. е. квадрату радиуса, и четвертой степени температуры (закон Стефана — Больцмана). Простой расчет показывает, что нейтронная звезда, радиус которой равен 10 км, при одинаковой с Солнцем температуре должна излучать в 5 млрд. раз слабее. Такая звезда на расстоянии 10 пк имела бы 29-ю звездную величину, совершенно недоступную даже лучшим современным телескопам¹. Но светимость звезды пропорциональна четвертой степени температуры.

Вот если бы поднять температуру нейтронной звезды!

¹ Космический телескоп позволил бы наблюдать такие нейтронные звезды в оптическом диапазоне.

Но как это сделать — ведь, по определению, внутри такой звезды нет источников ядерной энергии!

Выход из положения был подсказан начавшимся в 60-е годы рядом астрономических открытий.

В 1963 г. американский астроном М. Шмидт отождествил спектральные линии квазаров с линиями лабораторного спектра. Оказалось, что квазары — самые яркие объекты Вселенной. Их светимость в сотни раз превышает светимость такой гигантской галактики, как наш Млечный Путь. При этом квазар имеет ничтожные по галактическим масштабам размеры. Следовательно, эффективность механизма свечения квазаров должна быть значительно выше эффективности энерговыделения обычных звезд, т. е. эффективности термоядерных реакций. Возникла насущная потребность в совершенно новых источниках энергии. И такой источник был найден.

В 1964 г. советский физик и астрофизик Я. Б. Зельдович и американский астрофизик Е. Солпитер независимо отметили, что при падении вещества (аккреции) на релятивистскую звезду, которая ускоряет падающее вещество почти до скорости света, может выделяться до 10% полной энергии падающего вещества. Это в 100 раз больше, чем если бы мы все это вещество сожгли в термоядерных реакциях.

Следует подчеркнуть, что сама идея об аккреции как источнике свечения звезд не нова. Еще в прошлом веке серьезно обсуждалась гипотеза, согласно которой свечение Солнца объяснялось разогреванием его поверхности падающими на него метеоритами. Идея эта оказалась безнадежно неправильной. В 40-е годы процесс аккреции межзвездного вещества на обычные звезды активно обсуждался в связи с проблемой их эволюции. Но эффективность аккреции на обычную звезду намного уступает эффективности термоядерных реакций. Поэтому идея использовать аккрецию как источник свечения звезд потускнела и была заброшена.

Кстати, человечество давно использует аккрецию как источник энергии. Ведь в гидроэлектростанциях энергия вырабатывается за счет кинетической энергии воды, падающей под действием силы тяжести с большой высоты (см. цветную вклейку 1). Интересно оценить эффективность электростанции в смысле переработки полной энергии. Скорость, с которой вода падает с высоты H , равна $\sqrt{2gH}$, и для высоты плотины 100 м оказывается ≈ 45 м/с.

Если бы даже вся кинетическая энергия падающей воды переходила в электрическую энергию, то каждый килограмм вещества давал бы $mv^2/2 = mgH$ энергии. Полная энергия одного килограмма вещества по формуле Эйнштейна пропорциональна c^2 , где c — скорость света. Значит, эффективность есть $\frac{1}{2} (v/c)^2$, т. е. $2 \cdot 10^{-10}\%$. Это в миллиард раз меньше, чем в цепных реакциях, которые используются в атомных электростанциях. Естественно, что столь малая эффективность компенсируется гигантским потоком речной воды.

Другое дело — аккреция на сверхплотные звезды. Скорость падения вещества на поверхность нейтронной звезды достигает $1/3$ скорости света. Если всю кинетическую энергию падающего вещества превратить в излучение, то каждый грамм вещества будет давать $\approx 0,1 c^2$ энергии. Полная светимость аккрецирующей звезды, как и мощность электростанции, пропорциональна потоку падающего вещества.

В межзвездном пространстве вещество очень разрежено и не создает больших потоков. Поэтому особенно благоприятные условия для работы аккреционных машин возникают в двойных системах, где соседняя обычная звезда может поставлять большую массу вещества. На это обстоятельство впервые обратил внимание Я. Б. Зельдович в 1964 г.

Аккреция на релятивистскую звезду — эффективнейший механизм выделения энергии. Аккреция уступает лишь реакции аннигиляции вещества и антивещества. Но антивещество — большой дефицит в нашей Вселенной.

Здесь мы должны вернуться на 2 года назад, когда произошло важнейшее для астрономов событие.

18 июня 1962 г. группа американских астрофизиков во главе с Риккардо Джиаккони осуществила запуск ракеты, оборудованной приборами, приспособленными для наблюдения рентгеновских лучей. Ракета поднялась на высоту 200 км, и это позволило «вынырнуть» из атмосферы и наблюдать рентгеновское излучение (см. цветную вклейку 3). Во время этого полета был обнаружен ярчайший на нашем небе рентгеновский источник Скорпион X-1. Первые годы никаких разумных идей о природе этого источника не высказывалось. Это объяснялось прежде всего скудостью информации — был известен только рентгеновский поток и больше ничего. Не ясно

было даже, где находится источник: внутри Солнечной системы или вне ее.

В 1966 г. Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков и независимо И. С. Шкловский (1967 г.) выдвинули идею, что Скорпион X-1 — двойная система, в которой одна из звезд является аккрецирующей нейтронной звездой.

Мы уже говорили, что светимость нейтронной звезды можно увеличить, лишь повысив ее температуру. Яркая нейтронная звезда должна быть необычайно горяча. При этом максимум ее излучения сместится в невидимую область и почти все оно будет идти в рентгеновском диапазоне.

Следующий важнейший шаг был сделан советскими астрофизиками П. Р. Амнуэлем и О. Х. Гусейновым в 1968 г. В условиях двойных систем вещество, теряемое обычной звездой, представляет собой плазму, хорошо проводящую электрический ток. Кроме того, из общих соображений было ясно, что нейтронные звезды должны обладать мощными магнитными полями (см. дальше). Из курса школьной физики известно, что на двигающийся проводник с током в магнитном поле действует сила. Следовательно, движение вещества вблизи нейтронной звезды будет происходить не только под действием силы тяжести, но и под действием магнитного поля. Оценки, проведенные П. Р. Амнуэлем и О. Х. Гусейновым, показывали, что магнитное поле может существенно изменить движение вещества вблизи нейтронной звезды. Такое неоднородно распределенное вещество будет излучать неодинаково по всем направлениям. Нейтронная звезда как бы покроется горячими пятнами, и ее вращение приведет к пульсациям блеска со строго определенным периодом.

Таким образом, все шло к вполне «запланированному» открытию нейтронных звезд. Скорпион X-1 не в счет, так как информация о его излучении в то время была очень скудной. (Информация, имеющаяся сейчас, настолько разноречива и запутанна, что астрономы до сих пор гадают — какая именно из «вечных» звезд занимает пост «Сириуса» рентгеновского неба.)

Но судьба распорядилась по-другому. В том же 1968 г. радиоастрономы сообщили об обнаружении пульсирующих источников, которые действительно оказались нейтронными звездами, но излучали они совершенно по другим причинам.

АСПИРАНТКА ИЗ СЕРЕНДИПА

Американские астрономы В. Бааде и Ф. Цвикки связали образование нейтронных звезд со вспышками сверхновых. К концу 60-х годов в такой связи мало кто сомневался, и понятен тот интерес, который испытывали астрономы к остаткам вспышек сверхновых.

Самым «полезным» из них оказался остаток вспышки сверхновой, наблюдавшейся китайскими астрономами в 1054 г., — Крабовидная туманность. Природа свечения туманности была разгадана в 50-е годы нашего века. Теория и наблюдения показывали, что свет туманности обусловлен синхротронным излучением релятивистских электронов в магнитном поле (синхротронным — потому, что с таким излучением впервые столкнулись физики, работающие на ускорителях).

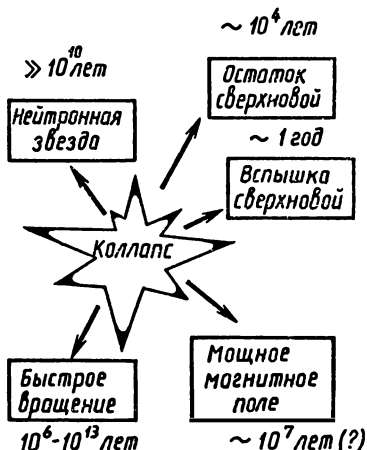
Но настораживало одно обстоятельство, которое особенно подчеркивал советский астрофизик С. Б. Пикельнер. Если рассчитать полную энергию релятивистских частиц внутри туманности и разделить ее на светимость туманности, то получается, что запаса энергии хватит всего лишь на 100—200 лет. Однако нет сомнений, что туманность светит не менее девяти столетий. Этот парадокс мог означать только одно — внутри туманности находится «родничок», постоянно «подпитывающий» туманность релятивистскими частицами.

Следующий, очень важный шаг был сделан советским астрофизиком Н. С. Кардашевым в 1964 г. К этому времени стало ясно, что коллапс нормальной звезды в нейтронную сопровождается гигантским ускорением ее вращения и усилением магнитного поля. При коллапсе звезды должен сохраняться ее вращательный момент. В результате частота вращения сжимающейся звезды нарастает обратно пропорционально квадрату ее радиуса, так как вращательный момент единицы вещества равен ωR^2 (ω — частота, R — радиус звезды). Момент сохраняется, а энергия вращения растет! (Энергия единицы массы есть $v^2/2 = \omega^2 R^2/2 \sim \omega$.) Энергия растет, потому что работает сила тяготения. Когда фигуристка сжимает руки и ускоряет свое вращение, она тоже работает и устает. Недаром говорят, что за самым изящным, красивым элементом программы стоит большой труд.

При коллапсе звезды в миллиарды раз возрастает индукция ее магнитного поля. Вещество сжимающейся

Рис. 3. Следствия коллапса нормальной звезды в нейтронную звезду.

(Цифрами дается характерное время, в течение которого следствие сохраняется.)



звезды увлекает с собой линии индукции, пронизывающие ее (вмороженность магнитного поля). Общее число магнитных линий сохраняется, а их плотность на единицу поверхности (индукция магнитного поля) растет.

Оба эти явления (ускорение вращения и усиление магнитного поля) Н. С. Кардашев применил для объяснения наблюдаемых свойств Крабовидной туманности. Он предположил, что в ее центре находится сколлапсировавшая звезда, обладающая гигантской энергией вращения. Эта энергия перекачивается в туманность с помощью ее магнитного поля.

Так появился источник энергии «вечных» звезд — вращение. Правда, сама энергия вращения есть результат работы гравитационных сил во время коллапса. Вообще говоря, вращение — гигантский резервуар энергии. В нем может «вместиться» до 10% полной энергии нейтронной звезды. Это примерно в 1000 раз больше той энергии, которая наблюдается при вспышке сверхновой. Если бы нейтронная звезда излучала энергию со светимостью, равной светимости Солнца, то ее энергии вращения хватило бы на 10^{13} лет. Вот вам и «умершая» звезда! Возможно, быстрое вращение — более важное следствие коллапса, чем короткая, хотя и очень эффектная вспышка сверхновой (рис. 3).

В 1967 г. итальянский астрофизик Ф. Пачини опубликовал работу, в которой обращал внимание на то, что быстро вращающаяся нейтронная звезда, обладающая

дипольным магнитным полем, может ускорять заряженные частицы до релятивистских энергий. На заряженные частицы в магнитном поле действует сила Лоренца, которая заставляет их «навиваться» на линии индукции магнитного поля. Движение поперек магнитных линий становится невозможным.

Давайте «насадим» заряженные частицы на магнитные линии диполя. Мысленно можно заменить эти линии жесткими прутиками, на которые надеты скользящие по ним шарики. Теперь будем вращать наш диполь. Частицы (шарики), насаженные на прутики, начнут двигаться по ним от центра и по мере удаления от него будут увеличивать свою скорость. Казалось, что на бесконечность уйдут только те частицы, которые «сидят» на полярных прутиках. Но это не так. Дело в том, что на некотором достаточно большом расстоянии скорость вращения магнитных линий станет формально равной скорости света. Поверхность, на которой достигается это условие, называется световым цилиндром. Здесь прутики теряют жесткость — стационарное магнитное поле превращается в электромагнитные волны. Частицы срываются с магнитных линий со скоростью, близкой к скорости света, и уносят энергию вращения. Поэтому вращение нейтронной звезды должно замедляться. Так думал Ф. Пачини, ничего не подозревая о том, что именно в это время английские радиоастрономы уже наблюдают нейтронные звезды.

Летом 1967 г. аспирантка профессора А. Хьюиша, работая на радиотелескопе, предназначенном для исследования мерцаний радиоисточников, обнаружила новый, ранее неизвестный источник. Мерцания радиоисточников в метровом диапазоне длин волн связаны с неоднородно-

Рис. 4. Запись периодических импульсов радиоизлучения, обнаруженного одним из первых.

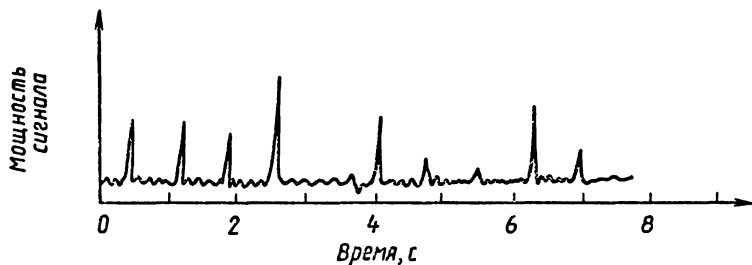
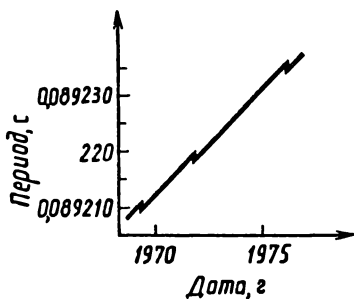


Рис. 5. Замедление скорости вращения радиопульсара в созвездии Парусов. (Видны три кратковременных сбоя замедления.)



стями в плазме, текущей от Солнца. Поэтому чем ближе источник к Солнцу, тем сильнее мерцание. Источник же, который обнаружила Джоселин Белл, мерцал ночью и посылал строго периодические импульсы радиоизлучения (рис. 4)!

Свое открытие англичане скрывали от мировой научной общественности несколько месяцев, думая, что натолкнулись на сигналы внеземных цивилизаций. Позднее было обнаружено еще несколько таких источников, названных пульсарами. Периоды прихода импульсов обладали двумя ранее неизвестными астрономам особенностями. Во-первых, они были очень маленькими. Так, первый пульсар имел период 1,337 с. Во-вторых, поражала стабильность периода. Пульсары работали как часы, точнее, как атомные часы.

Открытие радиопульсаров известный астрофизик Д. Тер Хаар назвал «сказочной случайностью» (Seren-dipity¹). Это слово было придумано английским писателем Г. Уолполом, который взял его из цейлонской волшебной сказки «Три принца из Серендипа».

Английские радиоастрономы, похоже, и не подозревали о работах Н. С. Кардашева, Ф. Пачини, П. Р. Амнуэля и О. Х. Гусейнова.

Первым, кто связал только что открытые радиопульсары с нейтронными звездами, был американский астрофизик Т. Голд. Окончательная уверенность в том, что пульсары — нейтронные звезды, возникла после открытия пульсара в Крабовидной туманности. Его период оказался равным 0,33 с — так быстро могут вращаться только нейтронные звезды. То, что пульсации связаны

¹ Д а й с о н Ф., Т е р Х а а р Д. Нейтронные звезды и пульсары. — М.: Мир, 1973.

с вращением, вскоре было доказано: периоды пульсара удлинялись (рис. 5). Именно так и должно быть, если причиной излучения пульсаров является диссипация их вращательной энергии.

УНИПОЛЯРНЫЙ ИНДУКТОР И СЫРОЕ ЯЙЦО

Первые годы наблюдений радиопульсаров характеризовались как подтверждением старых, так и появлением новых идей.

Очень важными были сведения о замедлении вращения радиопульсаров. Если знать светимость тормозящейся звезды и скорость торможения, то можно найти ее момент инерции. Скорость торможения можно измерить, а вот полная светимость пульсара, как правило, неизвестна. То радиоизлучение, по которому пульсары были открыты, уносит лишь малую долю всей излученной ими энергии. Декаметровое радиоизлучение пульсаров — это лишь побочный эффект.

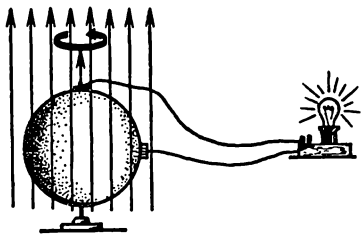
Однако оказалось, что у пульсара в Крабовидной туманности полную светимость излучения можно рассчитать. Чтобы синхротронная светимость туманности поддерживалась на наблюдаемом уровне, пульсар должен поставлять столько энергии, сколько туманность излучает в единицу времени. Найденный из этих соображений момент инерции нейтронной звезды пульсара Крабовидной туманности прекрасно совпадал с нашим представлением о нейтронной звезде как об объекте, имеющем массу порядка массы Солнца и радиус около 10 км.

Следующий важный шаг состоял в определении магнитных полей нейтронных звезд. Чтобы это сделать, необходимо было знать, как наблюдаемое торможение нейтронной звезды зависит от магнитного поля.

Здесь полезной оказалась аналогия пульсара с гигантским магнитом, предложенная Т. Голдом. Из электродинамики известно, что вращающийся магнит излучает электромагнитные волны на частоте вращения. Это излучение называется магнитодипольным. Мощность магнитодипольного излучения полностью определяется магнитным дипольным моментом и частотой вращения.

Конечно, пульсар не заменишь магнитом, даже очень большим. Но интересно, что все известные к настоящему времени модели пульсаров дают величину торможения, близкую к вычисленной по магнитодипольной формуле.

Рис. 6. Униполярный индуктор.



Это обстоятельство связано с тем, что во всех моделях энергия вращения пульсара уносится только через те магнитные линии, которые уходят за световой цилиндр.

Применение магнитодипольной формулы к пульсарам показывает, что большинство из них имеют сильные магнитные поля, в 10^{11} — 10^{13} раз большие, чем на поверхности Солнца или Земли.

Быстрое вращение нейтронных звезд со столь сильным магнитным полем и приводит к разнообразным физическим явлениям, происходящим на поверхности пульсаров. Однако детали этой картины неизвестны до сих пор. Перечислим лишь важнейшие идеи.

В 1969 г. американские астрофизики П. Голдрайх и В. Джулиан обратили внимание на то, что вращающаяся нейтронная звезда подобна униполярному индуктору (рис. 6). Из электротехники известно, что если проводящий вращающийся шар поместить в магнитное поле, то через гальванометр, подсоединенный к полюсу и экватору шара, потечет ток. Это происходит потому, что на вращающиеся заряды действует сила Лоренца. В результате шар поляризуется и возникает электрическое поле, под действием которого по его поверхности течет ток. На полюсе электрическое поле параллельно магнитному. Заряд, попавший на полюс, будет ускорен и выброшен на бесконечность (при этом заряд противоположного знака, наоборот, притягивается шаром).

Американский физик П. Стурок обратил внимание на то, что в сильном магнитном поле пульсара возможен процесс, обратный аннигиляции. Случайный гамма-квант (его называют затравочным), влетевший в магнитное поле пульсара в районе его полюса, рождает пару «электрон плюс позитрон»:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-.$$

Частицы подхватываются мощным электрическим полем униполярного индуктора и ускоряются до ультрарелятивистских энергий. Двигаясь в магнитном поле, они, в свою очередь, рожают очередные гамма-кванты, которые, распадаясь, дают новые электрон-позитронные пары, и т. д. Возникает лавинный процесс, сопровождающийся множественным рождением частиц и гамма-квантов. Они вылетают вдоль полярных магнитных линий, унося энергию вращения звезды.

Вблизи приполярной области существует узкий «зазор» наподобие сверхмощного конденсатора. В «зазоре» (между пластинами «конденсатора») и происходит разряд и ускорение релятивистских частиц. Вылетая потоками с обоих полюсов (рис. 7), они излучают энергию в узком конусе, напоминая собой гигантский вращающийся прожектор. Когда луч прожектора пересекает Землю, мы принимаем импульс радиоизлучения.

В феврале 1969 г. было обнаружено новое явление в поведении пульсаров — сбой периода. Группа американских радиоастрономов вела наблюдения пульсара в созвездии Парусов. По техническим причинам наблюдения пришлось прервать. Когда же через неделю их возобновили, оказалось, что период скачком уменьшился на величину, равную двум миллионным долям периода (рис. 8).

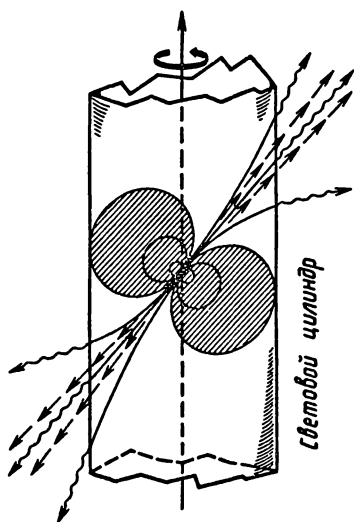
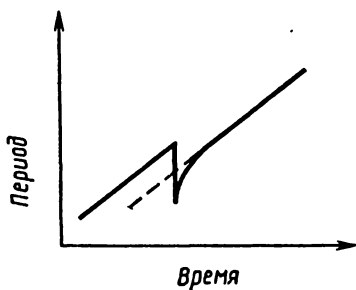


Рис. 7. Магнитосфера радио-пульсара.

(Линии индукции магнитного поля, не выходящие за световой цилиндр, удерживают плазму, увлекая ее во вращение. Вдоль полярных магнитных линий выбрасываются потоки излучения и релятивистских частиц.)

Рис. 8. Сбой замедления вращения радиопульсара.



После сбоя пульсар продолжал замедляться так, как будто ничего не произошло. Вскоре аналогичный сбой был обнаружен у пульсара в Крабовидной туманности.

Первая разумная гипотеза, объяснявшая эти сбои, была предложена американским астрофизиком М. Рудерманом. Прежде всего, он показал, что поверхность нейтронных звезд должна иметь кристаллическую структуру, т. е. должна быть твердой.

Кристаллическая структура образуется, если потенциальная энергия взаимодействия нейтронов друг с другом превышает их тепловую энергию. Напомним, что тепловая энергия есть не что иное, как кинетическая энергия хаотического движения частиц. Она тем выше, чем выше температура. Ясно, что при некоторой достаточно большой температуре тепловая энергия становится больше потенциальной и вещество плавится. Эту критическую температуру называют температурой плавления. Температура плавления коры звезды — несколько сотен миллионов кельвинов. Все радиопульсары заметно холоднее и должны быть покрыты коркой, толщина которой может достигать 1 км.

Раз есть твердая кора, то могут быть землетрясения, точнее, звездотрясения. Причину звездотрясений нетрудно найти. При быстром вращении звезда сплющивается. Твердая кора, в отличие от жидкости, «запоминает» свою форму, а когда пульсар замедляется, звезда стремится «округлиться». В коре растут напряжения, и в какой-то момент она трескается. При этом резко меняется момент инерции звезды и, как следствие, частота вращения. Оценки показывают, что достаточно разлома коры в 1 см, чтобы объяснить наблюдавшийся у пульсара в Парусах скачок периода.

Но вскоре был зафиксирован новый сбой пульсара в Парусах, и гипотеза звездотрясений поблекла. Расчеты показывали, что так быстро кора не могла накопить требуемые напряжения. Гипотеза модифицировалась из звездотрясений в ядротрясения.

Хотя природа сбоев до сих пор точно не установлена, но сами сбои помогли доказать, что внутри нейтронных звезд — жидкость, причем эта жидкость находится в сверхтекучем состоянии. Нейтронная звезда напоминает сырое яйцо.

Все знают, как проверить, сырое яйцо или сварено вкрутую. Нужно крутануть его и посмотреть, что будет дальше. Сырое яйцо очень быстро замедляет свое вращение. Почему? Ответ прост, но не очевиден. Причина состоит в том, что, вращая крутое яйцо, вы сообщаете вращательный момент сразу всему яйцу, а вращая сырое — только его коре и наружным слоям. Попросту говоря, за один поворот рукой вы не успеваете передать вращательный момент всей массе сырого яйца — его внутренность продолжает покоиться. За счет сил вязкости маленький момент перераспределяется по всему объему, вращение яйца замедляется, а потом уже сила трения о стол окончательно останавливает его.

Теперь ясно, как должны происходить скачки частоты у радиопулсара. Если по какой-то причине резко ускорить вращение коры, то вначале она начнет быстро вращаться, а потом станет замедляться, отдавая часть момента своим жидким недрам. Если бы жидкость внутри нейтронной звезды находилась в обычном состоянии, то время такой релаксации было бы 10^{-7} с. Тогда с большим запасом нейтронную звезду можно было бы считать целиком твердой.

Но в действительности наблюдаемое время релаксации достигает, например, у пульсара в Парусах 1 года. Отношение этих времен столь велико, что не остается сомнений в сверхтекучем состоянии нейтронной жидкости.

Таким образом, пульсар оказался сырым яйцом (см. цветную вклейку 2).

Вязкость сверхтекучей вращающейся жидкости обусловлена возникновением в ней квантовых вихревых нитей параллельно оси вращения. Такие вихри экспериментально наблюдаются у сверхтекучего гелия, а существование их у нейтронных звезд предсказывалось советскими

физиками В. Л. Гинзбургом и Д. А. Киржницем еще в 1964 г.

В 1975 г. Дж. С. Цакадзе и С. Дж. Цакадзе в СССР смоделировали свои пульсары в лаборатории. Вместо нейтронной жидкости они использовали сверхтекучий гелий, заполняя им сферические и цилиндрические сосуды. Результаты эксперимента полностью подтвердили модель «сырого яйца» в нейтронной звезде.

ПРОСТОТА — ЗАЛОГ НАДЕЖНОСТИ

После открытия радиопульсаров зарубежные теоретики увлеклись проблемой преобразования энергии вращения в излучение нейтронной звезды. В течение четырех лет за рубежом не появилось ни одной научной работы об аккреции на нейтронные звезды. В то же время молодые советские астрофизики под руководством Я. Б. Зельдовича продолжали теоретические исследования падения вещества на нейтронную звезду.

В 1969 г. Я. Б. Зельдович и Н. И. Шакура рассмотрели случай сферически-симметричной аккреции на нейтронную звезду, не имеющую магнитного поля. Анализ показал, что рентгеновский спектр аккрецирующей нейтронной звезды формируется в основном за счет комптоновского рассеяния фотонов на «горячих» электронах.

Но опыт радиопульсаров учил, что нейтронные звезды обладают мощными магнитными полями. И, как показали работы П. Р. Амнуэля и О. Х. Гусейнова еще до открытия радиопульсаров, влияние магнитного поля намного меняет картину аккреции.

К этому времени стало ясно, что радиопульсары по каким-то причинам избегают двойные системы. Это можно было трактовать двояко — либо нейтронные звезды не входят в двойные системы, либо в двойных системах что-то мешает возникновению эффекта радиопульсара.

Аспирант Я. Б. Зельдовича В. Ф. Шварцман выбрал второе объяснение. В результате этого выбора возникло совершенно новое понимание эволюции нейтронных звезд. Одиночная, быстро вращающаяся нейтронная звезда, эжектируя релятивистские частицы и электромагнитное излучение, разбрасывает окружающую ее очень разреженную межзвездную среду. В результате вокруг звезды образуется гигантская каверна. Однако мощность пульсара сильно падает при увеличении пери-

ода вращения. Но плотность межзвездной среды невелика. Поэтому даже через миллион лет, когда пульсар замедлится до нескольких секунд, давление излучения пульсара останется много больше давления силы гравитации, притягивающей вещество, и пульсар продолжает работать.

Другое дело — двойная система, где нормальная звезда теряет вещество в виде звездного ветра. Плотность его настолько велика, что давление гравитации начинает превосходить давление электромагнитного расталкивания уже при периоде в десятые доли секунды. Пульсар «захлебывается» не через миллионы, а через десятки тысяч лет, поэтому вероятность застать его в двойной системе крайне мала. В действительности есть еще причины, по которым радиопульсары не видны в двойных системах, но о них — позже. Главное в другом: торможение пульсара неизбежно приводит к образованию аккрецирующей нейтронной звезды. Излучение замагниченной аккрецирующей звезды должно быть неизотропным, а значит, пульсирующим. В двойных системах должны быть не радио-, а рентгеновские пульсары!

В. Ф. Шварцман предложил критический тест («Экспериментум круцис»¹) для проверки того, с каким пульсаром мы имеем дело. Если пульсар эжектирующий, период его должен расти. Период аккрецирующего пульсара не обязан увеличиваться, а наоборот, может даже уменьшаться (см. цветную вклейку 5).

Эти работы были опубликованы в 1970—1971 гг. Следует отметить еще одну важную работу, выполненную учеником Я. Б. Зельдовича О. Х. Гусейновым в 1970 г. Он подробно описал предполагаемые свойства аккрецирующей нейтронной звезды в двойной системе и особенно отметил три причины, приводящие к переменности рентгеновского излучения нейтронной звезды в двойной системе. Во-первых, это вращение нейтронной звезды. Оно создает эффект пульсара. Во-вторых, затмение нейтронной звезды оптической звездой. И в-третьих, впервые возникла идея о том, что аккрецирующая звезда на эллиптической орбите будет менять свою светимость из-за того, что приближаясь и удаляясь, будет то сильнее, то слабее захватывать вещество, истекающее с нормальной звезды. Идеи просты. А простота — залог надежности.

¹ Experimentum crucis (лат.) — ключевой эксперимент.

«ЭКСПЕРИМЕНТУМ КРУЦИС»

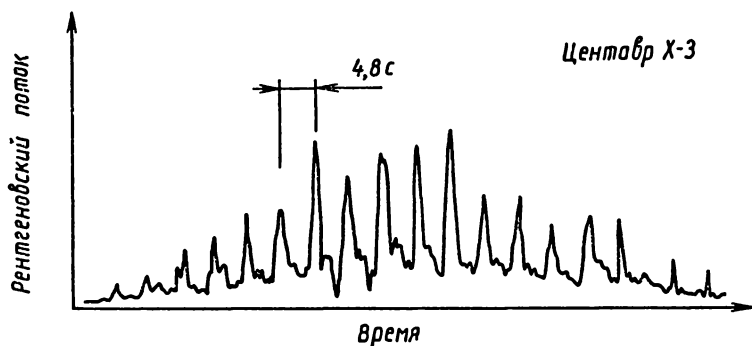
12 декабря 1970 г. был запущен первый специализированный рентгеновский спутник «Ухуру». Одним из научных руководителей эксперимента был тот же Р. Джаакони, который за 8 лет до этого вместе с группой сотрудников открыл первый рентгеновский источник Скорпион X-1. Новый эксперимент Джаакони оказался настолько удачным, что вся рентгеновская астрономия делится теперь на «до» и «послеухуровскую». За 429 дней полета спутника было открыто несколько сотен рентгеновских источников. До запуска «Ухуру» рентгеновские источники можно было пересчитать по пальцам.

Но дело даже не в количестве. Высокая чувствительность «Ухуру» позволила выявить ранее неизвестные особенности рентгеновских источников. Самым эффектным было открытие рентгеновских пульсаров.

Первыми рентгеновскими пульсарами оказались наиболее яркие рентгеновские источники — Центавр X-3 и Геркулес X-1. Эти источники обладали всеми свойствами, предсказанными советскими астрофизиками, — рентгеновское излучение их пульсировало с периодами 4,8 и 1,24 с (рис. 9). Кроме того, у пульсаров наблюдались рентгеновские затмения, что показывало: их место жительства — двойная система. Вскоре были найдены и оптические двойники рентгеновских пульсаров — спутники нейтронных звезд.

Хотя спектр излучения рентгеновских пульсаров не тождествен спектру черного тела, но все же, без сомне-

Рис. 9. Запись потока от рентгеновского пульсара Центавр X-3. (Медленная модуляция обусловлена вращением аппарата.)

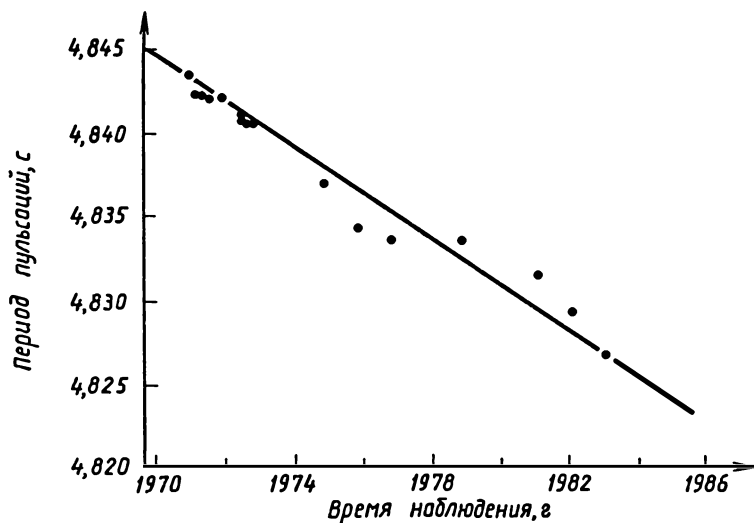


ний, имел тепловую природу. Это первое, что отличало их от радиопульсаров. Но самое главное состояло в том, что рентгеновские пульсары не замедлялись, а ускорялись. Вот вам и «Experimentum crucis»! Сомнений не оставалось — на спутнике «Ухуру» открыты аккрецирующие нейтронные звезды.

К настоящему времени известно около 20 аккрецирующих рентгеновских пульсаров. Периоды их заключены в пределах от сотых долей секунды до сотен секунд (рис. 10). Самый «быстрый» рентгеновский пульсар, А 0538-66, имеет период всего в два раза больший, чем период радиопульсара в Крабе. Но у большинства рентгеновских пульсаров периоды велики (более 100 с).

Важнейшей характеристикой астрономических объектов является их светимость — количество энергии, излучаемое ими в единицу времени. Каким образом удалось определить светимость рентгеновских пульсаров? Эксперимент позволяет нам измерить лишь поток рентгеновской энергии вблизи Земли. Чтобы найти полную энергию, излучаемую пульсаром, нужно знать расстояние до него. Его можно рассчитать. На помощь здесь приходит классическая астрономия, имеющая дело с нормальными звездами, которые излучают в основном в оптическом

Рис. 10. Ускорение рентгеновского пульсара Центавр X-3.



диапазоне. Изучая спектр оптического двойника рентгеновского пульсара, можно определить его спектральный класс. Нормальные звезды изучены столь хорошо, что, зная спектральный класс, мы можем узнать и полную оптическую светимость звезды, а сравнивая ее с принимаемым оптическим потоком, определить расстояние до двойной системы с рентгеновским пульсаром. Оказалось, что светимости пульсаров в тысячи раз превосходят светимость Солнца.

Открытие рентгеновских пульсаров вызвало поток теоретических работ, который из небольшого ручейка (несколько работ в год) в начале 70-х годов превратился в целую «Ниагару» (сотни работ в год) к концу 70-х годов. Говорят, что уже на расстоянии нескольких километров от Ниагары люди промокают до нитки от долетающих до них брызг. Может быть, это шутка, но на всякий случай мы не будем так близко приближаться к «Ниагаре».

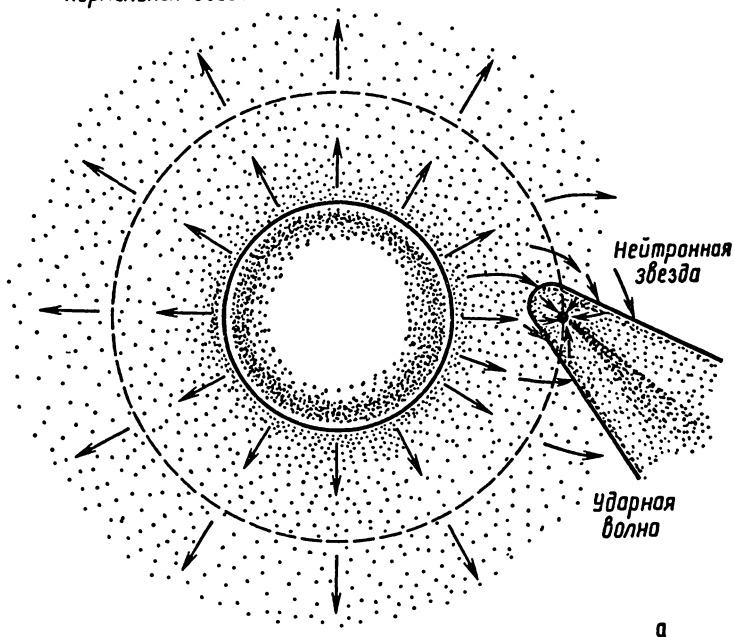
Картина аккреции вещества на рентгеновский пульсар в двойной системе выглядит следующим образом. Вещество, необходимое для работы «аккреционной машины» в двойной системе, может поставляться двумя путями.

Обычные звезды (все без исключения) теряют вещество в виде звездного ветра (рис. 11,а). Например, наше Солнце каждый год теряет 10^{-14} -ю часть своей массы. Голубые сверхгиганты теряют вещество в сотни миллионов раз быстрее. Простые оценки показывают, что нейтронная звезда, перехватывая гравитационным полем тысячную часть истекающего от нормальной звезды вещества, будет светить в тысячи раз ярче Солнца.

У звезд малой массы ветер слаб, и яркий рентгеновский источник по соседству вспыхивает тогда, когда нормальная звезда заполняет полость, обладающую тем свойством, что вещество, покинувшее ее пределы, перестает принадлежать одной звезде и может попасть на соседнюю звезду. Эта полость получила название полости Роша. Легче всего перенос вещества происходит вблизи точки, в которой равнодействующая всех сил, действующих на вещество, равна нулю (эта точка называется внутренней точкой Лагранжа).

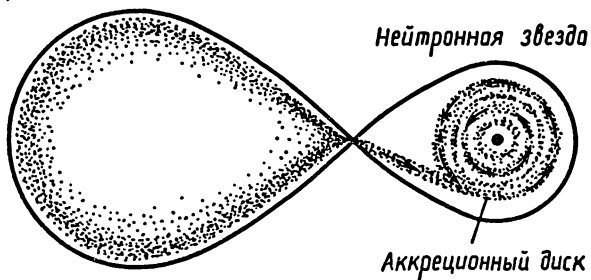
В обоих случаях вещество, захваченное нейтронной звездой, обладает относительно нее вращательным моментом. Это легко понять, перейдя в систему отсчета,

Нормальная звезда



а

Нормальная звезда



б

Рис. 11. Два типа перетекания вещества в двойной системе, состоящей из нормальной и нейтронной звезд.

связанную с нейтронной звездой. Нормальная звезда, а вместе с ней истекающее вещество, будет вращаться вокруг нас с периодом двойной системы. В результате вещество, прежде чем упасть на поверхность нейтронной звезды, образует газовое кольцо вокруг нее. Под действием вязких сил кольцо расплывается в тонкий аккреционный диск. В нем каждый элемент движется по направлению к нейтронной звезде по сильно закрученной спирали (рис. 11,б).

На расстоянии в несколько тысяч километров от звезды магнитные силы становятся сравнимыми с гравитационными — диск разрушается. Вещество вследствие различных магнитогидродинамических неустойчивостей проникает внутрь магнитосферы нейтронной звезды. Там оно «вмораживается» в магнитные линии и стекает на полюса нейтронной звезды. Здесь, на площади в несколько квадратных километров, вся кинетическая энергия падающего вещества превращается в рентгеновское излучение. В сильном магнитном поле плазма излучает анизотропно, что совместно с вращением нейтронной звезды приводит к явлению пульсара (рис. 12).

Ускоряются рентгеновские пульсары в силу того, что вещество, вращающееся в диске, прежде чем упасть на поверхность нейтронной звезды, должно отдать ей свой вращательный момент.

Но возникает вопрос, почему мы так уверены, что рентгеновские пульсары — это нейтронные звезды. Конечно, пульсар А 0535-66 вращается столь быстро, что никаких сомнений не возникает. Но как быть с другими пульсарами? Ведь большинство из них имеют периоды вращения более 100 с. С такими периодами вполне могут вращаться и белые карлики. Более того, не просто могут, а вращаются. Например, белый карлик DQ Геркулеса имеет период, равный 71 с. Можно было бы сослаться на то, что излучение пульсаров рентгеновское. Но белые карлики тоже изучают в рентгеновском диапазоне. Как же доказать, что рентгеновские пульсары действительно являются нейтронными звездами? Нужен был «Experimentum crucis».

Ключевой оказалась величина ускорения вращения, наблюдаемого у рентгеновских пульсаров. При данном темпе аккреции (т. е. массе вещества, падающего в единицу времени) и данном периоде вращения звезды ускоряющий момент сил не может быть больше некоторого

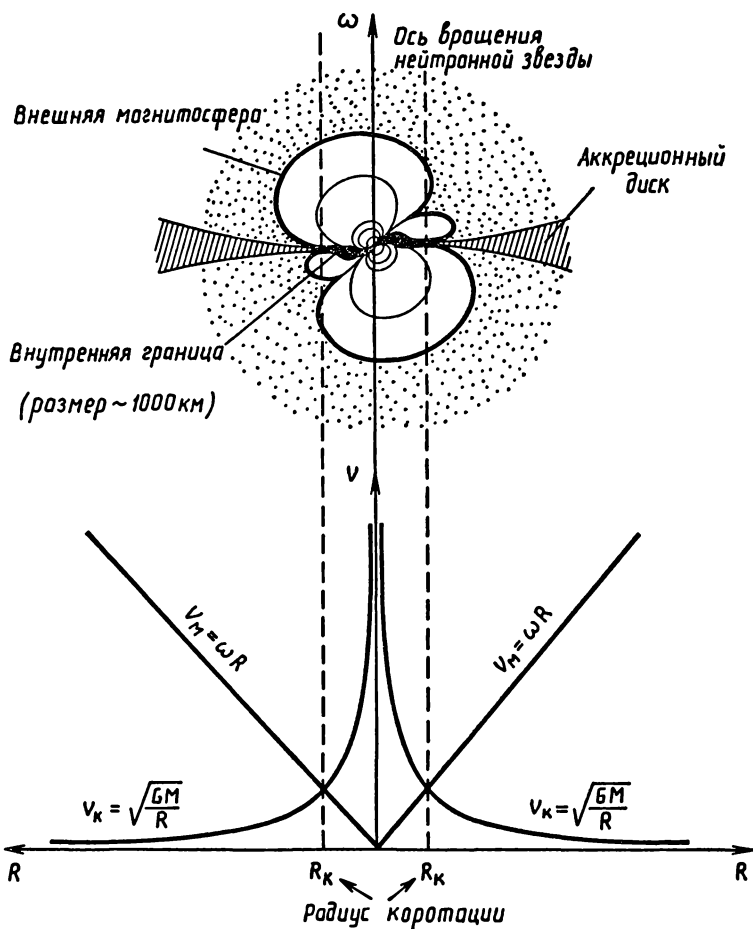


Рис. 12. Строение магнитосферы рентгеновского пульсара. (ω — угловая скорость вращения нейтронной звезды, V_m — линейная скорость вращения линий индукции магнитного поля, V_k — линейная скорость вращения вещества (плазмы) в аккреционном диске, R_k — расстояние, на котором и плазма, и магнитное поле имеют одинаковую линейную скорость вращения).

определенного значения. Это легко понять. При данном темпе аккреции ускорение звезды прямо пропорционально вращательному моменту единицы массы падающего вещества (удельному моменту). Но если удельный

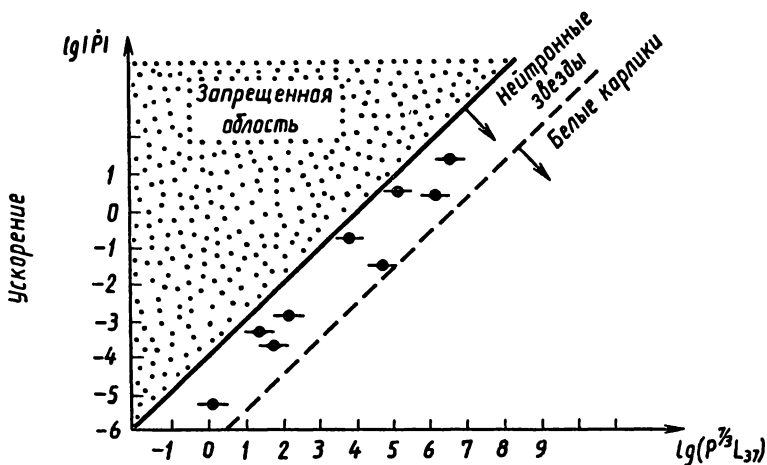


Рис. 13. Доказательство того, что рентгеновские пульсары являются нейтронными звездами.

(Черными кружками показаны наблюдаемые ускорения вращения рентгеновских пульсаров, а линиями — теоретическое ограничение на модуль ускорения. P — период, с; L — светимость, 10^{30} Дж/с; ускорение выражено в единицах с/год.)

момент велик, то вещество попросту не упадет на поверхность нейтронной звезды. Отсюда и получается верхний предел. Замечательно, что максимальное ускорение аккрецирующей звезды зависит только от ее радиуса и массы и совершенно не зависит ни от режима аккреции, ни от магнитного поля звезды. Нейтронные звезды, имеющие примерно ту же массу, что и белые карлики, более чем в 100 раз меньше их по размерам. Поэтому белый карлик ускоряется гораздо слабее, чем нейтронная звезда. Сравнение выводов из теории с наблюдаемыми фактами показало, что пульсары эти — нейтронные звезды, а не белые карлики (рис. 13).

Кстати, ни у одного из рентгеновских пульсаров не зафиксировано ускорения выше дозволенного для нейтронной звезды. Это — совершенно независимый аргумент в пользу того, что мы имеем дело с аккрецией, а не с чем-то другим.

ДРЕВО ЖИЗНИ

После запуска «Ухуру» в космос были посланы другие спутники с рентгеновской аппаратурой на борту. Основная их задача состояла в исследовании уже открытых рентгеновских источников. И здесь ученые столкнулись с громадным разнообразием. Древо жизни расцвело буйным зеленым цветом (см. цветную вклейку 4). Возникали новые и новые вопросы.

Еще в 1967 г. с помощью ракетных наблюдений удалось обнаружить рентгеновский источник, который, вспыхнув ярче Скорпиона X-1, через несколько месяцев снова погас. Это напоминало вспышку новой звезды, поэтому источники такого типа были названы новоподобными. Для исследования таких вспыхивающих источников английские астрономы запустили в 1974 г. специальный спутник «Ариэль». В течение года было открыто несколько новоподобных рентгеновских источников. Впоследствии началась настоящая путаница не только с источниками, но и с названиями. Их называли и временными (на английский манер — транзистными), и переходящими, и опять новоподобными. Необходимо было разобраться в многообразии обнаруженных свойств.

По мере накопления наблюдательных данных становилось ясно, что причин переменности — не одна и не две. Выяснилось, что есть «мягкие» и «жесткие» временные источники. «Мягкость» и «жесткость» характеризуют особенности рентгеновского спектра: у первых спектр содержит кванты меньшей энергии. «Мягкие» рентгеновские источники, как правило, соседствуют со старыми маломассивными звездами, а «жесткие» — наоборот, с массивными.

Теоретики предложили следующие модели временных рентгеновских источников:

- нейтронная звезда на эллиптической орбите;
- переменный сброс массы нормальной звездой;
- термоядерное горение аккрецирующего вещества;

Ве-звезда, теряющая вещество в экваториальной плоскости, и нейтронная звезда, плоскость орбиты которой наклонена к плоскости экватора;

быстрое вращение нейтронной звезды.

Часть временных источников с «жестким» спектром проявляют себя как рентгеновские пульсары. А вот у «мягких» источников никаких строгих периодических



1. Аккреция давно используется в народном хозяйстве.



2 Сырое яйцо и униполярный индуктор



3. Для наблюдения рентгеновских источников нужно было «вынырнуть» за атмосферу



4. Древо жизни.



5. Experimentum crucis.



6. Комбинируя различные типы нормальных и нейтронных звезд, получаем не открытые еще комбинации и их свойства. В этом смысл создания «искусственной галактики».

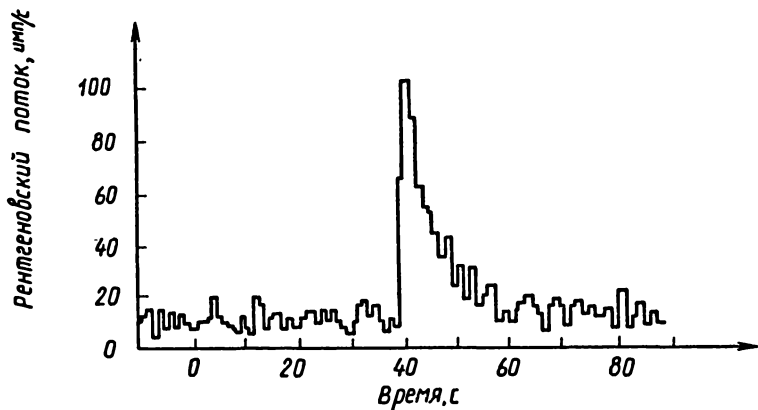


Рис. 14. Вспышка рентгеновского излучения, зарегистрированная в направлении на шаровое скопление NGC 6624.

пульсаций не обнаружено. Скорее всего, в разных случаях «работают» разные, а то и несколько из перечисленных механизмов.

В 1975 г. американский астрофизик Дж. Гриндлей, обрабатывая данные, полученные на голландском спутнике «ANS», обнаружил, что приборы регистрировали вспышку рентгеновского излучения в направлении на шаровое скопление NGC 6624 (рис. 14). Вспышка длилась всего 20 с. В следующем году американские астрофизики из Массачусетского технологического института подтвердили открытие Дж. Гриндлея и попутно открыли еще несколько таких источников, которые время от времени вспыхивали. Они были названы барстерами (англ. burst — вспышка).

Самый «скачущий» барстер был открыт в феврале 1976 г. Запись его вспышки показана на рисунке 15. Этот источник был не похож на все другие. У него между «мягкими» вспышками, характерными для других барстеров, наблюдались более короткие и «жесткие» всплески. Природа мягких вспышек была довольно быстро разгадана. Итальянский астрофизик Лаура Мараски заметила, что энергия, излучаемая барстером во время вспышки, примерно в 100 раз меньше, чем энергия, излучаемая между вспышками. Эта закономерность наблюдалась у разных барстеров и легко объяснялась в модели аккрецирующей нейтронной звезды. Мы видели, что при

аккреции на нейтронную звезду выделяется до 10% полной энергии падающего вещества. Теперь представьте себе, что все вещество, накопившееся на поверхности нейтронной звезды между вспышками, сгорает в термоядерной реакции. Эффективность термоядерных реакций примерно равна 0,1%. При переработке одной и той же массы вещества последовательно в «аккреционной» и «термоядерной машине» в первом случае будет выделяться в 100 раз больше энергии. Поэтому энергия, выделяемая во время вспышки, в 100 раз меньше, чем энергия, излучаемая между вспышками.

Спектр барстера неплохо описывается спектром абсолютно черного тела. Это позволяет определить площадь поверхности и радиус барстера. Его радиус оказался близок к 10 км, что прекрасно согласуется с гипотезой нейтронной звезды.

Долгое время не удавалось доказать двойственности барстеров. Почему-то ни у одного из более чем десяти известных барстеров не наблюдалось рентгеновских затмений. Тем не менее в двойственности их мало кто сомневался, а отсутствие рентгеновских затмений объясняли тем, что вторая компонента представляет собой красную карликовую звезду, масса которой много меньше массы

Рис. 15. Запись потока рентгеновского барстера.

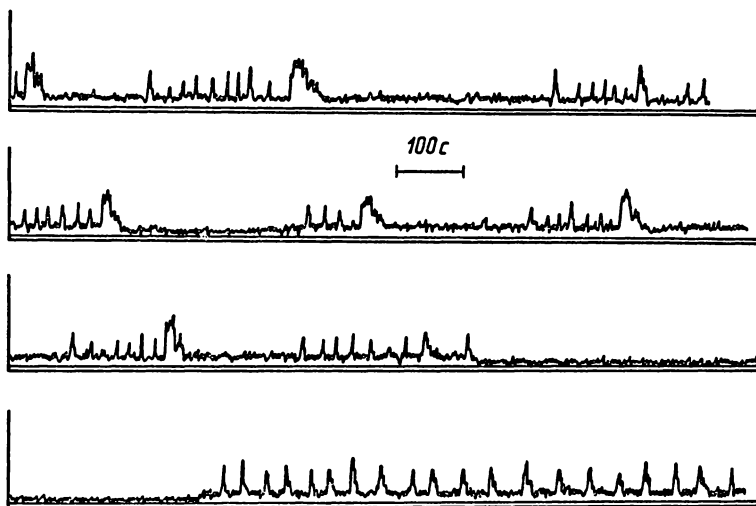


Рис. 16. Перетекание вещества в системе рентгеновского барстера.



нейтронной звезды (рис. 16). Даже если красный карлик заполняет полость Роша, то его размер невелик. Невелика и вероятность того, что мы находимся вблизи орбитальной плоскости двойной. Поэтому затмения маловероятны, но не настолько, чтобы среди нескольких десятков барстеров, известных сейчас, не попался хотя бы один затменный.

И действительно, такие затмения были обнаружены у одного барстера. Период двойной оказался чуть продолжительнее школьного урока — 50 мин.

Еще более удивительные и загадочные явления — гамма-всплески — впервые были обнаружены в 60-е годы на американских спутниках, запущенных для контроля термоядерных взрывов на поверхности Земли. Но первый эксперимент, проливший свет на природу гамма-всплесков, был проведен группой советских ученых под руководством Е. П. Мазеца. Эксперимент был осуществлен в 1978 г. на трех космических аппаратах. Два детектора гамма-излучения были установлены на аппаратах «Венера-11» и «Венера-12», а третий — на околоземном спутнике «Прогноз-7». За 1,5 года наблюдений удалось обнаружить около 150 гамма-всплесков — значительно больше, чем за все время наблюдений с момента их открытия.

Самый яркий всплеск был зафиксирован 5 марта 1979 г. (рис. 17). За время менее одной миллисекунды поток возрос до 10^{-6} Дж/(м² · с). Если бы вспышка была в оптическом диапазоне, то ее можно было бы видеть невооруженным глазом днем!

Но самое главное, советские ученые обнаружили периодическое изменение потока излучения во время вспышки. Период пульсаций оказался равным 8 с. Форма пульсаций напоминает импульсы рентгеновских пульсаров. Это делает нейтронную звезду наиболее подходящим

кандидатом в источник гамма-всплесков. Однако нужно подчеркнуть, что вспышка 5 марта 1979 г. отличалась от других всплесков. Как правило, гамма-всплески короче и имеют более жесткий спектр.

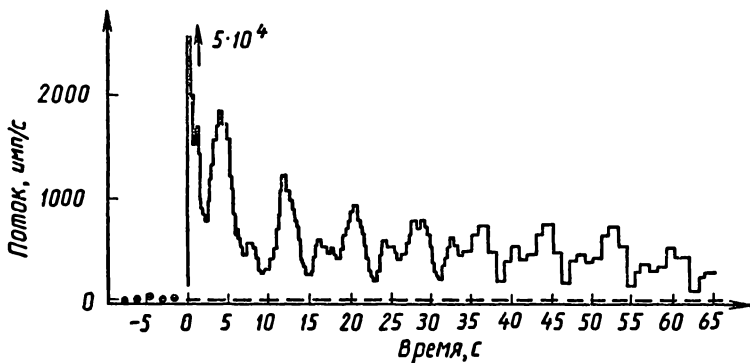
Механизм гамма-всплесков еще предстоит разгадать. Мало информации. Например, никак не удастся обнаружить в направлении на гамма-всплески никаких объектов в других диапазонах электромагнитных волн. Гамма-вспышка возникает на «пустом» месте!

НЕ ОГЛЯДЫВАЯСЬ НА НАБЛЮДЕНИЯ

К концу 70-х годов сложилась ситуация, в которой теоретики, упустив инициативу, едва успевали следить, стоя на платформе своих моделей, за экспрессом наблюдателей, проносившимся мимо. Рассредоточив свои силы по источникам, они образовали целые кланы. Те, кто занимался радиопульсарами, слабо представляли, что делается в теории рентгеновских пульсаров. Появились специалисты по рентгеновским барстерам и отдельно — по временным источникам. Каждый высказывал свою точку зрения на природу гамма-всплесков (используя, естественно, специфику только своих конкретных исследований).

Ситуация стала еще сложнее после открытия ошеломляющих свойств источника SS 433 (о нем подробнее

Рис. 17. Гамма-всплеск, зарегистрированный 5 марта 1979 г. с борта межпланетной станции «Венера-11».



мы расскажем дальше), который по непонятной причине «выстреливал» вещество с невиданной ранее для звезд скоростью — 80 000 км/с.

Еще в 1970 г. В. Ф. Шварцман указал на возможную генетическую связь радиопульсаров и рентгеновских пульсаров и предсказывал, что в двойных системах, да и вне их, нейтронные звезды должны из режима радиопульсара переходить в режим рентгеновского пульсара. А в 1974 г. советские астрофизики Г. С. Бисноватый-Коган и Б. В. Комберг писали о возможности обратного перехода нейтронной звезды — из состояния аккреции в состояние радиопульсара.

К. Дэвидсон и Дж. Острайкер в 1973 г., А. Ф. Илларионов и Р. А. Сюняев в 1975 г. проанализировали процесс замедления вращения нейтронной звезды в двойной системе. Особое внимание они обратили на то, что стадия эжектирующего пульсара и стадия аккрецирующего пульсара разделены еще одной стадией, в которой работает эффект «пропеллера». Эжектирующий пульсар уже затух, а аккреция еще не возникла. Падению вещества препятствует быстро вращающееся магнитное поле нейтронной звезды. Оно подобно лопастям гигантского пропеллера разбрасывает падающее вещество в разные стороны.

Н. И. Шакура и автор в 1976 г., подробно проанализировав эволюционные состояния рентгеновских пульсаров, подчеркивали, что эти пульсары находятся в особом равновесном состоянии, когда в среднем период нейтронной звезды не меняется, а ускорение (наблюдавшееся тогда у всех пульсаров) должно смениться замедлением. При этом пульсар случайно переходит из состояния аккреции в состояние пропеллера, и наоборот. Буквально в том же году последовало сообщение об открытии эпизодов замедления у рентгеновского пульсара Центавр X-3, а сейчас такие эпизоды уже наблюдались у пяти пульсаров.

И все же на фоне наблюдаемого многообразия источников эти идеи выглядели робкими попытками понять, что же их объединяет. Нужно было перейти от «беспринципного» накопления фактов (моделей) к логичной причинно-связанной картине.

К концу 70-х годов назрела необходимость в создании как можно более полной теории эволюции нейтронных звезд. Такое исследование должно было, во-первых, с

теоретических позиций выяснить все возможные пути эволюции нейтронных звезд и перечислить их возможные состояния. Во-вторых, постараться хотя бы некоторые из наблюдаемых типов источников объяснить естественным образом — как то или иное из всевозможных состояний нейтронной звезды.

Было еще одно важное обстоятельство, которое вселяло оптимизм и веру в то, что природа многообразнее наблюдательных данных. Статистика радиопульсаров показывала, что каждые 20—30 лет в Галактике рождается один радиопульсар. Примерно с тем же темпом рождаются звезды массой более $10 M_{\odot}$, которые согласно современной теории эволюции и являются предками нейтронных звезд. Порядка половины из этих массивных звезд — двойные. Помножив возраст Галактики на «скорость рождения» звезд, получим, что в Галактике к настоящему времени должно быть около полумиллиарда нейтронных звезд (звезды-то вечные). Из них мы наблюдаем в виде радиопульсаров и рентгеновских источников около полутысячи. Конечно, общее число радиопульсаров больше того, что мы видим, но и оно не превосходит полумиллиона, что примерно в тысячу раз меньше общего числа нейтронных звезд в Галактике. Что же происходит с остальными нейтронными звездами?

Первое следствие теории состоит в том, что мы пока имеем дело лишь с 0,1% всех нейтронных звезд. Второй важнейший вывод касается только двойных систем. Время жизни массивной двойной составляет примерно 100 млн. лет, значит, в Галактике около 100 тыс. массивных двойных. Стадия эволюции двойной, на которой появляется нейтронная звезда, раза в два короче полного времени ее жизни. Следовательно, двойных систем с нейтронными звездами должно быть около 50 тыс. В то же время число ярких рентгеновских пульсаров и других рентгеновских источников не превышает нескольких сотен, т. е. составляет всего лишь 0,5%.

То, что было открыто за последние 15 лет в мире нейтронных звезд, — всего лишь вершина айсберга. Хотя и сияющая. А мы хотим знать обо всех нейтронных звездах.

Прежде всего, нужно было выяснить, с каких позиций строить общий подход. Что является главным в жизни нейтронной звезды? Как определить ее эволюцию? Вопросы эти не столь просты. Например, можно по аналогии с обычными звездами считать эволюцией медленное

изменение светимости звезды, обусловленное ее остыванием. Так, кстати, считают ученые, проводящие численные расчеты остывания нейтронных звезд.

Однако такой подход лишен универсальности. Остывание радиопульсара — процесс в принципе наблюдаемый. А вот у рентгеновских пульсаров он полностью заглушен тепловым излучением полярных шапок и по сравнению с этим излучением кажется второстепенным.

Мыслимы и другие методы слежения за эволюцией. Например, можно следить за изменением химического состава вещества, аккрецируемого нейтронной звездой. А это изменение обусловлено соответствующим изменением химического состава вещества карликовой звезды. Но дальше рентгеновских барстеров и некоторых транзитных источников такой подход не распространяется.

Физики в последние годы работают над созданием теории «великого объединения», которая смогла бы объединить все известные в природе взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, ядерное, слабое...

Мечты астрофизиков о создании единого подхода к нейтронным звездам не менее дерзки. Хотелось бы иметь теорию «великого объединения» нейтронных звезд¹. О попытке создания такой теории мы и расскажем дальше.

«ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ»

Что отличает нейтронные звезды от других объектов, населяющих нашу Галактику? Огромные гравитационное и магнитное поля. Но что следует считать мерой «огромности»? «Лицо» нейтронной звезды определяется характером ее взаимодействия с окружающим веществом. Причем взаимодействие это осуществляется посредством двух типов физических сил — электромагнитных и гравитационных. Анализ показал, что кроме трех режимов взаимодействия, о которых мы уже говорили раньше, существуют еще пять качественно различных, настолько различных, что можно говорить о разных нейтронных звездах. Большое число режимов потребовало введения новой классификации и обозначений.

Среди всех прочих выделяются три величины, которые характеризуют взаимодействия нейтронной звезды

¹ Такое сравнение не ново. Так, недавно (в 1983 г.) известный английский астрофизик Мартин Рис попытался создать теорию «великого объединения» активных ядер галактик.

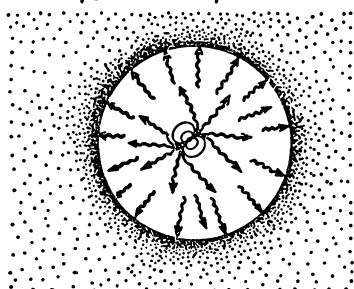
с окружающей средой. Одна из таких величин — потенциальный темп аккреции, определяемый той массой вещества, которую захватила бы нейтронная звезда, если бы у нее не было магнитного поля. Потенциальный темп аккреции характеризует гравитационное взаимодействие нейтронной звезды и ее окружения. Два других параметра — период вращения нейтронной звезды вокруг оси и ее магнитный дипольный момент — характеризуют электромагнитную часть взаимодействия.

Магнитный дипольный момент равен половине произведения индукции магнитного поля на полюсе нейтронной звезды на куб ее радиуса. Если отвлечься от различий в радиусах нейтронных звезд, то, очевидно, задание дипольного момента эквивалентно заданию индукции магнитного поля на поверхности звезды.

Чтобы перебрать все возможные режимы взаимодействия (типы) нейтронных звезд, рассмотрим следующую идеализированную ситуацию. Будем считать, что свойства среды (плазмы), окружающей нейтронную звезду, не зависят от времени. В природе это никогда не выполняется, но внешние изменения происходят, как правило, очень медленно.

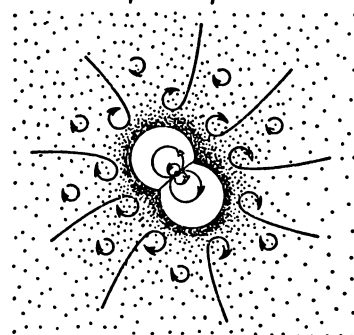
Пусть вначале нейтронная звезда вращается очень быстро. Энергия, эжектируемая звездой, столь велика, что сила давления релятивистских частиц и электромагнитных волн значительно превосходит силу гравитации. Этот режим взаимодействия, вслед за В. Ф. Шварцманом, принято называть режимом эжекции (рис. 18, Е). Нейтронные звезды, находящиеся в состоянии эжекции, будем обозначать буквой Е (от англ. ejection — выбрасывание). В режиме эжекции нейтронная звезда излучает энергию вращения и замедляется. Мощность Е-звезды падает. По достижении некоторого критического периода вращения P_E , при котором сила гравитации наконец становится больше силы давления эжектируемого звездой вещества, пульсар затухает. Эжекция прекращается, но аккреция еще невозможна. Наступает новый режим — режим пропеллера (рис. 18, Р). Обозначим его символом Р (англ. propeller — пропеллер). В режиме пропеллера нейтронная звезда продолжает тормозиться. Наконец ее период настолько уменьшается, что вращение магнитного поля перестает мешать аккреции и вещество падает на поверхность нейтронной звезды (рис. 18, А). Наступает новый режим взаимодействия — режим аккреции (А)

Эжектирующая нейтронная звезда



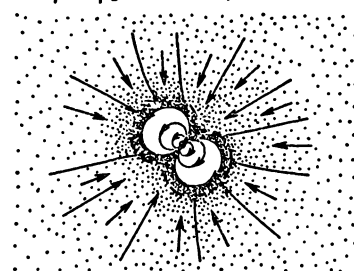
E - тип

Пропеллер



P - тип

Аккрецирующая нейтронная звезда



A - тип

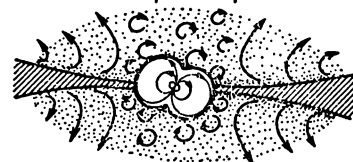
← Рис. 18. Три режима взаимодействия нейтронной звезды с окружающим ее веществом:
Е — эжекция, Р — пропеллер,
А — аккреция.

Сверхкритическая аккреция и эжекция



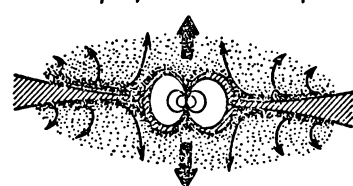
SE - тип

Сверхкритический диск и пропеллер



SP - тип

Сверхкритическая аккреция



SA - тип



Рис. 19. Три сверхкритических режима взаимодействия нейтронной звезды с аккреционным диском:

SE — сверхкритический диск и эжекция, SP — сверхкритический диск и пропеллер, SA — сверхкритическая аккреция.

(англ. accretion — аккреция). Период P , при котором «пропеллер» сменяется аккрецией (переход $P \rightarrow A$), как и период P_E , зависит от двух параметров: потенциального темпа аккреции и индукции магнитного поля нейтронной звезды. Чем больше индукция магнитного поля, тем сильнее электромагнитные силы препятствуют аккреции и тем сильнее звезда должна затормозить свое вращение, чтобы началась аккреция.

Рассказывая о трех режимах взаимодействия — E , P и A , мы считали, что плазма, окружающая нейтронную звезду, достаточно разрежена и темп падения вещества (даже потенциальный) мал. Мал для того, чтобы пренебречь обратным влиянием излучения, возникающего из-за аккреции, на само движение падающего вещества. Это влияние становится сильным, когда светимость звезды вследствие аккреции достигает эддингтоновского предела. У звезды с большой светимостью сила давления излучения превосходит силу гравитации и вещество не может аккрецировать. При массе порядка $1 M_\odot$ эддингтоновский предел равен 33 тыс. светимостей Солнца. Обратите внимание, что светимость рентгеновских пульсаров и барстеров не превосходит (или не сильно превосходит) эддингтоновский предел. Теперь эта закономерность вполне понятна.

Но в природе существуют ситуации, когда потенциальный темп аккреции столь велик, что если бы все вещество упало на поверхность нейтронной звезды, то светимость ее в десятки тысяч раз превзошла бы эддингтоновский предел. Как будет происходить такая сверхкритическая аккреция на нейтронную звезду?

В реальной ситуации сверхкритическая аккреция может быть реализована в тесной двойной системе, когда вещество нормальной звезды к нейтронной «течет» через внутреннюю точку Лагранжа. В этом случае всегда образуется аккреционный диск.

Сверхкритические аккреционные диски впервые были рассмотрены в 1973 г. Н. И. Шакурой и Р. А. Сюняевым. Соседние слои аккреционного диска «трутся» друг о друга. А трение рождает тепло и излучение. Таким образом, вещество начинает излучать задолго до того, как оно достигнет звезды. В сверхкритическом режиме светимость диска становится сравнимой с эддингтоновским пределом на больших расстояниях от звезды. Все — вещество дальше падать не может, иначе светимость диска в де-

сятки тысяч раз превзойдет предел Эддингтона. А это будет означать, что сила давления излучения диска в десятки тысяч раз превосходит силу гравитации. Но это невозможно. И течение вещества саморегулируется. Часть его начинает истекать от диска, а падает ровно столько, чтобы светимость на данном расстоянии не превышала эддингтоновского предела. В результате самой звезды достигнет только $1/10\,000$ часть всего вещества, а остальное истечет в виде квазисферического потока. Истекающее вещество настолько плотно, что оно полностью поглощает все жесткое рентгеновское излучение, перерабатывая его в ультрафиолетовое и видимое излучение. Снаружи такой диск похож на обычную звезду с мощным звездным ветром. По оси диска может истекать вещество из самых внутренних областей, где оно ускоряется до релятивистских скоростей. По мысли Н. И. Шакуры и Р. А. Сюняева, этим и можно объяснить наблюдаемые выбросы активных ядер галактик и квазаров.

В случае аккреции на нейтронную звезду магнитное поле начинает играть важную роль лишь вблизи нейтронной звезды, поэтому далеко от нее будет реализован тот же самосогласованный режим аккреции и истекающей оболочки. А вот на расстоянии в несколько тысяч километров магнитное поле разрушает диск, и все вещество, достигающее границы магнитосферы, падает на поверхность нейтронной звезды. При этом светимость ее может в десятки раз превосходить эддингтоновский предел. Часть вещества будет выброшена обратно со скоростью порядка скорости света.

Но падения вещества на поверхность звезды может и не быть, если она вращается очень быстро, т. е. реализуются аналоги режимов пропеллера и эжекции. Таким образом, мы получаем еще три режима (рис. 19): сверхкритический диск вокруг эжектирующей звезды (SE — super ejection), сверхкритический диск вокруг пропеллера (SP — super propeller) и критическая аккреция (SA — super accretion). Существенно следующее обстоятельство. Сверхкритическим называется такой режим, при котором светимость становится больше эддингтоновской вблизи ее магнитосферы! Поэтому в природе в принципе могут существовать пульсары со светимостью в несколько десятков раз выше эддингтоновского предела. Например, пульсары в Магеллановых Облаках имеют светимости в 8—10 раз больше эддингтоновского предела.

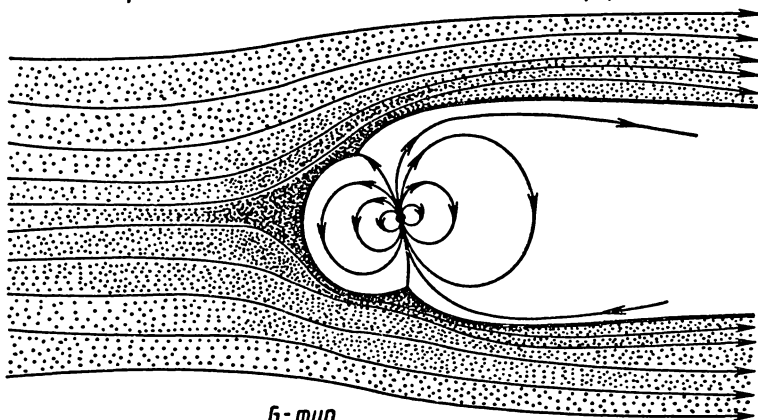
Итак, мы уже имеем шесть типов нейтронных звезд. Остаются еще два.

Представьте себе, что период вращения нейтронной звезды стал формально больше P_A , т. е. звезда должна совершить переход $P \rightarrow A$ и должна начаться аккреция. Однако этого не происходит. Такая ситуация может реализоваться, когда на границе магнитосферы сила притяжения самой нейтронной звезды пренебрежимо мала по сравнению с силой давления магнитного поля. Именно такое соотношение сил характерно для земной магнитосферы. Вспомним, что скорость солнечного ветра (300—500 км/с) в десятки раз превосходит вторую космическую скорость для Земли (11 км/с). Это означает, что сила гравитации пренебрежимо мала на границе магнитосферы Земли. Солнечный ветер (в спокойном состоянии) обтекает магнитосферу, не попадая на поверхность Земли (рис. 20).

Аналогичная ситуация может реализоваться и при взаимодействии нейтронной звезды с окружающим веществом (в том числе если окружающее вещество очень разрежено и магнитосфера имеет большие размеры). Режим взаимодействия в этом случае называется геоподобным и обозначается символом G (лат. Geo — Зем-

Рис. 20. У нейтронных звезд геоподобного типа режим взаимодействия их магнитного поля с окружающим веществом напоминает взаимодействие земной магнитосферы с солнечным ветром.

Нейтронная звезда с геоподобной магнитосферой



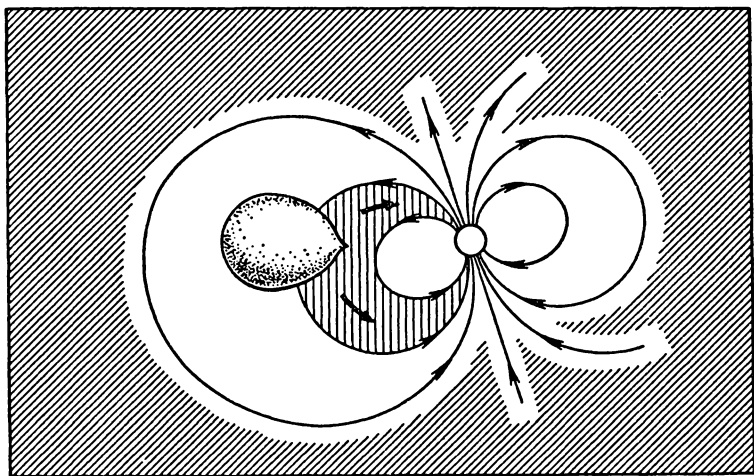


Рис. 21. Магнитные двойные системы (тип М).

ля). Теоретические исследования наблюдательных проявлений таких нейтронных звезд до сих пор не проводились. Во всяком случае, энергетика G-звезд значительно уступает другим типам нейтронных звезд.

Итак, мы подходим к концу. Фактически осталась еще одна возможность. В двойной системе может оказаться так, что источник вещества находится внутри магнитосферы нейтронной звезды. Аккреция станет возможной. На такой режим у белых карликов впервые обратили внимание советские астрофизики И. Г. Митрофанов, Ю. Н. Гнедин и Г. Г. Павлов в 1977 г. Получается двойная система, внутри которой определяющую роль играют магнитные силы (режим М — magnetic, рис. 21).

В процессе аккреции нейтронная звезда, увеличивая свою массу, может превзойти предел Оппенгеймера — Волкова и превратиться в черную дыру. Это состояние обозначим ВН (от англ. black hole — черная дыра). Прибавив к восьми типам нейтронных звезд еще ВН, получим девять возможных состояний, в которые может попасть нейтронная звезда.

Первые шесть рассмотренных нами режимов можно показать на одной диаграмме — $P - L$ (рис. 22). Будем откладывать по одной оси период вращения нейтронной звезды. Другой параметр, описывающий тип звезды,—

потенциальный темп аккреции — заменим на потенциальную светимость нейтронной звезды. Это светимость, которую имела бы нейтронная звезда, если бы все захваченное ею вещество упало на ее поверхность. Удобство этой величины в том, что для аккрецирующей звезды типа А она наблюдаема и примерно равна рентгеновской светимости звезды. Этот параметр будем откладывать по другой оси диаграммы $P - L$.

Это единственная диаграмма, на которой одновременно можно показать такие разные объекты, как радио- и рентгеновские пульсары. Причем каждый из них занимает свое место. К сожалению, из восьми типов нейтронных звезд пока наблюдаются только два — аккрецирующие (А) и эжектирующие (Е). Примеры аккрецирующих звезд — рентгеновские пульсары и барстеры, а эжектирующих — радиопулсары.

Но это только вершина айсберга. Подавляющая часть нейтронных звезд находится в остальных шести состояниях. Было бы заманчиво узнать, сколько и каких звезд в нашей Галактике. Это можно было бы сделать, рассчитав эволюцию нейтронной звезды. Первая такая попытка была предпринята в 1983 г. В. Г. Корниловым и автором. Но прежде чем рассказать о результатах этих расчетов, давайте попробуем качественно понять основные черты эволюции нейтронных звезд.

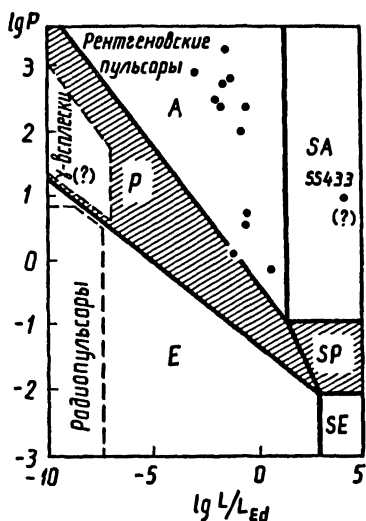


Рис. 22. Диаграмма «Период — светимость».

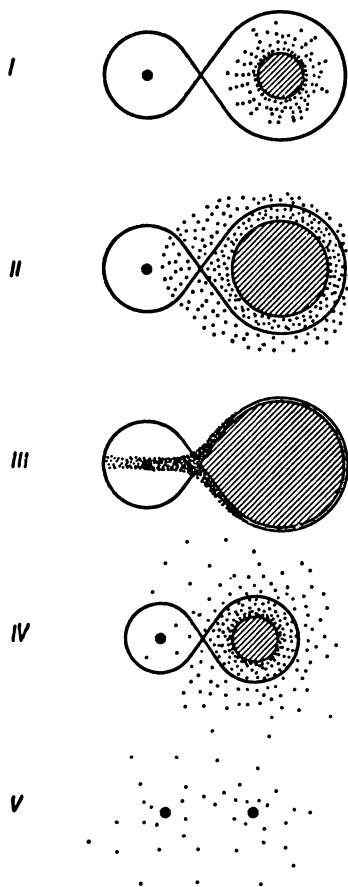
(P — период, с; L — светимость, в единицах эддингтоновской светимости, которая примерно равна 10^{31} Дж/с = 33 000 светимости Солнца.)

Пусть оживет «мертвая» статическая картина, показанная на диаграмме «Период — светимость» (рис. 22). Эволюция нейтронной звезды происходит не только вследствие изменений периода ее вращения, но и из-за изменения другого параметра — потенциальной светимости. Большая часть нейтронных звезд, по-видимому, рождается в двойных системах, где из-за эволюции нормальной звезды постоянно меняется параметр «окружающая среда», и это тоже приводит к переходу нейтронной звезды из одного состояния в другое. Следовательно, чтобы разобраться в том, как эволюционирует нейтронная звезда, нужно знать характер эволюции обычной звезды в двойной системе.

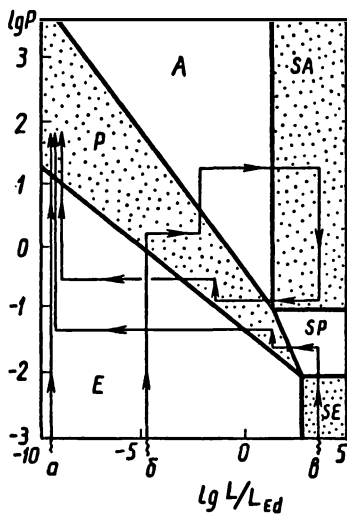
ЭВОЛЮЦИЯ «В КВАДРАТЕ»

Нейтронные звезды «вызревают» внутри массивных звезд (с массой более $10 M_{\odot}$). Большая часть из них входит в состав двойных систем. Черты современного сценария эволюции массивных двойных, содержащих рентгеновские звезды, были обрисованы в начале 70-х годов в работах советских астрофизиков А. В. Тутукова и Л. Р. Юнгельсона, голландского астрофизика Е. П. Ван ден Хёвела. Нейтронная звезда образуется в двойной после коллапса первоначально более массивной звезды, исчерпавшей ядерные источники энергии.

Но мы пока рассмотрим эволюцию нормальной звезды. В ее жизни выделяются пять этапов. Первый (I) и самый долгий этап эволюции (рис. 23) нормальная звезда проводит на главной последовательности. В это время в ее центре идет реакция синтеза гелия из водорода. Звезда далека от заполнения полости Роша и теряет свое вещество в виде слабого звездного ветра. При средней массе $15\text{--}20 M_{\odot}$ длительность I этапа составляет около 30 млн. лет, после чего в центре звезды водород выгорает и образуется гелиевое ядро, окруженное шаровым энерговыделяющим слоем, в котором продолжают термоядерные реакции сгорания водорода. Звезда сходит с главной последовательности и превращается в голубой сверхгигант (этап II). Этот переход сопровождается увеличением темпа истечения вещества в виде звездного ветра до величин порядка $10^{-6} M_{\odot} / \text{год}$. Длительность II этапа определяется временем горения энерговыделяющего слоя и примерно в 100 раз короче I этапа.



← Рис. 23. Пять стадий эволюции двойной системы с компактной звездой.



↑
Рис. 24. Эволюционные треки на диаграмме «Период — светимость». Трек *a* соответствует эволюции одиночной нейтронной звезды; трек *b* — нейтронной звезде в двойной системе; трек *v* — случаю, когда нейтронная звезда родилась в момент заполнения полости Роша нормальной звездой.

Эволюция звезды продолжается. Звезда расширяется и в некоторый момент заполняет всю полость Роша. Ее вещество начинает бурно перетекать на соседнюю звезду с характерным временем $10^4 - 10^5$ лет. Темпы перетекания достигают гигантских величин, $\sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$. При обмене веществом меняются параметры двойной системы. При перетекании вещества с большей звезды на меньшую расстояние между звездами уменьшается и уменьшается полость Роша нормальной звезды. А это, в свою очередь, увеличивает поток вещества. Так проходит III этап.

Дальнейшая эволюция двойной полна загадок и самых неожиданных возможностей. Сверхгигант, расширившись, может вообще «проглотить» нейтронную звезду и система прекратит свое существование как двойная. Но, вероятно, в большинстве случаев система выживает. И тогда наступает IV этап. Сбросив верхние слои, нормальная звезда оголяет гелиевое ядро. По-видимому, именно так и образуются звезды Вольфа — Райе (звезды, лишенные водорода). Живут они несколько сотен тысяч лет. Для них характерен очень мощный звездный ветер, $\approx 10^{-5} M_{\odot} / \text{год}$.

И наконец — V этап. Исчерпав источники ядерной энергии, ядро звезды коллапсирует, сбрасывая большую часть массы двойной. Система распадается.

Так выглядит вероятный сценарий эволюции массивной двойной. Этот сценарий был призван, в частности, объяснить, как именно возникают рентгеновские источники в двойных системах. Правдивость сценария должна проверяться на конкретных числах. Например, известно, что в Галактике не более 100 ярких рентгеновских массивных двойных. Значит, сценарий обязан объяснить это число. Исследователи и в этом случае, давая объяснения, упрощали ситуацию, сводя всю эволюцию двойной к эволюции только нормальной звезды. Делалось это следующим образом.

Считается, что на I этапе звездный ветер слаб и нейтронная звезда получает слишком мало «топлива» для аккреционной машины. Другое дело — II этап, когда звезда стала сверхгигантом и резко возрос поток вещества на нейтронную звезду. Большой темп аккреции и дает нам яркий рентгеновский источник. Таким образом, стадия эволюции двойной с римской цифрой II и есть рентгеновская стадия. Стоит звезде стать сверхгигантом — и вспыхнет яркий рентгеновский источник.

Но это, вообще говоря, неправильно. Мы видели, что наличие вещества вокруг нейтронной звезды вовсе не означает, что это вещество упадет на поверхность нейтронной звезды. Нужно еще учесть магнитное поле нейтронной звезды и ее скорость вращения. Нейтронная звезда тоже эволюционирует, и ее эволюцию также необходимо учитывать.

Чтобы описать состояние двойной, нужно указать не только стадию эволюции нормальной звезды, но и нейтронной звезды. Причем стадии эволюции нормальной

и нейтронной звезд, как правило, связаны нежестко. Двойная система с нейтронной звездой — это сумма одиночной нормальной и нейтронной звезд. Судьбы звезд переплетаются. Получаются не две эволюции, а эволюция «в квадрате».

ПЕТЛИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Диаграмма «Период — светимость» очень удобна для анализа эволюции нейтронной звезды. Причем магнитное поле нейтронной звезды играет роль, аналогичную массе обычной звезды при ее эволюции по диаграмме Герцшпрунга — Рассела. Чем мощнее магнитное поле нейтронной звезды, тем быстрее она переходит из одного состояния в другое.

Давайте качественно проследим за эволюцией нейтронной звезды в массивной двойной системе. Нейтронная звезда рождается с малым периодом и «появляется» внизу диаграммы в области эжектирующих звезд. Первое время, пока нормальная звезда эволюционирует медленно, можно считать, что параметры звездного ветра не меняются и потенциальная светимость нейтронной звезды постоянна. Звезда замедляет свое вращение, эжектируя релятивистские частицы и электромагнитные волны, и двигается вертикально вверх по диаграмме «Период — светимость» (рис. 24,б). (Декаметровое радиоизлучение эжектирующего пульсара поглощается в звездном ветре нормальной звезды, поэтому такой пульсар в радиодиапазоне мы не можем увидеть. Но более коротковолновое синхротронное излучение вполне может выходить из двойной системы. Так что в будущем такие двойные будут обязательно открыты.)

В некоторый момент период нейтронной звезды становится больше критического P_E и звезда переходит в режим P (пропеллер). При этом она продолжает замедляться, так что двигается по диаграмме в том же направлении. Если магнитное поле нейтронной звезды не очень мало, то она успевает замедлиться настолько, что становится возможной аккреция. Вспыхивает рентгеновский пульсар не очень большой светимости. Период пульсара перестает расти. Но чаще, прежде чем нейтронная звезда замедлится, нормальная звезда сходит с главной последовательности и резко возрастает темп аккреции. Нейтронная звезда еще чуть притормаживает и переходит

в аккреционное состояние. Вспыхивает яркий рентгеновский пульсар. Период нейтронной звезды перестает расти, потому что аккрецируемое вещество, обладая орбитальным моментом, ускоряет ее вращение. В среднем период рентгеновского пульсара застывает вблизи некоторого равновесного значения. Но это только в среднем. Из-за нестационарности в звездном ветре темп аккреции хаотически меняется и пульсар то ускоряется, то замедляется. При этом он может даже совершать переходы из режима аккреции в режим пропеллера и обратно ($A \leftrightarrow P$).

Далее нормальная звезда заполняет свою полость Роша и потенциальный темп аккреции увеличивается в миллион раз. Нейтронная звезда резко смещается на диаграмме вправо, переходя в состояние SA — сверхкритической аккреции (см. рис. 24,б). При этом звезда начнет быстро ускоряться, стремясь достичь нового равновесного периода. Оценки показывают, что нейтронная звезда ускоряется до периода, значительно меньшего одной секунды. Если при этом она не будет «проглочена» нормальной звездой, то образуется двойная, состоящая из звезды Вольфа — Райе и нейтронной звезды. Потенциальный темп аккреции резко уменьшается и аккреция становится невозможной. Нейтронная звезда, замыкая петлю, переходит в состояние пропеллера. Но времени у нее крайне мало. Звезды Вольфа — Райе живут очень недолго, нейтронная звезда не успевает снова стать рентгеновским пульсаром. В конце концов нормальная звезда взрывается и система распадается.

При этом старая нейтронная звезда вращается столь быстро, что снова становится радиопульсаром. Значит, распадаясь, двойная может рождать не один, а два пульсара одновременно. В наших обозначениях описанный эволюционный трек выглядит так:

$$E \rightarrow P \rightarrow A \rightarrow SA \rightarrow P \rightarrow E \rightarrow \dots$$

Эволюция одиночной нейтронной звезды изображается вертикальной прямой (трек *a* на рис. 24). По ней снизу вверх десятки и сотни миллионов лет «ползет» нейтронная звезда, проходя последовательно стадии эжекции, пропеллера и т. д. Впрочем, здесь есть неопределенность, связанная с тем, что мы до сих пор не знаем, исчезает ли со временем магнитное поле нейтронной звезды. Если поле не исчезает, то нейтронная звезда, скорее

всего, переходит в состояние G (с геоподобной магнитосферой). Тогда подавляющее число нейтронных звезд в Галактике — G-звезды.

Если же поле исчезает, должен наступить режим аккреции. Эволюция одиночной нейтронной звезды выглядит так:

$$E \rightarrow P \rightarrow A.$$

Эволюционные треки нейтронных звезд в двойных системах разнообразны. Те нейтронные звезды, которые проходят стадию яркого рентгеновского пульсара, совершают петли по диаграмме «Период — светимость» и становятся опять радиопульсарами.

Качественная картина эволюции нейтронных звезд весьма приближенна, и с ее помощью нельзя рассчитать, сколько и каких нейтронных звезд в Галактике. Поэтому возникает необходимость применять иные методы.

СДЕЛАЙ «ГАЛАКТИКУ» САМ

В начале 80-х годов советские астрофизики сделали первую попытку рассчитать совместную эволюцию (эволюцию «в квадрате») нормальных и нейтронных звезд в массивных двойных системах. Но сначала нужно было упорядочить и значительно упростить задачу. Для этого была придумана двумерная классификация двойных систем с нейтронными звездами. Каждую стадию эволюции нормальной звезды решили обозначать римской цифрой, как это показано на рисунке 23. А для описания состояния нейтронной звезды использовали буквенные обозначения E, P, A,..., которые расшифровывались выше. Тогда состояние каждой двойной стало возможно выразить символом XY, где:

$$\begin{aligned} X &= \text{I, II, III, IV, V,} \\ Y &= \text{E, P, A, SE, SP, SA, G, BN.} \end{aligned}$$

Например, IIA — это система, в которой имеются сверхгигант и аккрецирующая нейтронная звезда. Типичный представитель такой системы — система пульсара Сеп X-3. Если, используя введенные обозначения, просто пересчитать число систем с нейтронной и нормальной звездами, то получится 40 типов (звезды типа M не возникают в массивных двойных). Конечно, не все они

реализуются в природе. Забегая вперед, скажем, что реализуется и реально может наблюдаться лишь треть от общего числа систем, т. е. ≈ 15 . Но и это неизмеримо больше того, что наблюдается сейчас. Напомним, что в двойных системах наблюдаются только аккрецирующие нейтронные звезды в паре со сверхгигантами (системы типа IIА).

Для того чтобы восстановить полную картину, происходящую в массивных двойных системах, был выбран метод Монте-Карло. Этот строгий математический метод расчета взял свое название от известного курортного города, богатого игорными домами. Идея его состоит в том, что «разыгрывается» большое число двойных звезд со случайными начальными параметрами. «Игра» заключается в том, что каждая такая система развивается по вполне определенным законам. При этом мы следим как за эволюцией нормальной звезды, так и за эволюцией нейтронной звезды.

Вообще говоря, точный расчет эволюции одиночной звезды требует сотен часов машинного времени. А мы хотим рассчитать эволюцию тысяч звезд, да к тому же не просто эволюцию, а эволюцию «в квадрате». Естественно, пришлось упростить законы эволюции. Это позволило рассчитать не только число различных систем с нейтронными звездами в Галактике, но и выяснить их физические свойства.

Что же получилось в результате эволюции этой «самодельной галактики»? Она оказалась гораздо многообразнее того, что мы сейчас знаем о реальной Галактике. Как и ожидалось, рентгеновские пульсары в массивных двойных системах — это один из наиболее малочисленных классов нейтронных звезд. Большинство звезд этого класса — эжектирующие звезды и пропеллеры, часто встречаются и геоподобные звезды.

Но возникает вопрос, насколько похожи «искусственные» и наблюдаемые рентгеновские пульсары. Для сравнения были нанесены на диаграмму «Период — светимость» «самодельные» и настоящие пульсары (рис. 25). Оказалось, что их нетрудно спутать (по свойствам). Это говорит о том, что в азарте игры мы недалеко ушли от действительности.

Более того, удалось кое-что и предсказать. Так, при расчете каждого очередного разыгранного варианта «галактики» выпадали рентгеновские пульсары с периода-

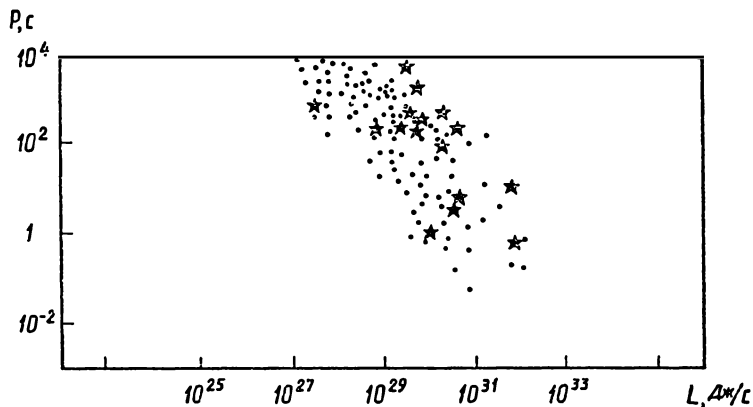


Рис. 25. Диаграмма «Период — светимость» для рентгеновских пульсаров.
(Точками показаны «искусственные» пульсары, звездочками — наблюдаемые.)

ми в несколько сотых долей секунды. Это огорчало, так как в то время (1981 г.) таких пульсаров не наблюдали, самым быстрым из рентгеновских пульсаров был тогда пульсар в Малом Магеллановом Облаке (SMC X-1) с периодом 0,71 с. Однако вскоре американские астрофизики обнаружили сверхбыстрый рентгеновский пульсар A0535-66 с периодом 0,069 с, что подтверждало расчеты.

Остальные нейтронные звезды не с чем пока сравнить — они еще не открыты. Конечно, не нужно сидеть и ждать, пока все это будет открыто. Одна из важных целей создания «искусственной галактики» состоит в том, чтобы выяснить, какие комбинации действительно реализуются (см. цветную вклейку 6), чтобы не решать абстрактную задачу, а заниматься детальным исследованием реально существующих объектов в Галактике. Так «искусственная галактика» открывает новые пути исследований (рис. 26).

Важнейшим результатом, например, является то, что должны быть массивные двойные с радиопульсарами. Их просто мало. Но рано или поздно их откроют. Тогда мы получим уникальный инструмент для исследования звездного ветра звезд. Такой пульсар подобен естественному зонду, просвечивающему звездный ветер радиоволнами. Расчеты, проведенные М. Е. Прохоровым и автором, показали, что, наблюдая запаздывание импуль-

сов на разных частотах, уменьшение интенсивности излучения и вращение плоскости поляризации, можно восстановить полную картину движения вещества в двойной системе.

В некоторых двойных взаимодействие эжектирующего пульсара со звездным ветром нормальной звезды может привести к новому явлению — радиобарстеру. Возможно, именно таким источником является необычный радиисточник LSI+61 в созвездии Кассиопеи. Каждые 26 дней от него резко возрастает радиоизлучение.

Результаты расчетов показали, что в Галактике должны быть системы, находящиеся в состоянии сверхкритической аккреции (SA), хотя число их раз в пять меньше, чем число рентгеновских пульсаров, которых около 20. Возможно, именно такой нейтронной звездой (SA) и является необычный объект SS 433.

Группа американских астрономов в 1979 г. обнаружила, что в спектре звезды V 1343 Орла (SS 433) у каждой «нормальной» спектральной линии есть по два спутника, сдвинутых в фиолетовую и красную стороны. Анализ показал, что спутники образуются в двух струях газа, выбрасываемых в противоположные стороны со скоростью 80 000 км/с. Вскоре эти струи были обнаружены в радио- и рентгеновском диапазонах. Важнейшее открытие сделал советский астрофизик А. М. Черепашук. Он обнаружил оптические затмения у этой звезды и показал, что это — массивная двойная, где нормальная звезда, по-видимому, заполняет свою полость Роша. Природа второй звезды пока неизвестна. Но возможно, что она

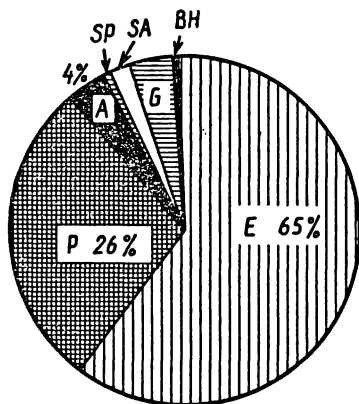


Рис. 26. Распределение числа нейтронных звезд по их типам, вычисленное с помощью «искусственной галактики».

является нейтронной звездой. Тогда по классификации, рассмотренной нами, SS 433 принадлежит к типу III SA.

Как видим, такие предположения не противоречат расчетам. В «самодельной галактике» таких объектов около 20.

ПОГОНЯ ЗА «УБЕГАЮЩИМИ» ЗВЕЗДАМИ

Еще в начале 60-х годов голландский астрофизик Блау провел детальное исследование звезд, получивших название «убегающих». Звезды диска в Галактике наряду с упорядоченным вращением вокруг ее центра участвуют в хаотическом движении. Средняя хаотическая скорость большинства из них близка к 20—30 км/с. Благодаря этому звезды Галактики располагаются не в виде абсолютно тонкого диска (наподобие колец Сатурна), а в виде диска конечной толщины. Чем больше хаотическая компонента скорости звезды, тем выше она может быть заброшена над плоскостью Галактики (высота над этой плоскостью еще называется *z*-координатой). И вот оказывается — в Галактике есть звезды, скорость которых значительно выше средней и достигает сотен километров в секунду. Такие звезды выбрасываются высоко над плоскостью Галактики, и поэтому их называют «убегающими».

Согласно современному сценарию эволюции массивных двойных, большую скорость двойная система приобретает при первом коллапсе. Коллапсируя, звезда сбрасывает большую часть массы. Но оболочка, улетая, уносит не только массу, но и импульс. Ведь до взрыва вещество оболочки двигалось с орбитальной скоростью. По закону сохранения импульса двойная система получает импульс отдачи. Расчеты показывают, что скорость, приобретаемая двойной при первом взрыве, может достигать сотен километров в секунду. Отсюда следует вывод, что «убегающие» звезды — это двойные системы с нейтронными звездами. На это обратил внимание И. С. Шкловский в 1975 г., а Б. В. Кукаркин и А. М. Черепашук указали на необходимость спектральных наблюдений, чтобы доказать двойственность этих звезд.

Характерно, что на протяжении десяти лет со времени запуска «Ухуру» от «убегающих» звезд не было обнаружено рентгеновского излучения. Расчеты эволюции нейтронных звезд в массивных двойных легко объясняют

этот факт. Ведь «убегающие» звезды по классификации — двойные системы, принадлежащие, как правило, к типу I, O — В-звезда далека от заполнения своей полости Роша. Согласно расчетам, в этих системах нейтронные звезды находятся в состоянии эжекции и пропеллера (Е и Р) и, следовательно, не могут быть рентгеновскими пульсарами. Это вселяет уверенность в то, что рядом с «убегающими» звездами должны обязательно находиться невидимые нейтронные звезды.

Недавно А. А. Асланов и А. М. Черепашук действительно обнаружили невидимые спутники у некоторых «убегающих» звезд. Массы спутников близки к массе Солнца. Так и должно быть, если эти спутники — нейтронные звезды. Естественно, что знания одной массы еще недостаточно для доказательства релятивистской природы спутника. Нужно попытаться найти какие-то проявления самих нейтронных звезд.

Если такая нейтронная звезда является эжектирующим пульсаром, то есть надежда, что релятивистские частицы, генерируемые пульсаром, будут давать синхротронное излучение, «врезаясь» в соседнюю звезду (точнее, взаимодействуя с ее истекающим ветром и магнитным полем). При этом можно ожидать излучения в очень широком диапазоне: от радиоволн до гамма-излучения самых высоких энергий. На этот своеобразный эффект отражения автор обратил внимание в 1980 г.

В 1984 г. М. Е. Прохоров и автор более подробно рассмотрели взаимодействие нейтронной звезды со звездным ветром в двойной системе. Вокруг нейтронной звезды образуется «каверна», заполненная электромагнитными волнами и релятивистскими частицами (рис. 27). При определенных условиях каверна всплывает из двойной системы и лопаается в звездном ветре. Затем возникает новая и т. д. Картина явления напоминает бурление в кипящем чайнике, в котором со дна всплывают и лопаются пузыри, заполненные паром. В двойной системе такое «бурление» приводит к появлению вспышек в радиодиапазоне.

Анализ «искусственной галактики» показывает, что число систем, от которых можно ожидать радиоизлучения синхротронного типа, не безнадежно мало. И действительно, в 1984 г. появилось сообщение американских радиоастрономов об обнаружении переменного нетеплового радиоизлучения от двух голубых O-звезд. Конечно,

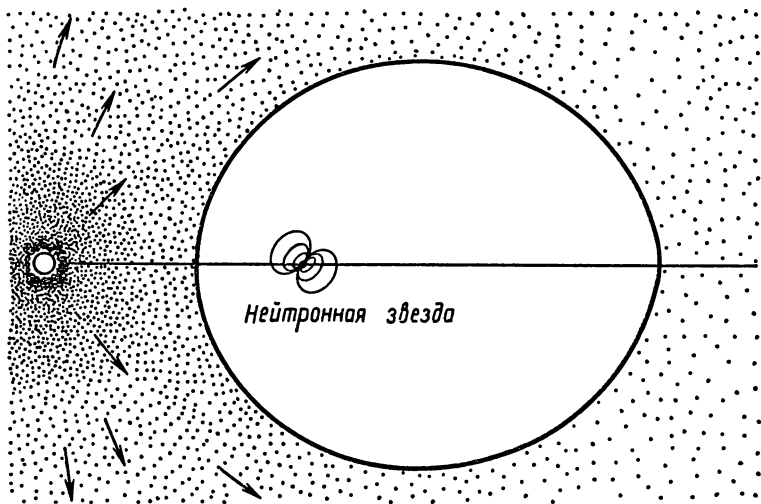


Рис. 27. Каверна вокруг эжектирующей нейтронной звезды в двойной системе.

эти наблюдения еще нуждаются в тщательной проверке, но кажется, что здесь мы столкнулись с эжектирующей стадией (Е) нейтронных звезд в массивных двойных системах.

Стадия пропеллера пока изучена очень плохо, и остается только гадать о возможных проявлениях нейтронных звезд типа Р.

Другой резервуар нейтронных звезд — «одиночные» звезды Вольфа — Райе. Эти звезды обладают всеми признаками «убегающих» звезд — большими лучевыми скоростями или большими z -координатами. Они долгое время считались одиночными, и лишь в начале 80-х годов удалось обнаружить следы их двойственности. Интересно, что и у «убегающих» О — В-звезд, и у «одиночных» звезд Вольфа — Райе невидимые спутники оказались маломассивными ($\approx 1 M_{\odot}$).

Таким образом, первые успехи налицо. Но погоня продолжается.

НАДО СПЕШИТЬ

История предсказания и открытия нейтронных звезд — это постоянное состязание теории и наблюдений, которое шло с переменным успехом. Нейтронная звезда — одно из самых удачных предсказаний физической теории.

И в то же время, наряду с реликтовым излучением и квазарами, оно является примером неожиданного открытия («серендипити»). С начала их исследования стало ясно, что во Вселенной наряду с обычными звездами, которые светят за счет выделения ядерной энергии, существует совершенно новый тип звезд, живущих по другим законам.

Открытия 70-х годов (рентгеновские пульсары, барстеры, временные источники, гамма-всплески) поставили много вопросов. До сих пор непонятно, что является причиной гамма-всплесков, нет ясного понимания того, что происходит в системе SS 433. И все же главная мысль, которую автор хотел подчеркнуть, состоит в том, что природа еще многообразнее. Залог этому — удивительные свойства нейтронных звезд, которые отличают их от всего остального. Наблюдательные проявления этих звезд очень сильно зависят от характера их взаимодействия с окружающим веществом. Взаимодействие осуществляется посредством гравитации и электромагнетизма. Уравнения, которые мы пишем при этом, внутренние столь богаты, что возникает целый «зоопарк» нейтронных звезд.

Уже первый анализ эволюции массивных двойных показал: то, что мы наблюдаем, — всего лишь бледная тень того, что реализует природа. Помните, мы прикидывали общее число нейтронных звезд в Галактике. Их около полумиллиарда. Многие из них живут своей, не похожей на ранее известные формы жизнью.

Есть еще один, совершенно не иссякающий резервуар нейтронных звезд — двойные системы малых масс. Нейтронные звезды образуются там реже, но зато живут они гораздо дольше, чем в массивных двойных. Кроме того, звезды малых масс рожают белые карлики, которые, подобно нейтронным звездам, могут обладать мощными магнитными полями и эволюционируют по тем же законам!

Такие исследования уже начаты, но нужно спешить, потому что не за горами очередной прорыв в области эксперимента — запуск космического телескопа и рентгеновской обсерватории «АХАФ»¹. Чувствительность последней будет в 10 тыс. раз выше, чем «Ухуру». Запуск

¹ «АХАФ» — advanced X-ray astrophysics facility — современное рентгеновское астрофизическое оборудование.

аппаратуры с высоким спектральным разрешением в рентгеновском диапазоне планируется в СССР. В 1987 г. пошел на орбиту специализированный астрофизический модуль «Квант» с рентгеновской аппаратурой на борту. Это позволит перейти к изучению нейтронных звезд не только в нашей, но и в соседних галактиках. Астрофизика нейтронных звезд станет внегалактической. К этому нужно быть готовыми.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Амнуэль П. Р. Релятивистская астрофизика сегодня и завтра.— М.: Знание, 1979.
- Амнуэль П. Р. Небо в рентгеновских лучах.— М.: Наука, 1984.
- Дайсон Ф., Тер Хаар Д. Нейтронные звезды и пульсары.— М.: Мир, 1973.
- Каплан С. А. Физика звезд.— М.: Наука, 1976.
- Липунов В. М. В мире двойных звезд.— М.: Наука, 1986.
- Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной.— М.: Знание, 1977.
- Шакура Н. И. Нейтронные звезды и черные дыры в двойных звездных системах.— М.: Знание, 1976.
- Шкловский И. С. Звезды, их рождение, жизнь и смерть.— М.: Наука, 1984.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	3
Вечные звезды	4
Сверх, сверх, сверх...	8
Аккреция на Земле и в космосе	10
Аспирантка из Серендипа	14
Униполярный индуктор и сырое яйцо	18
Простота — залог надежности	23
«Экспериментум круцис»	25
Древо жизни	32
Не оглядываясь на наблюдения	36
«Великое объединение»	39
Эволюция «в квадрате»	47
Петли нейтронных звезд	50
Сделай «галактику» сам	52
Погоня за «убегаящими» звездами	56
Надо спешить	58
<i>Рекомендуемая литература</i>	61

Учебное издание

ЛИПУНОВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

ВСЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Зав. редакцией *И. А. Иванов*
Редактор *Л. С. Мордовцева*
Младший редактор *О. В. Агапова*
Художники *О. М. Шмелев, В. С. Давыдов*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технический редактор *Т. В. Степушкина*
Корректор *О. В. Ивашкина*

ИБ № 10596



Сдано в набор 05.02.88. Подписано к печати 18.08.88. А05747. Формат 84×108¹/₃₂. Бум. кн.-журн. отечеств. Гарнит. литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36+0,21 вкл. Усл. кр.-отт. 3,26. Уч.-изд л. 3,12+0,21 вкл. Тираж 100 000 экз. Заказ № 2050. Цена 15 коп. Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной роши, 41. Калининский ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР Росглавполиграфпрома Госкомиздата РСФСР. 170040, Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ»
В 1988 г. ВЫПУСТИТ ДЛЯ УЧАЩИХСЯ
СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ:**

1. Гнедина Т. Е. Физика и творчество в твоей профессии.

Книга посвящена становлению новой личности современного рабочего, умеющего использовать физические знания в изобретательской деятельности в условиях цеха, лабораторий, конструкторского бюро, мастерской.

На конкретных примерах автор показывает сложное взаимодействие физической науки, производства и социальных процессов, в которых современный производственник должен уметь занять активную, творческую позицию.

2. Зигель Ф. Ю. Астрономия в ее развитии.

Книга рассказывает об истории развития астрономии — от ее зарождения до современных успехов астрофизики, внегалактической астрономии, космогонии, космологии. Читатель узнает о прошлом, настоящем данной науки и ее перспективах, о борьбе, подчас драматической, за победу научного мировоззрения, о том, как человек постоянно познает окружающий мир.

3. Филонович С. Р. Шарль Кулон.

Книга посвящена описанию жизни и деятельности выдающегося французского инженера и естествоиспытателя Шарля Кулона.

Имя этого ученого известно каждому школьнику: его носит основной закон электростатики — закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов. Кулону также принадлежат работы по механике и магнетизму, результаты которых вошли в золотой фонд науки. Ученый был современником Великой французской революции, поэтому исследовательская деятельность Кулона освещается в книге на фоне исторических событий второй половины XVIII — начала XIX вв.

**4. Чернощекова Т. М., Френкель В. Я.
И. В. Курчатов.**

Книга, посвященная жизни и деятельности выдающегося физика И. В. Курчатова, не только дает представление об основных направлениях его научной деятельности, но и раскрывает замечательные человеческие качества ученого: подлинный гуманизм, трудолюбие. Личность И. В. Курчатова оказала большое влияние на современников и может служить примером для подрастающего поколения.