

НАУКА

ВЕЛИЧАЙШИЕ
ТЕОРИИ

ЧАНДРАСЕКАР

Звездная эволюция

50



Жизнь и смерть
одной звезды

50



DeAGOSTINI

ЧАНДРАСЕКАР

Звездная эволюция

ЧАНДРАСЕКАР

Звездная эволюция

Жизнь и смерть одной звезды

НАУКА. ВЕЛИЧАЙШИЕ ТЕОРИИ

Наука. Величайшие теории: выпуск 50: Жизнь и смерть одной звезды. Чандрасекар. Звездная эволюция. / Пер. с исп. — М.: Де Агостини, 2015. — 168 с.

Субраманьян Чандрасекар — ученый-теоретик и один из самых выдающихся астрофизиков XX века. Самое любопытное, что этот индиец, ставший гражданином США, почти никогда не смотрел на небо в телескоп, но стал автором огромного количества книг, в которых раскрыл многие секреты, ревностно хранимые Вселенной. Особое место среди его работ занимают труды по определяющим физическим процессам при образовании и эволюции звезд, включая так называемый предел Чандрасекара — максимально возможную массу белого карлика.

ISSN 2409-0069

© Eduardo Battaner López, 2015 (текст)

© RBA Coleccionables S.A., 2015

© ООО «Де Агостини», 2014–2015

Иллюстрации предоставлены:

Age Fotostock: 57 (вверху); Album/akg-images/ РИА Новости: 89 (вверху слева); Biswarup Ganguly: 150; Chandra X-ray Observatory/ Смитсоновский институт: 96; Cordon Press: 45 (вверху слева); Eduardo Battaner: 153 (вверху); Hans Wolff: 57 (внизу); Joan Pejoan (инфографика); NASA: 73 (внизу), 145, 153 (внизу); NASA/ CXC/M. Weiss: 73 (в центре); NASA/ ESA: 143; NASA/ ESA/J. Hester (Аризонский университет): 73 (веху слева); S. Snowden/R. Petre (LHEA/GSFC)/ C. Becker (MIT)/ ROSAT Project, NASA: 73 (вверху справа); Science Photo Library/ Age Fotostock: 89 (вверху справа), 117 (внизу слева; внизу справа); Американский институт физики: 45 (вверху справа); Архив RBA: 23, 26, 45 (внизу), 89 (внизу), 100, 113, 117 (вверху слева), 137; Йеркская обсерватория, Чикагский университет: 117 (вверху справа); Лос-Аламосская национальная лаборатория: 110; Массачусетский технологический институт: 67; Нобелевский фонд: 58.

Все права защищены.

Полное или частичное воспроизведение
без разрешения издателя запрещено.

Содержание

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 7 |
| ГЛАВА 1. Что такое звезда | 17 |
| ГЛАВА 2. Что такое белый карлик | 49 |
| ГЛАВА 3. Что такое релятивистский белый карлик | 83 |
| ГЛАВА 4. Что такое галактика | 105 |
| ГЛАВА 5. Наконец-то физика | 129 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 157 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 161 |
| УКАЗАТЕЛЬ | 163 |

Введение

XX век — это век астрофизики. Развитие квантовой и релятивистской теорий дало новую основу для истолкования данных, а также сделало возможным прорыв в области больших телескопов. В XX веке многие без сомнений назвали бы Чандraseкара великим астрофизиком. Однако этот ученый был нетипичным физиком: он почти никогда не смотрел в телескоп и очень мало, причем довольно неумело пользовался компьютером. Зато Чандрасекар много читал и писал, используя в качестве инструмента собственный мозг, в котором умещалась целая Вселенная. Он был индийцем и гражданином Америки, абсолютным трезвенником и вегетарианцем, а также прославился удивительной способностью контролировать время и не тратить ни секунды напрасно.

Сложная задача — писать биографию Чандрасекара, или Чандры, как его звали друзья. Причина в том, что Чандра только и делал, что работал. Иногда кажется, что каждая секунда его жизни была посвящена науке, поэтому мы ничего не знаем о других событиях в жизни Чандрасекара и занимательных случаях, связанных с ним. Главное приключение происходило внутри ученого, вся его напряженная жизнь протекала в его собственной голове, все его драмы носили исключительно интеллектуальный характер. Страсть проявлялась только в исследованиях физика, которые затрагивали самые разные темы.

Он начинал работу над ними практически с нуля и оставлял доведенными до последней точки, а затем переключался на новую проблему.

Три этапа жизни Чандрасекара представляют собой приблизительно 20 лет в Индии, примерно 6 лет в Кембридже и остальные — в Йерксе и Чикаго. Чандре воспитывался как индус и остался индусом даже в Америке, однако он дополнил свое индийское образование британским, причем не только в Кембридже, но еще раньше, у себя на родине, которая в то время была колонией Великобритании. Индийские корни ученого — это ключ, который поможет приблизиться к пониманию его личности, хотя, как в случае с каждым гениальным человеком, ее невозможно ограничить какими-то рамками.

Чандре был удостоен Нобелевской премии (или Нобелевская премия имела честь быть связанной с его именем) за астрофизическое открытие чрезвычайной важности: он сделал вывод, что существует верхний предел массы белого карлика, что позже назвали *пределом Чандрасекара*. В этой книге мы рассмотрим, что такое звезда, что такое белый карлик, почему его масса имеет предел и почему это открытие имело такую важность.

Однако самое примечательное — то, что он сделал свое открытие во время путешествия из Индии в Европу, а именно от Бомбея до Венеции, потратив на это всего 19 дней. Чандре работал вопреки почти постоянным штормам и делал записи во время редких перерывов в качке. Ему едва исполнилось 20 лет. Индийское правительство предоставило юноше стипендию для написания диссертации в Кембридже... и он использовал путешествие, чтобы сделать работу, заслуживающую Нобелевской премии. Это было в 1930 году, а премию Чандрасекар получил лишь в 1983-м, то есть через 53 года. Почему понадобилось столько времени для признания этой заслуги?

Один из самых известных ученых Кембриджа, Эддингтон, обладал, можно сказать, чрезмерным авторитетом. Он был так уверен в себе и внушал такое уважение коллегам, что они доверяли суждению Эддингтона абсолютно по всем вопросам. Долгая полемика между Эддингтоном и Чандре — классический

пример полемики, причем не только в мире астрофизики, но и в мире науки в целом. Мы уделим ей должное внимание, поскольку эта дискуссия стала ярким образцом того, как внешне бессмысленное столкновение может привести к значительным результатам. То, что казалось камнем преткновения, стало опорой для гигантского шага вперед. Победителем из этой полемики вышел Чандра, и не только потому, что истина была на его стороне, но и благодаря душевной силе, с которой он встретил сопротивление судьбы. Можно сказать, что в споре выиграли наука и скромность.

Эддингтон не только не оценил работу молодого Чандры, но и публично высмеял юношу и пренебрежительно отверг его идею как ложную. Чандре ужасно страдал: именно Эддингтон, которого он безмерно уважал, отказал ему в справедливости. Работа молодого ученого даже не была опубликована, поскольку не получила поддержки великого коллеги.

Какой же была реакция Чандры? Он не стал втягиваться в бесконечную дискуссию, рискуя временем, энергией и душевным спокойствием, а просто опубликовал первую книгу — «*Введение в учение о строении звезд*», — в которой изложил свои идеи, как всегда, математически безупречные. В ней речь шла и о пределе массы белых карликов. Ученый посвятил себя другим темам, сохранил уважение к Эддингтону, и в итоге они стали хорошими друзьями. Ни тот, ни другой не уступили в дискуссии до самой смерти авторитетного профессора, но Чандре проявил индуистское спокойствие и в 1983 году написал биографическую статью с удивительным названием «*Эддингтон: самый выдающийся астрофизик своего времени*».

Поскольку белые карлики — объект изучения астрономии, можно сказать, что Нобелевская премия была вручена Чандraseкару за его вклад в эту науку. Но, как ни парадоксально, Чандра не хотел заниматься астрономией и даже астрофизикой как приложением физической теории к астрономическим наблюдениям. Его интересовала исключительно физика. Ученый был великим астрономом, который не хотел быть астрономом. По-степенно он двигался к чистой физике, чтобы полностью посвятить себя ей. Значительную часть своей жизни он жил в обсер-

ватории (Йеркской), не проявляя ни малейших намерений смотреть в окуляр. Это был астроном без телескопа. Чандра знал, что его главный инструмент – ручка, из-под пера которой появлялись элегантные дифференциальные уравнения, поддающиеся только ему. Сильной стороной ученого были развитые математические способности. Его работы представляли и представляют собой непрерывный поток мудрости, обильное течение которого, казалось, не зависело от жизненных обстоятельств. Ум Чандры оставался острым даже в старости.

Жизнь ученого можно разделить на этапы в зависимости от мест его жительства либо согласно научным темам, которыми он занимался, хотя мы можем применить оба критерия. Дело в том что Чандра очень редко рассматривал разные проблемы одновременно. Он работал над одной обширной темой, приходил к окончательным выводам и начинал другую обширную тему, и так раз за разом. Каждый этап заканчивался итоговой книгой, в которую включался целый ряд уже опубликованных статей, связанных с исследованием. Чандрасекар работал так много и столько всего публиковал, что Пенроуз говорил: никто не может перечислить полностью все темы, над которыми трудился этот физик. Невозможно прочитать все, что он написал. Такая плодовитость стала результатом стальной дисциплины. Чандра не вел пустопорожних бесед – он говорил либо о науке, либо об искусстве. Все остальные темы не заслуживали внимания.

Главы этой книги рассматривают различные научные темы, которым ученый посвятил себя. Он сам разделил свою жизнь на семь этапов – по предметам изучения.

1. Строение звезд, включая теорию белых карликов (1929–1939).
2. Звездная динамика, включая теорию броуновского движения (1938–1943).
3. Теория переноса лучистой энергии, теория поляризации света в атмосфере под действием Солнца, теория звезд-

ных атмосфер и квантовая теория отрицательного иона водорода (1943–1950).

4. Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость (1952–1961).
5. Стабильность эллипсоидальных фигур равновесия (1961–1968).
6. Общая теория относительности и релятивистская астрофизика (1962–1971).
7. Математическая теория черных дыр (1974–1983).

Перечисляя эти этапы, Чандре еще не знал, что в его жизни добавится последний, восьмой этап, весьма отличающийся от других и связанный с изучением «*Начал*» Ньютона (1984–1995).

Большинство статей физика легли в основу его книг. Письменные труды, демонстрирующие вклад ученого, довольно хорошо соотносятся с этапами его жизни, определенными им самим и представленными восемью книгами: «*Введение в учение о строении звезд*», «*Принципы звездной динамики*», «*Перенос лучистой энергии*», «*Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость*», «*Эллипсоидальные фигуры равновесия*», «*Математическая теория черных дыр*», «*Истина и красота*» и «*Начала* Ньютона для обыкновенного читателя».

Мы уже говорили о первой работе, которая позволила Чандре уйти от полемики с Эддингтоном и помогла ему получить Нобелевскую премию.

Его вторая книга, «*Принципы звездной динамики*», привлекает постановкой вопроса. Если газ состоит из молекул, как будет вести себя звездный газ, то есть газ, в котором вместо молекул — звезды? Можно ли считать галактику звездным газом?

Книга «*Перенос лучистой энергии*» сохраняет актуальность до сих пор и является настольной для любого начинающего исследователя, интересующегося переносом фотонов. Книга име-

ет исключительную важность и описывает, как ведут себя фотоны в той среде, где они образуются и поглощаются. Также в ней объясняется поведение света, испускаемого звездами, когда он пересекает их и нашу атмосферу. Работы на эту тему существовали и ранее, но были безвкусными, неточными и плохо систематизированными, а самое главное — они не объясняли перенос фотонов при поляризованном излучении. Эта книга восполняла большой пробел и отличалась математическим совершенством. По мнению самого автора, работа над ней соответствовала самому счастливому периоду его жизни, причем счастье для него было связано с возможностью делать красивые научные открытия.

Книга «Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость» также все еще актуальна и, возможно, такой и останется. Она имеет большое значение для изучения многих астрофизических проблем, на эту работу часто ссылаются исследователи в области механики флюидов. Это исключительно сложная тема, особенно если она рассматривает намагниченные флюиды с их богатейшим разнообразием нестабильностей. Гигантский труд Чандрасекара, созданный со всей математической объективностью, будет жить вечно.

В «Эллипсоидальных фигурах равновесия» речь идет о проблеме, которую начал рассматривать еще Ньютона, когда с помощью пера и бумаги вычислил, что Земля имеет форму эллипса. Его данные через много лет были проверены Монпертию во время исторической экспедиции в северные широты. В целом в книге речь идет о форме, которую приобретают аутогравитационные врачающиеся системы.

В «Математической теории черных дыр» Чандр занялся теорией черных дыр Керра, то есть черными дырами, которые обладают не только массой, но и кинетическим моментом,— следовательно, это врачающиеся черные дыры. Он нашел очень общие решения уравнений Эйнштейна, которые, по собственным словам ученого, обладают удивительной математической красотой.

Наконец, Чандрасекар совершил смелый поступок, когда изложил свои мысли о красоте в книге «Истина и красота».

Ученый был очень восприимчивым к искусству, особенно к музыке, литературе и живописи. В качестве образцов творческого начала в искусстве и науке он предлагал Ньютона, Бетховена и Шекспира, которые не занимались развитием уже созданного, а создавали новое с нуля. В последние годы жизни Чандра углубился в биографию и тексты Ньютона и тщательно проанализировал его *«Начала»*. Он выяснил, что Ньютон был не только создателем новой науки, но и изобретательным человеком с развитым эстетическим чувством, который использовал в своих работах наиболее простые, привлекательные и точные методы. Чандра влюбился в Ньютона и написал свою последнюю книгу — *«Начала» Ньютона для обыкновенного читателя»*.

Также ученый был редактором *«Астрофизического журнала»* (*ApJ*) и превратил это внутреннее издание Чикагского университета в наиболее влиятельный журнал в своей области. Работа на этом посту предполагала гигантские усилия, однако собственная научная деятельность Чандры ничуть не замедлилась — по-прежнему благодаря строгому контролю над временем. На посту редактора он решал, какие статьи отправлять на публикацию, а какие отклонять. Он превратил журнал в издание для всего американского астрофизического сообщества, и развитие этой науки было в руках Чандрасекара в течение почти 20 лет. Сегодня невозможно себе представить, чтобы контроль над научным журналом подобного уровня принадлежал одному человеку.

Таким был Чандра, всегда одетый в темно-серый костюм, белую рубашку и галстук. Мы не знаем, носил ли он дома что-то более удобное, — все помнят его в этой неизменной одежде. Он никогда не повышал голос, никогда не ел мяса, никогда не употреблял алкоголь, никогда не произнес ни одной грубой фразы. По мнению одних, Чандрасекар имел замкнутый характер, по мнению других, он был воплощением приветливости. Любопытно, что и первые, и вторые были правы.

- 1910** Субраманьян Чандрасекар родился 19 октября в Лахоре, Индия.
- 1918** Семья переехала в Мадрас. Три года спустя он поступил в среднюю школу.
- 1925** Начал обучение в Президентском колледже.
- 1929** Написал первую статью — «*Комптоновское рассеяние и новая статистика*».
- 1930** Окончил учебу в Президентском колледже и получил стипендию на учебу в Кембридже. Во время поездки разработал предел Чандрасекара, за который много лет спустя получил Нобелевскую премию.
- 1931** Умерла мать ученого. По приглашению Макса Борна посетил Гётtingен. Через два года Нильс Бор пригласил его посетить Копенгаген.
- 1933** Защитил докторскую диссертацию по врачающимся аутогравитационным полиротам. Получил звание *фелло Тринити-колледжа*.
- 1934** Посетил Советский Союз, где встретился с армянским астрофизиком Виктором Амбарцумяном.
- 1935** Начало полемики с Артуром Эддингтоном. Вместе с Шепли посетил Гарвард.
- 1936** Женился на Лалите Дораисвами. Жил в Кембридже, а позже получил работу в Йеркской обсерватории Чикагского университета.
- 1939** Опубликовал книгу «*Введение в учение о строении звезд*». Четыре года спустя опубликовал «*Принципы звездной динамики*».
- 1950** Опубликовал «*Перенос лучистой энергии*».
- 1952** Перешел на работу в отделение физики Чикагского университета. Получил медаль Кэтрин Брюс Тихоокеанского астрономического общества.
- 1953** Получил золотую медаль Королевского астрономического общества. Назначен редактором «*Астрономического журнала*». Получил американское гражданство.
- 1955** Чандрасекару присвоено звание члена Национальной академии наук.
- 1961** Опубликовал книгу «*Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость*».
- 1964** Окончательно обосновался в Чикаго.
- 1967** Основал рубрику «*Письма Астрофизического журнала*».
- 1969** Опубликовал книгу «*Эллипсоидальные фигуры равновесия*».
- 1971** Оставил пост редактора «*Астрофизического журнала*».
- 1983** Получил Нобелевскую премию. Опубликовал книгу «*Математическая теория черных дыр*».
- 1987** Опубликовал книгу «*Истина и красота*».
- 1995** Опубликовал книгу «*Начала Ньютона для обычного читателя*». Умер 21 августа от сердечного приступа.

ГЛАВА 1

Что такое звезда

Почему звезды светят? Ответ на этот вечный вопрос мы сегодня знаем. Но знал его и один индийский подросток, живший в Мадрасе, потому что прочел об этом; удивительные математические способности позволяли ему, несмотря на молодость, читать книги такого рода. Кроме того, этому подростку повезло: два великих физика, Зоммерфельд и Гейзенберг, посетили его город, и он многому научился у них. Разве кто-то мог знать, что в итоге этот мальчик станет известнейшим ученым в области эволюции звезд?

Субраманьян Чандрасекар родился в Лахоре, в образованной и процветающей тамильской семье. Он появился на свет 19 октября 1910 года и сам в шутку называл эту дату 19101910. Его семья была с юга, и на юг, в Мадрас, она вернулась, когда Субраманьян было всего восемь лет. Город Мадрас, один из самых известных в Индии, сегодня называется Ченнаи. Переезд в Лахор был необходим, поскольку отец Чандры, Айяр, служил железнодорожным чиновником высокого уровня.

Один из братьев его отца, Чандрасекхара Венката Раман (1888–1970), известный в мире как Ч.В. Раман, стал лауреатом Нобелевской премии в 1930 году за открытие эффекта, носящего его имя. Эффект Рамана относится к области спектроскопии и доказывает существование квантовых эффектов в рассеянии света на молекулах. Казалось бы, дядя мальчика — лауреат Нобелевской премии — должен был решительно повлиять на образование и призвание Чандры как ученого. Однако это было не так, более того, на самом деле их личные отношения были довольно холодными, и досада Чандрасекара имела свои причины — мы еще поговорим о них. В любом случае, то, что родной дядя мальчика был лауреатом Нобелевской премии, не было причиной его ранних занятий математикой и физикой.

ДЕТСТВО

Семья Чандры входила в течение брахманического шиваизма — одного из двух главных религиозных течений на юге Индии. Несмотря на традиционный образ жизни, прадедушка будущего ученого Раманатан (1837–1906) воспитывал своего сына Раманатана Чандрасекара (1866–1910) так, чтобы его тамильская культура дополнилась преимуществами британской. Хотя Индия была завоевана в середине XIX века, западная культура еще до этого внесла свой вклад в запутанный рисунок вековых индийских традиций. Британское правительство хотело сделать свою культуру (включая научную) частью сложной индийской системы с ее кастами, верованиями и расами. В индийскую традицию должно было войти изучение английского языка. Предки Чандрасекара приняли это новшество, не забывая о родном тамильском и собственных верованиях. И деды ученого, и сам Чандрасекар сохранили индуистские корни, однако усвоили и европейскую философию.

Чандрасекар говорил, что верность индуистской традиции — часть его натуры. Несмотря на то что жизнь ученого протекала в Кембридже и Чикаго, несмотря на весь его огромный вклад в западную культуру и даже несмотря на американское гражданство, Чандрасекар всегда был настоящим индусом.

Британские просветители хотели влиять на культуру Индии, заставить ее отказаться от некоторых ужасных традиций, таких как сжигание вдов после смерти мужа (эту практику сохраняли некоторые касты), и искали поддержки у тех индийцев, которые стремились усвоить более прогрессивные взгляды. Хотя британцы потерпели фиаско, насаждение английского языка и западной науки имело благоприятный эффект, по крайней мере для состоятельных семей, к числу которых принадлежали и потомки Раманатана. Превращение Индии в более западную страну было невозможным, но эта попытка оставила в некоторых кастах плодородные семена. Частичное слияние двух таких разных культур принесло свои небольшие плоды, и одним из них стал вклад индийца в международную астрофи-

зику. Рабиндрнат Тагор и Уильям Шекспир были разными, но вполне совместимыми.

Чандра не знал своего дедушку Раманатана Чандрасекара, потому что родился через семь месяцев после его смерти, но испытал на себе все преимущества открытого ума, который дедушка вместе с супругой Парвати хотел сформировать в своих детях. Он был преподавателем математики и автором нескольких книг. Среди его восьмерых детей были отец Чандры Субраманьян Айяр, родившийся в 1885 году, и уже упомянутый Чандрасекхара Венката Раман, более известный как Ч. В. Раман, лауреат Нобелевской премии, родившийся в 1888 году.

Айяр получил хорошее образование. Он окончил Мадрасский университет, Президентский колледж и получил высокую должность в службе железных дорог Индии. Как уже было сказано, эта должность заставляла его часто менять место жительства, поэтому Чандра родился в Лахоре, городе с мусульманскими традициями (он вошел в состав Пакистана после создания этого государства в 1947 году). Затем семья переехала в Лакхнау, а оттуда — в Мадрас, вернувшись к собственной тамильской традиции.

Мать будущего ученого, Ситалакшми, вышла замуж в 17 лет. Это была очень одаренная женщина и, хотя она не смогла завершить образование, делала переводы различных авторов.

У пары было много детей. Первые две дочери, Раджалакшми (Раджам) и Балапарвати (Бала), были старше Чандры, но так как он стал первым мальчиком в семье, ему полагалось наследство, он должен был нести ответственность за семью после смерти отца, а также проводить различные ритуалы. Кроме того, Чандра унаследовал имя своего дедушки: старшие сестры называли его Айя, а младшие братья и сестры — Анна. Затем появились Вишванатан (Вишван), Балакришнан, Раманату (Рамнат) и младшие сестры — Савада, Видья, Савитри и Сундари.

Из всех братьев Чандру лучше всего понимал Балакришнан, судя по их обширной переписке. Много сохранилось и писем молодого Чандры к отцу, благодаря которым мы можем немно-

го понять образ мыслей этого ученого. Связь Чандры с матерью была очень тесной, хотя Ситалакшми и умерла через несколько месяцев после его отъезда в Кембридж. Ее болезнь чуть не помешала поездке, но женщина, осознавая, как сильно ее сыну необходимо образование, попросила Чандру уехать в Англию. Юноша создан для мира, а не для нее, так пусть он уезжает, даже если сама Ситалакшми никогда больше его не увидит.

Хотя моя мать училась только в средней школе, она хорошо знала английский язык. Она даже перевела на тамильский язык несколько пьес Ибсена. Один из ее переводов, который пользовался большим успехом, — «Кукольный дом». [...] С тех пор Ибсен — один из моих любимых писателей.

Субраманьян Чандraseкар

Родители Чандры лично занялись его образованием. Айяр учил сына арифметике, Ситалакшми — тамильскому. Образование в индийских школах в то время было очень скучным, так что до 11 лет мальчик учился дома, а в 15 лет поступил в Президентский колледж, чтобы изучать физику. Его семья в Мадрасе имела большой двухэтажный дом с девятью спальнями, пользовалась услугами повара, садовника и двух слуг. Этот красивый особняк назывался *Чандра Вилас* — правда, не по имени будущего ученого, а в честь его дедушки.

Одной из соседок была Савитри Дораисвами — вдова капитана Дораисвами и мать Лалиты — девушки, которая изучала в Президентском колледже физику вместе с Чандрай, а позже стала его женой. В годы их учебы можно было видеть, как юноша и девушка сидят на уроке — она всегда позади него — и вместе молчат.

Чандра был вундеркиндом и имел талант к математике, удивлявший его отца, семью и всех учителей. Он всегда делал больше, чем требовалось, и даже начал самостоятельно изучать учебники старших курсов. Поступив в Президентский колледж, Чандра стал объектом восхищения: многие понимали, что юно-

ИНДИЯ И АНГЛИЯ

В детские годы Чандра Индия была британской колонией. Англичане хотели, чтобы их культура пронизала сложное индийское общество. Многие индийцы учились в Англии и возвращались на родину, чтобы участвовать в развитии своей страны. Молодежь разрывалась между стремлениями сохранить традиции и доказать, что индийцы не меньше британцев способны заниматься наукой. Однако прежде всего Индии нужно было восстановить свою независимость. Хотя страна была бедной, с сильно расслоенным населением, в ней расцветали идеи мирного освобождения: это были годы Махатмы Ганди и Джавахарлала Неру. Два индийца получили Нобелевскую премию: Раман (дядя Чандры) и Тагор. С другой стороны, различные индийские ученые, получившие образование в Англии, стали членами Королевского общества. Достойны упоминания Менгна Саха (1893–1956) и Сатьендра Нат Бозе (1894–1974). Первый широко известен благодаря уравнению, носящему его имя, — уравнению Саха, которое регулирует пропорцию ионизированных атомов в термодинамическом равновесии. Второй установил статистическую механику фотонов, позже дополненную Эйнштейном, которая справедлива для квантовых систем частиц, не выполняющих принципа запрета Паули. Это статистическое распределение сегодня называется распределением Бозе — Эйнштейна и справедливо для всех типов бозонов. Термин «бозоны» как раз связан с фамилией этого индийского физика — Бозе.



Сатьендра Нат Бозе.

ше уготовано большое будущее. По решению своего отца Чандра изучал не математику, а физику, но всю свою профессиональную жизнь проявлял способности к математике, позволявшие ему решать физические и астрофизические задачи. Сам Чандра хотел изучать математическую физику, однако его отец мечтал, что после окончания учебы сын станет чиновником. К счастью, Чандра, имевший другие планы, нашел поддержку у матери.

ЮНОСТЬ

Несмотря на то что в Индии были хорошие физики, три самых выдающихся из них (Саха, Бозе и Раман) очень плохо ладили между собой. Поль Дирак рассказывал, что во время поездки в Индию он заметил сильную враждебность между Бозе и Саха, которые не могли находиться в одной комнате. Существовало и соперничество между Саха и Раманом, которое обострилось на лекции Рамана в присутствии Арнольда Зоммерфельда. Саха встал во время вопросов и сказал, что открытие Рамана — всего лишь подтверждение прогноза Адольфа Смекала (1895–1959), а позже написал в журнал *Nature*, что объяснение Рамана неверное. По словам Чандры, который знал обо всех этих интригах благодаря своему другу Кришнану, сотрудничавшему с Раманом, «Бозе был самым лучшим, он был добрым, любезным и не заботился о «гламурных» аспектах науки».

Возможно, самое обидное из этих столкновений состоялось между Раманом и Кариаманиккамом Сринивазой Кришнаном (1898–1961). Они оба вместе открыли то, что сегодня называется спектром Рамана, и первое сообщение в *Nature* было подписано именами обоих. Действительно, похоже, что спектр должен был бы называться спектром Рамана — Кришнана. Но в следующем месяце Раман отправил еще одно сообщение в *Nature*, подписавшись единолично и ничего не сообщив Кришнану. Позже Раман даже начал сомневаться в честности Кришнана и после его смерти написал: «Он был самым большим шарлатаном, которого я когда-либо знал, всю свою жизнь он носил маску, под которой скрывался другой человек».

У Чандры также не было взаимопонимания с дядей, и главная причина их враждебности относится к 1937 году. Приехав в Индию из Чикаго, Чандра навестил своего дядю в Бангалоре. Когда он вошел в кабинет Рамана, тот как раз распаковывал последнюю книгу Чандры, «Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость». Раман заметил:

«Единственная книга такого размера, которую я видел до этого, — роман Энтона Троллопа. Настоящий мусор. Как у тебя получает-

ся писать такие книги? Я никогда не находил времени, чтобы написать книгу. Для меня всегда было намного интереснее исследование. В 1926 году я хотел написать книгу о рассеянии света, но услышал, что Анри Кабан пишет такую же, и не стал этого делать. В результате я открыл эффект Рамана, и мне дали Нобелевскую премию, а Кабан написал книгу. Теперь у меня Нобелевская премия, а у Кабана книга».

Чандра ответил: «Боже мой, я упустил возможность получить четыре Нобелевские премии», а Раман парировал с напыщенным презрением: «Получить Нобелевскую премию не так-то просто».

Больше всего на образование Чандры повлиял математик Сриниваса Рамануджан (1887–1920), который работал в Англии и умер очень молодым, вернувшись на родину. Позже Чандра занялся установкой бюста ученого и выяснил, что не сохранилось ни одной его фотографии. В итоге нашлась одна — из паспорта: супруга Рамануджана жила в нищете, но случайно сохранила ее. Из-за временной разницы Чандра не был лично знаком с этим ученым, но всегда боготворил Рамануджана, работы которого открыли для него очень многое.

В 1927 году в руки Чандрасекара попала книга Арнольда Зоммерфельда «Строение атома и спектры». Он довольно быстро изучил ее от начала до конца и очень гордился этим, поскольку преподаватель предупредил юношу, что тот не поймет этой работы. Разве юный Чандра мог предположить, что в следующем году лично познакомится с великим Зоммерфельдом? Немецкий физик приехал в Мадрас и читал лекцию в его колледже! Об этом Чандру предупредил Кришнан — физик, сотрудничавший с его дядей Раманом в Калькутте, и даже сказал ему, в какой гостинице остановится великий ученый. Чандра, не стесняясь, пошел туда, и Зоммерфельд любезно принял его.

Чандра заметил, что книга Зоммерфельда уже немногого устарела, поскольку появилась новая квантовая механика, которую разрабатывали Гейзенберг и Шрёдингер. Они много говорили о Дираке, Паули и Ферми, обо всей новой физике, которая только появлялась. Сам Зоммерфельд в этот период

ЗОММЕРФЕЛЬД, ПИОНЕР КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Арнольд Зоммерфельд (1868–1951) изучал математику в родном Кёнигсберге, был профессором в Гётtingене и прошел через университеты Клаусталя-Целлерфельда, Аахена и Мюнхена. Он стал одним из основателей квантовой механики, проводя исследования в этой сфере и даже создав целую школу ученых. Под руководством Зоммерфельда защитили свои докторские диссертации Вернер Гейзенберг (1901–1976) и Вольфганг Паули (1900–1958). Ученый исследовал спектры простых, а затем сложных атомов, начиная с марганца. Спектр марганца был предоставлен Мигелем Каталаном (1894–1957), с которым Зоммерфельд широко сотрудничал после поездки в Мадрид в 1921 году. Он считал, что круговые орбиты Бора следует заменить эллиптическими с введением большего количества квантовых чисел, ввел постоянную тонкой структуры и был большим защитником и популяризатором общей теории относительности. Также ученый применил статистику Ферми — Дирака к системе электронов в металле (на эту тему он и прочел несколько лекций в Индии). Чандра захотел встретиться с ним в Мадрасе и добился этого благодаря своему упорству. Встреча с Зоммерфельдом была решающей в его выборе научного призвания.



изучал электроны в металле, используя новую статистическую механику Ферми — Дирака.

Упорство Чандры и удача вновь встретились, когда Мадрас в 1929 году посетил Гейзенберг, и юноше уже не пришлось штурмовать ученого в гостинице. Ему поручили показать Гейзенбергу город, и Чандре представилась неожиданная возможность поговорить с великим ученым — пусть в течение нескольких дней, зато без всяких ограничений. Не будем забывать, что самому Гейзенбергу в то время, несмотря на весь его научный авторитет, было всего 28 лет, так что они с Чандрай

быстро пришли к взаимопониманию. Именно Зоммерфельд и Гейзенберг направили молодого Чандрасекара по пути науки.

Чандря опубликовал свою первую работу в возрасте 18 лет. Она носила название «*Комптоновское рассеяние и новая статистика*» и была напечатана в «*Трудах Королевского астрономического общества*». В этом исследовании он использовал статистику Ферми — Дирака, продемонстрировав, что полностью усвоил уроки Зоммерфельда. Чандря послал свою работу нескольким ученым, одним из которых был Ральф Говард Фаулер (1889–1944), преподаватель Кембриджа, работавший над теорией белых карликов. Фаулер оценил работу и представил о ней сообщение в Королевское общество. Судьба Чандры постепенно определялась.

Значительная часть студентов, которые окончили
Президентский колледж в 1910-х и 1920-х годах, то есть в мое
время, затем стали известными в Индии людьми. [...]
Проанализировав историю Индии 1950–1960-х годов, можно
увидеть, что многие известные люди происходят
из Президентского колледжа.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

В то время Чандря пару раз съездил в Калькутту, в институт, где работал его дядя. Тот хотел посвятить племянника в экспериментальную физику, но юноша уже четко осознавал, что путь экспериментатора не для него. Он доказал это, случайно разбив прибор, который его дядя собрался использовать для изучения строения молекул. Чандря хотел обсудить с родственником свои исследования по комптоновскому эффекту, но не пробудил в том интереса. Раман признавал талант Чандры, но слишком гордился собственной работой и Нобелевской премией, чтобы вохищаться кем-то другим. Зато Чандря подружился с сотрудником своего дяди Кришнаном.

Юноша послал на публикацию вторую статью о влиянии магнитного поля на комптоновский эффект. Его работы все

ТРИ ТИПА СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ЧАСТИЦ

В статистической механике обычно используется пространство из шести измерений, описываемое пространственными координатами x, y, z и импульсными координатами p_x, p_y, p_z . Элемент объема в этом пространстве называется ячейкой. Различные типы статистики касаются того, как расположить частицы в разных ячейках. Классическая механическая статистика называется статистикой Максвелла — Больцмана. Речь идет о классических частицах, которые имеют свойство различимости, то есть если имеются атом А и атом В, то у нас два разных атома. Но в квантовой статистической механике частицы неразличимы. Может быть два электрона, но речь идет об их паре: не существует каждого электрона по отдельности. Известно два типа квантовых частиц: фермионы и бозоны. Фермионы подчиняются принципу запрета Паули, то есть два фермиона не могут иметь одно и то же квантовое состояние, в отличие от бозонов, на которые подобное ограничение не распространяется. Фермионы подчиняются статистике Ферми — Дирака, а бозоны — статистике Бозе — Эйнштейна. Примерами фермионов являются протон, электрон и нейтрон. Самый известный пример бозона — фотон. Позже было замечено, что бозоны — это частицы, которыми фермионы обмениваются, чтобы произвести четыре вида взаимодействия. В последнее время широкую известность получил бозон Хиггса. Если фермионы имели полуцелый спин, то бозоны — нулевой или целый. Из-за принципа запрета Паули, если число ячеек конечное, фермионы не могут занимать одно и то же квантовое пространство — на это соображение опирается предел Чандрасекара.

больше говорили о научном призвании юноши, которое в будущем принесло обильные плоды.

Знакомство Чандры с известными учеными дополнилось еще одной встречей, которая произошла в Аллахабаде. В этом городе на юге страны он познакомился с Саха. К удивлению Чандры, Саха очень хорошо знал его первые работы и даже поручил своим студентам развить их.

Юноша не терял времени — как он это делал в течение всей своей жизни. Он учился, и преподаватели Президентского колледжа делали для Чандры исключение, позволяя ему самому выбирать дисциплины. В его руки попала работа Эддингтона «*Внутреннее строение звезд*», написанная на прекрасном английском. Она стала фундаментом работы, за которую Чандра-

секар позже получил Нобелевскую премию. Но эта хорошая книга имела серьезный недостаток, который юноша позже исправил, чем заслужил враждебность со стороны автора. Также он углубился в теорию политропов (понятие «политроп» рассматривается в приложении). В будущем исследовании ему помогла книга Зоммерфельда *«Комптоновские рентгеновские лучи и электроны»*. В его экземпляре сохранилась дарственная надпись для подруги Чандры Лалитамбики, которая позже стала его женой.

Ученые Индии понимали, насколько гениален молодой Чандр. Президентский колледж предоставил ему стипендию на учебу в Англии с условием, что юноша возвратится на родину по прошествии трех лет, а в противном случае ему придется вернуть деньги. Стипендия была создана практически для него, и по возвращении Чандрасекар должен был возглавить кафедру теоретической физики, которую также собирались создать к тому времени специально для него. Надежды, возлагаемые на Чандру, были огромными. В индийских научных организациях, по крайней мере в Мадрасе, высоко ценилось британское образование, несмотря на процесс национального освобождения.

Дядя Раман советовал отказаться от стипендии. В отличие от Рамануджана, Бозе или Саха, он не выезжал из Индии и все равно добился мирового признания.

Однако Чандр все же сел на поезд до Бомбея, потом — на итальянский корабль, который доставил его в Венецию, откуда шел поезд до Кембриджа. Попрощаться на вокзал пришли множество людей. Не было только его матери, которая в это время болела, и одной из его теток: она была вдовой, а в Индии считается, что вдовы приносят несчастье. На перроне остались вся большая семья Чандры и некоторые его преподаватели из Президентского колледжа.

Чандрасекар больше никогда не увидел свою мать. Он оставил дом и дорогую подругу Лалитамбику, или Лалиту, как ее звали друзья, с которой, правда, формально не обручался: нужно было выбирать — или Лалита, или наука. Чандр выбрал науку. Начиналась новая жизнь. В Мадрасе его считали

РАСИЗМ

Когда Чандра возвращался на поезде в Мадрас после одного из переездов, он столкнулся с примером расизма. Поскольку его отец был железнодорожным чиновником высокого ранга, он пользовался привилегией ехать первым классом. Однако в вагоне находилась пара англичан, и дама заметила: ужасно, что их заставляют делить пространство с темнокожим индусом, и еще хорошо, что он одет по-европейски. Чандра, услышав эти слова, ушел в туалет и вернулся в вагон в индийском костюме и тюрбане. Дама закатила истерику и потребовала у контролера перевести его в другой вагон. Контролер спросил Чандру, не сложно ли ему перейти в другой вагон, но тот ответил: «Почему я должен это делать?» Когда контролер сообщил паре, что Чандру придется терпеть, дама в порыве неуступчивости дернула за стоп-кран, и поезд остановился. В конце концов, после бессмысленной задержки, даме самой пришлось покинуть вагон первого класса. Кроме природной решимости юноши, на его действия повлияло нарастающее движение освобождения со стороны почитателей Неру и Ганди. Позже ученый страдал от расистских притеснений со стороны британцев на своей родине и в США. Зато в Кембридже, как говорил он сам, он ни разу не встретил проявлений расизма.

гением, но... что будет в Кембридже? Там были Эрнест Резерфорд (1871–1937), Артур Стэнли Эддингтон (1882–1944), Поль Дирак (1902–1984), Фред Хайл (1915–2001), Уильям Фаулер (1911–1995), Эдуард Артур Милн (1896–1950)... Юношу переполняли надежда и страх.

Первая половина поездки прошла очень плохо. В неспокойном океане Чандре страдал от морской болезни. Высоко оценивая работу 20-летнего Чандры, за которую он получил Нобелевскую премию, иногда отмечают, что она была написана всего за 19 дней. Однако при этом не учитывают, что половину пути Чандру непрерывно тошило.

Зоммерфельд привлек внимание молодого физика к новой статистической механике Ферми – Дирака, и в результате он заинтересовался работой Эддингтона о звездах и исследованием Фаулера о белых карликах. Чандра решил, что очень плотная звезда должна обнаруживать релятивистские эффекты. Его собственные уравнения говорили, что белый карлик не может иметь массу выше 1,4 солнечной массы (сегодня мы

называем это *пределом Чандрасекара*). Таким, схематически, было направление его идей, развивая которые, ученый пришел к понятию, вскоре получившему отражение в теории звездной эволюции.

Чандра был готов к самым суровым лишениям. Приехав в Венецию, он спал на вокзале в ожидании поезда, чтобы не тратить деньги на ненужное общежитие. И вот он оказался в Кембридже.

ЗВЕЗДНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Чтобы рассмотреть, как был установлен предел Чандрасекара — максимальная масса, которой может обладать белый карлик, — сначала мы должны понять, что такое «нормальная» звезда, а затем поговорить о других типах звезд, в частности о белых карликах.

Обычной звездой называют звезду главной последовательности. В соответствии с упрощенной моделью она состоит из идеального газа, в основном водорода, она аутогравитационная, то есть сохраняет форму благодаря собственной гравитации, и в ее недрах четыре атома водорода превращаются в одно ядро гелия.

Почти все звезды, которые мы видим невооруженным глазом, относятся к главной последовательности. Знание о внутреннем строении звезды — в основном заслуга Эддингтона. Немцу Хансу Бете (1906–2005) принадлежит идея о том, что блеск звезды объясняется высвобождением энергии во время атомной реакции синтеза гелия из водорода, которую можно катализировать более сложными процессами. Благодаря супружеской паре Бербиджей — Джону Рональду (1925–2010) и Маргерит (р. 1919), — а также Фаулеру и Хойлу были рассмотрены все процессы синтеза внутри звезды для образования тяжелых элементов и, таким образом, получены объяснения современного химического состава Вселенной. (Уильям Фаулер — ученый, получивший Нобелевскую премию вместе

с Чандрай, — не тот Фаулер из Кембриджа, который руководил его докторской диссертацией.) Упомянутые авторы наиболее сильно продвинулись в понимании того, что такое звезда главной последовательности, хотя подобное сведение к нескольким исследователям в сложном историческом процессе всегда несправедливо, поскольку вклад в итоговый результат сделали довольно много людей, включая тех, кто пошел по ложному пути.

Таблица показывает распространенность химических элементов во Вселенной. Хотя преобладающими являются компоненты темной материи и темная энергия, в ней отражена обычна материя. Можно сказать, что водород и гелий были образованы в космологические времена, в то время как остальные элементы появились в недрах звезд.

| Химический элемент | Распространенность (%) |
|--------------------|------------------------|
| Водород | 93,9 |
| Гелий | 5,9 |
| Кислород | 0,06 |
| Углерод | 0,04 |
| Азот | 0,008 |
| Кремний | 0,004 |
| Магний | 0,004 |
| Неон | 0,003 |
| Железо | 0,003 |
| Сера | 0,003 |

Поскольку основную информацию о звездах давала только узкая видимая область электромагнитного излучения, для их классификации использовали два основных вида данных — светимость и спектр. Светимость звезды — это количество энергии, которую она испускает в секунду. Спектр — это разложение света на волны разной длины. Если мы видим очень яркую звезду, она может обладать высокой светимостью или просто находиться очень близко к нам. Световой поток, получаемый на Земле, зависит от этих двух величин — светимо-

сти и расстояния. Основываясь на потоке света, полученном на Земле, и каким-то образом зная расстояние до звезды, мы можем определить ее светимость, а если знаем светимость — то расстояние.

История определения расстояний в астрофизике — это, собственно, история астрофизики. Существует множество методов этого расчета, и одни из них основываются на других, представляя собой некое подобие лестницы, где следующая ступень держится на предыдущей. Но это долгая история, которую мы опустим, поскольку не она является главной темой нашей книги. Итак, предположим, что мы знаем расстояния до различных астрофизических объектов и, следовательно, знаем звездные светимости, которые обозначаем буквой L .

Сложнее — с классификацией спектров, поскольку они характеризуются множеством спектральных линий поглощения, что связано с многочисленными химическими элементами на внешней области звезды. Эта внешняя область, которую мы видим, называется звездной атмосферой, и ее следует отличать от ее внутренней области, которую мы не видим и к которой, можно сказать, имеем доступ только в теории.

Собрав огромное количество звездных спектров (это было трудоемкой и сложной задачей), ученые увидели, что их можно

СКАЗКА МОЛОДОГО ЧАНДРЫ

Товарищи Чандры, увидев, как много он работает, смеялись над ним: «Эта дополнительная работа не поможет тебе на экзаменах». Но юноша рассказал им сказку.

Король со своей свитой шел по лесу и увидел старика, который сажал деревья манго.

— Для чего ты сажаешь эти деревья? Ты очень стар и не доживешь до того времени, когда они начнут плодоносить. Ты не получишь никакой пользы.

— Я ел манго с деревьев, которые посадил мой отец. А с этих, которые сажаю я, будут есть мои дети.

Король, которому понравилась мудрость старика, дал ему несколько золотых монет. Когда он удалился, старик, считая монеты, сказал про себя: «Все-таки я получил пользу от манговых деревьев».

выстроить в ряд, и лишь очень небольшое число спектров оказались вне этого ряда. Это была хорошая классификация, потому что она основывалась на простых и прямых данных и включала в себя почти все классифицируемые объекты. Вскоре учёные пришли к спектральной классификации, согласно которой спектры получали названия с помощью странной последовательности букв – OBAFGKMRNS.

Чтобы оценить сложность выстраивания в линию, предполагаемую в вышеприведенном названии, представьте себе, что сначала порядок был алфавитным, но по мере продвижения исследований в него вносили изменения, результатом которых стала эта странная последовательность (если вдаваться в детали, то последние три буквы не соответствуют выстраиванию в линию, а связаны с разветвлением).

Изначальная ошибка в спектральной классификации состояла в предположении, что время – это физическая величина, которая влияет на типы спектра. Считалось, что звезды начинают свою жизнь с типа O и заканчивают ее типом S. До сих пор звезды левой части последовательности сегодня называют ранними, а правой части – поздними. Это абсолютно ошибочная номенклатура, но она используется. Впрочем, время в этой последовательности не отсутствует полностью, поскольку звезды в левой части совсем молодые, а в правой – старые (это свойство было доказано позже).

Если время – не та физическая величина, которая позволяет выстроить спектры в линию, то какой признак в действительности скрывается за этой классификацией? Вскоре было замечено, что это температура. Звезды O более горячие, а R, N и S – более холодные. Понятно, что температура влияет на спектр. Воспользовавшись запутанной привычной номенклатурой, назовем звезды справа поздними, поскольку они очень холодные и имеют в своих спектрах молекулярные полосы. С ростом температуры молекулы делятся, и в спектрах остаются только спектральные линии атомов. Если мы продолжим повышать температуру, элементы начинают ионизироваться, и в спектрах самых горячих звезд (их называют ранними) появляются линии со всем более ионизированными элементами.

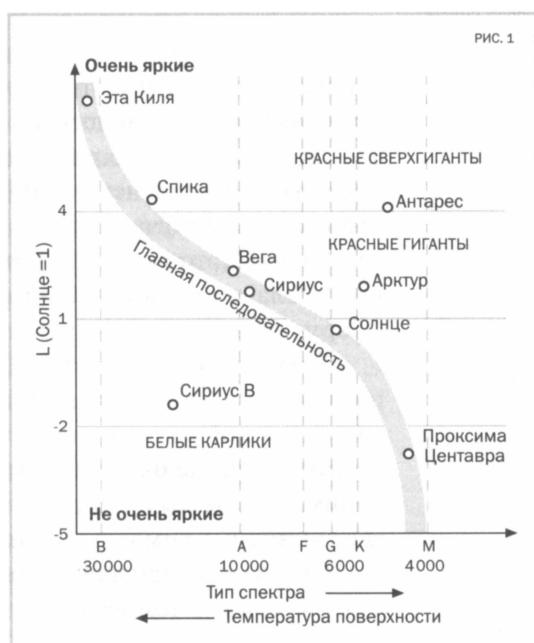
Приблизительное соотношение между температурой и типом спектра приведено в таблице.

| Тип спектра | Температура поверхности |
|-------------|-------------------------|
| O | 50 000 K |
| B | 25 000 K |
| A | 15 000 K |
| F | 7 600 K |
| G | 6 000 K |
| K | 5 100 K |
| M | 3 600 K |

Диаграмма Г-Р, светимость и тип спектра. Почти все звезды расположены на узкой полосе диаграммы. Белые карлики находятся в нижней части (не очень яркие) и в центре (нормальная температура). На оси ординат представлена светимость звезды, где за единицу взята светимость Солнца.

Зная светимость и тип спектра звезд, мы можем представить их на диаграмме Эйнера Герцшпрunga (1873–1967) и Генри Норриса Расселла (1877–1957), которые разработали ее независимо друг от друга, и сегодня она известна как диаграмма Г-Р (см. рисунок 1). Эта диаграмма используется для разграничения звезд различных типов, в частности чтобы различить звезды главной последовательности и белые карлики, которые больше всего интересуют нас для оценки открытия Чандraseкара. Поскольку это старая классификация начала XX века, мы учли только видимую область спектра. Сегодня спектр звезды изучается от гамма-лучей и рентгеновских лучей до радиоволн.

Другая номенклатура, также используемая в астрофизике и также ошибочная, называет оптическим то, что



следовало бы называть «видимым», то есть область электромагнитного спектра, к которому чувствителен человеческий глаз, ведь инфракрасный и ультрафиолетовый — также объекты изучения оптики.

На диаграмме Г-Р показано, что почти все звезды находятся на неширокой полосе, которая соответствует звездам главной последовательности. Но есть и любопытные исключения.

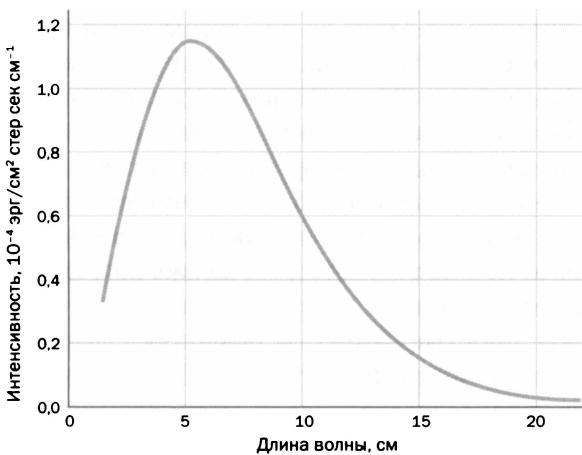
Главный признак звезды — это свет, и чтобы получить первое толкование, хотя и не самое точное, мы должны прибегнуть к самой простой модели, использующейся при изучении света. Эта модель — *черное тело*, то есть система фотонов в термодинамическом равновесии. Поток q , выходящий из поверхности звезды (то есть световая энергия, испускаемая за единицу времени единицей поверхности звезды), зависит исключительно от температуры. Точнее, он зависит от четвертой степени температуры. Постоянная пропорциональности называется постоянной Стефана — Больцмана и обозначается буквой σ :

$$q = \sigma T^4.$$

Из этой формулы становится понятно, что исходящий поток зависит только от температуры, поскольку система в термодинамическом равновесии, независимо от входящих в нее частиц, имеет только одну характеризующую ее величину — температуру. Этот исходящий поток — та же самая величина, что и поток, получаемый на Земле, но на Земле поток намного меньше, потому что он теряется обратно квадрату расстояния, согласно Иоганну Кеплеру (1571–1639), который первым сформулировал этот результат.

Есть и еще один способ охарактеризовать черное тело по его внешнему виду, а именно по его цвету. Когда температура изучаемого объекта поднимается, его цвет меняется, и наступает момент, когда он становится красным, затем белым, а затем синим. Как бы мы ни привыкли к обозначениям на смесителях, где синий цвет символизирует холодную воду, а красный — горячую, физика однозначно говорит нам, что тело синего цвета, имеет большую температуру, чем тело красного цвета.

РИС. 2



Этот график соответствует микроволновому космическому излучению и показывает распределение излучения черного тела, измеренного космической экспедицией СОВЕ. Для получения кривой излучения черного тела в полости нужно сделать отверстие на ее поверхности. Фотоны, выходящие из отверстия, говорят нам о том, что внутри. Однако это отверстие нарушает равновесие внутри полости, так что лучший способ наблюдать за черным телом — самим попасть в полость. Мы вынужденно находимся внутри Вселенной, поэтому космическое микроволновое излучение представляет собой такое совершенное определение кривой черного тела, какое невозможно получить ни в одной лаборатории.

Но что такое на самом деле цвет черного тела? Внутри него есть фотоны разных длин волн, как это видно на рисунке 2. Мы знаем, что фотоны с наибольшей длиной волны — красные, их энергия низкая, в то время как наиболее энергетические — синие, с меньшей длиной волны. Но есть преобладающая длина волны. В непрерывном спектре черного тела существует определенный максимум. Обозначим максимальную длину волны, характеризующую цвет светящегося объекта, через λ_{\max} . Это максимальная длина волны, и зависит она исключительно от температуры. Формула, описывающая ее, очень проста и называется законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,3 \text{ см} \cdot K}{T}$$

Если измерять длину волны в сантиметрах, а температуру — в градусах Кельвина, то константа равна примерно 0,3. Если нам не нужны очень точные расчеты, а достаточно примерно оценить цвет светящегося объекта, мы можем приблизить эту константу к единице.

Формула позволяет увидеть, что чем больше температура объекта, тем меньше длина волны, характерная для его цвета. Так, тело с температурой 5000 К испускает лучи с длиной волны $6 \cdot 10^{-5}$ см, то есть 600 нм (нанометров), в видимой области спектра. Эта температура типична для звездной атмосферы, поэтому звезды видны невооруженным глазом. Если светящийся объект — это человеческое тело, имеющее температуру примерно 300 К, получается, что мы испускаем инфракрасное излучение, хотя и не видим его, поскольку наш глаз невосприимчив к этому диапазону.

Эти две простые формулы позволяют объяснить одно из свойств диаграммы Г-Р на странице 35. Звезды, находящиеся вне главной последовательности, расположенные над ними и справа, имеют большую светимость, они испускают много света, но они красные (холодные); то есть их излучение на единицу поверхности мало. Следовательно, они имеют очень большую поверхность и, соответственно, очень большой радиус, поэтому их называют красными гигантами.

Звезды, находящиеся под главной последовательностью, имеют нормальную температуру, они не слишком красного, не слишком синего цвета — скорее, белого. Их светимость низкая, а поток нормальный. Они испускают мало света, но все равно это много из расчета на каждый квадратный сантиметр поверхности звезды, то есть это очень маленькие звезды, которые называют белыми карликами. Мы начинаем приближаться к объекту интереса Чандрасекара.

Итак, белый карлик — это очень маленькая звезда. Но насколько маленькая? Сделаем некоторые подсчеты. Знаменная звезда Сириус, которую так хорошо видно невооруженным глазом, имеет звезду-компаньона — Сириус В, один из самых изученных белых карликов. Он имеет нормальную для звезды температуру, примерно 5000 К. Значение постоянной Стефана — Больцмана равно $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж с^{-1} м^{-2} К^{-4} . Следовательно, $q = 3,6 \cdot 10^7$ Дж м^{-2} с^{-1} . Отношение между светимостью L (энергия, испускаемая всей звездой) и потоком q (энергия, испускаемая на квадратный метр звезды) очевидно, если считать, что поверхность звезды равна $4\pi R^2$:

$$L = 4\pi R^2 q.$$

Это означает, что радиус белого карлика приблизительно равен 4000 км, что сопоставимо с радиусом Земли (приблизительно 6300 км). Чтобы оценить плотность такой маленькой звезды, нужно знать ее массу. Масса звезд вычисляется разными способами, большинство которых основываются на третьем законе Кеплера. Благодаря ему мы можем вычислить массу Солнца, зная расстояние до него и длительность года на планете. Масса Сириуса В также довольно типична для белого карлика — 0,96 от массы Солнца.

Представим себе звезду, имеющую массу Солнца и размер Земли. Ее плотность равна

$$\rho = 6000 \text{ г см}^{-3}.$$

Понятно, что для материи при такой огромной плотности характерно физическое поведение, плохо понятное интуитивно. Чтобы рассмотреть это поведение, сначала поговорим о физике нормальных звезд — звезд главной последовательности.

ЗВЕЗДЫ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Сегодня мы знаем, что звезда сияет из-за высвобождения ядерной энергии в результате реакций синтеза, но об этом не подозревали в XIX веке, пока не было сформулировано уравнение $E = mc^2$, одно из самых известных следствий теории относительности. Рассмотрим представления ученых в контексте докерниаковой физики, а именно мнение Уильяма Томсона, лорда Кельвина (1824–1907), одного из самых плодотворных и проницательных физиков в истории.

Этот британский математик и физик предложил так называемый механизм Кельвина — Гельмгольца. Хорошо известно, что в результате адиабатического расширения тело остывает. Термин «адиабатический» предполагает, что процесс происхо-

дит без теплообмена — либо потому, что система развивается очень быстро, не позволяя теплу теряться, либо потому, что система термически изолирована. Основная причина охлаждения состоит в том, что в качестве энергии расширения служит внутренняя энергия, которая зависит от температуры. Точно так же, если система сжимается, она нагревается. При образовании звезды происходит быстрое сжатие межзвездного газа. В результате он сильно нагревается, а любое нагретое тело испускает излучение. Это испускание, как предполагал лорд Кельвин, и является светом звезды. Такое объяснение было логичным и довольно привлекательным, но подсчеты ему противоречили.

Какая энергия получается при сжатии? Она равна разности между потенциальной энергией до образования звезды и потенциальной энергией после образования, в ее нынешнем сияющем состоянии. Звезда образуется в результате гравитационного коллапсирования газообразной массы, размеры которой намного превышают размеры звезды. Для упрощения картины скажем, что атомы звезды были рассеяны до бесконечности. Поскольку мы хотим найти разницу потенциальной энергии, мы можем поместить первый атом куда захотим. Рассмотрим момент, предшествующий образованию звезды, когда ее атомы еще рассеяны по бесконечности.

Хорошо известно, что чем выше находится камень, тем больше его потенциальная энергия. Изначально атомы протозвезды находятся так высоко, что можно предположить, будто они находятся в бесконечности, и если взять эту ситуацию в качестве исходной, то все другие потенциальные энергии в процессе рождения звезды будут отрицательными. Для вычисления потенциальной энергии атома на поверхности звезды используется формула

$$\frac{G M m}{R},$$

где G — универсальная гравитационная постоянная, M — масса звезды, m — масса атома, а R — радиус звезды. Неудивительно,

что потенциальная энергия — не атома, а всех атомов звезды — вычисляется по формуле

$$W = -G \frac{M^2}{R}.$$

Следовательно, термическая энергия E , полученная при сжатии, сопровождающем образование звезды, равна $0 - W$, то есть

$$E = \frac{GM^2}{R}.$$

Итак, согласно расчетам лорда Кельвина, такой является максимальная энергия звезды, которую она может испустить в виде свечения. Для расчетов возьмем в качестве примера звезду, находящуюся рядом с нами, — Солнце.

Масса Солнца равна $2 \cdot 10^{33}$ г, а его радиус — $7 \cdot 10^5$ км. Получается, что максимальная доступная энергия такова:

$$E = 4 \cdot 10^{41} \text{ Дж.}$$

И здесь начинаются проблемы, потому что светимость Солнца — $L = 4 \cdot 10^{26}$ Дж с^{-1} . Если бы Солнце с самого начала было таким же ярким, как сегодня, продолжительность его жизни составила бы

$$\frac{E}{L} = 10^{15} c = 3 \cdot 10^7 \text{ лет.}$$

Это время, называемое временем Кельвина, очень мало. На Земле находят намного более древние ископаемые, и время существования планеты оценивается с помощью радиоактивных процессов в более чем $4 \cdot 10^9$ лет. Это означает, что механизм Кельвина не позволяет объяснить блеск такой звезды, как Солнце.

Итак, механизм Кельвина, согласно которому световая энергия, испускаемая звездой, — это потенциальная энергия, приобретенная в процессе гравитационного коллапса при ее образовании, не позволяет объяснить долгую жизнь такой

звезды, как Солнце. Однако не будем отмечать механизм Кельвина, поскольку он, как мы скоро увидим, по-прежнему остается ключевым для понимания звездной эволюции.

Но если это не потенциальная энергия, то каково происхождение энергии звезды, благодаря которой она может столько времени светить? Представим, что это ядерная энергия, высвобожденная в процессах синтеза. Представим себе, что вся масса звезды превращается в энергию. Тогда мы получаем энергию $Mc^2 = 2 \cdot 10^{47}$ Дж. Теперь E/L уже намного больше, порядка 10^{13} лет, и это превышает время жизни Вселенной, равное примерно 14 миллиардам лет. Итак, предположим, что высвобождающаяся энергия имеет ядерное происхождение и связана с превращением массы в энергию согласно знаменитой формуле Эйнштейна.

Но нам нужны некоторые уточнения: сложно представить, что вся масса звезды целиком превратится в энергию, кроме того, существуют различные ядерные процессы, а нам нужен самый эффективный из них.

Какую материю можно «сжечь»? Обычная звезда состоит из водорода. Прийти к этому выводу было нелегко, и довольно долго считалось, что звезды состоят из железа. Однако сегодня хорошо установлен тот факт, что нормальные звезды сформированы из межзвездной среды, в которой они образовались, а эта среда представляла собой водород с небольшим количеством гелия. Водород и в меньшей мере гелий — два главных элемента, которые образовались через некоторое время после Большого взрыва; все остальные элементы были рождены в недрах звезд гораздо позже. Хотя межзвездная среда постепенно обогащается тяжелыми элементами, водород остается наиболее распространенным ее компонентом.

Как ни странно, любой вклад, который я сделал, никогда не казался мне собственным открытием, а скорее чем-то всегда существовавшим, что я смог почувствовать.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

Следовательно, звезда — это шар из водорода с небольшим количеством гелия и незначительным содержанием некоторых других элементов. Рассмотрим, как можно сжечь водород. В реакции синтеза, которая превращает четыре ядра водорода (четыре протона) в одно ядро гелия (два протона и два нейтрона), как и в каждом ядерном экзотермическом процессе, существует дефект массы. Ядро гелия весит меньше четырех исходных протонов. Высвобожденная энергия — это дефект массы, умноженный на c^2 .

Этот дефект массы очень велик, порядка 0,7 %. Следовательно, в предыдущем расчете время жизни такой звезды, как Солнце, должно быть умножено на 0,007. Но даже в этом случае у нас есть время, равное $7 \cdot 10^{10}$ лет. Результат начинает становиться очень интересным. Он примерно равен времени жизни Вселенной, хотя и несколько больше, однако это не важно, потому что Солнце тоже еще не умерло. Согласно расчетам, оно существует около 4500 миллионов лет и продолжит жить еще столько же, испуская примерно такое же количество энергии, как сегодня.

Но когда весь водород превратится в гелий, могут ли начаться процессы трансформации гелия, в результате которых будут образованы тяжелые элементы? Конечно, да, другие элементы могут образовываться. Более того, именно таков механизм образования всех существующих во Вселенной элементов, которые легче, чем железо. Процессы образования более тяжелых, чем железо, элементов имеют эндотермический характер: для их протекания нужно больше энергии, чем высвобождается при этом. Подобные процессы происходят в присутствии большой энергетической силы, например при взрыве сверхновой. Конечно, это описание имеет несколько упрощенный характер, но оно подходит для наших целей.

Вернемся к нашему энергетическому балансу. Если сжигать гелий, мы получим дополнительный источник энергии, и еще один, если затем сжигать углерод, и так далее. При этом в идеальном процессе, когда 14 ядер гелия превращаются в 1 ядро железа, дефект массы составил бы всего 0,1 %. То есть сжигание гелия может быть очень важным для объяснения хи-

мического состава Вселенной, но оно не позволяет получить большое количество энергии для солнечного излучения, кроме тех случаев, когда нормальная звезда, то есть звезда главной последовательности, сжигает водород, чтобы образовать гелий.

Однако синтез водорода не происходит в обычных условиях (к сожалению). Для этого нужна температура примерно 10 млн градусов. При ее достижении начинаются процессы синтеза водорода — либо напрямую, либо с помощью промежуточных процессов с участием других элементов.

Итак, межзвездный газ коллапсирует, образуя звезду. Пока происходит сжатие с помощью аутогравитации, этот газ нагревается согласно механизму Кельвина. При достижении 10 млн градусов начинаются ядерные процессы. Высокая температура создает высокое давление, этот перепад давления — большое внутри и малое снаружи — создает силу, оказывающую сопротивление гравитации. Изначальный коллапс тормозится.

Кроме того, процесс саморегулируется. Представим себе, что по какой-то причине звезда расширяется. При этом она охлаждается, следовательно, уменьшается количество ядерных реакций. В результате уменьшается перепад давления, происходит сжатие Кельвина, и мы возвращаемся к исходной ситуации. Если же, наоборот, звезда по какой-то причине сжимается больше необходимого, температура увеличивается, увеличивается выработка ядерной энергии, растет перепад давления, и звезда вновь возвращается к исходной ситуации.

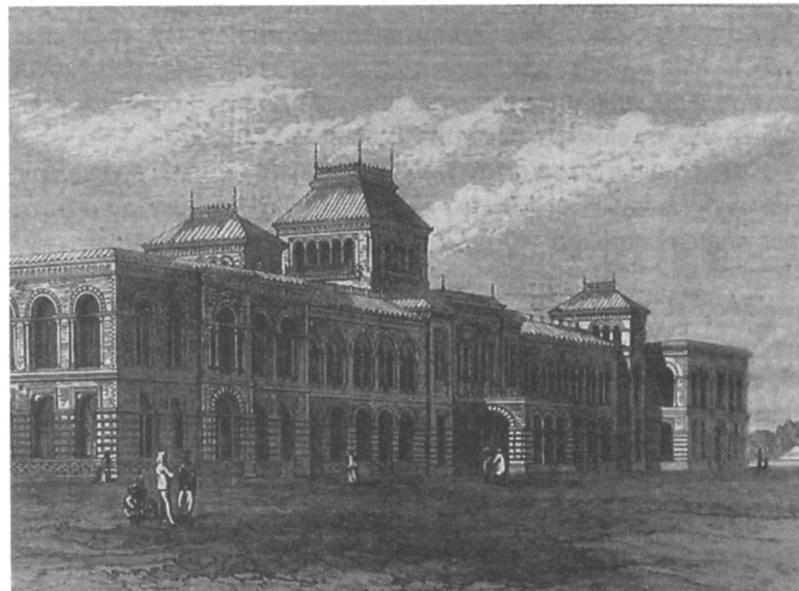
С помощью подобных рассуждений мы приходим к выводу о том, что в центре звезды температура достигает 10 млн градусов (на самом деле немного больше). Механизм не зависит от массы звезды. Таким образом, мы приходим к важному свойству звезды главной последовательности: температура в ее центре не зависит от массы звезды, она всегда немного выше 10 млн градусов (речь идет о градусах Кельвина).

Интуитивно кажется, что чем больше звезда, тем больше ее масса, и это можно обосновать логическим путем. Известно, что температура системы одноатомных частиц — это ки-

ВВЕРХУ СЛЕВА:
Раман, дядя
Чандры, вместе
со своей женой
и писательницей
Сельмой
Лагерлёф
на церемонии
вручения
Нобелевской
премии
в 1930 году.

ВВЕРХУ СПРАВА:
Молодой
Чандрасекар.
Этот физик
сформулировал
свой
знаменитый
предел
в возрасте
20 лет.

ВНИЗУ:
Президентский
колледж, где
учились Чандр,
его отец и дядя
Раман, а также
его жена Лалита.



нетическая энергия частиц, которые ее составляют. Средняя кинетическая энергия частиц пропорциональна температуре, а коэффициент пропорциональности — это так называемая постоянная Больцмана, k . Таким образом, средняя энергия частицы равна kT .

Когда звезда находится в состоянии равновесия, энергия атома (водорода) должна быть равна его потенциальной энергии, то есть

$$\frac{GMm}{R} = kT_0,$$

где G — универсальная гравитационная постоянная, M — масса звезды, m — масса атома, R — радиус звезды, а T_0 — температура в центре звезды (нижний индекс 0 используется для величин в центре звезды). Следовательно,

$$\frac{M}{R} = \frac{kT_0}{Gm}.$$

Но, как мы уже сказали, температура в центре звезды постоянна, чуть больше 10 млн градусов, а все величины второй части уравнения — константы, поэтому можно сделать вывод, что $M \propto R$, то есть чем больше масса, тем больше радиус. Следовательно, наиболее тяжелые звезды главной последовательности имеют самый большой размер.

Центральную плотность можно легко оценить, если приравнять массу, выведенную из предыдущей формулы, к интересующей нас массе с помощью приближенной формулы

$$M = \rho_0 4 / 3\pi R^3.$$

Отбросим числовые значения, близкие к единице, поскольку мы не выводим значения, а оцениваем их порядок:

$$\rho_0 = \frac{kT_0}{Gm} \frac{1}{R^2}.$$

Следовательно, самые большие звезды имеют меньшую центральную плотность согласно

$$\rho_0 \propto 1/R^2.$$

Этот результат не очень понятен интуитивно. Центральные звездные плотности не чрезмерно высоки, поэтому можно считать, что звезды — это идеальный газ, для которого справедливо уравнение состояния Клапейрона

$$P_0 = \frac{\rho_0}{m} k T_0.$$

Понятно, что тогда центральное давление зависит от радиуса, как и центральная плотность, согласно $1/R^2$.

Продолжим выводить приблизительные формулы для понимания основных характеристик внутренней области звезды.

Ее светимость объясняется идеей о том, что ядерная энергия, образующаяся внутри, должна найти выход. Если обозначить через ϵ ядерную энергию, образованную единицей массы, светимость мы вычислим по приблизительной формуле

$$L = \epsilon \rho_0 4 / 3\pi R^3,$$

где ϵ зависит только от температуры, и если температура постоянна, то и светимость будет постоянна. Следовательно,

$$L \propto R^3.$$

И, значит,

$$L \propto M^3.$$

Это знаменитая формула, которая описывает отношение масса — светимость. Самые тяжелые звезды наиболее яркие, их светимость соответствует третьей степени, и это открытие было одним из самых важных достижений Эддингтона.

Наконец, вспомним, что мы вычислили время жизни звезды, разделив $M c^2$ на L . Итак, время жизни звезды главной последовательности можно приложить к отношению пропорциональности:

$$t \propto M/L \propto M^{-2}.$$

Это очень интересное свойство. Наиболее тяжелые звезды живут очень недолго, а самые маленькие — дольше всего. Это не так понятно интуитивно, потому что самые большие звезды испускают больше излучения и обладают большим количеством материи для сжигания. Однако эти два эффекта не компенсируются: звезда, масса которой в 10 раз больше солнечной, живет в 100 раз меньше, чем Солнце, а звезда, масса которой равна 1/10 массы Солнца, светит в 100 раз дольше. С помощью простых расчетов становится понятно, что тяжелые звезды умирают, едва родившись, в то время как маленькие живут дольше, чем наша Вселенная, — практически вечно. В таблице ниже приведены массы, светимость и продолжительность жизни звезд главной последовательности.

| Тип спектра | Масса (Солнце = 1) | Светимость (Солнце = 1) | Продолжительность жизни (миллионы лет) |
|-------------|-----------------------|----------------------------|--|
| O | 40 | 400 000 | 1 |
| B | 15 | 13 000 | 11 |
| A | 3,5 | 80 | 440 |
| F | 1,7 | 6,4 | 3000 |
| G | 1,1 | 1,4 | 8000 |
| K | 0,8 | 0,5 | 17 000 |
| M | 0,5 | 0,1 | 56 000 |

Мы рассмотрели приблизительные формулы, позволяющие сформулировать самые важные характеристики звезд главной последовательности. В профессиональной астрономии прибегают к намного более точным числовым моделям и к компьютерным расчетам. Но обладая базовыми знаниями о звездах главной последовательности, мы можем лучше понять природу белых карликов, которым посвящена следующая глава.

Что такое белый карлик

Молодой Чандрасекар знал, что такое белый карлик, потому что был знаком с новой статистической квантовой механикой. Белый карлик — это маленькая звезда с большой массой. Может ли масса таких звезд увеличиваться бесконечно? Чандрасекар думал над этим вопросом на корабле по пути в Кембридж и до прибытия в порт уже знал ответ: масса звезды не может превышать 1,4 солнечной массы. Однако научная атмосфера Кембриджа приняла идеи молодого исследователя враждебно. Авторитетный Эддингтон выслушал Чандрасекара, но отверг его тезис как абсурдный.

Когда Чандра прибыл в Кембридж, ему не было известно, в каком именно колледже он будет учиться. Он написал Фаулеру и, хотя не получил согласия, все же надеялся, что тот станет его руководителем, но когда прибыл в Англию, то обнаружил, что Фаулер уехал на время отпуска в Ирландию. Юношу никто не ждал.

«Отвратительная секретарша» сообщила, что все колледжи Кембриджа заполнены, поэтому Чандра должен ехать в Лондон, в Университетский колледж. Кроме того, заметила дама, он не представил никаких документов о своих оценках в Президентском колледже в Индии. На следующий день Чандра вновь предстал перед секретаршой, показав ей свой аттестат с блестящими результатами. «Мы не знаем, какие критерии приняты в Индии. Этого недостаточно». Тогда Чандра показал ей статьи, опубликованные в английских журналах. Этого тоже было недостаточно. И тогда произошел очень редкий случай в жизни Чандрасекара — он рассердился:

«Я приехал издалека не просто потому, что хочу учиться в английском университете. Я хочу учиться именно здесь, поскольку же-лаю работать с профессором Фаулером. Я вернусь в Индию! Вам платят за то, чтобы помочь мне».

Секретарша отметила: профессор Фаулер ничего не говорил о том, что готов стать научным руководителем молодого индийца. Единственный аргумент для нее — рекомендация профессора Фаулера, но когда он прибудет в Кембридж — неизвестно. Чандра написал профессору, рассказав ему о том, в каком затруднительном положении он оказался. Тогда Фаулер напрямую связался с приемной комиссией. Он знал работу Чандры и считал ее довольно сильной, особенно учитывая возраст автора, а также отметил, что готов стать научным руководителем юноши. Однако секретарше рекомендация Фаулера показалась недостаточно четкой.

Тогда Чандра написал отцу о том, что он возвращается домой. К счастью, благодаря упорству молодого индийца, дискуссия перешла на более высокий уровень, и Чандра получил послание из Кембриджа: ему сообщали, что рекомендация Фаулера принимается во внимание и он зачислен студентом-исследователем в знаменитый Тринити-колледж — тот самый, где жил и работал Исаак Ньютона (1643–1727). Радости Чандры не было предела. Поскольку почта между Кембриджен и Мадрасом шла долго, он отправил отцу телеграмму с просьбой не обращать внимания на грустные новости, поскольку они уже устарели. Так Чандра победил бюрократические препоны, выстроенные «отвратительной секретаршей».

КЕМБРИДЖ

Чандрасекар был принят 4 сентября, а Фаулер вернулся из отпуска 2 октября. Теперь юношу ждала научная битва: Фаулера нужно было убедить в самом деле стать его руководителем. Однако проблем с этим не возникло. Чандра показал профессору две работы, одна из них была продолжением статьи самого Фаулера и очень понравилась ученному. По поводу второго текста Фаулер сказал, что не очень понимает предложенный в нем математический результат (речь шла о так называемом пределе Чандрасекара), так что спросит мнения Милна, однако юноша, без

сомнений, может рассчитывать на его научное кураторство. Вне себя от радости Чандра помчался вниз по лестнице, прыгая через две ступеньки, и улыбающийся Фаулер крикнул ему вслед: «Спокойней, юноша. Спокойней».

Фаулер отличался сангвиническим темпераментом, всегда был полон сил и радости, однако постепенно стало заметно, что он не проявляет должного интереса к работе Чандры, и тому становилось все сложнее встретиться со своим научным руководителем. Ситуация осложнялась еще и тем, что у Фаулера, как это ни странно, не было собственного кабинета в Тринити, а сам он вел широчайшую научную деятельность и, можно сказать, практически избегал вежливого, но настойчивого Чандру. В довершение всего Фаулер взял отпуск на весь следующий учебный год. Это не слишком беспокоило Чандру, потому что график студентов-исследователей в Кембридже было свободным, а во время отпуска Фаулер должен был замещать сам Дирак (какое счастье!). Чандре продолжал ходить на магистерские занятия, которые порекомендовал ему Фаулер, и лихорадочно работал в своем скромном двухкомнатном доме, проводя все время в компании гигантских уравнений.

У Чандры почти не было друзей в Кембридже: он так сильно хотел извлечь как можно больше пользы из своей стипендии, что времени на общение не оставалось. В число его немногих друзей входили математик Сарвадаман Чоула (1907–1995), в то время тоже учившийся в Кембридже, и его невеста, слепая женщина-теолог Фрейе, которая вместе с женихом участвовала в пацифистском движении и была поклонницей идеи Ганди о ненасильственной революции. В некоторой степени именно Фрейе помогла Чандре немного отвлечься от учебы, сказав ему, что физика и астрофизика — далеко не все в этом мире и иногда можно сделать перерыв в решении уравнений. Чандра так и поступил и сразу же увлекся художественной литературой и в частности русскими писателями, особенно Толстым и Достоевским. Другими его любимыми авторами были Вирджиния Вулф и Джеймс Джойс.

Чандра как читатель имел довольно необычную привычку, которая сохранилась у него на всю жизнь. Все закладки в его

книгах были заложены ровно посредине. Когда Чандре нравилась книга, он дочитывал до конца, и ему не нужна была закладка. Но если книга ему не нравилась, он давал ей шанс, дочитывая до середины. И если мнение о книге не менялось, он прекращал чтение, и закладка не покидала своего места.

В противоположность Фаулеру, Дирак любил одиночество, имел болезненный вид и был застенчив, причем до такой степени, что на улице всегда немного сжимался и шел, касаясь стены, словно вор. Но его занятия были чем-то необыкновенным. На второй год Чандра решил пройти его курс заново. «Почему? — спросил Дирак. — Ведь твои оценки за прошлый год отличные». Юноша ответил: «Кто откажется послушать второй раз симфонию Бетховена?» Иногда они ходили гулять вместе, но при этом почти не разговаривали. На одном из их маршрутов было несколько оврагов подряд, и Дирак по-детски позволял себе съезжать на спусках и подниматься по инерции, превращая потенциальную энергию в кинетическую, а затем кинетическую в потенциальную.

Чему были посвящены нечастые беседы ученых? Возможно, религии, вернее, ее бесполезности, потому что Дирак в тот период был пылким атеистом, а Чандра был атеистом всегда. Как и все физики того времени, Дирак не понимал, почему Чандра занимается астрофизикой. Сам он никогда не имел склонности к этому, за исключением разве что космологии. И действительно, Дираку принадлежит космологическая модель, основанная на непостоянстве универсальных констант.

Прежде чем перейти к изложению, мне хотелось бы сделать личное заявление, чтобы мои последующие комментарии были правильно истолкованы. Я считаю себя атеистом.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

Милн заинтересовался работой Чандры, хотя, похоже, не придал ей большого значения. А вот юношу, напротив, очень увлек труд Милна о внутренней области звезд, потому что онставил шах Эддингтону. Чандра однажды решил присутствовать

на заседании Королевского астрономического общества, ожидая столкновения между Эддингтоном и Милном, но этого, к разочарованию юноши, не произошло. Милн не хотел публично противоречить авторитетному коллеге. Чандра и Милн сотрудничали по некоторым вопросам внутренней области звезд и их атмосфер, но Милн также не был впечатлен пределом Чандрасекара. Вообще в первые годы индийца в Кембридже никто не интересовался этой его работой. Как он сам рассказывал, никто вообще не интересовался тем, что он делал. Он жил отшельником в собственном мире, окруженный множеством ученых.

Чандре много работал и узнал, что такое одиночество. Единственным спасением была переписка с семьей, особенно с отцом и братом Балакришнаном. А 2 мая 1931 года умерла мать ученого.

ПУТЕШЕСТВИЯ МОЛОДОГО ЧАНДРЫ

Чандре было некомфортно в Кембридже. Он чувствовал себя одиноко, у него было мало друзей, а преподаватели, хотя и не отказывались выслушать его идеи, на самом деле не заинтересовывались ими. Чандрасекар работал рядом с самыми выдающимися учеными своего времени, но дистанция между ними была так велика, словно он по-прежнему жил в Индии. Своего руководителя Фаулера он почти не видел. Дирака не интересовала астрофизика, и они почти не разговаривали. Эддингтон находился слишком высоко, Милн — слишком далеко, в Оксфорде. Вдобавок ко всему — смерть матери. «Что же делать?» — думал Чандре, кружка по улицам Кембриджа. Город был таким маленьким, а его одиночество — таким большим, что юноше приходилось делать несколько кругов по повторяющемуся маршруту.

В этом крохотном городе раньше работали великие учёные, начиная с Ньютона, которым Чандрасекар восхищался. Как так вышло, что Кембридж вообще был и продолжает оставаться научным центром мира? Чандре замечал, что коллеги

всегда ведут себя с ним очень вежливо, однако отчужденно, да и он сам не стремился к более близким отношениям, но хотел более тесного научного контакта... К тому же еда в Англии непригодна для вегетарианца.

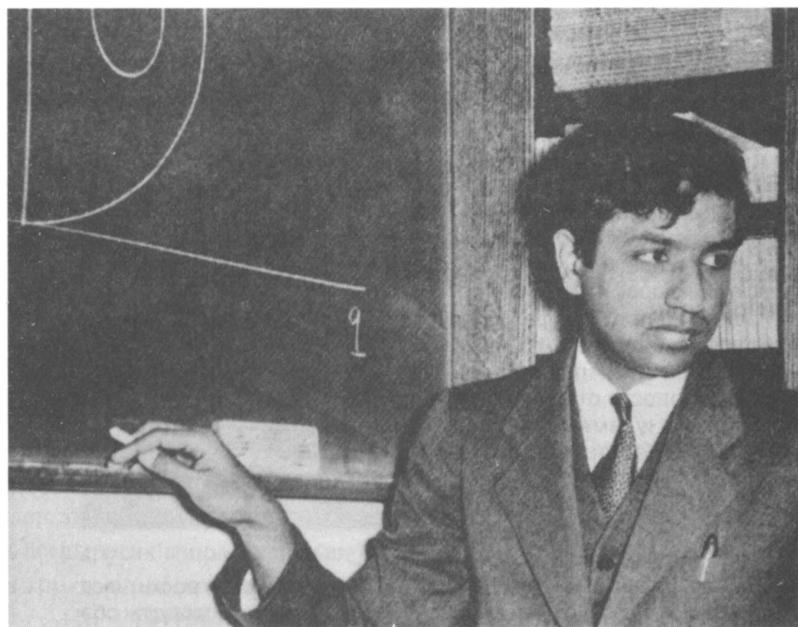
В Мадрасе, с его гораздо более низким уровнем развития науки, он встречал больше понимания. А теперь его мать умерла, и общение с семьей сводилось к закорючкам на листе бумаги. Да, письма теплые и эмоциональные, но это всего лишь бумага. А Лалита? Чандра постоянно вспоминал девушку, видел перед собой ее понимающие глаза, когда она узнала, что он предпочел ей астрофизику. Где сейчас Лалита?

Дирак сказал Чандрасекару:

«Не занимайся астрофизикой. Занимайся физикой. Кембридж дает тебе много свободы. Поезжай в Гётtingен – там Макс Борн. Сейчас он директор Института теоретической физики, я напишу ему. Или поезжай в Копенгаген, познакомишься с Бором, самым великим физиком из живущих».

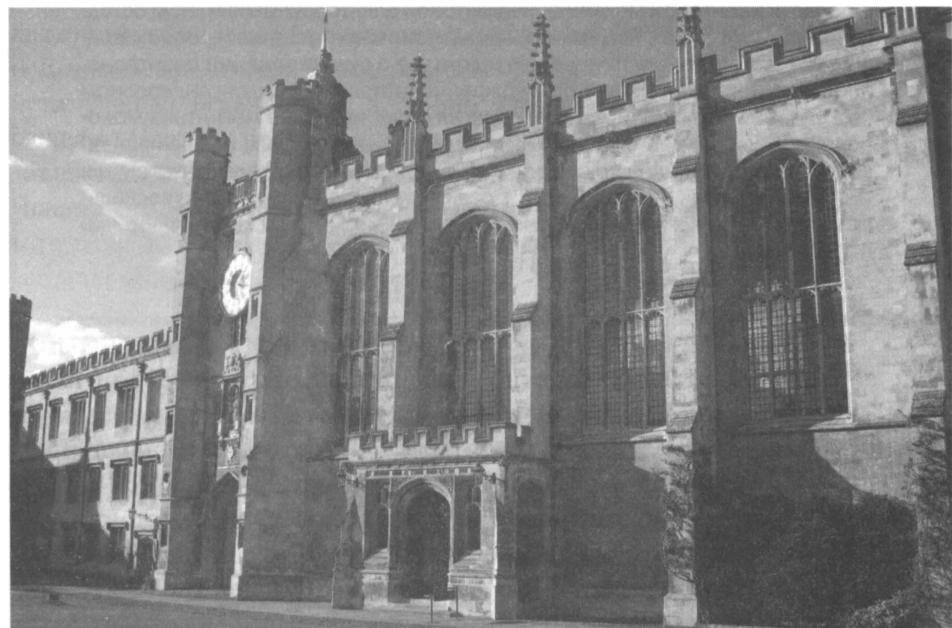
Чандра так и сделал. Сначала, летом 1931 года, он поехал в Гётtingен и встретил там обстановку, намного более приятную в плане человеческих отношений и более открытую с научной точки зрения. Сам Макс Борн (1882–1970), несмотря на свою занятость на посту директора института, приехал встретить гостя на станции. Коллеги сразу заинтересовались работами Чандрасекара, да и еда там была намного лучше. Он воспрял духом и даже завязал несколько интересных знакомств. Чандре начал общаться с венгром Эдвардом Теллером (1908–2003), который позже сыграл важную роль в Манхэттенском проекте, с Людвигом Бирманом (1907–1986), который интересовался вопросами внутреннего строения звезд и составил несколько звездных моделей, а также опять встретился с Гейзенбергом, который приехал в институт из Лейпцига и рассказал Чандре о новой квантовой электродинамике.

В Кембридже научная жизнь кипела в течение многих веков, но Гётtingен не отставал от него. Если в Кембридже когда-то жил Ньютон, то в Гётtingене – Карл Фридрих Гаусс



ВВЕРХУ:
Субраманьян
Чандрасекар
во время одного
из своих
выступлений.
Труд, за который
он получил
Нобелевскую
премию
в 1983 году, был
разработан
в молодости
и привел
к длительной
полемике
с авторитетным
астрофизиком
Эдингтоном.

ВНИЗУ:
Тринити-колледж
в Кембридже,
где Чандр
защитил
докторскую
диссертацию,
получил титул
фелло.



МОЛЧАЛИВЫЙ ГЕНИЙ

Поль Дирак (1902–1984), физик швейцарского и французского происхождения, сначала получил в родном Бристоле профессию инженера-электрика, а затем стал изучать то, что его действительно интересовало,— математику. Почти всю свою профессиональную жизнь он занимал пост профессора Кембриджского университета. Дирак с детства имел сложный характер, возможно, из-за суровости отца. Он был очень молчаливым и замкнутым. Молодой Чандра сделал первые шаги в науке, использовав статистику Ферми — Дирака, которую сам Дирак из-за чрезмерной скромности приписывал только Энрико Ферми (1901–1954).

Затем, когда Чандрасекар познакомился с Дираком лично, он восхитился его лекциями, и они иногда гуляли вместе, хотя во время этих прогулок оба молчали. Основные работы ученых, кроме статистики фермionов, лежали в области квантовой механики и квантовой электродинамики. Нам сегодня известно уравнение Дирака — релятивистское уравнение, описывающее поле электрона и приведшее к догадке о существовании позитрона, позже экспериментально подтвержденной Карлом Дэвидом Андерсоном (1905–1991). Также Дирак предполагал существование магнитных монополей. Довольно долго ученый был убежденным атеистом и публично защищал идеи, отрицающие все религии. Паули по этому поводу даже шутил: «Бога нет, и Дирак — пророк его». Позже, однако, атеизм ученого несколько ослаб. Он был хорошим другом Леметра. Умер в Таллахасси (Флорида) в 1984 году.



(1777–1855). Возможно, Чандра даже приходил в дом Гаусса и держал в руках самое плодотворное перо в истории, которое вначале служило полету птицы, а потом — полету науки. Гаусс со своим другом Вильгельмом Эдуардом Вебером (1804–1891) был навечно запечатлен на площади средневекового города — такого же маленького, как Кембридж.

Кроме того, Чандра владел немецким языком. Он выучил его еще в Мадрасе, и об этом знали даже не все члены его семьи,

которые, возможно, немало удивились бы этому факту. Юноша занялся туризмом: Кёльн, Берлин, Кассель... Позже, в 1932 году, уже по возвращении в Кембридж, он поехал в Копенгаген, где немного выучил датский, хотя в институте говорили на немецком. Там человеческий и научный климат показался ему еще приятнее, чем в Гётtingене. Постепенно Чандрасекар оттаивал, и о нем стали говорить как об очень приятном в общении человеке. К сожалению, он не мог часто видеться с Нильсом Бором (1885–1962) из-за большой занятости датского ученого, поэтому их общение было редким, однако плодотворным. Бор говорил:

«Я не нахожу привлекательной идею работы в астрофизике. Первый вопрос, который я задаю себе: откуда происходит энергия звезды? Никто не может на него ответить. Как же я могу идти в других вопросах дальше?»

Ни в Гётtingене, ни в Копенгагене никто не был глубоко знаком с теорией Эддингтона, поэтому Чандр начал отходить от астрофизики и все больше интересовался чистой физикой. В Копенгагене он жил примерно семь месяцев. На обратном пути ученый остановился в Льеже, где коллеги, знакомые с идеями Чандры, пригласили его прочитать курс лекций. Наконец, он вернулся в Кембридж, чтобы защитить диссертацию. После этого Чандрасекару нужно было возвращаться в Индию.

ДОКТОРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Уже был определен день защиты, а также назначена комиссия из двух профессоров: один — руководитель Чандры Фаулер, другой — Эддингтон. Все было решено, кроме... темы самой работы.

Чандр к тому времени освоил столько предметов, что мог представить несколько диссертаций. Он благоразумно решил, что будет защищаться по астрофизике. Так как Эддингтон

успешно ввел понятие политропов в звездах, Чандра подумал, что доставит удовольствие авторитетному ученому, если разовьет тему политропов, поэтому выбрал в качестве объекта исследования искаженные политропы (понятие «политроп» рассмотрено в приложении).

В назначенный час Чандра пришел в аудиторию, но никого в ней не нашел — ни Фаулера, ни Эддингтона, ни приглашенных на защиту. Через 15 минут пришел Фаулер и, даже не извинившись за опоздание, объявил, что нужно перейти в комнаты Эддингтона. Защита выглядела довольно комично: Чандра — в строгом костюме и Эддингтон — в домашних тапочках.

Настало время вопросов. Чандрасекар вспоминал, что вначале его ответами остался доволен Фаулер, но не Эддингтон. Затем наоборот: был удовлетворен Эддингтон, но не Фаулер. Вдруг Фаулер посмотрел на часы и, извинившись, сказал, что ему нужно идти. И ушел. Эддингтон сказал: «Это всё». После этого Чандра оставил личные апартаменты уважаемого профессора, автора наиболее полного трактата о строении звезд и лучшего популяризатора теории относительности (по словам Эйнштейна), но очень небрежного в вопросах академической формальности. Может быть, в Кембридже так защищали диссертации всегда?

Защита осталась позади, но Чандра так и не узнал том, какое впечатление произвела его работа на обоих профессоров. Ему не вручили никакой письменной оценки, а Фаулер исчез в неизвестном направлении. Через несколько дней юноша узнал от секретаря, что он уже доктор наук. Этому событию никто не придал значения, включая самого Чандрасекара. С учетом общей сумбурной атмосферы на защите, он даже не был уверен в том, что она действительно состоялась. Но, как бы то ни было, он стал доктором Кембриджа.

Теперь Чандра должен был вернуться в Индию, хотя мог и попросить о стипендии, чтобы стать *фелло* Тринити-колледжа. Идея была хорошая, но Фаулер огорчил подопечного: получить такую стипендию невозможно. А ведь если бы это удалось, у Чандры были бы собственные апартаменты, он трапезничал бы за так называемым *High Table*, имел более чем до-

столько средств в течение пяти лет стипендии и... получил бы право ходить по газонам колледжа! В последний год стипендии он даже мог жить где угодно, хоть в Индии. Чандрасекар от правил запрос на стипендию вопреки словам Фаулера о том, что надежд питать не стоит. Он ни на что не надеялся — просто решил провести последние месяцы в Оксфорде с Милном, чтобы закончить некоторые общие исследования. Однако он даже не успел сесть в такси, поскольку в последний момент узнал, что получил столь желанную и недоступную стипендию. Чандрасекар стал *фелло Тринити*-колледжа.

Комизм защиты его докторской диссертации компенсировался торжественной средневековой церемонией предоставления статуса *фелло Тринити*, во время которой Чандре на коленях принял свои полномочия, а *Мастер* произносил ритуальные фразы на латыни. Затем он узнал, что ему помогли настойчивые рекомендации Милна и Фаулера. С этих пор к Чандре начали относиться более дружелюбно, и его представление о Кембридже улучшилось. Даже их разговоры с Фаулером стали происходить чаще, поскольку тот с большим интересом рассматривал тезис о пределе массы белых карликов.

Одновременное знакомство с «Внутренним строением звезд» Эддингтона и современной статистикой — современной на тот момент — через Зоммерфельда пробудило во мне интерес к теории белых карликов.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

Резерфорд и Эддингтон спорили с молодым фелло на самые разные темы, а Эддингтон, которого считали отшельником, проявлял невероятное дружелюбие. Чандре тогда подумал: этот человек очень скромен в личной жизни, но очень настойчив в науке. Квакер Эддингтон был очень набожен. Королевское общество провело опрос, выясняя, кто из ученых верит в божественное начало, и Эддингтон оказался одним из немногих, ответивших положительно. Он написал чудесную книгу на эту тему под названием *«Наука и невидимый мир»*. Однако

позже его отношения с Чандрасекаром были омрачены известной полемикой.

Чандра часто говорил с Резерфордом, который высказывал очень радикальные идеи и, как физик предшествующего поколения, испытывал явную неприязнь к астрофизике. Говоря о своей работе, он замечал: «То, что делаю я сейчас, больше связано со звездами, чем то, что делаете вы в обсерватории». И еще: «Здесь не говорят о Вселенной».

Однако в то время астрофизика привлекала все больший интерес физиков, и Резерфорд неожиданно для себя был вынужден сосредоточиться на ее проблемах. К Чандре вернулись радость и вера в себя. Теперь ему очень нравился Кембридж, совсем недавно вызывавший отторжение, и молодой ученый приобрел английские манеры, которые сохранил на всю жизнь. Правда, при этом он никогда не отказывался от индийских корней.

Чандрасекар с некоторым беспокойством воспринял новость о том, что его отец собирается совершить поездку по Европе и, конечно же, Кембридж должен стать одним из пунктов его маршрута. С одной стороны, юноша боялся, что отец будет разочарован, когда увидит безразличие английских ученых к его сыну, которого в семье считали гением. С другой стороны, этот довольно долгий визит мог нарушить точно выверенные планы Чандры. Он попытался переубедить отца, рассказывая ему об отвратительной английской еде, но тот уже составил список вегетарианских ресторанов Европы. Кроме того, отец Чандры исполнял музыку *карнатик* на скрипке и уже договорился о творческих вечерах в различных городах.

Встреча состоялась, и Чандра стал гидом своего отца в Кембридже, Оксфорде, Лондоне... и одну неделю в Германии. Вопреки его опасениям, встреча принесла радость обоим, и они узнали друг друга лучше, чем раньше, в окружении огромной семьи.

По предложению Милна Чандра был также избран *фелло* Королевского астрономического общества. Он познакомился с такими его знаменитыми посетителями, как Генри Норрис Расселл (1877–1957) и Харлоу Шепли (1885–1972), а так-

же с физиком и астрономом Джеймсом Хопвудом Джинсом (1877–1946), работы которого до сих пор восхищают астрофизическое сообщество.

Летом 1934 года Чандрасекар решил посетить Советский Союз. Поездка заняла один месяц. Сначала он направился в Ленинград (ныне Санкт-Петербург), и их корабль постоянно преследовали немецкие эсминцы, предвещавшие скорое изменение границ на континенте. В СССР он познакомился с Виктором Амбарцумяном (1908–1996) и Львом Ландау (1908–1968), которые оказали значительное влияние на работы Чандры. Ландау некоторое время спустя нашел предел массы для нейтронных звезд (которые тогда еще не были открыты), подобный пределу Чандрасекара для белых карликов (так называемый предел Ландау — Оппенгеймера — Волкова), а Амбарцумяну выпало осуществить независимо от Чандрасекара разработку теории переноса лучистой энергии.

Амбарцумян воодушевился пределом Чандрасекара. В своем путешествии из Индии в Англию Чандра использовал очень неплохие приближения, к которым прибегали теоретики того времени, таким образом не только делая математическое решение более простым, но и достигая лучшего понимания физиче-

КАК ЧАНДРА ПРИНИМАЛ ДУШ

Этот анекдотический случай произошел с Чандрой во время путешествия на корабле из Одессы в Стамбул. Когда ученый поднялся на борт, ему сообщили, что каюту он будет делить с двумя русскими женщинами и одной немкой. Это было ужасно и для него, и для женщин. Однако Чандра знал немецкий, а немка — русский, так что они смогли установить правила поведения. Перед сном Чандра выходил в коридор, а женщины в это время укладывались спать. Затем Чандра возвращался в номер и, не включая свет, ложился. Но однажды дамы оставили иллюминатор открытym, хотя капитан предупредил их, в море в это время года встречаются крупные одиночные волны (их называют солитонами). Когда все улеглись спать, такой солитон захлестнул иллюминатор. Четыре путешественника, вымыкшие до нитки, забыли установленные правила и выскоцили из постелей. Это был единственный случай, когда Чандра принимал душ в компании дам.

ской проблемы. Амбарцумян, конечно, оценил эти теоретические приближения, но посоветовал Чандре сделать расчет без них, чтобы убедить наиболее неуступчивых оппонентов. Проблема требовала сложных вычислений, но могла быть решена с помощью калькулятора, так что нужно было только найти это новое приспособление. Чандрасекар принял идею Амбарцумяна и решил вернуться к проблеме карликов с новыми силами.

В этой поездке он также посетил Москву, Крым, Одессу, Стамбул, познакомился со многими учеными, однако даже не мог представить, что через некоторое время все его новые знакомые будут расстреляны режимом Сталина или сосланы в концентрационные лагеря. Избежать печальной судьбы удалось только Амбарцумяну.

Чандре продолжал учиться. Все, что он знал, было результатом самообразования. Он рассказывал, что тогда читал каждый номер «*Ежемесячных записок Королевского астрономического общества*» (MNRAS) и «*Астрофизического журнала*» (ApJ) от корки до корки, а также статьи из нового немецкого издания — «*Астрофизического журнала*» (Zeitschrift für Astrophysik) — и регулярно просматривал Nature.

ПОЛЕМИКА МЕЖДУ ЭДДИНГТОНОМ И ЧАНДРАСЕКАРОМ

В истории науки известны несколько знаменитых полемик. Обычно научное сообщество в итоге признает правоту одного из ученых, участвующих в полемике, или целой группы. В этой полемике победил Чандрасекар, но и он, и его оппонент Эддингтон вошли в историю как два выдающихся астронома. Дискуссия была долгой: Чандре установил предельную массу еще в молодости, но астрономическое сообщество признало это открытие спустя целых 30 лет, и еще через 20 лет ученый получил за него Нобелевскую премию. Порой соперники в этом научном турнире теряли благородство (особенно это верно по отношению к Эддингтону), но сама полемика оказалась очень

плодотворной. В развитии науки ошибки так же важны, как и правильные гипотезы.

Чандря был 20-летним юношей, подающим надежды, а Эддингтон — самым авторитетным из астрономов, и этот статус был вполне заслужен благодаря вкладу ученого в понимание строения звезд, в космологию, благодаря его прекрасному толкованию общей теории относительности, популяризации термодинамики и другим работам. Эддингтона отличал легкий, хотя и немного едкий юмор. Об ученом говорили, что он ни разу в жизни не завершил ни одной своей фразы, но его перо творило чудеса. Его престиж и авторитет были так велики, что все безоговорочно принимали вердикты ученого в отношении новых гипотез и идей: если сам Эддингтон говорил, что это чушь, значит, так оно и было. Никто, кроме Милна и Чандры, не решался скрестить с ним шпаги. Так что эта полемика напоминала поединок скромного Давида и гиганта Голиафа.

Звезда главной последовательности — это политроп, давление в котором относится к плотности как $5/3$, если рассматривать звезду в конвекционном равновесии (как уже было сказано, понятие политропа объясняется в приложении). Ввести статистику Ферми — Дирака в описание белых карликов, как это сделал Фаулер, значило определить для них этот показатель так же как $5/3$. С показателем $5/3$ все звезды умирали как белые карлики. Этот вывод, столь понятный интуитивно, противоречил статистике релятивистских белых карликов, потому что для них этот показатель был равен $4/3$. Это означало, что звезды, которые изначально имеют массу, превышающую предел Чандрасекара, примерно 1,4 солнечной массы, «не могут умереть спокойно», по выражению Эддингтона. Но как умирает звезда, масса которой больше 1,4 солнечной массы? Чандре рано или поздно пришлось столкнуться с этим вопросом, а пока он просто говорил, что белый карлик, масса которого больше 1,4 солнечной массы, не может существовать.

По совету Амбарцумяна Чандря уточнил расчеты, используя позаимствованный у друга примитивный калькулятор. Признаки релятивистского вырождения не появлялись долго. Эддингтон часто заходил в кабинет Чандры, чтобы узнать

результат вычислений, причем сам Чандрасекар был крайне удивлен этим неожиданным интересом к расчету, который нужно было представить на заседании Королевского астрономического общества в 1935 году.

Когда Чандря увидел повестку заседания, он удивился: после его сообщения шло сообщение Эддингтона с неожиданным названием «Релятивистское вырождение». Но ведь это его тема, а не Эддингтона! И тогда Чандря заподозрил, что частые визиты старшего коллеги вызваны другой причиной, довольно непрятной. За день до заседания ученые вместе ужинали, но Эддингтон ни словом не упомянул о предстоящем выступлении. Если его так интересовало релятивистское вырождение, почему он никогда не говорил об этом?

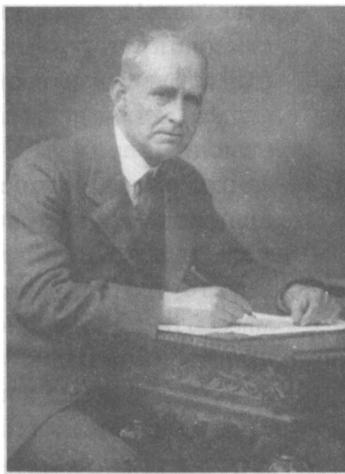
Чандря представил свой доклад. Затем шло сообщение Эддингтона, которое начиналось словами: «Не знаю, останусь ли я в живых после этого заседания, потому что статья, которую вы только что услышали, имеет абсолютно ошибочные обоснования». Чандря побледнел. В итоге все, подчинившись авторитету великого профессора, заявили: «Да, действительно, это было неудачное выступление». Сокрушенный, Чандря отправился на вокзал, где встретил Милна, который заметил: «Я спинным мозгом чувствую, что Эддингтон прав», на что Чандря угрюмо ответил: «Лучше бы Вы чувствовали это другими местами».

Такая резкость не была свойственна Чандре, но он чувствовал в этот момент злость, досаду и унижение, так что простим его. После этой стычки отношения между Чандрасекаром и Эддингтоном надолго испортились. Чандря избегал Эддингтона, а тот всячески старался сделать вид, что между ними ничего не произошло, хотя и продолжал утверждать, что расчет Чандры не имеет смысла.

На конференции в Париже в 1935 году Эддингтон настаивал на отсутствии релятивистского вырождения. Чандря передал Расселу, который председательствовал на мероприятии, записку, в которой просил слова для ответа Эддингтону, но Расселл в ответ написал ему другую записку: «Лучше Вам этого не делать».

АРТУР СТЭНЛИ ЭДДИНГТОН (1882–1944)

Эддингтон — один из самых великих астрономов всех времен, и Чандraseкар признавал это. Он был квакером, как и его родители, поэтому проявлял глубокую религиозность. Также Эддингтон хорошо знал английскую литературу. Он работал в легендарной Кавендишской лаборатории в Кембридже и в не менее легендарной Гринвичской обсерватории. Почти вся профессиональная жизнь Эддингтона проходила в Кембридже, где он занимал пост директора обсерватории, а затем передал его Джорджу Дарвину (сыну знаменитого Чарльза Дарвина). Самая великолепная работа ученого — «Внутреннее строение звезд» — анализирует внутренний состав и эволюцию звезд. Именно Эддингтон пришел к выводу, что звезду главной последовательности можно рассматривать как идеальный газ. Именно он количественно оценил турбулентные радиоактивные эффекты и влияние давления излучения, объяснил отношение между светимостью и периодом звезд-цефеид, предположил, что энергия образуется при синтезе водорода (идея, разработанная Бете), и объяснил отношение массы и светимости (светимость приблизительно пропорциональна кубу массы). Эддингтон, как и Чандрасекар, тоже вычислил свой предел. Предел Эддингтона относится к максимальной светимости, ожидаемой от объекта, увеличивающего свою материю (как это свойственно открытым позднее квазарам). Его книгу «Математическая теория относительности» очень хвалил Эйнштейн. Эддингтон 29 мая 1919 года повел экспедицию на остров Принципи, чтобы проверить отклонение света в системах, близких к Солнцу, во время затмения, как это прогнозировала общая теория относительности. По словам Чандры, в этой экспедиции Эддингтон не только преследовал научные цели, но также хотел избежать тюрьмы за уклонение от участия в Первой мировой войне по религиозным мотивам. В своей достойной похвалы популяризации теории относительности ученый не забыл и космологическую теорию Леметра. Эддингтон хотел заниматься космологией, как Милн, но без особых успехов. По словам Чандры, после того как и Эддингтон, и Милн потерпели фиаско, он сам больше никогда не хотел заниматься этой дисциплиной. В конце своей жизни великий ученый занимался поисками всеобщей теории, однако, как и Эйнштейн, безуспешно. Более того, эта цель не достигнута до сих пор.



На другом собрании в Париже астроном Джерард Койпер (1905–1973) спросил Эддингтона, нет ли способа примирить обе теории с помощью наблюдений. Однако великий ученый ответил: «Не существует никаких двух теорий». Возмущенный Чандра, протестуя, поднялся со своего места, но Расселл, который вновь вел собрание, изрек: «Дискуссия закрыта».

Но каковы были аргументы Эддингтона? Он не отвергал выводы и расчеты Чандры, с которыми был хорошо знаком, но отвергал само понятие релятивистского вырождения. Уравнение, из которого исходил Чандрасекар, опиралось на квантовую механику и общую теорию относительности, однако мы можем понять, что беспокоило Эддингтона. Утверждение, что звезды массой более 1,4 солнечной массы «не могут умереть спокойно», противоречило показателю 5/3 политропа Фаулера.

Чандрасекар был дискредитирован и почти не имел возможностей защищаться публично. Не стоило и думать о том, чтобы опубликовать без одобрения Эддингтона статью в журнале Королевского астрономического общества, а выступать на научных встречах Чандре тоже не давали. И он принял три мудрых решения.

1. Заняться другими исследованиями, поскольку борьба с Эддингтоном требовала слишком много времени и энергии.
2. Сохранить восхищение перед заносчивым профессором и вести себя вежливо, но не отказываться от своих расчетов. Тем более что Эддингтон по-прежнему предлагал Чандрасекару свою дружбу. Да, он злоупотреблял своим положением, но это было вызвано обожествлением Эддингтона в мировом астрономическом сообществе — не только в Кембридже. Он привык к тому, что его авторитет непререкаем.
3. Поскольку возражения Эддингтона напрямую влияли на понимание новых законов физики, почему бы не спро-

сить мнения открывателей этих новых законов — Бора, Паули, Дирака?..

Для начала он обратился к Бору через своего друга Леона Розенфельда (1904–1974), который с ним вместе работал. «Пожалуйста, пришлите мне ответ авиапочтой», — писал Чандра. И Розенфельд, и Бор ясно видели, что интерпретация Чандры верна. В мире физиков Эддингтон уже не пользовался незыблемым авторитетом: физики в то время мало интересовались астрофизикой. Но когда Чандра попросил обнародовать это мнение, например в виде статьи, Розенфельд ответил, что Бор слишком сильно занят. Это действительно было так: ученый много работал и не хотел распыляться на другие вопросы.

Паули также был согласен с интерпретацией Чандры, но предпочитал не осложнять себе жизнь этим спором, один из участников которого был очень упрям и не желал прислушиваться к аргументам других. Точно так же считал и Дирак — и написал об этом Чандрасекару из Принстона, где в то время работал. Таким образом, Чандра не получил письменного подтверждения своей правоты, но радовало хотя бы то, что прав был он, а не Эддингтон. Дело в том, что иногда Чандрасекар падал духом и терял веру в себя, начиная предполагать, что, возможно, он действительно где-то допустил ошибку. Тогда молодой ученый решил просто перевернуть эту страницу и написать о своем открытии книгу (книги ученое сообщество воспринимало легче, чем статьи в научных журналах), а время рассудит.

Его личные отношения с Эддингтоном вскоре вновь по теплели, их даже можно было назвать дружескими. Они часто вместе катались на велосипеде, пили чай, много разговаривали. Когда у Чандры закончился период действия стипендии, они много размышляли о его дальнейшей судьбе, и молодой ученик последовал совету старшего коллеги. А когда Чандра, уже женатым, вернулся в Кембридж, Эддингтон пригласил его вместе с супругой на чаепитие. Чандрасекар испытывал искреннее уважение и восхищение по отношению к тому, кто многому его научил. Он понял, что полемика вышла из сугубо научно-

го русла только из-за особого характера Эддингтона. Он был всемогущим, но очень прямолинейным. И, как это ни странно, Эддингтону нужен был Чандра. Как-то раз, чтобы сделать личные отношения легче, Эддингтон заметил: «Не будем говорить о науке». Чандря ответил: «Мы уже так и делаем».

Чандрасекар вспоминал свой диалог с Эддингтоном на торжественном ужине после Парижского конгресса, на котором присутствовали такие выдающиеся физики, как Луи Виктор де Бройль (1892–1987) и Мария Кюри (1867–1934). Чандря чувствовал себя удрученным после новой безжалостной атаки Эддингтона. Тот подошел к нему и сказал:

- Сожалею. Надеюсь, что не ранил вас этим утром.
- Вы изменили свое мнение? — спросил Чандря.
- Нет, — ответил Эддингтон.
- Тогда почему вы говорите, что сожалеете? — снова спросил Чандря.

Эддингтон посмотрел на него и ушел. Чандрасекар всегда сожалел о своем поведении тогда — все-таки Эддингтон подошел попросить у него прощения. Увы, с тех пор они больше не виделись: Вторая мировая война прервала развитие науки, а Эддингтон умер до ее окончания, в 1944 году. Некоторые подозревали, что в этой научной полемике проявился тщательно скрываемый Эддингтоном расизм, однако это не так. Чандрасекар, хорошо знавший Эддингтона, был уверен в том, что его оппонент не был расистом.

Но углубимся не только в эпизоды *истории* астрофизики, но и в эпизоды ее *истории*. В ней есть очень интересные моменты, касающиеся внутреннего приключения Чандры и необходимые для ответа на вечный вопрос, которым задавались еще древние: что такое звезда?

СМЕРТЬ ЗВЕЗД

До вмешательства Чандры в исследования звездной эволюции смертью звезды считалось состояние белого карлика, итогом

которого является трансформация в черного карлика, который ничего не излучает. Белый карлик мог рассматриваться как образец мирной смерти, удовлетворявшей Фаулера и Эддингтона. Чандря доказал, что их догадка верна для звезды с массой ниже так называемого предела Чандрасекара — приблизительно 1,4 солнечной массы. Но поскольку уже было обнаружено, что некоторые звезды имеют большую массу, неизбежно возникал вопрос: как умирают эти тяжелые тела?

Чандря считал, что уже достаточно сделал для небесной сферы и это не его миссия — отвечать на все вопросы. Но внутри себя он оставался недоволен, и этот вопрос тревожил его, словно заноза.

На конгрессе в Париже в 1939 году Чандря рассмотрел эту проблему. Во-первых, он изучил нестабильность равновесия звезды, например радиальную и ротационную нестабильность, найдя признаки нестабильного равновесия в конечных состояниях главной последовательности. Он представил взрыв звезды, во время которого она может потерять массу и уже не превышать установленного предела. И действительно, звезды способны терять массу, выбрасывая часть материи и образуя *планетарную туманность*.

Несмотря на свое название, планетарная туманность никак не связана с планетами, но истощенный материал образует нечто вроде кольца, которое напомнило открывателям такой туманности кольца Сатурна. Звезда будто бы «знает», что у нее чересчур много массы для того, чтобы мирно умереть, как белый карлик, и избавляется от излишка. Таким же образом можно истолковать так называемые звезды Вольфа — Райе, у которых из-за выброса массы словно обнажается внутренняя область.

Но ученый по-прежнему чувствовал себя неудовлетворенным. А если исходная масса звезды еще больше и звезда не способна освободиться от всего избытка? Не верилось и в то, что звезда «знает» о пределе массы, наложенном доктором Чандрасекаром. Приведем слова ученого, сказанные им на заседании в Париже в 1939 году, — они определили будущее исследований звездной эволюции:

«[Для звезд большей массы] существуют другие возможности. Во время фазы сжатия они могли бы вырабатывать вырожденные ядра. Если бы эти вырожденные ядра достигли достаточно высокой плотности (как это возможно в таких звездах), протоны и электроны соединялись бы, образуя нейтроны. Это вызвало бы резкое понижение давления, которое привело бы к коллапсу звезды в нейтронное ядро и к огромному высвобождению гравитационной энергии. Это может быть механизмом образования сверхновой».

Еще Вальтер Бааде (1893–1960) и Фриц Цвикки (1898–1974) говорили на собрании Американского физического общества о возможном существовании нейтронных звезд, связывая их со сверхновыми. Чандра подумал, что очень тяжелые звезды могут умирать и таким образом.

С другой стороны, нейтроны — также фермионы, следовательно, нейтронные звезды тоже должны иметь предел массы. Этот предел был рассчитан Львом Ландау, Робертом Оппенгеймером (1904–1967) и Джорджем Волковым (1914–2000) и называется пределом Ландау — Оппенгеймера — Волкова. А в 1967 году Джоселин Белл (р. 1943) и Энтони Хьюиш (р. 1924) открыли пульсары — нейтронные звезды высочайшей плотности. Их плотность соответствует массе, немного большей, чем у Солнца, но сосредоточенной в шаре радиусом около 10 км. Через 27 лет прогноз Чандры начал подтверждаться.

Идентификации открытых пульсаров и теоретических нейтронных звезд не пришлось долго ждать. Во время лекции, на которой Хьюиш рассказывал об открытии Беллом пульсаров, в конце, когда наступил черед вопросов, Хайл поднял руку: «Я думаю, что пульсар — это остаток сверхновой». Возможно, он вспомнил гипотезу Чандры. Сделаем небольшое пояснение: сегодня остатком сверхновой называют оболочку, извергнутую во время взрыва, а Хайл имел в виду как извергнутый материал, так и то, что осталось от самой нейтронной звезды.

И если давление нейтронного ферми-газа не может выдержать аутогравитации очень большой звезды, то звезда должна превратиться в черную дыру. Однако релятивистские исследо-

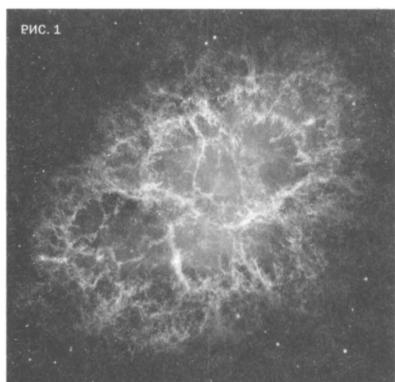


РИС. 1

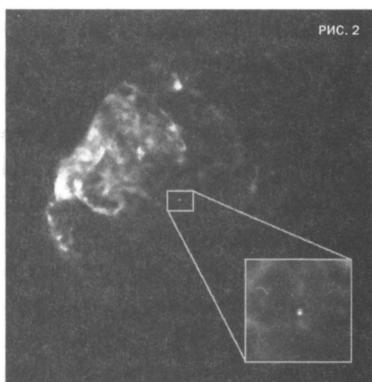


РИС. 2

РИСУНОК 1:
Крабовидная
туманность —
это остаток
сверхновой. Такой
взрыв вызывают
неустойчивости
тяжелой звезды.
Нейтронная
звезда (пульсар)
в центре
не превышает
предела Ландау —
Оппенгеймера —
Волкова. Это
соответствует
догадке
Чандрасекара,
сформулированной
еще до открытия
пульсаров.



РИС. 3

РИСУНОК 2:
Другой остаток
сверхновой, где
заметна точка,
соответствующая
излучению
нейтронной
звезды,
существование
которой было
предсказано
Чандрой.

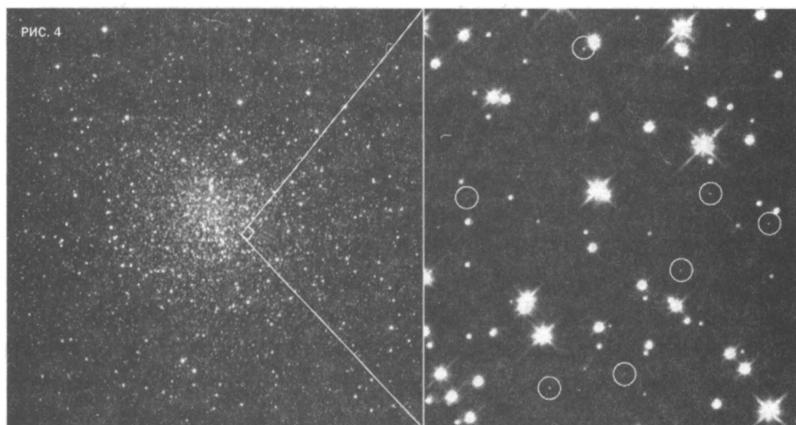


РИС. 4

РИСУНОК 3:
Чандра догадался
об образовании
черных дыр из-за
смерти тяжелых
звезд. На этом
рисунке галактика
поглощается
черной дырой,
деформируясь
из-за приливных
сил.

РИСУНОК 4:
В шаровом
звездном
скоплении могут
появляться белые
карлики. Круги
на рисунке
справа — это
белые карлики.

вания черных дыр не касались их внутренней области. Нужно было, чтобы кто-нибудь описал черные дыры с помощью уравнений Эйнштейна в ситуациях, очень отдаленных от приближения слабого поля, то есть легкой кривизны. Эту работу через несколько лет осуществил Чандрасекар, который специально для этого изучил общую теорию относительности. Рисунки 1–4 на предыдущей странице показывают конечные стадии, которые вывел или о которых догадался Чандр: остатки сверхновых, черные дыры и белые карлики. Чандр получил за свою работу различные награды — такие как Золотая медаль Королевского астрономического общества (1952) и Медаль Кэтрин Брюс (1953), но ни одна из них не была связана с открытием предела Чандрасекара.

Первой премией, при вручении которой был упомянут предел Чандрасекара, была Премия Дэнни Хайнемана (1974). Ученому вручили ее через 30 лет после смерти Эддингтона, когда уже давно была признана справедливость релятивистского вырождения.

БЕЛЫЕ КАРЛИКИ

В предыдущей главе мы рассмотрели, что такое звезда главной последовательности, такая как наше Солнце. В ней водород трансформируется в гелий. Ядерный процесс вызывает увеличение внутреннего давления, а этот перепад давления создает силу, оказывающую сопротивление гравитации. Реакции синтеза противостоят гравитационному коллапсу. Но что произойдет, когда водород закончится? Во внутренней области звезды, ближе к ее центру, исчезает давление, которое до сих пор сдерживало коллапс. При этом коллапсе, как мы знаем, происходит большой рост температуры благодаря механизму Кельвина. При достижении 100 миллионов градусов начинается сгорание гелия. Теперь реакция ядерного синтеза состоит в том, что из трех атомов гелия образуется один атом углерода.

Эта реакция вновь вызывает перепад давления, противостоящий коллапсу. Но мы уже знаем, что в этом процессе обра- зуется меньше энергии, чем раньше, и этап сгорания гелия короче предыдущего. Так можно сжечь что угодно, дойдя до же- леза. С этого момента давление больше не растет, и коллапсу ничего не противостоит.

Между фазой сжигания водорода и фазой сжигания гелия радиус звезды увеличивается, проходя через фазу красного гиганта, которая составляет очень небольшую долю жизни звезды. Когда гелий заканчивается, неизбежно приближается коллапс, пока не возникает новый тип давления — так называемое давление ферми-газа, которое этот коллапс останавливает. В этот момент звезда входит в фазу белого карлика. Что такое давление ферми-газа?

Невероятно: то, что человеческий мозг воспринимает как красивое, находит свое отражение в природе.
Все умное также красиво.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

В Кембридже эти идеи кипели. Говоря очень упрощенно, Эддингтон понял, что такая нормальная звезда, Фаулер — что такое белый карлик, а Чандрасекар — что такое релятивистский белый карлик. После этих исследований оставалось мало вопросов относительно массы звезды в ее эволюции. Для начала остановимся на нерелятивистском белом карлике. Эддингтон считал, что это естественная смерть любой звезды, которая по прошествии долгого времени в итоге гаснет и превращается в черного карлика. Но Чандре отверг идею такой простой смерти для звезд, если их масса в разы превышает массу Солнца.

Электроны — это частицы, относящиеся к так называемым фермionам. С точки зрения статистической механики это означает, что у них есть пара свойств. Фермионы — неразличимые частицы. Электрон — это не что-то отличное от другого электрона; пара электронов — это именно их пара, а не сочетание двух электронов. Другое свойство, характеризующее ста-

тистическую систему электронов, заключается в соответствии принципу запрета Паули. Два электрона не могут иметь одно и то же квантовое состояние. Если мы хотим поместить в систему еще один электрон, возникает отталкивание — чтобы он не занял уже занятое квантовое состояние. Благодаря этому система противостоит сжатию, что равносильно утверждению, что принцип запрета Паули создает особый вид давления — давление ферми-газа.

Почему мы говорим об электронах, если звезда до этого момента содержала молекулы веществ — углерода, азота, железа и так далее? Потому что при высоких температурах все элементы сильно ионизируются, тяжелые элементы выбрасывают в среду много электронов, и когда мы доходим до этой фазы звездной эволюции, звезда содержит больше электронов, чем молекул. Эти электроны образуют квантовый газ — ферми-газ — и способствуют созданию давления.

Когда система приобретает такую высокую плотность, что давление ферми-газа становится самым важным из всех видов давления, она получает название вырожденной системы. Итак, мы определяем белый карлик как звезду, состоящую из вырожденного электронного газа. Вырождение может быть частичным, как это происходит внутри внешних планет Солнечной системы, или полным, как в крайнем случае белых карликов.

ПОЛНОЕ ВЫРОЖДЕНИЕ

Есть нечто парадоксальное в том, что такой аккуратный учёный, как Чандра, был таким большим специалистом по вырожденным звездам. Но это всего лишь термин. В вырожденной звезде нет ничего вырожденного в привычном использовании этого слова, поэтому мы должны уточнить, что мы понимаем под ним.

В белом карлике нельзя пренебрегать квантовыми эффектами. Более того, они являются в нем определяющими. Вновь

приведем уравнения равновесия, рассмотренные в первой главе. Уже нет топлива для сжигания, потому что было сожжено все, что можно сжечь. Хотя обычно для этого процесса используется слово «сжигание», будто речь идет об обычном горении, но на самом деле это другой процесс. При обычном горении выделяется очень мало энергии в сравнении с ядерным горением. Говоря, что мы сжигаем, например, водород, несколько легкомысленно расширяя значение этого слова, мы имеем в виду процесс ядерного синтеза, в котором из четырех протонов мы получаем ядро гелия.

Однако в фазе белого карлика нам уже почти нечего «сжигать», $\epsilon = 0$. И уже нельзя ожидать, что будет выполняться уравнение состояния идеальных газов, которое нужно заменить уравнением состояния вырожденного электронного газа — правда, мы его должны найти.

Полным вырождением считается состояние, когда длина волны частиц, связанная с их квантовым поведением, того же порядка, что и расстояние между частицами. Чтобы описать обычное расстояние между частицами, предположим, что если n — это число частиц на единицу объема, то обратное ему — это объем на частицу, то есть объем, занимаемый частицей, когда в нем нет другой частицы (нечто вроде объема участка, если проводить аналогию с землевладением). На участке одной частицы нет другого «владельца». Но мы говорим не об объемах, а о расстоянии, поэтому нужно извлечь кубический корень. В итоге примем в качестве показателя расстояния между частицами $n^{-1/3}$, обратный кубический корень от числа частиц на единицу объема.

Как установил Луи де Бройль в 1923 году, с каждой частицей импульса p связана длина волны, что выражается следующим образом:

$$\lambda = h / p.$$

Из-за небольшого значения постоянной Планка h эту длину волны в большинстве ситуаций повседневной жизни можно игнорировать, но не в случае, когда мы рассматриваем электро-

ны белого карлика. Импульс p зависит от температуры. Так как мы знаем, что

$$\frac{1}{2}m_e V^2 = \frac{3}{2}kT,$$

где m_e — масса электрона, а V — среднеквадратичная скорость, получаем

$$V = \sqrt{\frac{kT}{m_e}}.$$

Заметьте, что мы опустили коэффициент 3. Когда мы ищем порядки величин, числовые коэффициенты, близкие к единице, могут быть проигнорированы. Умножив на m_e , получаем импульс

$$p = \sqrt{m_e k T}.$$

Следовательно, длина волны де Бройля равна

$$\lambda_{\text{де Броиль}} = \frac{h}{\sqrt{m_e k T}}.$$

На самом деле, если уточнить расчеты, получится

$$\lambda_{\text{де Броиль}} = \frac{h}{\sqrt{m_e k T 2\pi}},$$

что отличается от нашего приближения только на числовой коэффициент порядка единицы, которые мы систематически игнорируем.

Итак, вырождение произойдет, если

$$n_e^{-1/3} \approx \frac{h}{\sqrt{m_e k T}},$$

где n с нижним индексом e обозначает число электронов на единицу объема. Если бы температура была равна нулю, полное вырождение было бы обеспечено. Поэтому для изучения этого типа систем прибегают к идеализации, предположив, что $T = 0$. Эта идеализация используется и при рассмотрении белого

карлика, хотя на самом деле его температура может быть очень высокой из-за небольшого расстояния между его электронами.

В белом карлике электроны двигаются абсолютно свободно, как и электроны в металле. Благодаря этому теплопроводность очень высока, так что температура внутри во всех его точках одинакова. Это мы и предположили, приняв, что $T = 0$. Но $T = \text{константа}$ — это реальное свойство, в то время как $T = 0$ — идеализация для упрощения расчетов. В любом случае, если белый карлик виден, то есть он испускает свет, значит, существует перепад давления на его поверхности — тонкий внешний невырожденный слой. В процессе испускания белый карлик теряет энергию, его температура уменьшается, и он становится черным карликом. Но для этого нужно много времени.

О ПОНЯТИИ ДАВЛЕНИЯ

Прежде чем определить уравнение состояния вырожденной системы фермионов, поразмышляем немного о смысле понятия *давление*. Пусть это понятие будет несколько более абстрактное, чем обычное давление, например атмосферное. Это поможет нам полностью понять смысл давления в системе фермионов. Давление флюида обычно определяется как сила, действующая на единицу площади перпендикулярно поверхности сосуда, содержащего флюид. В космосе сосудов нет. Впрочем, в классическом смысле об атмосферном давлении также говорят, не используя понятие площади, на которую действует сила. Но воспользуемся этим классическим представлением, чтобы найти выражение, справедливое для всех частиц.

Наука — это восприятие мира, который нас окружает.

Наука — это место, где то, что мы находим в природе, полностью удовлетворяет тебе.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

Со стенкой хаотично соприкасаются частицы, но они не могут проникнуть сквозь нее, поэтому отражаются назад. Но в этом процессе отражения частицы сами толкают стенку. Этот толчок представляет собой силу, воздействующую на стенку, то есть давление, которое флюид оказывает на нее. Предположим, что частицы воздействуют на стенку строго перпендикулярно.

Сила — это изменение количества движения на единицу времени. При этом импульс частицы позволил бы ей пролететь сквозь стенку, если бы она была ячеистая, а частица попала бы в такую ячейку. На элементарную площадь S за время t воздействует импульс, соответствующий всем частицам, которые достигли в это время стенки. Частицы, доходящие за время t до площади S , — это частицы, которые содержатся в цилиндре с основанием S и высотой Vt , где V — скорость частиц. Это число частиц будет $nSVt$, то есть число частиц на единицу объема на объем этого цилиндра. Каждая из них имеет импульс p , поэтому количество их движения равно $pnSVt$. Сила та же самая, но разделенная на время, то есть $pnSV$. И давление — то же самое, разделенное на площадь, то есть pnV .

В реальности не все частицы действуют перпендикулярно, и импульс еще меньше. Если движение частиц изотропно, легко доказать, что нужно разделить предыдущее значение на 3, хотя мы не будем долго задерживаться на этом, поскольку игнорируем чистые числовые значения порядка единицы. Итак, для любого типа частиц мы можем вычислить давление по общей формуле:

$$P = \frac{1}{3} pnV.$$

Напомним, что P — это давление, вне зависимости от наличия стенки; p — импульс частиц; n — число частиц на единицу объема, а V — скорость частиц.

Прежде чем применить это к фермионам, заметим, что это действительно классическая система частиц, $p = mV$, поэтому давление будет $(1/3) mnV^2$, а поскольку отношение между кинетической энергией и температурой задано $(1/2) mV^2 = (3/2) kT$, мы быстро получаем уравнение идеальных газов:

$$P = nkT.$$

Мы видим, что для системы фотонов, так как теперь $V = c$ и так как импульс фотона равен $\hbar v/c$, где v – частота, получается, что давление равно $1/3 n\hbar v$. Но $\hbar v$ – это энергия фотона, следовательно, $n\hbar v$ – это плотность лучистой энергии на единицу объема – величина, которую мы называем ϵ .

Так мы получаем уравнение излучения:

$$\epsilon = 3P.$$

Это знаменитое уравнение излучения черного тела.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ФЕРМИОНОВ БЕЛОГО КАРЛИКА

Вырождение предполагает, что в положении электрона существует неопределенность, вызванная порядком расстояния между электронами. Этой неопределенности положения соответствует неопределенность импульса. Импульсы имеют различные значения, выполняющие принцип неопределенности Гейзенberга, поэтому средний характерный импульс задан формулой

$$p = \hbar n_e^{1/3}.$$

Теперь вычислим давление по общей формуле из предыдущего раздела, опуская числовые коэффициенты:

$$P = pn_e V = pn_e \frac{p}{m_e} = p^2 \frac{n_e}{m_e} = \hbar^2 n_e^{2/3} \frac{n_e}{m_e} = \frac{\hbar^2}{m_e} n_e^{5/3}.$$

Это уравнение состояния фермионов и, в частности, электронов белого карлика. Им следует заменить уравнение состояния идеальных газов. Так как постоянная Планка и масса электрона – это константы, самое важное в этом уравнении – то, что давление пропорционально степени $5/3$ плотности электронов. Таково странное свойство белых карликов, и вскоре мы увидим, как это отражается на их внутреннем строении.

Очевидно, что должна быть связь между числом электронов на единицу объема и плотностью звезды. Воспользовавшись ею, выразим предыдущее уравнение состояния в виде отношения между давлением и плотностью.

Можно легко установить, что это отношение имеет вид

$$\rho = 2m_H n_e.$$

Как будто масса, соответствующая частице звезды, в два раза больше массы протона m_H , что справедливо для любого типа белого карлика, который сжег свой водород и гелий и состоит в основном из углерода, или азота, или железа, при этом базовый элемент полностью ионизирован. Чтобы не прерывать ритм изложения, объясним это отношение в приложении. В итоге в качестве уравнения состояния получаем

$$P = K\rho^{5/3},$$

где константа K имеет следующее точное значение (включая числовые константы):

$$K = \frac{\hbar^2}{m_e m_H^{5/3}} \frac{1}{5} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} 2^{-5/3}.$$

Формула выглядит очень сложной, но это не должно отвлекать нас от чрезвычайно простой предыдущей формулы:

$$P \propto \rho^{5/3}.$$

Этот любопытный результат получил Фаулер, применив статистику Ферми – Дирака к белым карликам. Это число, $5/3$, стало загадкой для многих астрофизиков, пока Чандра не сказал, что оно может быть другим в достаточно больших звездах и равняться $4/3$. Полемику Эдингтона – Чандрасекара можно свести к следующему:

Эдингтон: $5/3$.
Чандра: $4/3$.

ГЛАВА 3

Что такое релятивистский белый карлик

Звезда, масса которой превышает
предел Чандрасекара, не может умереть,
как белый карлик. Тогда как она умирает?

Чандрасекар не уточнил это, но вопрос, оставленный
где-то на краю сознания, беспокоил ученого еще долгие
годы, включая жизнь в США. Чандре не вел
исследований в этой области, но указал
верное направление для них. Именно
его лаконичные намеки позволили
прийти к сегодняшнему пониманию
звездной эволюции.

Заканчивался период *фелло в Тринити*. Чандре нужно было искать место, где он мог бы вести свои исследования. Его отец хотел, чтобы сын вернулся в Индию. Причина, конечно, состояла в том, что, получив британское образование, Чандре легко мог найти хорошее место на родине и принести пользу своей стране. Кроме этого, отец хотел, чтобы Чандре скорее женился: он был первым мальчиком в семье, значит, пока он не вступит в брак, другие братья и сестры, особенно самые младшие, тоже не могут этого сделать. Девочки в Индии выходили в то время замуж очень молодыми, иногда даже в 11 лет. И хотя семья Чандрасекара, довольно близкая к британскому образу мыслей, игнорировала этот обычай, все же они жили в Индии, и с замужеством дочерей нельзя было долго тянуть. Отец Чандры знал о симпатии между его сыном и Лалитой, так что возвращение сына в Мадрас позволяло убить одним выстрелом двух зайцев.

Отец говорил: «Ты скоро станешь астрофизическим животным, но кроме науки существуют и другие стороны жизни». Чандре действительно был влюблён в бывшую однокурсницу, но в свое время решил полностью посвятить себя науке. Они с Лалитой переписывались все то время, что он находился в Европе, но сколько воды утекло! Кроме того, свадьба помешает его исследованиям, а они для Чандры имели абсолютный приоритет. Молодой человек решил пока не вступать в брак. А его се-

стры пусть выходят замуж, когда захотят, — его семья не должна проявлять уж слишком большую приверженность этой странной индийской традиции, которая может стать препятствием для того, чтобы быть счастливым.

ЛАЛИТА

Лалита долго ждала Чандру, хотя они друг другу ничего не обещали и ни о чем не договаривались. Между ними со временем отрочества словно была протянута нить, невидимая, но тугая. Теперь же Чандра говорил, что вообще не хочет жениться. Лалита чувствовала, что эта невидимая нить превращается в удавку на ее шее. Но что она могла сделать? Она приняла решение Чандры молча. Не протестовала, потому что даже не знала, как это — протестовать. Чандра вспоминал: «Мы с Лалитой договорились прервать наш «уговор», поскольку такие внеинтеллектуальные понятия, как любовь и брак, могли ограничить нашу взаимную свободу, которой требовала моя учеба». Но как это — «взаимная свобода, которой требовала моя учеба»?

Лалита была соседкой Чандры. Ее отцом был капитан Дорансвами, и жили они в доме под названием Шри Вилас, рядом с Чандра Вилас. Капитан умер, когда Лалита была совсем маленькой, и она жила со своей матерью и четырьмя сестрами. Как и Чандра, Лалита изучала физику в Президентском колледже и, как и он, была очень успешной студенткой. Как же так вышло, что ее не выдали замуж в детстве и в свои 26 лет — немыслимое дело для Индии — она все еще оставалась свободной? Дело в том, что если семья Чандры игнорировала некоторые несправедливые индийские обычаи, то семья Лалиты была еще более либеральной. Если дядя Чандры был лауреатом Нобелевской премии, то тетя Лалиты, Сестра Суббалакшми, пользовалась гораздо большей популярностью, чем Раман.

Суббалакшми вышла замуж в 11 лет, но ее муж очень быстро умер, и она стала вдовой. Это самое худшее, что могло произойти с девочкой в традиционной Индии. Суббалакшми

не могла больше выйти замуж, она должна была одеваться скромно и бедно, не носить украшений и исчезнуть со всех празднеств, потому что считалось, что ее присутствие приносит несчастье. Ей предстояло быть служанкой для остальной семьи, носить попеременно только два сари в течение года и питаться два раза в день. Несмотря на то что Суббалакшми была умной девочкой и подавала надежды, учиться она тоже не могла.

Но ее семья смогла пойти наперекор этой несправедливой традиции, и, даже несмотря на оскорблении, которыми осыпали молодую вдову встречные, Суббалакшми продолжила образование и стала феминисткой, защитницей индийских вдов и вообще женщин. Сначала она собирала в своем доме вдов, которые нуждались в крове и защите, а затем оборудовала заброшенный особняк, потому что таких женщин с каждым днем становилось все больше. Благодаря этой пылкой защите Суббалакшми получила известность, а люди вокруг разделились на ее страстных противников и таких же страстных защитников. Сестру Суббалакшми знали все.

Ее невестка, мать Лалиты, также была вдовой, и они с детьми жили в *Ледяном доме* — служебной резиденции мужа. С ними вместе жили *аммамма* (бабушка) и *тата* (дедушка). Матери Лалиты удалось скопить деньги и купить собственный дом — Шри Вилас, который находился рядом с Чандрой Вилас. Лалита была умной и прилежной студенткой, а к тому же — настоящей красавицей. Она хотела поехать в Кембридж с Чандрай, но мать ее не отпустила. «Выходи замуж за Чандру, — сказала она, — тогда и поедешь в Кембридж». Но Чандре не хотел жениться! В то время Лалита работала учительницей физики, а потом занималась исследованиями в Индийском научном институте в Бангалоре, которым руководил Раман, дядя Чандры.

ЙЕРКС

Чандрасекару поступило несколько предложений о работе. Его отец сообщил, что Чандру ждут на посту директора Кодайка-

нальской обсерватории. Но молодого ученого не привлекала административная работа. Дядя Раман предложил ему должность приват-доцента в Бангалоре, но Чандра хотел большей свободы в исследованиях. В его родном городе Лахоре была должность преподавателя в Правительственном колледже, но на нее претендовал друг Чандры Чоула, который очень помог ему в первые годы в Кембридже, и он не хотел составлять конкуренцию товарищу. Кроме того, Чандра еще раньше дал обязательство вернуться в Мадрас, поскольку стипендию ему предоставили на этом условии. Однако при этом ему также пообещали по возвращении должность преподавателя теоретической физики, но такой должности не было, так что ученый оказался свободным от своего обязательства. В любом случае, он не испытывал безудержного желания вернуться на родину. Чандра помнил о соперничестве, которое существовало между самыми выдающимися учеными его страны, например между Саха с Раманом. Кроме того, интуиция подсказывала ему, что лучше не ввязываться в ситуацию, когда он будет чувствовать себя обязанным дяде.

Кроме предложений из Индии, у него было несколько приглашений из США. Великий Харлоу Шепли (1885–1972), прекрасный астроном и недруг Хаббла, предложил ему поехать в Гарвард, чтобы преподавать там космическую физику. Подобное же предложение сделал и Отто Струве (1897–1963), потомок великой семьи астрономов и директор Йеркской обсерватории. Чандра попросил совета у Милна и Эддингтона, и оба рекомендовали ему поехать в США, причем лучше в Йеркс, чем в Гарвард. Его отец, отчаявшись вернуть сына на родину, принял это решение и даже поддержал его. Работа в обеих обсерваториях предполагалась на короткий срок, но если всё пойдет хорошо, контракт можно было продлить.

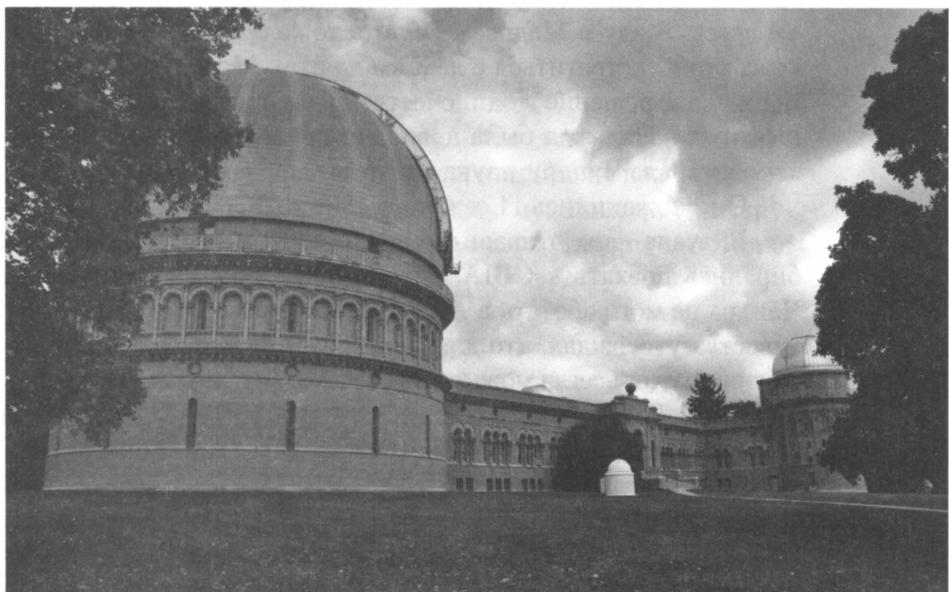
Чандра сначала поехал в Гарвард, а затем в Йеркс. Обе обсерватории показались ему очень привлекательными, а установка — теплой. Особенно понравился ему Йеркс, где Чандре предложили должность приват-доцента и предоставили всю необходимую свободу действий. Струве хотел сочетать возможности Йеркса в области наблюдений с теоретической астрофизи-



ВВЕРХУ СЛЕВА:
Виктор
Амбарцумян,
посоветовавший
Чандрасекару
более точно
рассчитать
пределную
массу белых
карликов.

ВВЕРХУ СПРАВА:
Чандра и его
жена Лалита,
которая
оставила
собственную
научную
карьеру, чтобы
посвятить себя
заботе о муже.

ВНИЗУ:
Йеркская
обсерватория,
где Чандра
начал работать
после прибытия
в США.



зикой, и это показалось Чандре прекрасной идеей, достойной того, чтобы посвятить ей все силы. Йеркская обсерватория предоставляла астрономам общежитие, оно принадлежало Чикагскому университету и располагалось в деревушке Уильямс-Бэй. На новом месте Чандре близко сошелся не только со Струве, но и с Джерардом Койпером, который также начал работать в обсерватории в то время и с которым они до этого встречались на различных научных собраниях, а также с Бенгтом Стрёмгреном (1908–1987), знакомым Чандрасекару еще с Копенгагена.

Астрономы США отказывались от теоретической астрофизики, поэтому решение Струве взять на работу в обсерваторию астрофизика многие критиковали, однако сам Струве считал, что подобный разрыв между дисциплинами должен быть преодолен. Он говорил: «В этой стране нет никого знакомого с традицией Эддингтона, Милна и других теоретиков подобного рода».

Однако вначале Чандре нужно было съездить в Индию. Он не видел свою семью уже шесть лет.

Ученый прибыл на корабле в Бомбей, встретился там со своим отцом и написал Лалите, которая была в Бангалоре: «Я здесь. Я еду в Мадрас». Лалита тоже сразу поехала в Мадрас, чтобы встретиться с давним другом. Может быть, он изменил свое решение в одиночестве пройти научный и жизненный путь? Надежда была довольно призрачной, ведь Лалита хорошо знала Чандру: наука для него была всем.

Они поженились 11 сентября 1936 года.

Вначале пара отправилась в Кембридж, а оттуда они собирались поехать в США. Но возникла проблема с визами: Чандра не мог работать в Америке — суровый сотрудник консульства утверждал, что для индийцев нет квоты. К счастью, в бюрократии всегда можно найти выход, пусть даже довольно странный. Единственным способом получить визу для Чандры было доказать, что он едет в США в качестве миссионера.

Лалиту ожидали другие трудности. Для оформления визы требовалось предоставить свидетельство о заключении брака, но поскольку они женились по индуистскому обряду, такого документа у них не было. И вновь нашлось решение. Словом,

хорошие бюрократы могут гордиться тем, что находят изобретательные пути в запутанном лабиринте правил.

Лалита намеревалась продолжить научную деятельность, да и Чандра побуждал ее к этому. Но вскоре она отказалась от карьеры физика и решила, что лучшим ее вкладом в науку станет забота о гениальном муже. Лалита заботилась о Чандре с таким самоотречением, что ее имя тоже заслуживает упоминания в истории астрофизики.

Детей у них не было, но было полное взаимопонимание в течение всей жизни — возможно, скорее благодаря ее мудрости, чем его вниманию. Лалита мало видела Чандру, а когда видела, он не замечал ее, потому что был погружен в себя. И лишь спустя очень много лет Лалита попросила Чандру уделять ей больше времени, и он изменил свой рабочий график так, что теперь основное место в нем занимала Лалита, а не черные дыры.

Боюсь, что когда человек отдает науке самый высокий приоритет, он неизбежно деформирует свою личную жизнь.

Это касается и моего брака: жизнь моей супруги была очень сложной.

Субраманьян Чандraseкар

Лалита очень хорошо исполняла индийские песни, сопровождая пение игрой на традиционном музыкальном инструменте под названием *вина*, услаждая слух Чандры и помогая ему немного отвлечься от забот.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

Идея состояла в том, что воздействие перепада давления способно уравняться с аутогравитацией белого карлика, окончательно остановив коллапс. Чтобы найти простое аналитическое выражение, оценим силу перепада давления, которое

вдоль радиуса звезды меняется от максимального в центре до нулевого на поверхности. То есть силу перепада давления, действующего на единицу объема звезды, можно определить (очень приблизительно) следующим образом:

$$\frac{P_0 - 0}{R} = \frac{P_0}{R}.$$

Приравняв эту силу к гравитации, действующей на единицу объема, получаем

$$P_0 = \rho_0 \frac{GM}{R}.$$

Кроме этого, мы располагаем уравнением состояния, рассмотренным в предыдущей главе:

$$P_0 = K \rho_0^{5/3},$$

и очевидным приблизительным отношением:

$$M = \rho_0 R^3.$$

С их помощью мы можем получить странные отношения, которые кажутся ошибочными, но это не так:

$$\begin{aligned} P_0 &\propto R^{-10}, \\ \rho_0 &\propto R^{-6} \end{aligned}$$

и (самое удивительное из всех)

$$M = \left(\frac{K}{G} \right)^3 R^{-3}.$$

В отличие от звезды главной последовательности, которая чем больше, тем тяжелее, белый карлик, наоборот, чем меньше, тем тяжелее! На рисунке 1 показана примерно такая же звезда, как наше Солнце, для которой соблюдается уравнение идеаль-

Уравнения состояния звезды, подобной нашему Солнцу.

РИС. 1

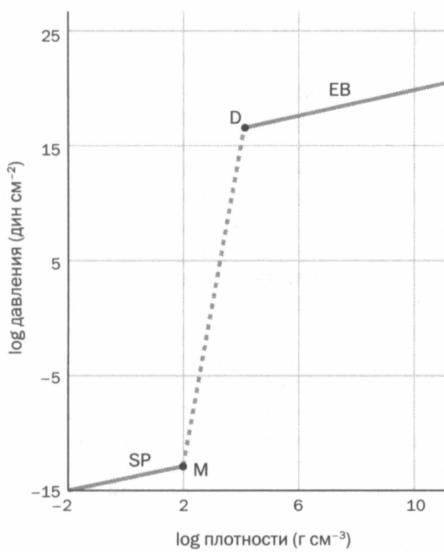
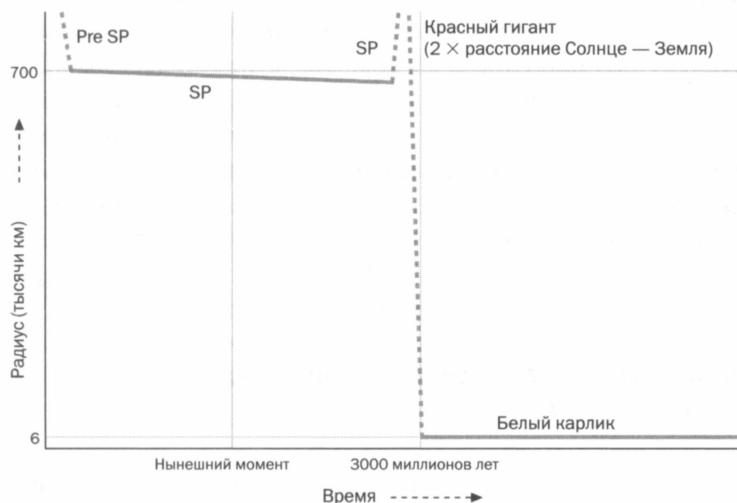


Схема эволюции радиуса Солнца.

РИС. 2



КОРОЛЕВСКИЕ ЛУЧНИКИ

Чандра обычно рассказывал своим студентам индийскую легенду. Говорилось в ней примерно следующее. Король хотел назначить королевского лучника, и у него были три кандидата — прекрасные стрелки. Чтобы выбрать одного из них, он подверг кандидатов испытанию. Король сказал им: «Видите ту птичку? Нужно выстрелить ей в глаз. Натягивайте лук, но прежде чем выстрелить, скажите мне, что вы видите». Первый ответил: «Я вижу ветви, листья, птичку, ее глаз». Второй сказал: «Я вижу легкий ветер, который приводит в движение ветки и оперение птички». Третий ответил: «Я вижу только глаз птички». Именно он был назначен королевским лучником. Этим рассказом Чандра призывал сосредотачиваться на единственной проблеме. Такой была и его научная жизнь. Он рассматривал многие, самые разнообразные проблемы, но никогда не занимался двумя темами одновременно. Примерно каждые десять лет он менял тему исследований, приступая к ней с абсолютной концентрацией. Именно по этой причине, хотя у Чандрасекара было много аспирантов (51, чтобы быть точными) и некоторые из них позже имели большой авторитет, ученый не создал своей школы.

ных газов в фазе главной последовательности (SP). Ее смерть наступает в точке М. С этого момента со звездой происходят изменения, описываемые сложным уравнением состояния (показано пунктирной линией), пока она не становится вырожденной звездой (D) в фазе белого карлика (EB). Рисунок 2, в свою очередь, описывает изменение радиуса Солнца начиная с фазы, предшествующей главной последовательности (SP), проходя через фазу главной последовательности и краткую фазу красного гиганта, пока Солнце не превратится в белый карлик.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОГО БЕЛОГО КАРЛИКА

Хотя все эти вопросы освещены в первой книге, написанной Чандрасекаром, и хотя он применил к ним более общий и элегантный подход, они не были результатом его собственного ис-

следования. Зато начиная с этого момента все было придумано уже юношем, не достигшим и 20 лет во время путешествия из Индии в Англию. Его открытие разожгло спор в чопорных коридорах Кембриджа и принесло Чандре Нобелевскую премию, как бы поздно это ни произошло.

Юноша подумал, что выше некоторой массы — так называемого предела Чандрасекара — электроны должны занимать более высокие уровни энергии, поэтому у них появляются релятивистские скорости. Если бы мы добавляли обычному белому карлику электроны — в реальном мире, при захвате материи от соседней звезды, или в воображении — задействованные электроны обнаружили бы все более низкие энергетические уровни занятыми и вынуждены были занять более высокие, что вызвало бы релятивистские скорости. При добавлении массы почти все электроны имели бы скорости, близкие к скорости света.

Но поскольку скорость конечна, конечно и количество электронов, которые мы можем добавить, то есть материя, которую мы можем добавить. Масса белого карлика не может расти до бесконечности. Существует предельная масса, которая совершенно справедливо называется пределом Чандрасекара. На самом деле процесс добавления материи необязательно должен быть реальным. Звезда, которая родилась с массой, превышающей этот предел, просто не может пройти фазу белого карлика.

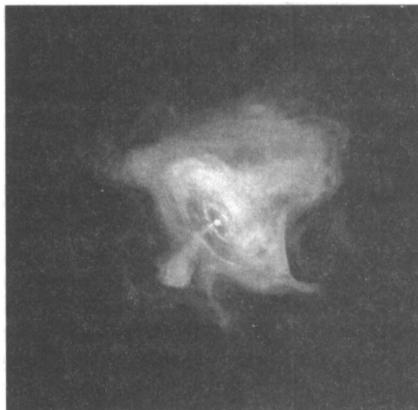
Теперь, уже будучи знакомыми с предыдущей главой, мы легко можем найти уравнение состояния релятивистского белого карлика. Как и раньше, у нас будет импульс квантового происхождения $p = hn_e^{1/3}$, мы вычисляем давление по $P = - (1/3) n_e p v$ и знаем формулу $\rho = 2m_H n_e$. Единственное изменение: скорость электронов теперь практически равна скорости света, то есть постоянна. Сразу же получаем

$$P = \frac{1}{3} \hbar c n_e^{4/3}.$$

Результатом будет показатель $4/3$ вместо успокаивающего показателя $5/3$, характерного для нерелятивистских белых

КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ЧАНДРА

В 1999 году НАСА вывела на орбиту телескоп с рентгеновскими лучами, который назвали «Чандра» — в честь знаменитого индийского астронома. Это телескоп с рентгеновскими лучами большого пространственного разрешения, примерно в 50 раз лучше, чем у его предшественника. Это означает, что размер пикселя в 50 раз меньше или что полученные детали изображений в 50 раз четче. Рентгеновские лучи — это электромагнитное излучение с чрезвычайно маленькой длиной волны, от 10 до 0,01 нанометра. Согласно рассмотренной формуле смещения Вина черного тела это соответствует температуре 10^7 – 10^9 К. Такие высокие температуры встречаются у некоторых астрофизических объектов, таких как межгалактический газ в скоплении галактик, материал, который вращается в увеличивающемся диске при попадании в черную дыру, остатки сверхновых и области солнечной короны. Электромагнитное излучение может пересечь нашу атмосферу только через диапазоны, соответствующие видимому свету, радиоволнам и некоторым областям инфракрасного излучения. Следовательно, земная атмосфера абсолютно непрозрачна для рентгеновских лучей. Они останавливаются в верхних слоях атмосферы, где затем теряются из-за реакций фотодиссоциации. По этой причине рентгеновские лучи можно наблюдать только с помощью космических устройств. Телескоп «Чандра» вращается на расстоянии примерно 140 тысяч км.



Знаменитая Крабовидная туманность на рентгеновском изображении, полученном космической обсерваторией «Чандра».

карликов, которые, по выражению Эддингтона, могут «спокойно умереть». Таким образом, для релятивистского белого карлика уравнение состояния имеет вид

$$P \propto \rho^{4/3}$$

с коэффициентом пропорциональности, который может быть выражен как

$$K_R = \frac{hc}{3(2m_H)^{4/3}}.$$

Не нужно придавать большого значения числовым константам, близким к единице, поскольку нас интересуют порядки величины. Более точное значение константы следующее:

$$K_R = 4,68 \cdot 10^{14} \text{ г}^{-1/4} \text{ см}^3 \text{ с}^{-2}.$$

Подчеркнем, что константа зависит от таких универсальных постоянных, как h , c и масса протона.

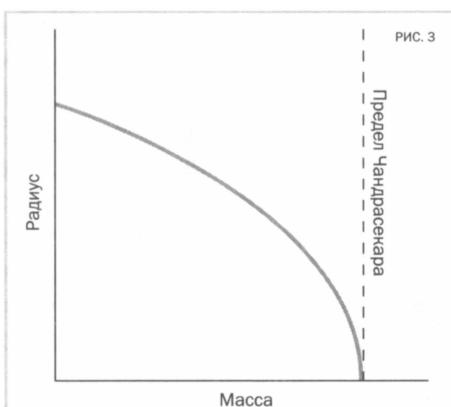
Главный момент, который я хотел выделить, — это значение сочетания природных констант, которое появляется в пределе белых карликов.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЛЯТИВИСТСКИХ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

Выражения, которые нам нужно вывести далее, очень просто получить, поскольку процедура та же, что и для нерелятивистских белых карликов, с тем исключением, что сейчас используется другое уравнение состояния. Мы обращаем особое внимание на отношение массы звезды к ее радиусу. Вспомним, что для звезды главной последовательности $R \propto M$. Для нормального белого карлика — $R \propto M^{1/3}$. Теперь вновь произведем расчеты, а сделав это, столкнемся с ошеломляющим результатом! Радиус не зависит

В белом карлике чем больше масса, тем меньше радиус, но в какой-то момент, благодаря релятивистским поправкам, масса больше не может расти.



от массы (см. рисунок 3). Радиус релятивистского белого карлика может быть любым (правда, если он будет слишком большим, белый карлик перестанет существовать).

Масса не зависит ни от радиуса, ни от чего-либо другого и имеет постоянное значение:

$$M_{\text{Чандра}} = (K_R / G)^{3/2}.$$

После этих операций мы получаем великое открытие:

$$M_{\text{Чандра}} = 1,4 M_{\text{Солнце}}.$$

На рисунке 4 сравниваются кривые масса-радиус для нерелятивистского и релятивистского белых карликов. При небольших массах обе кривые совпадают. Для масс порядка массы Солнца Чандрасекар доказал, что верхняя кривая невозможна, и установил свой знаменитый предел.

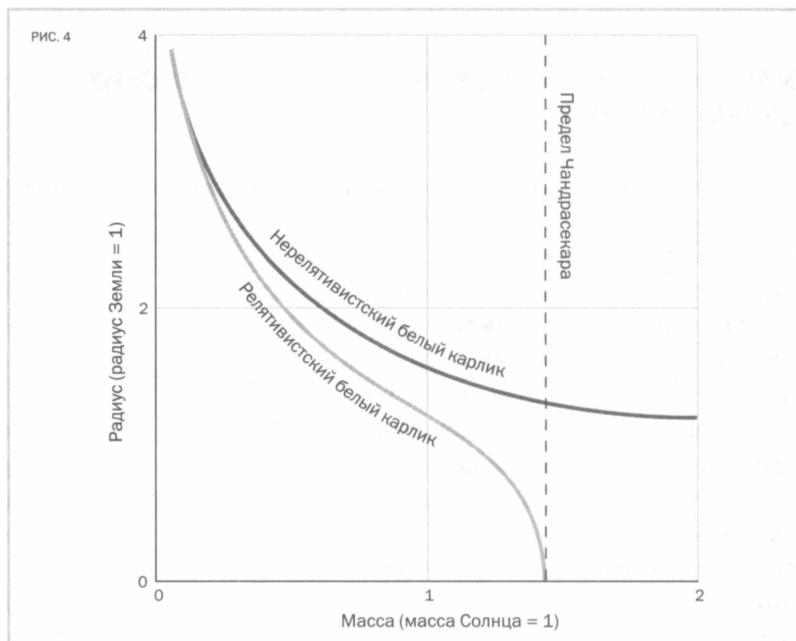


РИС. 5

| | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AB | | | A | A | A | | B | B | B | | |
| | AB | | B | | A | A | A | | B | B | |
| | | AB | | B | B | A | A | A | A | B | |
| | | | AB | | B | B | B | | A | A | A |

Распределение Максвелла — Больцмана. Обе частицы различимы.

| | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|--|
| 00 | | | | 0 | 0 | 0 | | | | |
| | 00 | | | 0 | | | 0 | 0 | | |
| | | 00 | | | 0 | | 0 | | 0 | |
| | | | 00 | | | 0 | | 0 | 0 | |

Распределение Бозе — Эйнштейна. Частицы неразличимы.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|--|
| 0 | 0 | 0 | | | | |
| 0 | | | 0 | 0 | | |
| | 0 | | 0 | | 0 | |
| | | 0 | 0 | 0 | | |

Распределение Ферми — Дирака. Обе частицы неразличимы и подчиняются принципу запрета Паули.

Предельная масса Чандрасекара зависит только от универсальных постоянных. Выводя ее здесь, мы в основном прошли по тому же пути, что и Чандря на пароходе, который вез его в Кембридж, хотя он использовал не совсем такие же приближения. Расчет Чандры был немного более утонченным, но похожим на наш. Как уже было сказано в предыдущей главе, позже Чандря по совету Амбарцумяна сделал более точный расчет, хотя для этого ему понадобился калькулятор — прибор, возможности которого в то время не шли ни в какое сравнение с современными устройствами. Однако новый расчет подтвердил

ВЕРНЕР ГЕЙЗЕНБЕРГ (1901–1976)

Гейзенберг изучал математику в Бюрге, своем родном городе, а после этого объехал различные университеты: в Гёттингене он был помощником Борна, в Копенгагене познакомился с Бором, затем работал в Лейпциге, Берлине, Сент-Андрюсе и, наконец, окончательно обосновался в Мюнхенском университете. Его докторской диссертацией руководил Зоммерфельд. Гейзенберг ездил в Индию и встречался с Чандрасекаром, поэтому в той же степени, что и Зоммерфельд, повлиял на выбор научного призвания этого великого индийского теоретика. Работа Чандры над пределом массы белых карликов была примером применения принципа неопределенности Гейзенберга. В этом знаменитом принципе говорится, что невозможно одновременно с неограниченной точностью измерить и положение, и импульс частицы, поскольку произведение их неопределенностей имеет порядок постоянной Планка. Гейзенберг получил Нобелевскую премию в 1932 году, когда ему было всего 30 лет. Его жизнь достойна льча в основу захватывающего фильма, поскольку, несмотря на все его объяснения теорий, которые нацисты считали примерами «еврейской науки» (такие как теория относительности и квантовая теория), Гейзенберг руководил ядерными исследованиями и под эгидой германского правительства работал над созданием атомной бомбы. При этом сам Гейзенберг не хотел, чтобы такая бомба была создана. Когда война закончилась, выяснилось, что немцы продвигались в разработке и изготовлении бомбы гораздо медленнее американцев, и это можно было объяснить намеренным саботажем Гейзенberга, который предложил Бору заключить соглашение между учеными всего мира, в частности между американцами и немцами, чтобы помешать изготовлению бомбы. Когда закончилась война, Гейзенберг был задержан британской оккупационной администрацией и некоторое время провел под наблюдением в Англии. Вся эта история окутана густым туманом, и мы не имеем оснований клеймить Гейзенберга как сторонника нацистов. Принцип неопределенности получил большой отклик не только в физике, но и в философии; сам Гейзенберг написал книгу под названием «Физика и философия».



приближенные результаты. Чандра и так это знал, ему не нужен был еще один расчет, но он сделал его, чтобы выглядеть более убедительным в глазах Эддингтона.

На рисунке 5 показано, как располагаются частицы в квантовых ячейках. Статистика Ферми – Дирака, последняя на рисунке, соответствует электронам белого карлика. С помощью этого графика легко понять, почему белые карлки не могут иметь массу, превышающую некоторый предел. В первых двух статистиках мы можем поместить в одну ячейку бесконечное число частиц. Но с фермionами все происходит не так. Согласно принципу запрета Паули, если у нас больше частиц, чем ячеек, нам некуда их поместить.

НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА

Открытие Чандры привело к новому острому вопросу. Звезда массой в 1,4 раза больше массы Солнца не может умереть, как белый карлик. Но звезд, которые гораздо тяжелее Солнца, довольно много. Как они умирают? Ответ на этот вопрос требовал введения в астрофизику новых понятий, от чего Чандра не мог уклониться. Вспомним его предположения, уже рассмотренные в предыдущей главе, которые оказались чрезвычайно плодотворными в теории звездной эволюции.

Одна из идей, к которым он часто возвращался, состояла в изучении гидродинамических нестабильностей в различных системах, в частности в звездах. Согласно данной теории, одна из этих нестабильностей в звездах массой, немного большей его предела, может быть причиной выброса материи. Таким образом звезда освобождается от лишней массы, а в центре выброшенной массы появляется звезда, лишенная своей оболочки. Казалось, природа сама нашла решение вопроса. Выброшенная материя образовывает планетарные туманности, а центральные звезды, если можно так сказать, бесстыдно показывающие область под внешней оболочкой, называются звездами Вольфа – Райе. Более поздние исследования немного расширили

САМЫЕ БОЛЬШИЕ И САМЫЕ МАЛЕНЬКИЕ ЗВЕЗДЫ

Хотя это и не связано напрямую с исследованиями Чандры, рассмотрим, какова масса самой большой звезды и самой маленькой. Хотя мы привыкли к экстремальным величинам в астрофизике, масса звезд не имеет статистического распределения, которое характеризовалось бы слишком большим диапазоном порядков величин. Существует очень мало звезд массой, превышающей 30 солнечных масс, и они очень нестабильны. Также очень мало звезд с массой ниже 1/10 солнечной массы. На рисунке можно увидеть схему Чандрасекара, касающуюся звездной эволюции, которая в целом соотносится с современной. Наше Солнце также пройдет через фазу создания планетарной туманности и умрет как белый карлик, не дойдя до релятивистского состояния.



этот простой сценарий, но его идея была предложена именно Чандрой.

Могло быть и так, что напряжения нестабильностей недостаточно для того, чтобы освободить звезду от избыточной массы. Но разве звезда может иметь массу, невозможную для нее, не теряя при этом своей природы вырожденной звезды из электронного газа? В звезде могла протекать реакция, состоящая в соединении одного протона с одним электроном и образовании нейтрона (и нейтрино). Электроны исчезали, и не было никакого давления ферми-газа, характерного для них.

Но нейтроны также являются фермионами, и, соответственно, их скопления имеют предельную массу. Этот предел называется пределом Ландау – Оппенгеймера – Волкова,

в честь астрономов, которые разработали конкретную модель на основе предположения Чандры. К тому времени открыли пульсары, которые и являются нейтронными звездами.

Если учитывать их единственное отличие от белых карликов, то оно состоит в том, что сейчас в расчеты необходимо ввести давление ферми-газа, заменив массу электрона массой нейтрона, которая в 1800 раз больше. Нам нужно записать:

$$P = \frac{\hbar^2}{m_N} n_N^{5/3}.$$

Давление пропорционально числу нейтронов на единицу объема, возведенному в степень 5/3. Плотность звезды также меняется. Теперь она равна

$$\rho = m_N n_N$$

При повторении расчетов оказывается, что плотность нейтронной звезды примерно в 1800 раз больше плотности белого карлика, а ее радиус примерно равен 10 км. Плотность впечатляет, она соответствует массе, превышающей массу Солнца, но не выходящей при этом за границы среднего города, а именно $\rho = 2 \cdot 10^{14}$ г см⁻³. Это примерно тот же порядок, как если бы все нейтроны звезды соприкасались. Формулы для такой системы, в которой искривление пространства-времени довольно экстремальное, намного сложнее. В итоге получается, что предел Ландау – Оппенгеймера – Волкова равен примерно двум солнечным массам. Скорость убегания равна 0,93 скорости света. Намного раньше Джон фон Нейман (1903–1957) и Чандра уже получили такие же результаты на основании работы Оппенгеймера и Волкова, но не опубликовали их.

Если звезда имеет массу, превышающую этот предел, она не может умереть как нейтронная звезда. В этом случае выброс излишней материи представляет собой взрыв сверхновой, в центре остатков которой находится нейтронная звезда.

Наивысший предел связан со случаем, когда светимость так высока, что нельзя пренебречь давлением излучения, которое толкает частицы звезды. Когда сила, вызванная дав-

лением излучения, уравнивается с силой гравитации, мы получаем так называемый предел Эддингтона. На другом конце находятся самые маленькие звезды, так называемые коричневые карлики, которые обладают такой небольшой массой, что давление вырожденного электронного ферми-газа останавливает коллапс еще до того, как звезда достигает температуры, необходимой для реакций синтеза. Светимость коричневых карликов очень мала, поэтому их было довольно сложно обнаружить. Окончательное открытие совершили Мария Рока Сапатеро (р. 1969), Рафаэль Реболо (р. 1961) и их сотрудники.

ГЛАВА 4

Что такое галактика

Чандрасекар вошел в штат Йеркской обсерватории, хотя ни разу в жизни не работал с телескопом. Крайне редко пользовался он и компьютером. Единственным научным инструментом Чандры была перьевая ручка, и с ее помощью он сформулировал необычную идею — рассматривать галактики как звездный газ. Прямые столкновения между звездами этого газа настолько редкие, что его гидродинамические свойства очень привлекали с математической точки зрения.

Довольно долгое время в Йеркской обсерватории имелся самый большой в мире телескоп. Ее помещения, в число которых входил и дом Чандры, находились рядом с живописным озером Женева в Уильямс-Бэй, в штате Висконсин. Там Чандря и Лалита жили в течение 27 лет. И все эти годы в голове Чандры бурлили идеи и гипотезы.

Отто Струве был директором обсерватории, а Роберт Хатчинс (1899–1977) — президентом Чикагского университета. Они оба намеревались подкрепить астрономические наблюдения теоретической интерпретацией — как ни странно, этого до сих пор в США не делали. Как уже было сказано, астрономия и физика взаимно игнорировали друг друга. Струве хотел привлечь молодых и выдающихся астрономов и физиков и поэтому рассчитывал на участие блестящих астрономов-наблюдателей Стрёмгrena и Койпера, а также теоретика Чандрасекара, который, как уже было сказано, был знаком с ними обоими. Хотя цель была довольно интересной, с самого начала возникли некоторые сложности.

Чтобы упрочить положение Чандры, при его приеме на работу потребовалось личное участие Хатчинаса, хотя до сих пор подобные вакансии в этом не нуждались. Объяснение появилось в газете «*Нью-Йорк Таймс*» намного позже, в 1968 году: Хатчинс признался, что Дин Гейл, который в то время возглавлял отде-

ление физики в университете, резко противился тому, чтобы «черный индус» вошел в штат и читал лекции на его отделении. Но Хатчинс был непреклонен и принял Чандру на работу.

Возможно, из-за этого инцидента Струве относился к Чандре немного не так, как к остальным. Возможно, это было вызвано и тем, что исследования Чандры не были сугубо астрономическими. Стрёмгрен, Морган и Койпер были наняты как штатные преподаватели, в то время как Чандра был всего лишь научным сотрудником. В следующем году зарплата других исследователей выросла, и они заключили постоянные контракты, а Чандрасекар остался в прежнем статусе, в том же временном положении и с той же зарплатой. Существовали и другие явно дискриминационные детали, на которые Чандра, однако, не обращал внимания. Эти вопросы очень мало беспокоили его. Только в 1942 году он достиг наивысшей категории штатного профессора.

Струве, последний представитель великой династии астрономов, не был счастливым человеком. Он получил несколько золотых медалей за свои исследования, но после его смерти их расплавила его собственная жена! Его книги и статьи также были уничтожены. С Чандрай у Струве были хорошие отношения, но это, скорее всего, объяснялось покладистым характером Чандры и его однозначным желанием не претендовать на руководящие должности. Среди других коллег, с которыми у Чандрасекара были наилучшие отношения, выделялся Койпер, у которого, в свою очередь, всегда были трения со Струве. Тот надеялся сделать Койпера административным помощником, который должен был в числе прочего перепечатывать его переписку. Но Койпер был великим астрономом, который во второй раз открыл атмосферу Титана (в первый раз это сделал Хосе Комас Сола (1868–1937)), а также обнаружил монооксид углерода в атмосфере Марса и пояс транснептуновых астероидов-комет, носящий сегодня его имя. Чандра говорил: «Как ученый может согласиться на то, чтобы просто сидеть и печатать письма для Струве?»

В США Чандре и Лалите часто приходилось страдать от проявлений расизма. Астрофизик Мартин Шварцшильд

(1912–1997) рассказывал, что он вынужден был преодолеть некоторое изначальное отвращение — результат неправильного воспитания, не позволявшего ему общаться с человеком с темной кожей. Но через некоторое время, после разговора с уважительным, мудрым и образованным Чандрай, в нем победила мудрость, и с тех пор, с того самого вечера и навсегда, он был одним из самых близких друзей Чандрасекара.

Донна Элберт, секретарша ученого и ответственная за расчеты в Йерксе, рассказывала, что жизнь Чандры была очень упорядоченной. Он вставал в пять утра и работал дома. Появлялся на работе в восемь, обедал дома, возвращался в обсерваторию в час и работал до шести, потом уходил ужинать и снова возвращался к работе, которая продолжалась до десяти часов вечера. Элберт приходилось работать так же интенсивно, как и ему, но у Чандры хватало такта подчеркнуть, что она трудится вместе с ним, а не для него.

Донна Элберт делала расчеты на компьютере. Хотя Чандрасекар иногда применял компьютер для сложных вычислений и признавал, что компьютер может быть очень полезным в руках хорошего исследователя, сам он не пользовался им регулярно. «Я не принадлежу этой цивилизации», — говорил он. Компьютеры в то время были огромными монстрами, работавшими на лампах.

ВТОРАЯ МИРОВАЯ ВОЙНА

Как почти все американцы, Чандре поддерживал Британию и боялся подъема нацистской Германии. Когда США присоединились к войне, он хотел помочь альянсу, как и другие американские ученые, такие как Хайл, Бонди и Голд (известные своей космологической теорией стационарного состояния), Шварцшильд, Оппенгеймер, Бете, Теллер и многие другие. Его друг Джон фон Нейман предложил Чандре стать научным волонтером на Абердинском испытательном полигоне (APG) — военном центре с собственной баллистической лабораторией, где уже

ПРОТИВОПОЛОЖНОСТИ СХОДЯТСЯ

Родившийся в еврейской семье в Будапеште, когда этот город еще был частью Австро-Венгерской империи, под именем Нейман Янош, Джон фон Нейман (1903–1957) с детства проявлял одаренность. Он выделялся в ряде математических дисциплин, работал в области квантовой физики, компьютерного вычисления и экономики. Фон Нейман учился в Будапештском и Берлинском университетах (где посещал занятия Эйнштейна) и работал в Высшей технической школе в Цюрихе и в Берлинском университете. В Гётtingене он участвовал в семинаре Гильберта и подружился с Оппенгеймером. Он эмигрировал в США одновременно с Эйнштейном из-за преследований со стороны нацистов и приступил к работе в Институте перспективных исследований в Принстоне. Фон Нейман был одним из лучших друзей Чандрасекара, познакомились они в Кембридже в 1935 году. Эта была очень любопытная дружба — учитывая их разницу в характерах. Джон любил праздники и пикантные шутки; он был открытым, быстрым, с хорошим чувством юмора, и это очень контрастировало с безупречной уравновешенностью Чандры. Последний написал длинную статью, почти книгу, о стоастических процессах в астрофизике, которую не хотел публиковать, потому что создал ее для себя. Фон Нейман настаивал на публикации и в итоге сам отправил ее в издательство, несмотря на возражения друга. Сегодня эта статья остается самой цитируемой работой Чандрасекара! Фон Нейман очень активно участвовал в Манхэттенском проекте и был одним из главных членов Комиссии по атомной энергии США, в которую также входили Оппенгеймер, Теллер и Вигнер и в которую не захотел вступать Чандра. Фон Нейман не был противником ядерного вооружения, и его метод сжатия был применен в бомбах, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки. Его деятельность в области гонки вооружений во времена холодной войны также контрастировала с пацифизмом Чандры. Фон Нейман умер от рака — болезни, с которой не смог смириться. Всю свою жизнь он был агностиком, но крестился и принял католичество в последние дни — возможно, из-за страха смерти, хотя его как могла поддерживала его вторая жена, Клара, также хорошая подруга Чандры. Клара погибла в результате несчастного случая — она утонула в море.



работали Эдвин Хаббл, Роберт Сакс и многие другие физики и математики, а руководил ими Роберт Кент. Для того чтобы присоединиться к работе APG, нужно было иметь американское гражданство, но Чандру взяли благодаря его британскому подданству. Там он и работал до окончания войны, чередуя три недели в Йерксе с тремя неделями в Абердине.

Работы, которые ему поручали на полигоне, были связаны с баллистическими испытаниями, ударными волнами и их отражением, дроблением бомб и способами добиться наибольшей площади рассеяния фрагментов, эффектом Маха, диффузией нейтронов и так далее. В Йерксе в это время Чандра начал исследования по гидродинамике и магнитной гидродинамике и читал лекции по недавно открытому ядерному делению. Также Чандрасекар продолжал исследования по переносу лучистой энергии.

**Я очень хорошо осознаю пользу науки для общества
и те блага, которые общество получает от нее.**

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

Его друг фон Нейман пытался убедить Чандру присоединиться к Манхэттенскому проекту, как это сделали Бете, Оппенгеймер, Теллер и другие. Вначале ученый согласился, но затем решил, что он должен закончить свое исследование в Йерксе. К тому же он не являлся американцем, а это было еще одно препятствие для участия в подобном проекте. Чандра знал по разговорам с коллегами в Чикаго, такими как Ферми и Теллер, что они работают над созданием атомной бомбы, но он предпочел мирную обстановку Йеркса ядерным испытаниям Лос-Аламоса. Чандра, как и Хаббл, никогда не участвовал в разработке смертоносного оружия.

В Абердине он также страдал от проявлений расизма, особенно в ресторанах и даже со стороны коллег. В мужском туалете имелась кабинка для людей с темным цветом кожи, а также два туалета для женщин: один — для белых и другой — для темнокожих. Это было написано на вывеске у входа, в федеральном учреждении! Чандра никогда не возил Лалиту в Абердин.

ЧАНДРА-ПРЕПОДАВАТЕЛЬ

Слава о занятиях Чандры в Йеркской обсерватории и Чикагском университете быстро распространилась за пределы этих учреждений и дошла до наших дней. Чандрасекар был настолько выдающимся преподавателем, что это даже вызывало проблемы. Его занятия были совершенными, фразы — безупречно точными, английский язык — изысканным, глубина мысли — неимоверной. Он заполнял три доски последовательностью формул, записанных с кристальной точностью. Ритм его речи был очень четким, а сама лекция — идеально выстроенной. Он был отличным автором выступлений и выдающимся актером в пьесе, написанной им для себя самого — таким было единодушное впечатление от лекций Чандрасекара.

Но столь совершенная дидактика оказалась неприемлемой для этого несовершенного мира. Во-первых, за занятиями Чандры было очень сложно следить из-за высокого уровня математики и низкой громкости его голоса. Его беглая речь без пауз звучала несколько монотонно. Когда Чандрасекар произносил речь на церемонии вручения Нобелевской премии, неудивительно, что аудитория выказывала все меньший и меньший интерес из-за недоступного уровня изложения, хотя математика в этом выступлении была гораздо более низкого уровня, чем на его занятиях. Кстати, иногда на них присутствовали всего два студента: сложно представить себе, что три доски, полные длинных непрерывных формул, могли быть понятны всем учащимся. Его голос — отражение спокойствия и уравновешенности Чандры — убаюкивал слушателей. Но те, кто обладал достаточным уровнем подготовки и стремился к знаниям, видели в занятиях Чандрасекара пример строгости, элегантности и оригинальности.

Можем оценить это как педагогический недостаток или как достоинство, но Чандра не делал разницы между исследованием и преподаванием. Он объяснял последние свои открытия, а эти открытия неизбежно оказывались чем-то очень новым, и нельзя было заранее знать, о чём ученый будет говорить на своих занятиях. Все понимали, что это должно быть что-то

ГЕНРИ НОРРИС РАССЕЛЛ (1877–1957)

Расселл и Чандрасекар общались нерегулярно, но их отношения были прекрасными, несмотря на то что на паре конгрессов Расселл помешал Чандре защититься от атак Эддингтона. Индийский ученый рассказывал, что Расселл был очень активным и умел пробудить в молодежи тягу к астрономии, но также он был очень авторитарным и говорил без остановки. Как-то раз Чандр спросил его, почему при таком авторитете он состоит в небольшом числе комитетов. Расселл ответил: «Это очень просто. Если ты хочешь, чтобы тебя не включали в комитеты, нужно говорить без остановки. Сделай так, и тебя больше не включат ни в один из них». Чандр всегда с интересом слушал Расселла, хотя их исследования имели мало точек пересечения. Расселл работал над затменными двойными звездами и кривыми света, вычисляя отношения звездных масс. Это была очень интересная тема, и из нее получилась знаменитая диаграмма Г-Р, но задействованная физика была простой, и это мало привлекало Чандру. Он часто навещал Расселла в Принстоне и иногда оставался у него на ночь.



любопытное, но что именно — неизвестно. Уверенность, красноречие и убежденность Чандры стали предметом некоторых дошедших до нас анекдотов. Однажды, когда Чандр уже стоял рядом с третьей доской, один студент заявил: «Этот знак «плюс» стоит неверно». Чандр невозмутимо продолжил лекцию. «Профессор Чандрасекар, Вы не собираетесь ответить на вопрос?» — вдруг услышал он за своей спиной. Не отводя взгляда от третьей доски, Чандр ответил: «Это был не вопрос, а утверждение. И не просто утверждение, а ошибочное», — и продолжил свои доказательства. В другой раз он отказался отвечать на вопрос студента, сказав: «Я помню, что Вы уже задавали мне этот во-

прос ранее, и я Вам предложил прочитать определенную статью. Вы прочитали ее? По-видимому, нет». И продолжил выступление, более не отвлекаясь.

Как в Йеркской обсерватории, так и в самом Чикагском университете Чандря вел чрезвычайно обширную преподавательскую деятельность. Он читал примерно шесть предметов в год — курсы по астрофизике, фундаментальной астрофизике, спектрометрии и фотометрии; затрагивал такие материи, как звездная атмосфера и внутренняя область звезды, звездная динамика, строение галактики и межзвездное пространство. Вначале на его занятиях в качестве слушателя присутствовала и Лалита (не будем забывать, что она была специалистом по физике).

В 1944 году Чандра по просьбе Расселла, который уходил в отставку, едва не переехал в Принстон. На новом месте ему предлагали гораздо больший оклад, и ученый согласился. Но Хатчинс не хотел терять такого уважаемого сотрудника и поднял ставку до принстонского уровня. На все эти старания Чандра ответил: «Я уже сказал Расселлу, что согласен. Это честь — занять место такого выдающегося астронома». Хатчинс возразил: «Ты знаешь, кто занял место Кельвина? Нет, этого никто не помнит. Честь не в том, чтобы занять место великого ученого, а в том, чтобы быть великим ученым, когда кто-то другой придет тебе на смену». В итоге Хатчинс выиграл, и Чандра остался в Чикаго. Хатчинс с юмором сообщил Расселлу: «Ты даже не представляешь, каких сил мне стоило уговорить Чандру остаться». Позже в одном из интервью Хатчинс заметил, что согласие Чандрасекара остаться было одним из главных его достижений на должности президента Чикагского университета.

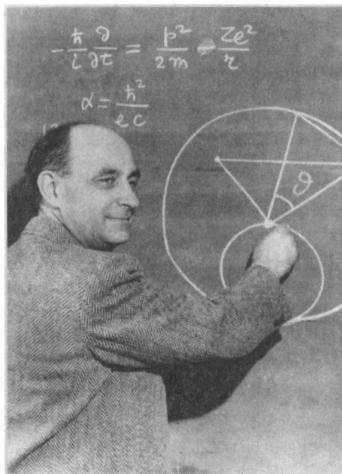
Увы, человеческая низость часто сопутствует великим людям, в том числе и в науке. Ученые в университетах и исследовательских центрах не чужды мелочности. Чандре пришлось столкнуться с неприятностью — такой же горькой, как и его конфликт с Эдингтоном.

Его друга Стрёмгрена назначили директором отделения астрономии. Однако этот ученый на посту наблюдателя был полезнее, чем на администраторской должности, и вскоре отделе-

ВЕЛИКИЙ ИТАЛЬЯНСКИЙ ФИЗИК

Исследования Энрико Ферми (1901–1954) охватывали очень разнообразные темы теоретической физики, такие как статистика Ферми — Дирака, бета-радиоактивность (согласно которой нейтрон распадается на протон, электрон и нейтрино), искусственная радиоактивность и нейтронная бомбардировка. Ферми вошел в состав команды, изготовившей первый ядерный реактор. Менее известны его работы по астрофизике, в большинстве своем обусловленные тесной дружбой с Чандрасекаром. Разве мог подумать 19-летний Чандря, написавший свою великую работу на основе статистики, разработанной Ферми, что тот в итоге станет одним из его лучших друзей? Ученые виделись и обедали вместе

по меньшей мере раз в неделю. Мало кто знает о том, что Ферми совершил великое астрофизическое открытие. Космические лучи были ограничены в галактике магнитным полем, о существовании которого не знали, и Ферми верно оценил порядок их величины в несколько микрогауссов. Вместе с Чандрасекаром он изучал космические плазмы в спиральных рукавах и межзвездные облака. Ферми получил Нобелевскую премию в 1938 году и эмигрировал в США. Сначала он работал в Колумбийском университете, а с 1942 года — в Чикагском. В конце жизни ученый заболел раком, однако сердечный приступ избавил его от последних страданий. Ферми был агностиком при жизни и умер агностиком, смело и с улыбкой глядя смерти в лицо. Он в шутку успокаивал Чандру: «Ничего особенного не может произойти с человеком в возрасте за 50, и его утрата не так велика, как можно подумать. А теперь скажи мне, Чандря: буду ли я в следующей жизни слоном?»



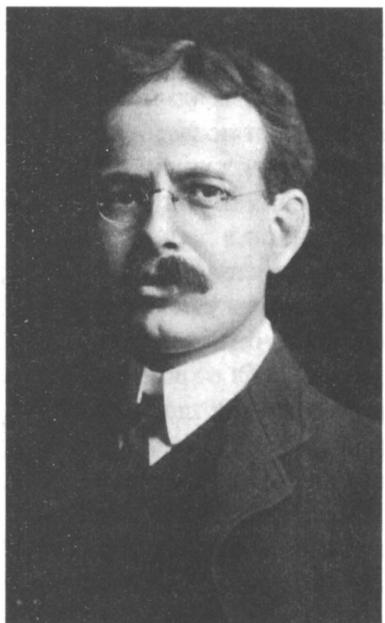
ние начало страдать от плохой организации. Для примера скажем, что в его каталогах хранились письма, на которые не отвечали по полгода. Чандря честно сказал Стрёмгрену, что ему лучше оставить эту должность, а управление мог бы взять на себя Койпер. Это была серьезная ошибка. Несмотря на все их хорошие отношения, Стрёмгрену ужасно не понравилась

критика. Он не замечал плохой организации и воспринял слова Чандры с обидой. Стрёмгрен решил отомстить коллеге, назначив комиссию для анализа преподавательской деятельности Чандры. Комиссия, составленная из недругов ученого, вынесла вердикт: «Чандрасекар работал много, но безуспешно». После этого Чандрасекар прекратил вести занятия по астрономии, хотя раньше отдавался этой работе всеми силами. Он чувствовал себя удрученным, а его вера в дружбу испарилась.

Но сломить Чандру было нелегко. Ферми, наиболее тесно сотрудничавший с Чандрасекаром, предложил ему должность в отделении физики исследовательского института, которым сам и руководил (и который сегодня носит его имя). В институте как раз нужен был заместитель на курс математической физики, и он предложил эту должность Чандре. Но тот после перенесенного унижения прибегнул к той же стратегии, что и в конфликте с Эддингтоном: просто перевернул неудачную страницу, стараясь, чтобы она никак не повлияла на состояние его духа. С тех пор преподавательская нагрузка (в данном случае — преподавательская разгрузка) Чандрасекара касалась фундаментальной физики, квантовой механики, электродинамики, математической физики и теории относительности. Он был астрономом, который не хотел быть астрономом.

С другой стороны, Чандрасекар как преподаватель отличился в организации семинаров. В течение своей жизни он организовал, возможно, около полутора тысяч подобных мероприятий. В Йерксе, по распоряжению Струве, проводился один семинар в неделю, иногда под руководством приглашенных ученых, иногда — других астрономов обсерватории, иногда — самого Струве.

Чандре считал исследования и преподавание пусть не неразрывными, но сходными видами деятельности, поэтому его работа получила новый импульс после того, как неизменный серый костюм ученого был украшен двумя престижными медалями, а с 1944 года он был назначен *фелло* Королевского общества. Это был редкий знак отличия, которым отмечали только действительно выдающихся ученых. С тех пор он мог расписываться как *Chandrasekhar FRS*.

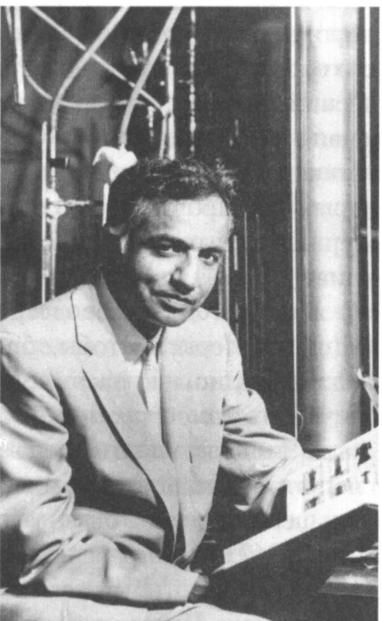


ВВЕРХУ СЛЕВА:
Джордж Эллери
Хейл, астроном,
родившийся
в Чикаго,
основатель
«Астрофизического
журнала» (ApJ).

ВВЕРХУ СПРАВА:
Ото Струве,
начальник Чандры
в Йеркской
обсерватории,
а также, в свое
время, директор
ApJ. Он сделал
Чандрасекара
помощником
редактора этого
журнала.

ВНИЗУ СЛЕВА:
Мартин
Шварцшильд,
имевший
большой вес
в Американском
астрономическом
обществе
и выступивший
в поддержку
Чандры, когда ApJ
сменил курс.

ВНИЗУ СПРАВА:
Субраманьян
Чандрасекар был
директором
«Астрофизического
журнала»
в течение почти
20 лет и за это
время превратил
его в издание
по астрофизике
мирового уровня.



«АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ»

Ученый избегал участия в комиссиях и любых административных функций, которые могли отвлечь его от исследований. Тем не менее он стал единственным редактором журнала по астрофизике, который чаще всего цитируют сегодня, причем именно благодаря заслугам Чандрасекара.

Молодой ученый может избегать руководящих должностей, но с течением времени, проведенного в одном учреждении, чувство ответственности врывается в работу чистого исследователя, даже полностью погруженного в науку. Обстоятельства сложились таким образом, что Чандря почти 20 лет руководил изданием «*Астрофизического журнала*». Оставив эту должность, он подумал, что не стоило брать на себя такую ответственность, но раз уж он сделал это, значит, должен был нести ее до конца.

ApJ создал Джордж Эллери Хейл (1868–1938), упорство которого проявлялось в том, что он доставал все большие и большие телескопы, существовавшие в США в то время. Тогда, и даже сегодня, обладатель самого большого телескопа лидировал в астрономии. Хейл основал журнал в 1895 году и был его первым главным редактором. Он хотел создать астрофизический журнал мирового уровня, предвидя рассвет, который ждал эту область знаний. С самого начала *ApJ* издавался в Чикагском университете, однако он не достиг того авторитета, который ему прочил его создатель. До прихода Чандры это был журнал, аудитория которого едва выходила за границы самого университета.

В 1932 году руководство перешло к Струве, начальнику Чандры в Йерксе. Чтобы облегчить себе работу, он принял эту должность, но всю нагрузку переложил на плечи Чандры, назначив его *помощником редактора*. Это произошло в 1944 году, когда Чандря только вошел в штат Йеркса. Он не мог отказаться от этой должности, но мало беспокоился: пусть работы стало больше, зато теперь он мог опубликовать все, что хотел.

В 1947 году Струве передал руководство Уильяму Моргану (1906–1994), который отличался слабым здоровьем и недостатком энергии. Чандрасекар остался на посту помощника редак-

тора. Он понимал: чтобы сделать журнал международным или, по крайней мере, общеамериканским, о чем мечтал его основатель, нужно кое-что изменить. Смена директора была подходящим способом достичь этой цели. Чандрасекар начал изменения, стараясь, чтобы его тихие действия оставались незаметными. Идея Чандры была несколько трудноосуществимой: он хотел, чтобы журнал спонсировало Американское астрономическое общество (AAS), но управление оставалось за Чикагским университетом. Однако AAS не хотело давать Чикагскому университету такую исключительную функцию.

Чандре пришлось воспользоваться своими связями — он обратился частным образом к своим друзьям Лайману Спитцеру (1914–1997) и Мартину Шварцшильду, которые имели в AAS большой вес. Переговоры оказались очень напряженными, и в итоге Морган поссорился с Чандрай. Увидев, что директор совсем не поддерживает его стремления повысить авторитет журнала и даже недоволен его скрытой настойчивостью, Чандра, возмущенный, пригрозил уйти. И ушел. Пусть Морган ищет другого помощника редактора. Но через несколько дней ушел и Морган, и *ApJ* остался без редактора. Президент Чикагского университета, чтобы выйти из этого хаоса, попросил Чандру взять руководство журналом на себя. И Чандра, даже предвидя, какая огромная задача стоит перед ним, не смог отказаться: в конце концов именно он встремил все американское астрофизическое сообщество, чтобы достичь своей цели.

Чем же располагал Чандрасекар, вступив в новую должность? В первые годы в его распоряжении были только секретарь на полставки и, конечно, университетская типография. Чандра вел бухгалтерский учет, просматривал гранки, следил за печатью, счетами, объявлениями — то есть абсолютно за всем. Но он и хотел делать все — именно так ученый подходил к проблемам. Особенно важен был отбор статей, и новый редактор брал на себя всю ответственность, решая, что должно быть напечатано, а что нет. Вскоре журнал стал самым важным в своей области. Судьба астрофизики в США никогда прежде не лежала в руках всего лишь одного человека.

С самого начала Чандрасекар принял решение о том, что все статьи, направленные на публикацию, должны быть проанализированы рецензентом — кем-то вроде судьи или арбитра, который должен высказаться о научной ценности текста. Он выбирал рецензента, а тот писал отчет, хотя окончательное решение зависело только от Чандры. Обязательное участие рецензента сегодня является обычной практикой в специализированных журналах, но тогда это было новшеством.

Чандра читал практически все статьи, поступавшие в *ApJ*, причем как в основной журнал, так и в его приложения, которые содержали наибольшее число таблиц и данных наблюдений. Но эта работа, непосильная для любого смертного и растущая вместе с авторитетом журнала, была ничем по сравнению с еще одной задачей, которую Чандрасекар взвалил на свои плечи: он создал еще один раздел журнала — *ApJ Letters* («Письма Астрофизического журнала»). Целью этого раздела было быстрое распространение работ особой новизны и значимости.

Для этого Чандра решил лично читать все письма в журнал! Чтобы добиться большей объективности, он решил изолироваться от астрономического сообщества, редко посещая собрания и избегая личных отношений. В результате у Чандрасекара появились многочисленные враги — особенно среди авторов отвергнутых статей. «Он теоретик, он не понимает в астрономии», — говорили одни. «Что сделал этот Чандрасекар?» — говорили другие. Авторитарный характер его руководства был так знаменит, что *ApJ* называли «Журналом Чандры».

Решение о том, что все статьи должны проходить через рецензента, было непреклонным и нерушимым. Но применял ли его Чандра к самому себе? Свои статьи ученый обычно направлял в Англию, при этом он заметил Ричарду Далитцу (1925–2006) — сотруднику института, который сегодня называется Институтом имени Ферми, — что не хочет выносить свои книги на суд критиков. Чандра писал для самого себя. Он считал каждую свою книгу (и это было правдой) художественным произведением, которое не допускает никаких изменений.

Кроме того что Чандрасекар позволял себе отвергать статьи или вносить в них изменения, он также заботился о стиле

работ, которые должны были быть написаны хорошим языком. Одному из своих студентов, который сделал хорошую работу, но написал ее на ужасном английском, он посоветовал прочитать какое-нибудь произведение Шекспира, а затем отредактировать свою статью.

Юджин Паркер (р. 1927), признанный сегодня автор, был никому неизвестным юношем, когда направил свою первую работу в *ApJ*. Чандра сказал ему: «Я послал вашу статью двум различным рецензентам, оба — большие специалисты по теме и оба дали отрицательный ответ». Вы действительно хотите, чтобы она была опубликована?» Паркер ответил: «Да. Ни один из них не уточняет, в чем именно ошибка». После минутного раздумья Чандра сказал: «Хорошо, я опубликую вашу работу». Он прочел статью, и ему, более крупному специалисту, чем рецензенты, она понравилась. Решение о публикации всегда принимал он, и только он. В статье Паркера предполагалось — ни больше ни меньше, — что при сверхзвуковых скоростях на большие расстояния неизбежно возникает расширение солнечной короны; это явление автор назвал солнечным ветром. Статья была действительно решающей. А сколько фундаментальных работ пострадало из-за непонимания рецензентов!

**Если ценить искусство сознательно, дисциплинированно,
это помогает лучше заниматься наукой.**

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

Обычно Чандра проявлял чрезвычайную корректность в переписке с авторами. Например, одному человеку, который после отказа в публикации работы, не выбирая выражений, жаловался редакторскому совету на единоличное руководство Чандры, он ответил: «Благодарю Вас за искренность при изложении жалоб редакторскому совету». Однако однажды даже Чандрасекар не сдержался. Один аспирант хотел опубликовать в журнале в качестве статьи всю свою диссертацию. Чандра ответил на это: «Сожги диссертацию и напиши статью». В любом случае все авторы, включая самых призванных, должны были пройти через рецензента.

Однажды Джон Уоддел, сын Джона Уоддела, послал статью в *ApJ*, получил отказ и, находясь из-за этого в состоянии депрессии, в отчаянии вышел на шоссе, попал под автомобиль и умер. Его отец обвинил Чандру в убийстве сына и потребовал, чтобы тот опубликовал его статью. Это был единственный раз, когда Чандрасекар смягчил свои требования. Статья была опубликована, но она уменьшилась с 60 страниц до 6, написанных редактором собственноручно. Позже Джон Уоддел попросил у Чандры прощения.

В защиту ученого нужно сказать, что хотя его отношения с коллегами постепенно ухудшались, все, кто работал с ним рядом в офисах или в типографии, искренне любили его. Как-то раз Мартен Шмидт (р. 1929) позвонил Чандре. Он написал в журнал письмо о своем важном открытии. Шмидт открыл такое высокое красное смещение квазара ($z = 0,2$), что это доказывало: квазары являются внегалактическими (эта тема как раз бурно обсуждалась). Чандра быстро признал большую ценность этой статьи. Она требовала немедленной публикации. Ученый убедил Шмидта как можно быстрее прислать работу, чтобы успеть оценить ее и отправить в печать в то же воскресенье, в ближайший номер. Чандра попросил сотрудников типографии и конторский персонал поработать в воскресенье, но один из них заявил, что они имеют право на воскресный отдых. Чандра погрустнел, замолчал и поник — так сильно он хотел как можно раньше опубликовать важную статью. Сотрудник ушел, но через некоторое время вернулся со словами: «Я поговорил с ребятами, они сказали, что готовы поработать для вас в воскресенье». На глазах Чандры от радости появились слезы. «Но есть одно условие, — продолжил работник. — Вы объясните нам, что такое квазар и почему статья так важна». Чандра так и поступил. В результате персонал типографии и работники редакции *ApJ* были первыми людьми в мире, кто узнал, что квазары — это внегалактические объекты.

Ученого не изнуряла даже самая трудная работа. Как это ни удивительно, но его исследования не страдали из-за руководства журналом. Он очень четко распределял свое время: утром — *ApJ*, вечером — исследования. Если кто-то звонил ему

СТАТЬЯ С. КЕНДЛСТИКМАКЕРА

В 1957 году появилась поддельная копия статьи из *ApJ*, которая претендовала на сатиру, хотя и хорошо продуманную и пропитанную здоровым юмором. Написана она была одним из студентов Чандры, который пародировал его личный стиль. Автором был некий С. Кендлстикмакер, что означало что-то вроде «изготовитель подсвечников». Инициал С. и сходство в фамилии давали понять, что автор предполагаемой статьи имитировал Чандру. Работа называлась *On the Imperturbability of Elevator Operators.* LVII («О невозмутимости лифтеров»; на английском языке сходство с названиями исследований Чандрасекара более очевидно). Приведем несколько фраз: «Очевидное решение получается в том случае, если заность [лифта] равна нулю. [...] В предыдущей статье (Кендлстикмакер 1954q; ссылка на эту статью помечена как XXX–VIII) было рассмотрено одновременное действие магнитного поля, электрического поля, поля Маршалла, ротации, вращения, трансляции и ретрансляции на постоянство лифтера. [...] Это обстоятельство было экспериментально доказано Шопуолкером и Сейлсперсоном (1955), что полностью расходится с теоретическими прогнозами (Нострадамус, 1555) [...] с использованием также отношения (Пифагор, 520) $3^2 + 4^2 = 5^2$ (5). [...] Однако на основе опыта по проблемам этого типа можно вывести единственное оптимальное решение. [...] Автор надеется затронуть эту проблему в ближайшую субботу вечером. [...] Результаты исследования, рассмотренного в этой статье, были частично изъяты Управлением военно-морских исследований в рамках договора AI-tum-OU812 с Институтом исследованных перспектив». Статья, хотя и теряет часть остроумия при переводе, безупречна.

по телефону вечером, чтобы поговорить о статье, он отвечал, что контора *ApJ* открыта только по утрам (хотя все знали, что контора *ApJ* – это он сам). Чандра придерживался этой линии очень строго, не делая исключений даже для самых близких друзей. Это были самые трудные годы в жизни ученого, когда он не терял ни секунды времени и никуда не выезжал из Чикаго.

Когда Чандрасекар оставил *ApJ*, ему устроили трогательное прощание. Одной из работниц издательства, Джин Сакс, поручили произнести несколько теплых слов. Она сказала: «Когда я составляю сборник статей к публикации, то часто читаю в них о пределе Чандрасекара. Но я не думаю, что у Чандрасекара есть какой-то предел».

Лалита поняла, что ее муж чрезмерно жертвует личной жизнью. Она сказала ему, что так больше продолжаться не может, и попросила уделять ей больше времени. Он должен снять с себя нагрузку и перестать жертвовать собой ради всех, в то время как другие жертвуют чем-то ради него: «Не мог бы ты подумать и о моих потребностях?» Чандра посмотрел на нее широко раскрытыми глазами, расплакался и внезапно, через 20 лет, понял, как права Лалита. Именно тогда, в 1967 году, он принял решение оставить *ApJ*. Однако понадобилось еще четыре года на то, чтобы найти заместителя, и только в 1971 году на этот пост был назначен Гельмут Артур Абт. Никто не хотел принять эту должность, потому что никто не был способен заменить Чандрасекара. Тогда он сам начал искать новый способ руководить журналом, передав ответственность AAS и сформировав большую издательскую группу, чтобы дюжина людей делала то, с чем справлялся он один.

С тех пор напряженность в его отношениях с коллегами спала, Чандра опять сблизился с друзьями, начал путешествовать, вновь открыл для себя искусство... и много разговаривал с Лалитой. Оказалось, что индийские песни, которые поет его супруга, по-прежнему наполняют его трепетом.

ЗВЕЗДНЫЙ ГАЗ

В такой галактике, как наша, примерно 300 000 миллионов звезд. Если бы галактика состояла только из этого звездного компонента, мы могли бы рассматривать ее как газ, в котором звезды заменяют молекулы. Звезды были бы молекулами нашего газа — звездного газа. Это действительно привлекательная идея. Она означает, что мы можем применить уравнения газа, то есть уравнения флюидов, чтобы узнать, как ведет себя галактика. В этом заключалась блестящая идея, которую должен был развить Чандра.

Уравнения флюидов выводятся из более общего уравнения Больцмана. Так как речь идет о таком флюиде, где интуи-

ция не дает нам решения проблемы, Чандра напрямую использовал уравнение Больцмана. В этом состояло его выдающееся мастерство, поскольку большинство работ Чандрасекара включали в себя это уравнение, примененное к различным типам частиц, с релятивистским или нерелятивистским подходом. Уравнение Больцмана — это базовое уравнение статистической механики, и оно говорит нам, как ведет себя макроскопическая система из многих частиц, если известны законы, действующие на микроскопическом уровне, то есть на уровне их частиц.

Газ галактик имеет сходство с обычным газом, но есть между ними и значительные различия. В газе частица взаимодействует со своей соседкой посредством упругих столкновений или отталкиваний и притяжений электромагнитного типа, а кроме того, на нее могут действовать внешние силы, такие как земная гравитация. Внешняя сила, которая рассматривается применительно к галактике, — это аутогравитация, то есть сила гравитации, произведенная всеми ее частицами. Взаимодействие между частицами следует понимать не как реальное столкновение звезд, а как смещение их траекторий под воздействием соседних объектов. Это воздействие также представляет собой гравитацию, хотя сейчас речь идет о взаимно действующей силе между двумя ближайшими звездами.

Другое важное отличие: в обычном газе мы не видим микросостояния, то есть не видим молекул, не знаем где они и с какой скоростью движутся. Мы можем наблюдать лишь макросостояние, то есть систему в масштабе, намного большем, чем молекулярный, — в масштабе наблюдателя. В галактике происходит обратное: мы не видим макросостояния, поскольку межзвездная пыль мешает нам видеть то, что находится дальше, чем 1 кpc (1 кpc, один килопарsec — примерно три тысячи световых лет). Мы не можем видеть нашу галактику целиком. Однако мы видим микросостояние, потому что можем наблюдать отдельные звезды и можем узнать статистическое распределение их скоростей. Это мечта ученого-термодинамика, которая исполняется в космосе. То, что мы не видим в нашей галактике макросостояния, не является недостатком, потому что мы можем наблюдать его в других галактиках, если посчитаем

их похожими на нашу. Итак, у нас есть наблюдения микросостояния и макросостояния. Это большое преимущество.

В обычном газе молекулы сталкиваются так часто, что вскоре достигается термодинамическое равновесие, в котором все направления движения молекул равносильны, а их скорости подчиняются статистическому распределению Максвелла — Больцмана. Глядя в определенном направлении, мы видим гауссово распределение, с которым читатель, возможно, знаком. Можно ли предположить такое простое распределение равновесия для звездного газа? Нет, нельзя. Первое, что сделал Чандра, — ввел критерий для установления времени релаксации, то есть периода, в течение которого звездные столкновения приводят звездный газ в термодинамическое равновесие. Повторим: говоря о звездных столкновениях, мы имеем в виду не столкновения двух звезд, а то, что они проходят достаточно близко друг от друга и их траектории искажаются. Влияние одной звезды на другую не прекращается никогда, как бы далеко друг от друга они ни находились, но звезда меняет свою траекторию благодаря гравитационному воздействию на коротком расстоянии под значительным углом, порядка одного радиана, из-за взаимодействия с целым рядом звезд.

Время релаксации зависит от скорости звезд, возведенной в куб (без учета скорости вращения галактики), которая составляет примерно 20 км/с. Также оно обратно пропорционально типичной звездной массе, которая примерно равна солнечной массе, $2 \cdot 10^{30}$ кг, и, наконец, обратно пропорционально числу звезд на единицу объема, которое составляет порядка одной звезды на 10 пк^3 , по крайней мере вблизи Солнца. В итоге вблизи Солнца время релаксации — порядка 10^{14} лет. Это намного больше возраста Вселенной. Следовательно, галактика не может пока достичь термодинамического равновесия, то есть вести себя как обыкновенный газ при распределении Максвелла — Больцмана.

С математическим мастерством, которое кажется поразительным для любого обычного человека, Чандрасекар ввел уравнение Больцмана в систему без столкновений и смог описать свойства галактики при отсутствии равновесия. Если рас-

ЗВЕЗДЫ НЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ ДРУГ С ДРУГОМ

В галактике звезды подвержены гравитации, созданной множеством звезд и темной материей. Но взаимодействия между двумя звездами очень редки, за исключением двойных, тройных звезд и других множественных систем. Это вызвано долгим временем релаксации, которое вычислил Чандraseкар. Отсутствие столкновений, при понимании столкновений не как фронтальных ударов, а как взаимодействий между двумя приближающимися друг к другу звездами, имеет некоторые примечательные следствия. Например, так как галактики не могут достичь термодинамического равновесия за время жизни Вселенной, распределение их звезд не должно обладать круговой симметрией. Эллиптические галактики, не обладающие круговой симметрией, не имеют ее не благодаря сплющиванию из-за вращения, а потому что рассеяние скорости в разных направлениях отличается. Если две галактики начнут взаимодействие и пройдут через процесс слияния (как это должно произойти в будущем между галактикой Андромеды и нашей), то, несмотря на всю грандиозность этого процесса, звезды его даже не заметят. Только гипотетические живые существа на какой-нибудь планете обратят внимание, что небосвод изменился. В галактике иногда встречаются два звездных населения, которые врачаются в противоположных направлениях и существуют одновременно, не теряя идентичности. Старая теория о том, что планетная система образуется в результате взаимодействия двух звезд, которые прошли рядом друг с другом, обменявшиеся материи, и эта материя осталась в подвешенном состоянии между звездами (так называемая гипотеза катастроф), очень маловероятна, поскольку звездные встречи крайне редки. Ошибочность этой гипотезы подтверждается исследованиями множества внесолнечных планетных систем.

пределение Maxwella — Больцмана не подходит, он решил использовать другой закон распределения, радиус Шварцшильда, согласно которому в каждом наблюдаемом направлении можно найти гауссиану, но параметр ее ширины зависит от направления наблюдения. Фигура ширины в зависимости от направления образует эллипсоид вращения.

В радиальном направлении, то есть из центра галактики наружу, ширина, σ , имеет порядок 25 км/с. В азимутальном направлении (в направлении круга вокруг центра) и в вертикальном направлении (перпендикулярно плоскости симметрии галактики) ширина составляет примерно 20 км/с. Чандре нашел

уравнения звездного газа и, следовательно, определил его распределение в вертикальном направлении, уравнение радиального равновесия и так далее.

Это исследование было ключевым для понимания природы галактик и обусловило современные подходы. Однако анализ был правильным, но неполным. Сегодня мы знаем, что галактика — это не аутогравитационный звездный газ; это не набор звезд. Кроме них, существует межзвездный газ, который подчиняется другим уравнениям, поскольку на него действуют другие силы. Например, частично ионизированный межзвездный газ подчиняется воздействию магнитного поля. Поскольку звезды рождаются при коллапсе межзвездного газа, невозможно представить себе звездную динамику, не понимая динамики межзвездной среды.

Другая проблема, из-за которой анализ Чандры является устаревшим, связана с существованием темной материи. Ее количество в галактике намного больше количества видимой материи, возможно, более чем в 10 раз больше, поэтому гравитацией управляет в основном она. Во времена Чандры существование темной материи невозможно было представить, но распределение этой материи очень сильно влияет на галактическую динамику. На самом деле именно это влияние заставило констатировать существование темной галактической материи: галактики врачаются слишком быстро, и их скорость не уменьшается с расстоянием, как это происходит с планетами Солнечной системы.

Одним из результатов, полученных Чандрасекаром, был параллелизм между накопительным эффектом взаимодействия звезды и тем, что мы наблюдаем при броуновском движении. Частица порошка в жидкости хаотично блуждает из-за столкновений с частицами жидкости, которые намного меньше, но имеют более высокую скорость. Точно так же блуждает траектория звезды, хотя множество этих тел имеет регулярное макроскопическое поведение.

ГЛАВА 5

Наконец-то физика

Чандра всегда хотел заниматься не астрофизикой, а фундаментальной физикой. И с годами его исследования переходили из первой области во вторую. Это изменение отразилось и в перемене места жительства: из Уильямс-Бэй, резиденции Йеркской обсерватории, ученый переехал в Чикаго, где вошел в штат университета. На этом этапе, самом счастливом в его жизни, Чандрасекар сосредоточился на исследовании фотонного газа и взялся за физику «самых совершенных макроскопических объектов во Вселенной» — черных дыр.

В 1952 году США ослабили так называемый Закон об исключении восточных наций, который мешал людям азиатского происхождения получить американское гражданство. Это стало для Чандрасекара и Лалиты возможностью оформить гражданство. Сначала им пришлось прослушать курс в Университете Висконсина об американской истории и Конституции. Выдержав экзамен и дав соответствующую клятву, они с Лалитой стали гражданами США и потеряли индийское гражданство, поскольку Индия не допускала двойного гражданства.

Этот поступок не понравился отцу ученого, который расценил его как отрыв от родины и отказ от древних традиций. Он нашел для своего сына и его жены самые суровые слова. Почему они ничего не сказали, когда приезжали в Индию в прошлом году? В письмах Лалита попыталась оправдать смешанное гражданства и смягчить гнев свекра.

Не имея гражданства в США — стране, где они жили и, по-видимому, собирались прожить до конца дней, — Чандра и Лалита сталкивались с рядом неудобств. Ученый не мог быть назначен членом Национальной академии, не мог приглашать студентов и коллег из других стран, и каждый раз, выезжая за границу, они сталкивались с бюрократическими трудностями при возвращении. Приобретая новое гражданство, они не собирались отказываться от своего происхождения или от тради-

ций. Лалита все так же играла на *вине* и пела Чандре песни на тамильском языке. Она всегда носила сари. Никто из них двоих никогда не пробовал алкоголь. Они были, прежде всего, индуистами. Они всегда считали себя иностранцами в Америке.

Получив гражданство, Чандра был принят в Национальную академию. Кроме того, супруги начали активно участвовать в политике, вступив в демократическую партию, которая защищала близкие им идеи.

ГРАЖДАНИН США. ИЗ УИЛЬЯМС-БЭЙ В ЧИКАГО

С 1937 по 1964 год Чандра и его супруга жили в Уильямс-Бэй, рядом с Йеркской обсерваторией, хотя ученый читал курсы в Чикагском университете. Он уезжал по четвергам в Чикаго на своем большом бьюике с кондиционером, вел занятия, занимался делами *ApJ* и в пятницу возвращался. Водил Чандра очень быстро, но долгая дорога все равно занимала 2,5 часа. Так происходило каждую неделю в течение многих лет. Ученый был очень методичным: он всегда останавливался на одной и той же бензоколонке, обедал в одном и том же ресторане, заказывая одни и те же блюда. Казалось, не существует силы, способной заставить его нарушить график.

В 1959 году Чандра снял маленькую квартиру в Чикаго, хотя продолжал жить в Уильямс-Бэй и, следовательно, совершал те же поездки. В 1964 году пара обосновалась в Чикаго, приобретя дом на проспекте Дорчестер. Это стало окончательным местом жительства ученого. Больше не надо было совершать долгие утомительные поездки, хотя Чандра никогда не жаловался на это. Более того, он и в этих поездках не терял времени: иногда его сопровождали аспиранты, и ученый пользовался дорогой, чтобы поговорить о науке.

С новым местом жительства изменились и друзья Чандры, в их число вошли семьи его коллег — Ферми, Теллера и других знаменитых ученых, работавших в Чикаго. Обычно Чандру и Лалиту приглашали на ужин, и им приходилось отвечать вза-

имностью, но поскольку сами они были трезвенниками и вегетарианцами, то испытывали определенные сложности при организации ответных приглашений.

Чандра и Лалита предпочитали приглашать гостей на чай. Дружба Чандрасекара с его коллегами имела прежде всего научную основу и очень редко переходила в сферу личных отношений. Но Чандра всегда проявлял человеческую теплоту, и лучше всего это было видно, когда он общался с детьми своих друзей. Он всегда говорил, что ему легче с детьми своих друзей, чем с друзьями. Так же тепло он относился к молодым студентам и, как мы уже видели, к подчиненным из управления *ApJ*. В течение жизни у Чандры был 51 аспирант, и это противоречит тому факту, что многие астрономы не руководили диссертациями, как в случае с Шепли, Элдингтоном, Джинсом и другими. У Хаббла был только Сэндидж, а у Сэндиджа — никого. С аспирантами у Чандры были намного лучшие отношения, чем с коллегами-преподавателями.

Его интересы также постепенно менялись, переходя из сферы астрофизики в сферу физики, тем более что последняя всегда привлекала Чандру. К этому чикагскому этапу жизни ученого относятся его работы на чисто физические темы, такие как магнитная гидродинамика, равновесие вращающихся систем, общая теория относительности, черные дыры и Ньютона. Без сомнения, на эту желанную смену научных интересов повлияла крепнувшая дружба с Ферми.

Чандра продолжал писать перьевой ручкой (он никогда не пользовался шариковой) безупречные статьи. Известно, что он составлял черновик за черновиком, пока статьи не достигали совершенства. Одна из его студенток, Билма Бути, позвонила ученому домой по телефону, когда он писал книгу «Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость». Трубку взяла Лалита, ответив, что Чандра «занят ($n - 1$)-й версией книги». Иногда он переписывал одну страницу до десяти раз, чтобы исправить даже минимальные ошибки. Кроме того, ученый все время носил серый костюм. Очевидно, у него было несколько одинаковых костюмов, но знать это точно не мог никто, кроме Лалиты. Всегда в одном и том же костюме, не теряя ни секунды,

не произнося ни одного лишнего слова... Таким был Чандрасекар в глазах современников.

В 1960 году умер отец Чандры, и в 1961-м он приехал в Индию. Ученый увиделся со всей своей семьей. Он был тронут встречей со своими сестрами Видьей, Савитрой, Сундари... Они были уже настоящими дамами. Так Чандря и Лалита вновь встретились с прошлым.

Ученый вышел в отставку в 1980 году, при этом ему предложили должность работающего пенсионера, и в итоге он стал заслуженным отставным профессором. Наконец-то у него была возможность работать без обязательств, и он сразу воспользовался этим... чтобы работать как всегда, когда эти обязательства у него были.

ПУТЕШЕСТВИЯ СТАРОГО ЧАНДРЫ

Будучи редактором *ApJ*, Чандря жил, словно привязанный к Уильямс-Бэй и Чикаго (хотя он и сам не очень хотел путешествовать). Однако после ухода в отставку ученый совершил несколько поездок. Сначала в Россию — страну, которую он уже посещал в молодости. В 1981 году проводился конгресс в память о 40-летии пионерской работы по переносу лучистой энергии и принципам инвариантности Амбарцумяна и Чандрасекара. Ученый должен был присутствовать на этом мероприятии, поскольку его имя фигурировало в названии конгресса; кроме того, Советский Союз того времени отличался от Советского Союза времен его молодости. Тогда население, включая ученых, страдало под гнетом режима. Расстраивало Чандрасекара лишь то, что Амбарцумян послал ему некоторые свои книги, в которых Чандря цитировался только в заметках, сделанных самим Амбарцумяном от руки.

Но они вместе с Лалитой решили приехать, и эта поездка оказалась незабываемой благодаря любезнейшему приему, который они встретили везде — в Москве, Ленинграде, Ереванской

и Пулковской обсерваториях... Чандрасекар вызывал у широкой публики интерес и искреннее восхищение. Он познакомился (точнее, вновь познакомился) со многими исследователями, по работам которых сегодня учатся все студенты-астрофизики и физики. Чандре завязал теплые отношения не только с Амбарцумяном, пригласившим его, но и с Яковом Зельдовичем (1914–1987), Игорем Новиковым (р. 1935), Вениамином Маркаряном (1913–1985) и другими. Евгений Лифшиц (1915–1985), верный друг Ландау и соавтор стольких обязательных работ для студентов-физиков во всем мире, пригласил их на ужин. Кстати, одной из самых удивительных заслуг Лифшица, в связи с ее новаторским характером, было использование общей теории относительности для описания механизма формирования протогалактик. Во время одной из речей в честь Чандрасекара его новый знакомый Сергей Соболев (1908–1989) произнес краси- вую фразу: «До сегодняшнего дня Вы были книгой; теперь Вы человек».

Еще одной поездкой, оставившей у Чандры хорошие воспоминания, было путешествие в Испанию. В Гранаде в 1989 году проводилось научное собрание Международного астрономического союза на тему «Строение и динамика межзвездной среды», организованное Андалусийским институтом астрофизики и Гранадским университетом и посвященное астрофизику Гвидо Мюнху (р. 1921), одному из бывших аспирантов Чандры. Ученый приехал с Крита, где работал с одним из своих со-трудников, Базилисом Ксантопулосом (1951–1990), который вскоре погиб от руки сумасшедшего. Когда Чандре прибыл в Гранаду, он не проявил большого интереса к своему бывшему ученику и решил не ходить на конгресс. «Мой нынешний интерес не связан с обсуждением ухода Гвида в отставку, которому посвящено это собрание», — отказал он с привычной элегантностью. Впрочем, отношения ученика и учителя уже некоторое время были довольно отдаленными.

Чандре с Лалитой посвятили себя «познанию Гранады и ее знаменитых окрестностей». Они занимались этим вместе с коллегами из Гранадского университета, и с ними у них сложились теплые отношения. И Чандре, и Лалита хорошо чувствовали

искусство. Ученый сказал, что «ждал всю жизнь визита в Гранаду». Он тщательно осматривал своды Альгамбры и гораздо больше, чем кто-либо другой, восхищался искусствой работой. Красота и истина были для него синонимами, и можно сказать, что в Гранаде Чандре утолял научный интерес. Разговор с Чандной — это было то же самое, что разговор с самой наукой.

В Гранадском университете он прочел лекцию «Интеллектуальное достижение, которое представляют собой «Начала». Планировалось, что она состоится в зале вместимостью 100 че-

ЖЕНЩИНА — ПРЕМЬЕР-МИНИСТР ИНДИИ

Индира Ганди (1917–1984) редко общалась с Чандрасекаром, но эти не-частные встречи были довольно важными. После обретения Индией независимости в 1947 году Чандре получил от властей страны предложение вернуться на родину, хотя формально он уже не был ее гражданином. Сам Неру, когда был премьер-министром, просил Чандру вернуться и настоял, чтобы директор Научного совета Индии, господин Такер, обсудил с ним детали договора. Чандрасекару пришлось бы вернуть индийское гражданство несмотря на то, что договор был временный — всего на пять лет. При этом президент заверял его, что пока он занимает этот пост, договор гарантированно будет продлеваться. Чандре ответил: «Все люди смертны». Дочь Неру, Индира Ганди, также была заинтересована в возвращении Чандры. Он познакомился с ней в 1968 году, получая *Ладма Вибхушан* — наивысшую награду Индии, предоставляемую «иностранным». Индира сама представила ученого, она говорила в течение десяти минут без каких-либо записей, просто и в то же время красноречиво, хотя в то же самое утро получила официальный акт о бойкоте. Позже Чандре получил от нее приглашение поужинать вместе с другими гостями. Ученый по-джентльменски собирался пододвинуть стул, на котором должна была сидеть индийская правительница. «Не помогайте мне. Я не привыкла, чтобы мне помогали». Они дружелюбно поболтали. В другой раз Индира Ганди предложила Чандрасекару занять руководящую должность в Комиссии по атомной энергии Индии. Очевидно, Чандре испытывал отвращение к подобной работе, но ему пришлось найти элегантный и дипломатичный способ отказаться от этого предложения. В 1982 году Индира Ганди снова пригласила Чандру к себе домой, на этот раз без какой-либо конкретной цели, предложения, просьбы, а просто по взаимной симпатии. Чандре спросил ее: «Вы оптимистично относитесь к будущему Индии?» Она не сразу ответила: «Я не могу позволить себе этого». И улыбнулась искренне и мило. Индира Ганди была убита собственными телохранителями два года спустя.

ловек, но поток студентов, преподавателей и любопытствующих был таким большим, что лекцию предложили перенести в Большой зал, на тысячу слушателей. Чандрасекар отказался: «То, о чем я буду говорить, не может быть понято столькими людьми».

В качестве любопытного факта упомянем, что Чандрасекар в своем безупречном сером костюме ходил по улицам, не глядя по сторонам, и постоянно подвергался опасности попасть под автомобиль. Коллеги-ученые сопровождали его во время всей



Неру, его сестра Виджая и Индира Ганди (слева) с Эйнштейном на снимке 1949 года.

поездки и отвезли Чандру в Мадрид, где ему нужно было читать другую лекцию. Когда один из его сопровождающих начал слишком заботливо следить за движениями ученого, тот ответил: «Я не такой уж хрупкий». Ученый очень по-разному относился к людям: к одним он проявлял резкость, а к другим — повышенную внимательность, без золотой середины. Одна журналистка, задав ему несколько банальных вопросов, вышла с интервью вся в слезах после пары сухих ответов: «Это уже записано» (*This is on the records*). Зато другого журналиста он принимал без ограничения по времени и долго обсуждал с ним множество вопросов, отыскивая самые точные ответы.

НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ

В 1983 году Шведская академия наук оценила труд Чандры наивысшей наградой — Нобелевской премией. Она была представлена ученым в основном за работу по пределу Чандрасекара. Телефон зазвонил в шесть часов утра, и он узнал новость, едва выйдя из душа. Жизнь ученого резко изменилась — на него посыпались сотни телеграмм и приглашений. Удивительно, но эта новость даже испортила настроение Чандрасекару. Он всю жизнь критиковал учреждение Нобелевской премии, поскольку, по его словам, эта награда искажает жизнь ученого, вносит в нее элемент суматохи и тщеславия, что противоречит ежедневным занятиям, посвященным поиску истины. Это пустая церемония, которая превозносит исследователя так, что он утрачивает свою мудрость. Возможно, он вспоминал при этом своего дядю, который испытывал невероятную гордость после получения Нобелевской премии, название которой он повторял вслух несколько раз в день.

Чандра никогда не работал ради этой награды и никогда не думал, что в итоге получит ее. Его труды были очень сложными для широкой публики, его поведение мало напоминало поведение популярного артиста, обожаемого толпой. Он писал брату:

«Премия, хотя и приносит радость, — это не то, чего я искал и что считаю важным в научной карьере. [...] Я очень устал — физически, умственно и эмоционально. Мне потребовалось наивысшие усилия, чтобы сосредоточиться и написать речь, которую я буду произносить на следующей неделе в Стокгольме».

Это отношение к Нобелевской премии отчасти противоречило гордости Чандры за другие знаки отличия — например, когда его избрали членом Королевского общества, вручили золотую медаль Королевского астрономического общества или когда президент Джонсон повесил ему на грудь Национальную научную медаль. Во всех этих и многих других случаях он принял награду с радостью.

Математическая теория черных дыр — очень сложная тема, но ее исследование убедило меня в правоте древних афоризмов: простое — это печать истины, а красота — это блеск истины.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР В СВОЕЙ РЕЧИ ПЕРЕД ШВЕДСКИМИ АКАДЕМИКАМИ

Чандрасекар, конечно же, был благодарен за премию, но в то же время испытывал некоторое раздражение. В интервью теперь неизменно включали вопрос: «Вы сильно обрадовались, узнав, что вам предоставили Нобелевскую премию?» Этот вопрос предполагал ответ «Да», но на самом деле ответом было «Нет». Иногда Чандря просто уходил от ответа, прячась за довольно пресными фразами. А как-то раз в раздражении сказал: «Нет, я не обрадовался, потому что премию дали очень молодому Чандрасекару. Он существовал когда-то, но это не я сегодня». Действительно, Шведская академия опоздала в признании заслуги Чандры на 40 лет. Однако, вполне возможно, если бы он получил награду в молодости, то СМИ и коллеги так повлияли бы на жизнь ученого, что он не смог бы сделать всего того, что он сделал.

Однако Чандря смирился, сменил свой серый костюм и галстук на торжественный фрак и белую бабочку и принял

награду из рук короля Швеции Карла XVI со всей сердечностью и уважением, полагающимися по протоколу. Его речь перед шведскими академиками была восхитительной. В ней Чандре удалось объединить свои многочисленные работы о строении звезд, от своего знаменитого предела, сформулированного в молодые годы, до недавних достижений по гравитационному коллапсу, нестабильностей релятивистского характера и неосесимметричным видам колебания, закончив математической теорией черных дыр. Это была важная лекция, хотя она требовала внимания. Диаграммы и формулы в ней сменялись длинным потоком научных терминов.

На банкете Чандра произнес несколько слов, скорее об искусстве, чем о физике, процитировав своего соотечественника Рабинраната Тагора. И как только он смог снять фрак, то сразу вернулся из мира награждений и речей в собственный мир дифференциальных уравнений. Он снова начал изучать природу, расширять горизонт, отделяющий известное от неизвестного, добывать породу в рудниках истины. Чандрасекар не почивал на лаврах и не украшал ими свою голову.

ТЕОРИЯ СВЕТА

По словам самого Чандры, книга «Перенос лучистой энергии» соответствовала самому счастливому периоду его жизни. Не нужно добавлять слова «научной», потому что для него жизнь и наука были неотделимы. Жизнь давала Чандре возможность заниматься наукой, а наукой означала для него всю жизнь. Кроме того, возможно, эта работа наиболее важна из всех и даже сравнима с первым сочинением о пределе. Выбор других тем исследований также был удачным, но в этом случае он был необходимым. Что может сделать астроном, чтобы истолковать то, что наблюдает, если у него нет необходимой для этого математической теории?

Чандра знал, что такое газ, он знал, что такое звездный газ, то сейчас ученый столкнулся с фотонным газом, световым га-

зом. Для него он использовал все то же уравнение Больцмана. В данном случае — релятивистское уравнение Больцмана для того, что называется горячим флюидом. Горячий флюид — это флюид, в котором частицы имеют скорости, близкие к скорости света. Следовательно, фотонный газ — это абсолютно горячий флюид.

Я начал, не имея четкого представления о том, что одна статья приведет к другой, та — еще к одной, и так 24 статьи.

Работа развивается сама по себе.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР О СВОЕЙ ТЕОРИИ СВЕТА

Но ученый исходил не из нуля. Например, самая простая модель света, которая у нас есть,— это черное тело. Вин, Больцман, Рэлей, Джинс, Кирхгофф, Планк и Эйнштейн, а также Кеплер и Ньютона проделали значительную работу в этой области. Но все требовало систематизации, а кроме того — восполнения пробелов. Эти пробелы были связаны с переносом лучистой энергии и, в частности, с переносом поляризованного света. Нужно было узнать, сколько света переносится в определенном направлении на единицу времени, единицу площади и единицу частоты через среду, которая искажает свет, одновременно производя его.

Чандре нашел еще одного ученого, который делал похожий анализ: это был Амбарцумян, великий астроном, с которым он познакомился в молодости. Амбарцумяну удалось установить принцип инвариантности, который Чандре обобщил до четырех принципов. Свет имеет странное свойство, которое находит множество способов практического применения. Речь идет о поляризации. Как известно, свет может считаться волной, в которой распространяются электрическое и магнитное поля. У обыкновенного света плоскость колебания электрического поля (или магнитного, которое перпендикулярно) произвольная: все плоскости, перпендикулярные направлению распространения, существуют одновременно. В поляризованном свете, наоборот, есть предпочтительная плоскость колебаний.

Это сложная проблема, поскольку среда распространения не только заглушает свет и не только создает его и может делать его поляризованным, но и, кроме того, если среда ионизирована, она вращает плоскость колебаний (этот эффект назван вращением Фарадея в честь его гениального первооткрывателя). Проблема сложная, но Чандре удалось сделать ее простой...

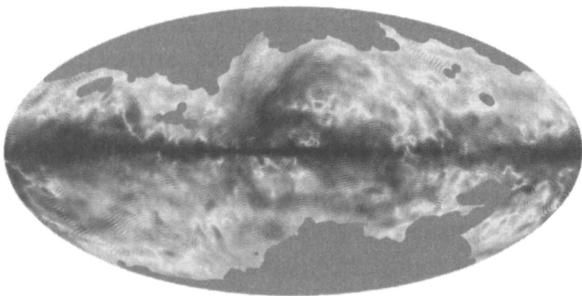
Как открыть поляризованный свет? Многие изучали так называемые параметры Стокса, I, Q, U, V, которые представляют собой значения, полностью описывающие состояние поляризации излучения. Не вдаваясь в их определение, скажем, что их ввел ирландский физик Джордж Габриэль Стокс (1819–1903). Но то, что эти значения получили имя Стокса, — заслуга Чандры, который спас Стокса от забвения. Этот факт не слишком широко известен. До Чандрасекара никто не знал, что это за параметры, и очень немногие помнили, кто такой Стокс. Чандра сказал себе: «Никто не пробовал поляризацию, а я попробую». Это был смелый шаг, но он привел к успеху.

Статья Стокса была забыта в архивах с 1852 года, там ее и нашел Чандра. В то время не существовало ни одной статьи или книги, в которых говорилось бы о поляризации и упоминался Стокс.

«Книга написана именно так, как я хотел написать ее». Хотя статья была очень подробной, Чандра предпочел не раскрывать тему до конца. «Это в некотором роде как будто прийти на прекрасный ужин и решить: «Я не хочу есть слишком много, потому что это испортит эффект». И он оставил работу и больше не беспокоился о ней и о тех преимуществах, которые знакомство с ней дало бы физикам. Спустя примерно 15 лет его попросили прочесть лекцию о переносе лучистой энергии. За столь долгий срок вполне можно забыть о своей работе, а кроме того, у Чандры не было времени заново прочитать ее. Но он сам удивился, потому что слова сами шли с языка, а уравнения появлялись на доске с той же элегантностью, что и три десятилетия назад. «Я полностью воспрянул духом, [...] наконец-то я почувствовал себя счастливым благодаря науке». Подобного ощущения Чандра больше не испытывал. Хотя, возможно, мы и ошибаемся.

ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Когда мы говорим о первоначальном магнитном поле, то имеем в виду поле, существовавшее в очень раннюю эпоху, спустя 400 000 лет после Большого взрыва. Этот возраст меньше 14 000 миллионов лет, и то, что мы наблюдаем, произошло на световом расстоянии, соответствующем предыдущему количеству, умноженному на скорость света. Как можно измерить магнитное поле чего-то, что произошло столько лет назад? Какой космический компас использовать для этого? Очень интересный метод — так называемое вращение Фарадея. Речь идет о не самом известном эксперименте гениального Майкла Фарадея (1791–1867). Когда поляризованный свет пересекает область, на которую воздействует мощный электромагнит, плоскость поляризации вращается. Точно так же поляризованный свет так называемого космического микроволнового излучения, если бы был подвержен действию первоначального магнитного поля, испытал бы вращение Фарадея. Но среда, ответственная за вращение, также испускает поляризованный свет. Чтобы учсть эти и другие изменения света до того момента, когда он достигает нас, мы должны проследить эволюцию параметров Стокса, то есть задействовать уравнения, которые завещал нам Чандра. Это только один из многих примеров, когда нам может пригодиться исследование Чандрасекара о переносе лучистой энергии. Это исследование особенно интересно для астрофизиков, поскольку почти вся информация, которую мы получаем из космоса, доходит до нас в виде света, часто сильно поляризованного. До сих пор не было измерено никакого первоначального магнитного поля, но растущая точность космических аппаратов может предоставить нам возможность великого открытия. На рисунке показана карта поляризации Млечного Пути. Это изображение — проекция того, что наблюдатель видит с Земли (в частоте нескольких сотен гигагерц).



ОТКРЫТИЕ СТЕББИНСА

Свет выходит частично поляризованным в отражении — это факт, хорошо известный производителям очков и даже тем, кто их носит. Чандра подумал, что в системе двойных затменных звезд свет звезды отражается в другой, производя частично поляризованный свет во время затмения. В один из тех редких случаев, когда Чандра занимался наблюдениями, он предложил Джоуэлу Стеббинсу (1878–1966), выдающемуся астроному, разработавшему фотоэлектрическую фотометрию, поискать поляризованный свет во время взаимного затмения двойной системы звезд. И действительно, свет был поляризован! Но на следующий день, когда затмение закончилось, поляризованный свет по-прежнему наблюдался, хотя этого не должно было быть... Именно так была открыта поляризация света в межзвездной среде под действием галактического магнитного поля.

ГИДРОДИНАМИКА И МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА

Книга «*Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость*» — еще одна из вех, поставленных Чандрой. Он почувствовал, что должен искать новую тему в рамках чистой физики, которой полностью посвятил себя, хотя работал с темами, имевшими прямое отношение к астрофизическим объектам. Изначальная идея состояла в том, чтобы погрузиться в тему турбулентности, но вскоре ученый увидел, что существуют проблемы, связанные с равновесием, в системах намагниченных флюидов, которые могут иметь отражение в области астрофизики (см. рисунок 1) и во многих других сферах, связанных с лабораторной и промышленной плазмой. В таких ситуациях Чандрасекар заботился об экспериментах, которые могли подтвердить теорию. Действительно, в Чикагском университете работали Накагава и Фултц, а также имелся старый заброшенный циклотрон, который должны были заменить другим, побольше.

Теоретические прогнозы полностью соответствовали данным экспериментов. Для Чандрасекара это были скорее тяжелые, чем счастливые годы, потому что работа была полна возможностей, но он был вынужден отдавать много времени руководству «*Астрофизическим журналом*», а также преподаванию.



ВРАЩАЮЩИЕСЯ ТЕЛА В РАВНОВЕСИИ

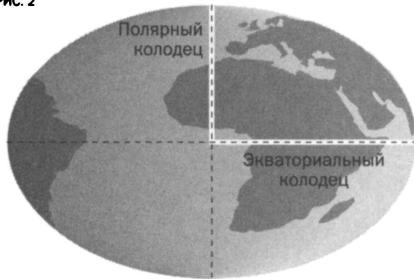
Книга «Эллипсоидальные фигуры равновесия» также представляла собой сборник статей. Она была плодом каприза Чандры, и он даже не предполагал, как сильно она повлияет на астрофизику и общую физику. Первым, кто подошел к подобной проблеме, был Ньютона, вычисливший эксцентриситет земной поверхности.

Сегодня мы знаем, что Земля не шар, а вращающийся эллипсоид, сплюснутый у полюсов. Геодезисты делают более точные приближения, но эллипсоидальное приближение уже довольно точное. Как Ньютона смог вычислить эксцентриситет планеты с помощью ручки и бумаги, не выходя из комнаты?

Он сделал первое приближение, предположив, что внутри Земля однородна. В своем воображении он соорудил два колодца: один на полюсе, он доходил до центра Земли, а другой — на экваторе, он также доходил до центра Земли и соединялся с предыдущим (см. рисунок 2). Ньютон мысленно заполнил образовавшийся канал флюидом и «наблюдал» (в своем воображении), как флюид достигает равновесия и наполняет со-

Магнитогидродинамические нестабильности материализуются в космосе. Это огромное тело извергается Солнцем, порождая солнечный ветер, который пересекает Солнечную систему, а на Земле вызывает северные сияния. Существование солнечного ветра предсказал Юджин Паркер в статье, которую Чандрасекар решил напечатать в «Астрофизическом журнале» несмотря на отрицательное мнение двух рецензентов.

РИС. 2



С помощью этих двух воображаемых колодцев Ньютон вычислил сплющивание полюсов. На рисунке воспроизведено изображение, напечатанное в «Началах».

общающиеся колодцы до краев. Длины колодцев не могли быть равными, потому что гравитация в колодце на экваторе компенсируется центробежной силой.

Вычисленный эксцентризитет, определенный сегодня как экваториальный радиус минус полярный радиус, и все это деленное на средний радиус, равнялся $1/294$. Сегодня принято значение $1/230$. Это

расхождение вызвано тем, что Земля внутри неоднородна, но расчет Ньютона вызывает восхищение.

Проблема равновесия вращающихся объектов была исследована знаменитыми математиками. Чандра изучал эллипсоиды МакЛорина, Якоби, Мейера, Лиувилля, Дирихле, Дедекинда, Римана, Пуанкаре, Картана, Роша, Дарвина и Джинса. Математики всех времен рассматривали проблему, которую тщательно проанализировал и Чандра. Эта книга короче, чем

СКЛОН К ПОЛЮСУ

Земля, как эллипсоид, имеет полярный радиус меньше экваториального. То есть существует то, что Франсиско Моран Саманьего (1901–1984) назвал склоном к полюсу. Полюс находится «внизу по склону». Значит ли это, что если положить на поверхность Земли, на которой нет гор и других неровностей рельефа, идеально круглый мячик, он покатится по этому склону, пока не достигнет полюса? Нет, этого не произойдет. Дело в том, что центробежная сила находится в идеальном равновесии с этим компонентом гравитации, который предполагает склон к полюсу. Причину этого равновесия нужно искать в тех временах, когда Земля была жидкой, и ее поверхность сформировалась в соответствии с этим равновесием. Физики атмосферы обычно не вводят в свои уравнения ни склон к полюсу, ни центробежную силу, а в рассуждениях либо рассматриваются обе величины, либо не рассматривается ни одна. Для начала надо рассматривать как центробежную силу, так и силу Кориолиса, когда в качестве отправной системы берется неподвижная Земля. Так как эта система неинерциальная, следует включать в уравнения и силы инерции.

обычно, — около 240 страниц. Обычно трактаты Чандрасекара куда длиннее.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Первая важная работа Чандры — предел Чандрасекара, — в которой он доказал, что белый карлик не может иметь массу, большую 1,4 солнечной массы, была релятивистским расчетом. Когда он работал над этой темой, то еще не имел, по собственным словам, большой математической подготовки, но все же смог сделать вычисления, потому что они не столько были сложными и трудоемкими, сколько были связаны с применением определенного принципа. Впрочем, мы знаем, что Чандра пользовался славой отличного математика еще в Индии. Верно и то, что он применил теорию относительности, не имея больших знаний по этой теории. После этого расчета, после спора с Эддингтоном и исследований на самые разнообразные темы у Чандры появилось желание заниматься общей теорией относительности.

Но ему было 52 года, и ученый понимал, что он уже прошел пик продуктивности, который, согласно статистике, приходится примерно на 40 лет. Эта тема в физике была уже достаточно разработана и требовала очень узкой специализации. Его ждала конкуренция с молодыми и блестящими учеными, одним из которых был Роджер Пенроуз. Когда Пенроуз познакомился с Чандрой, ему был всего 31 год, и он был впечатлен тем, что такой авторитетный ученый хочет заняться столь трудоемкой темой, словно он еще студент.

Однако Чандрасекар глубоко изучил общую теорию относительности и за короткое время превратился в одного из самых выдающихся специалистов по ней, найдя свою нишу в исследовании математической теории черных дыр Шварцшильда и Керра. Черные дыры Шварцшильда имеют только массу, в то время как черные дыры Керра имеют и кинетический момент — это врачающиеся черные дыры.

Черные дыры — это самые совершенные макроскопические объекты во Вселенной.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

Чандра связывал теорию черных дыр со столкновением двух гравитационных волн. Существовала любопытная взаимосвязь между этими волнами и решениями уравнений Эйнштейна о черных дырах, которые бесконечно захватывали Чандру. Можно представить, как Чандрасекар предвкушал новое исследование, когда еще не были открыты гравитационные волны, предсказанные самим Эйнштейном.

Его интерес к черным дырам был вызван тем, что эта фаза должна была быть конечным состоянием очень тяжелой звезды после взрыва сверхновой. Как говорил Пенроуз,

«...он столкнулся с итоговым выводом, принятым сегодня, о том, что по крайней мере в некоторых случаях судьба тела в гравитационном коллапсе должна заключаться в том, чтобы столкнуться со своеобразием пространства-времени, которое представляет для составных частей этого тела *конец времени*».

Чандра был захвачен математической красотой теории черных дыр, которые он считал «самыми совершенными макроскопическими объектами во Вселенной».

Ученый считал, что Эйнштейн с общей теорией относительности открыл драгоценный рудник, но из-за своих невысоких математических способностей пришел к выводам, которые были подобны простым царапинам по обнажившейся породе этого богатейшего рудника. Эйнштейн не занимался поиском нелегких решений дальше того, что соответствовало случаям легкого искривления пространства-времени. Постепенно юношеское восхищение Чандры Эйнштейном нашло другой объект — Ньютона, который действительно обладал необычными математическими способностями. Он как-то сказал: «Проблема Эйнштейна в том, что он сам недостаточно верит в общую теорию относительности». Возможно, Чандра был не очень

СТАРЫЙ СТУДЕНТ

Друг и соотечественник Чандры Рамасешан рассказывал такую историю. «Один мой знакомый был в гостях у Чандрасекара. Они гуляли по улице. Вдруг он увидел молодого человека в рваных джинсах. Чандрасекар был, конечно же, облачен в свой идеальный серый костюм и был так же элегантен, как и всегда. Он поправил галстук и быстро подошел поприветствовать молодого человека. Он взял его за руки и немного поговорил с ним, а потом почтительно открыл ему дверь машины, и молодой человек уехал. Чандрасекар вернулся к своему попутчику, и тот спросил его: «Кто этот хиппи?» Чандрасекар ответил: «Ты его не знаешь? Это Герох» — «Кто такой Герох?» — «Это один из лучших специалистов по теории относительности сегодня. Ему 20 с небольшим. Я пригласил его прочитать лекцию в Чикаго этим летом. Я сам прослушал его курс, и мне потребовалось все выходные, чтобы понять некоторые уравнения, которые он писал на доске. Когда я запутываюсь, я звоню ему по телефону, даже если уже поздний вечер, и он мне все разъясняет». Это настоящий пример скромности 55-летнего ученого, уже получившего признание за свои открытия, —ходить на лекции молодого человека, который, при всей своей небрежности в одежде, является блестящим теоретиком. Эта история также говорит и о том, что далеко не все исследователи соответствуют стереотипу забывчивого и рассейянного ученого.

справедлив, осуждая мудрого Эйнштейна, который тогда как раз вступил в полемику со своими коллегами, упорно отказываясь признать новую интерпретацию квантовой механики.

Отношения Пенроуза и Чандры были действительно невероятными. В 1985 году, когда Пенроуз был в Хьюстоне (Техас), Чандрасекар позвонил ему и сказал, что хочет встретиться, чтобы проконсультироваться по некоторым вопросам теории относительности. Чандря собирался совершить относительно недолгую поездку из Чикаго в Хьюстон, они провели бы день вместе, а на следующий день он вернулся бы домой. Вроде бы в этом не было ничего необычного. Однако в 1986 году Чандра обратился к Пенроузу с такой же просьбой, но ученый на этот раз был в Оксфорде. Чандра должен был прибыть из Чикаго к берегу Атлантического океана, сесть на трансатлантический лайнер, приехать в Оксфорд, поговорить с Пенроузом и на следующий день отправиться обратно. Эта поездка повторилась

РОДЖЕР ПЕНРОУЗ (Р. 1931)

Пенроуз, родившийся в Колчестере (Великобритания), защитил докторскую диссертацию в Кембриджском университете в 1958 году. Сегодня он заслуженный отставной профессор в Оксфордском университете, где провел почти всю свою профессиональную жизнь. Пенроуз — один из главных специалистов по теории относительности всех времен. Получил премию Вольфа в 1988 году вместе со Стивеном Хокингом (р. 1942). Отдельно изучал особые свойства, характерные для умирающих тяжелых звезд. Известна его гипотеза космической цензуры, согласно которой Вселенная защищает нас от особенностей черных дыр, которые им свойственны, но не могут быть наблюдаемы. Он также внес вклад в геометрию, лучший пример которого — непериодическое замощение, носящее имя ученого. Замощение — это полное покрытие плоскости (или объема) определенными геометрическими фигурами. Этимология международного термина этого слова происходит от латинского *tesela*, что означает «черепица». Помимо научной деятельности, Пенроуз известен философскими идеями, одновременно привлекательными и противоречивыми. Так, он возродил двойственность «разум-мозг» как двух отдельных сущностей. Разум обладает поведением, не выводимым из физических законов. Хотя эта теория восходит к периоду детства науки и одним из ее наиболее страстных защитников был Эйлер, Пенроуз возродил эту двойственность, основываясь на теореме Гёделя, исследованиях по клеточной материи Хамероффа и на квантовой механике. Его встречи с Чандрасекаром были краткими, но интенсивными. Чандря прибывал из Чикаго в Оксфорд на трансатлантическом лайнере только для того, чтобы встретиться с Пенроузом хотя бы на один день и обсудить с ним трудности, которые возникали у него, когда он запутывался в какой-то интерпретации или расчете в области общей теории относительности.



полны научной ценности, и лучшее доказательство этого — их повторение.

Нам остается только восхищаться, вслед за Пенроузом, безграничным энтузиазмом Чандры. Даже в возрасте 78 лет он отдавался исследованиям полностью, совершенно не думая о тех усилиях и жертвах, которых они требовали. Поистине скромность и энтузиазм делают Чандрасекара настоящим гением в мире идей.

Его книга *«Математическая теория черных дыр»* насчитывает 650 страниц. В одной из самых длинных глав говорится:

«Сделано все возможное, чтобы изложение в настоящей главе было логически последовательным. Однако сам материал просто не дает такой возможности: необходимые преобразования часто очень длинные и требуют 10, 20 и даже 50 страниц выкладок. Если читатель пожелает скрупулезно проследить весь ход выкладок, к его услугам — выкладки автора, депонированные в библиотеке им. Джозефа Редженстейна Чикагского университета».

КРАСОТА И ИСТИНА

Мысли Чандрасекара об антитезе истины и красоты и одновременно о слиянии обоих понятий в науке стали темой его книги *«Истина и красота: эстетика и мотивация в науке»*. Это сочинение — не совсем обычная книга, а, скорее, сборник восьми лекций, прочитанных Чандрасекаром в различные годы жизни. Сочинение очень отличается от остальных его трактатов, причем не только по тематике, но и своим несоответствием творческому методу Чандры. Для него была характерна заметная периодичность, которую можно представить в таком виде: выбор новой темы, ее полная математическая разработка, окончание и выбор новой темы, внешне не связанной с предыдущей, что знаменует полный отход от нее.

Эти восемь лекций называются: «Ученый» (1947), «Научное исследование: его мотивация» (1985), «Шекспир, Ньютон

и Бетховен, образцы творческой деятельности» (1975), «Красота и поиск красоты в науке» (1979), «Эдуард Артур Милн: вклад в развитие современной астрофизики» (1979), «Эддингтон: самый выдающийся астрофизик своего времени» (1982), «Эддингтон: выражитель и интерпретатор общей теории относительности» (1984) и «Эстетическое обоснование общей теории относительности» (1986).

Некоторые из них биографические. Привлекает внимание восхищение Чандры Эддингтоном, несмотря на то что этот ученый принес ему столько неприятностей. Наиболее известна его лекция, связывающая творческую деятельность Шекспира, Ньютона и Бетховена — великих гениев, которые создавали искусство или науку, практически не имея предшественников. Анализируя эти и другие случаи, Чандрасекар доказывал, что творческие процессы в науке и в искусстве следуют обратным моделям. Люди искусства увеличивают свою интенсивность с возрастом, так что лучшие их произведения появляются в преклонные годы, в то время как пик научного творчества приходится на 30 или 40 лет. Чандрасекар подтверждал свой тезис многочисленными примерами, опираясь на биографии людей искусства и науки, и этот тезис сегодня довольно популярен и имеет основания. Но из каждого правила существуют исключения, и одним из них был сам Чандрасекар!

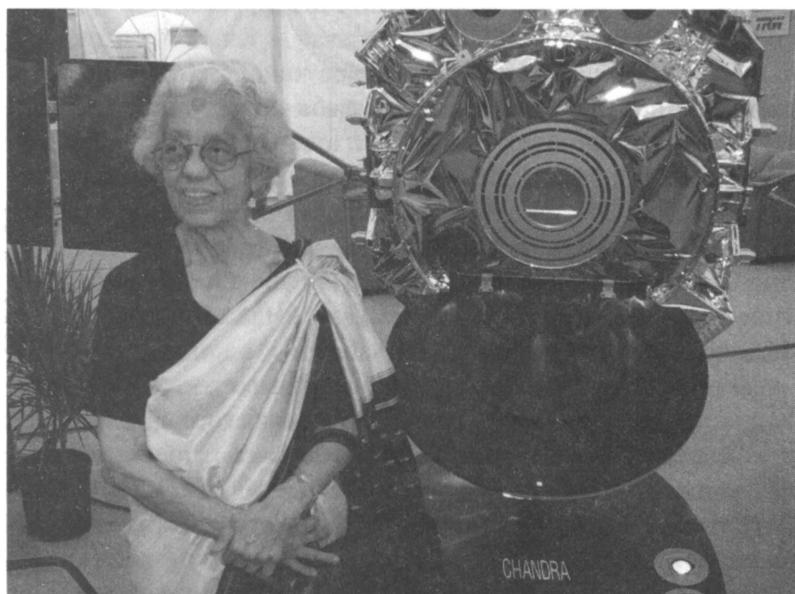
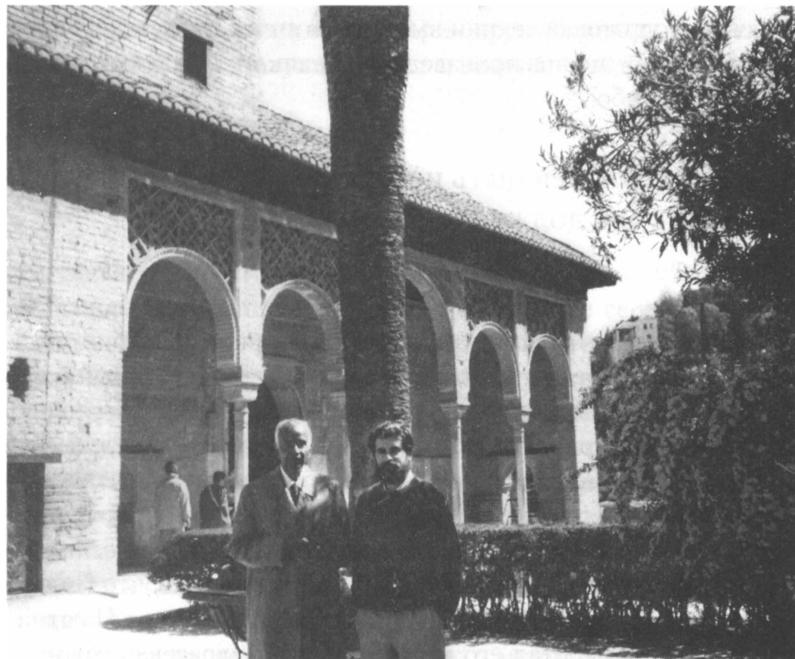
Лекции отличаются изысканным и богатым языком и показывают огромную эрудицию ученого (как этот человек все успевал?). Эти нерегулярные записи вполне сопоставимы с его научными работами.

ЧАНДРА И НЬЮТОН

В год 300-летия публикации *«Математических начал натуральной философии»* Ньютона Чандрасекара попросили прочитать лекцию об этом трактате. Чтобы написать такую лекцию, Чандре пришлось прочитать текст Ньютона. И, учитывая скрупулезность, с какой он подходил ко всем задачам в своей жизни,

ВВЕРХУ:
Чандра и автор
этой книги,
Эдуардо
Баттанер,
в Альгамбре
во время визита
этого великого
ученого
в 1989 году
в Испанию.

ВНИЗУ:
Лалита
на снимке
1999 года
во время ее
визита в НАСА
в связи
с выведением
на орбиту
телескопа,
названного
в честь ее мужа.



обычная подготовка лекции вылилась в книгу, представляющую собой лучший анализ произведения великого Ньютона, сделанный когда-либо.

Идеальный ученый должен быть историком, точно так же как идеальный историк должен быть ученым.

СУБРАМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

Он прочел *«Начала»* от корки до корки, повторил доказательства, теоремы, выводы и леммы, сделав особый упор на доказательствах, опущенных самим Ньютоном, поскольку тот считал их тривиальными. Чандра вновь открыл для себя выводы о форме Земли, приливах, брахистохроне и заново рассмотрел все темы, освещенные в *«Началах»*. Он воспроизвел рисунки, опущенные Ньютоном, но сохранившиеся в его черновиках, причем сделал это с такой точностью, что Лалита сказала: «Чандра, тебе удалось проникнуть в разум Ньютона и понять, как работал его мозг». А сам Чандрасекар говорил, что почти на каждой странице *«Начал»* открывает для себя что-то новое.

Часто для доказательств Чандра использовал дифференциальное исчисление. Он считал себя вправе так поступать, поскольку именно Ньютон изобрел этот метод. Хотя результат Чандры всегда совпадал с результатом Ньютона, доказательства иногда были разными. В этих случаях Чандра отмечал, что доказательства Ньютона всегда более изобретательные, простые и короткие. Ученый со всей полнотой оценил математическую элегантность Ньютона. Суть была даже не в том, что он сделал, а в том, *как* он это сделал.

Брат ученого Балакришнан рассказывал, что еще будучи подростком, Чандра говорил: «Боже, если бы я мог быть таким, как Ньютон!» Разве кто-то мог предположить, что уже в зрелые годы он, хотя и не станет таким, как Ньютон, но сможет созерцать течение его мыслей, повторяя их ход? Этот этап жизни Чандрасекара также нашел отражение в его книге *«Начала Ньютона для обыкновенного читателя»*. Чандра много читал,

особенно ему нравились биографии других ученых. Он считал, что полное знание науки требует и знания ее истории.

СЕРДЕЧНЫЕ ПРИСТУПЫ

Начиная с 1974 года здоровье Чандры начало ухудшаться. Однажды его пришлось увезти в больницу с сердечным приступом. По разговорам врачей он решил, что умирает. «Я почувствовал огромное спокойствие». Но затем это ощущение померкло: «Что будет с Лалитой?» Ее ожидали, конечно, не материальные проблемы, но полное одиночество. И эта мысль нарушила его спокойствие. Чандря больше не хотел умирать, хотя был готов сделать это так же, как и его друг Ферми и как Эйнштейн, — достойно, почти счастливо. Ученый никогда не боялся смерти. Вскоре Чандрасекару сделали сложную операцию по шунтированию трех клапанов, и он прекрасно себя чувствовал до нового, на этот раз смертельного сердечного приступа в 1995 году. Он не страдал, тело ученого было кремировано, а его пепел — развеян по кампусу Чикагского университета, в тех местах, которые выбрал он сам.

Во время лечения врачи запретили Чандре заниматься физикой, так что он смог послать на публикацию только две статьи! Вынужденное бездействие заставило его вспомнить о Шекспире. Еще с Кембриджа ученый думал, что было бы чудесно не только прочитать все произведения Шекспира, но и запомнить их. Однако для такого грандиозного плана его лечение оказалось слишком коротким.

В конце жизни ученый сказал: «Я не религиозен никоим образом. Я считаю себя атеистом». Он всегда добавлял к своим заявлениям об атеизме это словосочетание — «я считаю себя», — словно немного колебался в этом вопросе. После операции Чандрасекар много работал, причем даже над теми темами, которые считались бесплодными. Он изучал черные дыры и их устойчивость, перечитывал *«Начала»* Ньютона, понимая их ценность и математическую элегантность.

«Я остаюсь в науке ради удовольствия и, возможно, потому что не умею заниматься ничем другим». Как ни удивительно, Чандра не был удовлетворен тем, как протекает его жизнь: «Что я делаю здесь, такой старый? Почему я нервничаю, примут ли мою последнюю статью, хотя мог бы наслаждаться чтением Шекспира?»

Уже в глубокой старости Чандрасекар утверждал: «Я не думаю, что ученый — настоящий ученый — может иметь полноценную личную жизнь. Иногда я спрашиваю себя, все ли, что я сделал в своей жизни, заслуживало этого?»

По словам Юджина Паркера, которого называют отцом астрофизической магнитной гидродинамики (и это правильно, если считать Чандрасекара ее дедушкой), «эта смерть символизировала конец эры, в которой была разработана базовая звездная физика. Он был самым плодотворным и самым многогранным из всех, кто применил чистую физику к астрономическим проблемам». Или, как сказал Пенроуз, «никто не может знать всего, что он сделал».

У Чандры и Лалиты было растение, которое сначала цвело, а потом, несмотря на все их заботы, перестало. У него были красивые листья, но ни разу не появился ни один бутон. Однако после смерти Чандры растение будто возродилось, и на нем появились красивые цветы. Тогда Лалита подумала: «Чандр, ты цветешь для меня». Она назвала это растение «Мой вечный огонь».

Приложение

ПЛОТНОСТЬ И ЧИСЛО ЭЛЕКТРОНОВ НА ЕДИНИЦУ ОБЪЕМА ДЛЯ БЕЛОГО КАРЛИКА

Звезда может умереть как белый карлик, хотя ее состав может варьироваться и включать в себя углерод, азот, железо и другие элементы в качестве основных, в зависимости от того, когда именно произошло вырождение и сгорел ли какой-то из этих компонентов. При этом мы можем быть уверены в том, что запасы водорода и гелия к моменту смерти закончились. Как найти эквивалентную массу сочетания элементов? Она определяется по формуле

$$\rho = m \sum n_i = \sum (m_i n_i),$$

где m — эквивалентная масса, которую мы хотим найти. В сумме из n элементов преобладают электроны, поскольку высокая ионизация каждого элемента приводит к большому количеству электронов:

$$\sum n_i \approx n_e.$$

Но поскольку масса электрона ничтожна, электроны очень мало вносят во вторую часть суммы. Если обозначить доминирующий элемент как x , получится

$$\sum(m_i n_i) = m_x n_x.$$

Но $m_x \approx 2Z_x m_H$, где Z – атомные номера. С другой стороны, $n_e = Z_x n_x$, если ионизация полная. В итоге получается

$$\rho = 2 m_H n_e.$$

То есть эквивалентная масса в два раза больше массы водорода, несмотря на то что звезда уже не содержит водород. Заметьте, что результат не зависит от x . Следовательно, он не зависит от того, каким будет доминирующий элемент. Это даже может быть смесь различных элементов.

ПОЛИТРОПЫ

В полемике Эддингтона и Чандрасекара оппоненты полагали, что звезды можно рассматривать как политропы. Но политроп, предложенный Чандрасекаром для релятивистских белых карликов, отличался от политропа, который предполагал Эддингтон для белых карликов. Эддингтон вообще считал, что релятивистских белых карликов не существует. В любом случае понятие политропа часто используется как при рассказе об этой исторической дискуссии, так и при рассмотрении внутренней области звезд и объектов другого типа, которыми могут быть гало темной материи.

Но что такое политроп? И почему это математическое понятие так широко используется при рассмотрении внутренней области звезд? Дело в том, что это понятие предоставляет описание, справедливое для многих случаев и использующее упрощенные гипотезы. Сегодня предпочитают числовые решения, поиск которых доверяют компьютерам.

Предполагается, что в политропе давление и плотность связаны отношением вида

$$P = K \rho^{(n+1)/n},$$

где K — константа; n — политропный индекс. Если звезда допускает выражение этого типа, говорят, что эта звезда — политроп. Любопытно, что можно применять общий алгебраический подход к звездам с разным политропным индексом. На практике существуют по меньшей мере три экстремальные ситуации.

1. Звезда в конвективном адиабатическом равновесии. В ней энергия, произведенная благодаря ядерным реакциям, переносится на поверхность с помощью ячеек конвекции. Хороший пример — внешние слои звезды массой, подобной солнечной, поскольку на Солнце заметны геометрически правильные конвективные ячейки. Уравнение адиабатических звезд относится к политропному типу, и если звезда — это идеальный monoатомный газ, то политропный индекс равен $n = 1,5$.
2. Звезда со значимым давлением излучения. Это очень тяжелые звезды. Доказательство мы не приводим, хотя оно очень простое. В этом случае политропный индекс $n = 3$.
3. Полностью вырожденная электронная звезда, то есть случай нерелятивистских белых карликов. В рассмотренных нами формулах политропный индекс будет $n = 1,5$, как в звездах с конвективным переносом энергии.

Изотермическая атмосфера имеет политропный индекс, равный 0, поэтому для нее этот подход не используется.

Новшество, введенное Чандрасекаром, заключается в том, что полностью вырожденные звезды и релятивистский предел допускают политропную идеализацию, и, рассмотрев приведенные формулы, можно легко найти, что $n = 3$, как во втором случае, когда давлением излучения нельзя пренебречь.

Для всех политропов подходит уравнение Лейна — Эмдена. Чандрасекар тоже мог пользоваться этим уравнением. Он не делал этого в своем первом расчете, но применял его в дискуссиях с Эдингтоном и в своей диссертации. Необычно, что политропы с индексом 3 имеют очень своеобразные физические харак-

теристики, неприемлемые для интуитивного понимания и по-этому отвергнутые Эддингтоном.

Список рекомендуемой литературы

- BATTANER, E., *Introducción a la astrofísica*, Madrid, Alianza Editorial, 1999. —: *Física de las noches estrelladas*, Madrid, Alianza Editorial, 2011. —: *¿Qué es el Universo? ¿Qué es el hombre?*, Madrid, Alianza Editorial, 2011.
- FERRIS, T., *La aventura del universo*, Barcelona, Crítica, 2007.
- GALADÍ, D., *Cuestiones curiosas de astronomía resueltas por el perito en lunas*, Madrid, Alianza Editorial, 2014. —: *A ras de cielo*, Barcelona, Ediciones B, 1998.
- GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.
- GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.
- KRAGH, H., *Historia de la cosmología*, Barcelona, Crítica, 2008.
- LARA, L., *Introducción a la física del cosmos*, Granada, Editorial Universidad de Granada, 2007.
- MITTON, S. Y OSTRIKER, J., *El corazón de las tinieblas. Materia y energía oscuras*, Barcelona, Editorial Pasado y Presente, 2014.
- PENROSE, R., *Ciclos del tiempo: Una extraordinaria nueva visión del universo*, Barcelona, Debate, 2010.
- THORNE, K.S., *Agujeros negros y tiempo curvo*, Barcelona, Crítica, 2000.

Указатель

- Абердин 111
Альгамбра 136, 153
Амбарцумян, Виктор 15, 63–65,
89, 99, 134, 135, 141
Андалусийский институт астро-
физики 135
«Астрофизический журнал» (*ApJ*)
13, 15, 64, 117–124, 132–134,
145
атеизм 155
атомная бомба 100, 111

Бете, Ханс 31, 67, 109, 111
Бетховен, Людвиг ван 12, 54, 152
Бозе, Сатьендра Нат 23, 24, 28,
29, 99
Бозе – Эйнштейна статистика 23,
28, 99
бозон Хиггса 28
бозоны 23, 28
Большой взрыв 42, 143
Бор, Нильс 15, 26, 56, 59, 69, 100
Борн, Макс 15, 56, 100
бронниковское движение 10, 128
- Вигнер, Юджин Пол 110
Вина закон смещения 37, 96
внутренняя область звезды 47, 54,
55, 71, 74, 114, 158
возраст (жизнь) Вселенной 42, 43,
48, 126, 127
время релаксации 126, 127
вырождение 65, 66, 68, 72, 76–78,
102, 157

галактика 11, 73, 96, 105, 114, 115,
124–128
Ганди, Махатма 27, 30, 53
Гарвард 15, 88
Гаусс, Карл Фридрих 56
Гейзенберг, Вернер 17, 25–27, 56,
81, 100
Герцшпрунга – Расселла (Г-Р)
диаграмма 35, 113
Гётtingен 15, 26, 56, 59, 100, 110
гидродинамика 10, 101, 105, 111,
145
гравитационные волны 148
Гранада 135–136

- давление
излучения 67, 103, 159
ферми-газа 72, 75, 76, 102–104
- Джинс, Джеймс Хопвуд 62, 133, 141, 146
- Дирак, Поль 24–30, 53–56, 58, 65, 69, 82, 99, 115
- де Бройля длина волны де Бройля 77, 78
- звезда 8, 11, 17, 30–49, 59–63, 65, 67, 68, 70–76, 81–83, 91–95, 97, 101–103, 105, 124–128, 141, 144, 148, 150, 157–159
белый карлик 8–10, 27, 30, 31, 35, 38, 48, 49, 61, 62, 65, 70–79, 81–83, 89, 92–95, 97–103, 147, 157–159
- Вольфа – Райе 71, 101
- время жизни 41, 43, 47
- вырожденная 76, 94, 102, 159
- главной последовательности 31, 35, 37–39, 43, 44, 47, 48, 65, 67, 71, 74, 92, 94, 97, 102
- коричневый карлик 104
- красный гигант 35, 38, 75, 94
- нейтронная 63, 72, 73, 101–103
- релятивистский белый карлик 63, 65, 74, 83, 94, 95, 97, 98, 158
- черный карлик 71, 74, 75, 79, 102
- звездная атмосфера 10, 11, 33, 38, 55, 114, 159
- звездная динамика 10, 11, 114, 128, 135
- звездная (спектральная) классификация 32–35
- звездная эволюция 17, 31, 42, 67, 70, 71, 75, 76, 83, 101, 102
- Зельдович, Яков 135
- Зоммерфельд, Арнольд 17, 24–27, 29, 30, 61, 100
- Йеркс 8, 9, 15, 87–89, 105, 107, 109, 111–114, 116–119, 129, 132
- Каталан, Мигель 26
- квазар 67, 122
- Кельвина
- время 41
механизм 39, 41, 42, 44, 74
- Кембридж 8, 15, 20, 22, 27, 29–31, 49, 51–62, 67–69, 75, 85, 87, 88, 90, 95, 99, 110, 150, 155
- Кендлстикмакер 123
- Кеплер, Иоганн 36, 39, 141
- Керра черная дыра 12, 147
- Койпер, Джерард 68, 90, 107, 108, 115
- Комас Сола, Хосе 108
- Копенгаген 15, 56, 59, 90, 100
- Кришнан, Кариаманиккам
- Сриниваза 24, 25, 27
- Лалитамбика (Лалита) 15, 22, 29, 45, 56, 85–87, 89–91, 107, 108, 111, 114, 124, 131–135, 153–156
- Лахор 15, 19, 21, 88
- Леметр, Жорж 58, 67
- Лифшиц, Евгений 135
- магнитная гидродинамика 111, 133, 145, 156
- магнитное поле 27, 115, 123, 128, 141, 143, 144
- Мадрас 15, 17, 19, 21, 22, 25, 26, 29, 30, 52, 56, 58, 85, 88, 90
- Максвелла – Больцмана статистика 28, 99, 125, 126
- Манхэттенский проект 56, 110, 111

- микроволновое космическое излучение 37
- Милн, Эдуард Артур 30, 52, 54, 55, 61–62, 65–67, 88, 90, 152
- Моран Саманьего, Франсиско 146
- Морган, Уильям 108, 118, 119
- намагниченный флюид 12, 144
- Нейман, Джон фон 103, 109–111
- Неру, Джавахарлал 23, 30, 136, 137
- неустойчивости 12, 71, 73, 101, 140, 145, 148
- Нобелевская премия 8, 9, 11, 15, 19, 23, 25, 27, 29, 30, 31, 45, 57, 64, 95, 112, 138, 139
- остаток сверхновой 72, 73
- отношение масса – светимость 47, 67
- Паркер, Юджин 121, 145, 156
- Паули, Вольфганг 23, 25, 26, 28, 58, 69, 76, 99, 101
- Пенроуз, Роджер 10, 147–151, 156
- перенос лучистой энергии 10, 63, 111, 134, 140–143
- плазмы 115, 144
- планетарная туманность 71, 101, 102
- политропный индекс 158, 159
- политропы 15, 29, 60, 65, 68, 158–160
- предел
- Ландау – Оппенгеймера – Волкова 63, 72, 73, 102, 103
- Чандрасекара 8, 15, 28, 30, 31, 45, 52, 55, 63, 65, 67, 70, 71, 74, 83, 89, 95, 97, 98, 123, 138, 140, 147
- Эдингтона 67, 104
- принцип запрета Паули 23, 28, 76, 99, 101
- неопределенности Гейзенберга 81, 100
- Раман, или Чандрасекхара
- Венката Раман 19, 21, 23–25, 27, 29, 45, 86–88
- спектр 24
- Рамана эффект 19, 25
- Рамануджан, Сриниваса 25, 29, 109, 111
- Расселл, Генри Норрис 35, 62, 66, 113, 114
- Реболо, Рафаэль 104
- Резерфорд, Эрнест 30, 61
- Сапатеро, Мария Рока 104
- Саха, Мегнад 23, 24, 28, 29, 88
- сверхновая 43, 71–74, 96, 103, 148
- солитон 63
- спектр 24, 26, 32–37
- Спирцер, Лайман 119
- Стеббинс, Джоэль 144
- Стефана – Больцмана постоянная 36, 38
- Стокс, Джордж Габриэль 142, 143
- стохастические процессы 110
- Стрёмгрен, Бенгт 90
- строение
- галактики 114
- звезд 10, 31, 60, 64, 81, 91, 92, 140
- Струве, Отто 88, 90, 107, 108, 116–118
- Тагор, Рабиндранат 21, 23, 140
- Теллер, Эдвард 56, 109–111, 132
- темная энергия 31
- теория относительности 11, 26, 39, 60, 64, 66, 67, 72, 100, 116, 133, 135, 147–150, 152

- Уильямс-Бэй 90, 107, 129, 132, 134
уравнение состояния 46, 66, 77, 79, 81, 81, 92–96
- Фаулер, Ральф Говард 27, 30–32, 51–55, 59–61, 65, 68, 71, 75, 82
- Ферми, Энрико 25–27, 30, 58, 65, 72, 75, 76, 82, 99, 101–103, 111, 115, 133, 155
- Ферми – Дирака статистика 26–28, 30, 58, 65, 82, 99, 101, 115
- фермионы 28, 58, 72, 75, 79–81, 101, 102
- Хаббл, Эдвин 88, 111, 133
- Хатчинс, Роберт 107, 108, 114
- Чандра Вилас 22, 86, 87
- черная дыра 11, 12, 37, 72, 73, 91, 96, 102, 129, 133, 139, 140, 144, 147, 148, 150, 155
- черное тело 35–37, 39, 81, 96, 141
- Чикаго 8, 13, 15, 20, 24, 107, 111, 114, 117–119, 123, 129, 132–134, 144, 149–151, 155
- Шварцшильд, Мартин 109, 117, 119, 126, 147
- Шварцшильда эллипсоид 127
- Шекспир, Уильям 12, 21, 120, 151, 152, 155, 156
- Шепли, Харлоу 15, 62, 88, 133
- Шмидт, Мартен 122
- Эддингтон, Артур Стэнли 8, 9, 11, 15, 28–31, 47, 49, 54, 55, 57, 59–61, 64–71, 72, 74, 75, 82, 88, 90, 95, 99, 103, 113, 114, 116, 133, 147, 152, 158, 160
- OBAFGKMRNS 34

Уважаемый читатель!

Вы держите в руках заключительный выпуск коллекции «Наука. Величайшие теории».

Благодарим Вас за интерес, проявленный к изданию!

Мы надеемся, что Вы с удовольствием собрали коллекцию книг о том, как устроен мир вокруг нас!

Нам очень важно узнать Ваше мнение об этой коллекции, а также Ваши идеи и предложения по новым изданиям. Это поможет создать

увлекательные и полезные серии журналов и книг, которые будут интересны Вам и другим читателям.

Мы будем благодарны, если Вы заполните анкету на сайте www.nauka.deagostini.ru или отправите нам анкету, которая приложена к этой книге.

С уважением,
издатель

Наука. Величайшие теории
Выпуск № 50, 2015
Еженедельное издание

РОССИЯ

Издатель, учредитель, редакция:
ООО «Де Агостини», Россия
Юридический адрес: Россия, 105066,
г. Москва, ул. Александра Лукьянова,
д. 3, стр. 1
Письма читателей по данному адресу
не принимаются.

Генеральный директор: Николаос Скилакис
Главный редактор: Анастасия Жаркова
Финансовый директор: Полина Быстрова
Коммерческий директор: Александр Якутов
Менеджер по маркетингу: Михаил Ткачук
Младший менеджер по продукту:
Елизавета Чижикова

Для заказа пропущенных выпусков
и по всем вопросам, касающимся
информации о коллекции, обращайтесь
по телефону «горячей линии» в Москве:
+7 8-495-660-02-02
Телефон бесплатной «горячей линии»
для читателей России:
+7 8-000-200-02-01

Адрес для писем читателей:

Россия, 150961, г. Ярославль, а/я 51,
«Де Агостини», «Наука. Величайшие
теории»

*Пожалуйста, указывайте в письмах свои кон-
тактные данные для обратной связи (теле-
фон или e-mail).*

Распространение: ООО «Бурда Дистрибу-
шн Сервисиз»

Свидетельство о регистрации СМИ в Феде-
ральной службе по надзору в сфере связи, ин-
формационных технологий и массовых ком-
муникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-
56146 от 15.11.2013

УКРАИНА

Издатель и учредитель:
ООО «Де Агостини Паблишинг», Украина
Юридический адрес:
01032, Украина, г. Киев, ул. Саксаганского,
119
Генеральный директор: Екатерина Клименко

Для заказа пропущенных выпусков
и по всем вопросам, касающимся информа-
ции о коллекции, обращайтесь по телефону
бесплатной горячей линии в Украине:

+7 0-800-500-8-40

Адрес для писем читателей:

Украина, 01033, г. Киев, а/я «Де Агостини»,
«Наука. Величайшие теории»
Україна, 01033, м. Київ, а/с «Де Агостіні»

Свидетельство о регистрации печатного
СМИ Государственной регистрационной
службой Украины
КВ № 20525-10325Р от 13.02.2014

БЕЛАРУСЬ

Импортер и дистрибутор в РБ:

ООО «Росчерк», 220037, г. Минск,
ул. Авангардная, 48а, литер 8/к,
тел./факс: + 375 (17) 331 94 41

Телефон «горячей линии» в РБ:

+375 17 279-87-87

(пн-пт, 9.00–21.00)

Адрес для писем читателей:

Республика Беларусь, 220040, г. Минск,
а/я 224, ООО «Росчерк», «Де Агостины»,
«Наука. Величайшие теории»

КАЗАХСТАН

Распространение:

ТОО «Казахско-Германское предприятие
БУРДА-АЛАТАУ ПРЕСС»

Казахстан, г. Алматы, ул. Зенкова, 22
(уг. ул. Гоголя), 7 этаж.

+7 727 311 12 86, +7 727 311 12 41
(вн. 109), факс: +7 727 311 12 65

Издатель оставляет за собой право изменять
розничную цену выпусков. Издатель остав-
ляет за собой право изменять последователь-
ность выпусков и их содержание.

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного
электронного оригинал-макета
в ООО «Ярославский полиграфический
комбинат»

150049, Ярославль, ул. Свободы, 97

Формат 70 x 100 / 16.

Гарнитура Petersburg

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Печ. л. 5,25. Усл. печ. л. 6,804.

Тираж: 20 000 экз.

Заказ № 1514790.

© Eduardo Battaner López, 2015 (текст)

© RBA Coleccionables S.A., 2015

© ООО “Де Агостины”, 2014–2015

ISSN 2409-0069



Данный знак информационной про-
дукции размещен в соответствии с требова-
ниями Федерального закона от 29 декабря
2010 г. № 436-ФЗ «О защите детей от ин-
формации, причиняющей вред их здоровью
и развитию».

Коллекция для взрослых, не подлежит обя-
зательному подтверждению соответствия
единным требованиям установленным Тех-
ническим регламентом Таможенного союза
«О безопасности продукции, предназначенн-
ной для детей и подростков» ТР ТС 007/2011
от 23 сентября 2011 г. № 797

Дата выхода в России 19.12.2015

Субраманьян Чандрасекар – ученый-теоретик и один из самых выдающихся астрофизиков XX века. Самое любопытное, что этот индиец, ставший гражданином США, почти никогда не смотрел на небо в телескоп, но стал автором огромного количества книг, в которых раскрыл многие секреты, ревностно хранимые Вселенной. Особое место среди его работ занимают труды по определяющим физическим процессам при образовании и эволюции звезд, включая так называемый предел Чандрасекара – максимально возможную массу белого карлика.

ISSN 2409-0069



00050

Scan: Gencik

9 772409 006778

Рекомендуемая розничная цена: 289 руб.

12+