

# Излучение в астрономии, или Радуга на службе науки

Учёные постоянно устраивают революции. Не пролетарские и не буржуазные, а намного более культурные — научно-технические революции. В истории астрономии таких случаев было несколько, хотя о первых из них нам известно очень мало.

Может быть, ещё австралопитеки под ясным африканским небом определяли стороны света по звёздам. И уж конечно, первобытные рыбаки осознавали власть Луны над приливами и умели их предсказывать, а египетские жрецы, глядя на «собачью звезду» Сириус, не менее уверенно предсказывали разливы Нила. Но история не сохранила ни имени первого наблюдательного рыбака, ни даже первого любознательного жреца, хотя такие наверняка имелись.

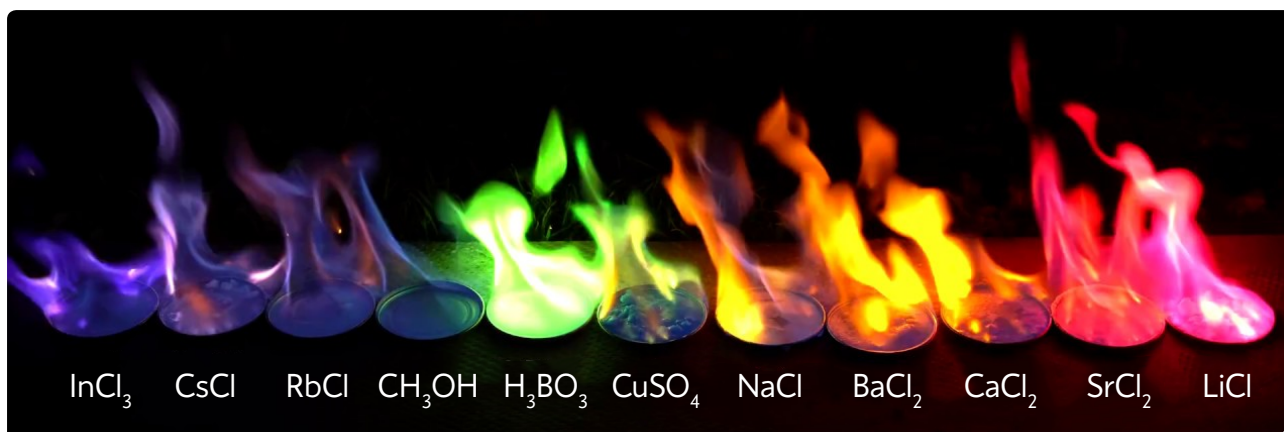
Одна достоверно документированная революция случилась благодаря изобретательности Галилео Галилея. Воспроизведя в своей лаборатории голландскую новинку — подзорную трубу, — Галилей вместо кораблей на горизонте или вражеских укреплений догадался навести её на звёзды и планеты. С новым изобретением открытия посыпались как метеорный дождь: спутники Юпитера, фазы Венеры, разрешение Млечного Пути на звёзды.

С тех пор — со времён Галилея — ни одно из открытий наблюдательной оптической астрономии не обходится без труб, линз и зеркал. Это, конечно, был прорыв, изменивший лицо наблюдательной астрономии на два-три века вперёд.

А вот другой прорыв, сотрясший небеса в середине 19-го века, не удостоился славы, сравнимой с трубой Галилея. Речь идёт уже не о том, чем ловить редкие фотоны далёких звёзд, а о том, как извлечь из них полезную информацию.

Об этом мы сегодня и поговорим: о чём рассказывает звёздный свет и как люди научились понимать его язык.

Рис. 1. Горение различных веществ



## Свет на лабораторном столе

Если в руки химика попало редкое загадочное вещество, он может использовать богатый арсенал способов, чтобы понять, с чем он имеет дело. Скажем, смешать с другим, известным веществом и посмотреть, какая будет реакция. Прекрасный способ, но для астрономических задач абсолютно неактуальный.

Именно невозможность взять пробу звёздного вещества заставила французского мыслителя Огюста Конта в 1835 году опрометчиво заявить, что мы никогда не узнаем, из чего состоят звёзды.

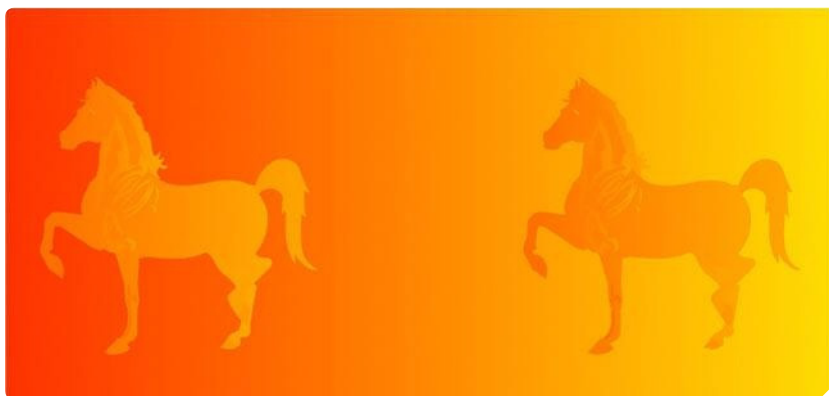
Но есть другой способ, который был известен уже современникам Конта в первой половине 19-го столетия: нагреть неизвестную субстанцию в пламени горелки и посмотреть, как изменится цвет пламени (Рис. 1). Этот способ хорош и тем, что подсказывает, какие химические элементы входят в состав соединения. Скажем, соединения натрия горят оранжево-жёлтым пламенем — вы все знаете этот жёлтый цвет: им светят уличные натриевые фонари. А вот похожие по химическим свойствам соединения лития вместо жёлтого будут давать красное свечение.

Метод «посмотреть на цвет» имеет, конечно, ограниченную применимость, но стоит вспомнить, что такое цвет, и у старого способа появляются неожиданные перспективы.

То, что мы называем цветом, для физика — распределение энергии в спектре: если объект излучает больше в синих лучах, чем в красных, то и цвет его будет «холодный».

В наших глазах есть клетки, чувствительные к разным участкам оптического диапазона: какие-то к красным, какие-то к зелёным, какие-то к синим лучам. То, что мы называем цветом, — это соотношение между сигналами от трёх разных типов клеток.

Человеческий глаз сортирует свет по частотам, но делает это грубо и неумело, а в чём-то и попросту неправильно, больше ориентируясь на цветовые контрасты и неосознанно учитывая освещение. Во множестве оптических иллюзий используется искажённое восприятие цвета (Рис. 2).



Огюст Конт  
(1798–1857)

Рис. 2. Пример оптической иллюзии, связанной с относительным восприятием цвета. Обе лошади на самом деле одного цвета, но глаз компенсирует цвет фона

Но можно разделить свет с разными длинами волн другим способом — взять призму или дифракционную решётку (Рис. 3): лучи разных длин волн пойдут в разных направлениях. Этот процесс называется разложением в спектр, или спектральным разложением, и лежит в основе принципа действия всевозможных спектроскопов, спектрографов и спектрометров.

✎ Спектральное разложение  
📖 Спектроскоп — прибор, позволяющий наблюдать спектр излучения невооружённым глазом

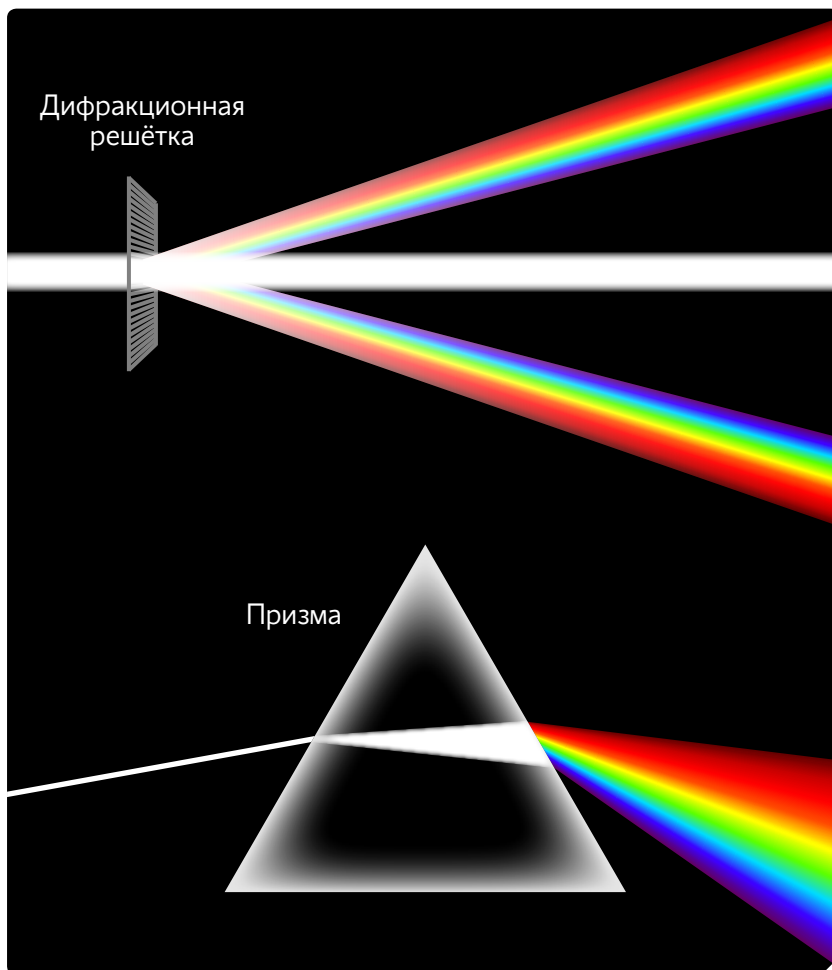


Рис. 3. Дифракционная решётка и призма

Сам по себе диспергирующий элемент (такой как решётка или призма), ответственный за разложение в спектр, — уже примитивный спектроскоп. В этом вы можете убедиться, рассматривая источник света при помощи обыкновенного компакт-диска, который (без всякого умысла со стороны создателей) является неплохой дифракционной решёткой. Свет, падающий на диск, при отражении расщепляется на два-три луча: один даёт прямое изображение вроде отражения в плоском зеркале, но остальные лучи эффектами интерференции на бороздках раскладываются в спектр.

Посмотрите при помощи диска на лампочку накаливания или на Луну — и увидите сплошную радужную полосу, всё как обычно. А теперь посмотрите точно так же на уличный ртутный фонарь, и он превратится в цепочку разноцветных линий — спектральных линий. Этот набор линий, уникальный для каждого химического элемента и для каждого иона, как раз и отвечает за характерные цвета разных солей в пламени (Рис. 1).

#### ✎ Спектральные линии

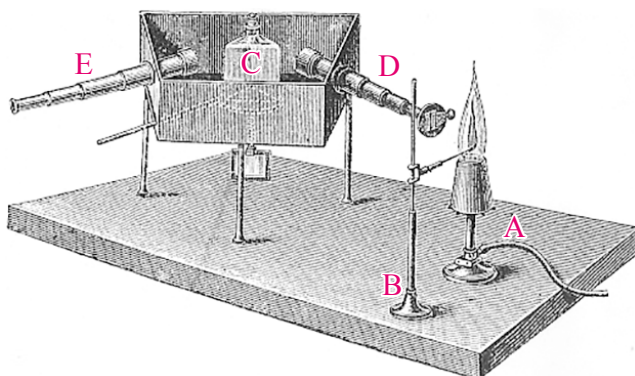


Рис. 4. Устройство спектроскопа, использовавшегося в лаборатории Кирхгофа и Бунзена. Справа — горелка (А), образец вещества укреплен на кронштейне В. С — диспергирующий элемент (призма), а D и E представляют собой, соответственно, камеру и коллиматор — оптические элементы, позволяющие фокусировать лучи и получать резкое изображение спектра

Хотя мы все привыкли к природным явлениям вроде радуги, где разные длины волн разделяются естественным путём, спектральное разложение в интересах науки стало использоваться сравнительно недавно — примерно с начала 19-го века. В химической лаборатории появление спектроскопа (особенно в сочетании с горелкой Бунзена с практически невидимым горячим спиртовым пламенем, Рис. 4) произвело переворот: вместо характерного цвета каждый химический элемент теперь обзавёлся набором узнаваемых спектральных линий. В 1860-х годах уже каждый распространённый элемент можно было узнать по его спектральной «подписи» — набору из нескольких линий (Рис. 5).

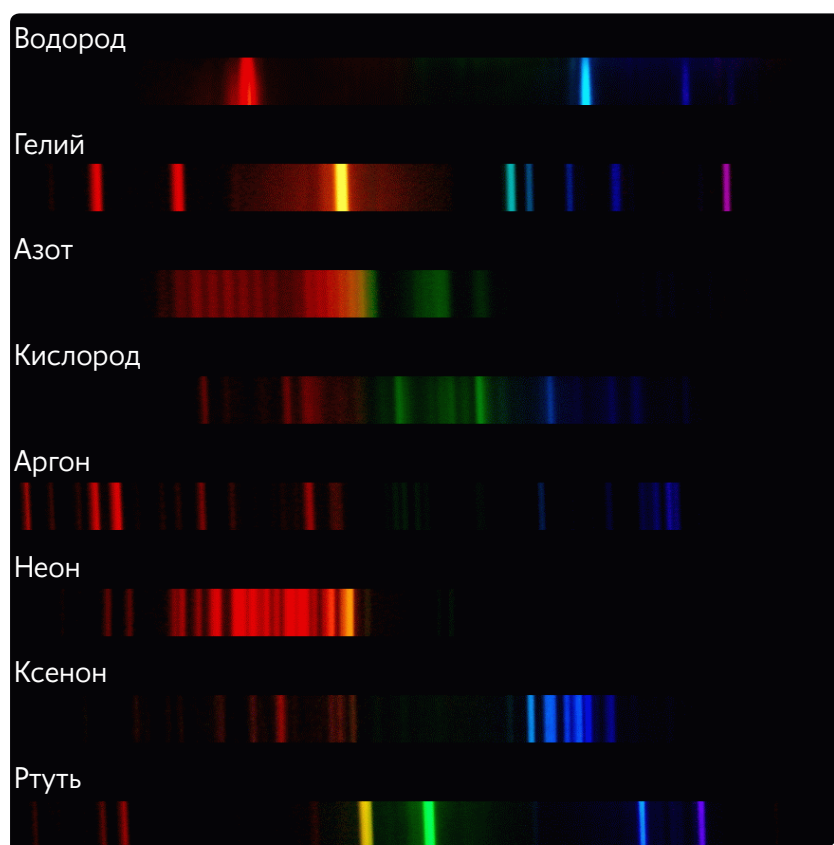


Рис. 5. Набор спектральных линий некоторых элементов

Так в распоряжении учёных оказался универсальный штрих-код, по которому всегда можно узнать, например, тот же натрий в неизвестном минерале, привезённом из геологической экспедиции. И спектр этого натрия будет таким же, как и у натрия из поваренной соли в вашей солонке.

Без спектров излучения не было бы понимания того, что такое химический элемент, не появилась бы Периодическая таблица Менделеева. А позже, в начале 20-го века, спектры разных элементов стали одним из важнейших стимулов для создания боровской модели атома и квантовой механики. Но история квантовой механики не обошлась и без неожиданной «помощи свыше», о чём мы расскажем в следующем уроке.

---

## Небесные элементы

Так что же звёзды? Каждый любитель астрономии знает, что на звезду в телескоп смотреть скучно: точка и точка, что в ней особенного? Может, спектральный анализ придаст этой точке какую-то индивидуальность?

Спектр одной звезды известен нам очень хорошо и очень давно. Ведь исторически первым лучом света, расщепленным в лаборатории при помощи призмы, был солнечный. Впервые сделал это и подробно задокументировал Ньютон в 17-м веке (Рис. 6).



Рис. 6. Ньютон получает спектр Солнца в затенённой комнате (раскрашенная картинка из книги «Жизнь прославленных учёных» (La Vie des Savants Illustres, 1868) французского научного писателя Луи Фигье)

То, что он увидел, походило больше на радугу, чем на наборы цветных линий, которые будут изучать химики полтора–два века спустя. Выделив в цветной полоске света 7 привычных цветов радуги<sup>1</sup>, он забросил этот эксперимент, подробно, впрочем, описав его в трактате «Оптика». А через сто с небольшим лет, в разгар наполеоновских войн проводя аналогичный эксперимент с дифракционной решёткой, баварский оптик Йозеф Фраунгофер изучил солнечный спектр с лучшим разрешением и увидел на фоне яркого непрерывного спектра (континуума) тёмные линии (Рис. 7). Сейчас мы так их и называем — линии Фраунгофера.



Йозеф Фраунгофер (1787–1826)

#### ✎ Линии Фраунгофера

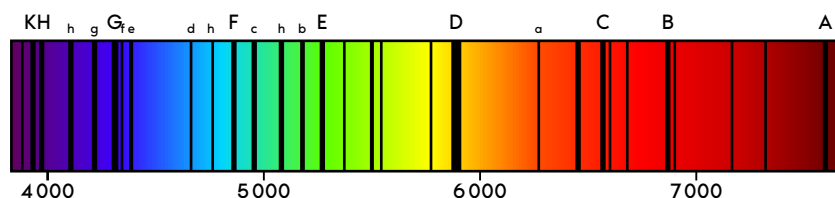


Рис. 7. Схема солнечного спектра с подписанными оригинальными линиями Фраунгофера. Длина волны указана в ангстремах

И не только увидел (строго говоря, за 12 лет до этого их наблюдал Уильям Хайд Волластон, экспериментатор, известный открытием платины и ультрафиолетового излучения), но тщательно изучил и составил список из 570 наименований, многими из которых мы пользуемся до сих пор.

Несколько упрощённо спектры делят по внешнему виду на эмиссионные (спектры излучения, в них доминируют узкие и яркие линии), непрерывные (энергия гладко, без скачков, размазана по длинам волн) и абсорбционные (спектры поглощения, в которых на фоне континуума наблюдаются узкие тёмные провалы, обычно на тех же длинах волн, что и линии излучения эмиссионного спектра). Реальные спектры могут сочетать в себе свойства всех трёх разновидностей, иногда довольно причудливым образом.

📖 Спектры делятся на эмиссионные, непрерывные (континуум) и абсорбционные

<sup>1</sup>Привычных именно нам, а не англичанам: голубой и синий цвета Ньютон назвал “blue” и “indigo”; не исключено, что именно Ньютона следует считать изобретателем известных нам семи цветов радуги.

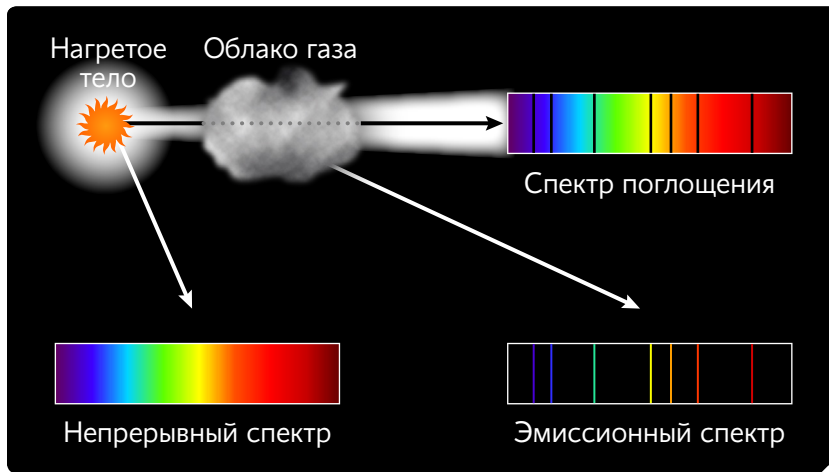


Рис. 8. Как выглядят и как образуются разные виды спектров

Примеры упомянутых разновидностей спектров приведены на Рис. 8. Горячий прозрачный газ или пар, как правило, имеет линейчатый спектр излучения, в который сравнительно малый вклад вносит непрерывный спектр (континуум)— по сравнению с эмиссионными (яркими) линиями. А вот нагретая непрозрачная среда излучает непрерывный спектр. И если она ещё и поглощает весь падающий на неё свет, получается излучение абсолютно чёрного тела. На нём стоит остановиться подробнее, прежде чем перейти к третьему виду спектров— спектру поглощения.

## Чёрное тело и цвета каления

Абсолютно чёрное тело по определению поглощает всё падающее на него излучение. В то же время ничто не запрещает ему светиться самому. В общем виде спектр чёрного тела описывается формулой Планка. Мы здесь давать её не будем, но полезно представлять себе основные свойства планковского излучения. На Рис. 9 показан пример спектра абсолютно чёрного тела с температурой, близкой к температуре солнечной фотосферы: можно видеть, что они неплохо согласуются друг с другом. В уроке по космологии вы познакомитесь с другим хорошим примером практически планковского спектра— со спектром реликтового излучения.

✎ Абсолютно чёрное тело

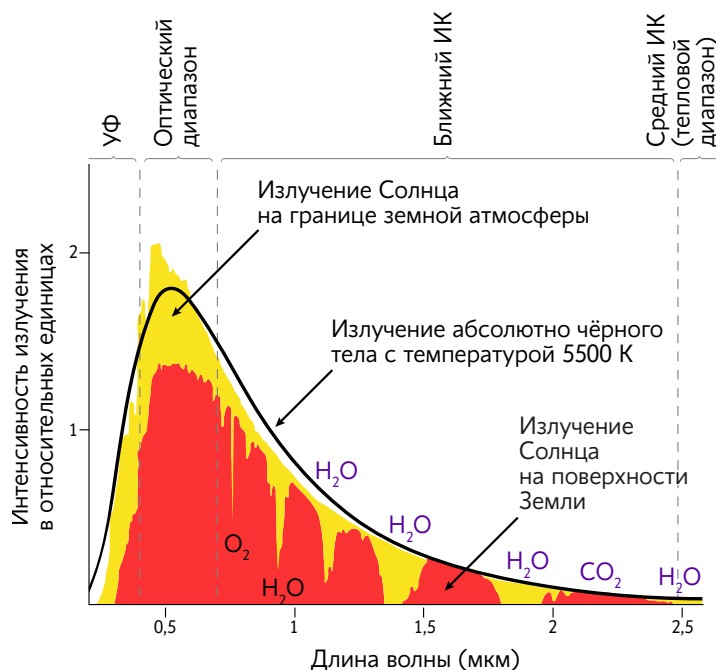


Рис. 9. Распределение энергии в солнечном спектре и сравнение со спектром чёрного тела. Интенсивность здесь и на других рисунках— это количество энергии на единичный интервал длин волн: линии поглощения на таком графике (спектрограмме) выглядят как провалы, яркие эмиссионные линии, если бы они были, то выглядели бы узкими пиками. Отдельно подписаны линии поглощения молекул земной атмосферы

Излучение чёрного тела — это непрерывный спектр, длина волны максимума которого обратно пропорциональна температуре: это так называемый закон смещения Вина:

 Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} T = b, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\max}$  — длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения,  $T$  — температура тела,  $b$  — константа. Обычно принимают  $b \approx 0,0029 \text{ м} \cdot \text{К}$ . Но существуют разные определения интенсивности, для которых работает закон смещения Вина, однако значения константы будут разными.



Автор закона Вина, Вильгельм Вин, ещё до появления функции Планка предсказал такой закон из общих термодинамических соображений: если нагретое тело, изолированное от других тел, расширяется, оно за счёт этого охлаждается (это называется адиабатическим охлаждением). Но если, скажем, в полости этого тела существуют фотоны, постоянно поглощаемые и переизлучаемые стенками, энергии этих фотонов постоянно будут уменьшаться из-за относительного движения стенок (это эффект Доплера, о котором мы ещё поговорим в конце урока). Если такой процесс идёт достаточно медленно, показал Вин, то температура будет уменьшаться обратно пропорционально длинам волн фотонов.

Казалось бы, фантастическая картина — горячее тело, расширяющееся в пустоту и освещающее само себя! Но именно так меняется температура расширяющейся Вселенной, о чём вы узнаете через несколько уроков.

Чтобы почувствовать, как закон Вина работает на практике, полезно вспомнить о цветах каления: металл, нагретый градусов до 500 по Цельсию, начинает светиться тусклым красноватым цветом. А при температуре в 1500 градусов мы назовём его свечение уже не красным, а белым.

Вольфрамовая нить в постепенно выходящей из моды лампе накаливания немного горячее: её температура около 2 000–3 000 градусов, и мы привыкли думать о её свете как о желтоватом. Но если бы нам довелось увидеть свет лампочки среди сравнимой яркости звёзд на ночном небе, мы бы записали её в красные звёзды вроде Антареса или Бетельгейзе. Восприятие цвета очень субъективно и зависит от обстоятельств и яркости источника. На Рис. 10 можно видеть, как смещается максимум распределения энергии в спектре абсолютно чёрного тела в соответствии с законом Вина.



Вильгельм Вин  
(1864–1928)

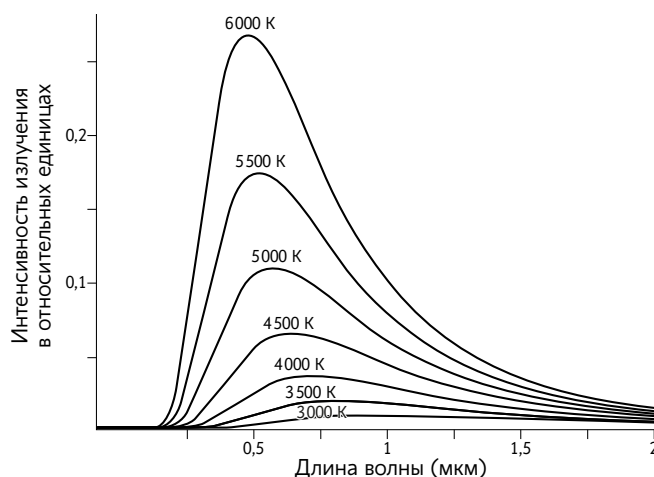


Рис. 10. Спектр излучения абсолютно чёрного тела при разных температурах. Максимум спектральной интенсивности смещается обратно пропорционально температуре (закон Вина), полный поток энергии растёт как четвёртая степень температуры (закон Стефана-Больцмана), полный поток энергии можно оценить как площадь под кривой на графике

Закон Вина неплохо работает и для звёзд. Самые холодные из них приближаются по температуре фотосферы к вольфрамовой спирали лампы накаливания (2000–3000 К) и светят в основном в том же диапазоне — в ближнем инфракрасном, на длинах волн около пары микрон. У звёзд вроде Солнца с температурой фотосферы 5000–6000 К максимум энергии расположен в оптическом диапазоне (напомним, что оптический диапазон — это примерно 0,4–0,7 микрон, или 4000–7000 Å), что не могло не повлиять на зрение человека и многих других животных. Самые горячие звёзды, которые мы видим как голубые, имеют фотосферы с температурами более 15 000–20 000 К и большую часть энергии излучают в жёстком ультрафиолетовом диапазоне (около 0,1 микрон и меньше). Жёсткое ультрафиолетовое излучение в основном не доходит до Земли, а теряется в космическом пространстве, поглощённое межзвёздной пылью и газом. Сбрав информацию о спектре звезды в возможно более широком диапазоне (желательно с привлечением инфракрасных и ультрафиолетовых данных), можно судить о температуре её поверхности.

Можно измерить температуру звезды и более простым способом. Сначала посчитать полную светимость на всех возможных длинах волн, потом радиус и применить закон Стефана-Больцмана: полный поток энергии с единицы поверхности абсолютно чёрного тела пропорционален четвёртой степени температуры,

$$E = \sigma T^4, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана. Корректно это сработает только для абсолютно чёрного тела с температурой, постоянной по всей излучающей поверхности, так что давайте осмотрительно называть  $T$  эффективной температурой. У Солнца она удивительным образом близка к температуре газа фотосферы и составляет около 5500–6000 градусов Кельвина. Но в целом чёрное тело — очень приближённый способ описания спектра звёзд. Настоящее послание зашифровано в спектральных линиях вроде фраунгоферовых, которые присутствуют в любом звёздном спектре.



Йозеф Стефан  
(1835–1893)

Закон Стефана-Больцмана



Людвиг Больцман  
(1844–1906)

## Фраунгоферовы линии у Солнца и звёзд

Ещё одна разновидность спектра, больше всего похожая на то, что увидел Фраунгофер у себя в лаборатории, — это непрерывный спектр с линиями поглощения. Таков спектр излучения, прошедшего через холодный газ. Будучи недостаточно горячим, чтобы заметно излучать в спектральных линиях, газ тем не менее может поглощать свет на тех же длинах волн, на которых мог бы светиться. Такой спектр называется абсорбционным, или спектром поглощения, а тёмные линии, соответственно, абсорбционными линиями, или линиями поглощения.

К этой картине разнообразия спектров, пожалуй, стоит добавить, что если газ молекулярный, то его «линии» представляют собой широкие полосы, состоящие из множества узких близких спектральных линий. Скажем, синее свечение природного газа в газовой плите с точки зрения спектроскописта состоит именно из таких полос, характерных для метана и других входящих в состав природного газа соединений.

На Рис. 11 и Рис. 12 показаны спектры различных астрономических объектов,

Спектр поглощения  
(абсорбционный спектр)

излучающих в молекулярных полосах: свечение ночного неба и кома кометы.

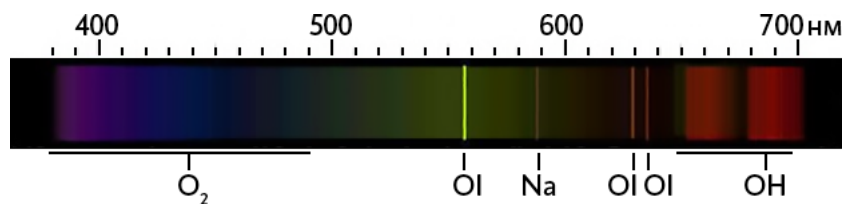


Рис. 11. Спектр свечения ночного неба. Видны линии атомарного кислорода (OI) и натрия, а также молекулы кислорода (в синей части спектра) и ионной молекулы гидроксила  $\text{OH}^-$  (в красной). Такой спектр увидит наблюдатель, если наведёт телескоп на пустой (лишённый звёзд и других ярких объектов) участок ясного ночного неба. К сожалению, линии свечения ночного неба (особенно линия кислорода на 5 577 Å и полосы гидроксила в красной области) часто мешают исследовать астрономические объекты, особенно слабые и протяжённые. Линии атомарного кислорода, подписанные на спектре, ответственны за ярко-зелёные и ярко-красные оттенки полярных сияний



Рис. 12. Спектр (слева) и прямое изображение (справа) кометы Лавджоя. Самые сильные асимметричные полосы – это излучение молекулы  $\text{C}_2$ . Узкую деталь в фиолетовой части спектра даёт ядовитый газ циан, правее от неё – молекула углерода  $\text{C}_3$ . Этот необычный спектр характерен для состоящей из разреженного газа протяжённой кометной комы



Спектры с резкими линиями характерны для атомов и атомарных ионов, в то время как вещества с молекулярным строением дают полосатые спектры. Чтобы понять, чем определяется различие **атомарных и молекулярных спектров**, вспомним, как возникают спектральные линии. Электрон в атоме, да и атом в целом, ограничен в выборе своих состояний дискретным набором уровней энергии (Рис. 13).

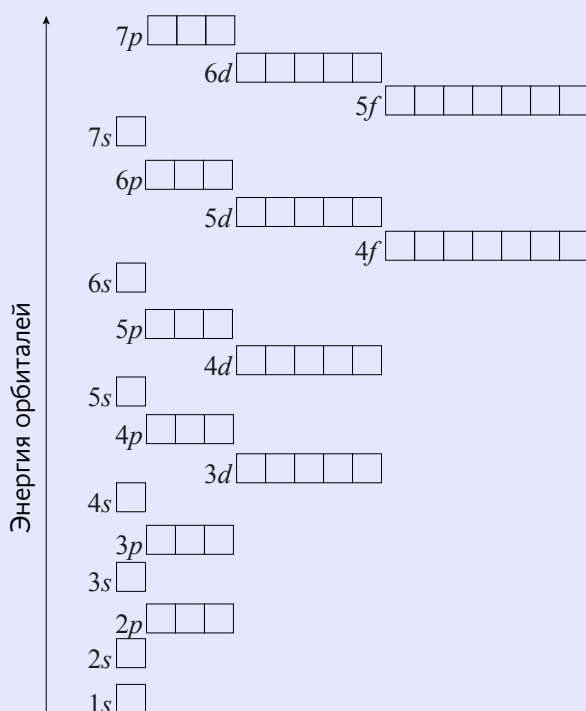


Рис. 13. Строение энергетических уровней атомов. Подписаны отдельные орбитали, вертикальное расположение орбиталей приблизительно соответствует энергии валентных (внешних) электронов разных элементов

Это картина, знакомая вам по урокам химии: на каждой орбитали уместается не более двух электронов. Периодический закон оперирует атомами в основном состоянии – в состоянии с наименьшей энергией. Но атом можно возбудить, переместив один или несколько электронов на другие орбитали, и энергия атома при этом станет больше. Избавиться от излишка энергии атом может, излучив фотон, и энергия этого фотона обязана равняться разности энергии атома в основном и в возбуждённом состояниях. Так на длине волны, соответствующей энергии перехода, возникает спектральная линия. Естественно, атом возбуждается не сам собой: его может возбудить фотон с подходящей энергией или взаимодействие с другими частицами.

Молекула сложнее атома: в ней есть химические связи, которые тоже могут перейти в возбуждённое состояние (при этом возникают колебательные уровни), и сама она может вращаться как целое вокруг различных осей (вращательные уровни). Поэтому любой электронный уровень, у атома или иона резкий и незыблемый, у молекулы оказывается расщеплён на множество колебательных состояний, а они – на ещё более тонкую сетку вращательных. На практике это приводит к тому, что спектральные линии превращаются в широкие полосы, часто – с резкими краями.

Солнечный спектр по нашей классификации оказывается спектром поглощения. Где же расположен и из чего состоит газ, «выедающий» линии в спектре Солнца? Оригинальный список фраунгоферовых линий содержит некоторое количество теллурических линий, возникающих в земной атмосфере. Самые сильные из таких линий в оптическом диапазоне – линии молекулярного кислорода. К ним принадлежит самая мощная абсорбция (линия поглощения) солнечного спектра, расположенная далеко в красной области спектра. Фраунгофер обозначил её большой буквой А (Рис. 7). В ближнем инфракрасном диапазоне у кислорода тоже есть линии, и к ним добавляются полосы поглощения водяного пара, а ещё дальше, в тепловом диапазоне<sup>2</sup>, активно поглощают метан, углекислый газ и другие газы, ответственные за парниковый эффект.

Если вывести спектрограф на орбиту, теллурические линии в оптическом диапазоне исчезнут, так как всё поглощающее вещество останется внизу, вблизи поверхности Земли (Рис. 9). Что ещё важнее, исчезнут линии и полосы поглощения в других диапазонах электромагнитного спектра – инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском. Излучение в этих диапазонах очень эффективно поглощается земной атмосферой, в отличие, например, от оптического диапазона и «окна прозрачности» в высокочастотном радиодиапазоне. Поэтому рентгеновские, ультрафиолетовые, а часто и инфракрасные обсерватории обычно выводят в космическое пространство.

Но теллурические линии в оптическом диапазоне – лишь небольшая часть линий солнечного спектра. Происхождение других стало понятно после статей Г. Кирхгофа и Р. В. Бунзена 1859–1860 годов. Кирхгоф и Бунзен стали активно использовать спектральный анализ в химии, составили списки характерных линий различных металлов, но также обратили внимание

 Теллурические линии – линии поглощения, появляющиеся в спектрах космических источников при прохождении их излучения через земную атмосферу



Роберт Бунзен  
(1811–1899)



Густав Кирхгоф  
(1824–1887)

<sup>2</sup> Так часто называют диапазон длин волн около нескольких микрон, где излучают тела с привычными нам температурами. Каждый из нас – источник инфракрасного излучения в тепловом диапазоне.

на то, что некоторые из этих линий совпадают с линиями из списка Фраунгофера. Например, в спектре Солнца нашлись линии водорода, железа, ионизованного кальция. То, что все эти элементы расположены где-то в атмосфере Солнца, а не на полпути в межпланетном пространстве, стало понятно, когда во время солнечного затмения 1868 года сняли «спектр вспышки», то есть спектр хромосферы Солнца (Рис. 14). Напомним, что хромосфера — прозрачный слой солнечной атмосферы, расположенный над фотосферой. Спектр хромосферы оказался таким негативом обычного, фотосферного солнечного спектра: его эмиссионные линии неплохо совпали с фраунгоферовыми линиями поглощения.

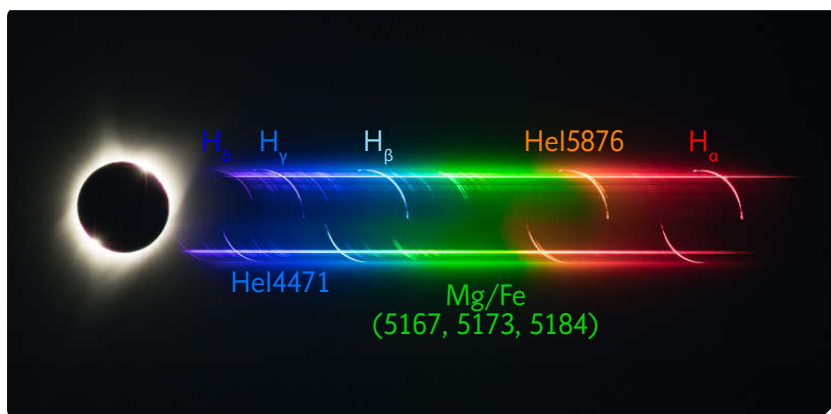


Рис. 14. Так называемый «спектр вспышки». На рисунке показано изображение и спектр Солнца, снятые одновременно в момент полной фазы солнечного затмения. Там, где сквозь неровности лунной поверхности прорывается свет фотосферы Солнца, мы видим кусочки непрерывного спектра (две яркие полосы сверху и снизу), а эмиссионные линии, формирующиеся в солнечной хромосфере, создают цветные «кольца»

Почти все линии солнечного спектра удалось отождествить с веществами, изученными в химической лаборатории, но по крайней мере одна — и на Рис. 14 она одна из самых ярких (жёлто-оранжевая) — принадлежала, похоже, новому элементу!

Новый элемент окрестили гелием в честь древнегреческого бога Солнца Гелиоса.

Почти 30 лет гелий не могли найти на Земле, а когда нашли, поняли, почему это не удавалось сделать. Любой газ легче воздуха легко покидает земную атмосферу. Самый лёгкий — водород — быстро связывается в молекулах воды, метана, органических соединений. Большинство соединений водорода тяжелее воздуха, а если и легче (как, например, метан), то ненамного. В то же время инертный газ гелий практически никогда не образует химических соединений, а значит, ему ничто не мешает покинуть земную атмосферу. Весьма ограниченные запасы земного гелия пополняются вулканическими газами и распадом радиоактивных изотопов в горных породах: например, торий-232 распадается с образованием альфа-частицы, то есть ядра гелия.

Открытие нового элемента, существующего, словно мистический платоновский эфир, только за пределами Земли, взбудоражило умы. Идею о том, что во Вселенной существуют элементы с фантастическими свойствами, неизвестные земной науке и по каким-то причинам избегающие нашей планеты, подхватили и писатели-фантасты, и серьёзные учёные. Это немного входило в противоречие с периодическим законом: казалось бы, куда ещё втиснуть новые элементы, когда старые стоят плотными рядами, отсортированные по порядковому номеру? Но перспектива открыть новый элемент, просто посмотрев на небо в спектроскоп, казалась слишком заманчивой.

Так чуть было не родились по крайней мере два новых вещества — небулий и короний. Первый открыли в спектрах газовых туманностей. Это те самые голубовато-зелёные линии, которые придают характерную окраску туманности, когда смотришь на неё в телескоп.

Короний же — ещё одно «дитя Солнца»: его линии неожиданно появились в спектрах солнечной короны, снятой во время затмения, — практически при тех же обстоятельствах, что и линии гелия. Вера в существование внеземных элементов оказалась столь устойчива, что даже Менделеев в поздних вариантах своей таблицы нашёл для них место: существуют изданные в начале 20-го века версии периодической таблицы, где в самом начале фигурируют сверхлёгкие и сверхинертные элементы, свободно витающие в космосе и излучающие в незнакомых спектрах (Рис. 15).

| Series | Zero Group         | Group I             | Group II             | Group III            | Group IV             | Group V              | Group VI              | Group VII            |  |
|--------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--|
| 0      | $\infty$           |                     |                      |                      |                      |                      |                       |                      |  |
| 1      |                    | Hydrogen<br>H=1.008 |                      |                      |                      |                      |                       |                      |  |
| 2      | Helium<br>He=4.0   | Lithium<br>Li=7.08  | Beryllium<br>Be=9.1  | Boron<br>B=11.0      | Carbon<br>C=12.0     | Nitrogen<br>N=14.04  | Oxygen<br>O=16.00     | Fluorine<br>F=19.0   |  |
| 3      | Neon<br>Ne=19.9    | Sodium<br>Na=23.06  | Magnesium<br>Mg=24.1 | Aluminium<br>Al=27.0 | Silicon<br>Si=28.4   | Phosphorus<br>P=31.0 | Sulphur<br>S=32.08    | Chlorine<br>Cl=35.46 |  |
| 4      | Argon<br>Ar=39.9   | Potassium<br>K=39.1 | Calcium<br>Ca=40.1   | Scandium<br>Sc=44.1  | Titanium<br>Ti=48.1  | Vanadium<br>V=51.4   | Chromium<br>Cr=52.1   | Manganese<br>Mn=55.0 |  |
| 5      |                    | Copper<br>Cu=63.6   | Zinc<br>Zn=65.4      | Gallium<br>Ga=70.0   | Germanium<br>Ge=72.6 | Arsenic<br>As=75.0   | Selenium<br>Se=78     | Bromine<br>Br=79.96  |  |
| 6      | Krypton<br>Kr=81.8 | Rubidium<br>Rb=85.4 | Strontium<br>Sr=87.6 | Yttrium<br>Y=89.0    | Zirconium<br>Zr=90.6 | Niobium<br>Nb=94.0   | Molybdenum<br>Mo=96.0 |                      |  |
| 7      |                    | Silver<br>Ag=107.9  | Cadmium<br>Cd=112.4  | Indium<br>In=114.0   | Tin<br>Sn=118.0      | Antimony<br>Sb=120.0 | Tellurium<br>Te=127   | Iodine<br>I=127      |  |
| 8      | Xenon<br>Xe=138    | Cesium<br>Cs=132.9  | Barium<br>Ba=137.4   | Lanthanum<br>La=139  | Cerium<br>Ce=140     |                      |                       |                      |  |
| 9      |                    |                     |                      |                      |                      |                      |                       |                      |  |
| 10     |                    |                     |                      | Ytterbium<br>Yb=173  |                      | Tantalum<br>Ta=183   | Tungsten<br>W=184     |                      |  |
| 11     |                    | Gold<br>Au=197.9    | Mercury<br>Hg=200.0  | Thallium<br>Tl=204.1 | Lead<br>Pb=207.2     | Bismuth<br>Bi=209    |                       |                      |  |
| 12     |                    |                     | Radium<br>Ra=226     |                      | Thorium<br>Th=232    |                      | Uranium<br>U=238      |                      |  |

Рис. 15. Периодическая таблица 1904 года издания, сохранившаяся в английском переводе. Внешний вид уже довольно привычный, но в нулевой группе, помимо инертных газов, фигурируют лёгкие элементы “х” и “у”, которые современники иногда отождествляли с «коронием» или даже с популярным среди физиков того времени «светоносным эфиром»

Разгадка природы «небулия» и «корония» пришла только в 30-х годах прошлого века, когда техника эксперимента позволила получать в лаборатории достаточно высокие температуры и достаточно глубокий вакуум для того, чтобы изучать ионы высоких степеней ионизации. И тот, и другой оказались не изученными ранее в лабораторных условиях ионами знакомых элементов. Напомним, что набор линий в спектре индивидуален не только у каждого атома, но и у каждого иона. Если постепенно нагревать изначально нейтральный газ, то линии нейтрального элемента сменятся линиями одновалентного положительно заряженного иона, а они — линиями иона с зарядом плюс два, и так далее. Спектроскописты привыкли в таком случае говорить о первом, втором, третьем спектрах того или иного элемента, поэтому после обозначения элемента ставят римские цифры, начиная с I (единицы) для нейтрального элемента. Так, в спектре Солнца есть пара очень глубоких абсорбционных линий, принадлежащих ионизованному кальцию, то есть CaII (кальций-два). А удивительные зелёные, реже красные сполохи северного сияния обязаны своим цветом нейтральному кислороду OI. Обозначения химических элементов читаются так же, как в химии: OI как «о-один», HII как «аш-два», CaII как «кальций-два».

 Разгадка природы «небулия» и «корония»

О межзвёздных областях ионизованного водорода (к которым относятся диффузные и планетарные газовые туманности) часто говорят как о  «зонах HII». Хотя состоят они действительно из ионизованного водорода (то есть из протонов и электронов), своих собственных линий у ионизованного водорода нет, а в спектрах туманностей видны линии нейтрального водорода (HI). Среди

них – самая яркая линия водорода в оптическом диапазоне,  $H_{\alpha}$ , придающая туманностям на фотографиях красноватый оттенок.

Положительно заряженный ион водорода (протон) и отрицательно заряженный электрон, оказавшись достаточно близко, легко могут снова образовать нейтральный атом (рекомбинировать). Образующийся атом часто находится в возбуждённом состоянии, переход из которого в основное состояние с наименьшей энергией неизбежно сопряжён с излучением одной или нескольких эмиссионных линий.

Чтобы туманность не рекомбинировала полностью, а область  $HII$  оставалась областью  $HII$  и светилась в спектральных линиях, нужен источник энергии, ионизирующий водород и другие атомы. Таким источником обычно являются расположенные внутри туманности горячие звёзды, ультрафиолетовое излучение которых способно ионизовать атом водорода. В итоге один жёсткий ультрафиолетовый квант превращается в несколько мягких ультрафиолетовых, оптических и инфракрасных.

Впрочем, даже оставшись без источника энергии, туманность может светить тысячи, а то и миллионы лет: рекомбинация – медленный процесс, особенно при низкой плотности, когда иону и электрону попросту трудно найти друг друга.

Более подробно мы поговорим об областях  $HII$  в уроке, посвящённом межзвёздной среде.

Так вот, небулий на поверку оказался  $OIII$ , дважды ионизованным кислородом. Кислород сложно ионизовать, но температуры и плотности в туманностях для этого подходящие. А короний вообще оказался набором ионов сравнительно тяжёлых элементов, некоторые из которых ионизованы 14–15 раз! Неудивительно, что спектроскописты не смогли узнать знакомые элементы, потому что дело оказалось не в химии, а в физике – в огромных температурах и глубоком вакууме космического пространства.

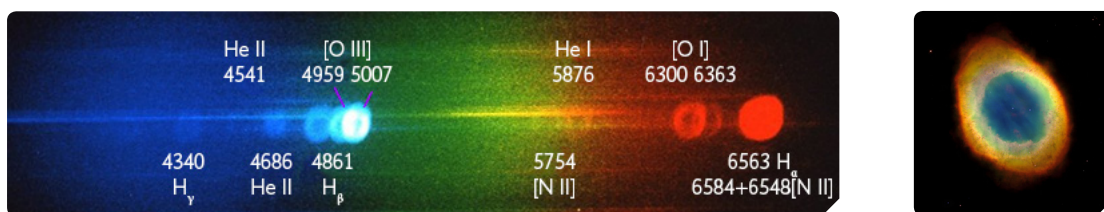


Рис. 16. Спектр (левый рисунок) планетарной туманности M57 (правый рисунок). Так как туманность имеет конечный размер и сложную форму, каждая спектральная линия создаёт в спектре не узкую полоску, а полноценное изображение туманности на соответствующей длине волн. Обратите внимание на яркие линии дважды ионизованного кислорода с длинами волн 4959 и 5007 Å в голубой части спектра – это те самые линии «небулия»

Качественный химический состав Солнца, таким образом, известен: в нём есть и водород, и гелий, и разные металлы, включая железо, кальций, натрий. Во всяком случае, они присутствуют в солнечной фотосфере и хромосфере. Химический состав солнечных недр узнать сложнее. Здесь может помочь, например, гелиосейсмология, о которой мы говорили в уроке «Солнце как звезда».

Так или иначе, все эти элементы присутствуют в солнечной атмосфере. Но одни из них, как водород, в основном нейтральны, другие, как кальций, ионизованы. Собрав данные по многим разным ионам, можно многое узнать об атмосфере звезды, а главное – какие там температура и плотность. Как мы увидели на экзотических примерах небулия и корония, физические условия очень сильно отражаются на спектре.

## Многоликий эффект Доплера

Таким образом, спектры рассказывают — и очень детально — о химическом составе и физических условиях в атмосферах звёзд, а также в туманностях, межзвёздной среде и во многих других, не менее далёких и недостижимых местах. Рассказывают они и о том, как движется излучающее и поглощающее вещество.

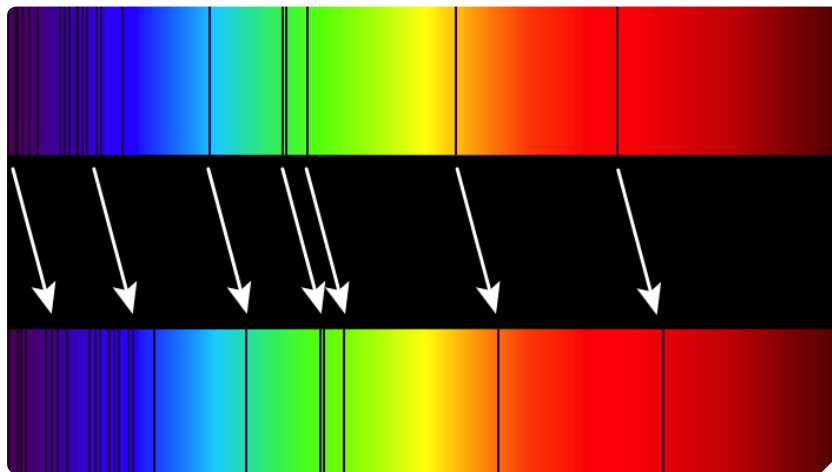
Эффект Доплера, на первый взгляд, простая и скучная штука: при движении источника излучения к нам или от нас все частоты в его спектре увеличиваются или уменьшаются на относительную величину, пропорциональную скорости. Но порой он позволяет увидеть невидимое.

В быту эффект Доплера нам знаком по такому феномену: звук сирены или громкая музыка в проезжающей мимо машине начинают плавно снижаться на тон по мере того, как машина удаляется от нас. То же самое понижение тона мы слышим и у пролетающего самолёта.

Относительное изменение длины волны в эффекте Доплера:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}} = \frac{v_r}{c}, \quad (3)$$

где  $v_r$  — скорость источника по лучу зрения, а  $c$  — скорость света. Длина волны  $\lambda_{lab}$  в формуле — лабораторная, то есть с такой длиной волны фотон излучается в системе отсчёта источника, а  $\Delta\lambda = \lambda_{obs} - \lambda_{lab}$  — разность наблюдаемой и лабораторной длин волн. Если  $v_r$  положительно (источник удаляется), то длина волны растёт, и мы наблюдаем красное смещение: все линии смещаются в красную, длинноволновую сторону спектра. Если же объект приближается, то линии в его спектре смещаются в синюю сторону.



Лучевые скорости звёзд нашей Галактики — обычно десятки, реже — сотни километров в секунду<sup>3</sup>. В спектрах звёзд их лучевые скорости дают совсем небольшие смещения всех линий. Зная лучевую скорость звезды, можно определить её орбиту в Галактике (поперечную (тангенциальную) скорость звезды можно измерить по собственному движению, то есть по той скорости, с которой звезда перемещается по небу), а также определить, где звезда образовалась, сделать выводы о её возрасте и происхождении.



Кристиан Доплер  
(1803–1853)

 Эффект Доплера — изменение частоты (или длины волны) излучения, воспринимаемой наблюдателем, вследствие движения источника излучения и/или движения наблюдателя

 Лучевая скорость

Рис. 17. Эффект Доплера. Для объекта, удаляющегося от наблюдателя, все спектральные линии смещаются в красную сторону

<sup>3</sup> Для точного измерения лучевых скоростей необходимо аккуратно учитывать движение Земли по орбите вокруг Солнца. Скорость движения Земли — около 30 км/с, что вполне сравнимо с лучевыми скоростями многих близких звёзд. Если спектр регистрируется прибором, расположенном на борту космической обсерватории, нужно учитывать и её скорость (около 8 км/с). Для особенно точных наземных измерений важна и скорость вращения Земли (примерно 0,5 км/с на экваторе).

Но есть ведь ещё двойные звёзды. Компоненты двойной системы кружатся вокруг общего центра масс со скоростями, которые могут быть значительно больше, чем скорость движения системы как целого. По периодическим смещениям линий в спектре двойной звезды можно, во-первых, понять, что она двойная. Такие двойные системы так и называются — спектральными двойными. Во-вторых, можно различить спектры индивидуальных компонентов: ведь как изучать свойства звезды, если мы не уверены в том, что это одна звезда, а не две? И наконец, амплитуда скоростей (а значит, и доплеровского смещения линий) зависит от масс компонентов двойной системы: чем больше суммарная масса двойной системы, тем быстрее (при том же размере системы) обращаются компоненты вокруг общего центра масс. Здесь работают те же законы небесной механики, которые вы изучали в уроке, посвящённом движению планет.

Кроме того, как видно на Рис. 18, положение центра масс (а значит, и отношение амплитуд скоростей двух компонентов системы) зависит от соотношения масс. Линии в спектре более лёгкого компонента системы смещаются сильнее.

Эффект Доплера позволяет сделать то, на что не способен ни один другой метод астрономических наблюдений: взвесить звезду. Все наши сведения о массах звёзд основаны на прямых измерениях компонентов спектральных двойных систем.

## ✎ Спектрально-двойные звёзды

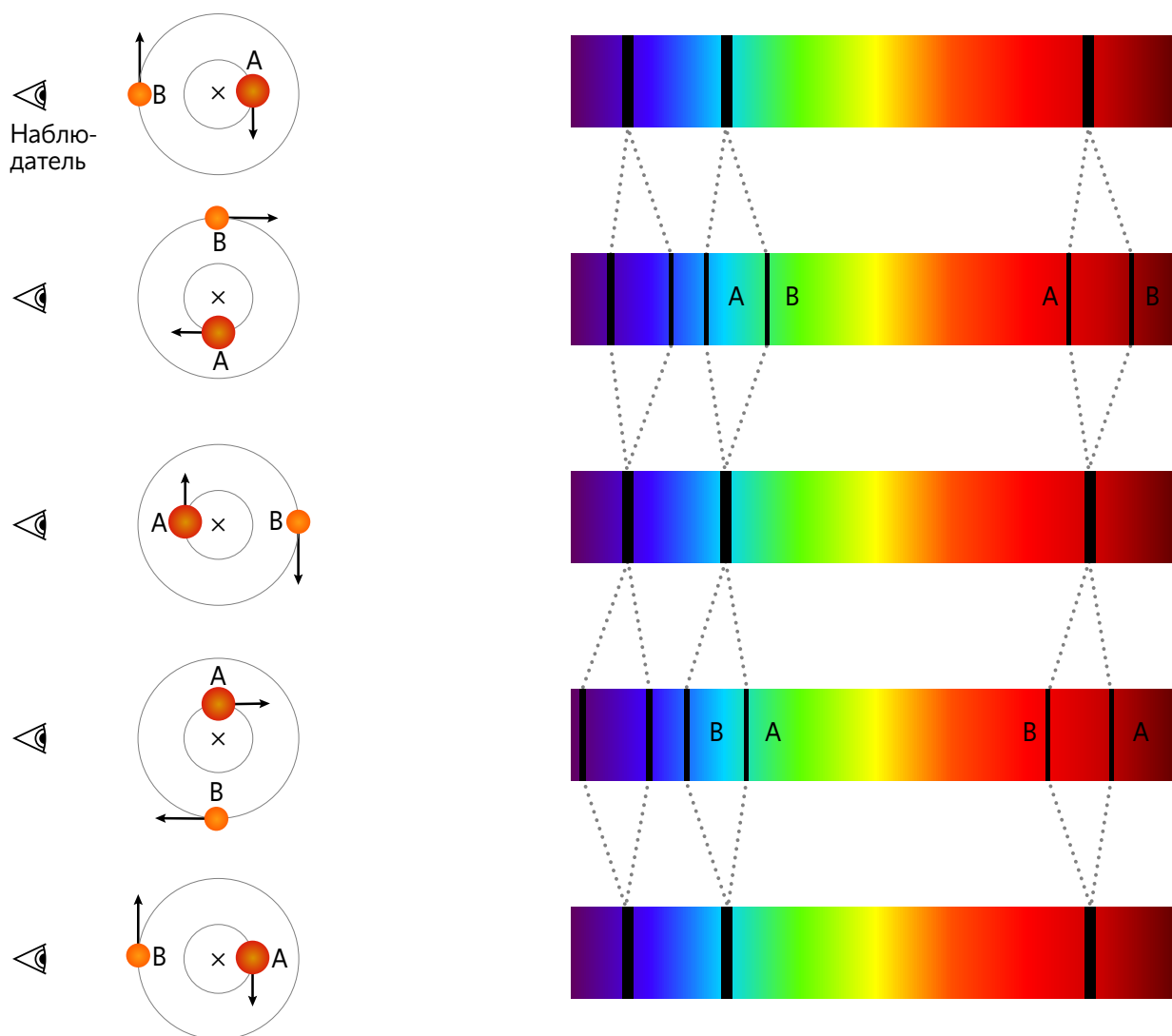


Рис. 18. Схема спектральной двойной системы в различных конфигурациях относительно наблюдателя (слева). Звезда *A* массивнее звезды *B*. Центр масс системы показан крестиком. Также показано, как меняется общий вид спектра с орбитальной фазой

Особенно впечатляющие результаты даёт эффект Доплера для систем, содержащих невидимый или попросту очень слабый вторичный компонент: белый карлик, нейтронную звезду или чёрную дыру. Имея хороший спектрограф, можно даже таким — косвенным — образом зарегистрировать планету или планетную систему. Так были открыты многие экзопланеты, включая 51 Пегаса *b* — первую экзопланету в системе обычной звезды. Возмущения, создаваемые планетами, конечно, малы, и планету легко спутать с пульсациями самой звезды. Но эффект Доплера помогает изучать и звёздные пульсации: знание того, с какой скоростью расширяется или сжимается поверхность звезды в данный момент, позволяет существенно дополнить наше понимание переменности звёзд.

Космические весы, работающие на эффекте Доплера, применимы не только к звёздам и планетам, но и к целым галактикам. Скорость, с которой в нашей Галактике (или в любой другой спиральной, дисковой галактике) газ и звёзды обращаются вокруг центра, определяется массой, заключённой внутри данного радиуса<sup>4</sup>. Практически так же, как и в Солнечной системе. Только в Солнечной системе большая часть массы — это масса самого Солнца, а в галактиках масса складывается из миллиардов отдельных звёзд. Оказывается, если оценить массу внутренней части галактики с помощью эффекта Доплера и сравнить её с суммарной массой звёзд и межзвёздного газа в том же объёме, полученной из независимых наблюдений, мы получим заметную разницу! Так эффект Доплера задал космологам одну из не решённых пока загадок — загадку тёмной материи.

Наконец, именно эффект Доплера оказался важнейшим триггером современной космологии. Астрономия начала 20-го века не различала газопылевые туманности и галактики. Были известны туманности с эмиссионными спектрами (диффузные и планетарные) и туманности со звёздными спектрами, некоторые из которых действительно связаны со звёздными скоплениями и отражают свет звёзд. Например, такая отражательная туманность наблюдается рядом со скоплением Плеяды.



Рис. 19. Звёздное скопление Плеяды с отражательной туманностью

Другая разновидность «туманностей со звёздными спектрами» — спиральные, которые мы сегодня называем галактиками. Их традиционно пытались представить себе как области звездообразования в нашей Галактике,

<sup>4</sup>То есть полной массой вещества, расположенного ближе к центру Галактики, чем то место, где мы измеряем скорость.

космические водовороты, где рождаются новые звёзды. Но в 1913 году американский астроном Весто Слайфер померил лучевую скорость «туманности Андромеды» (галактики M31), оказавшуюся, по звёздным меркам, подозрительно большой — около 300 км/с. За M31 последовали другие «туманности», движущиеся по лучу зрения со скоростями сотни и даже тысячи километров за секунду. В сочетании с нулевым собственным движением это могло означать только одно: галактики очень далеко от нас, а их «звёздные» спектры — это спектры множества звёзд, входящих в состав огромных звёздных систем.

Основываясь на измерениях лучевых скоростей галактик, Хаббл построил свой закон расширения Вселенной, и сегодня для описания далёких объектов и давних событий космологи неизменно пользуются одной универсальной пространственной координатой — красным смещением, относительным смещением линий в спектре. Это не совсем эффект Доплера, но по сути то же: отпечаток кинематики Вселенной на положении спектральных линий.

Сложно упомянуть в одном уроке всё, что можно узнать о космических объектах, расшифровывая их спектры. Скорости, массы, температуру и плотность, химический состав, магнитные поля — список далеко не полный. Прямо или косвенно на спектральную информацию опирается вся совокупность наших знаний о звёздах, их строении и эволюции. Об этом мы и поговорим в следующих уроках.



**Автор текста:**

Павел Аболмасов,  
астроном, научный сотрудник  
ГАИШ МГУ, кандидат  
физико-математических наук

**В тексте использованы иллюстрации:**

Рис. 1. Горение различных веществ. Thoisoi // youtube.com.

Рис. 2. Оптическая иллюзия. ejka.ru.

Рис. 4. Устройство спектроскопа. Poul la Cour and Jacob Appel.

Рис. 5. Набор спектральных линий. autogear.ru.

Рис. 6. Ньютон получает спектр Солнца. Жизнь прославленных учёных (La Vie des Savants Illustres, 1868).

Рис. 11. Спектр свечения ночного неба. Les Cowley.

Рис. 12. Спектр кометы Лавджоя. Christian Buil.

Рис. 14. Спектр вспышки. Юджин Куин // Университет Аризоны.

Рис. 16. Спектр туманности Кольцо. Y. Norimoto // Okayama Astrophysical Observatory // NAOJ.

Рис. 19. Скопление Плеяды. NASA.