

Глава 6. Звездные спектры

Автор: Нил Деграсс Тайсон

Что на самом деле происходит внутри звезды? Звезда — это не просто маячок, который достаточно включить, чтобы с его поверхности полился свет. Глубоко в недрах звезды протекают термоядерные процессы, в результате которых выделяется энергия, и эта энергия постепенно пробивается к поверхности звезды, где высвобождается и со скоростью света летит на Землю, а также во всю Вселенную. Давайте проанализируем, что происходит при продвижении такой тучи фотонов сквозь материю — ведь без сопротивления при этом не обходится.

Для начала нужно понять, через что пробиваются фотоны на пути к поверхности Солнца. Наша звезда и большинство остальных состоят преимущественно из водорода — самого распространенного элемента во Вселенной. 90% всех атомных ядер — это ядра водорода, 8% — ядра гелия, а оставшиеся 2% приходятся на все остальные элементы Периодической системы. История всего водорода и большей части гелия прослеживается вплоть до Большого взрыва, тогда же появилось ничтожное количество лития. Остальные элементы уже позже синтезировались в звездах. Если вы — поклонник той точки зрения, что земная жизнь есть нечто уникальное, то должны считаться со следующим важным фактом: если расставить по частоте встречаемости пять важнейших элементов во Вселенной — водород, гелий, кислород, углерод и азот, то этот набор будет очень напоминать химический состав человеческого организма. Какова основная молекула в теле человека? Это вода — вы на 80% состоите из H_2O . Если расщепить воду, то выделится водород, элемент номер один в человеческом организме. В вас совершенно нет гелия — за исключением того, что вы вдыхаете из наполненного гелием шарика, чтобы изменить голос на писклявый. Но гелий химически инертен. Он расположен в крайнем правом столбце Периодической таблицы; это значит, что его внешняя электронная оболочка целиком заполнена, там нет свободных «парковочных мест», куда можно было бы вставить

электроны от других атомов, поэтому гелий ни с чем не реагирует. Даже если бы у вас был гелий, вам было бы не на что его применить.

Далее в человеческом организме идет кислород — опять же, его много, так как он присутствует в молекуле воды H_2O . После кислорода идет углерод — основа всей органической химии. Далее идет азот. Если не считать гелия, который ни с чем не реагирует, то в земном человеческом организме наиболее распространены те же элементы, что и в космосе. Если бы мы состояли из какого-то редкого элемента, например из изотопа висмута, то могли бы утверждать, что на этой планете произошло что-то уникальное. Но учитывая, что мы состоим как раз из тех элементов, что наиболее распространены в космосе, приходится смиренно признать, что с химической точки зрения мы ничем не примечательны. С другой стороны, есть нечто поучительное и даже вдохновляющее в осознании, что все мы действительно сотворены из звездного вещества. Как будет рассказано в нескольких следующих главах, кислород, углерод и азот синтезируются в звездах спустя миллиарды лет после Большого взрыва. Мы родились во Вселенной, живем в этой Вселенной, и Вселенная живет внутри нас.

Рассмотрим газовое облако — космическую смесь водорода, гелия и остальных элементов — и обратим внимание на то, что там происходит. В центре атома находится ядро, состоящее из протонов и нейтронов, вокруг ядра вращаются по орбитам электроны. Удобно, пусть и графически неверно, представлять себе простую классическую квантовую модель атома, которую Нильс Бор предложил около 100 лет назад. У такого атома есть основное состояние — такая орбита, на которой электрон обладает наименьшей внутренней энергией; назовем это основное состояние «*энергетический уровень 1*». На следующей возможной орбите электрон будет уже в возбужденном состоянии, это будет *энергетический уровень 2*. Давайте изобразим атом с двумя энергетическими уровнями, чтобы не усложнять картину (рис. 6.1). В атоме есть ядро и облако электронов, находящихся «на орбитах» вокруг ядра. Но эти орбиты не похожи на планетные, о которых мы говорили, обсуждая гравитацию, планеты и Ньютона. Вообще, здесь было бы правильнее говорить не об орбитах, а об *орбиталях*. Они называются *орбиталями*, поскольку похожи на орбиты, но могут принимать самые разные формы. На самом деле, это «вероятностные облака», в разных частях которых с той или иной вероятностью может находиться электрон. Электронные облака. Некоторые из них сферические, другие — продолговатые. Орбитали

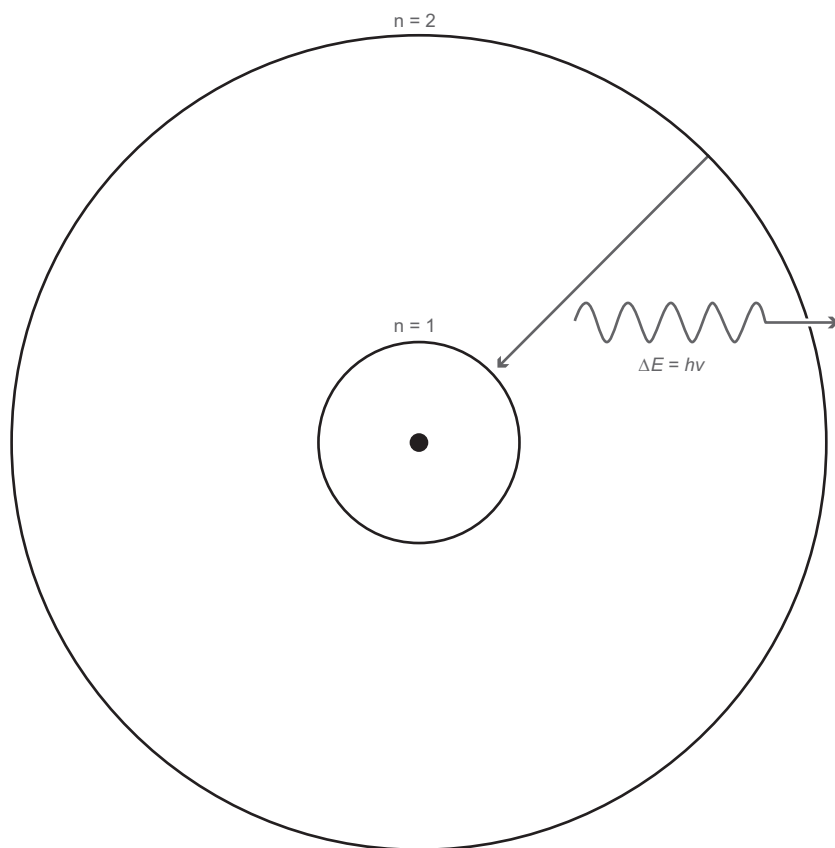


Рис. 6.1. Энергетические уровни в атоме. Показан простой атом с двумя электронными орбиталями, $n = 1$ и $n = 2$. Если электрон переходит со второго энергетического уровня на более низкий первый энергетический уровень, он излучает фотон с энергией $\Delta E = h\nu$, где $\Delta E = E_2 - E_1$ — это разница в энергии между первым и вторым энергетическим уровнем. После того как электрон окажется на первом энергетическом уровне, он может поглотить фотон с энергией $\Delta E = h\nu$ и вновь подняться на энергетический уровень 2. Предоставлено Майклом Строссом

объединяются в семейства, для одних семейств характерны более высокие энергии, чем для других. Давайте абстрагируемся от этого и поговорим просто об энергетических уровнях, но на самом деле будем рисовать орбитали, занятые электронами, вращающимися вокруг атомных ядер.

Ядро — это точка в центре атома. Энергетический уровень $n = 1$ соответствует сферической орбитали, расположенной ближе всего к ядру. Энергетический уровень $n = 2$ — это сферическая орбиталь, расположенная чуть дальше от ядра. Электрон на энергетическом уровне $n = 2$

уже не так плотно связан с ядром. Электроны и протоны притягиваются; нужна энергия, чтобы отодвинуть электрон от ядра на более отдаленную орбиталь. Энергетический уровень 2 обладает более высокой энергией, чем энергетический уровень 1.

Допустим, есть электрон в основном состоянии, на энергетическом уровне 1. Он не может зависнуть где-нибудь между первым и вторым энергетическими уровнями. Там просто нет места. Это же *квантовый* мир. Плавных изменений там не бывает. Чтобы электрон мог перескочить на следующий уровень, ему необходимо сообщить энергию. Он должен каким-то образом поглотить энергию, и в данном случае отличным источником энергии был бы фотон. Фотон попадает в электрон, но электрону подойдет не любой фотон, а только такой, энергия которого равна энергетической разнице между двумя уровнями. Заметив такой фотон, электрон проглатывает его и перескакивает на энергетический уровень 2. Если в фотоне чуть больше или чуть меньше энергии, электрон его просто пропустит. Еще отмечу, что атомам, в отличие от людей, не нравится пребывать в возбужденном состоянии. Спустя достаточное время электрон с энергетического уровня 2 спонтанно спустится на более низкий энергетический уровень 1 (как показано прямой стрелкой на рис. 6.1).

Бывает, что достаточное время — это миллионная доля секунды. Электрон недолго пребывает в возбужденном состоянии, будучи в атоме. Итак, что должно произойти, когда электрон опускается на более низкий энергетический уровень? Он должен испустить фотон — новый, но с той же энергией, которую принял с предыдущим фотоном. При переходе на более высокий энергетический уровень фотон поглощается. При переходе на более низкий энергетический уровень фотон излучается, как показано волнистой стрелкой на рис. 6.1. Согласно знаменитому уравнению Эйнштейна, энергия E этого фотона равна $h\nu$, где h — постоянная Планка, а ν — частота фотона. Энергия излученного фотона в точности равна разнице между двумя энергетическими уровнями ΔE . (Заглавная греческая буква «дельта», Δ , часто используется для обозначения разницы или изменения величины). В результате получаем тождество $\Delta E = h\nu$, позволяющее вычислить частоту того фотона, который был излучен электроном, когда тот опустился со второго на первый энергетический уровень.

Вы когда-нибудь играли с фосфоресцирующими фрисби? Чтобы они светились в темноте, их сначала нужно подержать на свету. Например, подвесить перед лампочкой. Что при этом происходит? Электроны в атомах и молекулах игрушки переходят на более высокие энергетические

уровни (в таких сравнительно больших атомах много энергетических уровней) и поглощают фотоны света. Создатели игрушки подобрали такой материал, в котором эти электроны каскадируют не сразу, а постепенно, излучая при этом видимый свет. Конечно, такой процесс продолжается не вечно. Свечение прекращается после того, как все электроны вернутся в исходное состояние. Фосфоресцирующие фрисби и светящиеся костюмы скелетов, которые так нравятся детям, светятся благодаря одному и тому же принципу.

Энергия, поглощаемая электроном, может поступить от фотона, но бывают и другие источники энергии. Возможно, пролетающий мимо атом ударит по электрону, и электрон в результате такого воздействия будет заброшен на более высокий энергетический уровень. В данном случае переход осуществляется за счет кинетической энергии. Как подобный механизм работает в облаке газообразного водорода? Во-первых, нужно выяснить, а какова температура этого водородного облака? Температура в кельвинах пропорциональна средней кинетической энергии молекул или атомов в облаке. Переносное движение облака не влияет на эти измерения. Естественно, кинетическая энергия — это энергия движения, поэтому чем выше температура, тем быстрее эти частицы носятся взад-вперед. Если бы я был электроном в основном состоянии и мне дали под зад, то я мог бы проверить энергию этого пинка. Если бы такого пинка хватило, чтобы я пролетел лишь часть пути до второго энергетического уровня, то я остался бы на месте. Но если энергия пинка именно такая, какая нужна для перехода на второй энергетический уровень, то я приму эту энергию, поглощу ее и перейду на второй уровень.

При достаточной температуре можно обеспечить, чтобы вся совокупность атомов и некоторая доля их электронов находились в сравнительно высоком состоянии. Можно поддерживать такое равновесие, так, чтобы любой упавший электрон сразу выталкивался на уровень выше. Примерно так действует жонглер, удерживающий несколько мячиков в воздухе. Все это — функция температуры. При низких температурах абсолютное большинство электронов остается на энергетическом уровне $n = 1$ и лишь немногие электроны — на энергетическом уровне $n = 2$. По мере повышения температуры все больше электронов выталкивается на энергетический уровень $n = 2$.

Резюме. Допустим, межзвездное газовое облако подсвечивается сиянием звезды, температура которой составляет 10 000 К. У большинства атомов — множество очень сложных энергетических уровней,

таково устройство природы; энергетические уровни водорода при этом сравнительно просты. Эта разнородная смесь совершенно искажает чистый тепловой спектр, излучаемый звездой с температурой 10 000 К. Посмотрим, какой же хаос получается.

Во-первых, рассмотрим полноценный атом водорода. В нем — бесконечное количество энергетических уровней, соответствующих концентрическим орбиталям, расположенным все дальше и дальше от ядра: $n = 1$ (основное состояние; ближайшая к ядру орбиталь), $n = 2$ (первый уровень возбуждения), $n = 3$, $n = 4$, $n = 5$, $n = 6 \dots n = \infty$. Схема энергетических уровней напоминает лестницу, поэтому называется «лестничная диаграмма». Нижние энергетические уровни, расположенные на которых электроны теснее связаны с ядром, на диаграмме также располагаются внизу (рис. 6.2).

Первое возбужденное состояние водорода — $n = 2$, на три четверти пути вверх, за ним следует $n = 3$, затем $n = 4$, $n = 5$ и так далее. Электрон с высоким n занимает очень высокую орбиталь и имеет очень слабую связь с протоном. На самом верш диаграммы энергия связи электрона равна нулю. Энергия в атомах измеряется в *электрон-вольтах*, эВ. Это энергия, требуемая электрону, чтобы преодолеть разность потенциалов в 1 вольт. Допустим, у вас есть фонарик, работающий от девятивольтовой батарейки. Каждый электрон, проходя по проводам в фонарике, генерирует 9 эВ энергии в виде света и теплоты. По проводам фонарика может проходить $6,24 \times 10^{18}$ электронов в секунду, при этом будет генерироваться энергия в $9 \times (6,24 \times 10^{18})$ эВ (или 9 ватт) световой и тепловой энергии в секунду. Следовательно, один электрон-вольт — очень малая энергия; просто такими единицами удобно оперировать, когда речь идет о небольших порциях энергии, обмен которыми происходит при электронных переходах. Например, $-13,6$ эВ на рисунке соответствует энергетическому уровню $n = 1$. Эта энергия показана как отрицательная. Чтобы вывести этот электрон из атома, ему нужно сообщить энергию 13,6 эВ. Говорят, что 13,6 эВ — это *энергия связывания* для основного состояния электрона $n = 1$. Что будет, если электрон в основном состоянии заметит фотон с энергией более 13,6 эВ? Он сможет поглотить этот фотон? Вот фотон с таким количеством энергии, что электрону с ним делать? Если электрон поглотит такой фотон, то ему хватит энергии, чтобы заскочить выше $n = \infty$. Что выше $n = \infty$? Свобода. Если электрон выскочит туда на уровень энергии выше нуля, то покинет атом и расстанется со своим протоном. В таком случае мы *ионизируем*