

# Звездна еволюция: Раждане, Живот и смърт на звездите

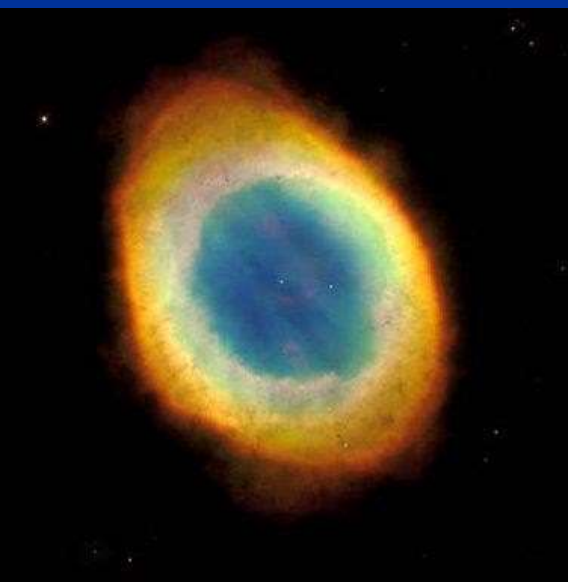
John R. Percy

*International Astronomical Union  
University of Toronto, Canada*



# Еволюция на звездите

- Когато говорим за звездна еволюция, имаме предвид промените, които се случват при звездите, докато консумират „гориво“, от раждането им през дългия им живот и докато умрат.
- Разбирането на еволюцията на звездите помага на астрономите да разберат:
  - Същността и бъдещата съдба на нашето Слънце.
  - Произходът на нашата Слънчева система.
  - Как сравняваме нашата Слънчева система с други планетни системи
  - Ако можеше да има живот другаде във Вселената.



The Ring Nebula, a dying star. Source: NASA



# Свойства на Слънцето: най-близката звезда и как ги измерват астрономите - важно!

- Разстояние:  $1,5 \times 10^{11}$  м, отразяващо радарни вълни от Меркурий и Венера
- Маса:  $2 \times 10^{30}$  кг, измервайки движението на планетите, които се въртят около Слънцето
- Диаметър:  $1,4 \times 10^9$  м, от видимия диаметър (ъгъл) на Слънцето и неговото разстояние
- Мощност:  $4 \times 10^{26}$  W, от разстояние и измерената мощност от Земята
- Химичен състав: 98% водород и хелий, изучавайки неговия спектър.



The Sun.

Source: NASA SOHO Satellite



# Свойства на звездите - далечни слънца и как ги измерват астрономите - важно!

- Разстояние: от паралакса или от видимият блясък, ако мощността е известна.
- Мощност: от разстояние и видимият блясък  
Температура на повърхността:  
От цвета или спектъра
- Радио: От мощността и температурата на повърхността
- Маса: Използване на наблюденията на двойни звезди
- Химичен състав: от звездни спектри

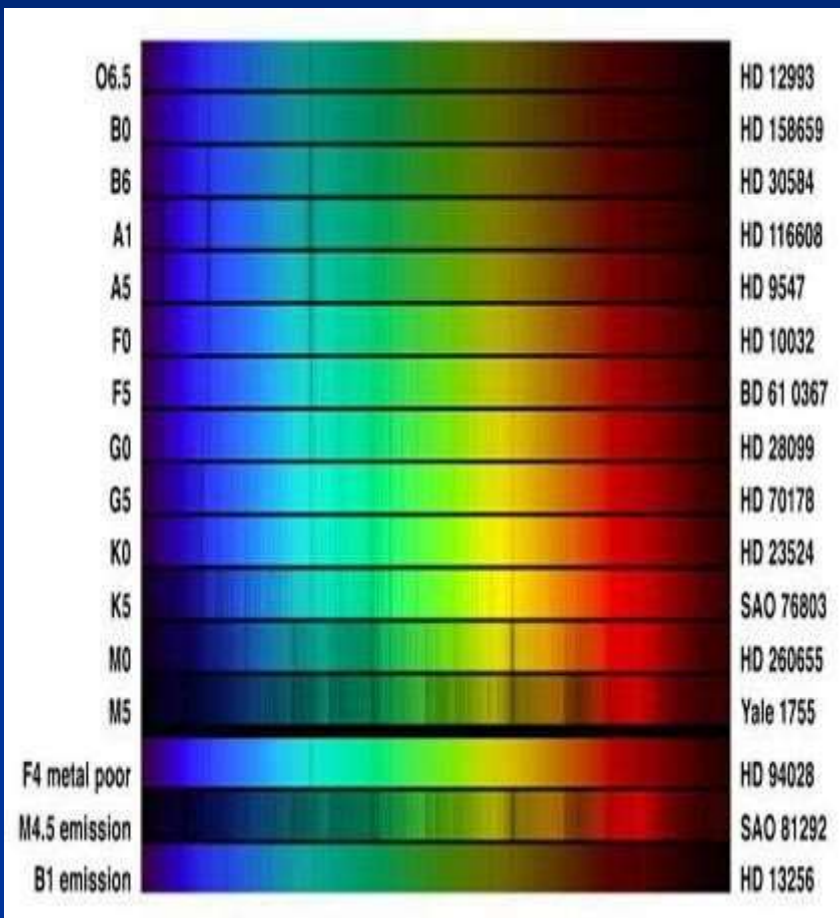
Orion Constellation.

Source: Hubble, ESA, Akira Fujii



# Спектрите на звездите:

## Звездна светлина, разложена на цветове



- Астрономите научават за астрономическите източници, като изучават светлината, която излъчват
- Спектърът предоставя информация за състава, температурата и други свойства на звездите

*Left: the first 13 spectra of stars with different surface temperatures (the highest on top); the last three spectra were taken from stars with peculiar properties*

Stellar Spectra

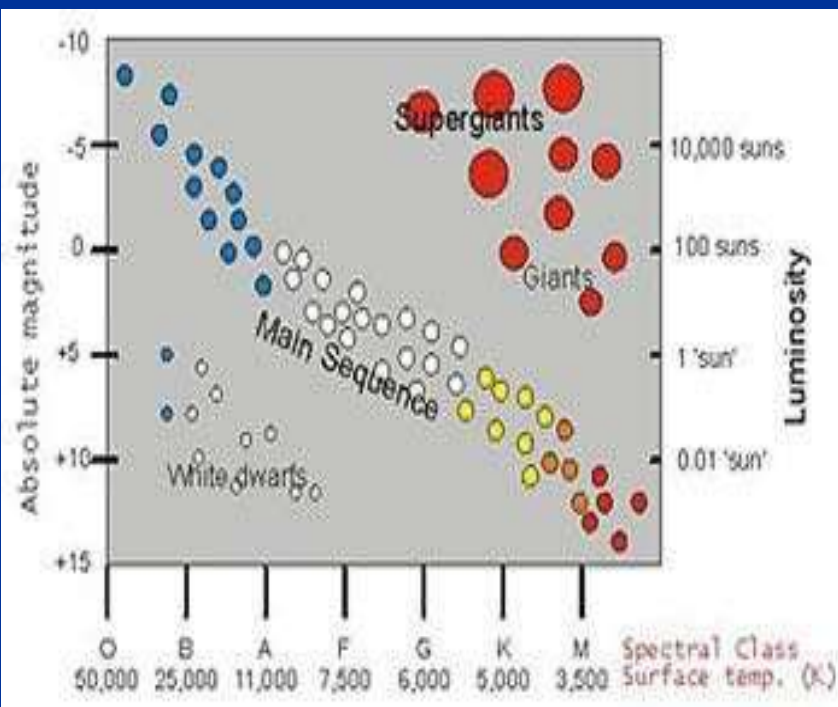
Source: US National Optical Astronomy Observatory



# Диаграма на Hertzsprung-Russell

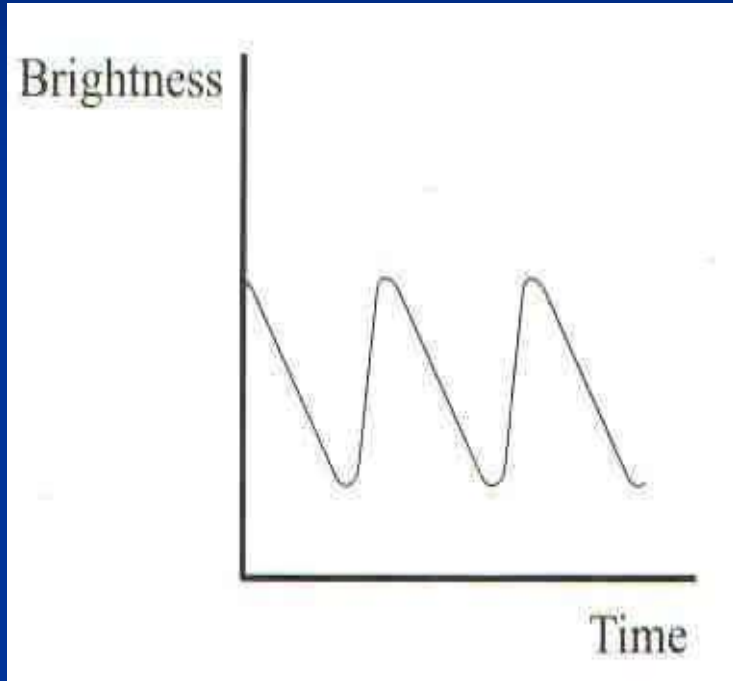
Има ред в свойствата на звездите!

- Диаграмата Hertzsprung-Russell (HR) показва мощността (светимостта) като функция от температурата (спектрален клас); ординатата "абсолютна величина" е логаритмична мярка на светимостта.



- Повечето звезди лежат на „основната последователност“: масивните звезди са горещи и имат висока светимост (горе вляво), докато малките звезди имат по-ниски маси, студени са и имат ниска светимост (долу вдясно)
- Гигантските звезди лежат в горната дясна част на диаграмата, докато белите джуджета са в долния ляв ъгъл

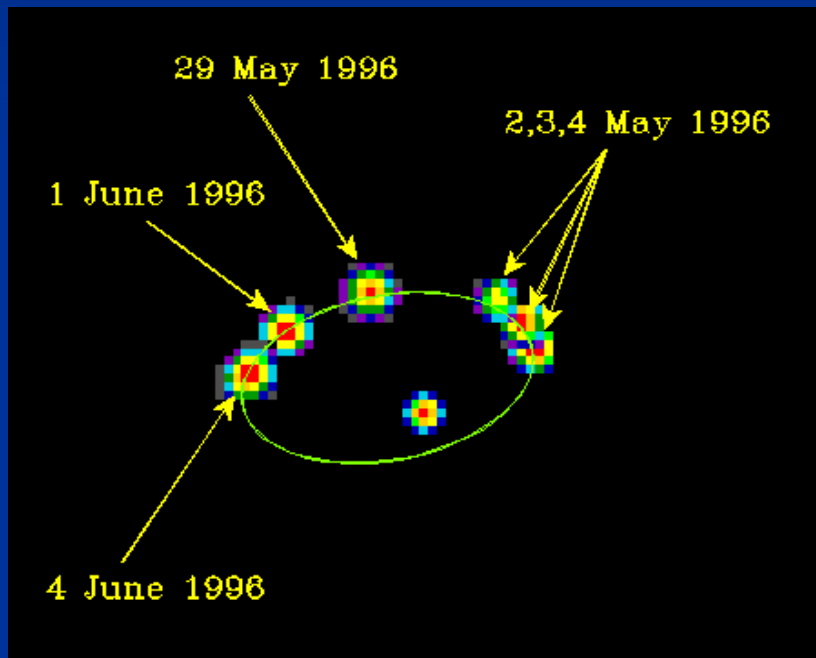
# Променливи звезди



Light curve: a graph of brightness vs. time.

- Променливите звезди са звезди, които променят яркостта си с времето
- Повечето звезди са променливи; могат да варират, защото пулсират, блестят ярко, изригват или експлодират или са затъмнени от спътник звезда или планета
- Променливите звезди предоставят важна информация за звездната природа и еволюцията

# Двойни и кратни звезди



Orbital movement of Mizar, in Osa Major.  
Source: NPOI Group, USNO, NRL

- Двойните звезди са двойки звезди, които са близо една до друга поради гравитацията и обикалят около себе си. Те могат да бъдат видими директно (както е на изображението вляво), или да бъдат открити по техните спектри, или затъмнение между звездите.
- Те са най-важният инструмент за измерване на масите на звездите
- Множеството звезди са три или повече звезди, които са свързани заедно поради гравитацията





# Звездни купове

## "Експерименти на природата"



Open Cluster The Pleiades.  
Source: Mount Wilson Observatory

- Звездните купове са групи от звезди, които са близо една до друга поради гравитацията и се движат заедно в пространството
- Те са се образували по едно и също време и място, от един и същ материал и са на едно и също разстояние, само се различават по масата
- Куповете са образци на звезди с различни маси, но с една и съща възраст



# От какво са направени Слънцето и звездите?



Използвайки спектроскопия и други техники, астрономите могат да идентифицират „основните материали“, от които са направени звездите. Водородът (H) и хелийът (He) са най-разпространените елементи и са се образували с формирането на Вселената. По-тежките елементи са милиони или милиарди пъти по-малко. Те са се образували вътре в звездите чрез термоядрени реакции.

Abundances of chemical elements in the Cosmos: birdseed H (90%), rice He (8%), beans C, N, and O and a few of all the other elements (2%).

**Изобилие от химични елементи в Космоса: птичи семена H (90%), ориз He (8%), боб C, N и O и някои от всички останали елементи (2%).**



1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra			104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 UUp	116 Lv	117 Uus	118 Uuo			
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					



Elements created at the Big Bang



Elements produced by nucleosynthesis, in the core of the stars



Elements produced by supernovas



# Законите за строежа на звездите

- Вътре в звездата, докато навлизаме по-дълбоко, налягането се увеличава, поради теглото на горните слоеве.
- Според законите на газовете, температурата и плътността се увеличават с увеличаване на налягането.
- Енергията ще се движи от вътрешната по-гореща част към външната по-студена част чрез излъчване и конвекция.
- Ако енергията изтича от звездата, тя ще се охлади - освен ако вътре не се създаде повече енергия.
- Звездите се управляват от тези прости и универсални закони на физиката



# Пример: Защо Слънцето не се свива?

collapse or contract?



- Надуйте балон, както е показано вляво
- Атмосферното налягане "притиска" балона навътре. Той не се свива, защото налягането на газа "изтласква" балона навън.
- Вътре в Слънцето гравитацията, изтласквайки материала навътре, се балансира от налягането на газа.

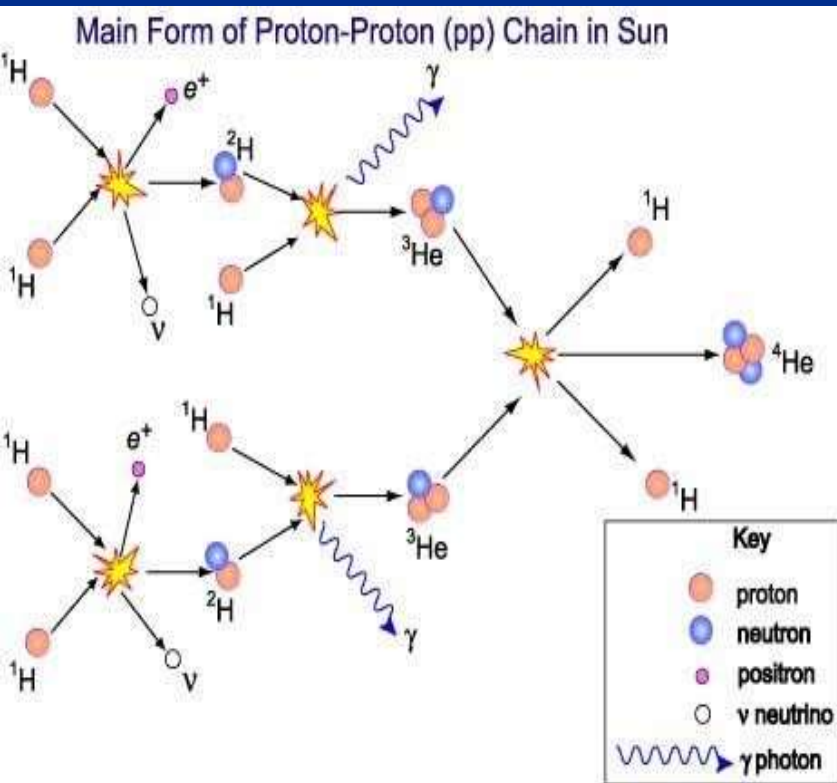
# Енергийният източник на Слънцето и звездите

- Химическо изгаряне на газ, нефт или въглерод? Този процес е толкова неефективен, че носи енергия на Слънцето само за няколко хиляди години
- Бавно гравитационно свиване? Това може да донесе енергия на Слънцето през милиони години, но Слънцето е на милиарди години
- Радиоактивност (ядрено делене)?
- Радиоактивните изотопи почти не съществуват вътре в Слънцето и звездите
- Ядрен синтез на леки елементи в по-тежки?  
**Да! Това е много ефективен процес и леките елементи като водород и хелий представляват 98% от Слънцето и звездите**



# Протон-протонна верижна реакция

е основният процес на сливане в Слънцето



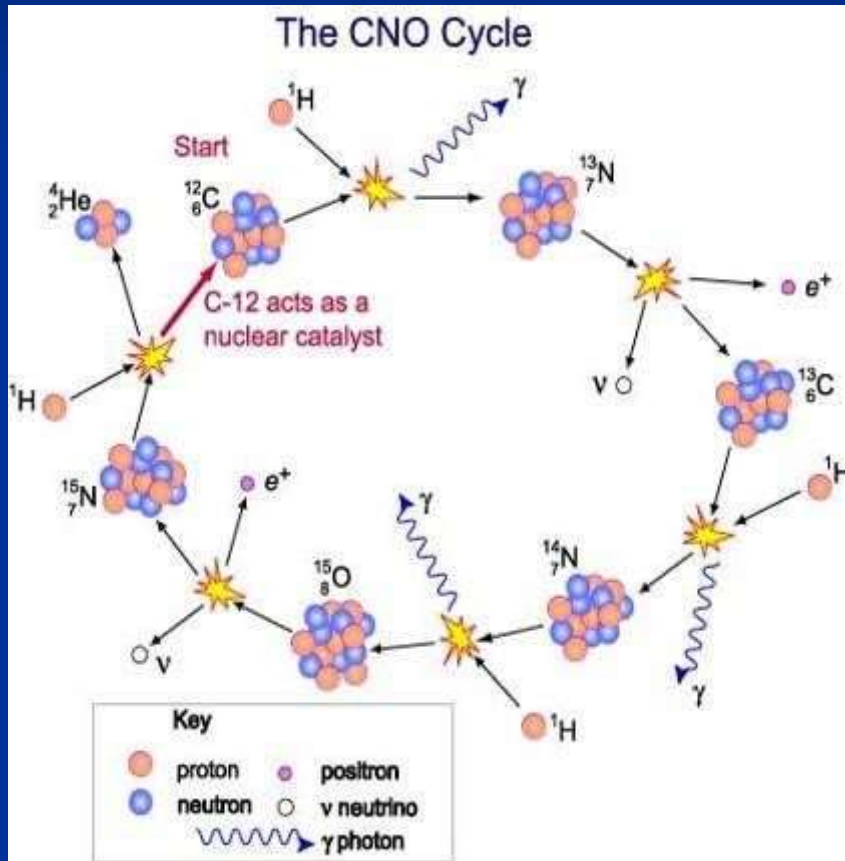
Proton-proton cycle

Source: Australia National Telescope Facility

- При високи температури и плътности, в звезди като нашето Слънце протоните (в червено) преодоляват електростатичното отблъскване между тях и образуват  $^2\text{H}$  (деутерий) и неутрино ( $\nu$ )
- По-късно друг протон се свързва с деутерий, за да образува  $^3\text{He}$
- По-късно ядрата  $^3\text{He}$  се свързват помежду си, за да образуват ядро  $^4\text{He}$ , освобождавайки два протона.
- Резултат: 4 протона заедно, за да образуват хелий и енергия (гама-лъчи и кинетична енергия)



# Цикълът въглерод - азот - кислород



- В масивни звезди, с много горещо ядро, протоните (червени) могат да се сблъскат с ядро  $^{12}\text{C}$  (въглерод) (горе вляво)
- Това стартира кръгова последователност от реакции, при която накрая четири протона се сливат, образувайки хелиево ядро (горе вляво)
- Ядрото  $^{12}\text{C}$  се възстановява отново в края на цикъла, следователно не се създава, нито унищожават; то действа като ядрен катализатор

CNO cycle

Source: Australia National Telescope Facility





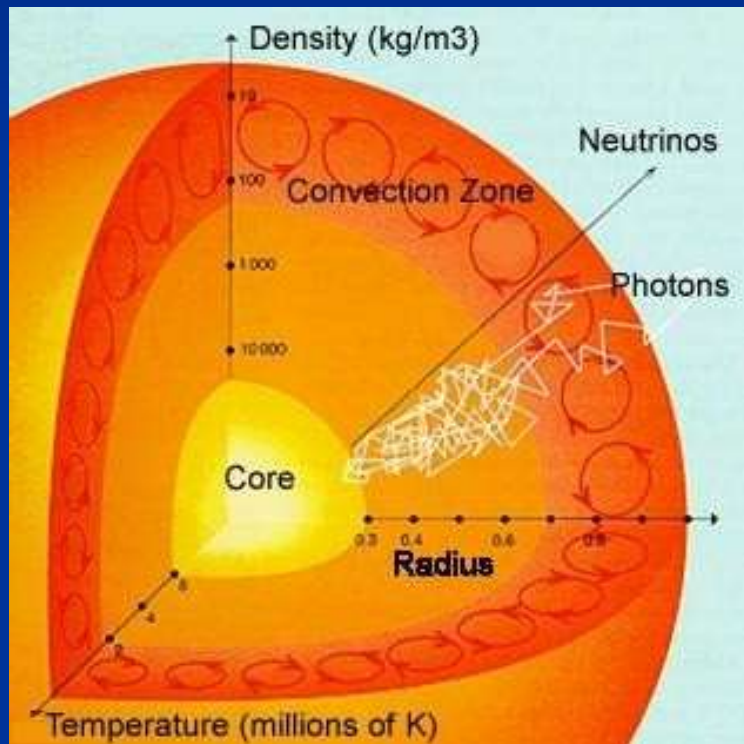
# Изработване на звездни „модели“

- Законите, които описват звездната структура, се изразяват в уравнения и се решават с помощта на компютър
- Компютърът изчислява температурата, плътността, налягането и мощността във всяка точка на Слънцето или звездата. Това се нарича модел
- В центъра на Слънцето плътността е 150 пъти по-висока от плътността на водата, а температурата е  $\sim 15\,000\,000\text{ K}$ !



# Във вътрешността на Слънцето

Въз основа на "модел" на Слънцето, направен с компютър



- Вътре в горещото ядро ядрените реакции произвеждат енергия чрез сливане на водород в хелий
- В радиационната зона, над ядрото, енергията тече навън чрез механизма на излъчване
- В конвективната зона, между радиационната зона и повърхността, енергията тече навън чрез конвекция
- Фотосферата на повърхността е слой, където звездата става прозрачна

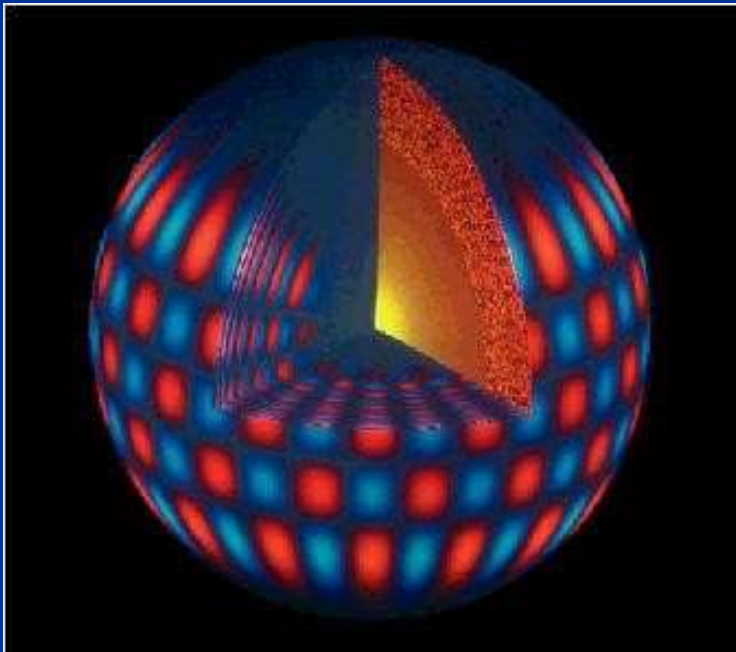
Solar model

Source: Institute of Theoretical  
Physics, University of Oslo



# Тестване на хелиосейсмологичен модел

- Слънцето вибрира нежно по хиляди начини (модели). Един от тях е показан на изображението вляво
- Тези вибрации могат да се наблюдават и ние можем да ги използваме, за да изведем вътрешната структура на Слънцето, тествайки следователно съществуващите модели на структурата на Слънцето. Този процес е известен като хелиосейсмология
- Подобни вибрации могат да се наблюдават и при други звезди: астросейсмология



Artistic conception of the solar vibration. Source: US National Optical Astronomy Observatory



# Тестване на модела на слънчевото неутрино



- Реакциите на ядрен синтез произвеждат елементарни частици, наречени неутрино.
- Те имат много ниска маса и рядко взаимодействат с материята. Тяхната маса е открита и измерена благодарение на специални обсерватории, като например Обсерваторията на неутрино в Съдбъри (вляво).
- Резултатите са в съответствие с прогнозите, получени чрез модели

Observatory of neutrino, Sudbury  
Source: Sudbury Neutrino  
Observatory



# Продължителност на живота на звездите

- Продължителността на живота на звездата зависи от това колко ядрено гориво (водород) има и колко бързо я изразходва (мощност)
- Звездите, по-малко масивни от нашето Слънце, са най-често срещаните. Те имат по-малко гориво, но много по-малки мощности, така че имат по-дълъг живот
- По-масивните от Слънцето звезди са по-рядко срещани. Те имат повече гориво, но мощности много по-високи, следователно имат по-кратък живот



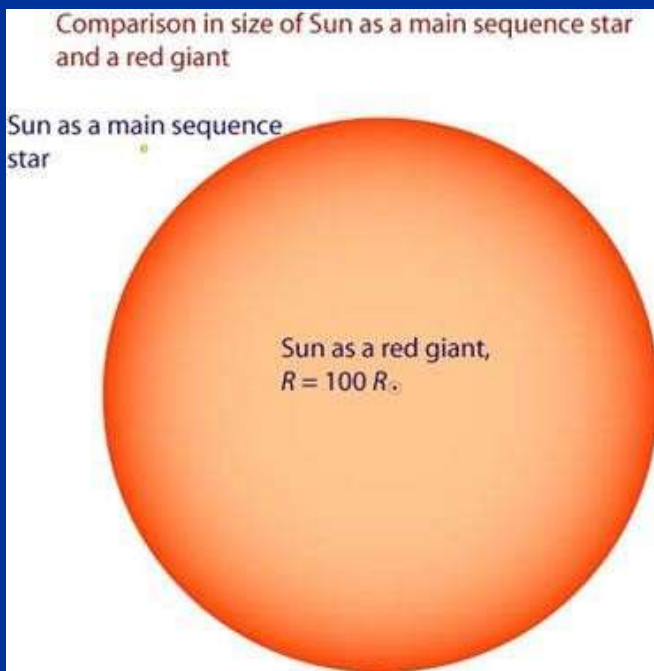
# Как астрономите научават за звездната еволюция?

- Наблюдение на звездите в различни етапи от живота им и поставянето им в последователност от логическа еволюция.
- Изработване на модели с помощта на компютри, използване на законите на физиката и отчитане на промените в състава на звездите, които възникват поради ядрен синтез.
- Изучаване на звездните купове и / или групи звезди с различни маси, но с една и съща възраст.
- Изучаване на бързите и странни фази в звездния живот (напр. Свръхнови и нови).
- Чрез изследване на променливи пулсиращи звезди, измерване на бавните промени в периода на пулсации, причинени от тяхното развитие.



# Еволюцията на подобни на слънце звезди

- Звезда, подобна на Слънцето не се променя много по време на първите около 90% от живота си, доколкото има достатъчно гориво (водород), за да продължи с термоядрените реакции. Наричаме я звезда в основна последователност.



- Когато горивото и, водородът, се изчерпи, тя се разширява в червена гигантска звезда.
- Вътре в ядрото, температурите могат да се повишат достатъчно, за да започне да произвежда енергия чрез сливането на хелий с въглерод.
- Когато хелиевото гориво се изчерпи, звездата отново се разширява в още по-голям червен гигант, стотици пъти по-голям от Слънцето

Comparison of size: Sun - red giant  
Source: Australia National Telescope Facility



# Смъртта на подобни на Слънцето звезди



Helix Planetary  
Nebula. Source:  
NASA

- Когато звездата стане червен гигант, тя започва да пулсира. Наричаме я Мира звезда.
- Пулсацията причинява отделянето на външните слоеве на звездата, създавайки красива планетарна мъглявина (вляво)
- Ядрото на звездата е джудже, плътно, бяло, малко и без гориво





# Бяло джудже

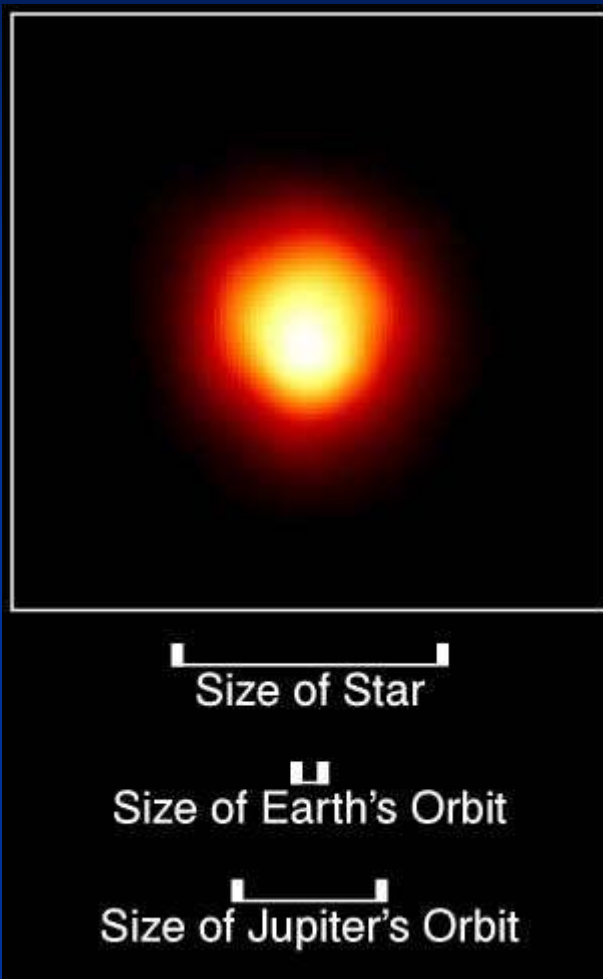


The white dwarf companion (below) of Sirius (above). Source NASA

- Бяло джудже представля мъртво ядро на подобни на Слънцето звезди.
- Бялото джудже има маса, подобна на Слънцето, обем, подобен на Земята, и плътност милион пъти по-голяма от тази на водата.
- При бялото джудже центростремителната гравитационна сила се балансира от външното квантово налягане на електроните във вътрешността му.
- Много близки звезди, включително Сириус (вляво) и Процион, имат спътници бели джуджета.



# Еволюцията на масивна звезда star



- Масивните звезди са редки, мощни и консумират горивото си много бързо - за няколко милиона години.
- Когато изразходват горивото си, те се раздуват и се превръщат в червени свръхгигантски звезди
- Ядрото им е много горещо, достатъчно, за да произвежда тежки елементи като желязо.
- Бетелгейзе (вляво), в съзвездието Орион, е яркочервен свръхгигант. Той е много по-голям от земната орбита

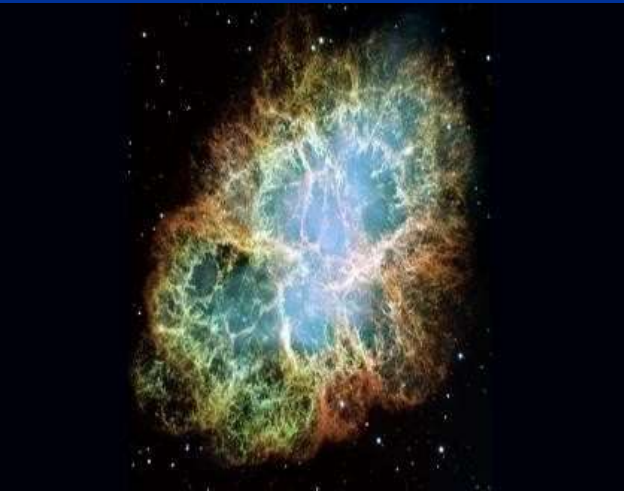
Betelgeuse.

Source: NASA/ESA/HST



# Смъртта на масивна звезда

- Когато ядрото на масивна звезда стане главно от желязо, тя няма повече ядрено гориво, за да продължи със ядрен синтез и вече не може да остане гореща.
- Гравитацията смазва ядрото в неутронна звезда, освобождавайки огромни количества гравитационна енергия и отвеждайки звездата до експлозия на свръхнова (вляво).
- Свръхновите произвеждат елементи, по-тежки от желязото, и изхвърлят тези и други елементи в пространството, които ще станат част от нови звезди, планети и живот



The Crab nebula, the remnant of an explosion of supernovae observed in 1054 AD. Source: NASA



# Неутронна звезда

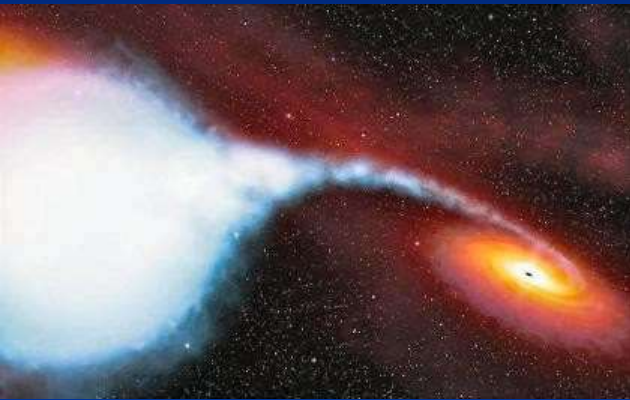


- Звездните ядра с маси между 1,5 и 3 пъти масата на Слънцето колапсират и се превръщат в неутронни звезди в края на живота на звездата.
- Те имат диаметър около 10 км и плътност трилиони пъти по-голяма от водата.
- Те са направени от неутрони и по-екзотични частици.
- Младите неутронни звезди се въртят бързо и излъчват регулярни импулси на радиовълни и са известни като пулсари.

Pulsar, neutron star in the heart of the Crab Nebula The rotational energy that emits energized Nebula.  
Source: NASA/ESA/HST



# Черни дупки



- Черната дупка е астрономически обект, чиято гравитация е толкова силна, че нищо не може да избяга от нея, дори светлината.
- Ядрата на необичайните масивни звезди (повече от 30 пъти масата на Слънцето) се превръщат в черни дупки, когато горивото им свърши.
- Един от начините за откриване на черни дупки: когато видима звезда обикаля около тях (вляво).

Artistic conception of Cygnus X-1, a visible star (left) with a black hole (right) in a center of accretion disk. Source: NASA.

# Специални случаи на променливи звезди



- Много звездни остатъци - бели джуджета, черни дупки или неутронни звезди - имат нормална видима звезда, която обикаля около тях.
- Ако газът от нормалната звезда попадне върху звездния остатък, около него може да се образува акреционният диск (вляво).
- Когато газът падне върху звездния остатък, той може да експлодира, което ние наричаме катаклизмична променлива звезда

A pair of normal star (left) and a white dwarf star with an accretion disc stealing gas from the companion (right). Source: NASA

# Раждането на звездите



- Вътре в молекулярните облаци (мъглявини) се образуват звезди, направени от студен газ и прах.
- Междувзвездният прах и газ са около 10% от материята в нашата Галактика.
- Младите звезди обикновено могат да бъдат намерени вътре или близо до мъглявината, от която са възникнали.
- Най-близкият и ясен пример за зона на образуване на звезди е мъглявината Орион (вляво), на около 1500 светлинни години от нас.

Orion Nebula  
Source: NASA



# Междузвезден газ



- Междузвездният газ (атоми или молекули) може да се активира от ултравиолетова светлина, идваща от близката звезда, произвеждайки емисионна мъглявина (вляво).
- Студеният газ между звездите създава радиовълни, които могат да бъдат открити от радиотелескопите.
- 98% от междузвездния газ е направен от водород и хелий

The Orion nebula. The gas is energized by  
• ultraviolet light from the stars in the nebula. Source: NASA





# Междузвезден прах



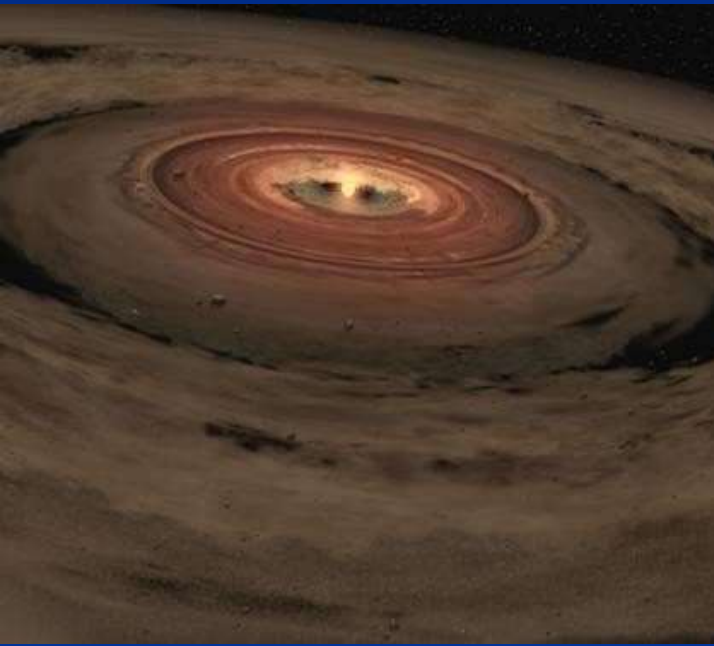
- Междузвездният прах в близост до ярките звезди може да бъде открит във видимата част на спектрите
- Прахът може да блокира светлината от звездите и газовете отзад (вляво). В тези облаци се образуват звездите.
- Само 1% от материала между звездите е прах. Праховите частици са с размер няколко стотин nm и са предимно силикати или графит

M16

Source: NASA/ESA/HST



# Формиране на звездите



Artistic conception of a planetary system in the formation process.

Source: NASA

- Звездите се образуват вътре в частите на мъглявина, наречени ядра, които са плътни или компресирани.
- Гравитацията е отговорна за привличането на ядрата.
- Запазването на ъгловия момент увеличава въртенето на ядрата, които се изравняват и накрая се превръщат в дискове.
- В центъра на дисковете се образуват звезди.
- Планетите се формират в по-студените, външни части на диска.



# Протопланетни дискове

## Планетарни системи в процес на формиране



- Протопланетни дискове са наблюдавани в мъглявината Орион (вляво)
- Звездата трудно може да се види в центъра на диска.
- Дисковият прах блокира светлината, която е отзад.
- Тези и други наблюдения осигуряват пряко доказателство за формирането на планетарни системи.

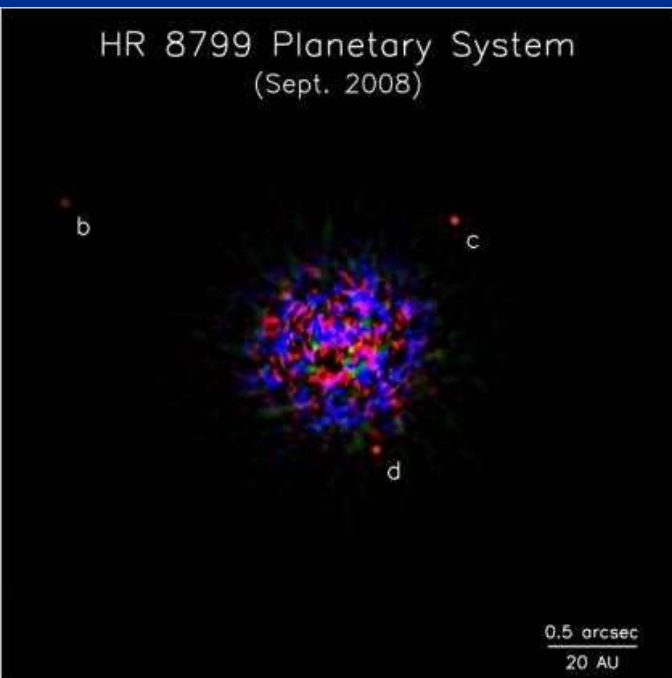
Proplyds

Source: NASA/ESA/HST



# Екзопланети = ИЗВЪНСЛЪНЧЕВИ ПЛАНЕТИ

## Планети около други звезди



- Екзопланетите обикновено се откриват и изследват чрез гравитационен ефект, който имат върху звездата, или чрез затъмняване на светлината на нейната звезда, ако настъпи транзит.
- Много малко са били открити директно (вляво).
- За разлика от планетите в нашата Слънчева система, много екзопланети са огромни и много близо до нейната звезда.
- Това позволява на астрономите да модифицират / коригират своите теории за това как се формират планетарните системи.

System exoplanet HR 8799

Source: C. Marois et al., NRC Canada



# Заклучителни съображения

- „Гравитацията движи формирането, живота и смъртта на звезди” [професор Р. Л. Бишоп]
- Раждането на звезда обяснява произхода на нашата Слънчева система и други планетни системи.
- Животът на звездата обяснява енергийния източник, който прави живота на Земята възможен.
- Животът и смъртта на звездите произвеждат химически елементи, по-тежки от водорода, от които са изградени звездите, планетите и живота.
- По време на смъртта на звезда, гравитацията създава най-странните обекти във Вселената: бели джуджета, неутронни звезди и черни дупки.



**Many Thanks  
for your attention !**

