

КНИГИ ПОЛИТЕХА

Научно-популярное издание

ВСЕЛЕННАЯ

**Краткий путеводитель по пространству
и времени: от Солнечной системы до
самых далеких галактик и от Большого
взрыва до будущего Вселенной**

СЕРГЕЙ ПОПОВ

УДК 524.8
ББК 22.632

Данная книга издана в рамках совместного
проекта Политехнического музея
и издательства ООО «Альпина нон-фикшн»

ПОЛИТЕХ АНО

Научный редактор
Анатолий Засов,
доктор физико-математических наук
Редактор
Дмитрий Мамонтов

П58 Попов С.
Вселенная. Краткий путеводитель по пространству и времени:
от Солнечной системы до самых далеких галактик и от Большого
взрыва до будущего Вселенной / Сергей Попов. — М.: Альпина нон-
фикшн, 2018. — 400 с.

ISBN 978-5-91671-726-6

УДК 524.8
ББК 22.632

Современная астрофизика — быстро развивающаяся наука, которая использует новейшие (и очень дорогие) приборы и суперкомпьютеры, дополняющие и меняющие астрономическую картину мира. Сегодня мы знаем, что живем в расширяющейся Вселенной, чей возраст составляет немногим менее 14 млрд лет. Нам известно, как синтезировались и синтезируются ядра элементов. Мы можем наблюдать разные стадии формирования звезд и планетных систем. Удастся даже разглядеть, как в дисках вокруг звезд образуются планеты. Тем не менее остается много вопросов и загадок. Что такое темное вещество и темная энергия? Как взрываются сверхновые разных типов? Как устроены черные дыры? Наконец, есть ли где-то еще жизнь во Вселенной и какой она может быть? В этой книге известный российский астрофизик и популяризатор науки Сергей Попов систематизирует сложившиеся научные представления о Вселенной и одновременно обращается к новейшим открытиям и нерешенным вопросам.

ISBN 978-5-91671-726-6

© ФОНД РАЗВИТИЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО МУЗЕЯ, 2018
© ООО «АЛЬПИНА НОН-ФИКШН», 2018

Содержание

Предисловие	15
Благодарности	19
Глава 1	
Солнце	21
1.1	Строение Солнца и условия в недрах 23
1.2	Реакции в Солнце. Нейтрино 26
1.3	11-летний цикл активности 30
1.4	Солнечные пятна, протуберанцы и все-все-все 34
1.5	Солнечная корона и затмения 37
1.6	Гелиосейсмология 41
1.7	Солнечные вспышки и их опасность 45
1.8	Эволюция Солнца и жизнь на Земле 50
Глава 2	
Солнечная система	57
2.1	Образование Солнечной системы 59
2.2	Планеты и их спутники 63
2.3	Астероиды 68
2.4	Пояс Койпера, Плутон и компания 73
2.5	Кометы и облако Оорта 77
Глава 3	
Экзопланеты	83
3.1	Способы обнаружения и изучения экзопланет 85
3.2	Основные типы экзопланет 90
3.3	Формирование и миграция планет 94

Глава 4

	Звезды и их эволюция	103
4.1	Расстояния до звезд	105
4.2	Устойчивость звезд и их структура	108
4.3	Диаграмма Герцшпрунга — Рассела. Цефеиды	111
4.4	Двойные и кратные звезды. Аккреция	116
4.5	Образование звезд. Три населения	121
4.6	Смена термоядерных реакций	124
4.7	Сверхновые	128

Глава 5

	Синтез элементов и термоядерные реакции	135
5.1	Первичный состав. Реакции в ранней Вселенной. Первые звезды	137
5.2	Химическая эволюция Вселенной. Звезды	139

Глава 6

	Компактные объекты: белые карлики и нейтронные звезды	147
6.1	Белые карлики	149
6.2	Нейтронные звезды	154

Глава	7		
		Черные дыры	161
7.1	Природа черных дыр. Коллапс		163
7.2	Кандидаты в черные дыры в тесных двойных системах		167
7.3	Сверхмассивные черные дыры		170
7.4	Первичные черные дыры и испарение Хокинга		175
Глава	8		
		Наша Галактика	179
8.1	Структура Галактики		181
8.2	Наше место в Галактике и структура наших окрестностей		185
8.3	Природа спиральных рукавов		188
8.4	Рассеянные и шаровые скопления		191
8.5	Сверхмассивная черная дыра — Sgr A*		195
8.6	Спутники Галактики. Местная группа		197
Глава	9		
		Межзвездная среда	201
9.1	Межзвездный газ и пыль. Состав среды		203
9.2	Поглощение света		206
9.3	Круговорот вещества в межзвездной среде		208
9.4	Межзвездные магнитные поля		210

Глава 10

Мир галактик 215

10.1	Типы галактик	217
10.2	Образование и взаимодействие галактик	222
10.3	Сверхмассивные черные дыры и активные ядра	226
10.4	Скопления галактик и крупномасштабная структура	231

Глава 11

Расширение Вселенной 237

11.1	Разбегание галактик. Закон Хаббла	239
11.2	Горизонт частиц и горизонт событий. Возраст Вселенной	242
11.3	Космологическое красное смещение	244
11.4	Геометрия Вселенной	246
11.5	Состав Вселенной. Темное вещество	249
11.6	Ускоренное расширение Вселенной. Темная энергия. Будущее Вселенной	253
11.7	Стадия инфляции	257
11.8	Ранняя Вселенная	260

Глава 12

Реликтовое излучение 265

12.1	Модель горячего Большого взрыва	267
12.2	Космологические данные по наблюдению реликта	269
12.3	Измерение температуры реликта в разные эпохи	272
12.4	Спектр первичных возмущений	273

Глава	13		
		Телескопы	277
13.1	Принцип работы телескопа		279
13.2	Рефракторы и рефлекторы		283
13.3	Современные оптические телескопы и проекты ближайшего будущего		286
13.4	Радиотелескопы		290
13.5	Рентгеновские телескопы		294
13.6	Гамма-телескопы на Земле и в космосе		299
13.7	Детекторы нейтрино		303
13.8	Детекторы космических лучей		308
13.9	Детекторы гравитационных волн		313
Глава	14		
		Космические исследования	321
14.1	Наблюдения из космоса. Космические телескопы		323
14.2	Полеты к телам Солнечной системы		329
14.3	Изучение Земли из космоса и исследования околоземного пространства		334
14.4	Пилотируемая космонавтика		337
Глава	15		
		Компьютеры в астрономии	343
15.1	Управление инструментами, телескопы-роботы		345
15.2	Обработка данных. Big data		348
15.3	Численный эксперимент и моделирование		353
15.4	Виртуальная обсерватория		358

Глава 16

Жизнь во Вселенной 361

16.1 Жизнь в Солнечной системе 363

16.2 Жизнь на экзопланетах 367

16.3 Двойники Земли. Зона обитаемости. Биомаркеры 371

16.4 Другие формы жизни 377

16.5 SETI 380

Эпилог 387

Рекомендуемая литература 389

Моим учителям и ученикам

Предисловие

Астрономия — одна из самых быстро развивающихся наук наших дней. Поток результатов чрезвычайно велик: каждый месяц появляется более тысячи новых публикаций. Во многом это связано с вводом в строй новых наземных телескопов, с запуском космических аппаратов и с ростом производительности компьютеров. Поэтому довольно часто прямо на наших глазах совершаются важные открытия или появляются теоретические работы, которые заметно влияют на существенные детали нашего научного описания мира. Эта книга является скромной попыткой зафиксировать общий вид астрономической картины мира на середину 2017 г. Безусловно, дальнейшее развитие науки приведет к необходимости уточнять, а иногда и перерисовывать разные части этого полотна. Однако, надеюсь, какое-то время данный томик будет оставаться актуальным описанием того, какими астрономы видят Вселенную и ее обитателей — астрономические объекты.

Современная астрономия, которой посвящена данная книга, — это в основном астрофизика, наука о природе небесных тел. Она изучает свойства космических объектов: как устроены звезды, планеты, галактики, какие физические процессы определяют их наблюдательные проявления. Мы последовательно рассмотрим все важнейшие типы наблюдаемых астрономических источников — от объектов Солнечной системы до мира галактик, не забудем также про межзвездную среду и синтез элементов, а затем перейдем к космологии. Кроме того, разберемся, как именно получают все эти данные, с помощью каких инструментов и аппаратов наблюдатели изучают далекие источники, прямые эксперименты с которыми попросту невозможны. Наконец, мы получим представление о работе современного астронома, которого сейчас скорее можно увидеть перед экраном компьютера, чем у окуляра телескопа. А «на десерт» представим рассказ о поиске жизни во Вселенной и различных формах, которые она может принимать.

По ходу изложения я постарался по возможности обойтись без формул, таблиц и графиков. Мне кажется, что важно попробовать рассказать о ключевых физических процессах и астрономических явлениях просто словами (даже если они не всегда простые, а изложение зачастую получается чересчур сжатым из-за ограниченного объема). Но читатель должен понимать, что это неизбежно приводит к существенному упрощению: мир устроен слишком сложно, чтобы его было возможно полностью описать привычными понятиями. Галилею

принадлежит знаменитое изречение: «Философия написана в величественной книге (я имею в виду Вселенную), которая постоянно открыта нашему взору, но понять ее может лишь тот, кто сначала научится постигать ее язык и толковать знаки, которыми она написана. Написана же она на языке математики, и знаки ее — треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без которых человек не смог бы понять в ней ни единого слова; без них он был бы обречен блуждать в потемках по лабиринту». Поэтому словесное описание физических процессов всегда является неполным, и для получения более детальной информации нужно обратиться к другим источникам, в том числе к научным статьям, обзорам и монографиям (ссылки на некоторые из них приведены в конце книги).

Книга состоит из 16 глав, которые делятся на 79 разделов. Текст можно читать как подряд от начала до конца, так и выбирая отдельные части. Кое-где это неизбежно привело к смысловым повторам, которые заметит внимательный читатель, зато это позволяет более удобно использовать книгу и как справочник для уточнения отдельных фактов. Так что, надеюсь, вы будете возвращаться к тексту даже после того, как прочтете его в первый раз.

Хотя детальное описание некоторых важных понятий содержится только в тематических разделах, соответствующие термины могут встречаться в разных частях книги (например, при описании галактик упоминаются темная материя и темная энергия, хотя подробный рассказ об этих понятиях читатель найдет ниже, в разделе о космологии). Если по ходу чтения какой-то термин покажется непонятным, можно быстро посмотреть его значение в соответствующем разделе или обратиться к бумажным или онлайн-словарям астрономических терминов, которые перечислены в разделе «Рекомендуемая литература».

Каждой главе предшествует краткое введение с упоминанием основных вопросов, а в тексте выделяются ключевые факты и понятия. Надеюсь, эти заметки будут полезны и после того, как вы прочтете книгу, когда понадобится что-то вспомнить или уточнить. Но не надо стесняться делать и свои пометки, выделяя важное, непонятное, а может быть, на ваш взгляд, и ошибочное: с этой книгой можно работать с карандашом в руках.

Эта книга, безусловно, не является учебником. Однако она дает целостное упорядоченное описание наших представлений о Вселенной и о методах ее исследования. Книга может послужить своего рода хрестоматией, важным дополнением к школьному курсу астрономии, а отдельные части будут полезны при преподавании курсов естествознания, в том числе и на вузовском уровне. Надеюсь, что любители астрономии и посетители астрономических кружков также найдут для себя много интересного и полезного, тем более что наличие базовых

астрономических знаний поможет легче и лучше разобраться в ряде деталей. И, конечно, весь представленный материал может послужить основой для того, чтобы с большим пониманием и удовольствием читать многочисленные современные научно-популярные книги по астрофизике (включая космологию, исследование Солнечной системы и вопросы поиска жизни во Вселенной). Поэтому, если вы хотите понять физику небесных тел несколько глубже, чем это обычно излагается в массовой популярной литературе, но не готовы сразу разбираться со множеством сложных формул, то эта книга для вас.

Книга не является такой уж простой. Но ведь и мир устроен сложно. Итак, взглянем на Вселенную!

Благодарности

После появления первой версии текста издательство «Альпина нон-фикшн» сделало все возможное, чтобы рукопись стала настоящей книгой, доступной большому числу читателей. Я благодарен сотрудникам АНФ за их труд.

Отдельные главы и параграфы были просмотрены моими коллегами из ГАИШ Леонидом Зотовым, Александром Петровым, Георгием Рудницким и Алексеем Топоренским. Их комментарии помогли сделать книгу лучше.

Особая благодарность Дмитрию Вибе, тщательно прочитавшему весь первоначальный вариант рукописи и сделавшему массу важных замечаний, учет которых помог избежать некоторых ошибок и неточностей.

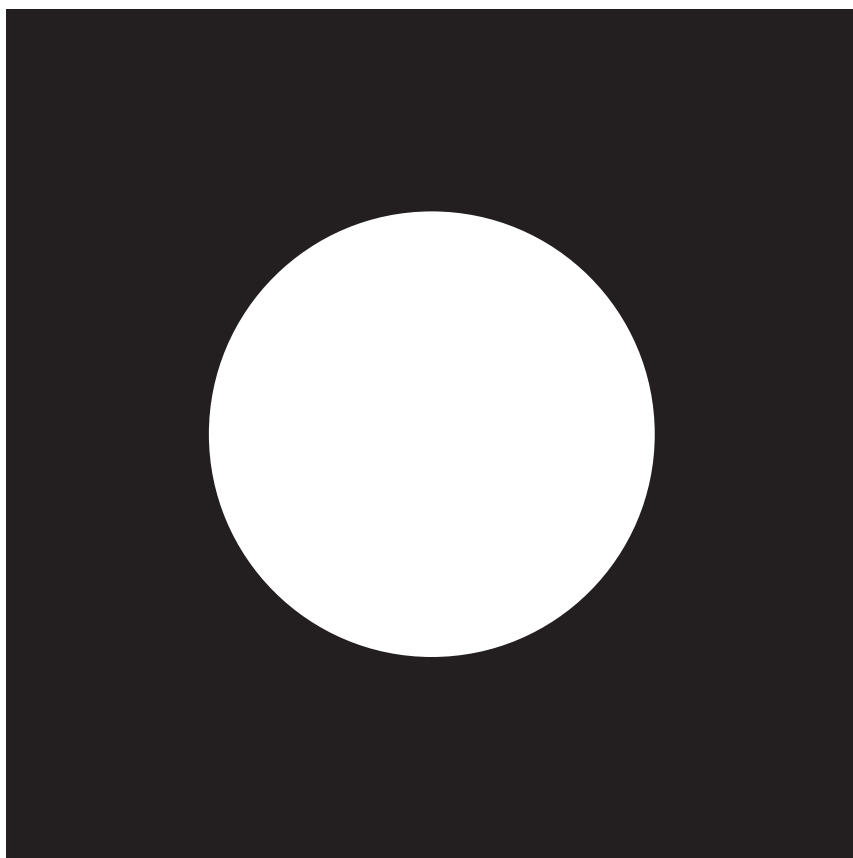
Многие мои коллеги консультировали меня по отдельным вопросам. Не имея возможности перечислить их всех, отмечу Сергея Блиникова, Юрия Ковалева и Константина Постнова.

Скрупулезная работа научного редактора книги Анатолия Владимировича Засова и редактора Дмитрия Мамонтова привела к радикальному улучшению всего текста как с точки зрения точности и достоверности, так и с точки зрения подачи материала. Ими был проделан очень большой объем работы, требующей глубоких знаний и внимания к деталям.

Во всех оставшихся недочетах прошу винить автора.

Работа над книгой заняла полтора года, и я признателен моей супруге Сусанне за поддержку и помощь в течение всего этого времени. Отдельное спасибо моим соавторам по научной работе и студентам, общение с которыми помогало прояснить некоторые вопросы и которые не могли не ощутить, что более года что-то сильно отвлекало меня от науки.

Я бы хотел посвятить эту книгу своим учителям и ученикам. Приятно чувствовать себя звеном в цепи создания, накопления и передачи новых знаний. К счастью, когда делишься знаниями, их становится только больше.



Глава 1

СОЛНЦЕ

1.1	Строение Солнца и условия в недрах	23
1.2	Реакции в Солнце. Нейтрино	26
1.3	11-летний цикл активности	30
1.4	Солнечные пятна, протуберанцы и все-все-все	34
1.5	Солнечная корона и затмения	37
1.6	Гелиосейсмология	41
1.7	Солнечные вспышки и их опасность	45
1.8	Эволюция Солнца и жизнь на Земле	50

Солнце — это звезда Главной последовательности, т. е. в ее недрах идет стабильный процесс превращения водорода в гелий путем цепочки реакций, в результате которых четыре протона превращаются в альфа-частицу. При этом выделяется энергия в виде кинетической энергии частиц, квантов электромагнитного излучения (фотонов) и нейтрино. Фотоны также возникают в результате аннигиляции электронов и рождающихся в реакциях позитронов. Нейтрино слабо взаимодействуют с веществом и поэтому свободно покидают недра Солнца. Регистрируя эти частицы, мы можем получить прямую информацию о происходящих в недрах Солнца термоядерных реакциях. Энергия фотонов и кинетическая энергия образующихся частиц нагревают недра звезды, позволяя ей противостоять силам гравитации, которые стремятся сжать звезду.

Солнце имеет радиус около 696 000 км, масса его составляет примерно 2×10^{30} кг. Температура поверхности составляет 5800 К, а светимость (мощность солнечного излучения) — $3,86 \times 10^{26}$ Дж/с. Расстояние от Земли до Солнца составляет примерно 150 млн км, свет проходит его за 8 минут с небольшим. На небе Солнце имеет угловой размер около половины градуса. Возраст Солнца равен примерно 4,6 млрд лет, а полная продолжительность его жизни составляет около 12 млрд лет. В конце своего пути, пройдя стадию красного гиганта и «горения» гелия в ядре, наша звезда станет углеродно-кислородным белым карликом.

1.1

Строение Солнца и условия в недрах

Устойчивость Солнца и его структура определяются выделением и переносом энергии, источником которой являются реакции превращения водорода в гелий. Для обеспечения стабильного протекания термоядерных реакций необходимы достаточно высокая температура и плотность. В центральной части Солнца плотность составляет более 100 г/см^3 , а температура превосходит 10^7 К . И плотность, и температура уменьшаются по мере продвижения к поверхности.

Структура Солнца связана с переносом энергии от горячих плотных недр к более холодным и менее плотным поверхностным слоям.

Термоядерные реакции идут в ядре, которое занимает около четверти солнечного радиуса. Вокруг ядра расположена горячая (несколько миллионов градусов) и потому достаточно прозрачная для излучения так называемая лучистая зона, простирающаяся до примерно 70–75% радиуса Солнца. Перенос энергии в этой области происходит с помощью излучения, при этом в процессе распространения фотоны многократно поглощаются и переизлучаются в случайном направлении. Поэтому от рождения фотона до покидания им Солнца (с учетом всех актов поглощения и излучения) проходит в среднем около 170 000 лет.

Во внешних слоях температура вещества падает (до пары миллионов градусов), и оно становится непрозрачным для излучения. При этом возрастает градиент температуры и начинается перенос энергии в этих слоях за счет конвекции. Конвективная зона занимает внешние 25–30% звезды, и ее наличие приводит к появлению нескольких видов солнечной активности. Такие образования, как гранулы, солнечные пятна, факельные поля и некоторые другие, обязаны своим происхождением магнитогидродинамическим процессам в конвективной зоне.

Солнце вращается вокруг своей оси, но не как твердое тело, поскольку оно является газовым (плазменным) шаром. Скорость вращения в конвективной зоне различна на разной глубине и разных широтах. Приповерхностные слои в экваториальных областях делают один оборот за 25 дней, а в полярных — за 38 дней. По мере

продвижения внутрь Солнца, к границе конвективной и лучистой зон, угловые скорости вращения выравниваются. Лучистая зона и ядро вращаются уже как твердое тело с периодом около 27 дней. Профиль скорости вращения на разных глубинах и широтах, как и многие другие свойства солнечных недр, в настоящее время с достаточной точностью измеряется методами гелиосейсмологии — раздела астрофизики, изучающего колебания Солнца.

Во внутренней структуре Солнца выделяют ядро, зону лучистого переноса энергии и зону конвективного переноса.

Наличие конвективной оболочки приводит к возбуждению колебаний во внешних слоях Солнца. Эти колебания распространяются внутрь и по сути зондируют недра Солнца, отражаясь от глубинных слоев и проявляясь в виде сложных пульсационных движений поверхности (фотосферы) с периодами в несколько минут и более и различными угловыми масштабами.

По характеру этих пульсаций можно определить физические параметры внутренних слоев нашей звезды.

В строении Солнца выделяют три внешние зоны: фотосферу, хромосферу и корону. Фотосфера является видимой поверхностью Солнца (которое представляет собой газовый шар и потому не имеет твердой поверхности). В этом тонком слое толщиной всего лишь около 300 км атмосфера Солнца становится непрозрачной в видимом диапазоне для внешнего наблюдателя. На разных длинах волн непрозрачность достигается на разной глубине: в ультрафиолетовом диапазоне это происходит во внешних слоях фотосферы, где видимая поверхность Солнца имеет более низкую температуру, чуть менее 5000 К, а в видимом и инфракрасном — в нижних слоях фотосферы, где температура несколько выше (более 6500 К).

В спектре фотосферы наблюдается огромное количество линий, позволяющих с высокой точностью определять физические условия и состав вещества. Поэтому долгое время именно фотосфера служила основным источником информации о свойствах Солнца.

Внешние, «атмосферные», слои Солнца подразделяют на фотосферу, хромосферу и корону.

Между фотосферой и самой внешней частью солнечной атмосферы — короной — находится так называемая хромосфера. Ее назвали так из-за того, что на изображениях Солнца во время затмений выглядит как окрашенный ореол вокруг фотосферы. Цвет возникает благодаря эмиссионным линиям (прежде всего,

водородным) солнечного излучения. Хромосфера имеет толщину несколько тысяч километров и эффективно нагревается плазменными волнами. Поэтому температура в ней быстро растет по мере удаления от поверхности звезды: от 5000 К (температура верхней фотосферы) до примерно 35 000 К. А на высоте несколько тысяч километров температура резко возрастает до миллиона градусов — температуры короны.

Солнечная корона хорошо видна во время затмения. Она визуально прослеживается на несколько солнечных радиусов и характеризуется очень низкой плотностью (поэтому ее невозможно увидеть на фоне дневного неба), но очень высокой температурой. Вид короны сильно зависит от солнечной активности в данный момент. На больших расстояниях корона постепенно переходит в солнечный ветер.

Стабильность полной светимости Солнца связана со стабильностью его внутренней структуры.

Несмотря на различные проявления поверхностной активности, полная светимость Солнца, в основном приходящаяся на оптический диапазон, крайне стабильна. Это связано со стабильностью внутренней структуры, которая поддерживается за счет равновесия сил гравитации и сил давления (газа и излучения). Однако светимость за пределами видимого диапазона (в радиодиапазоне, ультрафиолете, рентгене, гамма-лучах) может существенно изменяться как в коротком временном масштабе (вспышки), так и в длительном (11-летний цикл активности, а также более долгопериодические изменения). Активность Солнца связана с процессами в самых внешних (конвективных) слоях, а не с основным источником энергии — термоядерными реакциями в ядре. Однако даже такие небольшие вариации в поведении Солнца могут заметно влиять на земной климат.

Солнце состоит в основном из водорода (более 70% по массе) и гелия. Лишь менее 2% приходится на более тяжелые элементы. Распределение элементов по радиусу не является равномерным. Во-первых, в ядре происходит синтез гелия, а отсутствие конвекции во внутренних слоях исключает заметное перемешивание вещества и вынос продуктов синтеза во внешние слои. Во-вторых, внутренние слои обогащаются тяжелыми элементами, которые опускаются из внешних слоев.

Солнце более чем на 98% состоит из водорода и гелия.

По этим причинам фотосферный состав не отражает точного содержания элементов в Солнце. Разумеется, усредненный химический состав Солнца медленно меняется со временем из-за превращения водорода в гелий в ядре.

Солнце образовалось около 4,6 млрд лет назад. Еще чуть более 5 млрд лет Солнце будет оставаться на Главной последовательности. В течение этого времени светимость и радиус будут немного расти, но структура Солнца останется неизменной до ухода с Главной последовательности. Затем, когда запасы водорода в ядре будут исчерпаны, структура и основные параметры (светимость, масса, температура поверхности) нашей звезды начнут сильно меняться.

1.2

Реакции в Солнце. Нейтрино

Источником энергии Солнца являются термоядерные реакции превращения водорода в гелий. Благодаря регистрации выделяющихся при этом нейтрино мы достаточно точно знаем характеристики каждой из этих реакций.

Источником энергии Солнца являются термоядерные реакции синтеза гелия из водорода.

Ядро обычного гелия (${}^4\text{He}$) — альфа-частица — состоит из двух протонов и двух нейтронов, поэтому для его синтеза необходимы четыре протона — ядра водорода (${}^1\text{H}$). Но сделать это за один этап невозможно, требуется цепочка из нескольких реакций. Более того, существуют альтернативные каналы реакций, которые вносят разный вклад в энергетику Солнца.

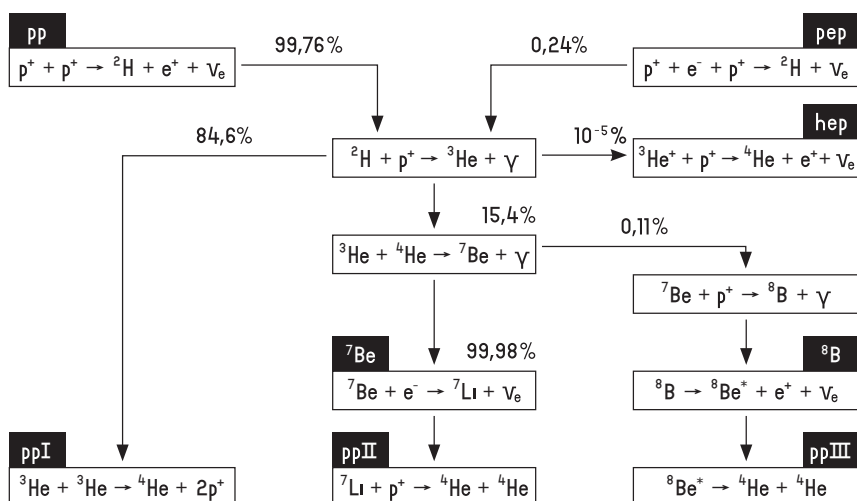
Основной канал называют pp-цепочкой, или pp-циклом, на первом шаге которого в реакцию вступают два протона (p). Однако даже эта реакция идет в недрах Солнца в двух вариантах. Основной (99,76% случаев) состоит во взаимодействии двух протонов, в результате чего образуется дейтерий (один из протонов превращается в нейтрон), рождаются позитрон и электронное нейтрино. Эти нейтрино имеют низкую энергию, поэтому их удалось детально исследовать лишь недавно, в 2014 г., на установке *Вогехипо* в Италии.

В другом варианте (0,24%) в реакции участвует третья частица — электрон. В этой так называемой pep-реакции также образуются дейтерий и электронное нейтрино (pep-нейтрино). Эти более редкие pep-нейтрино, обнаруженные с помощью *Вогехипо* в 2012 г., имеют несколько большую энергию, чем те, которые образуются в pp-цикле.

На следующем этапе дейтерий взаимодействует с еще одним протоном. Образуется изотоп гелия ^3He и рождается гамма-квант. У гелия-3 есть несколько возможностей для дальнейших реакций. Реже всего — в ничтожно малой доле случаев — в реакцию вступает протон, образуя на выходе ^4He , позитрон и электронное нейтрино (эти нейтрино крайне важны, несмотря на свою редкость, поскольку они имеют самую высокую энергию).

Более 98% энергии рождается в реакциях протон-протонного (pp) цикла.

Но чаще идут другие реакции. В 84,6% случаев два ядра гелия-3 взаимодействуют друг с другом, порождая ядро ^4He и два протона. В оставшихся 15,4% начинается другая цепочка реакций: гелий-3 взаимодействует с гелием-4, образуя ядро бериллия-7 (^7Be) и испуская гамма-квант. Однако бериллий не является конечным продуктом, он вступает в реакцию или с электроном (99,98% случаев), порождая литий-7 (^7Li) и электронное нейтрино, или с протоном (0,11%), порождая бор-8 (^8B) и гамма-квант. В свою очередь литий-7 захватывает протон и распадается на две альфа-частицы, а бор-8 превращается в возбужденное ядро бериллия-8 с испусканием позитрона и электронного нейтрино (это так называемые борные нейтрино, из всех рождающихся в Солнце в заметном количестве они имеют наибольшую энергию). И, наконец, ядро бериллия распадается на две альфа-частицы.



На схеме показаны различные каналы реакций pp-цикла в Солнце. Проценты соответствуют доли отдельных вариантов протекания синтеза.

Среди всех реакций, идущих в ядре Солнца, в пяти испускается электронное нейтрино. Антинейтрино или нейтрино другого типа в pp-цикле не возникают. Проще всего зарегистрировать борные нейтрино, поскольку они имеют высокую энергию и их достаточно много. Сложнее всего — нейтрино от первой (pp) реакции из-за их низкой энергии.

Такие же реакции идут во всех звездах того же типа, что и Солнце, однако из-за разной зависимости скорости реакций от температуры вклад различных каналов у звезд разной массы отличается.

Протон-протонный цикл вносит основной (более 98%) вклад в энергетику Солнца. Однако есть еще одна цепочка реакций, также ведущая к синтезу гелия из водорода. В Солнце она отвечает менее чем за 2% энерговыделения, но в более горячих (массивных) звездах этот вариант, называемый CNO-циклом, становится доминирующим.

Свое название CNO-цикл получил благодаря углероду (C), азоту (N) и кислороду (O). Однако эти элементы в реакциях CNO-цикла не расходуются и не синтезируются: на входе мы имеем четыре протона, а на выходе — альфа-частицу (плюс, конечно, нейтрино и энергию). Можно сказать, что углерод выступает в роли катализатора, а азот и кислород принимают участие в промежуточных этапах синтеза.

CNO-цикл отвечает менее чем за 2% энергетики Солнца, но становится доминирующим в более массивных звездах.

Цикл начинается с того, что обычный углерод-12 (^{12}C) захватывает протон, превращаясь в азот-13 (^{13}N) с рождением фотона. Затем в результате бета-распада азот-13 превращается в углерод-13 с испусканием позитрона и электронного нейтрино.

В результате реакций часть энергии уносится электронными нейтрино, регистрируемыми на Земле.

Углерод-13 снова взаимодействует с протоном с образованием азота-14 и фотона. Азот-14 взаимодействует с протоном, порождая кислород-15 и фотон. В ядре ^{15}O один из протонов в результате бета-распада превращается в нейтрон. Возникает азот-15, и, как во всяком бета-распаде протона, вылетают позитрон и электронное нейтрино. Наконец, азот-15 взаимодействует с протоном с образованием углерода-12 и альфа-частицы. Цикл завершен. Как видим, ядро ^{12}C , использованное в самом начале цикла, возникло снова, а четыре протона превратились в ядро ^4He .

У CNO-цикла есть еще несколько вариантов. Один из них идет только при высокой температуре и для Солнца совсем не актуален.

Второй все-таки дает ничтожный вклад в энергетику Солнца. При взаимодействии азота-15 с протоном в редких случаях возникает не углерод-12 и альфа-частица, а кислород-16. Кислород захватывает еще один протон, превращаясь во фтор-17. В результате бета-распада фтор-17 превращается в кислород-17 с испусканием нейтрино и рождением позитронов. Кислород-17 снова взаимодействует с протоном, а итогом реакции становятся азот-14 и альфа-частица. Но это еще не конец, ведь цепочка началась с азота-15, который необходимо получить для замыкания цикла. ^{14}N захватывает протон, превращаясь в кислород-15, который в результате бета-распада превращается в исходный ^{15}N .

Нейтрино обладают небольшой (но не нулевой!) массой.

Как видно, в ходе CNO-цикла также рождаются электронные нейтрино, которые, как и нейтрино от pp-реакций, удалось зарегистрировать в подземных нейтринных лабораториях.

Теоретики разработали основные цепочки pp- и CNO-циклов в конце 1930-х гг. В 1946 г. Бруно Понтекорво (Bruno Pontecorvo) отметил, что Солнце должно быть достаточно мощным источником нейтрино. В 1950-е гг. Рэй Дэвис (Ray Davis) начал работать над экспериментом, способным обнаружить солнечные нейтрино. В 1968 г. ему удалось получить важнейший результат: экспериментальный верхний предел на поток нейтрино от Солнца оказался почти в три раза ниже теоретического предсказания. Возникла *проблема солнечных нейтрино*. Затем на протяжении десятков лет ученые с помощью различных установок научились регистрировать нейтрино, испускаемые в ходе различных реакций, и все они подтверждали наличие дефицита. Окончательно решить проблему удалось в самом начале XXI в. Выяснилось, что расчеты структуры Солнца и процессов в нем были верны. Сюрприз был связан с природой нейтрино.

Нейтринные осцилляции объясняют, почему поток электронных нейтрино на Земле меньше, чем предсказывает стандартная модель Солнца.

На протяжении десятилетий шел спор о том, имеют ли нейтрино массу. Изначальная гипотеза Паули (1930 г.) о существовании нейтральной частицы, которая позволяла объяснить особенности бета-распада (а заодно, в варианте Паули, и свойства атомных ядер), предполагала ненулевую массу. С течением времени эксперименты показали, что есть три типа нейтрино, соответствующих трем лептонам: электронное, мюонное и тау-нейтрино. В минимальной Стандартной

модели элементарных частиц, созданной в середине 1970-х гг., все три нейтрино предполагаются безмассовыми (т. е. с нулевой массой). Обнаружение так называемых нейтринных осцилляций в экспериментах Super-Kamiokande («Супер-Камиоканде»), или просто Super-K, и на нейтринной обсерватории в Садбери (Sudbury Neutrino Observatory, SNO) в 2015 г. было отмечено Нобелевской премией по физике. Нейтринные осцилляции свидетельствуют, что на самом деле эти частицы имеют ненулевую массу. Хотя на момент открытия формально можно было объяснить явление нейтринных осцилляций не массой частиц, а «новой физикой», теперь такие объяснения не только выглядят «не элегантно», но и плохо согласуются с новыми экспериментальными данными, также свидетельствующими в пользу ненулевой массы нейтрино.

Феномен нейтринных осцилляций был предсказан в 1957 г. Бруно Понтекорво. С точки зрения наблюдателя, он состоит в том, что после испускания нейтрино любого типа детекторы на разных расстояниях от источника будут регистрировать нейтрино всех трех типов. Строго говоря, это не означает взаимное превращение частиц друг в друга. Нейтрино всегда является суперпозицией трех состояний, одно из которых может проявляться в данный момент. Осцилляции происходят и в вакууме, но наличие вещества может их усилить (так называемый эффект Михеева — Смирнова — Вольфенштейна, иногда в данном случае говорят о неосцилляторных превращениях одного сорта нейтрино в другой, называя их адиабатическими превращениями сорта (adiabatic flavor conversion), но мы будем называть все превращения осцилляциями, чтобы не усложнять терминологию). Это позволяет решить проблему солнечных нейтрино. Эти частицы рождаются в результате термоядерных реакций в недрах Солнца, и при энергии нейтрино выше нескольких мегаэлектронвольт осцилляции в основном происходят внутри Солнца, а при более низких энергиях — по пути от Солнца до Земли. В результате мы регистрируем лишь около трети электронных нейтрино, возникающих при синтезе гелия из водорода.

1.3

11-летний цикл активности

Одной из главных особенностей солнечной активности является наличие так называемого 11-летнего цикла. С этим периодом меняется количество солнечных пятен, вспышек, а также всех других проявлений активности, включая потоки радио-, рентгеновского