

АСТРОФИЗИКА

Лекция 6

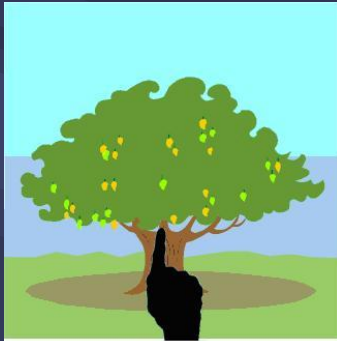
Звезды

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

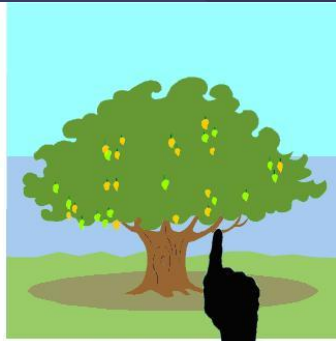
Звездные параллаксы

Звезды – далекие Солнца?

В течение веков некоторые ученые так думали, но были и серьезные основания для сомнений. Необходимо было обнаружить простой эффект.



Right eye open



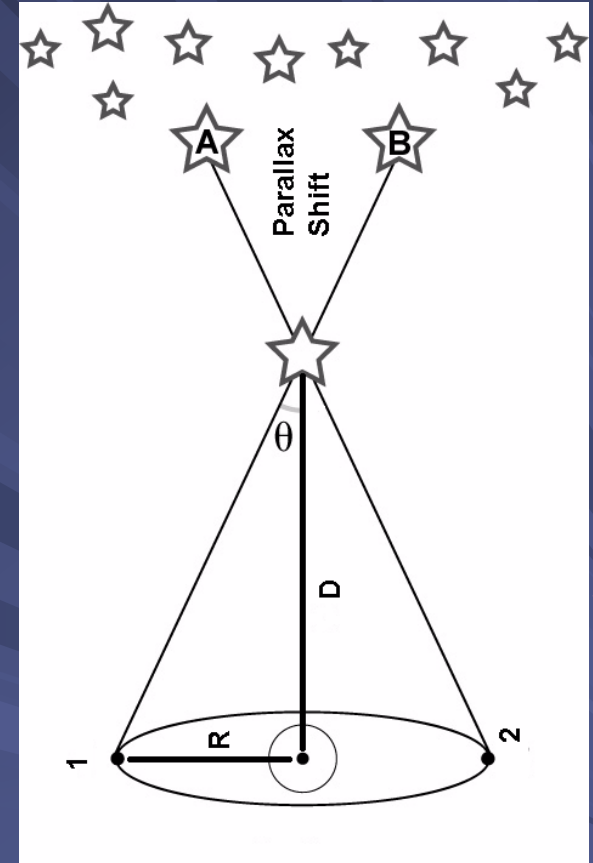
Left eye open



Тихо Браге

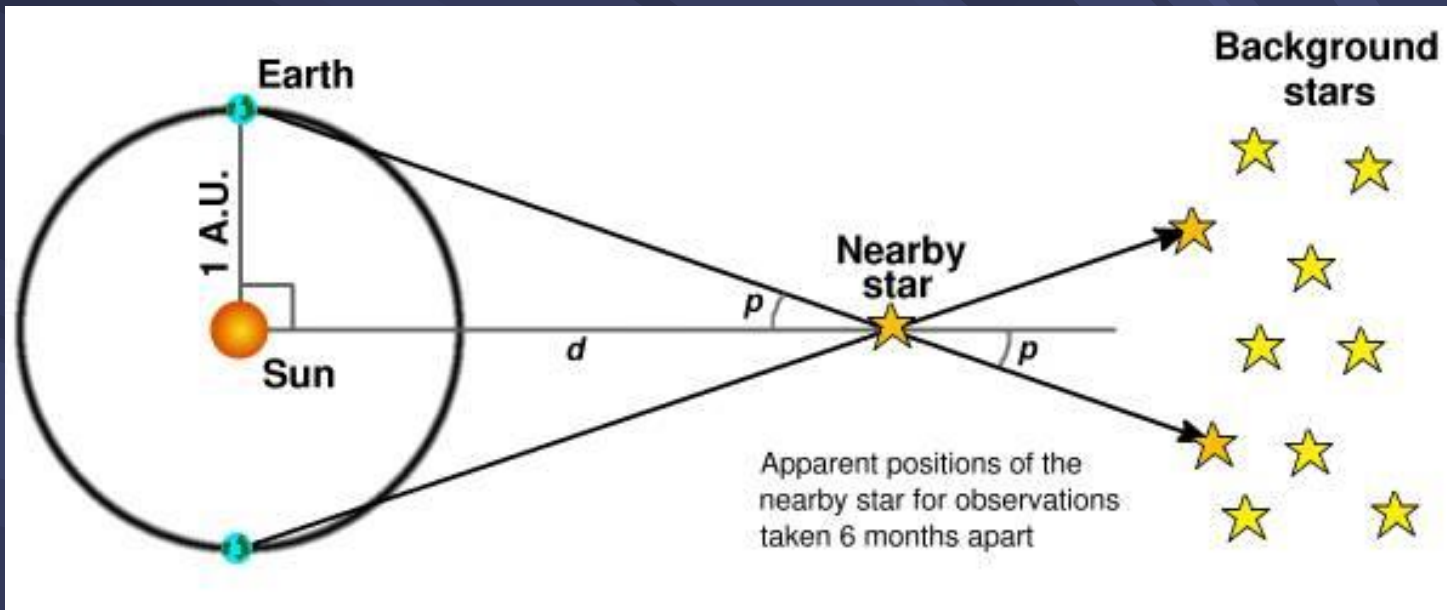
Если мы смотрим на некий предмет то одним, то другим глазом, то он сдвигается на фоне более далеких.

Так можно измерять расстояние до довольно далеких объектов.



Параллактический сдвиг из-за движения Земли вокруг Солнца.

Параллакс



Угол мал! Поэтому $\text{tg}(\text{параллакс}) \approx \sin(\text{параллакс}) \approx \text{параллакс} [\text{рад}]$

Расстояние = $1 \text{ а.е.} / \text{параллакс} [\text{рад}]$

Расстояние [пк] = $1 / \text{параллакс} [\text{угл.сек.}]$

Парсек – расстояние, соответствующее параллаксу одна угловая секунда
Парсек равен 206265 (число секунд в радиане) астрономических единиц.

$1 \text{ ПК} = 3.1 \cdot 10^{18} \text{ см}$

Первые измерения параллаксов



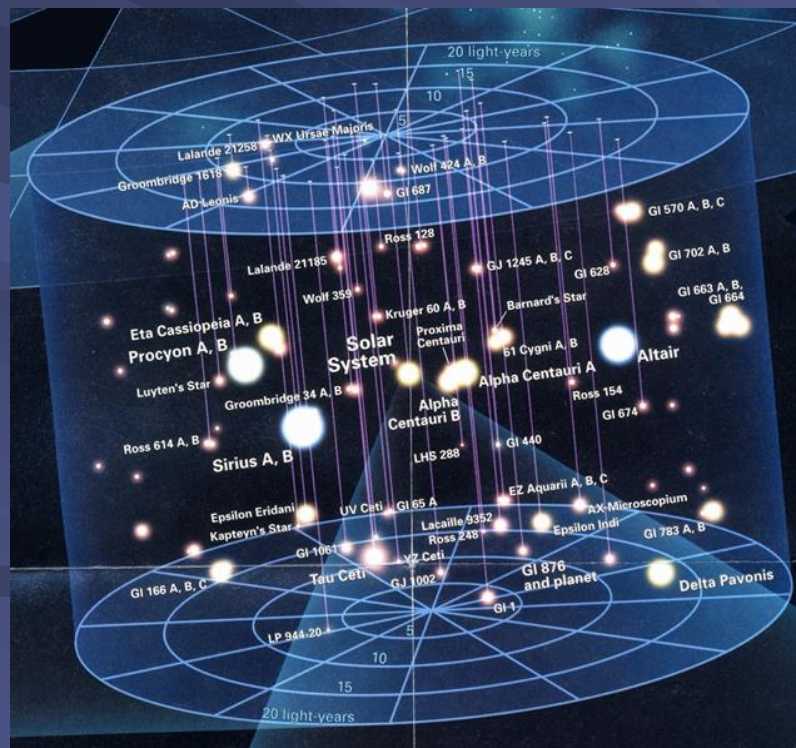
В.Я. Струве.
Вега. 1837 г.



Ф. Бессель.
61 Лебеда 1838 г.

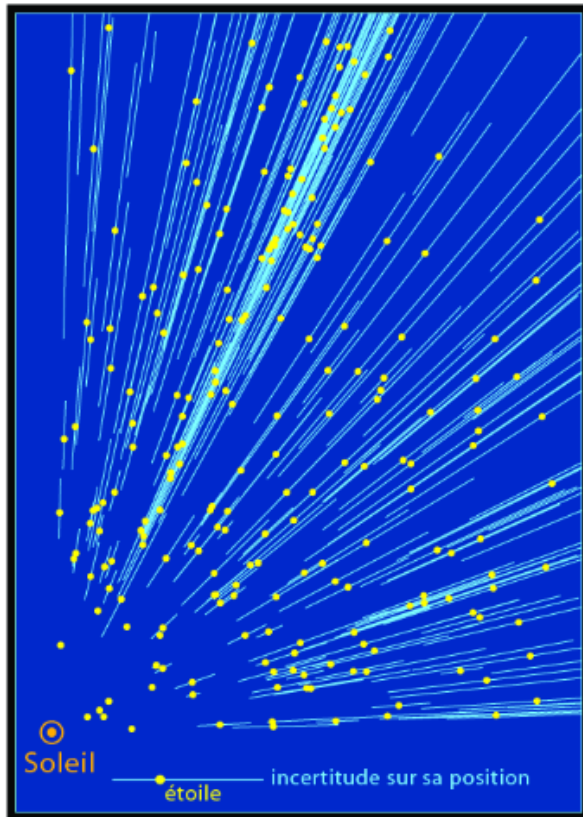


Томас Хендерсон
Альфа Центавра 1833

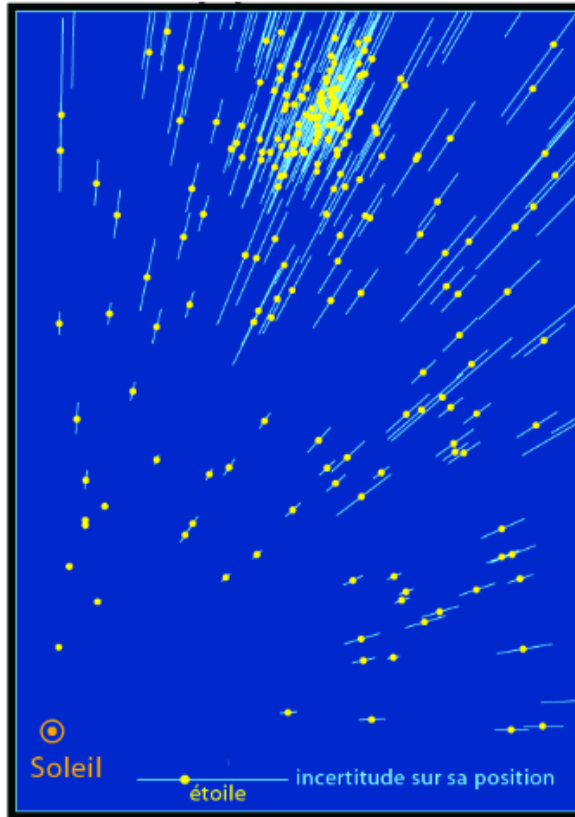


Пределы точного измерения расстояний

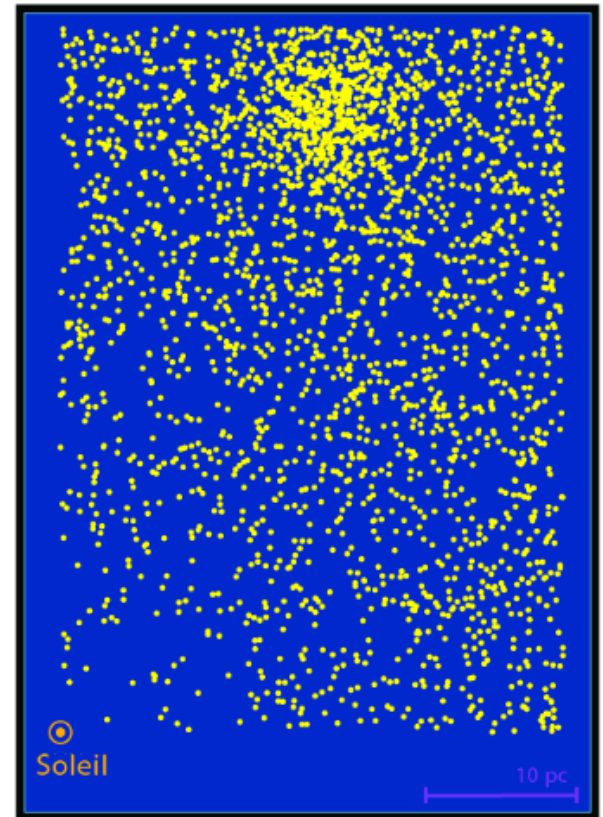
Sol



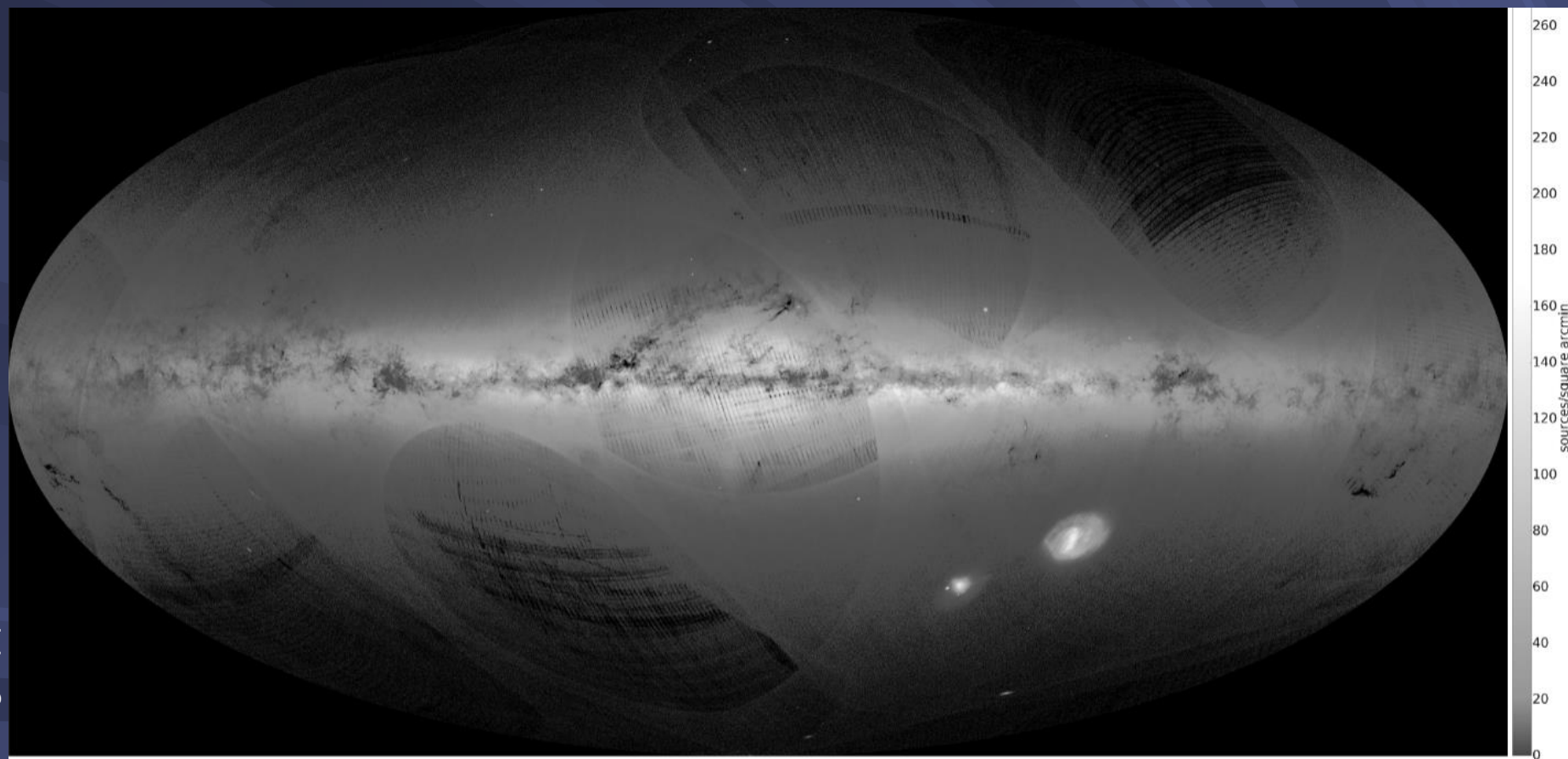
Hipparcos (1990)

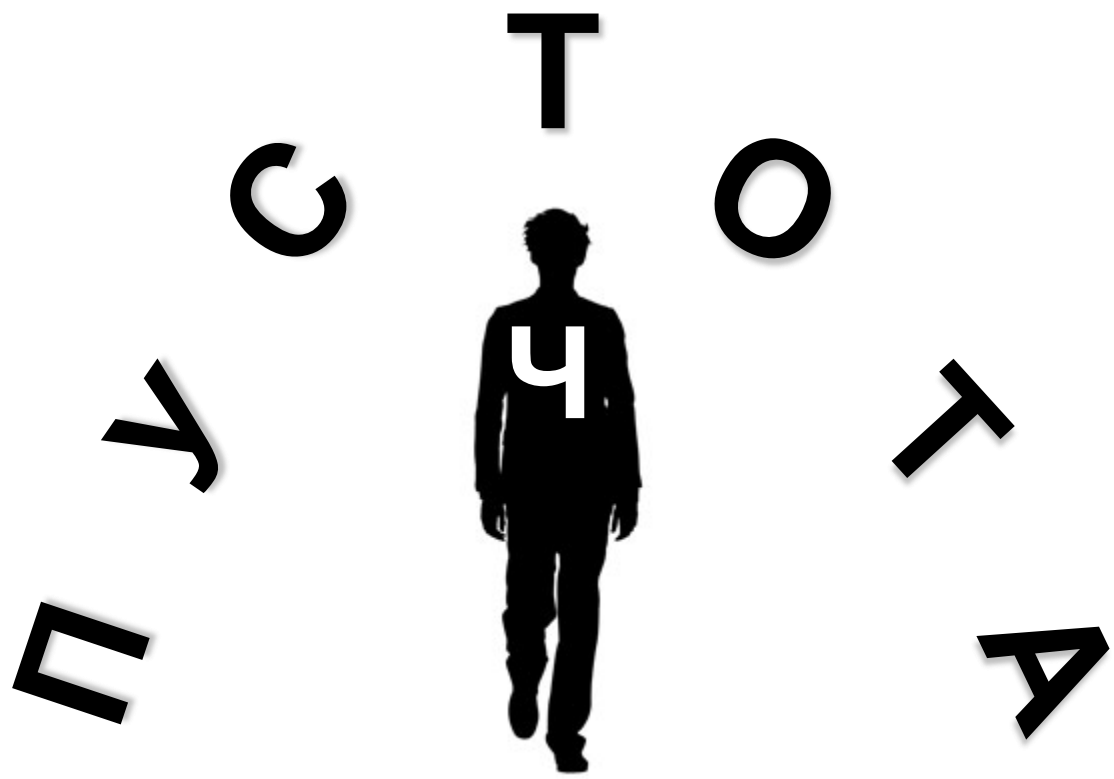


Gaia (2020)



Первый релиз данных Gaia



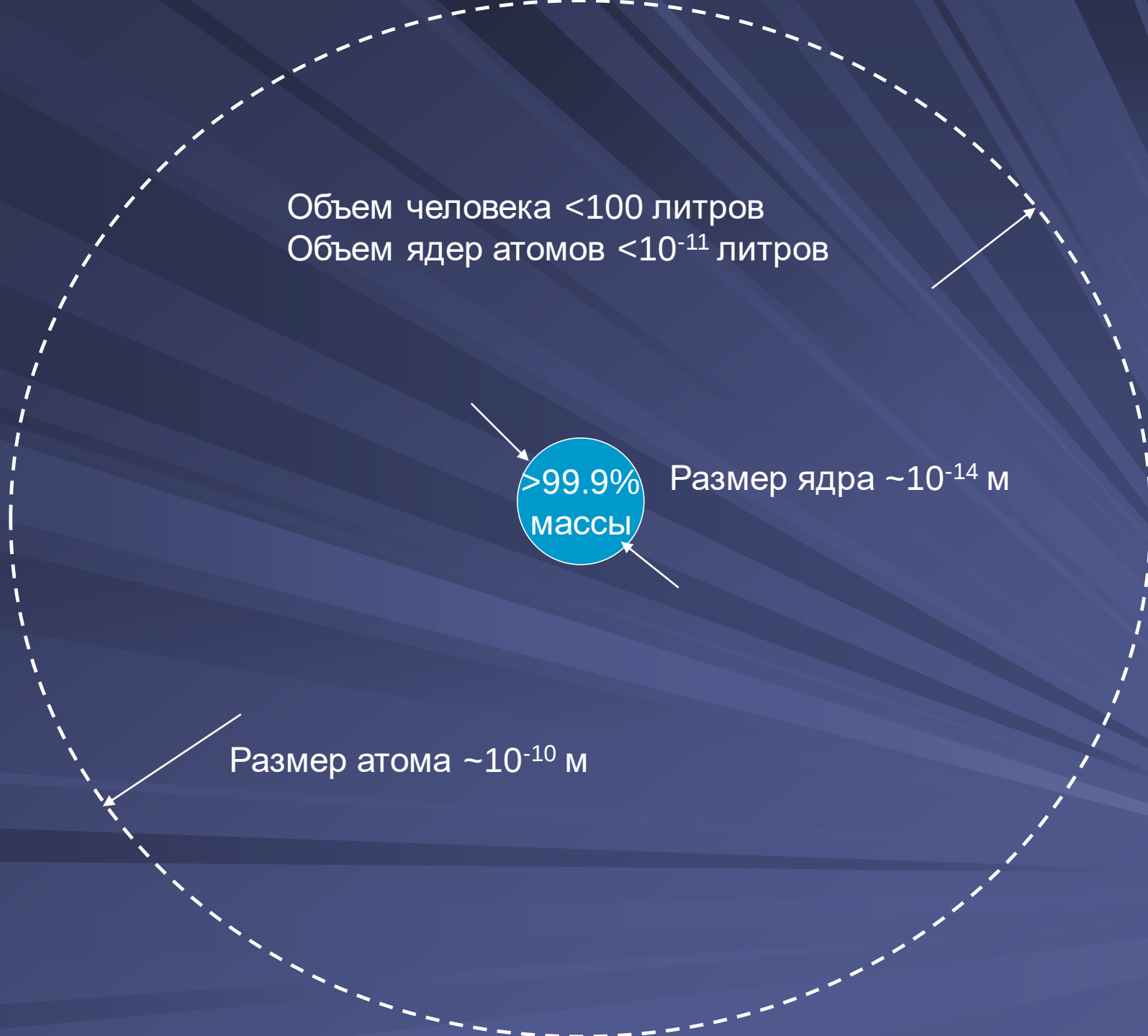


Объем человека < 100 литров
Объем ядер атомов $< 10^{-11}$ литров

$> 99.9\%$
массы

Размер ядра $\sim 10^{-14}$ м

Размер атома $\sim 10^{-10}$ м

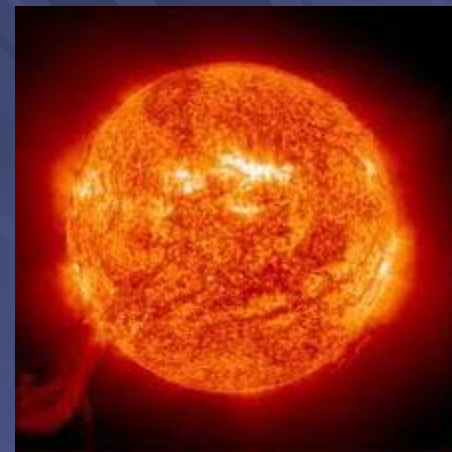


The background of the image is a deep-field astronomical photograph, likely from the Hubble Space Telescope. It shows a dense field of galaxies at various distances, appearing as small, colorful (blue, yellow, red) and irregular shapes. Interspersed among these galaxies are numerous individual stars, which appear as bright, point-like sources of light with some showing diffraction spikes. The overall color palette is dominated by the black of space, with highlights from the galaxies and stars in shades of blue, yellow, and red.
$$V_{\text{звёзд}} < 10^{-30} V_{\text{вселенная}}$$

Галактики и звёзды

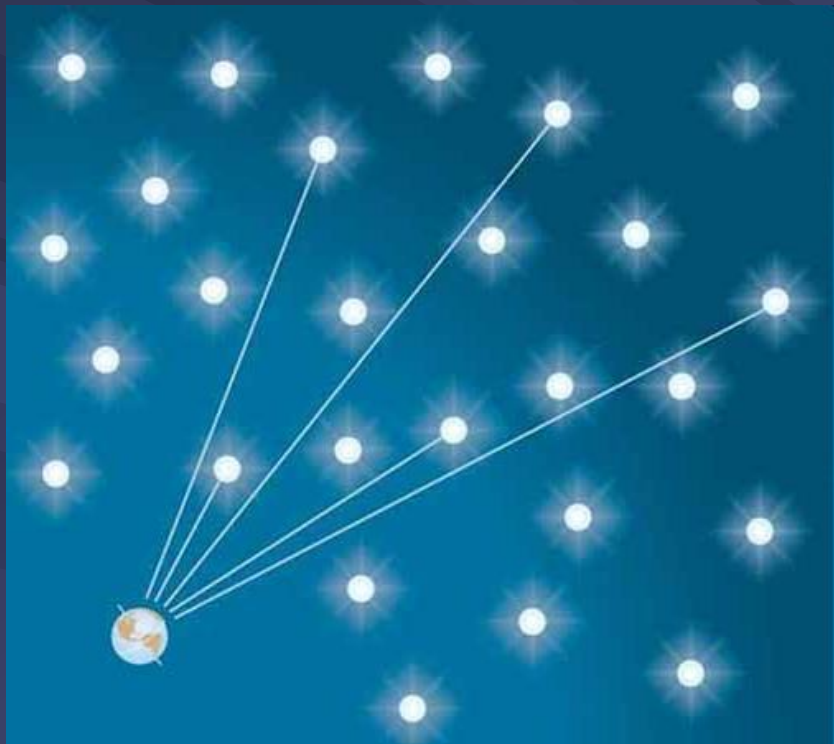


Свет звёзд



Мы видим мир, потому что есть свет звёзд

Парадокс Ольберса

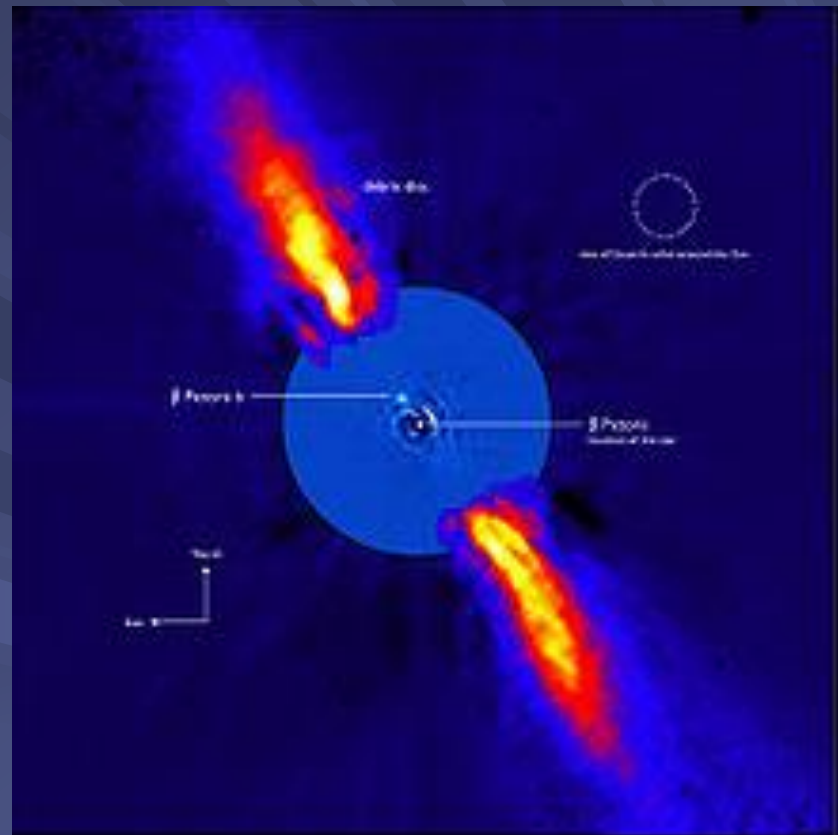


Значит, звёзды где-то «заканчиваются».

Мы смотрим в прошлое

Звёзды когда-то возникли

Образование звёзд



Мы видим звёзды разных возрастов.
В том числе и молодые и только-только
образующиеся на наших глазах.

Масса Джинса

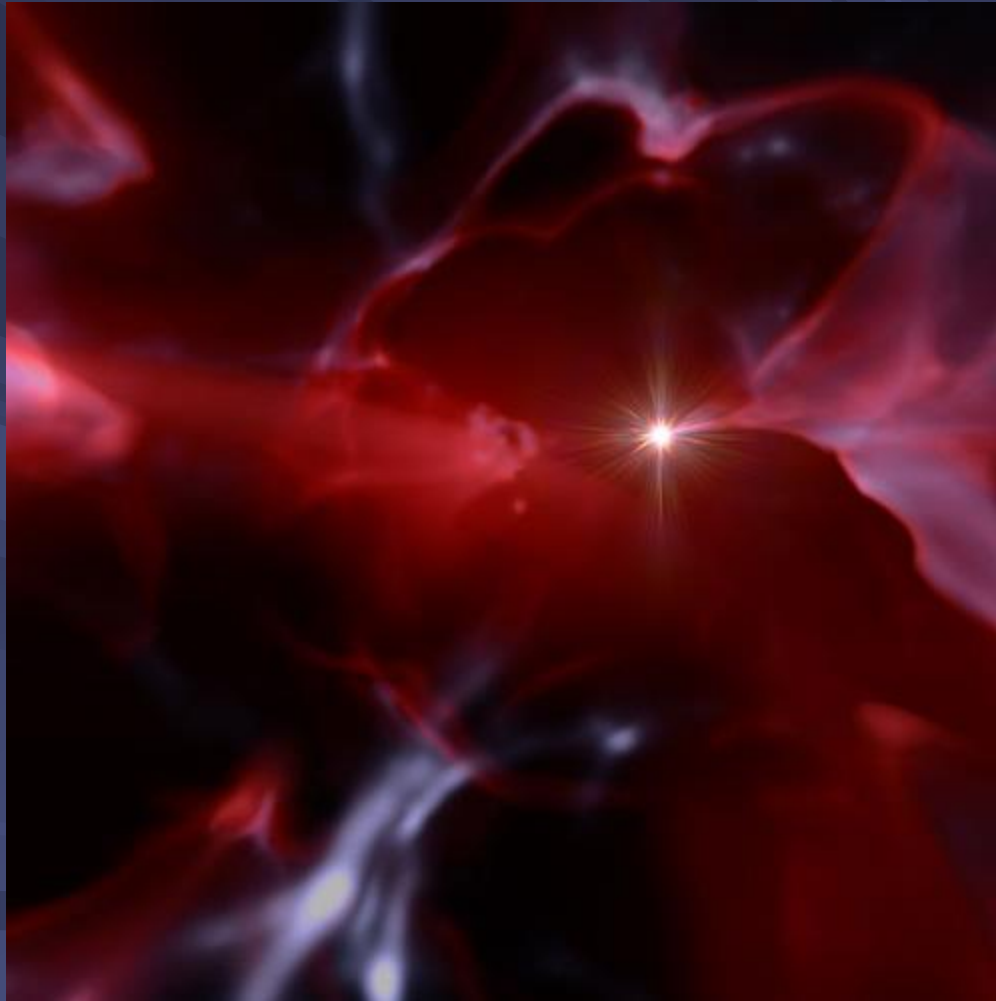
$$2K + U = 0 \left\{ \begin{array}{l} K = (N) \left(\frac{3}{2} kT \right) \\ U = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \end{array} \right. \Rightarrow 2NkT = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$M_J = \left(\frac{5kT}{Gm} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho} \right)^{1/2}$$

if $M_{\text{cloud}} > M_J \rightarrow \text{collapse!}$

$$R_J \simeq \left(\frac{15kT}{4\pi G \mu m_H \rho_0} \right)^{1/2}$$

Первые звёзды



Звёзды образуются раньше галактик

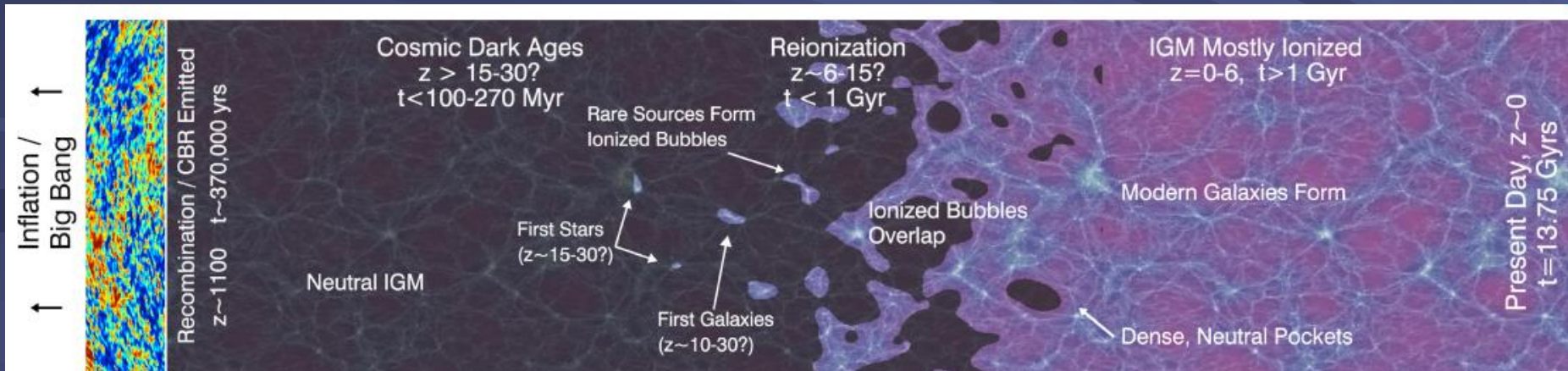
История вселенной

В начале вселенная была горячей. В течение сотен тысяч лет это были ионизованный водород и гелий.

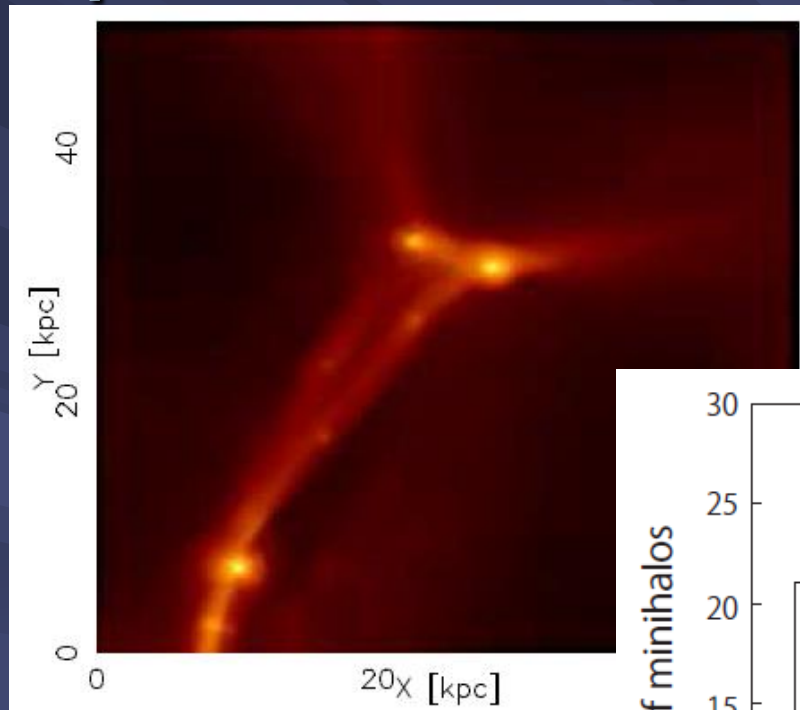
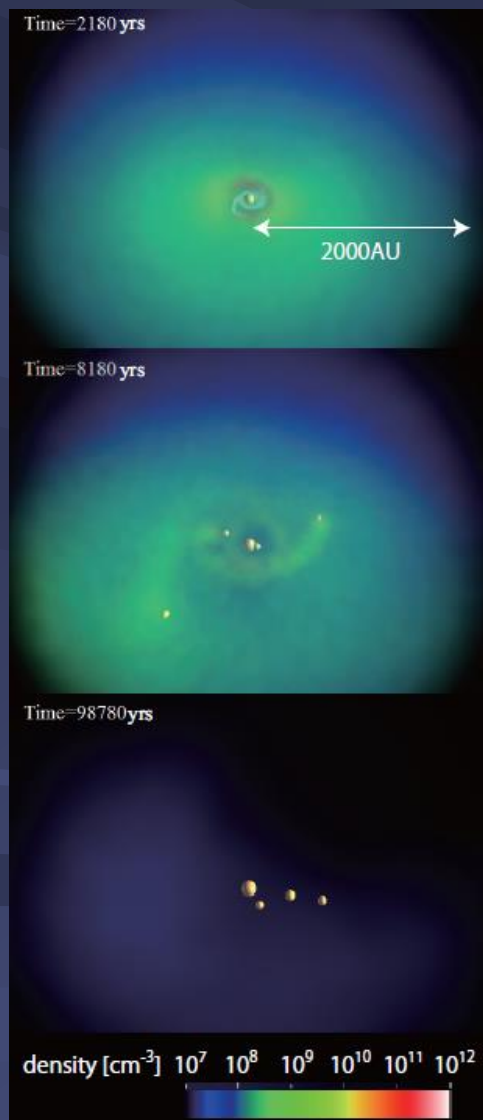
Спустя примерно 370 000 лет после начала расширения вещество рекомбинировало – стало нейтральным.

Наступили «темные времена».

Постепенно начали появляться первые звезды и квазары. Возникали галактики.

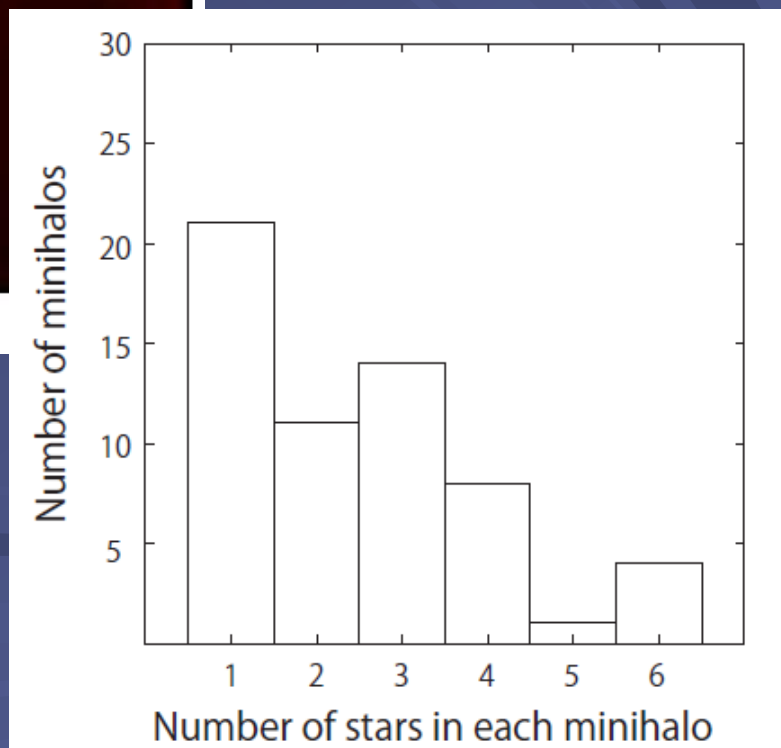


Моделирование первых звезд

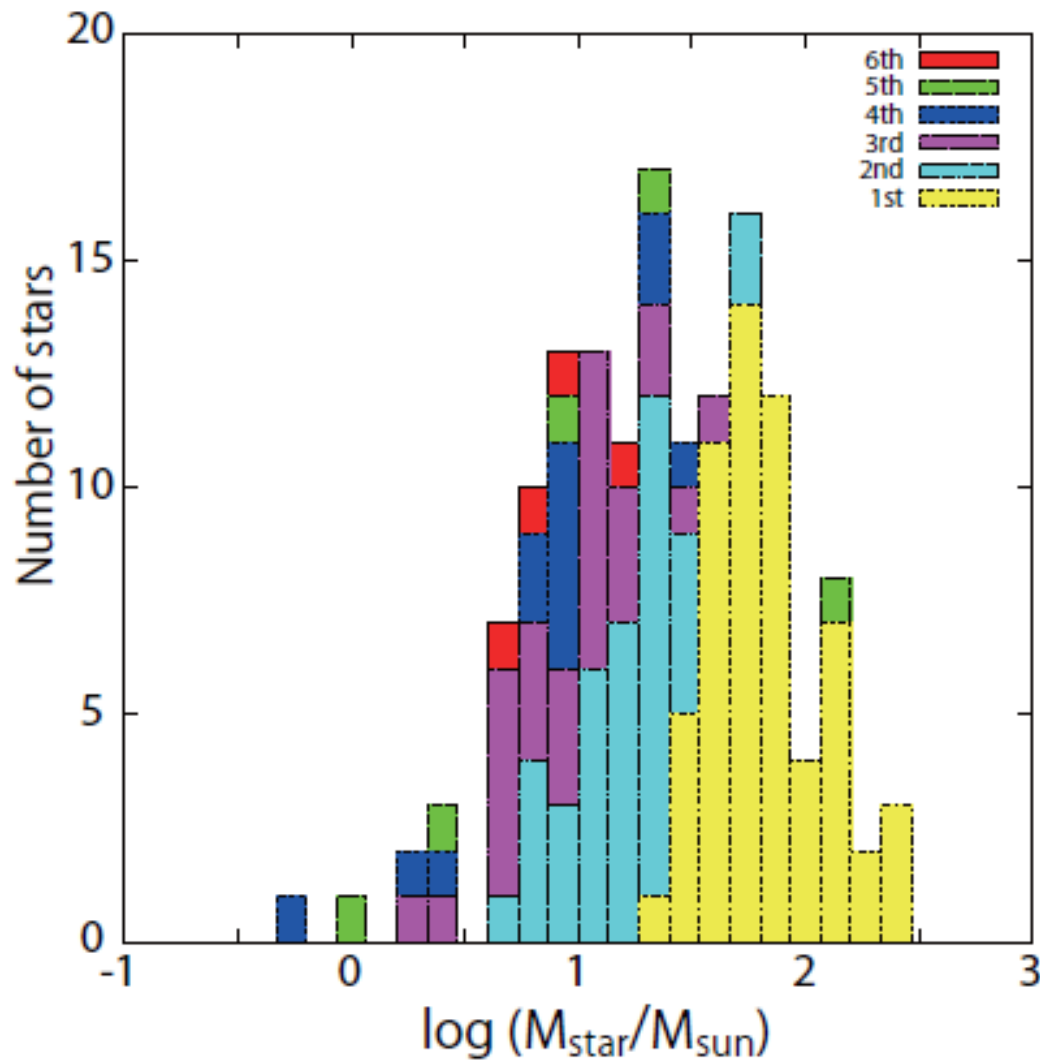


1407.1374

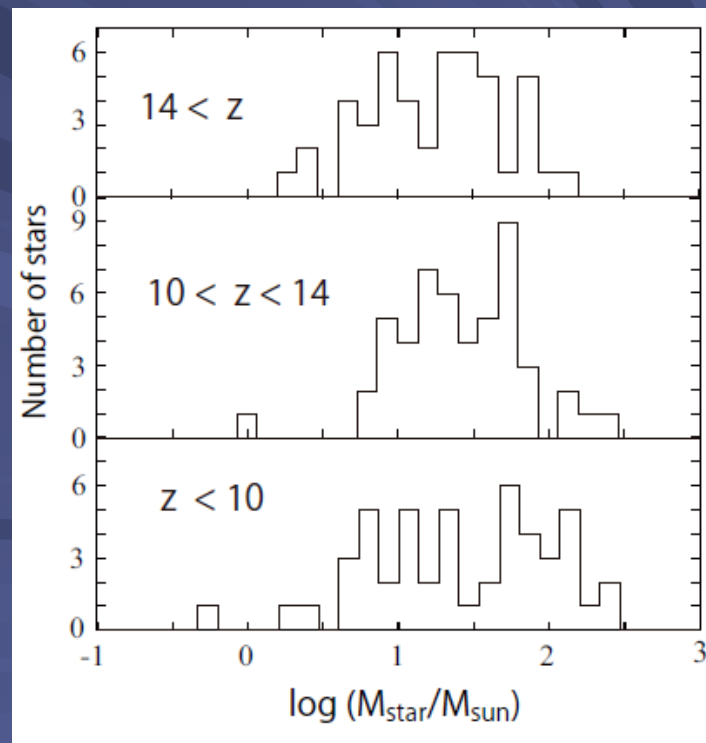
Часто в минигало
образуется более
чем одна звезда.
Поэтому звезды
могут быть не только
очень массивными.



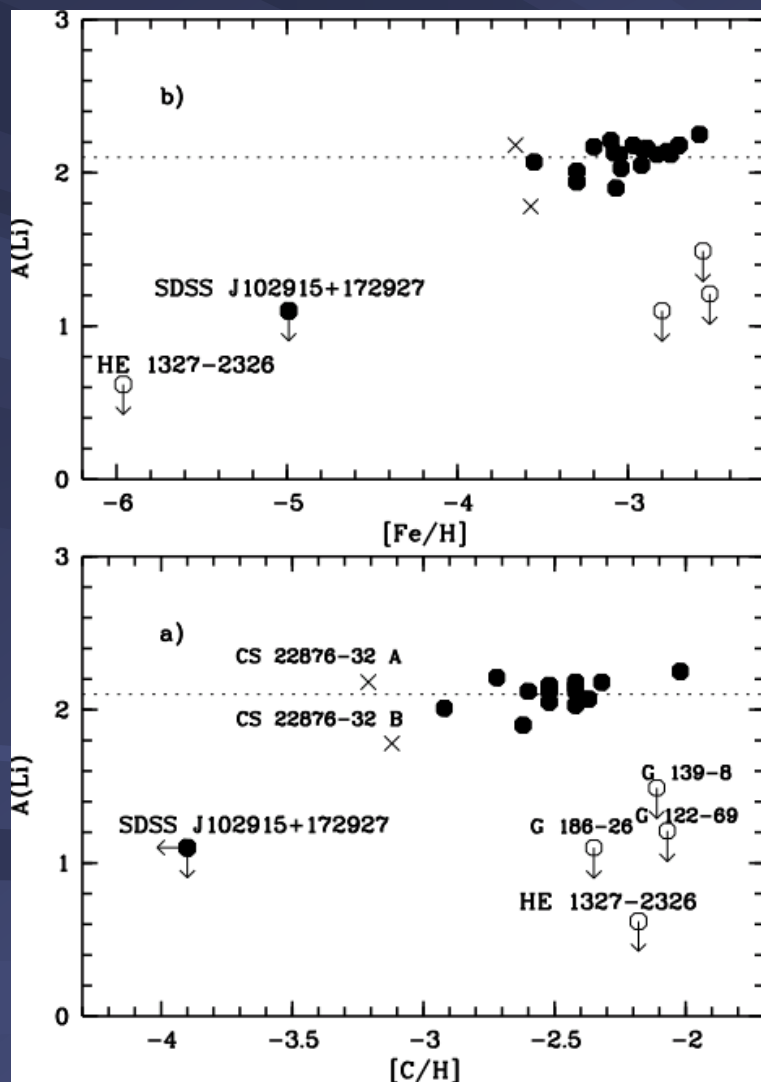
Спектр масс первых звезд



1407.1374



Очень малометаллическая звезда



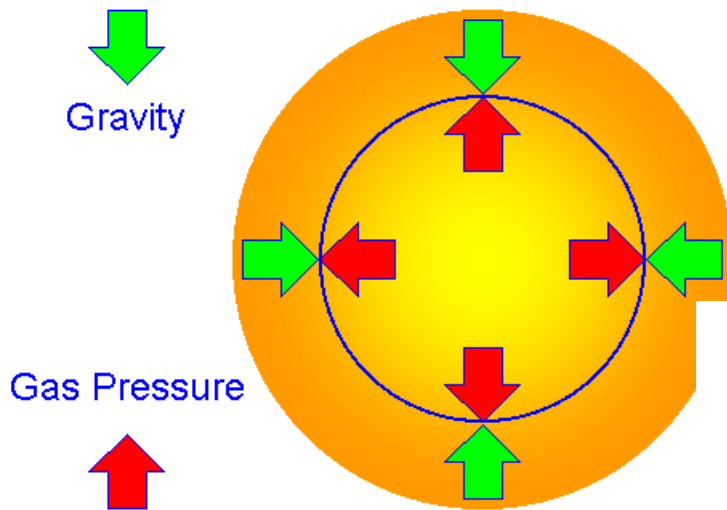
Самое низкое отношение C/H
Самая низкая металличность.

Если предел понизить еще в два раза,
то возникнут проблемы у моделей
образования самых первых звезд,
т.к. сейчас они говорят, что
маломассивные звезды не могли
образовываться из первичного вещества.

Наблюдения велись на VLT в Чили.

Устойчивость звезды

Hydrostatic Equilibrium



Сила тяжести уравновешена градиентом давления.

Для приближенных оценок
можно использовать
 $P/\rho \approx GM/R^2$

$$\rho \frac{d^2 r}{dt^2} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} - \frac{dP}{dr}$$

Diagram illustrating the forces in a star's interior, with handwritten annotations:

- DENSITY** (circled in pink) points to ρ .
- MASS WITHIN A SPHERE OF RADIUS r** (circled in green) points to M_r .
- ACCELERATION** (boxed in orange) points to $\frac{d^2 r}{dt^2}$.
- GRAVITATIONAL CONSTANT** (boxed in black) points to G .
- PRESSURE GRADIENT** (boxed in blue) points to $\frac{dP}{dr}$.

«Отрицательная теплоемкость»

Для звезды можно записать теорему вириала.

Отвод тепловой энергии приводит к сжатию звезды (например, из-за падения темпа выделения энергии), что влечет за собой ее нагрев.

Наоборот, подвод избыточной энергии (например, из-за роста энерговыделения в ядре) приводит к расширению и остыванию.

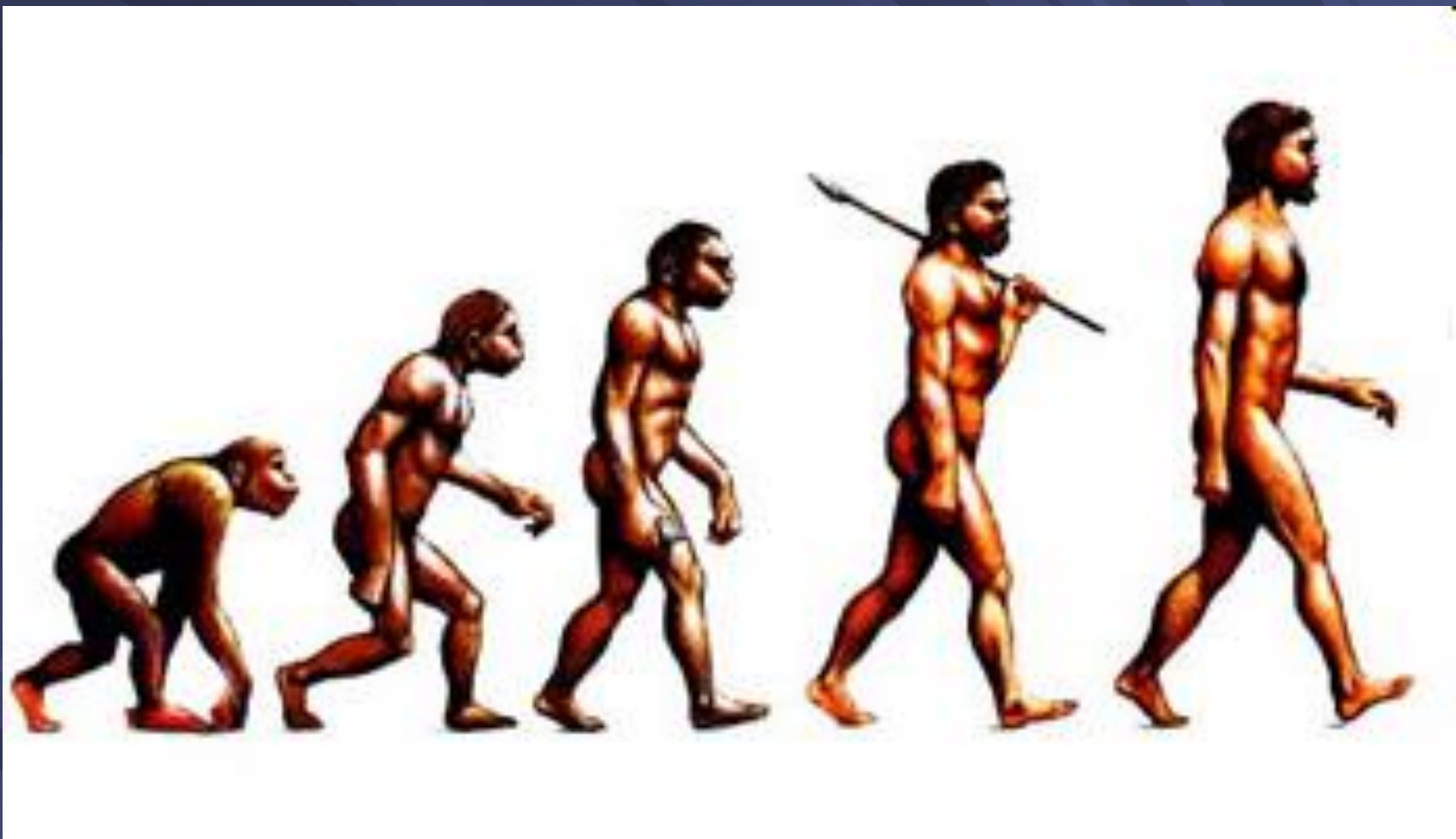


(рис. В. Липунова)

<http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a534/lec10.pdf>

<http://zuserver2.star.ucl.ac.uk/~jcr/3134/evol/virial.pdf>

Эволюция



Эволюция звёзд



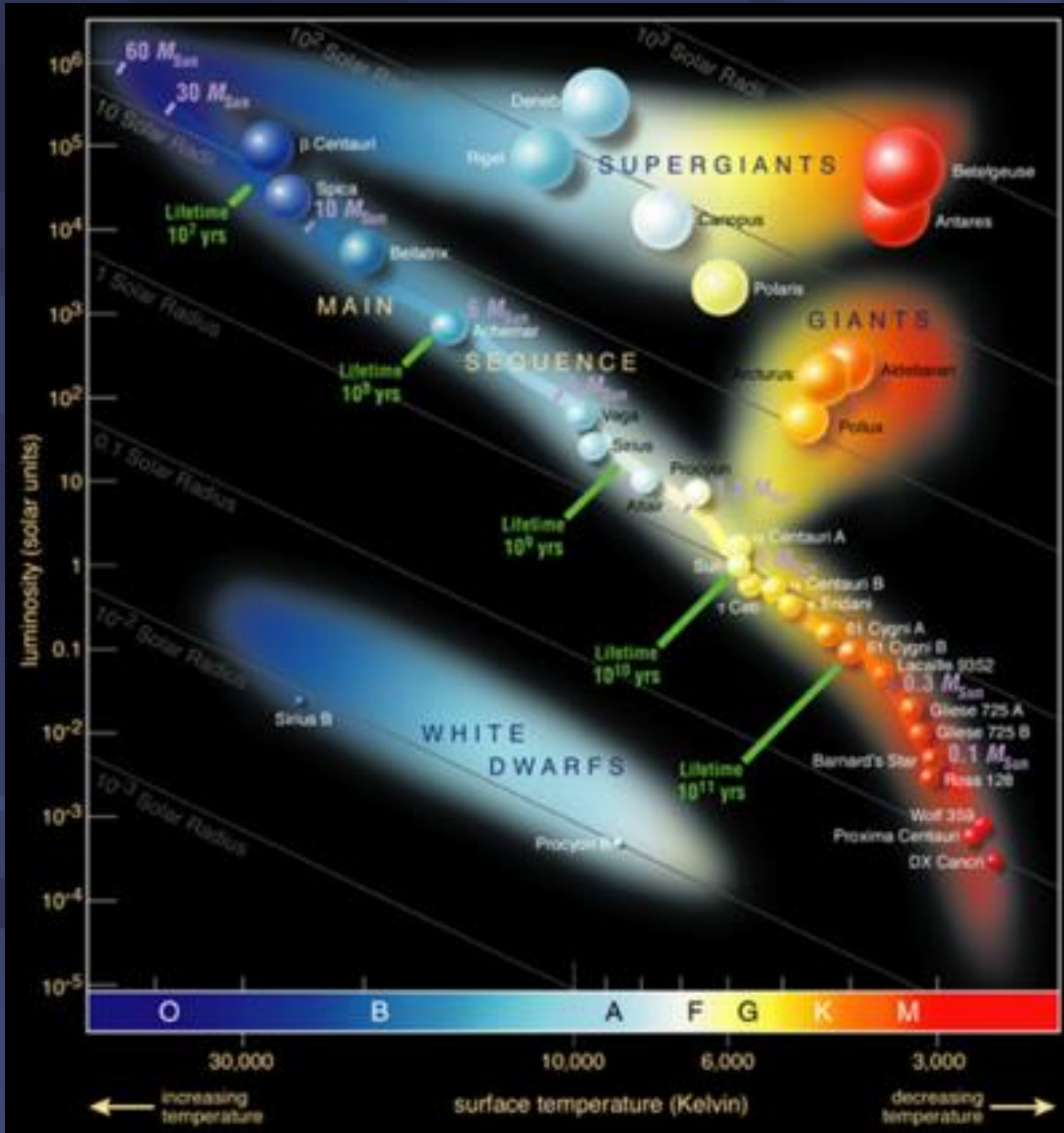
Популяция III – самые первые звёзды

Популяция II – старые звёзды в Галактике

Популяция I – «современные» звёзды (Солнце)

Меняется состав звёзд, меняются звёзды,
меняется их судьба

Диаграмма Герцшпрунга -Рассела



Самые легкие звезды имеют массу 0.08 солнечных.

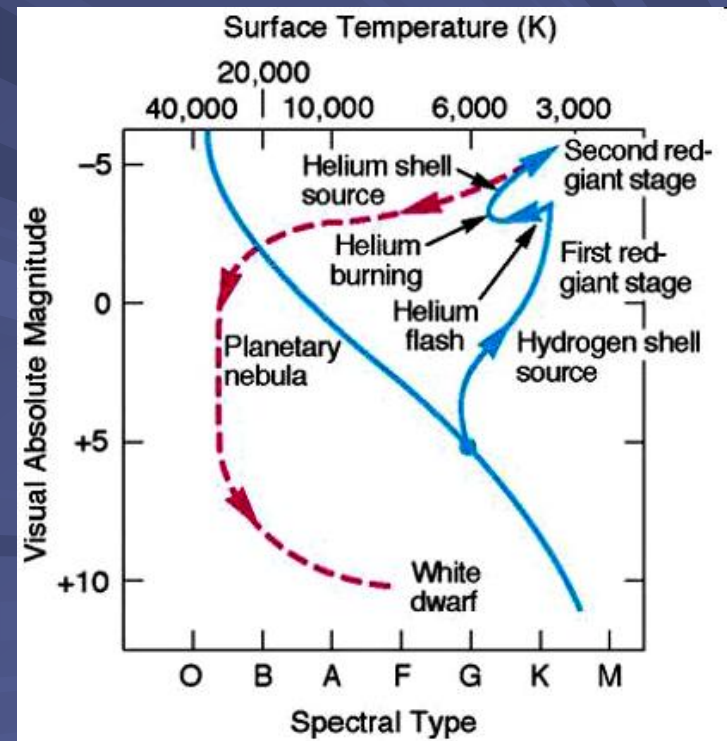
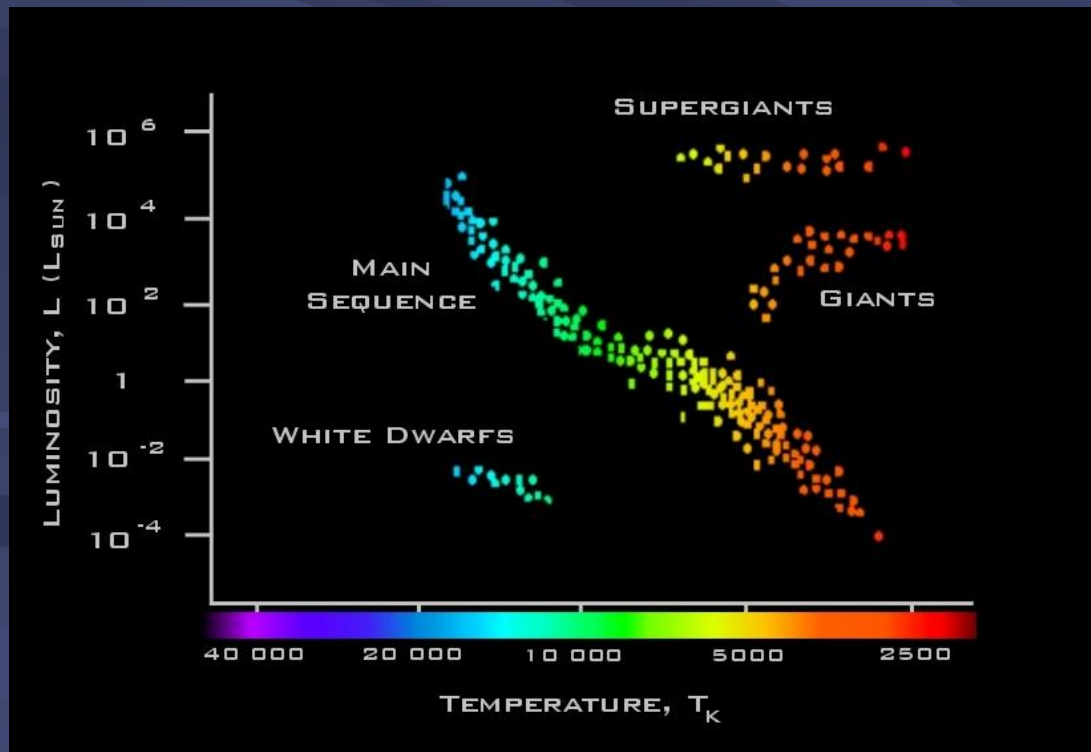
Самые тяжелые из образующихся сейчас около 100-200.

С ростом массы резко растет светимость.

Время жизни тем больше, чем меньше масса звезды.

Эволюция одиночной звезды

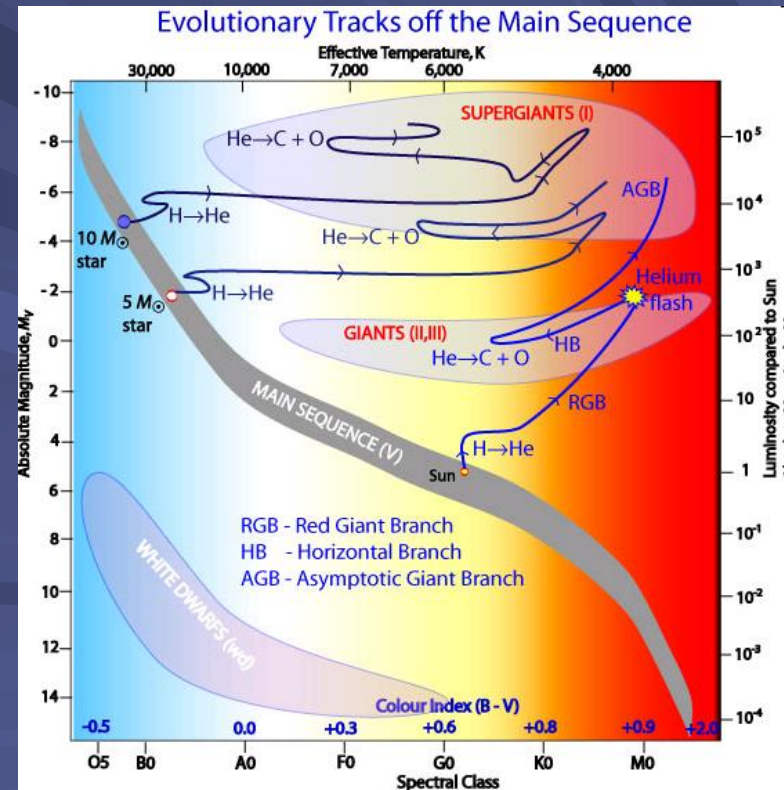
Эволюция звезды — это смена источников горения



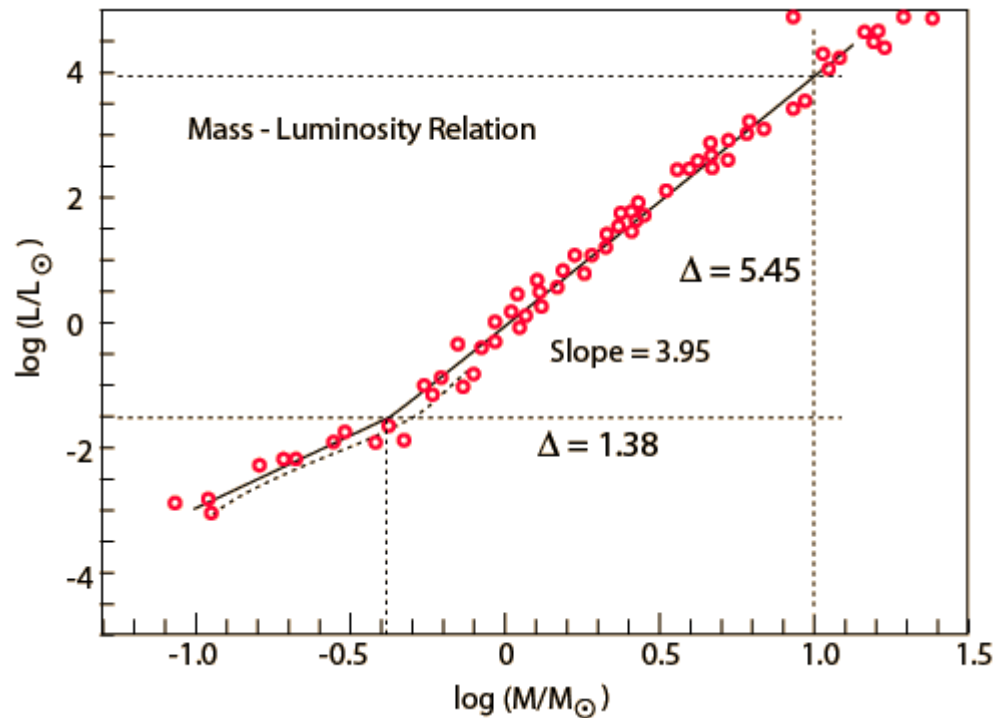
Масса – главный параметр

Судьба звезды зависит от ее массы.

- Чем массивнее звезда – тем больше она излучает и меньше живет
- Массивные звезды в конце жизни взрываются, а их ядра становятся нейтрон. звездами или черными дырами
- Маломассивные звезды сбрасывают оболочки, и их ядра становятся белыми карликами



Соотношение масса-светимость



Для легких звезд
(пока давление газовое)
 $L \sim M^{3-4}$

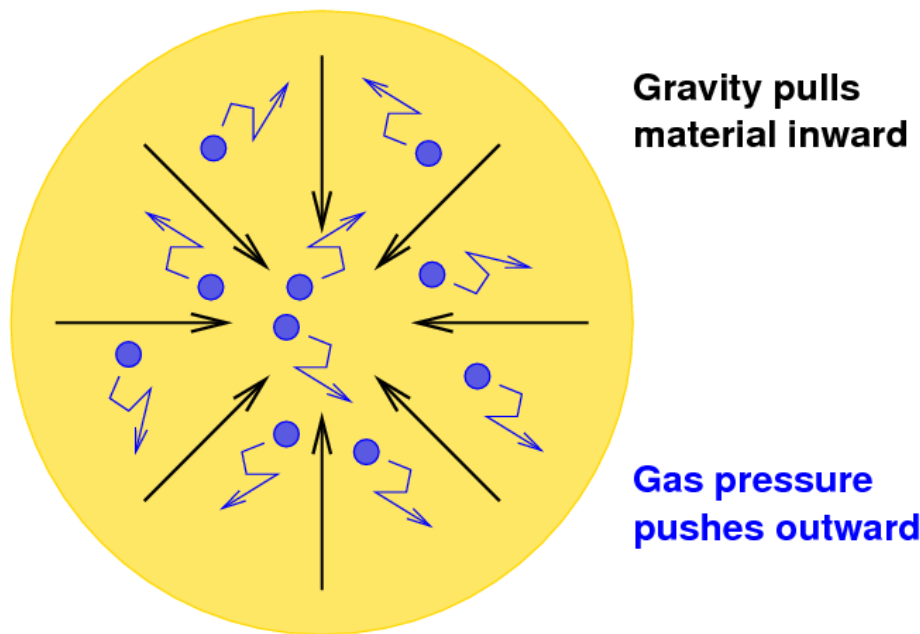
Для тяжелых звезд
(когда давление излучения
становится важнее)
 $L \sim M$

Горение водорода в звездах и альтернативные теории гравитации

Автор статьи 1510.05964 показывает, что известный предел на минимальную массу звезд (т.е. на начало термоядерных реакций) позволяет дать важные ограничения на альтернативные модели гравитации.

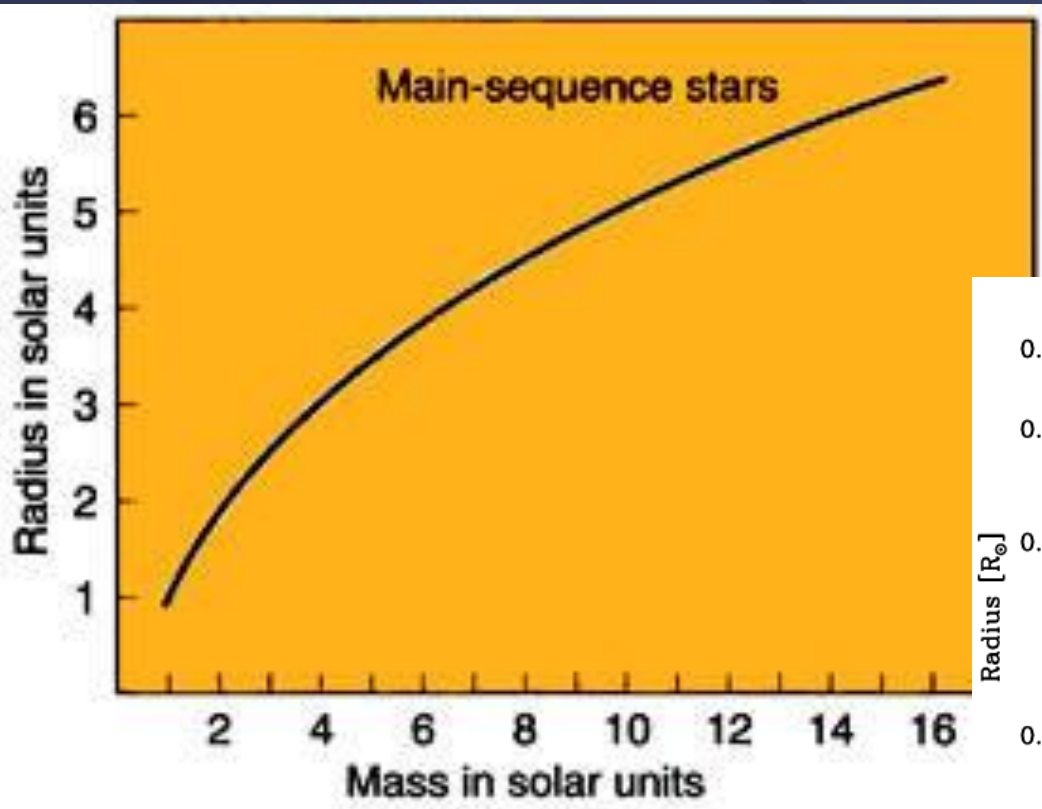
Оказывается, что этот предел весьма чувствителен к параметрам модели. Настолько, что позволяет закрыть некоторый важный диапазон параметров.

Т.о., если скалярно-тензорные теории и верны, то параметры должны быть таковы, что известные эффекты (здесь речь идет о космологической постоянной, кривых вращения галактик и т.д.) нельзя будет объяснить альтернативной гравитацией.

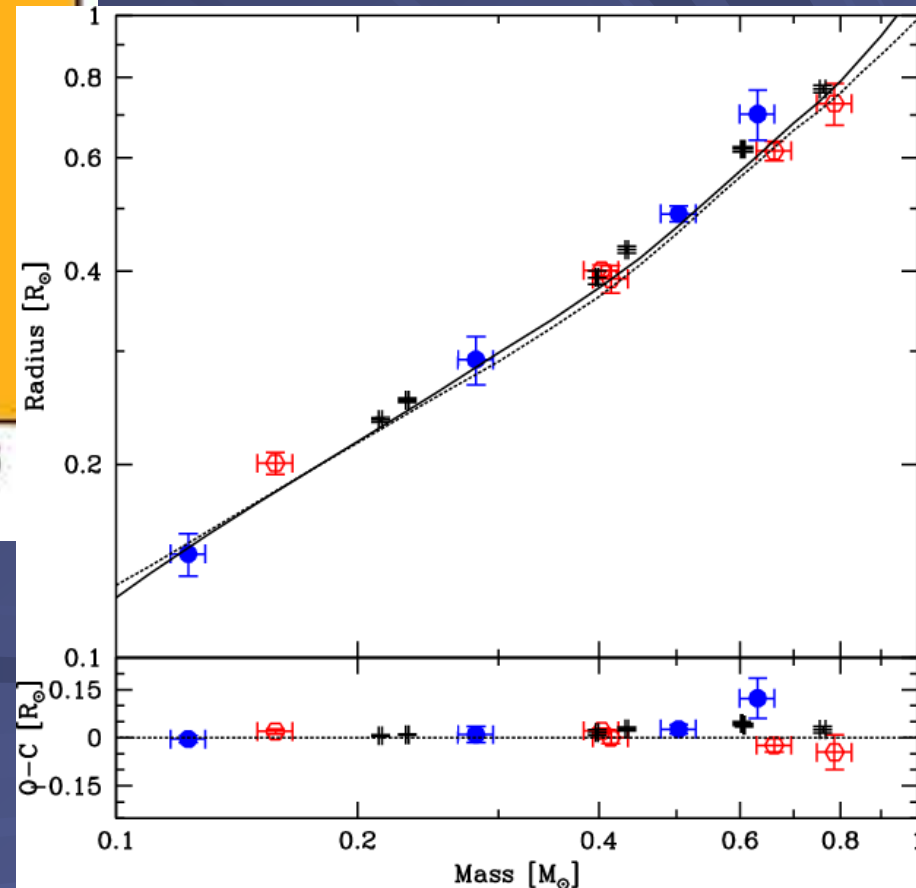


Соотношение масса-радиус

Соотношение зависит от параметров конвективной оболочки.

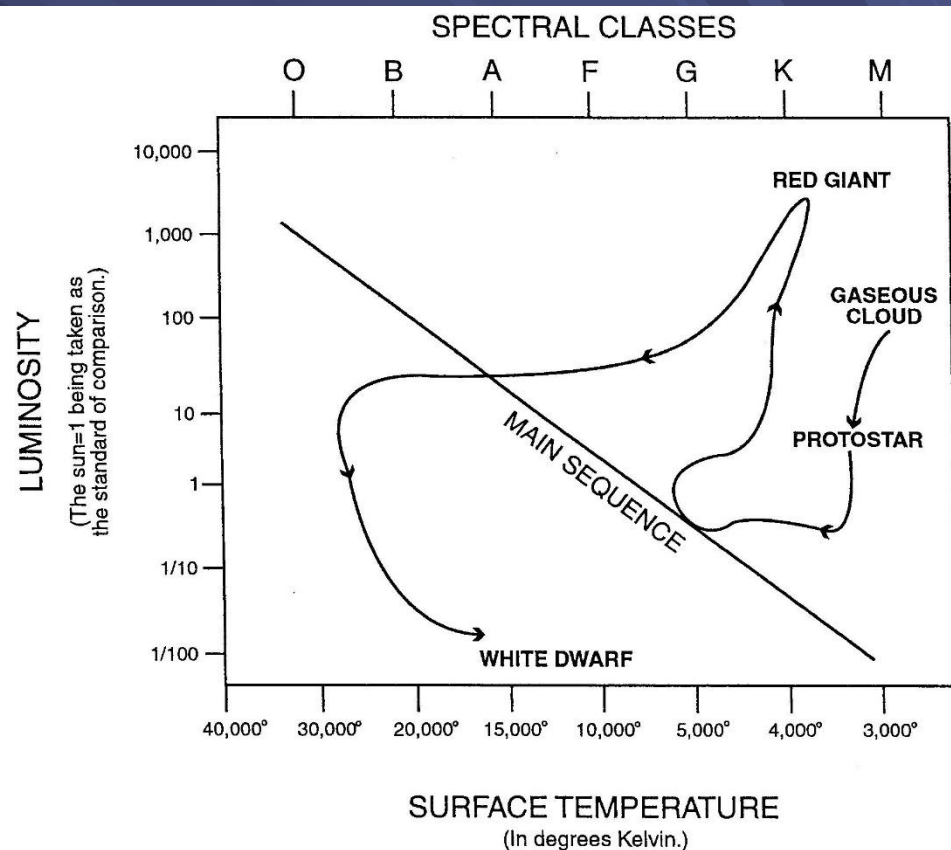
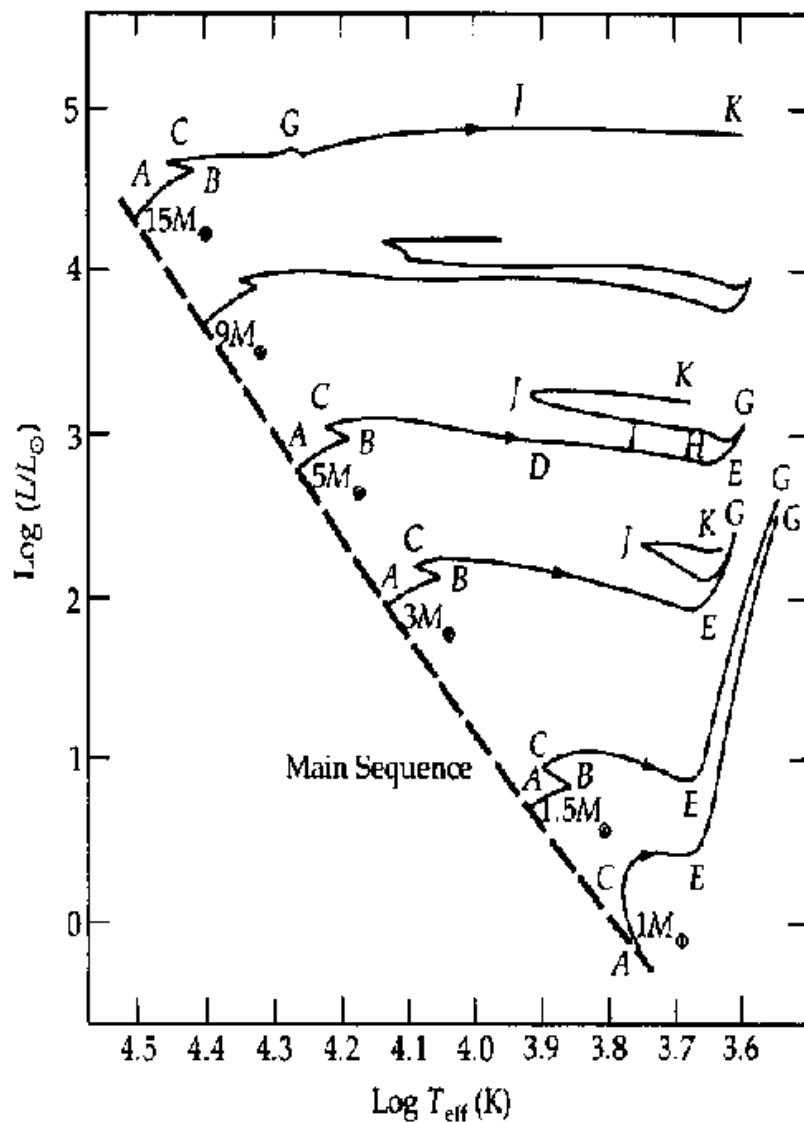


Для масс < 1 солнечной показатель степени равен примерно 0.8-1. А для больших масс примерно – 0.6.

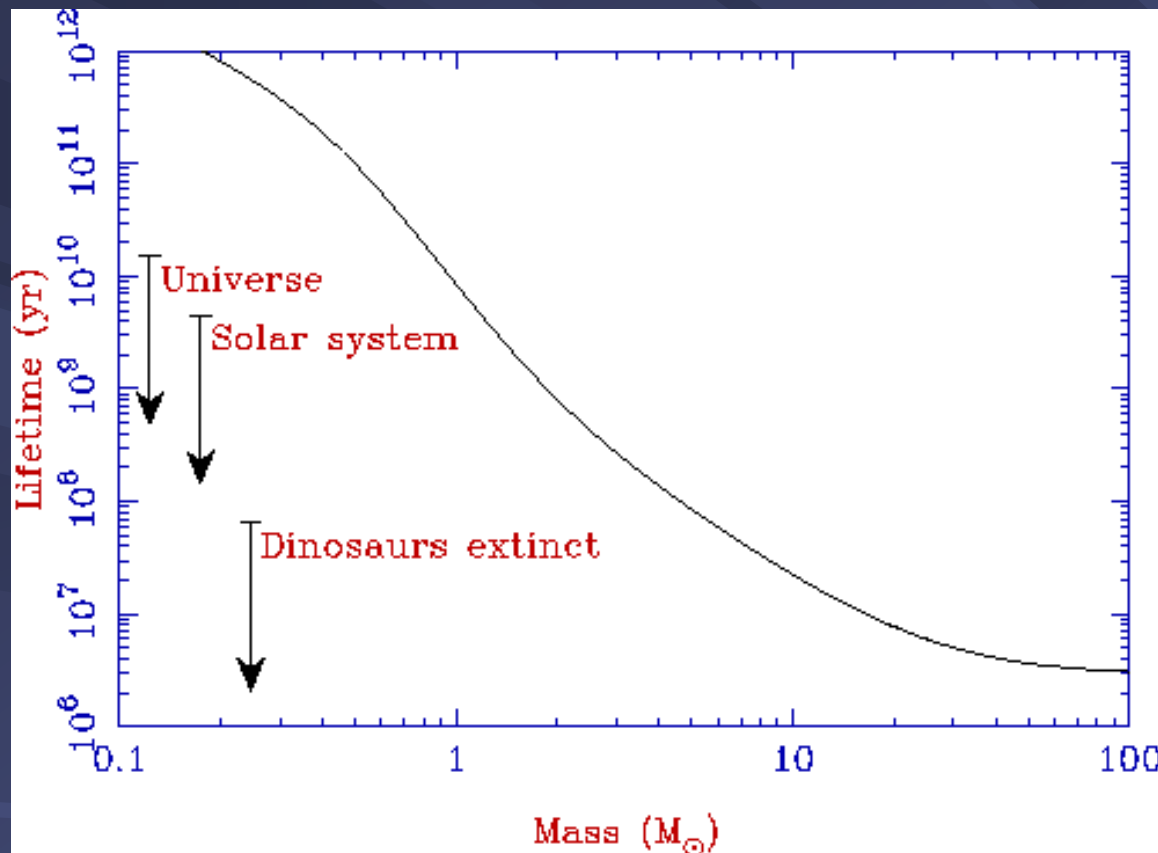


Эволюция на диаграмме Г-Р

Дольше всего звезды находятся на главной последовательности.



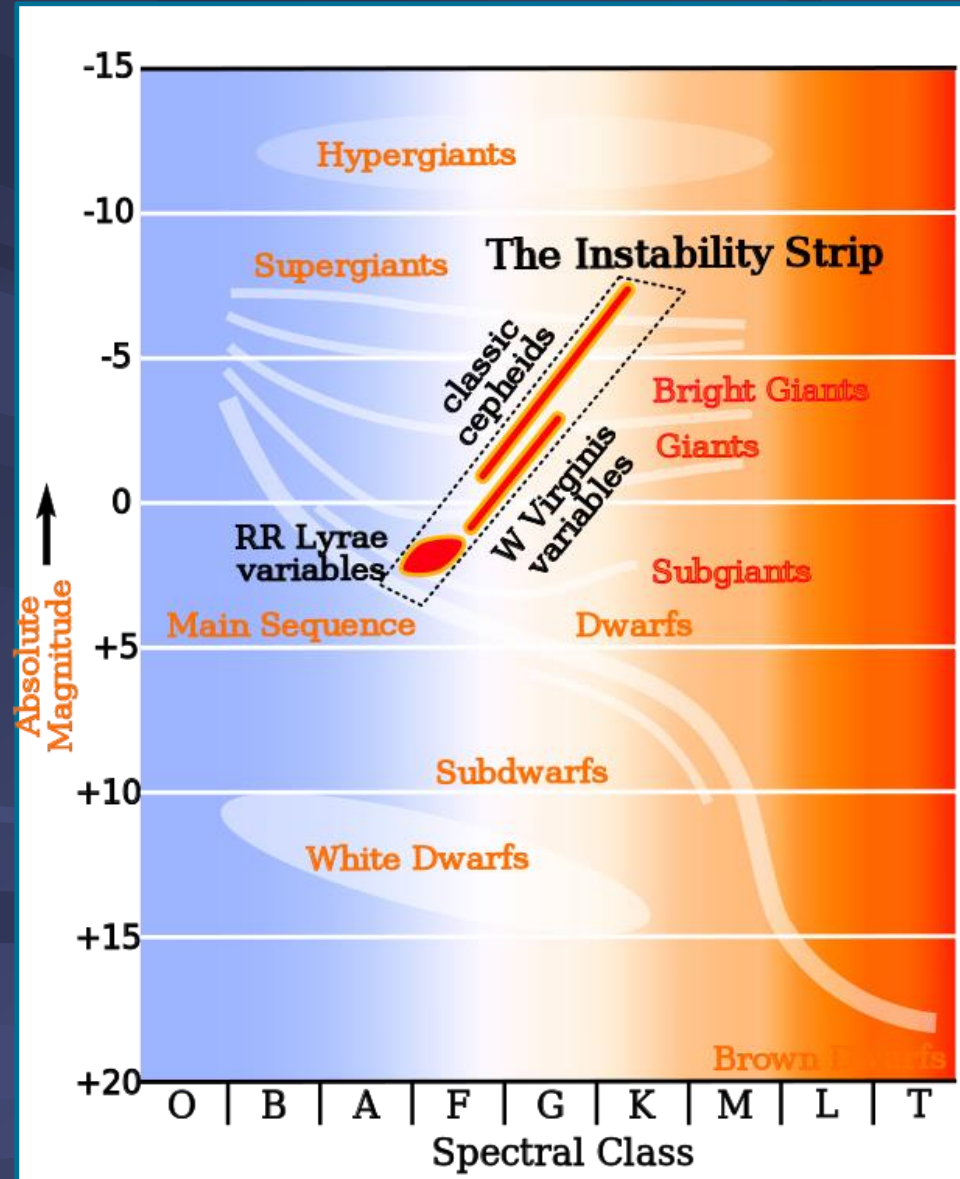
Время жизни звезды



$T \sim M/L$

Для маломассивных $T \sim M^{-2}$,
для массивных выходит на константу.

Область неустойчивости



В ходе своей эволюции массивные звезды попадают в область, где они становятся неустойчивыми. Начинаются пульсации.

Известным классом пульсирующих звезд являются цефеиды.

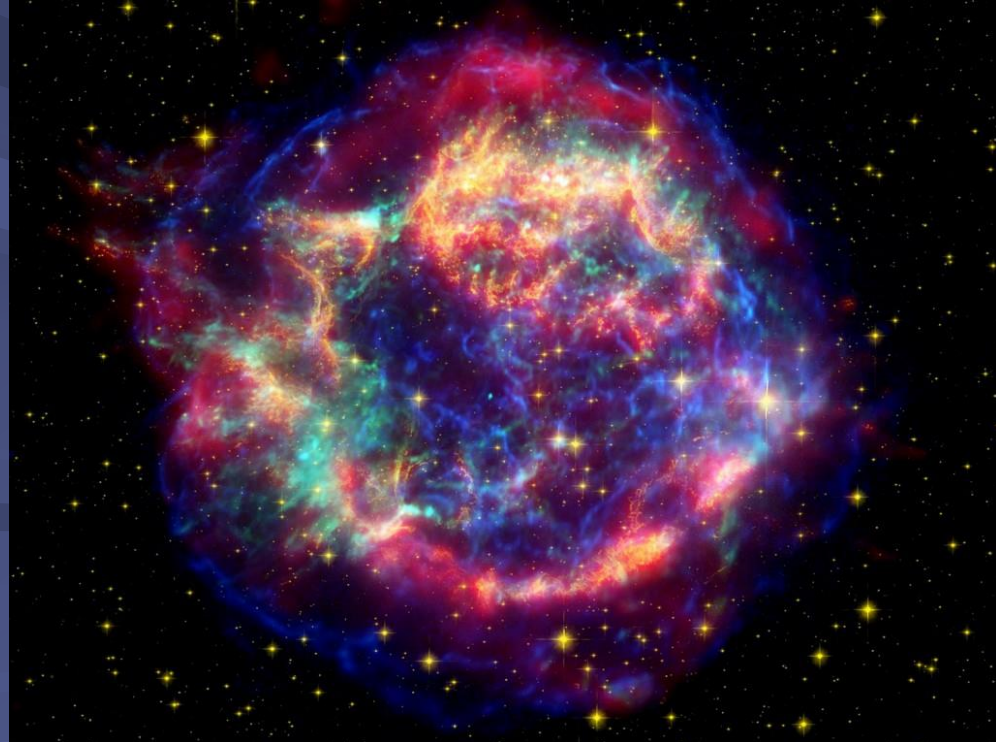
Они характерны тем, что у них светимость коррелирует с периодом пульсаций.

Это позволяет использовать их для измерения расстояний.

$$\text{Период} \sim (Gr)^{-1/2}$$

Химическая эволюция и звезды

В течение своей жизни и по ее окончании звезды сбрасывают часть своего вещества, обогащенного синтезированными элементами, в межзвездное пространство. Так в наши дни изменяется химический состав вселенной.



Возникновение элементов во Вселенной

Большинство химических элементов, с которыми мы сталкиваемся в жизни (и из которых состоим), возникли в звездах в течение их жизни в результате термоядерных реакций, или на последних стадиях жизни массивных звезд – во взрывах сверхновых.

До образования звезд обычное вещество в основном существовало в виде водорода (самый распространенный элемент) и гелия.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Big Bang

Supernovae

Large Stars

Small Stars

Cosmic Rays

S-процесс

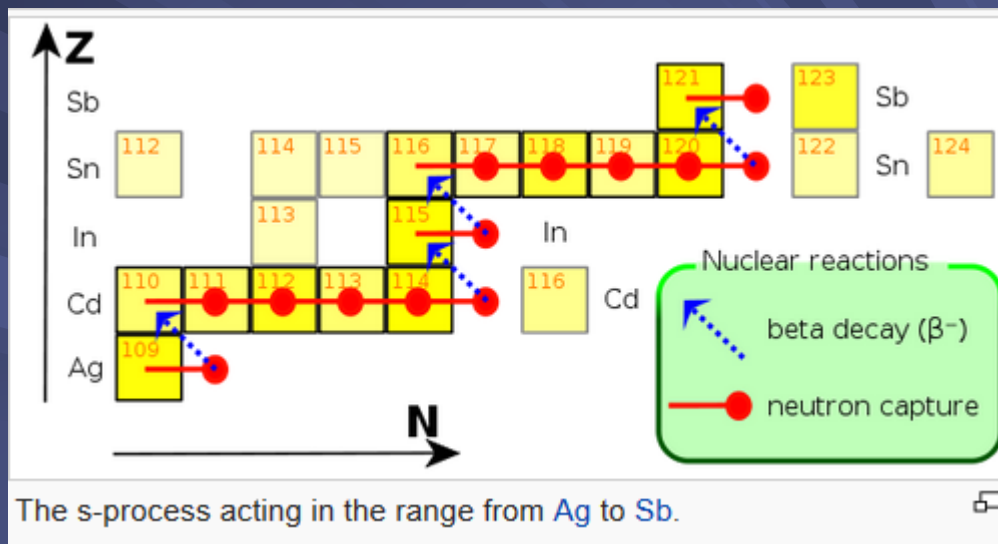


Этот процесс дает свободные нейтроны, которые легко проникают в ядра.

Идет в оболочках звезд-гигантов.

Медленный захват нейтронов.
Идет при относительно низкой плотности нейтронов.

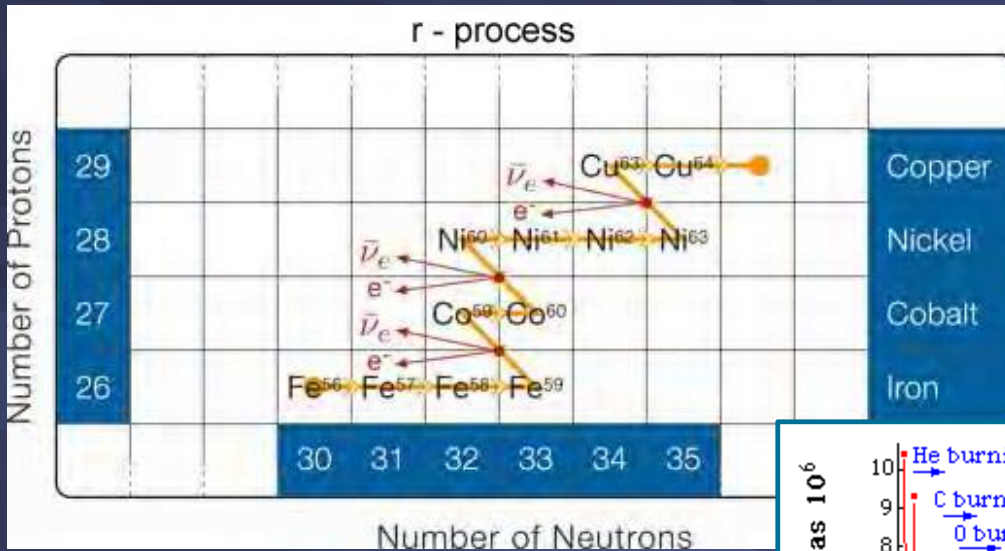
Захваченный нейтрон испытывает в ядре бета-распад, превращаясь в протон.



Синтез элементов с массой до сотни и примерно от 138 до 208

R-процесс

davidarling.info

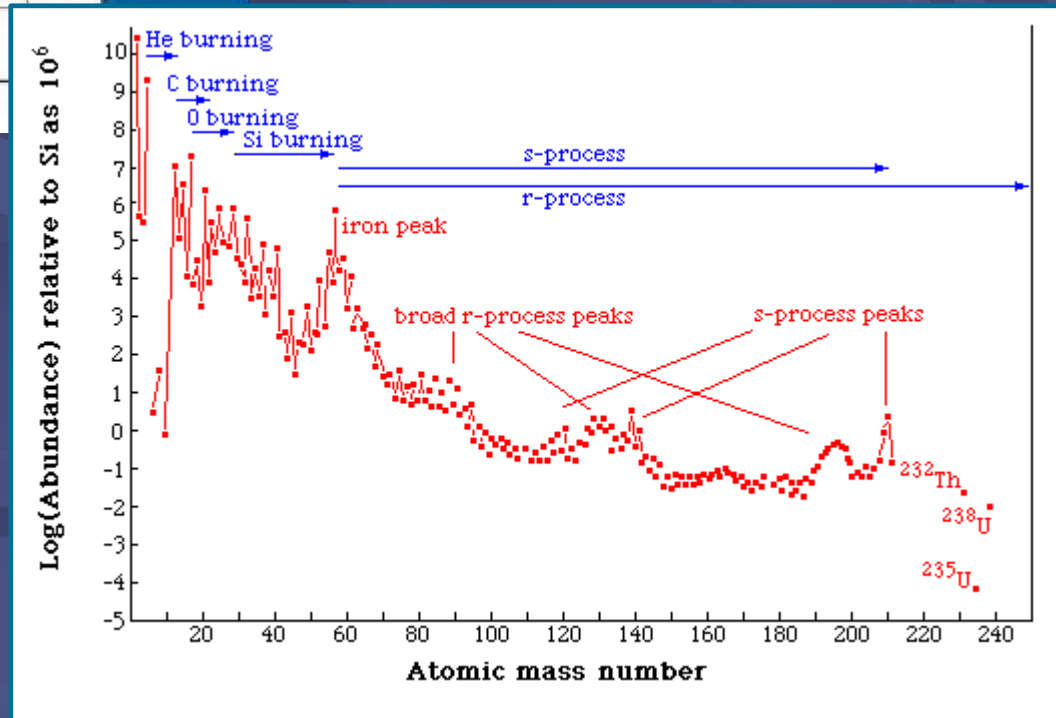


Идет во вспышках сверхновых и при слиянии нейтронных звезд.

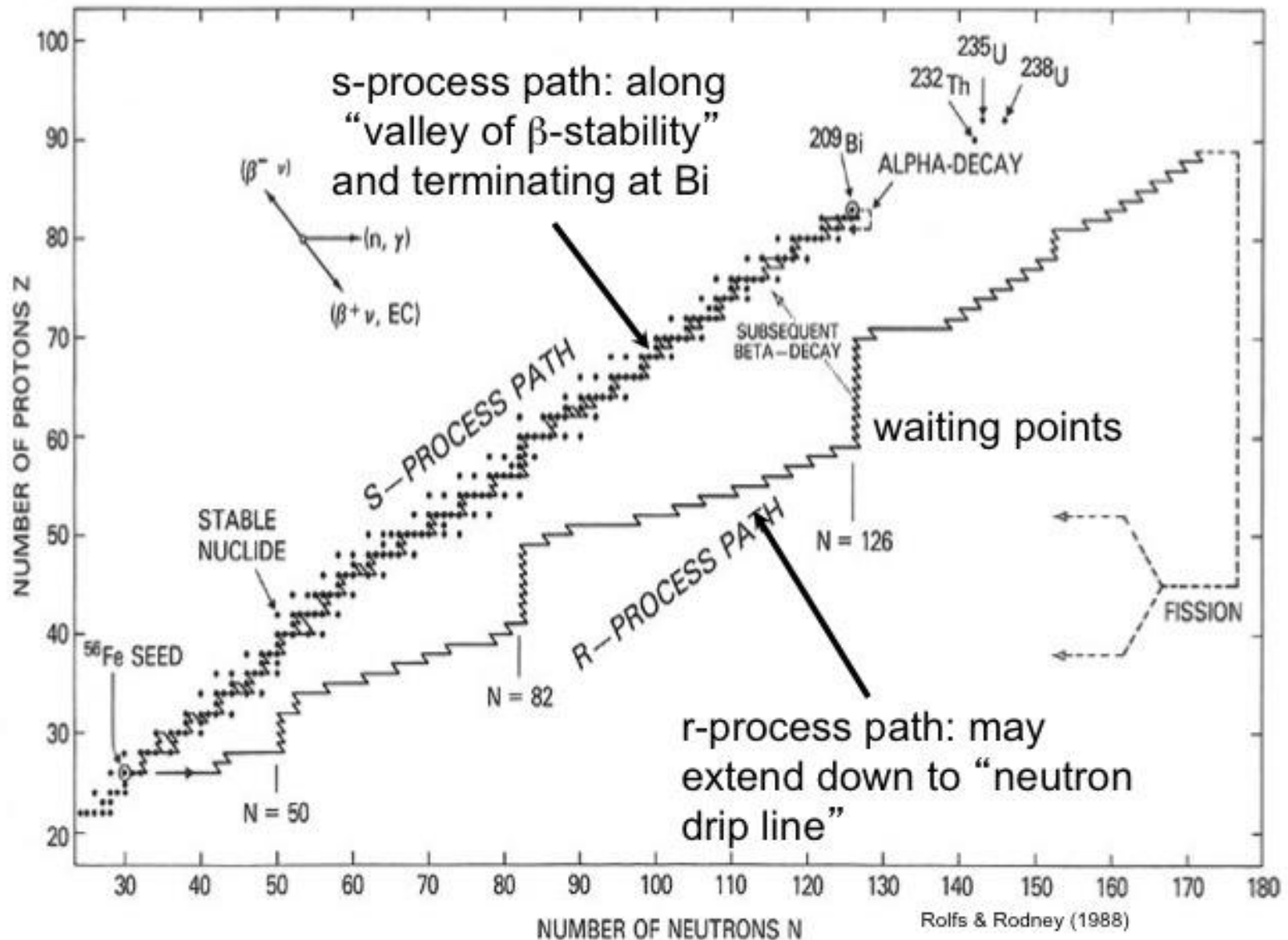
Важен для тяжелых элементов вплоть до урана.

Протекает при очень высокой плотности нейтронов. Например, при нейтронизации вещества в сверхновых.

Возникают насыщенные нейтронами ядра.



r- and *s*-process synthesis paths



Мафусаил: очень старая звезда в солнечной окрестности

HD 140283
субгигант
из гало Галактики

Расстояние
<200 световых лет

Возраст
>13.4 млрд. лет

Эволюционная стадия
звезды позволяет
довольно точно
оценить ее возраст,
зная светимость



Самая старая звезда,
но «металличность»
все-таки не нулевая,
т.е. это не звезда из
самого первого поколения.

