

Оглавление

Предисловие	9
-------------------	---

ЧАСТЬ I. ВСЕ О БЕЛЫХ КАРЛИКАХ

1 Три революции в астрономии	17
2 Наука о космосе на новом витке: пришествие ММА... ..	25
3 Астроликбез первого уровня.....	32
4 Горячие светлячки космоса	35
5 Изобретение великой диаграммы.....	43
6 От триады к тысячам.....	54
7 Вся сила в спектрах.....	57
8 Пульсации и магнетизм	64
9 Белые карлики и фундаментальная физика.....	69
10 Вырождение в физическом смысле.....	73
11 Вмешательство теории относительности.....	81
12 Справедливость и ирония истории	89
13 Как светят звезды?.....	93
14 Пришествие квантовой механики.....	95

15	Углеродная проблема	98
16	Белые карлики и возраст Галактики	101
17	Кое-что о полостях Роша.....	106
18	Взрывы и сверхвзрывы	109
19	Кристалл величиной с Землю.....	112
20	Другие вместители выроденного газа	118
21	От теории к открытию	123
22	Один хорошо, а два лучше.....	126
23	Кое-что о волновой гравитации	128
24	Совсем тесная пара	132
25	Послесолнечный карлик.....	138
26	Сага о двух Сириусах в настоящем... ..	141
27	...А также в прошлом и в будущем.....	144
28	Первые звезды	147
29	Белые карлики и конец света	155

ЧАСТЬ II. КАК БЕЛЫЕ КАРЛИКИ ПОМОГЛИ КОСМОЛОГИИ

30	Темная энергия: deus ex machina	167
31	Вселенные-экзоты.....	180

ЧАСТЬ III. АСТРОФИЗИКА ПОСЛЕ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ, ИЛИ РАДИОАСТРОНОМИЯ ШЕСТИДЕСЯТНИКОВ

32	История двух великих открытий	191
33	Как открывали реликтовое излучение	217
	Примечания	263

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 приглашенная 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 интересные 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 таких 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 символизировали 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 генерации 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 дожидаться 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 революции. 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 блеснула 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, счел 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 Радиового института Виктор Франц Гесс обнаружил проникающие в атмосферу Земли заряженные частицы внеземного происхождения, которые назвали космическими лучами. И это можно считать 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.

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 впросом 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 радионебосвода. 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 Радиевого 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» проходящие световые сигналы. Эти системы, особенно адаптивная оптика, практически уравнили наблюдательные 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 ЕНГ 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), изменится — 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, Проциона. 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 Проциона 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