

# Физические характеристики звезд

**Звезда** - это массивный газовый шар, излучающий свет, удерживаемый в состоянии равновесия силами собственной гравитации и внутренним давлением, в недрах которого происходят реакции термоядерного синтеза. Звёзды образуются из водорода и гелия в результате гравитационного сжатия, в большинстве звёзд энергия выделяется в результате превращения водорода в гелий. В звёздах сосредоточена основная масса светящегося вещества в природе и могут рождаться химические элементы вплоть до железа<sup>1</sup>.

## 1 Абсолютно чёрное тело

Прежде, чем мы продолжим повествование, ознакомимся с таким физическим понятием, как **абсолютно чёрное тело (АЧТ)**. Это такое тело, которое независимо от своей температуры полностью поглощает любое падающее на его поверхность электромагнитное излучение<sup>2</sup>. Несмотря на своё название, АЧТ само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Спектр излучения АЧТ, то есть интенсивность электромагнитного излучения в зависимости от его частоты, определяется только его температурой и задаётся довольно сложной **формулой Планка**<sup>3</sup>.

Интенсивность электромагнитного излучения АЧТ в зависимости от его длины волны тоже определяется только его температурой и задаётся той же формулой Планка, но немного в другом виде<sup>4</sup>. Соответствующая зависимость для различных значений температуры  $T$  приведена на рисунке справа. Видно, что при увеличении температуры максимум излучения смещается в коротковолновую область. Зависимость длины волны, на которой поток излучения АЧТ достигает своего максимума, от температуры называется **законом смещения Вина** и выражается формулой

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad b = 0.0029 \text{ м} \cdot \text{К}$$

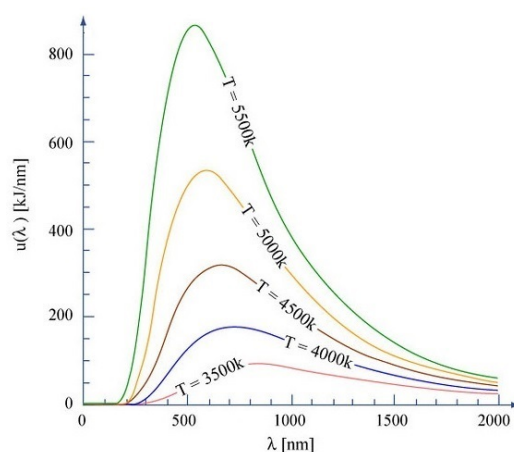


Рис. 1. Интенсивность излучения АЧТ в зависимости от длины волны для различных температур

<sup>1</sup>Более тяжёлые химические элементы образовываться с выделением энергии не могут.

<sup>2</sup>Таким образом, для абсолютно черного тела отношение поглощённой энергии к энергии падающего излучения равно 1 при излучениях всех частот, направлений распространения и поляризаций.

<sup>3</sup> $R(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} (e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)^{-1}$ , где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с (постоянная Планка),  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К (постоянная Больцмана),  $c$  - скорость света. В левой части стоит величина  $R(\nu, T)$  - интенсивность электромагнитного излучения в относительных единицах. Если мы зафиксируем температуру  $T$ , то выражение выше превратится в функцию одной переменной - частоты  $\nu$ .

<sup>4</sup> $R(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^{-1}$ .

Среди тел Солнечной системы свойствами абсолютно чёрного тела в наибольшей степени обладает Солнце. По сравнению со доходящим до нас светом далёких звёзд оно излучает несравнимо сильнее, а значит, Солнце (точно так же, как и АЧТ) светит только за счёт собственного нагрева. Максимум его энергии излучения приходится примерно на длину волны 500 нм, что соответствует температуре наружных слоёв Солнца около 5800 К.

## 2 Фундаментальные параметры звезд

Звезда как физическое тело характеризуется тремя основными параметрами: массой  $M_*$ , радиусом  $R_*$  и светимостью  $L_*$ <sup>5</sup>. Светимость определяет количество энергии, излучаемой звездой за единицу времени, т.е. аналогична физическому понятию мощности и имеет ту же размерность<sup>6</sup>. Значения этих величин для Солнца равны:

$$M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{33} \text{ г}, R_{\odot} \approx 700\,000 \text{ км}, L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{33} \frac{\text{эрг}}{\text{с}} = 4 \cdot 10^{26} \frac{\text{Дж}}{\text{с}},$$

Кроме того, для описания звёзд используется **эффективная температура**  $T_{eff}$ , которую можно вычислить, зная светимость и радиус. Она определяется соотношением

$$L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T_{eff}^4,$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-5} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана<sup>7</sup>. Откуда взялась эта формула? Есть такая физическая величина – поток излучения  $F_*$  от звезды, он определяется как количество энергии, излучаемое звездой с единицы её поверхности за единицу времени:  $F_* = \frac{L_*}{4\pi R_*^2}$  (светимость звезды делится на площадь её поверхности). С другой стороны, этот же самый поток для АЧТ определяется **законом Стефана-Больцмана**:  $F_* = \sigma T_{eff}^4$ . Приравнивая эти два выражения, получаем формулу выше.

Свет от звезды распространяется от неё одинаково по всем направлениям. Чем дальше (ближе) от неё находится наблюдатель, тем тусклее (ярче) она для него кажется. Чтобы характеризовать яркость звезды на определённом расстоянии  $d_*$  от неё, используют такую физическую величину, как *освещённость*  $E_*$ :

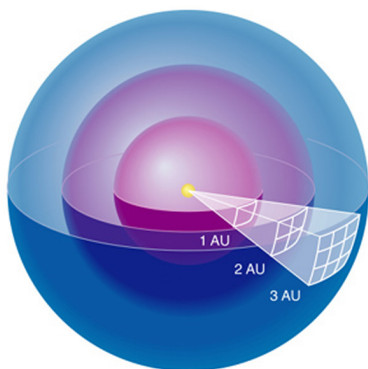


Рис. 2. К объяснению понятия *освещённость*

$$E_* = \frac{L_*}{4\pi d_*^2}.$$

Освещённость<sup>8</sup> – это светимость звезды, делённая площадью сферы с радиусом, равным расстоянию от наблюдателя до неё. С точки зрения физики *видимую*<sup>9</sup> яркость звезд (или, что то же самое, их *блеск*) разумно характеризовать именно создаваемыми ими освещённостями, а не светимостями, ведь светимость – это естественная характеристика звезды, а освещённость, как видно из формулы выше, обратно пропорциональна квадрату расстояния до неё. При увеличении расстояния до звезды вдвое или втрое световой поток от неё ослабится в четыре или девять раз соответственно.

<sup>5</sup>Индекс \* (звёздочка) означает, что эти величины характеризуют звезду.

<sup>6</sup>Напомним, что в единицах системы СИ мощность измеряется в Ваттах (1 Вт = 1 Дж / 1 с); в единицах СГС (сантиметр-грамм-секунда), принятых в астрофизике, она измеряется в эрг/сек (1 эрг =  $10^{-7}$  Дж).

<sup>7</sup>Не путать с вышеупомянутой постоянной Больцмана!

<sup>8</sup>Если быть точным, освещённость – это полное количество энергии, падающее в единицу времени на площадку единичной площади, или, что то же самое, суммарная мощность излучения, проходящего через поверхность, делённая на площадь этой поверхности.

<sup>9</sup>Здесь "видимая" означает "наблюдаемая с Земли" и не имеет отношения к человеческому глазу.

Телескоп (или наш глаз) регистрирует именно освещённость, создаваемую далёкими звёздами. Однако исторически сложилось так, что блеск звезд стали измерять задолго до введения физиками понятия *освещенность*, используя следующую единицу измерения.

### 3 Видимая звёздная величина (блеск)

Понятие "видимая звёздная величина" (прилагательное "видимая" часто опускают) было введено древнегреческим астрономом Гиппархом<sup>10</sup> во II веке до н.э. Он разделил видимые невооруженным глазом звезды по степени их яркости на шесть классов - звездных величин. Самые яркие звезды принадлежали к первому классу - имели первую звездную величину (обозначается как  $1^m$ ), а самые слабые принадлежали к шестому классу и имели шестую звездную величину ( $6^m$ ). Таким образом, чем больше звездная величина, тем слабее звезда. Связь между освещенностями и звездными величинами двух звёзд задаётся через **соотношение Погсона**:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \lg \frac{E_1}{E_2}, \quad \text{либо} \quad \frac{E_1}{E_2} = 2.512^{-(m_1 - m_2)},$$

где  $m_1, m_2$  - звёздные величины,  $E_1, E_2$  - освещённости,  $2.512 \approx \sqrt[5]{100}$ . Какой смысл несёт в себе эта формула? Если подставить в формулу выше  $m_1 = 1^m, m_2 = 6^m$ , то получится

$$\frac{E_1}{E_2} = 2.512^{-(1-6)} = 2.512^5 \approx 100,$$

то есть при увеличении звёздной величины на  $5^m$  освещённость уменьшается в 100 раз. Этот факт был экспериментально установлен ещё в середине XIX века, и на его основании была выведена формула выше. Как следствие, при разнице блеска  $1^m$  освещённости двух звёзд отличаются в примерно 2.512 раз<sup>11</sup>.

В качестве начала отсчета звездных величин астрономами была выбрана звезда Вега ( $\alpha$  Лиры). Условились считать, что она имеет блеск  $m = 0^m$  и блеск остальных звезд определяют через блеск Веги, то есть она является *фотометрическим стандартом*. Кроме того, в настоящее время используют дробные значения звездных величин, а более яркие звезды, чем Вега, имеют отрицательные звездные величины. Например, Сириус<sup>12</sup> ( $\alpha$  Большого Пса) имеет блеск  $m = -1.46^m$ , а видимая звёздная величина Солнца равна  $-26.74^m$ .

### 4 Абсолютная звёздная величина

Совершенно очевидно, что *видимая* звездная величина практически ничего не говорит нам о действительной светимости звезды. Яркая звезда первой звездной величины может быть близкой звездой-карликом низкой светимости, а слабенькая звездочка шестой звездной величины оказаться очень далеким сверхгигантом огромной светимости. Поэтому для характеристики светимости звезд введена шкала **абсолютных**<sup>13</sup> звездных величин. Абсолютная звездная величина  $M$  - это звездная величина, которую бы имела эта звезда, находясь на расстоянии 10 пк (напомним, что 1 парсек =  $3 \cdot 10^{16}$  м) от наблюдателя.

<sup>10</sup>Напомним, что он также установил факт прецессии земной оси.

<sup>11</sup>В психофизиологии такая взаимосвязь называется **законом Вебера-Фехнера**.

<sup>12</sup>Самая яркая звезда на ночном небе в видимом диапазоне электромагнитного спектра.

<sup>13</sup>В отличие от видимой звёздной величины, прилагательное "абсолютный" никогда не опускается!

Связь между видимой ( $m$ ) и абсолютной ( $M$ ) звездной величиной легко найти, используя закон Погсона и выражая расстояние до звезды в парсеках. Пусть освещённость звезды на расстоянии  $d$  пк равна  $E_d$ , а на расстоянии 10 пк она равна  $E_{10\text{пк}}$ . Тогда:

$$E_d = \frac{L}{4\pi(d \text{ пк})^2}, \quad E_{10\text{пк}} = \frac{L}{4\pi(10 \text{ пк})^2} \quad (\text{по определению})$$

$$M - m = -2.5 \lg \frac{E_{10\text{пк}}}{E_d} = -2.5 \lg \left[ \frac{L}{4\pi(10 \text{ пк})^2} / \frac{L}{4\pi(d \text{ пк})^2} \right] = -2.5 \lg \frac{d^2}{10^2} = -5 \lg d + 5$$

$$\text{Окончательно: } \boxed{M = m + 5 - 5 \lg d}.$$

Предлагаем вычислить абсолютную звёздную величину Солнца самостоятельно, для этого в формулу в рамочке необходимо подставить его видимую звёздную величину и расстояние до него, выраженное в парсеках. Напоследок отметим, что

$$M_1 - M_2 = -2.5 \lg \frac{L_1}{L_2},$$

то есть разница *абсолютных* звёздных величин связана с отношением *светимостей* так же, как разница *видимых* звёздных величин связана с отношением *освещённостей*.

## 5 Спектры звезд. Эффект Допплера

У разных звезд на излучение на разных длинах волн приходится разное количество энергии. **Спектр** звезды – распределение энергии излучения по длинам волн. Отметим, что создаваемая звёздой освещённость, о которой шла речь чуть выше, на самом деле подразумевалась просуммированной по всем длинам волн (так называемая *интегральная* освещённость).

В спектрах звезд на фоне непрерывного спектра заметны многочисленные темные относительно узкие линии поглощения<sup>14</sup>. Они образуются при переходах между энергетическими уровнями различных атомов и ионов в поверхностных слоях звезды. Каждый переход характеризуется вполне определенной длиной волны. Однако в наблюдаемых спектрах звезд длины волн  $\lambda$  этих переходов не совпадают с лабораторными<sup>15</sup> длинами волн  $\lambda_0$  этих переходов. Причиной этого является движение звезд относительно Земли. Вследствие движения звезды все наблюдаемые длины волн смещаются относительно своих лабораторных значений благодаря **эффекту Допплера**. Если звезда к нам приближается, линии в ее спектре смещаются в синюю (коротковолновую) область спектра, а если удаляется от нас, то в красную (длинноволновую)<sup>16</sup>. Величина смещения  $z$  зависит от скорости звезды *вдоль луча зрения*  $v_r$  и равна (где  $c$  - скорость света)

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (\text{по определению}), \quad z = \frac{v_r}{c} \quad (\text{по смыслу}).$$

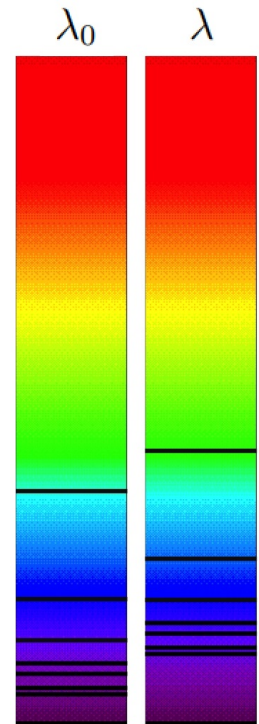


Рис. 3. Красное смещение  $\lambda_0 \rightarrow \lambda$

<sup>14</sup>Так называемые **фраунгоферовы линии**.

<sup>15</sup>То есть измеренными непосредственно рядом со звездой.

<sup>16</sup>Это прямой аналог звукового эффекта Допплера: например, частота звука сирены машины скорой помощи при её приближении к нам увеличивается, а при её удалении - уменьшается.