

В.И.Есин (учитель физики и астрономии) <Vesin2007@yandex.ru>
 МБОУ Запрудновская СШ, с. Запрудное, Кстовского района,
 Нижегородской области

Термоядерные реакции. Энергетические характеристики звезд.

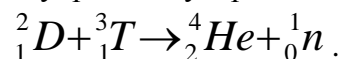
Авторская программа интегрированного курса физика + астрономия для 9-го класса.

Изучение данной темы можно начать с постановки проблемных вопросов: как, где, как долго образовывались химические элементы начала периодической системы Д.И. Менделеева.

Из предыдущих уроков учащиеся уже знают, что такое дефект масс и энергия связи атомного ядра. Напомним, что для легких элементов $M_{\text{ядра}} < Z \cdot m_p + N \cdot m_n$, где Z – число протонов в ядре атома, N – число нейтронов в ядре атома. Значит, если создать ситуацию, при которой отдельные протоны и нейтроны при слиянии будут образовывать более тяжелые элементы, то энергия при этом должна выделяться. Но чтобы между протонами начали действовать ядерные силы, их нужно сблизить на расстояние, равное размеру ядра, а значит нужно преодолеть кулоновское отталкивание. Для этого их нужно разогнать до больших скоростей, а это значит, что надо повысить температуру. Т.к. в 9-ом классе учащимся еще не известны формулы связи средней кинетической энергии движения частиц и абсолютной температуры ($E = \frac{3}{2}kT$), а также потенциальной

энергии взаимодействия зарядов ($W = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$), то следует сослаться на теоретические

расчеты, сделанные учеными, которые дают температуру порядка миллиона градусов. Такую температуру в земных условиях получить сложно, а значит сложно получить управляемую реакцию синтеза легких элементов. Пока же удалось осуществить лишь неуправляемую реакцию слияния взрывного типа в водородной бомбе:

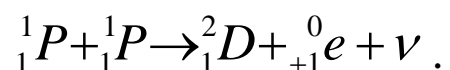


А вот в недрах звезд, например, внутри нашего Солнца, природа создала

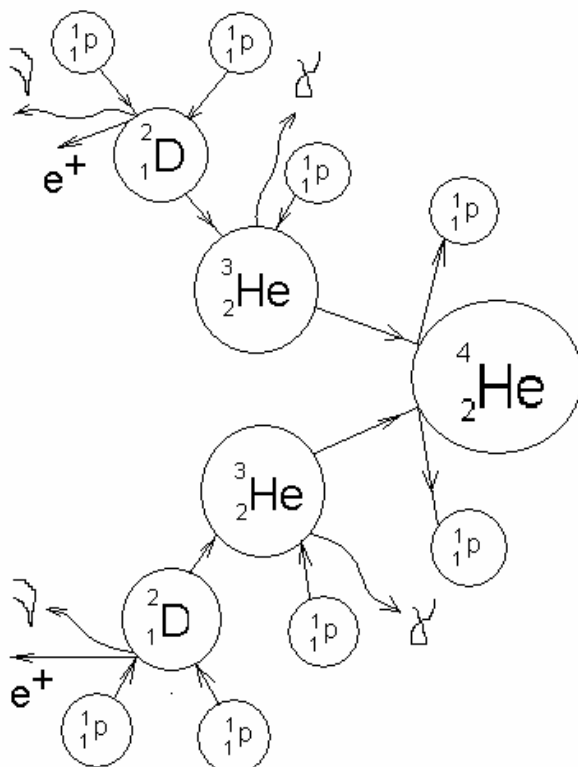
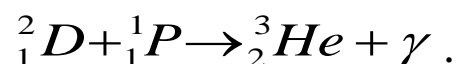
управляемые термоядерные реакции. При этом вводим определение термоядерной реакции: это реакции слияния легких ядер при очень высокой температуре.

Далее рассматриваем протон-протонный цикл, протекающий в недрах нашего Солнца.[1]

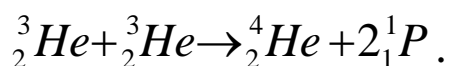
Сначала происходит реакция, при которой образуется ядро дейтерия, с вылетом нейтрино (ν) и позитрона (0_1e)



Далее идет реакция образования изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$:



И, наконец, «закрывающая» реакция цикла, в результате которой из двух изотопов ${}^3_2\text{He}$ образуется изотоп ${}^4_2\text{He}$ с освобождением двух протонов:



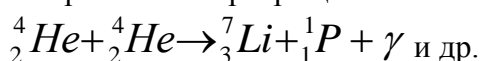
Затем подсчитываем энергию, выделяющуюся в этом цикле.

$$\Delta m = 4m_{{}^1_1\text{P}} - m_{{}^4_2\text{He}} = 4,032\text{a.e.m.} - 4,004\text{a.e.m.} = 0,028\text{a.e.m.}$$

$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot 931\text{МэВ} = 0,028\text{a.e.m.} \cdot 931\text{МэВ} \approx 26\text{МэВ}$, где 931 МэВ – энергия, приходящаяся на одну атомную единицу массы.

$$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

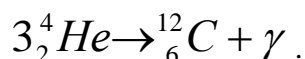
Далее кратко поясняем, как образуются более тяжелые химические элементы:[2] когда почти весь водород превратится в гелий (через несколько миллиардов лет), температура внутри звезды возрастает, и начинаются термоядерные реакции, в результате которых гелий превращается в более тяжелые элементы, например,



Предлагаем учащимся записать предполагаемые дальнейшие термоядерные реакции.



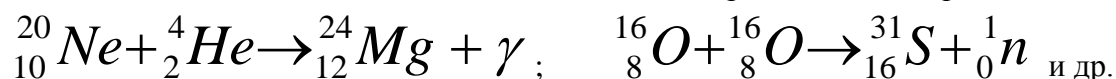
Затем объясняем, что в звездах типа Солнца (при данной массе) последней стадией является углерод. Образование углерода возможно в результате тройного α процесса:



В звездах массивнее Солнца возможны термоядерные реакции (при более высоких температурах):



Учащиеся самостоятельно записывают возможные предполагаемые реакции:



Уточняем, что последней стадией является железо.

Делаем первый вывод: все химические элементы до железа образуются внутри звезд, в результате термоядерных реакций длительное время (миллиарды лет).

Возвращаемся к вопросу о выделении энергии. Значит, Солнце дает нам свет, энергию, которая излучается с его поверхности, за счет термоядерных реакций, происходящих в его недрах.

Ставим вопрос. Как эта энергия передается к поверхности звезды? Чтобы ответить на этот вопрос, рассматриваем строение Солнца. Например, по предложенному плакату. Даем краткую информацию о каждом слое Солнца.

Фотосфера – это внешняя область Солнца, которую мы видим. Температура фотосферы примерно 6000°C . [3]

Зона конвекции – область, в которой циркулирующие потоки газа переносят теплоту от горячих недр наружу.

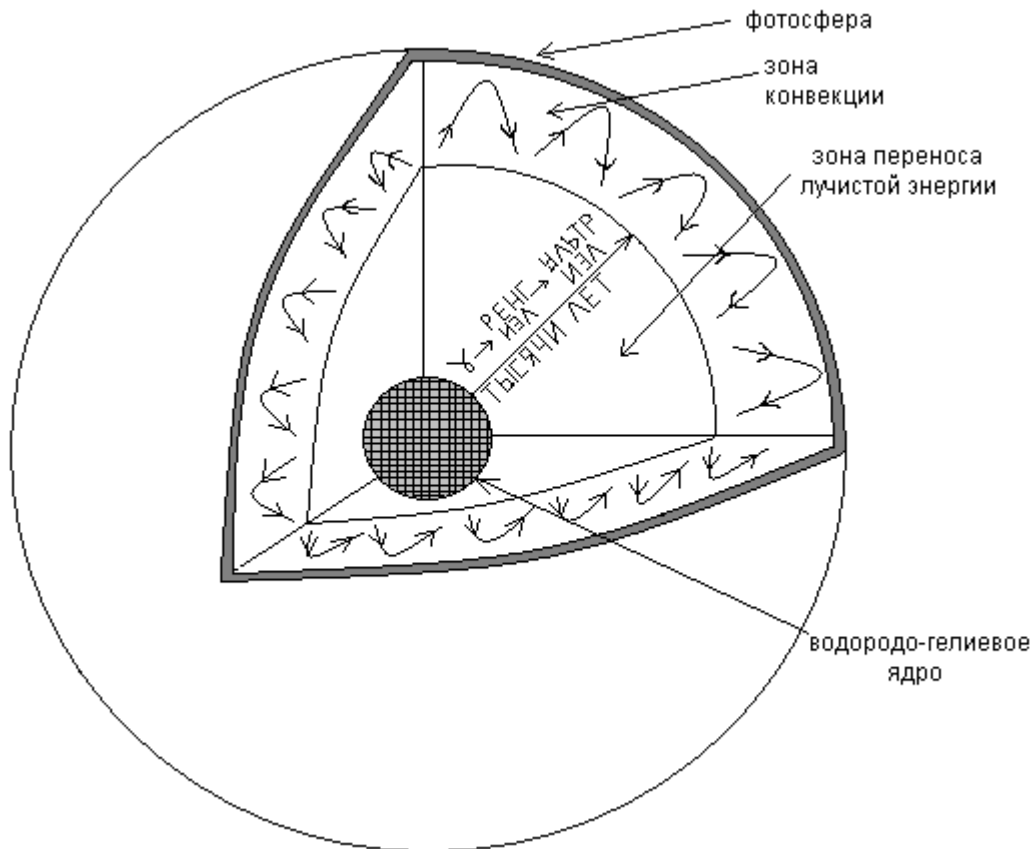
Зона переноса лучистой энергии – область, в которой энергия медленно просачивается к поверхности путем лучеиспускания по схеме:

γ _ кванты \rightarrow рентгеновские _ кванты \rightarrow ультрафиолетовые _ кванты

Солнечное ядро – это как бы атомная электростанция, где солнечная энергия генерируется в реакциях ядерного синтеза.

Вывод второй: энергия из недр к поверхности передается поэтапно длительное время.

Ставим следующий вопрос: а много ли энергии Солнце излучает со всей поверхности, например, за секунду?



Вводим понятия солнечной постоянной и светимости Солнца.[4]

Солнечная постоянная – энергия, которая падает в 1с на площадку в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно солнечным лучам вне земной атмосферы на среднем расстоянии Земли от Солнца.

$$L_0 \approx 1400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Светимость Солнца – произведение солнечной постоянной на площадь сферы, радиус которой равен 1а.е.

Предлагаем учащимся подсчитать светимость Солнца самостоятельно.

$$1\text{а.е.} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$$

$$S_{\text{сф}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 2,25 \cdot 10^{22} \text{ м}^2$$

$$L_{\odot} = L_0 \cdot S_{\text{сф}} = 1400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot 28 \cdot 10^{22} \text{ м}^2 \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

Вывод третий: значит, за 1с со всей поверхности Солнце излучает $4 \cdot 10^{26}$ Дж полной энергии.

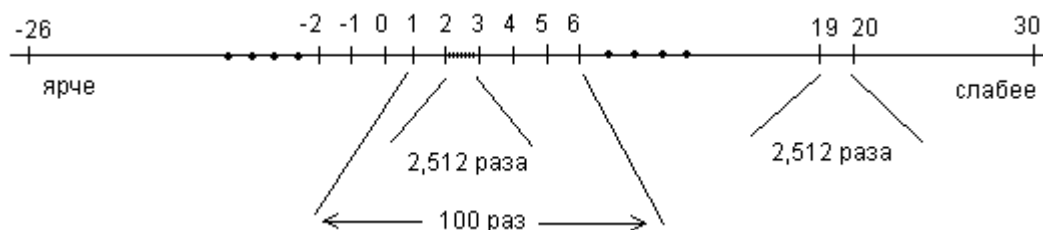
Светимости других звезд выражают в светимостях Солнца, принимая ее за единицу ($L_{\odot} = 1$).

Формулируем последний вопрос: а как узнать, какая из звезд, которые мы наблюдаем ярче чем другая; излучает больше энергии, т.е. имеет большую светимость?

Вводим понятие видимой звездной величины.

Видимая звездная величина (m) характеризует яркость (J) звезды, наблюдаемой с Земли.

Показываем шкалу видимых звездных величин и объясняем, что две звезды, у которых видимая звездная величина отличается на единицу, различаются по яркости в 2,512 раза.



Причем, чем меньше видимая звездная величина, тем ярче звезда.

Совместно с учениками выводим формулу Погсона
$$\frac{J_1}{J_2} = 2,512^{m_2 - m_1}.$$

Чтобы сравнивать светимости звезд, их необходимо как бы располагать на одно и то же стандартное расстояние от Земли (математическим методом). Таким расстоянием ученые выбрали расстояние в 10 парсек. Вводим понятие парсека. 1 парсек – это расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом в $1''$.

Вводим понятие абсолютной звездной величины.

Звездная величина, которую имела бы звезда, находясь на расстоянии в 10Пс, называется абсолютной звездной величиной (M).

Показываем также, что для сравнения светимостей звезд применима формула

Погсона
$$\frac{L_1}{L_2} = 2,512^{M_2 - M_1}.$$

Вывод четвертый: чтобы сравнивать яркости и светимости звезд, нужно воспользоваться формулой Погсона, зная заранее видимые и абсолютные звездные величины звезд.

Предлагаем учащимся в качестве закрепления материала решить следующую задачу:

Во сколько раз отличаются яркости и светимости Альтаира и α -Центавра? Известны при этом видимые и абсолютные величины этих звезд.

$$m_A = 0,8 \quad m_{\alpha-ц} = 0,0$$

$$M_A = 2,2 \quad M_{\alpha-ц} = 4,4$$

$$\frac{J_{\alpha-ц}}{J_A} = 2,512^{0,8-0,0} \approx 2,089 \quad \frac{L_A}{L_{\alpha-ц}} = 2,512^{4,4-2,2} \approx 7,587.$$

Литература:

1. П.И.Бакулин, Э.В.Кононович, В.И.Мороз «Курс общей астрономии», М. Наука 1983г.
2. И.А.Климишин «Астрономия наших дней», М. Наука 1980г.

3. Д.Моше «Астрономия» М. Просвещение 1985г.
4. Е.П.Левитан «Астрономия» М. Просвещение 1994г.