

БЕЛЫЕ

Б У Д У Щ Е Е В С Е Л Е Н Н О Й

КАРЛИКИ

А Л Е К С Е Й Л Е В И Н



ТРАЕКТОРИЯ



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Алексей Левин

**Белые карлики.
Будущее Вселенной**

«Альпина Диджитал»

2020

УДК 524.3
ББК 22.66

Левин А.

Белые карлики. Будущее Вселенной / А. Левин — «Альпина Диджитал», 2020

ISBN 978-5-0013-9373-3

Перед вами первая книга на русском языке, почти целиком посвященная остывающим реликтам звезд, известным под именем белых карликов. А ведь судьба превратиться в таких обитателей космического пространства ждет почти все звезды, кроме самых массивных. История открытия белых карликов и их изучение насчитывает десятилетия, и автор не только подробно описывает их физическую природу и во многом парадоксальные свойства, но и рассказывает об ученых, посвятивших жизнь этим объектам Большого космоса. Кроме информации о сверхновых звездах и космологических проблемах, связанных с белыми карликами, читатель познакомится с историей радиоастрономии, узнает об открытии пульсаров и квазаров, о первом детектировании, происхождении и свойствах микроволнового реликтового излучения и его роли в исследовании Вселенной.

УДК 524.3
ББК 22.66

ISBN 978-5-0013-9373-3

© Левин А., 2020
© Альпина Диджитал, 2020

Содержание

Предисловие	7
Часть I	10
1	10
2	14
3	18
4	20
5	24
6	31
7	33
8	37
9	40
Конец ознакомительного фрагмента.	42

Алексей Левин

Белые карлики. Будущее Вселенной

Научный редактор *Дмитрий Вибе*, д-р физ. – мат. наук

Редактор *Антон Никольский*

Издатель *П. Подкосов*

Руководитель проекта *И. Серёгинга*

Корректоры *Т. Дейкина, Е. Дейкина, М. Ведюшкина*

Компьютерная верстка *А. Фоминов*

Дизайн обложки *Ю. Буга*

© А.Е. Левин, 2021

© ООО «Альпина нон-фикшн», 2021

Все права защищены. Данная электронная книга предназначена исключительно для частного использования в личных (некоммерческих) целях. Электронная книга, ее части, фрагменты и элементы, включая текст, изображения и иное, не подлежат копированию и любому другому использованию без разрешения правообладателя. В частности, запрещено такое использование, в результате которого электронная книга, ее часть, фрагмент или элемент станут доступными ограниченному или неопределенному кругу лиц, в том числе посредством сети интернет, независимо от того, будет предоставляться доступ за плату или безвозмездно.

Копирование, воспроизведение и иное использование электронной книги, ее частей, фрагментов и элементов, выходящее за пределы частного использования в личных (некоммерческих) целях, без согласия правообладателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.



Памяти моего отца Ефима Ароновича Левина, одного из лучших выпускников знаменитого МИФЛИ, отдавшего жизнь в битве за Москву в конце 1941 г.

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжного).



Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» (www.traektoriafdn.ru) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

Предисловие

Предмет этой монографии обозначен в названии. Автор в моем лице намерен подробно (разумеется, в границах научно-популярного жанра) рассказать о чрезвычайно интересном семействе звезд, именуемых «белыми карликами». Этот термин отнюдь не нов – ему почти сотня лет. О его происхождении говорить рано, на это еще будут и время, и место. А пока попытаюсь ответить на вполне законный вопрос, который, возможно, возникнет у читателей и уж точно у потенциальных издателей: имеет ли смысл рассказывать неспециалистам об этих звездах, да еще писать целую книгу? Иначе говоря, заслуживают ли они такого внимания?

Вот несколько аргументов в пользу утвердительного ответа. Начну с того, что белые карлики чрезвычайно многочисленны. Более того, за ними будущее. Согласно данным звездной статистики, свыше 90 % всех когда-либо загоревшихся звезд либо уже превратились в белые карлики, либо станут ими спустя миллионы или миллиарды лет. Это справедливо и для светил, которым еще только суждено воссиять как в нашей Галактике, так и в других звездных системах. Поэтому о них стоит рассказывать хотя бы из уважения к принципам демократии. К тому же белым карликом в будущем (по счастью, весьма отдаленном) станет и наше собственное Солнце, чья судьба нам отнюдь не безразлична.

Конечно, есть и другие причины. История открытия и исследования белых карликов очень богата и поучительна. Она содержит множество любопытных случайностей, маловероятных совпадений и даже анекдотов. Она помогает понять, как делается реальная наука, а не ее приглаженная и спрямленная версия, которую приводят в учебниках, что уже немало.

Проникновение в эту историю также может стать хорошим интеллектуальным упражнением. В прошлом для понимания природы и свойств белых карликов ученым нередко приходилось адаптировать для нужд астрономии инструменты фундаментальной физики, в том числе совершенно новые для своего времени. Эта тенденция сохраняется и поныне – тем более что наблюдение белых карликов средствами современной астрономии по-прежнему преподносит интереснейшие сюрпризы. Поэтому я постарался как можно полнее погрузить читателя не только в астрономию белых карликов, но и в астрофизические и космологические аспекты их исследования. А таковых много, и они весьма нетривиальны.

И наконец, немаловажная причина – дефицит доступной на русском языке литературы. Я не видел ни единой отечественной или же переводной научно-популярной книги, посвященной белым карликам. Честно говоря, я даже не знаю русскоязычных монографий по этой теме, предназначенных для специалистов. И это как-то обидно. Если есть книги о звездах вообще, о нейтронных звездах и о черных дырах, то не пора ли отдать запоздалую дань уважения белым карликам? Повторяю, они того стоят!

Существующая литература по белым карликам очень обширна. Как и положено, она включает и оригинальные публикации, и обзорные статьи, и монографии. Я не стремился, да и физически не мог включить в книгу весь огромный архив знаний, накопленных о белых карликах. Поэтому мой выбор вошедших в нее вопросов оказался – и не мог не быть – в какой-то мере произвольным и, безусловно, отражающим мои личные научные интересы. Однако я льщу себя надеждой, что большинство из них все же нашло в книге достаточно полное отражение.

Сказанное относится и к цитированной литературе. Некоторые авторы и редакторы (правда, сейчас их стало меньше) уверены, что в научно-популярных книгах таковая вообще неуместна. Есть и другая крайность – текст, до предела нашпигованный разнообразными библиографическими указаниями. Будучи сторонником золотой середины, я снабдил книгу лишь ссылками на основополагающие публикации, посвященные не только непосредственно белым карликам, но и другим сторонам астрономии, связанным с их открытием и исследованием.

Поступить иначе было бы нечестно по отношению к десяткам замечательных ученых, которым мы обязаны сегодняшним пониманием ключевых проблем науки о Вселенной.

Книга неформально делится на несколько блоков. В первой главе я представил собственную картину становления и развития астрономии – от публикации великой книги Коперника «Об обращениях небесных сфер» (*De revolutionibus orbium coelestium*) нюрнбергским издателем Иоганном Петреусом в 1543 г. Вторая глава содержит краткое описание новейших тенденций в развитии науки о космосе, которые символизирует термин «многоканальная астрономия». Третья глава – свод минимально необходимых знаний по звездной астрономии, без которых читать книгу о белых карликах было бы затруднительно. В общем, это историческое и концептуальное введение к основной теме.

В четвертой главе подробно описана история открытия первых белых карликов, позже названных классическими. Пятая посвящена созданию замечательной системы классификации звезд, которая позволила включить сведения о белых карликах в общий интеллектуальный багаж астрономии. Все эти события имели место в теперь уже незапамятные времена – до 1918 г. Шестая глава повествует о последующем поиске белых карликов вплоть до второго десятилетия XXI в.

Следующие три раздела отданы астрофизике белых карликов. В седьмой главе говорится об особенностях и классификации их спектров, в восьмой – о пульсациях и магнитных свойствах. Девятая глава несколько выходит за эти рамки – там рассказано, как исследование белых карликов связано с поиском ответов на некоторые фундаментальные вопросы физики элементарных частиц.

Десятая, одиннадцатая и двенадцатая главы возвращают читателя к истории теоретических поисков, которые позволили понять природу белых карликов. Они начались во второй половине XIX в. и принесли не нуждающиеся в пересмотре (как говорят науковеды, финализированные) результаты в 1920–1930-е гг. Отсюда рукой подать до экскурсии в физику звезд, которой посвящены следующие три главы – с тринадцатой по пятнадцатую.

Затем идут вещи разнообразные. В шестнадцатой главе рассказано об определении возраста Вселенной с помощью наблюдений белых карликов, в семнадцатой и восемнадцатой – о механизмах их превращения в сверхновые звезды. Потом следуют три главы о кристаллизации белых карликов и их довольно близких родственниках – карликах коричневых, или, в другом переводе, бурых. Следующие главы с двадцать второй по двадцать четвертую повествуют о белых карликах в двойных системах, о гравитационной астрономии и о недавно открытой чрезвычайно тесной паре этих звезд. Из главы под номером двадцать пять читатель узнает о предстоящем превращении Солнца в белый карлик, а из двадцать шестой – о том, как такую же эволюцию когда-то претерпел спутник Сириуса, а также, как и когда самая яркая звезда земного небосвода последует его примеру. Ближе к завершению моего рассказа о белых карликах появится глава о самых первых звездах, которые никак не могли стать белыми карликами, но, так сказать, подготовили для них почву. А в заключение, по логике вещей, поговорим о финальной стадии Вселенной, где немалая роль опять-таки отведена белым карликам.

Последние четыре главы не совсем о белых карликах, но тесно с ними связаны. Я решил добавить еще несколько тем, пришедших в науку о космосе во второй половине прошлого века. Тридцатая глава посвящена самому блестящему достижению конца столетия – открытию темной энергии и его значению для астрономии и космологии. Глава за номером тридцать один повествует о нескольких экстравагантных космологических моделях, изобретенных высокоумными математиками. В тридцать второй главе детально рассмотрена история открытия в 1960-е гг. квазаров и пульсаров средствами тогда еще относительно новой науки – радиоастрономии. Из последней, тридцать третьей главы читатель узнает еще об одном великом достижении радиоастрономии этого славного десятилетия – открытии реликтового излучения. И не только о самом открытии, но также о физических свойствах этого излучения, механизмах его гене-

рации и информационном потенциале. В ней будет несколько больше физики, чем в других частях книги, но, надеюсь, она не покажется читателям скучной.

В конце предисловия принято выражать признательность коллегам, которые помогли автору советами, информацией и критическими замечаниями. Однако эта книга – плод индивидуальной работы, так что за ее погрешности отвечаю я один. Но хотел бы выразить безмерную благодарность моей любимой жене, которая отредактировала книгу куда лучше, чем смог бы это сделать я сам.

Часть I

Все о белых карликах

1

Три революции в астрономии

Открытие белых карликов случилось отнюдь не одномоментно. Оно стало следствием цепочки событий, растянувшейся до второго десятилетия прошлого века, когда новый этап развития астрономии привел к революционной перестройке ее теоретических и технических ресурсов. Чтобы понять эту перестройку, надо сначала разобраться, что ей предшествовало и что за ней последовало.

Как известно, знания о небесных телах собирались, копились и обобщались с незапамятных времен весьма разными культурами. В частности, в древнегреческом культурном ареале в IV в. до н. э. были созданы математические модели планетных движений, на базе которых в эллинистическую эпоху появились классические труды Аристарха Самосского, Архимеда, Аполлония из Перге и Гиппарха. Венцом эллинистической астрономии стала геоцентрическая модель движений Солнца, Луны и планет, изложенная в великом труде александрийского астронома II в. н. э. Клавдия Птолемея «Альмагест». Эта модель безраздельно господствовала на протяжении тринадцати с лишним столетий в арабской и западноевропейской науке.

Отказ от птолемеевского геоцентризма и постепенный переход к гелиоцентрическому описанию Солнечной системы обычно называют Коперниканской революцией. Однако этот радикальный пересмотр теоретического фундамента наблюдательной астрономии стал лишь начальным этапом гораздо более глубокой и всеобъемлющей трансформации науки о Вселенной, которая заслуживает титула Посткоперниканской революции. Николай Коперник лишил Землю статуса центра мироздания и низверг до уровня обыкновенной околосолнечной планеты. Однако еще несколько десятилетий его гелиоцентрическая модель (кстати, весьма несовершенная) практически не использовалась тогдашними астрономами. Только в начале XVII в. Иоганн Кеплер на основе прецизионных наблюдений датского астронома Тихо Браге определил истинную (эллиптическую, а не круговую, как у Коперника) форму планетных орбит и установил математическую связь между их геометрическими параметрами и временем обращения вокруг Солнца.

Но это было только началом Посткоперниканской революции. Астрономам потребовалось еще 100 лет для того, чтобы освоить телескопическую технику и опыт ее использования в обсерваториях. Хотя первые великие результаты оптической астрономии (открытие Галилеем спутников Юпитера и фаз Венеры, демонстрация многозвездности Млечного Пути, наблюдение солнечных пятен) были получены в первые годы применения телескопов, следующим поколениям ученых предстояло узнать еще очень многое. На этом пути были открыты спутники и кольца Сатурна, выполнено первое, хотя и очень неточное, измерение скорости света, обнаружены собственные движения звезд, определен период вращения Юпитера. Астрономии еще нужно было дождаться открытия Ньютоном закона всемирного тяготения и создания тремя поколениями блестящих математиков дифференциального и интегрального исчисления и способов решения дифференциальных уравнений. Так был постепенно накоплен арсенал математических приемов, только на основе которых и могли появиться эффективные вычислительные методы ньютоновской небесной механики.

Синтез этих нововведений завершился лишь в первой половине XVIII в., и именно он ознаменовал окончание (как говорят науковеды, финализацию) Посткоперниканской револю-

ции. Затем на протяжении целого столетия астрономия в основном развивала и совершенствовала созданные революцией ресурсы. На этом пути еще до конца XVIII в. и в первые годы XIX в. было получено немало замечательных результатов. Была обнаружена атмосфера Венеры, открыт Уран, а затем и первые астероиды, составлены каталоги космических туманностей, многие из которых сегодня называют галактиками, и даже, хотя и в сильно условном смысле, предсказано существование черных дыр. В середине XIX в. астрономия вновь блистала великолепными открытиями. В 1841 г. директор Берлинской обсерватории Иоганн Франц Энке вычислил массу Меркурия по возмущениям движения кометы, которая сейчас носит его имя. Тогда же было доказано, что орбита Меркурия поворачивается относительно Солнца, из-за чего эта планета описывает не замкнутый эллипс, а розетку. Скорость этого вращения очень невелика (за столетие меркурианский перигелий смещается всего на 575 угловых секунд), так что ее измерение продемонстрировало высокую точность телескопических наблюдений.

В принципе, в аномальном поведении ближайшей к Солнцу планеты не было ничего особенного. Из уравнений ньютоновской механики следует, что строго по эллипсу может двигаться лишь одиночная планета, не имеющая соседей. Однако на Меркурий влияют своим притяжением не только Солнце, но и прочие планеты, главным образом гигант Юпитер. В 1859 г. директор Парижской обсерватории Урбен Жан Жозеф Леверье доказал, что под действием гравитации Юпитера, Венеры, Земли и Марса и с учетом прецессии земной оси наблюдаемая с Земли орбита Меркурия должна поворачиваться чуть медленней, чем это происходит в действительности. Расхождение было ничтожным, около $2/3$ угловой минуты в столетие, но объяснить его никак не получалось. Причину дополнительного поворота обнаружил в конце 1915 г. Альберт Эйнштейн – на базе только что созданной общей теории относительности (ОТО). А пока что блестящие вычисления Леверье убедительно демонстрировали силу математических методов небесной механики.

Самым известным достижением посткоперниканской астрономии стало теоретическое предсказание и последующее наблюдение восьмой планеты Солнечной системы. Первым ее траекторию и даже массу в 1845 г. на основе анализа наблюдаемых аномалий движения Урана вычислил Кембриджский математик Джон Адамс. Годом позже это независимо сделал и Леверье, который тогда преподавал в Политехнической школе. Он поделился своими выводами с ассистентом Берлинской обсерватории Иоганном Галле. Галле с разрешения Энке сразу же приступил к наблюдениям и в ночь с 23 на 24 сентября 1846 г. обнаружил новую планету, которую Леверье назвал Нептуном. Правда, уже через год выяснилось, что 10 мая 1795 г. Нептун наблюдал французский астроном Мишель Лаланд, который, к несчастью для себя, считал его малоинтересной тусклой звездой (более того, не исключено, что его в 1612 г. и 1613 г. видел и Галилей). Очень важно, что Нептун был замечен не в ходе рутинных телескопических наблюдений (именно так 13 марта 1781 г. великий британский астроном немецкого происхождения Уильям – до переезда в Британию Фридрих Вильгельм – Гершель обнаружил Уран), а, как часто говорят, открыт на кончике пера. Это стало международной сенсацией, которая как нельзя более убедительно продемонстрировала мощь астрономической науки.

Как нередко случается, именно на время высшего торжества этой зрелой научной парадигмы пришлось начало очередного радикального обновления технических ресурсов и концепций той области знания, где она безраздельно господствовала. Я бы назвал его Революцией счастливого союза – или, не столь экспрессивно, Астрофизической революцией. С середины XIX в. в астрономию начали проникать методы экспериментальной физики, которые к концу столетия превратили ее едва ли не в новую науку. Такая интеграция (Счастливый Союз!) астрономических и физических исследований повлекла за собой появление астрофизики как научной дисциплины, которая фактически стала не просто компаньоном классической астрономии, но ее естественной и даже стержневой частью. Институциональным оформлением этого процесса стало учреждение в 1895 г. в США специализированного журнала с международной

редколлегией (*The Astrophysical Journal: An International Review of Spectroscopy and Astronomical Physics*) и последующее проникновение астрофизики в университетские программы и исследовательские планы астрономических обсерваторий по всему миру.

Самым очевидным признаком начала Астрофизической революции стало систематическое получение и изучение звездных спектров. Правда, солнечные спектры и спектры отдельных звезд наблюдались уже в первые десятилетия XIX в. – прежде всего феноменально одаренным немецким оптиком-самоучкой Йозефом Фраунгофером. Однако эти исследования если и затрагивали тогдашнюю астрономию, то разве что по касательной. Спектроскопия (включая и спектрофотографию) звездного света как отдельный и быстро прогрессирующий раздел астрономии ведет свое начало с 1860-х гг. Не берусь излагать ее историю – это увело бы нас слишком далеко от основной темы этой главы. Однако нельзя не отметить, что идентификация белых карликов во втором десятилетии XX в. стала возможной только благодаря хорошо развитым к тому времени методам звездной спектроскопии.

В истории Астрофизической революции это открытие занимает совершенно особенное место. Оно *впервые* выявило небесные тела (поначалу всего три), чье существование противоречило тогдашним представлениям о природе вещества. Фактически это был первый вклад астрофизики в фундаментальную физику.

Это стало ясным не сразу, но и без большой задержки. Понимание природы белых карликов пришло во второй половине 1920-х гг., когда были созданы основы квантовой механики и квантовой статистической физики. Доквантовая, она же классическая, физика эту задачу решить не могла и не решила. Поэтому открытие белых карликов можно считать предтечей близкой зрелости Астрофизической революции. Уместно отметить, что за время между идентификацией первого и второго белого карликов сотрудник венского Радиевого института Виктор Франц Гесс обнаружил проникающие в атмосферу Земли заряженные частицы внеземного происхождения, которые называли космическими лучами. И это можно счесть вторым великим открытием астрофизики XX в.

Финализация Астрофизической революции произошла в начале четвертого десятилетия XX в. К этому времени влияние астрофизики на прогресс астрономии стало воистину всеобъемлющим. В концептуальном плане оно дало астрономии возможность адаптировать такие величайшие достижения теоретической физики, как специальная и общая теория относительности и квантовая механика. В 1920-е гг. астрофизические методы позволили окончательно доказать, что космос не исчерпывается Млечным Путем, а заполнен множеством галактик, удаленных от нас на миллионы и, как вскоре выяснилось, миллиарды световых лет. Тогда же Эдвин Хаббл с помощью этих методов доказал, что галактики разбегаются по всем направлениям, причем скорость их разлета пропорциональна расстоянию до Солнечной системы. Математическая формулировка этого утверждения составляет знаменитый закон, который теперь носит его имя. Открытие расширения Вселенной, которое описывается законом Хаббла, стало началом космологии как новой научной дисциплины, основанной на астрономических и астрофизических наблюдениях.

Феноменальный прогресс науки о космосе в 1930–1990-е гг. (и особенно во второй половине прошлого века) непосредственно развивал возможности, заложенные Астрофизической революцией. Достижения этого времени настолько многочисленны и знамениты, что перечислять их нет ни возможности, ни даже смысла. Вот всего лишь несколько примеров. В дополнение к оптической астрономии появились радиоастрономия, инфракрасная и ультрафиолетовая астрономия, рентгеновская астрономия и гамма-астрономия. Астрономия стала использовать весь электромагнитный спектр – как часто говорят, сделалась всеволновой. Была создана (и убедительно подтверждена наблюдением микроволнового реликтового излучения) горячая модель рождения Вселенной в результате Большого взрыва, открыты активные ядра галактик, нейтронные звезды и черные дыры, обнаружены первые внесолнечные планеты. В

1997–1999 гг. было доказано, что наша Вселенная не просто расширяется, как следует из закона Хаббла, но расширяется с ускорением (иначе говоря, скорость ее расширения возрастает). Стадия ускоренного расширения началась около 5 млрд лет назад, незадолго до рождения Солнечной системы. Это замечательное открытие опять-таки было сделано благодаря постоянной модернизации технических и интеллектуальных ресурсов, восходящих к Астрофизической революции. Его прямым следствием и венцом стало создание Стандартной космологической модели Вселенной (Λ CDM cosmological model).

А теперь к нам в дверь стучится новая астрономическая революция – третья по счету. Для нее уже готово название. В последние годы в англоязычной литературе все чаще фигурирует словосочетание *multimessenger astronomy* (ММА). В отечественной литературе применяется несколько вольный перевод этого термина – многоканальная астрономия. Оно начало мелькать в научных статьях с конца первого десятилетия нашего века. Если говорить о монографиях, то, насколько я знаю, впервые оно появилось в книге «Усовершенствованные детекторы гравитационных волн»¹.

Что вызвало его к жизни? Многоканальность означает переход астрономии (и, естественно, астрофизики) к комплексной – как аппаратной, так и теоретической – обработке сигналов о космических событиях, порожденных самыми разными физическими процессами и потому приходящих по множеству каналов. Эти каналы (например, радиосигналы, оптические и рентгеновские фотоны, а в самые последние годы также гравитационные волны и потоки нейтрино) принято называть мессенджерами.

Сейчас наблюдения посредством широкого набора мессенджеров вышли на передний край астрономии и астрофизики. Они обещают особенно богатый урожай при изучении самых высокоэнергетичных космических процессов и событий, который может принести уточнение и даже пересмотр как астрофизических моделей, так и фундаментальных физических законов. Всего за несколько лет на этом пути получено немало замечательных результатов – например, зарегистрировано слияние черных дыр и нейтронных звезд. Это только первые плоды третьей астрономической революции, Революции многоканальности. Она разворачивается на наших глазах, и наблюдать за ней чрезвычайно интересно. Возможно, кому-то из читателей этой книги захочется в ней поучаствовать.

¹ Advanced Gravitational Wave Detectors, ed. by D. E. Blair et al, Cambridge University Press, Cambridge, 2012, p. 105.

2

Наука о космосе на новом витке: Пришествие ММА

11 февраля 2016 г. на пресс-конференциях в США и Европе было одновременно объявлено о крупнейшем научном достижении – первой прямой регистрации гравитационных волн. Эпохальное открытие сделали члены международной коллаборации LIGO, объединяющей более 1000 ученых из 15 стран. Они обнаружили гравитационно-волновой след космического катаклизма, рожденного слиянием пары черных дыр. Вскоре появились сообщения о регистрации еще двух таких слияний, пойманных двумя детекторами коллаборации LIGO. Это были первые – и какие великолепные! – успехи новой, гравитационной астрономии.

Вскоре последовало не менее великолепное продолжение. 14 августа 2017 г. свой первый всплеск гравитационных волн, связанный со слиянием черных дыр, зафиксировал итальянский детектор Virgo, а 16 октября 2017 г. было объявлено о новой демонстрации возможностей гравитационной астрономии. 17 августа 2017 г. обсерватории LIGO и Virgo зарегистрировали растянувшиеся на сотню секунд возмущения геометрии пространства-времени, обусловленные спиралевидным сближением двух нейтронных звезд непосредственно перед их слиянием. Правда, след финала этого катаклизма поймать не удалось, поскольку в момент удара частоты гравитационных волн оказались за пределами чувствительности обеих обсерваторий. Расчеты показывают, что результатом слияния могло стать образование нейтронной звезды большей массы, либо возникновение сильно нестабильного сгустка нейтронного вещества (который за время от секунды до нескольких часов коллапсировал в черную дыру), либо непосредственное появление новой дыры. Пока не ясно, что произошло на самом деле.

Значение этого открытия отнюдь не сводится к факту гравитационного детектирования слияния нейтронных звезд. В конце концов, в радиусе 1 млрд световых лет от Земли ежегодно происходит несколько подобных событий. Правда, LIGO способен отследить их на расстояниях не более 250 млн световых лет (в 2019 г. этот предел возрастет до 650 млн). В данном случае сигнал пришел с дистанции «лишь» 130 млн световых лет, что стоит счесть немалым везением. Во всяком случае, первая регистрация столкновения нейтронных звезд была вопросом времени. И все же она войдет в историю как еще один предвестник революционных перемен в науке о космосе.

На чем основан такой прогноз? Слияния черных дыр происходят практически в пустом пространстве и потому не порождают ничего, кроме гравитационных волн. Сталкивающиеся нейтронные звезды, напротив, оставляют за собой сверхгорячую экзотическую материю, которая дает о себе знать электромагнитными волнами и потоками релятивистских частиц. Их можно наблюдать как минимум несколько месяцев, а то и лет, что дает возможность интегрировать работу гравитационных детекторов с великим множеством наземных и космических обсерваторий, отслеживающих сигналы из космического пространства. Первым примером практической реализации этой возможности стал инициированный событиями 17 августа 2017 г. феерический всплеск активности астрономов и астрофизиков во всем мире. Количество обсерваторий, принявших участие в «гонке за лидерами» LIGO и Virgo, превысило 70 – это впечатляет.

А теперь самое главное: развитие ММА, или в российской терминологии многоканальной астрономии.

О чем же речь? Астрономия, как известно, может использовать и такие мессенджеры, как небесные тела – скажем метеориты или кометы, наблюдения за которыми немало рассказывают о дальней периферии Солнечной системы. Богатая информация о Солнце приходит с солнечным ветром – потоками протонов и электронов, долетающих до Земли со скоростями в несколько сотен километров в секунду. Однако для получения сведений о дальнем космосе,

особенно о событиях за пределами нашей Галактики, потребны мессенджеры иного рода, путешествующие со световой или почти световой скоростью, причем лучше всего по неискривленным путям. Это импульсы электромагнитных и гравитационных волн (на квантовом языке – потоки фотонов и гравитонов), а также элементарные частицы, которые не несут электрического заряда и потому не отклоняются космическими магнитными полями. Пока в этом качестве работают одни лишь нейтрино, которые имеют ничтожно малую массу и потому движутся практически со скоростью света (впрочем, не исключено, что когда-нибудь откроют и другие подобные мессенджеры). Входящие в состав галактических космических лучей заряженные частицы (протоны и антипротоны, ядра гелия и более тяжелых элементов, а также электроны и позитроны) тоже могут разогнаться до релятивистских скоростей, однако места их рождения отследить намного труднее.

Астрономия, как известно, одна из древнейших наук. Если считать, что ее родоначальником был основатель первой обсерватории античного мира и создатель первой математической модели Солнечной системы Евдокс Книдский, то ей уже 24 столетия. И почти все это время астрономы вели наблюдения лишь в оптическом сегменте электромагнитных волн, то есть в видимом свете. В терминах энергии фотонов ширина этого диапазона меньше полутора электронвольт – от 1,7 эВ в красной части спектра до 3,1 эВ на фиолетовой границе.

В наши дни возможности астрономических наблюдений стали неизмеримо обширней. Сейчас исследователям космического пространства доступны сигналы, которые переносят фотоны с энергиями от 10^{-6} эВ (радиоволны) до 300 млрд эВ (верхний предел чувствительности обзорного гамма-телескопа на борту космической обсерватории имени Ферми). Энергии космических нейтрино регистрируются вплоть до 10^{15} эВ, а протонов – даже до 10^{20} эВ. Так что ширина диапазона энергий переносчиков сигналов составляет 26 порядков!

И вот что примечательно. Астрономия освоила все гигантское разнообразие космических мессенджеров за очень короткое время. Наблюдения небосвода в инфракрасных лучах ведут с середины XIX в. (сначала на Земле, а с 1983 г. – в космосе, и не только околоземном, но и околосолнечном). Затем настала очередь радиоастрономии. Первый настоящий радиотелескоп с поворотной параболической антенной в 1937 г. построил американец Гроут Ребер и с его помощью создал первую карту радионевосвода. Ультрафиолетовая астрономия возникла гораздо позже, где-то около 1970 г. Рентгеновская астрономия ведет начало с 1949 г. (или даже с 1978 г., если связать день ее рождения с запуском первого спутника с рентгеновским телескопом). Первый гамма-телескоп отправили в околоземное пространство в 1961 г. (на борту американского спутника Explorer 11). Космические лучи открыл сотрудник венского Радиового института Виктор Гесс больше 100 лет назад, в 1912 г.

Остается упомянуть еще два мессенджера – нейтрино и гравитационные волны. О гравитационных волнах уже говорилось выше. Нейтринная астрономия началась с измерения плотности потоков этих частиц, возникших в ходе термоядерных реакций в ядре Солнца. Рэй Дэвис и его коллеги запустили первый детектор солнечных нейтрино в глубокой шахте в штате Южная Дакота в 1968 г. Позже появились приборные комплексы, способные зарегистрировать нейтрино, пришедшие из далекого космоса. Крупнейшая из этих установок, IceCube Neutrino Observatory, работает на Южном полюсе.

Классическая телескопическая астрономия за последние десятилетия тоже радикально изменилась. Новейшие телескопы-рефлекторы работают не только в видимом, но и в инфракрасном диапазоне – насколько это позволяет земная атмосфера. В третьем десятилетии XXI в. предполагается ввести в действие три телескопа-супергиганта (два в Чили и один на Гавайях). Сейчас телескопы стандартно оснащают (и будут оснащать) системами активной и адаптивной оптики: первая исправляет механические деформации зеркал, вторая компенсирует атмосферные возмущения, которые «размывают» приходящие световые сигналы. Эти системы, особенно адаптивная оптика, практически уравнили обсервационные возможности земной и

космической астрономии в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Теперь крупнейшие стационарные телескопы обеспечивают разрешение на этих длинах волн, сравнимое с разрешением «Хаббла» и не запущенного еще инфракрасного космического телескопа имени Джеймса Уэбба.

Стоит отметить, что новые телескопы изменили характер астрономических наблюдений. Ушел в прошлое романтический образ наблюдателя-одиночки, проводящего ночи в обсерватории, а дни – за проявкой и анализом фотопластинок. В наши дни астрономы используют телескопы так же, как физики – ускорители. Львиная доля работы приходится на эксплуатационщиков, которые наводят телескопы на заданную цель, снимают показания детекторов и передают их исследователям по цифровой связи. Более того, появились и автоматизированные телескопы, целиком и полностью управляемые дистанционно. Такие «безлюдные» наблюдения стали неотъемлемой частью многоканальной астрономии.

Итак, наблюдения посредством широкого набора мессенджеров вышли на передний край астрономии и астрофизики. Они обещают особенно богатый урожай в области изучения наиболее высокоэнергетичных космических процессов и событий, следствием которого может стать уточнение и даже пересмотр как астрофизических моделей, так и фундаментальных физических законов. Так, стоит отметить, что многоканальная регистрация слияния нейтронных звезд дала возможность показать, что отношение скоростей распространения световых и гравитационных волн по модулю отличается от единицы менее чем на 10^{-16} . Этот результат не только вновь подтверждает основы эйнштейновской ОТО, но и позволяет отсеять несколько конкурирующих теорий гравитации. Уже запланированная модернизация исследовательских комплексов (к примеру, предполагаемое десятикратное увеличение чувствительности IceCube) и создание целой серии установок нового поколения (таких как гигантская подводная нейтринная обсерватория KM3NeT, сооружаемая в сорока километрах от Тулона) добавят немало фактов в копилку наших знаний о мире.

Наконец, появление ММА привело к обогащению социальной структуры науки о космосе. Оно стимулировало формирование новых крупных исследовательских коллабораций, таких как Европейская гравитационная обсерватория со штаб-квартирой в окрестности Пизы, объединяющая ученых из Италии, Франции, Нидерландов, Венгрии, Испании и Польши. Имеется также организационная структура в лице AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network), созданная в 2012 г. под эгидой Пенсильванского университета. AMON ставит своей целью упрощение обмена информацией, полученной через различные космические мессенджеры, в реальном масштабе времени. О достигнутом уровне интеграции свидетельствует тот факт, что в «освоении» открытия GW170817 участвовали около 5000 специалистов. В общем, ММА – наука будущего.

При всей молодости ММА она уже может похвастаться немалым числом успехов. Конечно, первый и главный – детектирование гравитационных волн, возникающих при столкновении и слиянии черных дыр и нейтронных звезд. Но не только. Например, в январе 2018 г. появилось сообщение о том, что анализ данных, полученных в ходе детектирования гравитационных волн от столкновения нейтронных звезд, позволил оценить чрезвычайно важный для теоретической астрофизики верхний предел массы нейтронной звезды, составляющий 2,26 масс Солнца. Хотя эта оценка нуждается в подтверждении, ее получение методами многоканальной астрономии само по себе очень важно.

Стоит упомянуть еще одно важнейшее событие, которое дополнило достижения многоканальной астрономии. Весной 2019 г. члены международной научной коллаборации ЕНТ обнародовали «портрет» горизонта событий исполинской черной дыры, расположенной в ядре галактики М87. Реализация этого проекта потребовала, помимо всего прочего, обработки петабайтного объема первичной информации, собранной в ходе совместной работы восьми

радиоастрономических обсерваторий, расположенных на разных континентах. Таковы масштабы современной многоканальной астрономии. И это ведь только начало!

3

Астроликбез первого уровня

Природа создает белые карлики на последней стадии активного существования совсем других звезд. Поэтому я начну с кратких сведений о законах звездной эволюции, которые еще не раз будут расширяться и уточняться.

Все звезды загораются одинаково, но кончают жизнь по-разному. Рождение звезды происходит в результате гравитационного стягивания чисто газового (как это было в юной Вселенной) или газопылевого (в следующие космические эпохи) облака и последующего поджога термоядерного горения водорода в его центральной зоне. Минимальная температура, необходимая для воспламенения водорода, составляет около 3 млн градусов. Согласно модельным вычислениям, для достижения этого порога масса протозвезды должна превысить 0,075 массы Солнца. Максимальные массы новорожденных звезд исчисляются сотнями солнечных, но, согласно некоторым астрофизическим моделям, на заре мироздания они могли достигать и 1 млн.

В финале своего существования звезды претерпевают различные превращения. Иногда они взрываются без остатка, а иногда дают начало объектам иной природы, которые принято называть компактными. Это белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Первые в среднем в 2 млн раз плотнее Солнца, вторые – где-то в 300 трлн раз. О плотности черных дыр говорить не приходится, поскольку они вообще не содержат вещества даже в самых экзотических формах и представляют собой сгустки поля тяготения, которое (по крайней мере, без учета квантовых эффектов) достигает бесконечных значений. Поэтому белые карлики – самые «рыхлые» из космических компактов, так сказать субкомпакты.

По происхождению белые карлики – тлеющие, но все еще весьма горячие остатки не особенно массивных нормальных звезд, успевших сжечь свое термоядерное топливо и потому обреченных на постепенное затухание. Самые легкие звезды перерабатывают водород в гелий и на этом останавливаются, а светила потяжелее в конце жизни производят на свет более тяжелые элементы. Если начальная масса звезды не больше шести-восьми солнечных масс, то в ее ядре после гелия образуются лишь углерод и кислород. Звезды потяжелее (до 10–11 солнечных масс), как считается, дополнительно вырабатывают неон и магний. Затем основной термоядерный синтез прекращается, и звезда вступает в последнюю стадию своей активной жизни. На этом этапе она дожигает оставшееся ядерное топливо и в процессе катаклизмических раздуваний и сжатий сбрасывает внешние слои. В конце концов от нее остается углеродно-кислородное ядро (возможно, с небольшим включением более тяжелых элементов), окруженное горячей газовой оболочкой. Это и есть типичный белый карлик. Существуют также белые карлики с чисто гелиевыми ядрами – это остатки самых легких звезд. Все сказанное справедливо только для звезд, не входящих в тесные пары – о них разговор особый.

Масса большинства белых карликов составляет от половины до 1,3 массы Солнца, а средний радиус не превышает 0,01 солнечного. Правда, есть и выдающиеся (в обе стороны) примеры. Масса самого легкого на сегодняшний день белого карлика, J0917+4638, равна 0,17 массы Солнца. Интересно, что в то же время он и самый большой, а потому и самый рыхлый: его радиус составляет 8 % солнечного (в надлежащем месте книги я вернусь к этому вроде бы явному парадоксу). Самый тяжелый из известных белых карликов, RE J 0317–853, как считается, тянет на 1,4 солнечной массы, что близко к максимально возможной массе этих объектов.

Температура ядра новорожденного карлика оценивается приблизительно в 100–150 млн градусов по шкале Кельвина – или просто кельвинов. Конечно, оно остывает, но чрезвычайно медленно. Как показывают расчеты, чтобы его температура уменьшилась в 25 раз, то есть достигла 4 млн кельвинов, нужно без малого полтора миллиарда лет. Время, за которое белый

карлик охладится до температуры окружающего пространства (точнее, до температуры реликтового излучения), измеряется – самое меньшее – сотнями миллиардов лет. Кстати, первые теоретические оценки скорости остывания белых карликов были сделаны британским астрофизиком Леоном Местелом еще в начале 1950-х гг. и с тех пор неоднократно уточнялись.

4

Горячие светлячки космоса

Открытием первого белого карлика, как и открытием Урана, наука обязана Уильяму Гершелю. 31 января 1783 г. он наблюдал в свой телескоп звезду четвертой величины в южном созвездии Эридана. Эта звезда, удаленная – как мы теперь знаем – на 16,5 световых лет от Солнца, была известна под несколькими именами. В начале XVIII в. первый Королевский астроном Британии и основатель Гринвичской обсерватории Джон Флемстид включил ее в свой каталог под именем 40 Эридана (кстати, именно он ввел в астрономическую практику присвоение звездам индивидуальных номеров в каждом созвездии). Гершель заметил, что 40 Эридана имеет в качестве спутника гравитационно связанную звездную пару, то есть является частью тройной звездной системы. Эта пара состояла из совсем слабой красноватой звезды 40 Эридана С и чуть менее тусклого партнера 40 Эридана В, светящегося белым светом. Гершель внес ее в свой каталог двойных звезд, опубликованный в 1785 г. Позднее эти звезды не раз наблюдали и другие астрономы, однако считали их вполне рядовыми (за исключением того, что они были частью тройной системы) и особого внимания не уделяли. 40 Эридана В как раз и стала первым открытым белым карликом.

Следующий шаг сделал замечательный немецкий астроном и математик, основатель Кёнигсбергской обсерватории Фридрих Вильгельм Бессель (кстати, двойной тезка Гершеля). В 1844 г. он заметил слабые аномалии движения двух ярких звезд – α Большого Пса, Сириуса, и α Малого Пса, Прокциона. Надо сказать, что это потребовало гигантских усилий. Бессель сравнил данные о видимом движении нескольких опорных звезд, собранные в течение 90 лет наблюдателями из Западной и Восточной Европы (в том числе и из России) и из Кейптауна. Ему удалось выявить очень малые (порядка нескольких угловых секунд) отклонения собственного движения Сириуса и Прокциона от ожидаемой прямой линии на небесной сфере. Бессель предположил, что обе звезды входят в двойные системы, а эти отклонения объясняются притяжением их еще не открытых спутников.

Догадка оказалась верной, но Бесселю об этом узнать не довелось – два года спустя он умер от рака. В 1851 г. его преемник на посту директора Кёнигсбергской обсерватории Кристиан Август Фридрих Петерс показал, что пока еще невидимый спутник Сириуса обращается по сильно вытянутой эллиптической орбите с 50-летним периодом, что хорошо совпадает с современными данными.

Первыми спутник Сириуса наблюдали владелец небольшой бостонской оптической фирмы Элвин Кларк и его сын и тезка, Элвин Грэм Кларк-младший. Произошло это случайно. Ясным вечером 31 января 1862 г. они проверяли качество линз для телескопа-рефрактора, заказанного двумя годами ранее Университетом Миссисипи, но не оплаченного и не поставленного из-за начавшейся Гражданской войны. Поскольку труба телескопа не была готова, линзы смонтировали на временной раме, подвешенной к вращающейся стреле. Кларк-младший направил сборку на Сириус и буквально через несколько секунд заметил вблизи него очень тусклую светящуюся точку. Это и был предсказанный Бесселем спутник самой яркой звезды земного небосвода, о чем Кларки тогда не знали. Вскоре директор обсерватории Гарвардского колледжа Джордж Бонд сообщил об их открытии в *American Journal of Science*, особо отметив, что замеченное Кларками небесное тело может оказаться именно тем спутником Сириуса, о котором писали Бессель и Петерс. Когда этот номер журнала был доставлен в Европу, другие астрономы быстро подтвердили наблюдения Кларков. В том же году Французская академия наук присудила Кларку-старшему свою высшую ежегодную награду за астрономические исследования – Лаландовскую премию. А после того, как фирма Кларка в 1880-е гг. блестяще выполнила заказ Пулковской обсерватории на изготовление 76-см объектива для нового теле-

скопа, он получил золотую медаль от Александра III. В общем, бостонский оптик-самоучка не посрамил памяти своего пращура Томаса Кларка, одного из пассажиров знаменитого «Мэй-флауэра».

Но вернемся к спутнику Сириуса. В первое время его часто называли *Sirius comes* (в переводе с латыни – компаньон Сириуса). В конце концов, в соответствии с традицией, он получил имя Сириус В, а к названию Сириуса добавили букву А. Эти названия сохраняются и поныне.

Даже простые телескопические наблюдения Сириуса В вскоре после его открытия показали, что по видимой яркости он в тысячи раз уступает своему сверкающему собрату. Уже в 1864 г. директор Пулковской обсерватории Отто Струве (именно он через 15 лет посетил Кларка в Бостоне и заказал линзы для будущего телескопа) приписал Сириусу В восьмую звездную величину, что почти совпадает с современным значением 8,44. Отсюда следовало, что Сириус А примерно в 10 000 раз ярче своего компаньона. Само по себе это было весьма необычно. К тому времени стали известны сотни двойных звездных систем, но подобных различий в яркости астрономы не наблюдали.

К концу XIX в. ситуация стала еще парадоксальней. В 1866 г. Струве показал, что Сириус А вдвое массивней Сириуса В (современное значение – в 2,03 раза). Получалось, что массы звезд различаются вдвое, а светимости – на четыре порядка. Это была еще одна загадка спутника Сириуса. Струве вполне осознал важность своего результата и фактически пришел к выводу, что по своей природе Сириус В радикально отличен от Сириуса А. Правда, тогдашние астрономы практически игнорировали это заключение – скорее всего, просто не поняли его смысл. Насколько велико различие между двумя Сириусами, стало ясно лишь через 60 лет.

Тем не менее одно объяснение появилось намного раньше. Его предложил Джон Эллард Гор, ирландский инженер-строитель и астроном-любитель, автор нескольких популярных книг по астрономии, которые в викторианские времена пользовались немалой известностью. Проработав в Индии по специальности 11 лет и вернувшись на родину, он вполне благополучно жил на честно заработанную пенсию и публиковал статьи о своих наблюдениях двойных и переменных звезд.

В 1891 г. Гор самостоятельно измерил яркость обоих Сириусов и пришел к выводу, что Сириус А по блеску в 5000 раз превосходит Сириус В (о более точном результате Струве он, скорее всего, не знал). В те времена некоторые астрономы полагали, что Сириус В – просто планета, светящая отраженным светом. Эта идея была удобна тем, что вполне правдоподобно объясняла слабость его блеска и не требовала привлечения никаких экзотических гипотез. Однако Гор на основе своих телескопических наблюдений пришел к выводу, что Сириус В светит собственным светом и потому должен считаться звездой, хотя и очень тусклой. В духе астрономических концепций того времени он предположил, что Сириус В – крупное небесное тело (примерно того же размера, что и Сириус А), которое некогда было очень горячим, но с течением времени остыло и потемнело.

В самом конце XIX в. дошла очередь и до Проциона. В 1896 г. директор Ликской обсерватории Джон Шеберле обнаружил у него слабосветящийся спутник, предсказанный Бесселем. Это позволяло предположить, что существуют и другие звезды с вполне рядовыми массами и аномально малой абсолютной светимостью.

Правда, такая ситуация не вызывала чрезмерных подозрений. В рамках тогдашних скромных знаний о происхождении звезд можно было предположить, что Сириус и Процион каким-то образом обзавелись массивными, но сравнительно холодными спутниками. Это казалось тем более вероятным, что звезду 40 Эрида В с массой в 0,4 массы Солнца считали просто небольшим холодным светилом, сходным с 40 Эрида С. Однако в 1910 г. ситуация кардинально изменилась. В обсерватории Гарвардского колледжа с 1880-х гг. работала группа замечательных женщин, числившихся техническими помощниками астрономов. Официально

их должности назывались очень современно – computers. Директор обсерватории Эдвард Пикеринг поручил одной из них, Вильямине Флеминг, заняться классификацией фотографий звездных спектров. Не имея астрономического образования, она, не мудрствуя лукаво, объединила яркие голубые звезды в одну группу, присвоив ей букву А (туда вошел и Сириус). Звезды чуть меньшей яркости составили группу В – и так далее вниз по латинскому алфавиту. Звезды со спектрами солнечного типа получили индекс G, а самые тусклые красные светила – М. Позднее ее коллега Энни Джамп Кэннон видоизменила и расширила эту систему. Она ввела спектральные классы O, B, A, F, G, K, M (так что в ее системе звезды класса В оказались ярче звезд класса А!) и разделила каждый на десять подклассов, занумерованных от нуля до девяти. Солнце в этой системе было причислено к спектральному классу G2, где пребывает и поныне.

На рубеже XIX и XX вв. астрономы уже достаточно знали о спектрах ионизированных газов, чтобы понять, что движение вдоль этого ряда от начала к концу указывает на прогрессирующее снижение температуры звездных атмосфер. Так что группу O составили самые горячие звезды, группу М – самые холодные. К слову, в первую группу вошли очень яркие голубые звезды из созвездия Ориона – отсюда и буква О. В каждом классе подкласс с индексом 0 состоит из самых горячих звезд, а с индексом 9 – из самых холодных. Эта классификационная система, так и названная гарвардской, после ряда модификаций была утверждена на Пятой конференции Международного союза по сотрудничеству в исследованиях Солнца, которая летом 1913 г. состоялась в Бонне. Постановление конференции и предшествовавшие ему дискуссии фактически стали началом организационного оформления звездной астрофизики в качестве самостоятельной ветви науки о космосе.

Но это только присказка – сказка впереди. В 1910 г. профессор астрономии Принстонского университета Генри Норрис Расселл во время визита в Гарвард попросил Пикеринга проверить спектры звезды 40 Эридана В. Вильямина Флеминг, которой поручили эту работу, уже через час сообщила, что звезда вне всякого сомнения принадлежит классу А. Из этого следовало, что ее температура сравнима с температурой Сириуса (сейчас известно, что она в два с половиной раза выше – 25 200 кельвинов против 10 000 кельвинов). Как вспоминал Расселл почти через три десятилетия, он сразу понял, что такой результат никак не укладывался в закономерности звездной статистики, о чем тут же сказал Пикерингу. Улыбнувшись, тот ответил, что именно такие исключения из правил и приводят к прогрессу научного знания. Директор Гарвардской обсерватории как в воду глядел, но его прогноз оправдался лишь спустя много лет. Однако уже в 1914 г. заключение Вильямина Флеминг убедительно подтвердил Уолтер Адамс, сотрудник (и будущий директор) калифорнийской обсерватории Маунт-Вилсон.

Странная звезда 40 Эридана В недолго сохраняла свой уникальный статус. Уже в 1915 г. Адамс отнес Сириус В к одному спектральному классу с Сириусом А. Этот вывод он сделал на основе почти двухлетних очень трудоемких наблюдений на 152-см телескопе. Их пришлось проводить с исключительной осторожностью, чтобы не допустить «засорения» спектрограмм Сириуса В светом его сверхъяркого соседа. Однако игра стоила свеч. Адамс однозначно заключил, что обе звезды необходимо отнести к одному и тому же спектральному классу A0.

В ретроспективе мы понимаем, что результат Адамса был открытием первого ранга. Неслучайно американский астроном голландского происхождения и один из крупнейших исследователей белых карликов Виллем Люйтен, о котором еще пойдет речь, в 1956 г. назвал его сносшибательным. Почему – вполне понятно. Коль скоро две звезды равноудалены от Земли, примерно одинаково нагреты и в 10 000 раз отличаются по светимости, в той же пропорции должны разниться и площади их поверхностей. Отсюда следует, что радиус Сириуса В в 100 раз меньше радиуса Сириуса А, а средняя плотность его вещества приблизительно в 1 млн (100 в третьей степени) раз больше! Получалось, что Сириус В (а по аналогии и 40 Эридана В) следует причислить к еще не известному семейству сверхплотных звезд очень малых размеров. Сегодня эта логическая цепочка кажется не просто естественной, но единственно

возможной. Однако двухстраничная заметка Адамса² практически не вызвала резонанса в астрономической среде. По молчаливому согласию было признано, что как 40 Эридана В, так и Сириус В следует считать причудами природы, не требующими пересмотра представлений о свойствах звезд.

В той же обсерватории Маунт-Вилсон был обнаружен и третий по счету белый карлик. Честь его открытия принадлежит голландскому астроному Адриану ван Маанену, который работал там с 1912 г. Как часто бывает, ван Маанену помогло элементарное везение. В 1917 г. он заметил на двух фотопластинках из архива обсерватории очень тусклую звезду в созвездии Рыб, которая ежегодно смещалась на небосводе более чем на три дуговые секунды. Это свидетельствовало о ее близости к Солнцу (как позднее выяснилось, расстояние до звезды составляет всего лишь 14 световых лет), что не очень сочеталось с малой видимой яркостью. Поэтому ван Маанен решил изучить спектр этого светила. 24 октября 1917 г. он получил спектрограмму с помощью небольшого спектроскопа, установленного все на том же 152-см рефлекторе. Из нее следовало, что спектр следует отнести к подклассу F0, так что звезда оказалась лишь немногим холоднее звезд класса А. Если бы она была типичной звездой, ее яркость была бы неизмеримо больше наблюдаемой. Через шесть лет ей присвоили имя первооткрывателя, и она стала звездой ван Маанена. В отличие от двух предшественников она не имеет компаньонов в виде обычных звезд, так что это первый по времени открытия одиночный белый карлик.

Сириус В, 40 Эридана В и звезда ван Маанена находятся в радиусе пяти парсек от Солнца и потому обладают значительными собственными движениями – то есть смещаются на небесной сфере относительно более далеких и потому по видимости неподвижных светил. В 1923 г. Виллем Лютен опубликовал каталог таких «путешествующих» звезд, включив туда и эту тройцу. Ввиду очевидного сходства он придумал им имя – белые карлики. После того как этот термин годом спустя принял и использовал знаменитый Кембриджский астрофизик Артур Стэнли Эддингтон, он стал общепринятым (а тройку 40 Эридана В, Сириус В и звезда ван Маанена стали называть классическими белыми карликами). Стоит отметить, что Лютен всю свою долгую жизнь (он умер в 1994 г.) занимался измерением звездных смещений и определил их для нескольких сотен тысяч звезд.

Уолтер Адамс через десять лет после публикации работы о Сириусе В вновь приложил руку к его исследованию. Годом ранее Эддингтон на основе ОТО показал, что спектральные линии звезды такой массы и радиуса должны быть сдвинуты в сторону большей длины волны (так называемое гравитационное красное смещение) приблизительно на 0,3 ангстрема. В обсерватории Маунт-Вилсон тогда уже действовал крупнейший в мире 254-см телескоп имени Хукера. С помощью этого уникального инструмента Адамс показал, что красное смещение спектров Сириуса В практически соответствует предсказанию Эддингтона. Это стало не только еще одним подтверждением великой теории Эйнштейна, но и дополнительной демонстрацией аномально высокой плотности вещества белых карликов.

² Walter Adams, S. The Spectrum of the Companion of Sirius // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* (1915), 27 (161): 236–237.

5

Изобретение великой диаграммы

Всего через три года после выявления уникальности звезды 40 Эрида В – первого по времени открытия классического белого карлика – ей нашлось место в замечательной графической конструкции, позволившей систематизировать и упорядочить известные к тому времени данные о светимости и спектральных характеристиках звезд нашей Галактики. Со временем ее возможности значительно расширились, но об этом – в конце главы.

Эта конструкция, разумеется, возникла не на пустом месте. Историки астрономии именуют вторую половину XIX в. эрой великих рефракторов. Рефрактор – это телескоп, в котором свет фокусируется системой линз (телескопы с зеркальной фокусировкой света называются рефлекторами). Великими рефракторами стали именовать телескопы с объективами диаметром более 63,5 см (25 дюймов). Первый такой инструмент был изготовлен в 1862 г., за ним до исхода столетия последовали еще девять. Самым большим (из рабочих инструментов) был и поныне остается действующий с 1897 г. метровый рефрактор Йеркской обсерватории в окрестностях Чикаго. В эти же годы появились и первые промышленные предприятия, специализировавшиеся на производстве телескопов.

В XX в. лидерство перехватили крупные телескопы-рефлекторы, установленные на юге Западного побережья США. В 1908 г. в обсерватории Маунт-Вилсон вступил в действие первый телескоп нового поколения, тот самый 152-см рефлектор, на котором работал Уолтер Адамс. В 1917 г. там же вошел в строй зеркальный телескоп имени Хукера, на котором Адамс спустя восемь лет измерил гравитационное смещение излучения компаньона Сириуса (до 1949 г. он оставался самым крупным оптическим телескопом в мире). Эти уникальные для своего времени инструменты оптической астрономии, как и метровый рефрактор Йеркской обсерватории, были созданы по инициативе Джорджа Эллери Хейла, одного из самых авторитетных американских астрономов того времени и поистине великого организатора науки – в том числе и международного масштаба. Хейл создал и возглавил сначала Йеркскую обсерваторию, а потом обсерваторию Маунт-Вилсон, он же подготовил учреждение Паломарской обсерватории, которая начала действовать вскоре после Второй мировой войны. Он сильно помог институциональному развитию своей науки, способствуя проведению конференций и организации профессиональных журналов. Хейл приложил также немало сил для превращения скромной технической школы, основанной в 1891 г. мэром Пасадины бизнесменом Эймосом Трупом, в исследовательский университет мирового класса, который в 1920 г. стал называться Калифорнийским технологическим институтом (или сокращенно Калтех). Наконец, он был одним из инициаторов учреждения в 1904 г. уже упоминавшегося Международного союза по сотрудничеству в исследованиях Солнца. Наследником этой ассоциации стал Международный астрономический союз, отметивший в 2019 г. 100-летний юбилей. В общем, неумная энергия этого человека достойна искреннего восхищения.

Но вернемся к нашим «баранам». С помощью новых телескопов была собрана богатая информация о расстояниях до ближайших звезд (посредством измерения их годового параллакса), а также о звездных спектрах и звездной светимости. Эти данные буквально звали к теоретическому осмыслению. И оно, как почти всегда и бывает в науке, не заставило себя ждать. Основной вклад в выполнение этой задачи внесли два замечательных исследователя, датчанин Эйнар Герцшпрунг и уже знакомый нам Генри Норрис Расселл. Сделали они это практически одновременно, причем именно в таком временном порядке.

К звездам они пришли разными дорогами – к счастью, в противоположность знаменитому изречению Луция Аннея Сенеки, не через тернии. Герцшпрунг еще в школьные годы увлекся астрономией, но отец считал занятия этой наукой делом маловыгодным. По его насто-

янию Герцшпрунг получил профессию инженера-химика. Окончив в 1898 г. Копенгагенский университет, он работал в России и Германии, но через три года вернулся на родину. В Копенгагене получил доступ в университетскую обсерваторию и в частную обсерваторию с превосходным 27-см рефрактором, которую устроил на чердаке своего дома в окрестностях столицы еще один поклонник астрономии (а в основное время высокопоставленный администратор датской телеграфной сети) Виктор Нильсен. Там Герцшпрунг выполнил серию абсолютно профессиональных наблюдений светимости звезд, которые легли в основу его первых статей по астрономии. Не имея шансов напечататься в каком-либо астрономическом издании из-за статуса любителя, Герцшпрунг был вынужден публиковаться в малоизвестном немецком журнале по фотографическим технологиям *Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie* (много лет спустя Эддингтон в традициях истинно британского юмора написал Герцшпрунгу, что считает это решение одним из грехов его юных лет).

К счастью, эти публикации увидел и оценил по достоинству ровесник Герцшпрунга, но, несмотря на молодость, уже ординарный профессор астрономии Гёттингенского университета Карл Шварцшильд. В 1908 г. он пригласил Герцшпрунга в Гёттинген, где всего через несколько месяцев (совершенно небывалый случай!) тот тоже получил профессию. Когда год спустя Шварцшильд возглавил всемирно известную Потсдамскую астрофизическую обсерваторию, за ним последовал и его протеже. До 1919 г. Герцшпрунг вел наблюдения в Потсдаме, а потом перебрался в Голландию. Там он получил постоянную должность в обсерватории Лейденского университета, где и проработал вплоть до своей отставки с поста ее директора в 1946 г. По милости богов жизнь его была долгой – 94 года (08.10.1873–21.10.1967).

К его другу Шварцшильду судьба такого великодушия не проявила. Его великолепную научную карьеру (он успел стать членом Королевской академии наук Пруссии и Лондонского королевского общества) оборвала Первая мировая война. Он не подлежал призыву по возрасту, но пошел в армию добровольцем и оказался на русском фронте в штабе артиллерийской части, где занимался расчетом траекторий снарядов дальнобойных орудий. Именно на войне у него развилась тяжелейшая форма пузырчатки – аутоиммунного заболевания кожных покровов, к которому он имел наследственную склонность. В марте 1916 г. Шварцшильд был комиссован по состоянию здоровья и вернулся в Потсдам, где скончался 11 мая. Шварцшильд и погибший в Дарданелльской операции английский физик Генри Мозли были самыми крупными учеными, чьи жизни унесла Первая мировая война.

Уже находясь на госпитальной койке, Шварцшильд выполнил свое крупнейшее (и самое знаменитое) теоретическое исследование. В начале 1916 г. он написал и послал Эйнштейну в Берлин для публикации две статьи с точными решениями эйнштейновских уравнений для поля тяготения, созданного сферическими симметричными источниками. Эти работы стали началом математического моделирования экзотических объектов, которые сегодня мы называем черными дырами.

Расселла, в отличие от Герцшпрунга, привела на вершины астрономии вполне традиционная академическая карьера. Он был старшим сыном в семье пресвитерианского пастора с Лонг-Айленда. В 16 лет поступил в Принстон, где, в духе того времени, изучал предметы, приличествующие джентльмену – древнегреческий, латынь и классическую литературу. Однако ему повезло записаться на вводный курс астрономии, который читал Чарльз Янг – блестящий педагог и один из первых американских астрофизиков. Эти лекции и определили будущее Расселла. В 1902–1905 гг. он продолжил образование в Кембриджском университете под руководством Джорджа Дарвина, сына великого создателя теории биологической эволюции. Из Англии Расселл вернулся в Принстон и быстро поднялся по стандартной лестнице должностей от преподавателя до полного профессора. В своей альма-матер он проработал вплоть до выхода в отставку в 1947 г.

Теперь перейдем от персоналий к науке. В конце XIX в. участница гарвардской женской команды Антония Мори разделила звезды на три класса в зависимости от внешнего вида темных линий (то есть линий поглощения) на их спектрограммах. Звезды со спектрами солнечного типа, содержащими множество хорошо заметных линий, распределенных по всему спектру, попали в категорию «а». Звезды с широкими и расплывчатыми спектральными линиями получили индекс «b»; и наконец, звезды с очень четкими узкими линиями были объединены в группу «с». Физический смысл такой классификации в те времена был совершенно неясен, и многим астрономам она казалась искусственной.

Однако Герцшпрунг не только принял эту схему, но и положил ее в основу весьма глубоких заключений. В статье 1905 г. он показал, что звезды подкласса «с» имеют почти незаметные, нередко вообще не поддающиеся измерению собственные движения, в среднем не превышающие сотой доли дуговой секунды³. Этот вывод он сделал на примере всего 30 звезд – результатами наблюдений более многочисленной группы он не располагал. Отсюда естественным образом следовало, что расстояния до звезд подкласса «с» гораздо больше, чем до звезд двух других групп схемы Мори. Кроме того, эти светила отличались большой видимой яркостью. Герцшпрунг объяснял это тем, что с-звезды излучают намного больше света, чем звезды из семейств «а» и «b» – иными словами, их абсолютные светимости намного выше. Во второй части этой работы, опубликованной в 1907 г., он развил свои аргументы до утверждения, что с-звезды отличаются от прочих не только по характеру спектров, но и по физической природе⁴. Он также показал, что особенно яркие красные звезды типа Арктура и Бетельгейзе должны обладать сравнительно коротким временем жизни.

Эту работу Герцшпрунг продолжил в Гёттингене и в Потсдаме. В 1911 г. в сборнике трудов Потсдамской обсерватории он опубликовал крайне нетривиальные результаты наблюдений звездных скоплений Плеяд и Гиад⁵. На их основании Герцшпрунг пришел к заключению, что существует четко выраженная статистическая корреляция между цветом звезды и ее светимостью. Чтобы сделать эту корреляцию наглядней, он перевел ее в графическую форму. Для этого он поместил на одной оси прямоугольных координат цветовые характеристики звезд (которые, как он понял не позднее 1908 г., можно перевести в данные об их температурах), а на другой – наблюдаемые светимости. Это не было вполне корректным, но в данном случае допустимым. Поскольку расстояния от центров Плеяд и Гиад до Солнца сильно превышают размеры этих скоплений, можно считать, что звезды каждого скопления приблизительно одинаково удалены от нашей системы. Отсюда следует, что их видимые звездные величины отличаются от абсолютных на одно и то же число (абсолютная величина звезды есть, по определению, ее видимая величина при условии, что звезда располагается от наблюдателя на расстоянии в 10 парсек). Оказалось, что большинство звезд расположилось на каждой диаграмме вдоль достаточно узкой полосы, которую Герцшпрунг назвал главной последовательностью. Это лингвистическое изобретение со временем превратилось в один из основных терминов звездной астрономии.

Правда, диаграммы Герцшпрунга все же имели ограниченную применимость. В его распоряжении оказалось слишком мало звезд, к тому же нередко похожих друг на друга. Так, например, в Плеядах много ярких голубых светил, однако совсем нет звезд, которые сегодня называются гигантами и сверхгигантами; в Гиадах гиганты имеются, но их немного. В качестве следующего шага нужно было расширить наблюдательную базу для конструирования диа-

³ Hertzsprung, E. Zur Strahlung der Sterne. I // Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie (1905).

⁴ Hertzsprung, E. Zur Strahlung der Sterne. II // Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie (1907).

⁵ Hertzsprung, E. Über die Verwendung Photographischer Effektiver Wellenlaengen zur Bestimmung von Farbaequivalenten, Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam, 22. Bd., 1. Stuck = Nr. 63.

грамм «цвет-светимость». Этот шаг вскоре и сделал Расселл. В 1909–1913 гг. он собрал большой объем информации об абсолютных светимостях и спектральных типах приблизительно 300 звезд, удаленных от Земли на различные дистанции (какое он проявил упорство и какими методами пользовался, само по себе очень интересно, но в эти детали я вдаваться не буду). Проанализировав эти сведения, Расселл пришел практически к таким же выводам, что и Герцшпрунг, чьи работы, по всей вероятности, ему тогда не были известны (кстати, впервые эти ученые встретились в июле 1913 г. на той самой международной конференции в Бонне, где и была утверждена гарвардская классификация звездных спектров).

В первой публикации на эту тему Расселл представил свои результаты в виде таблиц⁶. Годом позже он обсудил их с коллегами на нескольких конференциях. В Лондоне на симпозиуме Королевского астрономического общества в июне 1913 г. он впервые использовал термины «карликовые звезды» и «звезды-гиганты», которые вскоре и обнародовал⁷. По ошибке он приписал обе терминологические инновации Герцшпрунгу, который слово «карлики» по отношению к звездам никогда не употреблял, хотя иногда называл звезды великанами (нем. *Riesen*); о звездах-гигантах (нем. *Giganten*) в 1908 г. также писал Шварцшильд. Эти названия вместе с термином Герцшпрунга «главная последовательность» быстро вошли в лексикон астрономии.

А вскоре на свет родилась и знаменитая диаграмма. Расселл впервые презентовал ее в завершенном виде (и даже в разных версиях) 30 декабря 1913 г. в обширном докладе на конференции Американского астрономического и астрофизического общества в Атланте. Этот доклад через год был опубликован в журнале *Nature* в двух частях под общим заголовком «Отношения между спектрами и другими характеристиками звезд»⁸.

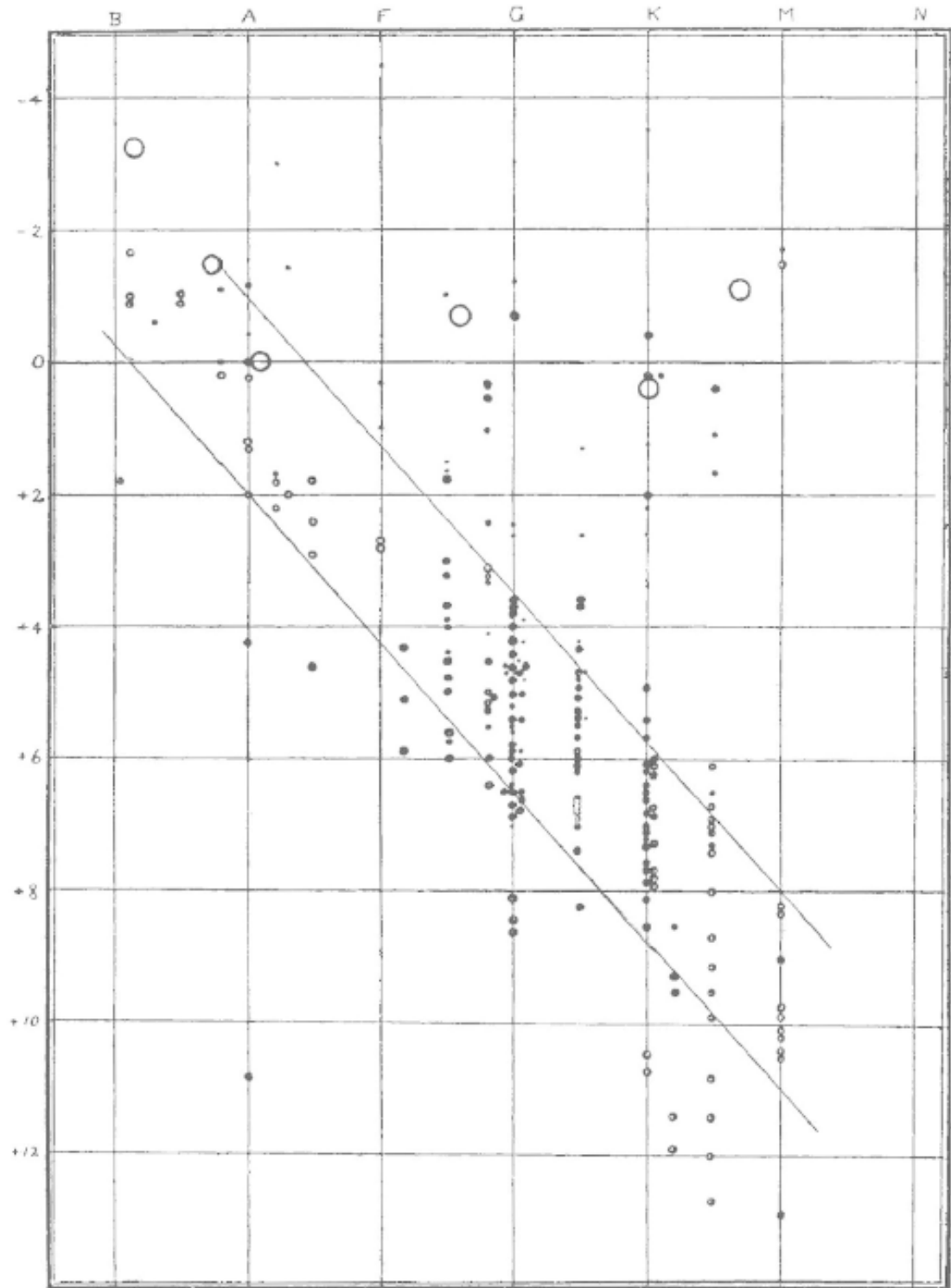
Выступление Расселла содержало множество интереснейших идей и выводов. Например, он привел убедительные аргументы в пользу тогда еще новой идеи, что спектр звезды в первую очередь зависит от температуры ее атмосферы, а не от химического состава. Но обо всем не расскажешь, поэтому ограничимся диаграммой. Во второй части статьи Расселла⁹ она представлена в версии, ставшей классической, которая несчетное число раз воспроизводилась в учебниках и книгах по истории астрономии.

⁶ *Proceedings of the American Philosophical Society* (Oct. – Dec., 1912), 51 (207): 569–579.

⁷ Russell, H. N. “Giant” and “dwarf” stars // *Observatory* (1913), 36: 324.

⁸ Russell, H. N. Relations between the spectra and other characteristics of the stars // *Nature* (1914), 93: 227–230; Relations between the spectra and other characteristics of the stars // *Nature* (1914), 93: 252–258.

⁹ *Nature* (1914), 93: 252–258.



К этой картинке стоит присмотреться внимательно. По горизонтали отложены спектральные классы звезд от самых горячих (слева) до самых холодных (справа). На вертикальной оси отложены абсолютные звездные величины от -4 (это самые яркие звезды, известные в те времена) до $+12$ (самые тусклые). Отмеченные позиции отдельных звезд (их свыше 200) в основном лежат вдоль узкой наклонной полосы, ограниченной двумя параллельными линиями. Сразу видно, что для подавляющего большинства звезд, представленных на диаграмме, выполняется четкая закономерность: чем больше абсолютная светимость звезды, тем «левее»

ее спектральный класс – и, следовательно, тем звезда горячее. Звезды внутри полосы как раз и составляют ту самую главную последовательность, о которой ранее писал Герцшпрунг.

Однако на диаграмме представлены и звезды, лежащие вне главной последовательности. В правом верхнем квадранте можно заметить звезды внутри горизонтальной полосы, обладающие примерно одинаковой (причем высокой) светимостью для разных спектральных классов (то есть температур). Именно эти звезды Расселл назвал гигантами (среди них есть и совсем холодные красные гиганты). А в левом нижнем квадранте скромно притулилась одна единственная звезда класса А примерно 11-й величины – следовательно, горячая, но очень тусклая. Расселл поместил туда двойной спутник звезды 40 Эридана, не различая членов этой пары. Сейчас мы знаем, что своей высокой температурой она обязана белому карлику 40 Эридана В, а его холодный спутник 40 Эридана С вносит в светимость очень незначительный вклад. Из диаграммы Расселла сразу видно, что единственный обитатель этого квадранта очень сильно выпадает из главной последовательности и потому должен очень отличаться от представленных в ней звезд.

Таким образом, графическая конструкция Расселла – это диаграмма «цвет-светимость» (позже появились и другие варианты, например «температура-светимость»). Сначала ее связывали только с его именем и называли диаграммой Расселла. В 1933 г. датский астроном Бенгт Стрёмгрен назвал ее диаграммой Герцшпрунга – Расселла, отдав дань уважения обоим ученым. После Второй мировой войны это наименование стало общепринятым.

Справедливости ради надо заметить, что первое графическое представление связи между светимостью и спектральными характеристиками звезд за год до Герцшпрунга построил немецкий астроном Ганс Розенберг. Он сделал это на основе наблюдения звезд все тех же Плеяд. Свои результаты он опубликовал в 1910 г. в диссертации для занятия преподавательской должности в Тюбингенском университете, где два года спустя получил профессию. Однако его диаграмма основана на весьма ограниченном наблюдательном материале и потому ее ценность не столь велика. Кроме того, пионером в прослеживании систематических связей между спектрами звезд и их светимостью в любом случае остается Герцшпрунг.

Диаграммы Герцшпрунга – Расселла уже давно не служат просто графическим инструментом систематизации звездных популяций. Сейчас мы знаем, что в них закодированы ценнейшие сведения о звездной эволюции. Так, на главной последовательности расположены звезды с различными начальными массами, которые еще не прошли цикл термоядерного сжигания водорода в своих ядрах. Во втором десятилетии XX в. до такого понимания астрономия, конечно, еще не дошла. Сама диаграмма с тех пор сильно усложнилась. Помимо главной последовательности и ветви белых карликов на ней выделяют ветви субгигантов, субкарликов, гигантов и сверхгигантов. На современных версиях диаграмм Герцшпрунга – Расселла можно проследить тонкие детали процессов схода звезд различных начальных масс с главной последовательности после выгорания водорода и их последующего превращения в компактные объекты той или иной природы (а в некоторых случаях, согласно еще не подтвержденной наблюдением теории, даже полного уничтожения).

Это еще не конец истории. В 1995 г. были открыты давно предсказанные «несостоявшиеся» звезды, названные коричневыми (в другом переводе с английского – «бурыми») карликами (сейчас я о них рассказывать не буду, им посвящена отдельная глава). После этого к системе звездных спектров были добавлены еще три класса – L, T и Y, которые тоже нашли отражение на позднейших версиях диаграммы Герцшпрунга – Расселла. К классу L относят объекты с температурами поверхности от 1300 до 2000 К. Среди них не только коричневые карлики, но и наиболее тусклые красные карлики, которые раньше относили к М-классу. Класс T включает лишь одни коричневые карлики, атмосферы которых нагреты от 700 до 1300 К. В их спектрах в изобилии присутствуют линии метана, поэтому эти тела нередко называют метановыми карликами. К спектральному классу Y относят объекты холоднее 700 К. Не исключено,

что и у этой истории будет продолжение, но в такие дебри я не буду забираться. Мы и так уже далеко ушли от основного предмета книги, поэтому самое время вернуться к белым карликам.

6

От триады к тысячам

К концу третьего десятилетия прошлого века были известны только три классических белых карлика, а затем их число принялось расти. Первый шаг сделал в 1930 г. голландский астроном Питер Остерхофф. Его заинтересовала бело-голубая звездочка в созвездии Персея с большим собственным движением, уже внесенная в каталоги. Проанализировав сведения о ее годовом смещении и светимости, Остерхофф предположил, что она вполне может оказаться белым карликом. Годом позже сотрудник недавно открытой обсерватории в Стокгольме Ингве Эман получил ее спектрограммы и отнес их к подклассу А0. Спектры также свидетельствовали, что эта звезда не может принадлежать главной последовательности. Так она стала четвертым открытым белым карликом и первым из тех, чья природа выяснилась благодаря международной кооперации астрономов. Еще пару белых карликов в 1934 г. обнаружил замечательный голландский астроном Джерард Койпер (кто не слышал о поясе Койпера?), который к тому времени перебрался в США, где стал работать в Ликской обсерватории.

А потом начался целенаправленный поиск белых карликов. Пионером в этом деле стал Лютен. Он исходил из вполне разумного предположения, что даже в крупнейшие (естественно, на тот момент) телескопы можно наблюдать лишь белые карлики, относительно близкие к Солнцу – все прочие просто не видны из-за малой светимости. Поскольку близким звездам свойственны заметные собственные движения, Лютен решил, что именно среди них и стоит искать белые карлики. Эта стратегия оказалась успешной. Лютен нашел множество кандидатов на роль белых карликов, чья природа позже была удостоверена с помощью спектрографического анализа их излучения. В немалой степени благодаря усилиям Лютена и сотрудничавших с ним астрономов в середине 1940-х гг. было известно уже около 80 белых карликов. Историю этих поисков лучше всего рассказал их инициатор¹⁰. Белым карликом оказался и открытый Джоном Шеберле спутник Прокциона.

Во второй половине прошлого века белые карлики искали куда активней и к тому же различными методами. К началу 1960-х гг. число идентифицированных белых карликов перевалило за четыре сотни, а в 1999 г. был опубликован каталог, содержащий более 2200 звезд этого семейства. Их список увеличился вчетверо в результате выполнения Слоуновского цифрового обзора небосвода (Sloan Digital Sky Survey), который начали осуществлять в 2000 г. Он ведется на 250-см телескопе обсерватории Апач-Пойнт в штате Нью-Мексико, оборудованном уникальной цифровой фотокамерой и спектрографами высокого разрешения. В 2006 г. его команда опубликовала каталог из 9316 белых карликов, причем около 6000 было найдено в ходе самого обзора. Каталог 2013 г. содержит уже 19 712 белых карликов.

Все идентифицированные белые карлики находятся в нашей Галактике. Более того, по большей части они наши соседи. Примерно половина известных белых карликов удалена от нас не более чем на 25 парсек. Даже самый далекий из них, RX J0439.8–6809, находится в гало Млечного Пути на расстоянии 30 000 световых лет от Солнца. Неудивительно, что он и самый горячий, температура его атмосферы равна 250 000 К. Кстати, поверхность самого холодного представителя этого семейства, к которому мы еще не раз вернемся, нагрета всего до 3000 К. Не приходится сомневаться, что белые карлики в изобилии имеются и в других галактиках. Согласно данным звездной статистики, свыше 95 % ныне активных звезд закончат жизнь именно как белые карлики.

¹⁰ Luyten, W. J. The White Dwarfs // Science, (January 26, 1945), 101 (2613): 79–82.

Для точной идентификации белого карлика нужно тщательно промерить его спектр, что стало понятным еще при изучении тройки классических белых карликов. Первая серия таких наблюдений в постклассическую (если это определение здесь уместно) эпоху была выполнена в 1930-е гг. Койпером. В 1941 г. он опубликовал список из 38 белых карликов, утвержденных в этом статусе с помощью спектрографических наблюдений. Девять из них были ранее предложены Лютеном из его подборки звезд с заметными собственными движениями в качестве кандидатов, прочие были отобраны по другим критериям. На основании своих наблюдений Койпер провел и первую, еще очень приблизительную, классификацию спектров белых карликов, которые, по его собственным словам, «демонстрировали лишь отдаленное сходство со спектрами обычных звезд». Другую подобную номенклатуру в 1945 г. предложил Лютен, по-прежнему продолжавший интересоваться белыми карликами.

В 1949 г. в астрономии произошло воистину великое событие. В калифорнийской обсерватории Маунт-Паломар неподалеку от Сан-Диего приступил к работе крупнейший в мире (и надолго оставшийся таковым!) телескоп с пятиметровым зеркалом, названный в честь Дж. Э. Хейла. Право первых наблюдений на этом инструменте получили сотрудники Калифорнийского технологического института и Смитсоновского института. Многолетний и весьма авторитетный сотрудник Йеркской обсерватории астрофизик Джесси Гринстайн, который как раз тогда стал первым профессором астрономии Калтеха, воспользовался этой возможностью для спектрального анализа излучения кандидатов в белые карлики. Такие звезды тогда уже считали на тысячи, но до выявления спектральных особенностей они оставались в подвешенном статусе. Гринстайн изучил спектрограммы более 500 тусклых звезд, многие из которых оказались белыми карликами. К слову, он же создал в Калтехе радиоастрономическую группу, а позднее приложил немалые усилия для организации Национальной радиоастрономической обсерватории в штате Вирджиния.

7

Вся сила в спектрах

Пока еще ничего не было сказано об особой природе вещества белых карликов, лишь о его чрезвычайно высокой плотности по сравнению с веществом звезд главной последовательности. Разумеется, в дальнейшем мы поговорим о ней во всех деталях. Однако я отмечал, что каждый карлик окружен тонкой газовой оболочкой, нагретой до тысяч или десятков тысяч кельвинов. В этих оболочках, то есть в атмосферах белых карликов, нет ничего экзотического, это просто очень горячий и потому ионизированный газ, который ничем принципиально не отличается от газа солнечной атмосферы.

Астрономы получают информацию об атмосферах белых карликов теми же методами, что и о звездных атмосферах, – с помощью спектрального анализа. Его общие принципы были установлены еще во второй половине XIX в., а позднее многократно уточнялись, особенно после появления квантовой механики атомов и квантовой теории излучения.

Очень кратко дело обстоит так. Наблюдаемые спектры звезд возникают благодаря процессам, протекающим в их атмосферах. Излучение звездной поверхности практически не отличается от излучения абсолютно черного тела с его гладким спектром, который описывается знаменитой формулой Планка. Согласно формуле Планка, интенсивность излучения на данной частоте зависит только от температуры. Это означает, что сравнение спектра поверхности звезды с планковским спектром позволяет определить температуру этой поверхности. В астрономии такую температуру называют эффективной, чтобы подчеркнуть: спектр звезды похож на планковский, но все-таки не совпадает с ним. Проходя через атмосферу звезды, излучение значительно ослабляется на некоторых выделенных частотах, соответствующих переходам между энергетическими уровнями электронных оболочек атомов или молекул, присутствующих в атмосфере. Так на спектрограмме появляются участки со сниженной интенсивностью излучения, называемые линиями поглощения. Зная расположение и характер этих линий, можно определить химический состав звездной атмосферы.

Чтобы этот механизм был полностью ясен, копнем поглубже. Предположим, что светящуюся поверхность звезды, фотосферу, покинул фотон чернотельного спектра, летящий, для простоты, вертикально вверх. Если его энергия (равная частоте, помноженной на постоянную Планка) не совпадает ни с одной из энергий возбуждения электронных оболочек находящихся в атмосфере атомов или ионов, этот фотон без помех вылетит в окружающее пространство. В противном случае какой-нибудь атом может захватить этот фотон, и один из его электронов перейдет с нижележащего энергетического уровня на вышележащий. Однако надолго он там не задержится. Почти мгновенно (по порядку величины, через одну стомиллионную долю секунды) этот электрон вернется в прежнее состояние, испустивши квант той же частоты. Однако новорожденный фотон уйдет в произвольном направлении и вполне может вернуться в фотосферу и там поглотиться. В результате некоторые фотоны с частотами, соответствующими энергиям переходов, не смогут выйти за пределы звездной атмосферы. Из-за этого внешний наблюдатель увидит на спектрограмме участки с падениями интенсивности излучения на определенных длинах волн. Идеально гладкий спектр чернотельного излучения становится ломаным и испещряется многочисленными провалами.

Исследования спектров белых карликов в полную силу развернулись в середине прошлого века. К 1950 г. стало известно, что газовые оболочки белых карликов чаще всего состоят из чистого водорода и значительно реже – из гелия. Вскоре были найдены очень незначительные примеси элементов тяжелее гелия, которые по традиции астрономы называют металлами. Прежде всего это углерод и кислород, а также ряд более тяжелых элементов. Как сказано в главе 3, углерод и кислород присутствуют в ядрах большинства белых карликов и попадают в

их атмосферы путем диффузии из нижележащих слоев. Этим же механизмом можно объяснить и присутствие магния и неона. Более тяжелые элементы должны оседать в ядра белых карликов, а в их атмосферы они приходят из окружающего пространства как космическое загрязнение. Согласно самой распространенной гипотезе, их главным источником служат мигрирующие в космосе планетезимали, твердые тела небольших размеров, падающие на белый карлик и испаряющиеся в его атмосфере. Их несгоревшие пылевые остатки под действием тяготения могут оказаться на поверхности карлика и даже, что не исключено, диффундировать несколько глубже.

Для упорядочивания информации о спектрах белых карликов было разработано несколько классификационных систем. Схема, которая применяется сегодня, была впервые предложена в 1979 г. и опубликована в 1983 г.¹¹ Она включает шесть классов, которые приведены ниже в соответствии с их современными определениями:

- DA. Доминируют линии поглощения бальмеровской серии водорода.
- DB. Видны линии неионизированных атомов гелия; нет линий водорода.
- DO. В спектре доминируют линии однократно ионизированных атомов гелия; кроме того, возможны признаки атомарного или молекулярного гелия, кислорода и углерода.
- DQ. Линии атомарного или молекулярного углерода в разных участках спектра.
- DZ. В спектре представлены металлы, но нет ни водорода, ни гелия.
- DC. Сплошной спектр с возможным наложением редких и неглубоких линий поглощения различных элементов.

Некоторые белые карлики имеют более сложные спектры, требующие использования дополнительных подклассов – но это уже детали.

Эта классификационная система, если так можно выразиться, легко читаема. Класс DA объединяет белые карлики, чьи спектры демонстрируют только линии второй (бальмеровской) серии водорода. Это самое многочисленное семейство – его доля в популяции этих звезд в нашей Галактике составляет порядка 80 %. Их температуры варьируют в очень широком диапазоне – от 5000 до 80 000 К. Белые карлики класса DB, в чьих спектрах доминирует атомарный гелий, в среднем похолоднее, верхний предел их температур не превышает 25 000–30 000 К. Класс DO объединяет самые горячие белые карлики с температурами в диапазоне от 45 000 до 100 000 К. В класс DZ, напротив, включены белые карлики, чьи спектры не содержат ни признаков водорода, ни признаков гелия, однако демонстрируют присутствие углерода и более тяжелых элементов – магния, кальция и даже железа. Например, Сириус В и 40 Эрида В являются типичными представителями класса DA. Напротив, излучение белого карлика, открытого ван Мааненом, свидетельствует о наличии кальция в его внешней оболочке – это спектральный класс DZ. Следует отметить, что белые карлики классов DA, DB и DO, чьи атмосферы содержат линии поглощения водорода или гелия, абсолютно преобладают в количественном отношении.

Посмотрим теперь на белые карлики класса DZ, чьи спектры не содержат линий поглощения водорода и гелия. Это вовсе не означает, что этих элементов там вообще нет – дело совершенно в другом. Карлики класса DZ просто успели довольно сильно остыть после рождения. Поэтому их фотосферы излучают сравнительно низкоэнергетичные фотоны, которые не возбуждают нейтральные атомы водорода и гелия и потому беспрепятственно проходят сквозь атмосферу белого карлика. Однако энергии этих фотонов хватает для возбуждения атомов элементов тяжелее гелия, чьи линии и присутствуют в спектрах. К классу DC относятся столь же слабо нагретые (иными словами, успевшие сильно остыть) белые карлики, чьи атмосферы содержат водород и/или гелий, но лишены даже следовых количеств металлов. Излуче-

¹¹ Edward M. Scion et al. A Proposed New White Dwarf Classification System // *Astrophysical Journal* (1913), 269: 253–257.

ние фотосферы такого белого карлика проходит сквозь газовую оболочку, не рассеиваясь на ее атомах, и потому обладает непрерывным или почти непрерывным спектром.

Однако даже в астрономии нет правил без исключений. В начале 2010-х гг. в созвездии Малой Медведицы был идентифицирован необычный белый карлик H 1504+65 с эффективной температурой поверхности выше 200 000 К. Несколько лет его считали абсолютным рекордсменом по степени нагрева, и лишь в 2015 г. он уступил место белому карлику, нагретому до четверти миллиона кельвинов. Его спектры свидетельствуют о наличии в атмосфере углерода, кислорода и неона, однако там нет линий поглощения водорода и гелия.

Как это объяснить, учитывая сверхвысокую температуру H 1504+65? Присутствие неона означает, что это светило представляет собой конечный этап эволюции звезды, чья начальная масса была близка к верхнему пределу масс звезд, способных дать начало белым карликам. Можно предположить, что его возникновение сопровождалось столь сильными пульсациями звезды-предшественницы, что привело к полному разрушению газовой оболочки из легких элементов. Однако она может вновь появиться, причем довольно скоро. Если водород и гелий все еще сохранились в недрах карлика, то по мере его остывания они, скорее всего, будут диффундировать к поверхности и накапливаться в атмосфере.

Спектрограммы белых карликов (как и любых звезд) обретают смысл в контексте теоретических моделей звездной эволюции и динамики звездных атмосфер. Они содержат информацию, позволяющую вычислить эффективную температуру белого карлика, его радиус, массу, химический состав атмосферы и силу тяготения на поверхности. Вряд ли стоит уточнять, что вот уже более полувека такие вычисления производятся с помощью компьютерных программ, которые постоянно усложняются и совершенствуются.

Информационный потенциал спектрального анализа нетрудно объяснить. Форма спектра звезды прежде всего определяется эффективной температурой ее поверхности. Чем горячее звезда, тем сильнее ее излучение сдвинуто в область коротких длин волн (или, что то же самое, высоких частот). Спектр содержит темные линии, которые свидетельствуют о том, что на определенных частотах излучение поглощается атомами, присутствующими в звездной атмосфере. Форма профилей этих линий у белых карликов зависит (среди прочего) от тяготения на поверхности звезды, которое замедляет течение времени и тем самым уменьшает частоту испускаемых фотонов – это так называемый эффект гравитационного красного смещения. Поскольку тяготение определяется массой карлика, промеры ширины этих линий дают возможность ее вычислить. И наконец, поскольку электронные оболочки атомов поглощают электромагнитные волны лишь на определенных частотах, надежно установленных лабораторными измерениями, анализ спектрограмм позволяет судить и о химическом составе звездной атмосферы.

Конечно, эту информацию нужно получить и обработать. Сегодня в распоряжении астрономов имеются высокочувствительные детекторы излучения, оснащенные мегапиксельными матрицами с зарядовой связью. Уже пару десятилетий назад астрономические приборы позволяли определять эффективные температуры большинства белых карликов с точностью порядка 1 %. Такова же по порядку величины и средняя точность измерения остальных физических характеристик белых карликов.

Спектры белых карликов сильно отличаются от спектров звезд главной последовательности как общей формой, так и наборами и шириной линий поглощения. Отличий много, и перечислять их все, наверное, не имеет смысла. Ограничусь единственным примером. Вспомним, что у белых карликов класса DA в спектрах присутствуют лишь линии водорода. У самых горячих звезд главной последовательности класса O с эффективной температурой поверхности 25 000–100 000 К, напротив, линий водорода нет или очень мало, но есть линии гелия, углерода, азота, кислорода и кремния. В спектре фотосферы Солнца наблюдаются десятки тысяч линий поглощения великого множества элементов (а в некоторых местах, где темпе-

ратура ниже, например в солнечных пятнах, регистрируется даже наличие термоустойчивых многоатомных молекул).

8

Пульсации и магнетизм

Без малого 400 лет (точнее, с 1638 г.) известно, что некоторые нормальные звезды периодически меняют блеск. Для этого есть разные причины; в частности, звезда может периодически раздуваться и сжиматься – иначе говоря, пульсировать. Известно несколько типов таких звезд, объединенных общим названием «пульсаторы». Около полувека назад были обнаружены и пульсирующие белые карлики.

Как нередко бывает, произошло это почти случайно. В середине 1960-х гг. астроном из Луизианского университета Арло Ландолт проводил в Национальной обсерватории Китт-Пик в штате Аризона фотометрические наблюдения блеска нескольких тусклых звезд с переменной светимостью. Для пущей надежности (чтобы меньше мешали колебания оптической плотности атмосферы) он сравнивал свет наблюдаемой звезды со светом ее соседки на небесной сфере, чью светимость считали постоянной. Полученные результаты почти всегда соответствовали ожиданиям, однако для одной звезды они оказались совершенно нелепыми. Ландолт принялся доискиваться до причин аномалии и вскоре обнаружил, что выбранная для контроля звезда-соседка периодически меняет блеск.

Эта незадача не имела бы никакого значения, не окажись эта звездочка белым карликом. Конечно, таким выгоревшим звездам положено было тускнеть из-за постепенного охлаждения. Однако никто не сомневался, что они, как показал еще Местел, остывают чрезвычайно медленно и потому сохраняют практически неизменный блеск на протяжении миллионов лет. Поэтому никак не ожидалось, что их видимая яркость может столь заметно варьировать. Эти вариации разумно объяснялись лишь пульсациями белого карлика.

Но главная проблема заключалась в другом. Некоторые теоретические модели белых карликов допускали слабые пульсации, но с очень малыми периодами порядка нескольких секунд (или, самое большее, десяти-двадцати секунд). Период колебаний яркости белого карлика Haro-Luyten Taurus 76, который наблюдал Ландолт, составлял целых 750 секунд, то есть 12,5 минут. Поэтому статья Ландолта «Новая короткопериодическая голубая переменная звезда»¹² с описанием результатов его наблюдений стала настоящей сенсацией.

Но интрига на этом не закончилась. Замеченные Ландолтом изменения блеска приблизительно соответствовали синусоиде. В 1971 г. Барри Ласкер и Джеймс Хессер обнаружили белый карлик R548, чья световая кривая демонстрировала не синусоидальные колебания, а биения между двумя модами с периодами 213 и 274 с. Кстати, ранее этот карлик был внесен в каталог переменных звезд, но в качестве обычной звезды. Через несколько лет более точные наблюдения показали, что его излучение имеет и дополнительные иррегулярности. В общем, к середине 1970-х гг. стало ясно, что белые карлики могут пульсировать, да еще весьма экзотическим образом. В дальнейшем число открытых пульсаторов этого типа стало быстро расти и к началу XXI в. достигло примерно сотни.

Тайна пульсирующих белых карликов была настолько интересной, что не могла не привлечь внимания множества астрономов. Сейчас она в общих чертах раскрыта, хотя многие детали еще предстоит прояснить. Изменения блеска белых карликов возникают благодаря колебательным процессам, которые изменяют и плотность, и температуру, и степень ионизации вещества белого карлика вблизи или не слишком далеко от его поверхности. Они не похожи на звуковые колебания и, скорее, напоминают волны на поверхности воды. Своим возникновением они обязаны не вариациям давления звездного вещества, а изменениям его плавучести в

¹² Arlo U. Landolt. A New Short-Period Blue Variable // *Astrophysical Journal* (July 1968), 153 (1): 151–164.

поле тяготения внутренних слоев звезды. Они не обладают радиальной симметрией и поэтому неодинаково распространяются по разным направлениям. Как легко предположить, известно несколько групп белых карликов (в настоящее время – шесть), для каждой из которых характерен свой тип таких волновых процессов. Эти волны всегда вызывают смещения атмосферы карлика и осцилляции ее температуры, которые и влекут за собой изменения блеска.

В нашем веке астрономы уделяют огромное внимание пульсирующим белым карликам, которые уже перестали выглядеть чем-то экстравагантным – напротив, оказались вполне типичными. Сейчас известно, что большинство этих звезд, за исключением лишь сильно намагниченных, в течение своего долгого жизненного пути хотя бы однажды проходят через стадию пульсаций. Например, карлики класса DA начинают пульсировать, когда температура их поверхности опускается до 13 000 К. При этой температуре протоны, присутствующие в зоне частичной ионизации водорода, могут присоединять электроны и превращаться в нейтральные атомы. Этот процесс изменяет тепловой баланс внутри белого карлика и запускает механизм пульсаций. Они продолжаются несколько сотен миллионов лет, пока поверхность не охладится еще на пару тысяч градусов – до 11 000 К. Сириус В, который относится как раз к этому классу, войдет в пульсационную стадию приблизительно через 1 млрд лет.

Это самый распространенный, но не единственный механизм запуска пульсаций белых карликов. В начале 1980-х гг. американский астроном Дон Вингет и его коллеги показали, что зародыши пульсаций могут появиться и в зоне частичной ионизации гелия. Ионы этого элемента начинают присоединять электроны при более высоких температурах, поэтому пульсации такого рода возникают в белых карликах задолго до остывания до 13 000 К. Уже через год эти же астрономы подтвердили свое предсказание, обнаружив белый карлик с гелиевой атмосферой (то есть карлик класса DB), пребывающий в стадии пульсаций¹³. При эффективной температуре 27 000 К он оказался вдвое горячее типичных водородных белых карликов-пульсаторов. Так что знаменитое изречение о том, что нет ничего практичнее хорошей теории, в данном случае быстро подтвердилось.

Наблюдения пульсаций белых карликов и сравнение результатов с модельными симуляциями позволяет получить уникальную информацию об их строении и скорости вращения. Например, полученная информация дает возможность вычислить процентное содержание кислорода и углерода в ядрах белых карликов. Этот раздел звездной астрономии, получивший название астросейсмологии, в наши дни развивается очень активно. Разумеется, таким методом изучают и другие звезды, в том числе и Солнце (и тогда он называется гелиосейсмологией). Полноты ради стоит отметить, что вертикальные колебания солнечной поверхности, типичные периоды которых составляют несколько минут, а типичные скорости – примерно 1 км/с, были открыты еще в начале 1960-х гг.

Осталось сказать несколько слов о магнитных свойствах белых карликов. Выявить и оценить магнитное поле любой звезды в принципе нетрудно, поскольку оно поляризует ее излучение и ведет к расщеплению спектральных линий. Конечно, здесь много технических сложностей, но они преодолимы. Сейчас установлено, что магнитные поля белых карликов далеко не одинаковы по силе. Их типичный диапазон простирается от десятков килогауссов до пяти сот – а возможно, даже тысячи мегагауссов (для сравнения, среднее магнитное поле Солнца составляет один гаусс, хотя в активных зонах солнечных пятен достигает до нескольких тысяч). Температуры замагниченных белых карликов и карликов с очень малыми магнитными полями лежат в одном и том же диапазоне. Напротив, средняя масса магнитных белых карликов в полтора раза больше, чем немагнитных, – 93 % солнечной массы против 60 %. Скорее всего, причина в том, что магнитные белые карлики являются потомками более массивных звезд.

¹³ Winget D. E. et al. Photometric Observations of GD 358: DB White Dwarfs Do Pulsate // *Astrophysical Journal Letters* (1982), 262, L11.

Гигантские масштабы магнитных полей белых карликов вполне понятны. Их предшественники – звезды с достаточно сильными (конечно, для этих звезд) магнитными полями. При сжатии силовые линии магнитного поля звезды оказываются вморожены (вполне профессиональный термин) во внутризвездную плазму. Это ведет к сохранению магнитного потока, который пропорционален произведению силы магнитного поля на квадрат звездного радиуса. Следовательно, если радиус карлика в сто раз меньше радиуса материнской звезды, напряженность магнитного поля для сохранения магнитного потока должна возрасти в 10 000 раз. Поэтому, если поле звезды-родительницы составляло, скажем, 200 гауссов (в сотню раз больше, чем в фотосфере Солнца), магнитное поле на поверхности белого карлика будет равно двум мегагауссам. Нередкая намагниченность звезды-предшественницы в 25 килогауссов у карлика обернется полем в 250 мегагауссов. Как говорится, не слабо! Впрочем, это самый типичный сценарий, есть и более экстравагантные. Стоит отметить, что полями в сотни мегагауссов располагают приблизительно 10 % белых карликов.

Белые карлики с сильными магнитными полями весьма заметно поляризуют собственное излучение. В общем случае такая поляризация оказывается эллиптической и при астрономических наблюдениях без проблем поддается измерению. Полученные данные служат хорошим средством оценки напряженности магнитного поля в окрестности белого карлика.

9

Белые карлики и фундаментальная физика

Читатель, наверное, уже осознал (во всяком случае, я сильно для этого постарался), насколько интересно изучать белые карлики, чтобы понять их природу и физические особенности. Однако эти звезды могут также стать лабораториями для погружения в мир элементарных частиц. Оказывается, что в этом плане весьма перспективна именно сейсмология белых карликов. Например, не исключено (хотя пока и не доказано), что она позволит оценить верхний предел массы аксионов, гипотетических сверхлегких частиц, которые ищут, но не могут найти с начала 1990-х гг.

Что это за частицы и кто их заказал? Изначально они были изобретены теоретиками вне какой-либо связи с астрофизикой и космологией. История эта довольно любопытна. Аксионы появились как следствие гипотезы, предложенной в 1977 г. физиками из Стэнфордского университета Роберто Печчеи и Хелен Квинн. Они пытались разрешить довольно неприятную проблему современной теории сильных ядерных взаимодействий – квантовой хромодинамики. В ее основное уравнение заложена возможность нарушения СР-симметрии (комбинированной четностью). Эта симметрия осуществляет зеркальное отражение и одновременно заменяет частицы античастицами. Конкретно – в этом уравнении имеется член, связанный с топологическими конфигурациями глюонного поля, который и предписывает такое нарушение. Масштаб нарушения задается вводимым в теорию углом θ , причем комбинированная четность соблюдается лишь при его нулевом значении.

Несохранение комбинированной четности должно привести к появлению у нейтрона большого дипольного электрического момента, который, однако, вообще не наблюдается в эксперименте. Печчеи и Квинн предложили красивую модель, снимающую это противоречие. В их модели угол θ оказывается динамической переменной, имеющей неодинаковые значения в различных точках пространства. Однако в низкоэнергетическом пределе он стремится к постоянному минимальному значению, что и ведет к сохранению СР-симметрии.

Это было только началом. Как вскоре независимо показали будущие лауреаты Нобелевской премии Стивен Вайнберг и Фрэнк Вильчек, вблизи своего минимума угол θ неизбежно осциллирует. Эти осцилляции проявляют себя рождением чрезвычайно легких стабильных частиц с нулевым спином. Они не несут электрического заряда, однако могут рассеиваться на виртуальных фотонах, сопутствующих магнитным полям. Более того, в сильном магнитном поле такая частица может превратиться в реальный фотон. Это и есть аксионы.

Аксионы должны быть намного легче нейтрино – согласно теоретическим оценкам, их массы измеряются всего миллионными долями электронвольта. Согласно ряду космологических моделей, аксионы могли в изобилии появиться через 0,00001 с после Большого взрыва. Их предполагаемое количество было столь велико, что сверхлегкие аксионы внесли весьма ощутимый вклад в общую массу Вселенной. Поэтому космологи считают, что аксионы могут быть вполне приемлемыми претендентами на роль частиц темной материи.

Если кто не знает или не помнит, что это такое, вот краткая информация. Гипотетические частицы этой загадочной материи пришли в астрономию из космологии. Примерно полвека назад стало понятно, что наша Вселенная обладает плоской или почти плоской геометрией. Отсюда следовало, что средняя плотность ее вещества не должна особенно отличаться от 10^{-29} г/см³ (этот вывод элементарно следует из модели изотропной и однородной Вселенной, развитой в 1920-е гг. российским математиком Александром Фридманом и бельгийским космологом Жоржем Анри Леметром). Однако все имеющиеся данные наблюдательной астрономии показывали, что известного науке вещества для этого не хватает. Чтобы выйти из

этого затруднения, была использована гипотеза темной материи, которую вне связи с космологией в 1933 г. предложил замечательный американский астроном швейцарского происхождения Фриц Цвикки. Согласно этой гипотезе, в космическом пространстве рассеяны несветящиеся массивные объекты, которые и восполняют наблюдаемый дефицит вещества. Эти объекты Цвикки вполне логично назвал темной материей.

Природа гипотетической темной материи с самого начала вызывала споры. Ее объясняли по-разному, но всегда безуспешно. В 1978 г. американский астрофизик Джеймс Ганн и его соавторы предположили, что от Большого взрыва могли остаться массивные стабильные частицы небарионной природы, которые и составляют темную материю. Подобно нейтрину, они электрически нейтральны и, следовательно, не могут излучать и поглощать фотоны – в противном случае их бы легко обнаружили. Через шесть лет было показано, что скопления подобных частиц могут формировать гравитационные колодцы, которые способствуют образованию галактик и контролируют скорости периферийных звезд в этих галактиках. Эти частицы из-за большой массы уже на стадии рождения первых галактик (а фактически гораздо раньше) обязаны двигаться гораздо медленней света. Поэтому их называют холодными – в отличие от «горячих» нейтрино, движущихся почти со скоростью света. Так к середине 1980-х гг. возникла концепция холодной темной материи, доминирующая до сегодняшнего дня.

С тех пор прошло 35 лет – срок немалый, и теоретики придумали множество версий частиц темной материи (не только холодной). В частности, есть основания считать, что темная материя может состоять из аксионов. Как ни странно, эти сверхлегкие частицы, если они существуют, должны двигаться с нерелятивистскими скоростями – то есть это «холодная» темная материя. Для поиска различных кандидатов в частицы темной материи, в том числе и аксионов, экспериментаторы сконструировали и опробовали множество детекторов. Однако воз и ныне там. Темную материю десятилетия ищут на различных установках во многих странах, но пока безуспешно.

Причем же здесь затухающие звезды? Дело в том, что имеющиеся данные по осциллирующим белым карликам дают слабое (но все же реальное!) указание на возможность физического взаимодействия аксионов с электронами. Если это так, то порожденное аксионами электромагнитное излучение должно влиять на скорость остывания белых карликов, и этот эффект можно отследить по изменениям их кривых блеска. Детальный анализ отклонений наблюдаемой светимости белых карликов от результатов модельных вычислений темпов их охлаждения, начатых в свое время еще Местелом, также указывает на такую возможность. Это очень интересное направление исследований, которое еще раз демонстрирует неразрывность глубинных интересов астрофизики и физики элементарных частиц.

Но это далеко не все. Сейсмология белых карликов может также дать информацию о дипольном магнитном моменте нейтрино. Согласно Стандартной модели элементарных частиц, он равен нулю, однако, как допускают многие теоретики, в реальности может иметь ненулевое значение. Наконец, не исключено, что анализ пульсаций белых карликов позволит ответить на вопрос, не изменяется ли во времени и пространстве гравитационная постоянная, которая в эйнштейновской ОТО считается абсолютной константой. Вот как много можно получить (или хотя бы надеяться получить) от этих догорающих «звездных останков»!

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.