



Звёзды – это огромные светящиеся газовые шары далеко в космосе. Точнее, даже не газовые, а плазменные: там такая высокая температура, что многие электроны не крутятся вокруг своих ядер, как в обычном веществе, а отрываются от них и летают сами по себе – электроны отдельно, ионы отдельно.

Но почему звёзды светятся? И что с ними происходит потом? В статье «Две звезды» в «Квантике» № 1 за 2022 год мы обсудили некоторые детали из жизни звезды Бетельгейзе. Сейчас попробуем подробнее разобраться, что же происходит в ней и в других звёздах. При этом сами реакции термоядерного синтеза, который идёт в центре звезды и даёт ей энергию для жизни, мы обсуждать почти не будем. Узнать, что это такое, можно из статьи «Ядра атомов: вынужденное деление и термоядерный синтез» в «Квантике» № 9 за 2019 год. А если не очень представляете, чем протон отличается от электрона, поможет статья «Что у атома внутри» в «Квантике» № 11 за 2018 год.

Почему наши дома, вещи, да и мы сами не улетаем от Земли? Каждый знает – потому что Земля нас притягивает. По закону всемирного тяготения, любая тяжёлая вещь притягивает к себе всё вокруг. И чем она тяжелее, тем сильнее притягивает. А Земля очень тяжёлая. Но почему же мы все тогда не падаем в центр Земли, не проваливаемся «сквозь землю»? Тоже ясно – нас пол не пускает! Ну или там асфальт, грунт... то, на чём мы стоим, отталкивает нас, и две эти силы – притяжение и отталкивание – компенсируют друг друга, так что мы спокойно остаёмся на месте и никуда не падаем, ни вверх, ни вниз.

Сила, которая отталкивает нас от Земли, создаётся давлением вещества. Пол, почва, камень и т.д. сопротивляются сжатию, причиняемому нашими ногами, и немножко «пружинят», отказываются сжаться ещё сильнее. А там, внизу, в десятках и сотнях километров у нас под ногами, вещество сжато до ещё больших плотностей и ещё сильнее «пружинит» – держит на себе всё, что над ним. И чем глубже внутрь Земли,

тем больше давление; это давление и держит все верхние слои. Ведь если где-то оно оказывалось недостаточным, вещество «проседало» и уплотнялось до тех пор, пока давление не выросло настолько, чтобы остановить этот процесс. При этом «проседании», пока планета Земля формировалась, выделилось много энергии. Деваться ей было некуда, и она потратилась на нагревание: Земля внутри очень горячая. Теперь она потихоньку остывает, и будет остывать ещё несколько миллиардов лет...

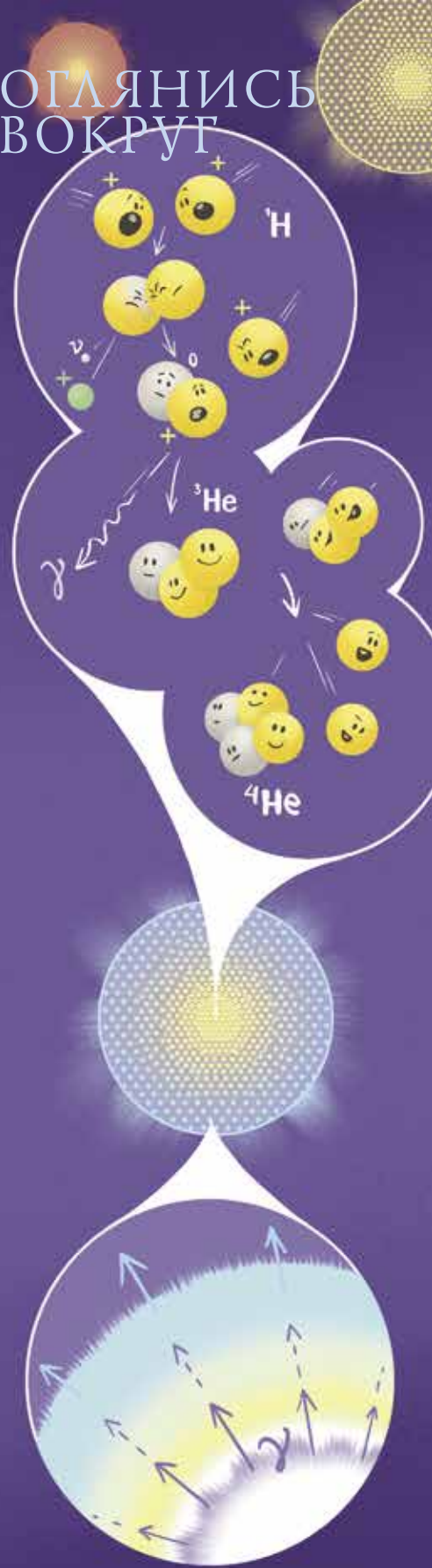
Звезда – даже такая захудалая, как наше Солнце – в миллионы раз тяжелее Земли. Вещество в ней находится под ужасным давлением. И внутренние слои так же вынуждены «держаться» верхние, не давая им провалиться вниз.

Этим давлением вещество в центре сжато до огромных плотностей и нагрето до гигантских температур – десятки миллионов градусов. При таких условиях в ядре звезды происходят термоядерные реакции: ядра водорода, то есть протоны, слипаются между собой (часть протонов ещё успевают превратиться в нейтроны) и образуют ядра гелия.¹ При этом выделяется куча энергии, то есть попросту излучается свет. Правда, не совсем привычный нам свет, а рентгеновские и гамма-лучи². Эти лучи разлетаются из ядра во все стороны, унося энергию наружу. По дороге они натываются на вещество звезды, поглощаются им, нагревая остальную часть звезды, и переизлучаются снова – пока не доберутся до края звезды, где уже относительно холодное вещество с температурой в несколько тысяч градусов переизлучит их в видимом диапазоне – голубым, жёлтым или красным светом.

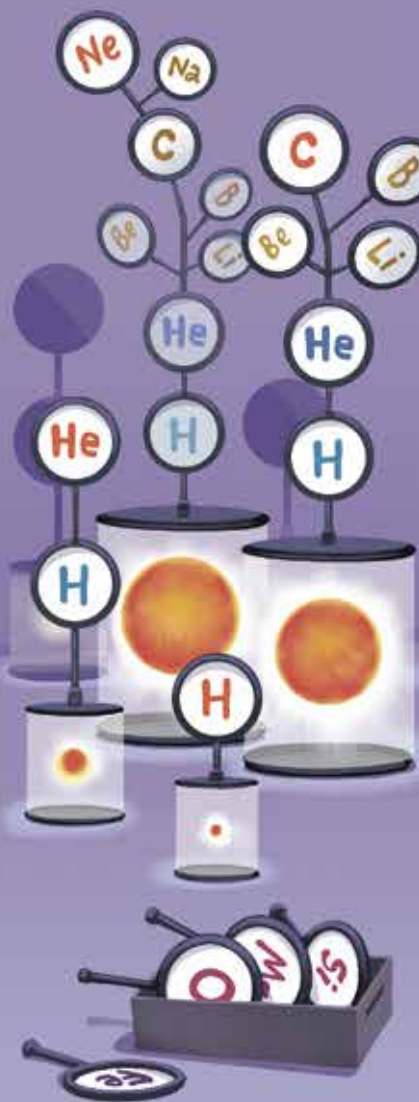
Но вернёмся пока в ядро. Чем тяжелее звезда, тем больше температура и плотность у неё внутри, тем быстрее водород там перерабатывается в гелий. Поэтому массивные звёзды живут недолго, всего не-

¹ Подробнее про ядерные реакции и «слабые» реакции (превращения) см. «Квантик» № 9 за 2019 год.

² Это «очень-очень фиолетовый» свет, в радуге он был бы далеко за фиолетовым. Глаз его не видит, зато он может, например, пройти через человека насквозь. Так светила бы чудовищно горячая печька.



ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ



сколько миллионов лет. А маленькие, лёгкие – светят еле-еле, зато живут в тысячи и даже в сотни тысяч раз дольше.

Через несколько миллионов или миллиардов лет наступает момент, когда водород в ядре подходит к концу, а гелия становится много. В отсутствие топлива ядро начинает остывать, давление в нём норовит уменьшиться, и – поскольку снаружи давят по-прежнему – ядро и области вокруг него ещё немного сжимаются. Сжимаясь, они снова нагреваются³, причём теперь температуры хватает на то, чтобы «поджечь» водород в окружающем ядро слое. А «загоревшись», этот водород нагревается ещё больше – это как с костром или печкой: чтобы зажечь дрова, нужно их нагреть спичкой, но уж как разгорятся – столько тепла от них! И вот этот «горящий» водородный слой вокруг нагревает ядро до такой высокой температуры, что в нём «загорается» уже гелий – ядра гелия сливаются, образуя углерод.⁴ Итак, теперь водород «горит» уже по краешку ядра, в слое вокруг него (хотя всё равно глубоко внутри звезды), а в центре «горит» гелий. При этом энергии выделяется ещё больше, «печка» внутри звезды работает на полную мощность!

Для звёзд вроде нашего Солнца это уже почти конец, потому что для того, чтобы загорелся ещё и углерод, температуры в ядре не хватит. Хорошо, что водород в центре Солнца кончится только ещё через несколько миллиардов лет. А вот в ядре Ригеля – даром что он в сотни раз моложе Солнца – уже, возможно, горит гелий. Но в массивном Ригеле давления достаточно, чтобы, когда гелий тоже «прогорит», углерод мог «слипаться» дальше, образуя ядра неона, магния, кремния... и, наконец, железа.

Вот это и происходит с Бетельгейзе. Гелий там, видимо, уже выгорел, и звезда дожигает свои последние запасы – уже горит углерод, а может, и неон.

³ Потенциальная (гравитационная) энергия звезды переходит в тепловую.

⁴ В очень тяжёлых звёздах с массой больше 10 масс Солнца всё происходит немного в другом порядке: там и так очень горячо, и сначала «загорается» гелий в ядре, а потом уж водород в окружающем слое.

А когда неон догорит и образуется железное ядро, гореть там станет нечему, потому что железо уже не может выделять энергию, «слепляясь» с другими ядрами – ядра железа самые устойчивые, дальнейшее их «укрупнение» уже не даст энергию, а только заберёт её.

Как выглядит снаружи этот последний период жизни звезды, «звёздная старость»? Когда горение водорода переходит из ядра в окружающий слой, температура этого слоя повышается. Увеличивается и давление, с которым вещество распикивает всё вокруг. А масса-то у звезды не изменилась, и давление снаружи (как и вес внешних слоёв звезды) осталось прежним. В итоге равновесие смещается, горячий газ в слое вокруг ядра отвоёвывает себе больше места, отодвигая от центра внешние слои. Для звёзд вроде Солнца это приводит к поистине катастрофическим последствиям. Наше Солнце, когда это произойдёт, разбухнет в 250 раз и «проглотит» Меркурий, Венеру и Землю! При этом внешние слои, которые оказались очень далеко от центра, остынут и станут светить уже не жёлтым, а красным светом – Солнце станет красным гигантом. Мы и сейчас видим на небе такие звёзды: например, очень яркие Арктур в созвездии Волопаса (рядом с Большой Медведицей) и Альдебаран в созвездии Тельца (справа от Ориона).

В огромных звёздах, массой 8–10 масс Солнца и больше, переход от горения водорода к горению гелия не столь заметен снаружи: там и так было чудовищное давление внутри, эти звёзды как были, так и остаются голубыми, большими и очень горячими. Они только чуть-чуть увеличиваются. Но уж когда и гелий выгорит, а загорается углерод – с ними происходит то же самое, они разбухают и становятся красными сверхгигантами.

В этом разбухшем состоянии звезда оказывается неустойчивой: внешняя её оболочка то сжимается слегка, то расширяется больше прежнего и ещё пуще остывает. Она еле держится: случайное колебание температуры или давления, какая-нибудь вспышка в ядре – и оболочка вообще может оторваться и разлететься прочь от звезды. Возле некоторых звёзд-сверх-



ОГЛЯНИСЬ ВОКРУГ

гигантов видны следы нескольких таких сброшенных оболочек. Кстати, если красный сверхгигант сбрасывает оболочку, он может на время снова стать голубым.

Чем же всё это закончится? Скорее всего, взрывом. Если только звезда не очень маленькая – совсем мелкие звёзды, заметно меньше Солнца, просто спокойно догорают и потихоньку потухнут, но и это случится очень нескоро, – она живёт так долго, что за всё время существования Вселенной ещё не успела состариться. Звёзды вроде Солнца тоже избегнут сильного взрыва, но сбросят свою оболочку (а с ней – и большую часть всего своего вещества, так что останется одно ядро). В более массивных звёздах, когда топливо в ядре кончится, произойдёт то же, что с прогоревшими поленьями в костре: всё обрушится вниз, к центру звезды. Ведь давление, которое поддерживалось ядерной реакцией и столько лет держало ядро и всю звезду, исчезло. От этого падения выделится куча энергии: вся гравитационная энергия огромной звезды переходит в тепло. Опять – напоследок! – на недолгий миг очень сильно поднимутся давление и температура, возобновятся ядерные реакции – причём в общем беспорядке будут иногда слепляться даже «невыгодные» элементы, более тяжёлые, чем железо, которые в нормальных условиях в звезде не образуются. Чудовищное давление создаёт взрыв. Чудовищная энергия наконец вырывается наружу. И как в костре от обрушения прогоревших дров взрывается целый сноп искр и облако золы, так и здесь ударной волной взрыва вещество звезды разметаётся по всей окрестности. Человечеству случалось наблюдать такое много раз – звезда вспыхивает вдруг очень ярко, а потом в течение месяца или двух тускнеет и исчезает из виду. В телескоп и через много веков можно увидеть в этом месте газовую туманность – разлетающиеся остатки звёздного вещества.

Жалко звезду? Жалко. Но именно так появились в межзвёздном пространстве, потом в Солнечной системе, а потом и на Земле углерод, кислород, железо...

А в центре что же, ничего не остаётся? Остаётся. Но остаются невидимые глазом и очень странные

и удивительные объекты. О них мы поговорим в другой раз.

ЗАДАЧИ

1. При превращении Солнца в красный гигант его радиус увеличится в 200 раз. Во сколько раз упадёт при этом его средняя плотность? Во сколько раз (и в какую сторону) изменится его светимость, если температура поверхности уменьшится в 2 раза?

2. Мы видим на небе довольно много красных звёзд, сравнимых с Солнцем по массе – Арктур, Альдебаран... Но их радиусы в 20–50 раз больше солнечного. Как же это сочетается с «предсказанием» из предыдущей задачи, что Солнце увеличится в размере в 200 раз? Почему же мы не видим таких больших звёзд с массой порядка солнечной?

3. Когда вокруг ядра загорается слой водорода, давление в нём увеличивается; сила, с которой он «отпихивает» внешние слои звезды, становится больше веса этих внешних слоёв, и звезда расширяется. Почему же она не разлетается совсем? Почему возникает новое равновесие?

Что горит	Что образуется	Ограничение на массу звезды (в массах Солнца)	Температура в ядре	Время горения
Водород	Гелий	Во всех звёздах $> 0,1$	> 10 млн градусов	Зависит от массы звезды, от 10 млн до 10 млрд лет. Чем больше масса, тем короче жизнь!
Гелий	Углерод	$> 0,5$	> 100 млн градусов	В 10 раз быстрее, чем водород
Углерод	Неон, кислород, магний, кремний, железо	> 8 > 10	> 10 млрд градусов	Несколько тысяч лет

