

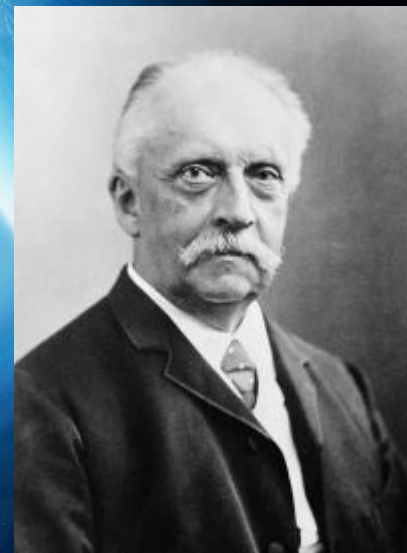


**Внутреннее
строение
звезд**

Внутреннее строение звезд

Источники энергии звезд

- Если бы Солнце состояло из каменного угля и источником его энергии было горение, то для при поддержании нынешнего уровня излучения энергии Солнце бы полностью сгорело за 5000 лет. Но Солнце светит уже миллиарды лет!
- Вопрос об источниках энергии звезд был затронут еще Ньютоном. Он предполагал, что звезды восполняют запас энергии за счет падающих комет.
- В 1845г. нем. Физик Роберт Мейер (1814-1878) попытался доказать, что Солнце светит за счет энергии на него межзвездного вещества.
- 1954г. Герман Гельмгольц высказал предположение, что Солнце излучает часть энергии, освобождающейся при его медленном сжатии. Из простых расчетов можно узнать, что Солнце полностью исчезло бы за 23 млн. лет, а это слишком мало. Кстати, этот источник энергии в принципе имеет место до выхода звезд на главную последовательность.

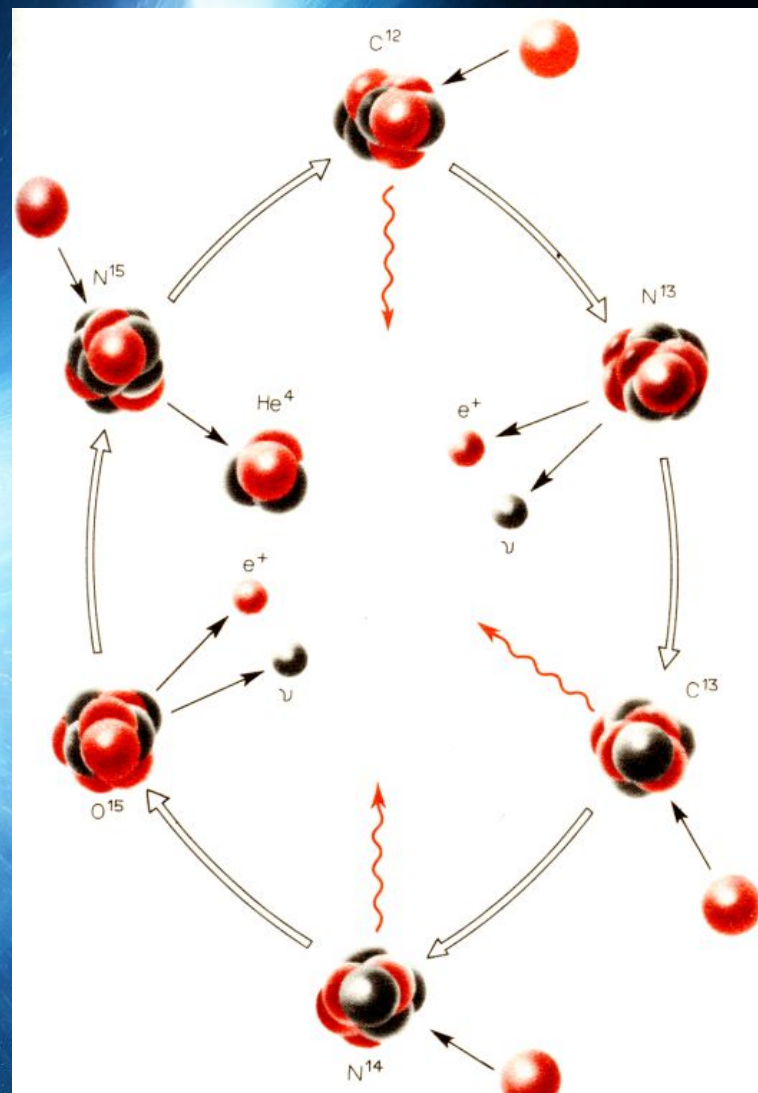
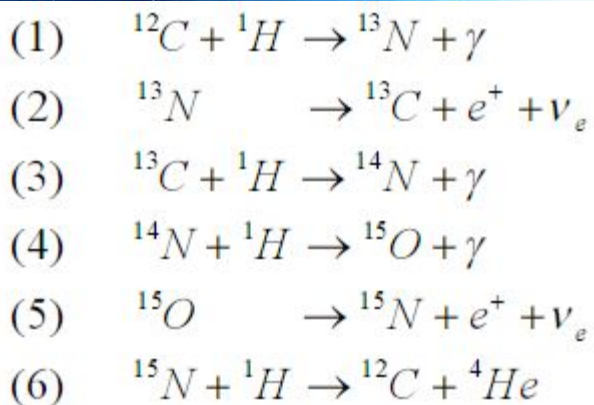


Герман Гельмгольц
(1821-1894г.)

Внутреннее строение звезд

Источники энергии звезд

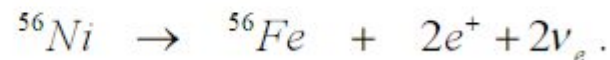
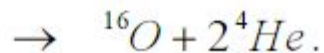
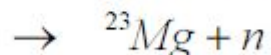
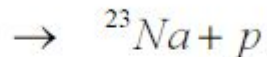
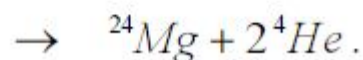
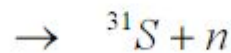
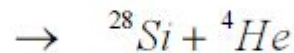
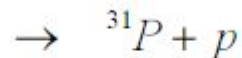
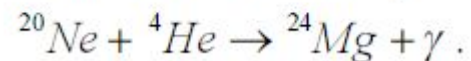
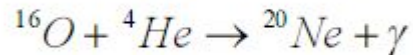
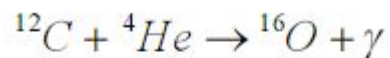
- При больших температурах и массах более 1,5 массы Солнца доминирует углеродный цикл (CNO). Реакция (4) самая медленная – для нее требуется около 1 млн. лет. При этом выделяется чуть меньше энергии, т.к. больше ее уносится нейтрино.
- Этот цикл в 1938г. Независимо разработали Ганс Бете и Карл Фридрих фон Вейцзекер.



Внутреннее строение звезд

Источники энергии звезд

- Когда горение гелия в недрах звезд заканчивается, при более высоких температурах становятся возможными другие реакции, в которых синтезируются более тяжелые элементы, вплоть до железа и никеля. Это α-реакции, углеродное горение, кислородное горение, кремниевое горение...



- Таким образом, Солнце и планеты образовались из «пепла» давно вспыхнувших сверхновых звезд.

Внутреннее строение звезд

Модели строения звезд

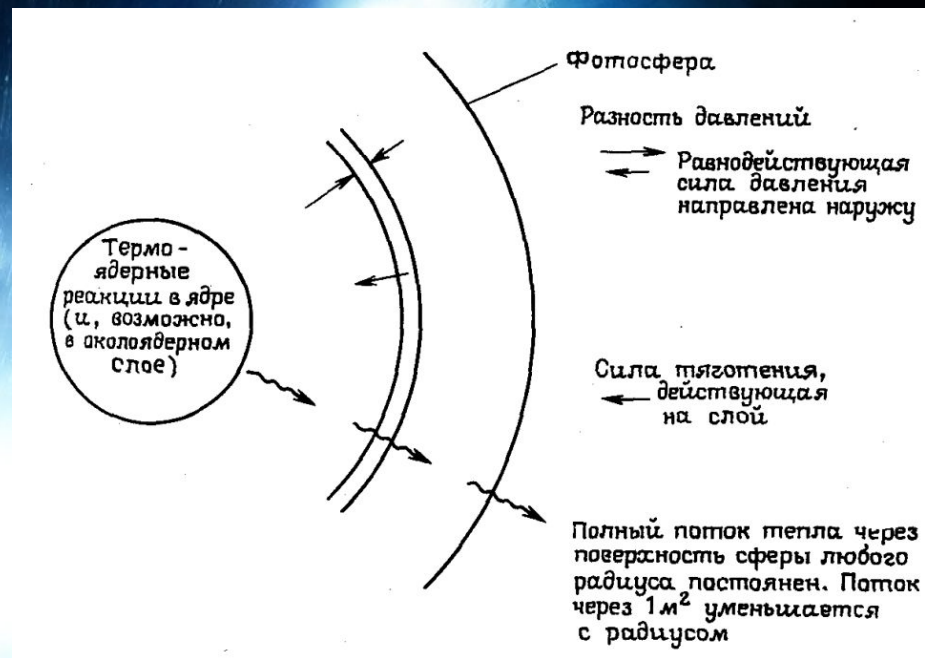
- В 1926г. была опубликована книга Артура Эддингтона «Внутреннее строение звезд», с которой, можно сказать, началось изучение внутреннего строения звезд.
- Эддингтон сделал предположение о равновесном состоянии звезд главной последовательности, т.е., о равенстве потока энергии, генерируемого в недрах звезды, и энергии, излучаемой с ее поверхности.
- Эддингтон не представлял источник энергии, но совершенно правильно поместил источник в самую горячую часть звезды – ее центр и предположил, что большое время диффузии энергии (миллионы лет) будет выравнивать все изменения, кроме тех, что проявляются вблизи поверхности .



Внутреннее строение звезд

Модели строения звезд

- Равновесие налагает на звезду жесткие ограничения, т.е., придя в состояние равновесия, звезда будет иметь строго определенное строение. В каждой точке звезды должен соблюдаться баланс сил гравитации, теплового давления, давления излучения и др. Также градиент температуры должен быть таким, чтобы тепловой поток наружу строго соответствовал наблюдаемому потоку излучения с поверхности.
- Все эти условия можно записать в виде математических уравнений (не менее 7), решение которых возможно только численными методами.



Внутреннее строение звезд

Модели строения звезд

Механическое (гидростатическое) равновесие

Сила, обусловленная разностью давлений, направленная от центра, должна быть равна силе тяготения.

$$dP/dr = -\rho M(r)G/r^2,$$

где P -давление, ρ -плотность, $M(r)$ – масса в пределах сферы радиуса r .

Энергетическое равновесие

Прирост светимости за счет источников энергии, содержащихся в слое толщиной dr на расстоянии от центра r , вычисляется по формуле

$$dL/dr = 4\pi r^2 \rho \epsilon(r),$$

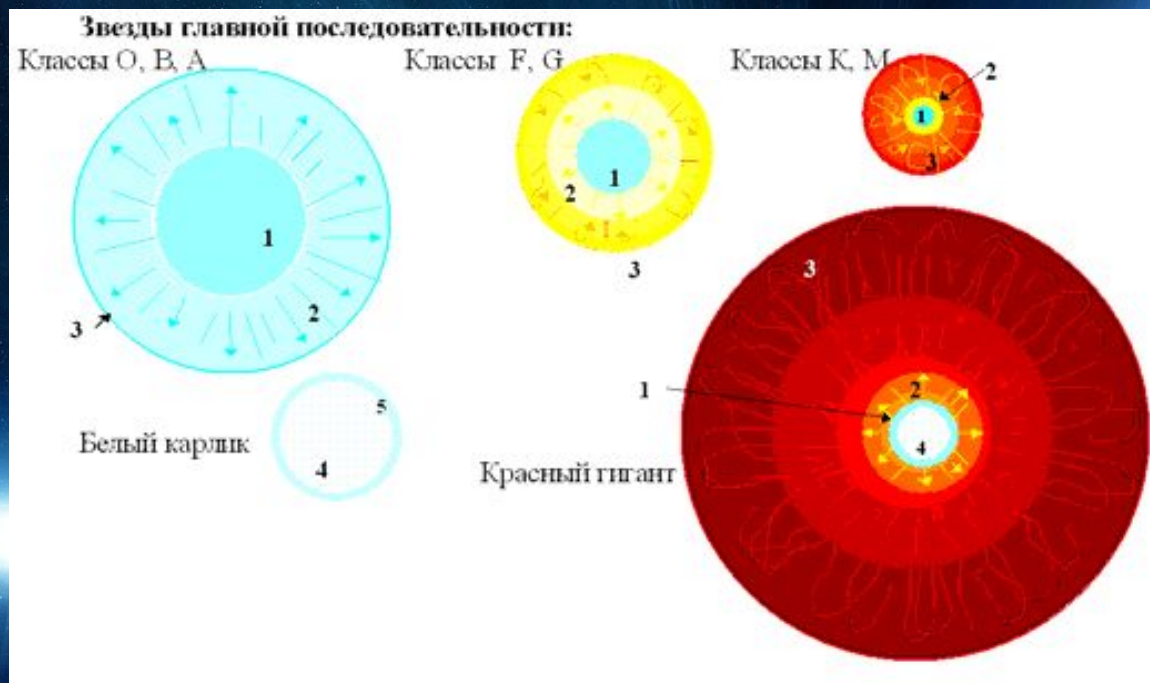
где L -светимость, $\epsilon(r)$ – удельное энерговыделение ядерных реакций.

Тепловое равновесие

Разность температур на внутренних и внешних границах слоя должна быть постоянна, причем, внутренние слои должны быть горячее.

Внутреннее строение звезд

Внутреннее строение звезд



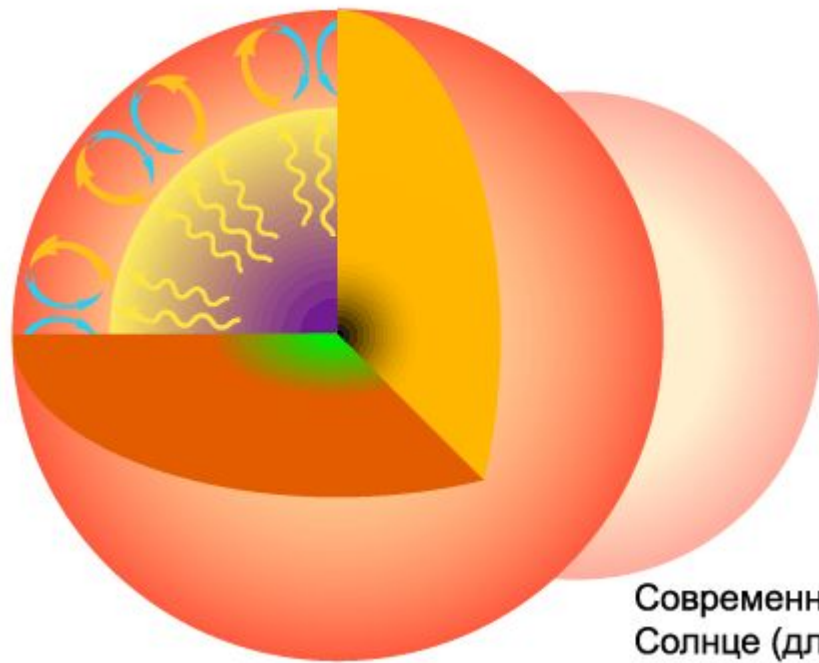
1. Ядро звезды (зона термоядерных реакций).
2. Зона лучистого переноса выделяющейся в ядре энергии внешним слоям звезды.
3. Зона конвекции (конвективного перемешивания вещества).
4. Гелиевое изотермическое ядро из вырожденного электронного газа.
5. Оболочка из идеального газа.

Внутреннее строение звезд

Строение звезд до солнечной массы

- Звезды с массой меньше 0,3 солнечной являются полностью конвективными, что связано с их низкими температурами и высокими значениями коэффициента поглощения.
- Звезды солнечной массы в ядре осуществляется лучистый перенос, тогда как во внешних слоях – конвективный.
- Причем, масса конвективной оболочки быстро уменьшается при движении вверх по главной последовательности.

Солнце в конце главной последовательности



Современное Солнце (для сравнения)

Внутреннее строение звезд

Конвективные зоны в звездах ГП

M/M_{sun}	L/L_{sun}	T_{eff}	R_*/R_{sun}	$R_{\text{кз}}/R_*$
0.5	0.0456	3956	0.457	0.56 (оболочка)
1	1	5770	1	0.71 (оболочка)
1.25	2.19	6250	1.27	0.06 (ядро) 0.92 (оболочка)
5	500	16500	2.75	0.16 (ядро)
50	316000	45500	9.34	0.4 (ядро)
50	316000	45500	9.34	0.4 (ядро)

Внутреннее строение звезд

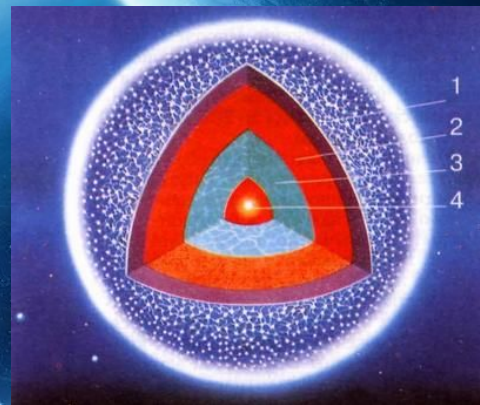
Строение вырожденных звезд

- Давление в белых карликах достигает сотен килограммов на кубический сантиметр, а у пульсаров – на несколько порядков выше.
- При таких плотностях поведение резко отличается от поведения идеального газа. Перестает действовать газовый закон Менделеева-Клапейрона – давление уже не зависит от температуры, а определяется только плотностью. Это состояние вырожденного вещества.
- Поведение вырожденного газа, состоящего из электронов, протонов и нейтронов, подчиняется квантовым законам, в частности, принципу запрета Паули. Он утверждает, что в одном и том же состоянии не может находиться больше двух частиц, причем их спины направлены противоположно.
- У белых карликов число этих возможных состояний ограничено, сила тяжести пытается втиснуть электроны в уже занятые места. При этом возникает специфическая сила противодействия давлению. При этом, $p \sim \rho^{5/3}$.
- При этом, электроны имеют высокие скорости движения, а вырожденный газ имеет высокую прозрачность вследствие занятости всех возможных энергетических уровней и невозможности процесса поглощения-переизлучения.

Внутреннее строение звезд

Строение нейтронной звезды

- При плотностях выше 10^{10} г/см³ происходит процесс нейтронизации вещества, реакции $p + e \rightarrow n + \nu$
- В 1934г Фрицем Цвикки и Вальтером Баарде теоретически было предсказано существование нейтронных звезд, равновесие которых поддерживается давлением нейтронного газа.
- Масса нейтронной звезды не может быть меньше $0,1M_{\odot}$ и больше $3M_{\odot}$. Плотность в центре нейтронной звезды достигает значений 10^{15} г/см³. Температура в недрах такой звезды измеряется сотнями миллионов градусов. Размеры нейтронных звезд не превышают десятков км. Магнитное поле на поверхности нейтронных звезд (в млн. раз больше земного) является источником радиоизлучения.
- На поверхности нейтронной звезды вещество должно обладать свойствами твердого тела, т.е., нейтронные звезды окружены твердой корой толщиной несколько сотен метров.



Внутреннее строение звезд

Список литературы

- М.М.Дагаев и др. *Астрономия* – М.:Просвещение, 1983
- П.Г. Куликовский. *Справочник любителя астрономии* – М.УРСС, 2002
- М.М.Дагаев, В.М.Чаругин “*Астрофизика. Книга для чтения по астрономии*” - М.:Просвещение, 1988г.
- А.И.Еремеева, Ф.А. Цицин «*История Астрономии*» - М.: МГУ, 1989г.
- Купер, Е.Уокер «*Измеряя свет звезды*» - М.:Мир, 1994г.
- Р.Киппенхан. *100 миллиардов солнц. Рождение, жизнь и смерть звезд.* М.:Мир, 1990г.