

Unutrašnja struktura zvezda

- Zvezde imaju svoj sopstveni, postojani izvor energije u svom jezgru!!!
- Unutrašnjost zvezde nije dostupna direktnim posmatranjima, zračenje koje posmatramo potiče iz ATMOSFERE ZVEZDA
- Teorijsko **modeliranje zvezdanih unutrašnjosti**
- **Provera modela** tek u drugoj polovini XX veka
- Modeli zvezdane unutrašnjosti bi trebalo da zadovolje osnovne fizičke procese i posmatranja
- **Aproksimacije** koje se koriste za početak: sferno-simetrična zvezda, stacionarna, stabilna, nerotirajuća, bez magnetnog polja
- ZVEZDE OPSTAJU STABILNE DUGO VREMENA USLED POSTOJANJA HIDROSTATIČKE RAVNOTEŽE – **gravitaciona sila usmerena ka centru zvezde je uravnotežena pritiskom gasa/plazme i pritiskom zračenja koji su usmereni ka spolja!!!**

- Prirodne nauke imaju za cilj da objasne posmatrane pojave i to putem kritičkog promišljanja (rezonovanja).
- Teorija predstavlja jedno naučno objašnjenje razmatrane pojave, koje svakako mora biti proverljivo.
- Informacije o nebeskim telima se mogu prenositi do nas na više različitih načina.
- Osnovni nosilac informacija u astronomiji, a dugo vremena i jedini je elektromagnetno zračenje.
- U svrhu astronomskih istraživanja koristimo i različite tipove čestica (neutrini, kosmički zraci), odnosno makroskopske materije (meteoriti, uzorci materijala sa nebeskih tela prikupljeni svemirskim misijama), a u poslednje vreme veliki akcenat je dat i na analizi informacija koje nam pružaju tzv. gravitacioni talasi.

- Nosioci informacija ne bi trebalo da budu pod veoma izraženim uticajem okolne materije kroz koju se prostiru na putu do posmatrača
- Nije moguće posmatrati unutrašnjost zvezda upotrebom elektromagnetnog zračenja kao nosioca informacija (zbog izrazite neprozračnosti zvezdane materije), već samo spoljašnje slojeve
- Atmosfere zvezda se obično i definišu baš kao one, spoljašnje oblasti zvezda iz kojih nam dopire, posmatrano elektromagnetno zračenje.

- Unutrašnjost zvezde nije dostupna direktnim posmatranjima
- Teorijsko **modeliranje zvezdanih unutrašnjosti**
- **Provera modela** u drugoj polovini XX veka:
 - merenjem neutrinskog fluksa
 - registrovanjem oscilacija na Suncu i zvezdama
- **Modeli zvezdane unutrašnjosti** treba da zadovolje osnovne fizičke procese i posmatranja
- **Aproksimacije koje se koriste:**
 - sferna-simetrija,
 - stacionarnost,
 - zvezda je stabilna, nerotirajuća, bez magnetnog polja

Izvori zvezdane energije

- Termonuklearne (TN) reakcije – OSNOVNI MEHANIZAM PROIZVODNJE ENERGIJE U ZVEZDAMA – kontrolisana fuzija na visokim temperaturama!!! (pp lanac i CNO ciklus)
- Zvezde na glavnom nizu u svojim jezgrima (središtu) fuzionišu jezgra vodonika, oslobađa se velika energija i stvaraju se jezgra helijuma (tzv. alfa čestice), kao i neke druge elementarne čestice kao što su neutrini (koji su takođe nosioci informacija)
- Gravitaciono sažimanje (rane i kasne faze u evoluciji) – oslobođena gravitaciona potencijalna energija se delom troši na zagrevanje, a delom se transformiše u elektromagnetno zračenje!!!

Stabilne zvezde (na glavnom nizu) – izvor energije je u jezgru (TN reakcije), a kroz ostatak unutrašnjosti se energija samo prenosi

Gravitaciono sažimanje

- GRAVITACIONA POTENCIJALNA ENERGIJA ZVEZDE MASE M I RADIJUSA R :

$$E_G = - \int_0^M \frac{Gm(r)}{r} dm(r) = - 4\pi G \int_0^R dm(r) \rho(r) r dr$$

- UKUPNA ENERGIJA ZVEZDE:

$$E = E_G + E_T + E_{\text{zr}} < 0 \quad \text{ZA STABILNU KONFIGURACIJU GASA I ZRAČENJA}$$

- TERMALNA ENERGIJA ZVEZDE:

$$E_T = \frac{3}{2} \int_0^M \frac{kT}{m} dm(r) = \frac{3}{2} \int_0^M \frac{p}{\rho} dm(r) = 6\pi \int_0^R p(r) r^2 dr$$

$$= 6\pi \left[\cancel{p(r) \frac{r^3}{3}} \Big|_0^R - \frac{1}{3} \int_0^R r^3 dp(r) \right] = 2\pi G \int_0^R m(r) \rho(r) r dr = - \frac{1}{2} E_G$$

$p(R) = 0$

- PRI SPOROM SAŽIMANJU ZVEZDE (ZADOVOJEN USLOV H.R.):

$$\Delta E_G < 0 \Rightarrow \Delta E_T = -\frac{1}{2} \Delta E_G > 0$$



Gravitacionim sažimanjem jedna polovina oslobodjene energije pretvori se u termalnu energiju zvezde, a druga polovina se izrači.

Ako bi gravitaciono sažimanje bilo jedini izvor energije, starost Sunca bi bila

$$-E_G = GM^2/R = 4 \times 10^{41} \text{ J} \quad L_{\odot} = 3.844 \times 10^{26} \text{ W} \quad t = \frac{4 \times 10^{41} \text{ J}}{4 \times 10^{26} \text{ W}} = 10^{15} \text{ s} = 3 \times 10^7 \text{ god}$$

Gravitaciono sažimanje ne može da obezbedi dovoljnu količinu energije za ceo život zvezde.

Sunce je staro oko 5 milijardi godina

Termonuklearne reakcije

(osnovni izvor zvezdane energije)

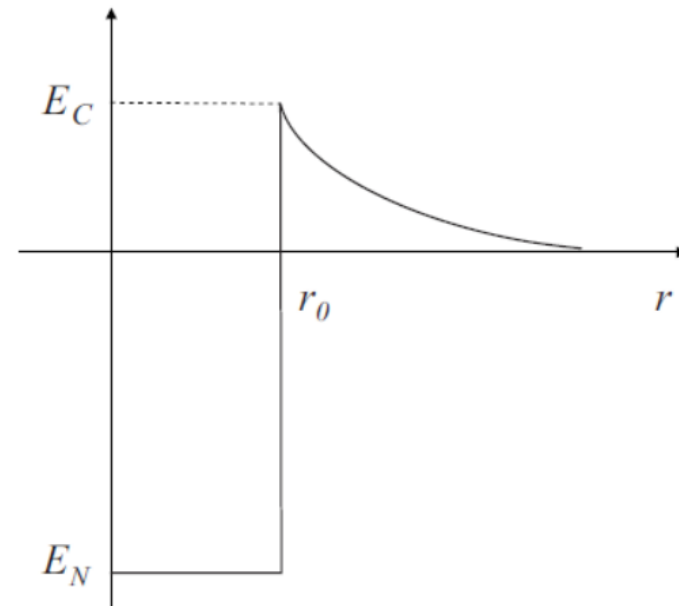
Fuzija lakih atomskih jezgara u teža dovodi do oslobadjanja nuklearne energije prema Ajnštajnovoj relaciji (1905):

$$E = \Delta m \cdot c^2.$$

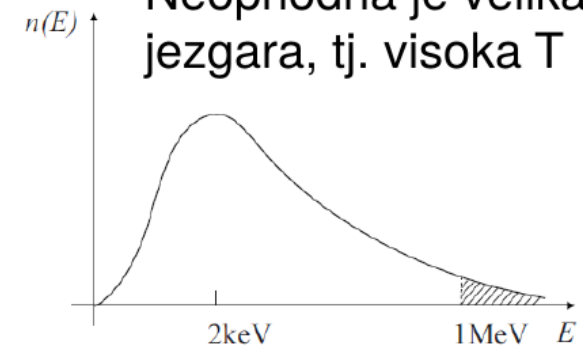
Teorijsku osnovu TN fuzije vodonika u helijum dali su: K. von Weizsacker (1937) i H. Bethe (1938).

Energija potrebna da se savlada odbojna Kulonova sila izmedju dva jezgra:

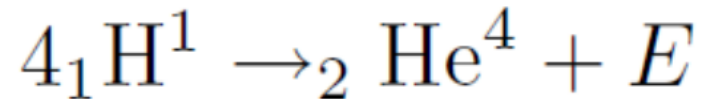
$$E > \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_0}$$



Neophodna je velika E_{kin} jezgara, tj. visoka T



Fuzija vodonika u helijum



$$\text{Defekt mase: } \Delta m = 4m_{\text{H}^1} - m_{\text{He}^4}$$

$$m_{\text{H}^1} = 1.008145 \text{ u}$$

$$m_{\text{He}^4} = 4.00387 \text{ u}$$

$$\Delta m = 0.02871 \text{ u}$$

$$\text{u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{u} c^2 = 931 \text{ MeV}$$

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 26.72 \text{ MeV}$$

Defekt mase – razlika između zbira masa čestica koje ulaze u sastav nukleusa i mase samog jezgra

Za združivanje nukleona u jezgro i održavanje jezgra kao celine potrebna je određena energija veze

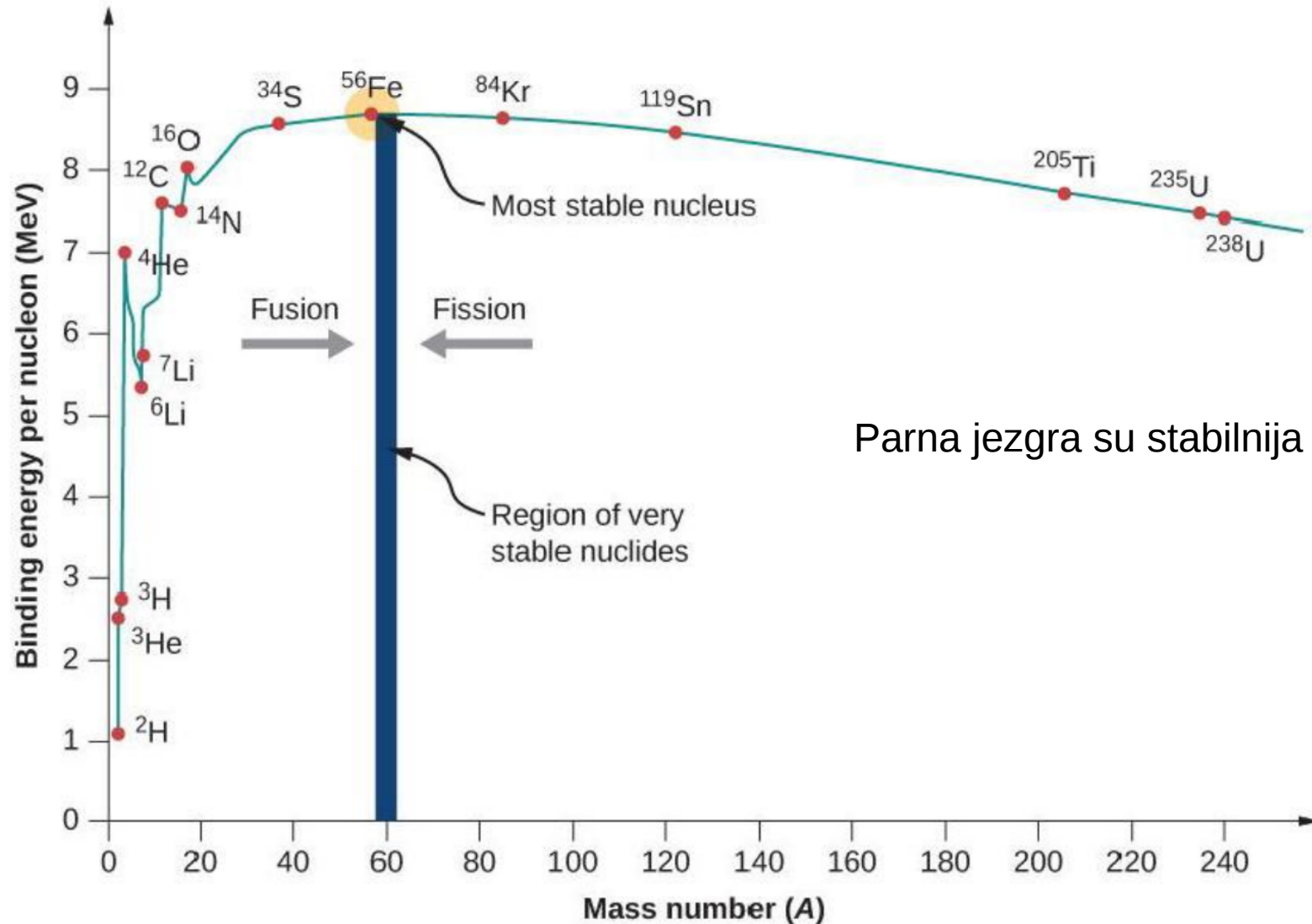
Prema zakonu održanja energije, energija veze jezgra odgovara energiji koju treba uložiti da bi se jezgro razbilo na pojedinačne nukleone

Jezgra su vezana stanja nukleona, te imaju svoje unutrašnje nivoe

Energija veze jezgra zavidi od broja nukleona, ona se obično obračunava po jednom nukleonu – specifična energija veze – ukazuje na stabilnost jezgra

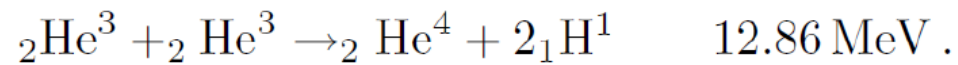
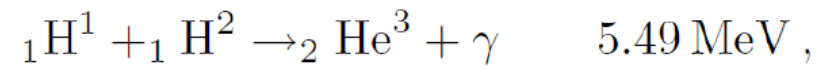
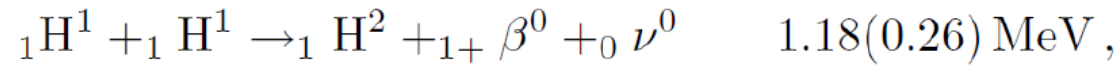
Što je veća ta energija, potrebna je veća energija da se nukleon izbací iz jezgra, odnosno jezgro je stabilnije

Energija veze po nukleonu u funkciji masenog broja

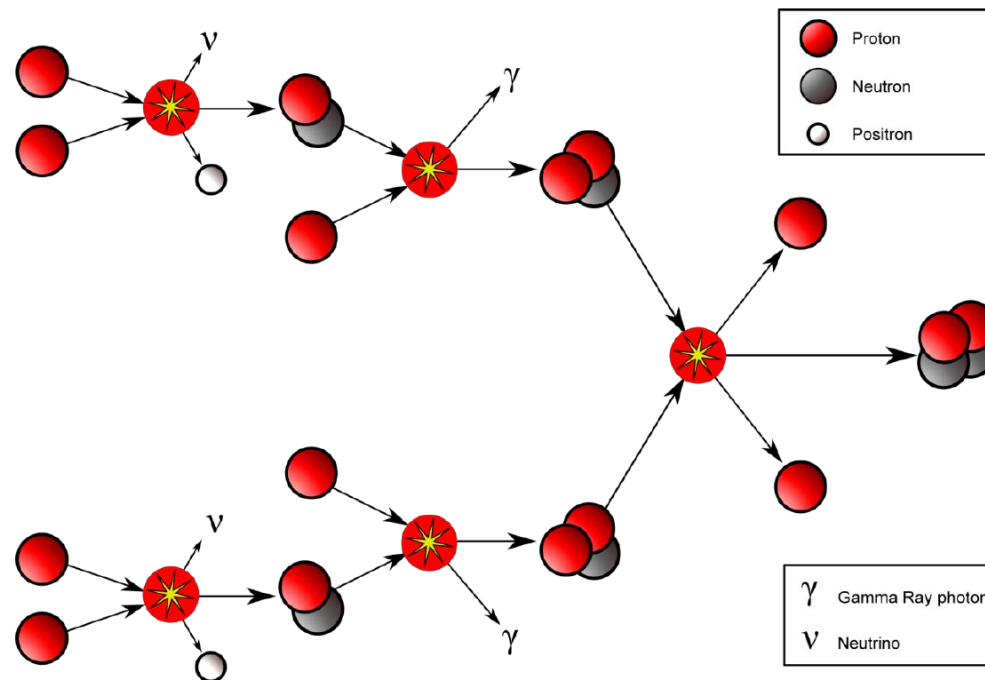


Parna jezgra su stabilnija od neparnih

Proton-proton (p-p) lanac

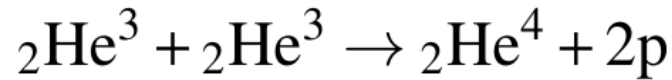


p-p lanac je najefikasniji na T oko $15 \cdot 10^6$ K i gustinama oko 100 g/cm^3 .

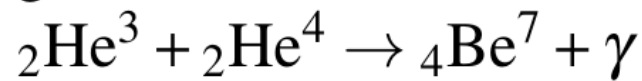


- Osnovna i početna reakcija se odvija putem slabe interakcije i određuje vreme procesa (reda 10^{10} godina ali ima mnogo protona)
 - oko 86% neutrina nastaje u njoj – daje kontinualni spektar
$$p + p \rightarrow {}_1\text{H}^2 + e^+ + \nu_e$$
- Prati je $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$
- Zatim se u reda nekoliko sekundi jakom interakcijom odvija
$${}_1\text{H}^2 + p \rightarrow {}_2\text{He}^3 + \gamma$$
- Nekoliko kanala dovodi do ${}_2\text{He}^4$

- Najverovatniji je ppI, uz to da moraju da se odvijaju dve reakcije koje stvaraju ${}^3_2\text{He}$

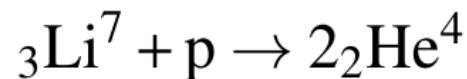
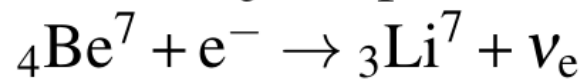


- Ako već postoji ${}^4_2\text{He}$ u sastavu zvezde onda je moguće da se dogodi

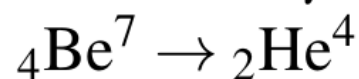
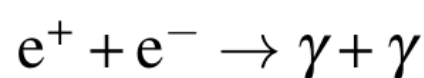
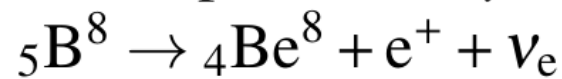
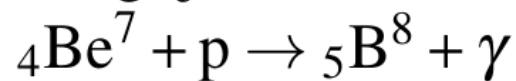


- Postoje dva kanala koja onda dovode do ${}^4_2\text{He}$

- Prvi (linijski spektar) – ppII:

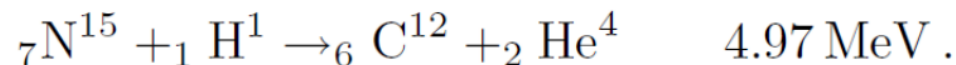
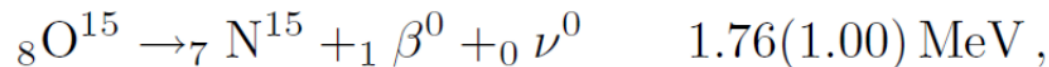
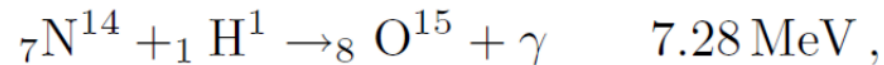
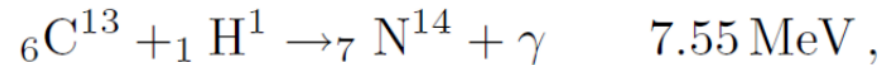
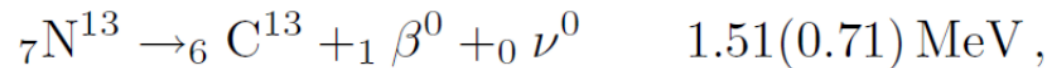
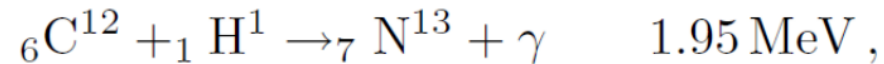


- Drugi je (kontinualni spektar) – ppIII:



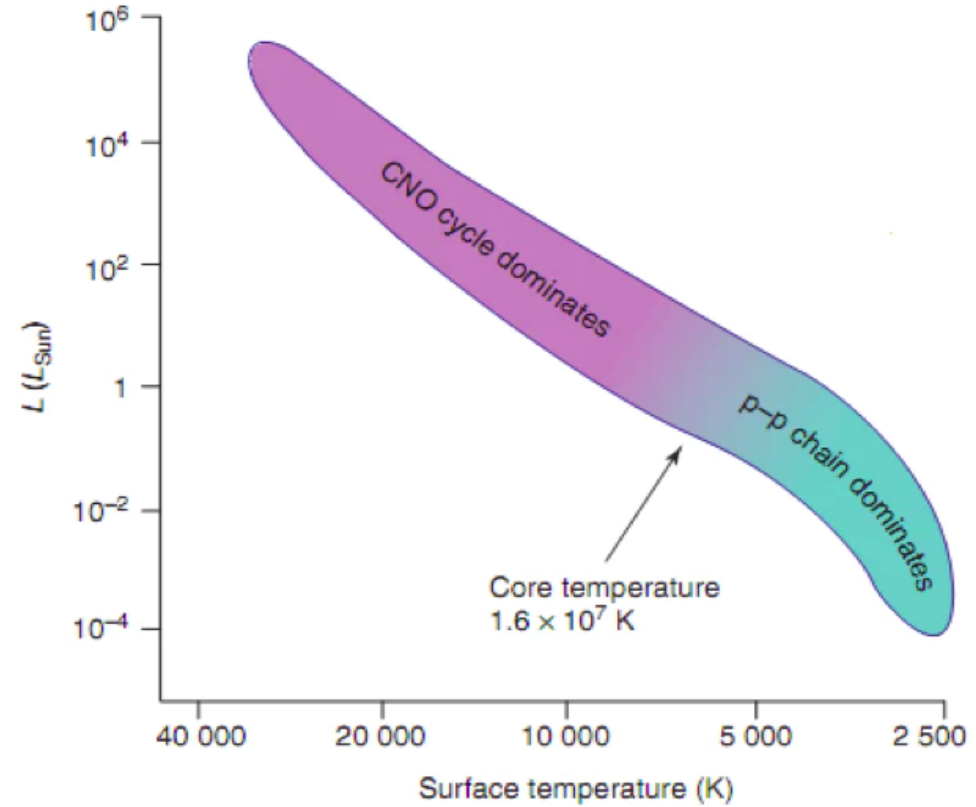
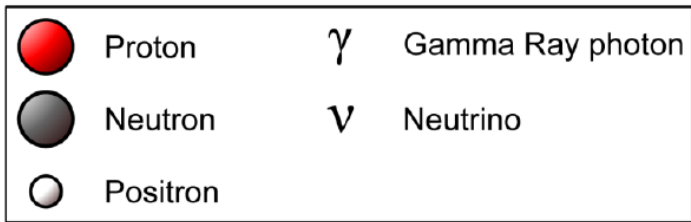
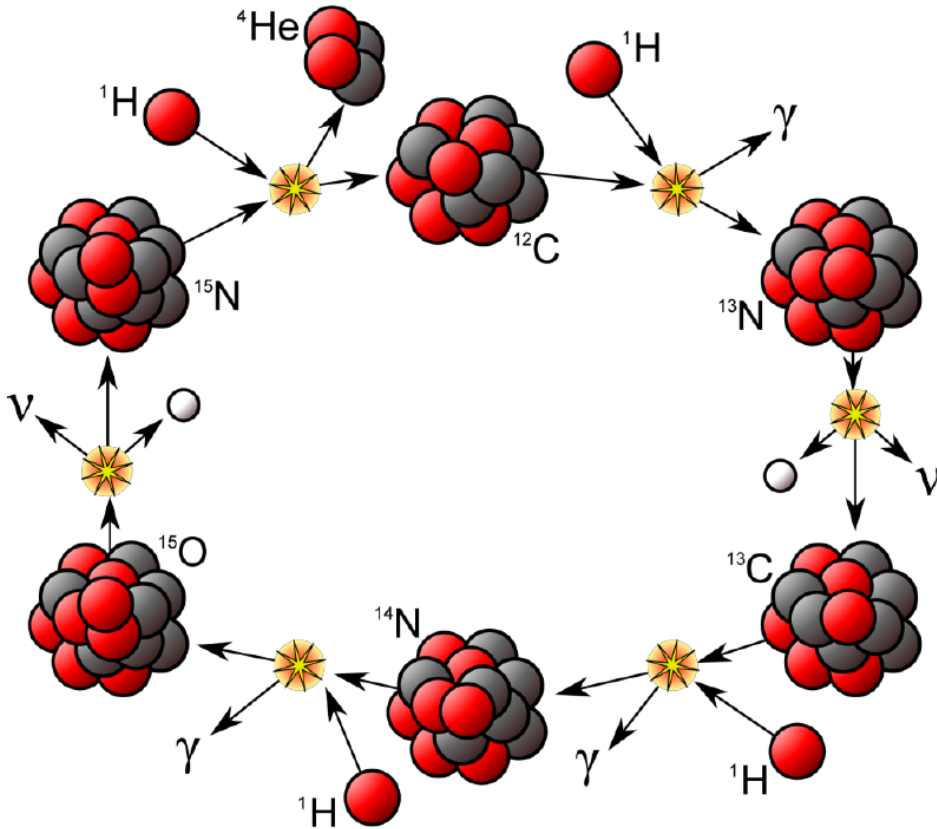
**Veće temperature
od ppI**

CNO (Bethe-ov) ciklus



Proton mora da savlada veću Kulonovu barijeru da bi bio zahvaćen težim elementom (C ili N), pa su za CNO ciklus potrebne **T veće od $20 \cdot 10^6 \text{ K}$** (u jezgrima masivnih zvezda).

CNO ciklus

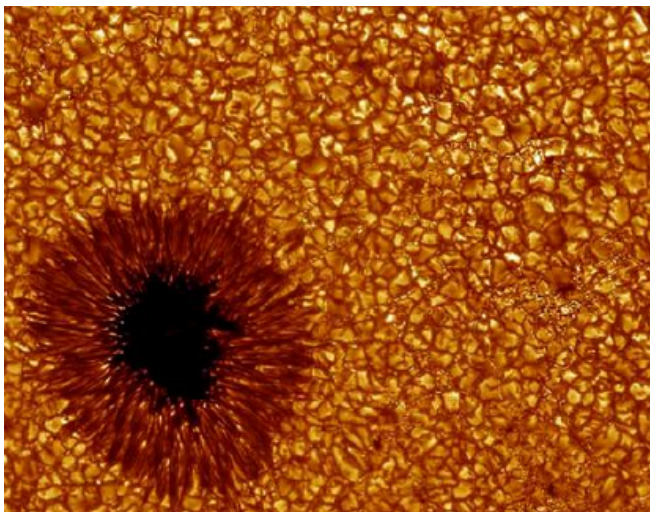
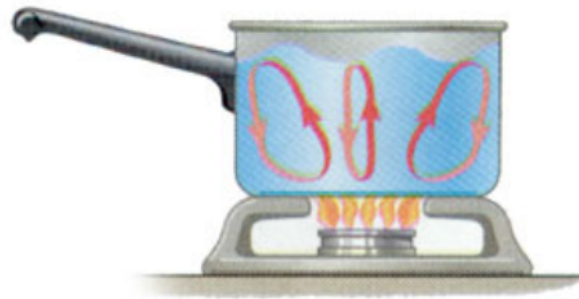
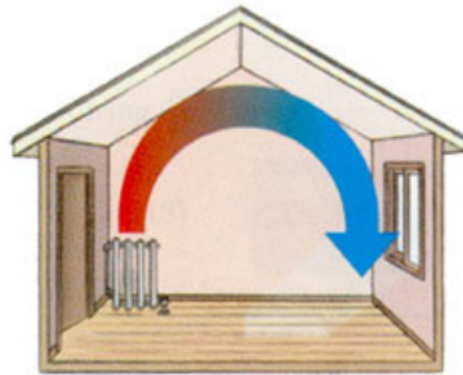


Mehanizmi prenosa energije kroz unutrašnjost zvezda

Kod zvezda na glavnom nizu uglavnom **zračenje fotona** i **konvekcija**

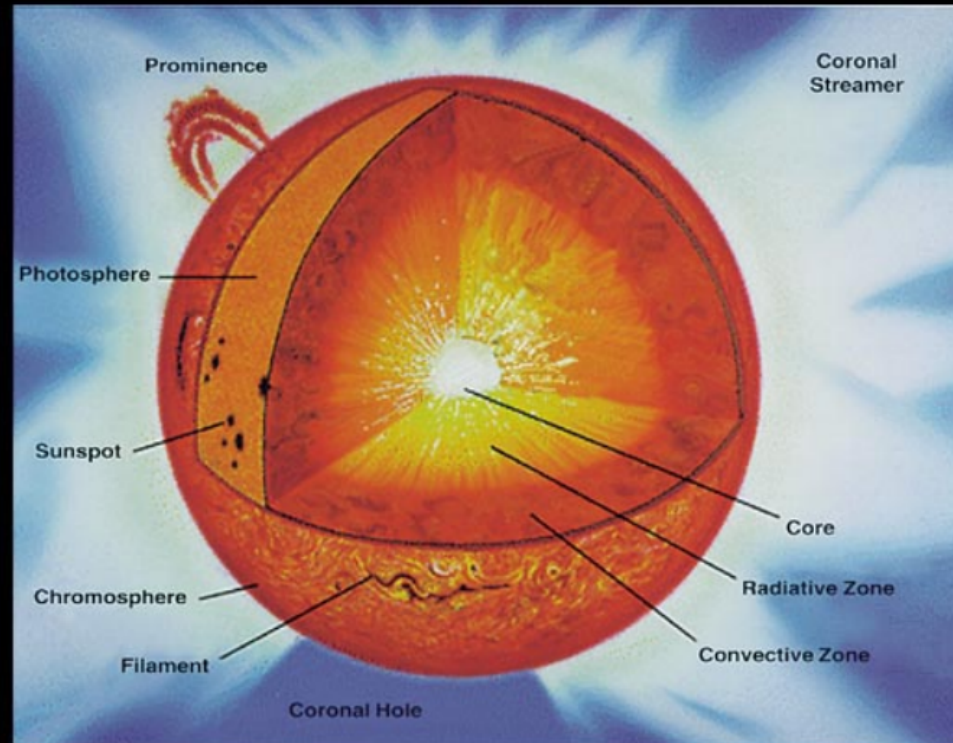
Kondukcija (toplotno provođenje) kod npr. kompaktnih objekata, konačnih faza u evoluciji kao što su beli patuljci, a talasi mogu biti značajni u atmosferama

Prenos toplote ili mase **konvekcijom** je pojava do koje dolazi kada fluid (tečnost ili gas ili plazma) razmenjuje toplotu (masu) unutar samog sebe, prostim mešanjem (konvekcijom) materije. Ovaj proces odvija se pod uslovom da postoji dovoljna razlika u temperaturi (ili gustini ako se prenosi masa) unutar samog fluida. Ukoliko se, na primer, sud sa vodom zagreva odozdo, donji slojevi vode, usled zagrevanja, postaju specifično lakši i struje naviše, a gornji hladniji slojevi padaju na dno suda.



Primer
zvezda
tipa Sunca

Fraknoi/Morrison/Wolff, *Voyages Through the Universe, 2/e*
Figure 14.1 The Parts of the Sun



Harcourt, Inc. items and derived items copyright ©2000 by Harcourt, Inc.

Modeli zvezdane unutrašnjosti treba da zadovolje osnovne fizičke procese i posmatranja

Pravimo modele: od najprostijih ka složenijima

- **Aproksimacije koje se koriste:**
 - sferna-simetrija,
 - stacionarnost,
 - zvezda je stabilna, nerotirajuća, bez magnetnog polja

Jednačine unutrašnje zvezdane strukture

$$\frac{d\mathcal{M}(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r),$$

$$\frac{dp(r)}{dr} = -G \frac{\mathcal{M}(r)\rho(r)}{r^2},$$

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) j(r)$$

$$p(r) = p_g + p_{zr} = f(\rho, T)$$

i (za slojeve gde dominira zračenje):

$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{3\kappa}{4ac} \frac{\rho(r)}{T^3(r)} \frac{L(r)}{4\pi r^2},$$

ili (za slojeve gde dominira konvekcija):

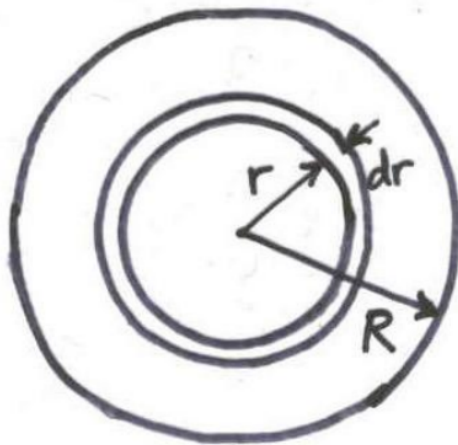
$$\frac{dT(r)}{dr} = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{T(r)}{p(r)} \frac{dp(r)}{dr}.$$

Eliminacijom $\rho(r)$, nepoznate su: $p(r)$, $T(r)$, $L(r)$ i $\mathcal{M}(r)$

Zadati: hemijski sastav, masa zvezde i granični uslovi

**Poznavati
strukturu
znači
poznavati
ove
raspodele**

Jednačina mase (raspodela mase)

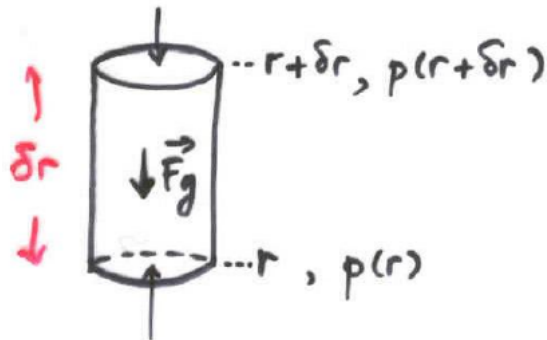


$$M(r) = \int_0^r \rho(r) dV(r) = \int_0^r \rho(r) 4\pi r^2 dr$$

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

Jednačina pritiska (uslov hidrostatičke ravnoteže)

STACIONARNOST $\Rightarrow \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$
(uslov mehanioke ravnoteže)



$$[p(r+\delta r) - p(r)] \delta S + g(r) d\mu = 0$$

$$d\mu = \rho(r) \delta S \delta r$$

$$p(r+\delta r) = p(r) + \left(\frac{dp}{dr}\right) \delta r$$

\Downarrow

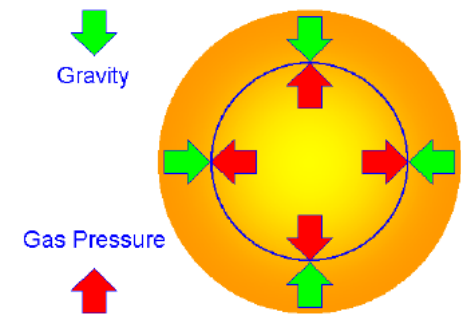
$$\frac{dp(r)}{dr} = -g(r) \rho(r)$$

$$g(r) = G \frac{\mu(r)}{r^2}$$

$$\frac{dp(r)}{dr} = -G \frac{\mu(r) \rho(r)}{r^2}$$

$$\underline{p(r) = p_g(r) + p_{er}(r)}$$

Hydrostatic Equilibrium



Jednačina stanja gasa

- PRITISAK IDEALNOG GASA

$$p_g(r) = n k T = \frac{\rho}{m} k T = \frac{\rho}{\mu m_H} k T$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltzmann-ova konstanta
 $\mu =$ srednja molekulska masa $(= \frac{\rho}{n \cdot m_H})$

- PRITISAK DEGENERISANOG GASA

$$\text{za } \rho > \rho_{cr} = 2.4 \times 10^{-8} \mu T^{3/2}$$

$$p_{deg.g} = k' \left(\frac{\rho}{\mu_e} \right)^{5/3}$$

(za ne-relativističke e^-)

$$p_{deg.g} = k'' \left(\frac{\rho}{\mu_e} \right)^{4/3}$$

(za relativističke e^-)

$$p_{deg.g.} \neq f(T) \quad !$$

- PRITISAK ZRAČENJA

$$p_{zr} = \frac{1}{3} a T^4 = \frac{4\sigma}{3c} T^4$$

Trećina gustine energije zračenja

Jednačina luminoznosti (uslov energetske ravnoteže)

Količina energije koja u jedinici vremena napusti sferu radijusa $r < R$ jednaka je količini energije koja se u jedinici vremena unutar te sfere proizvede.

$L(r)$ – luminoznost na rastojanju r od centra = ukupna količina energije koja u jedinici vremena napusti sferu radijusa r

$j(r)$ – količina energije koju u jedinici vremena proizvede jedinica mase zvezdane materije unutar sfere radijusa r

$$L(r) = \int_0^{\mathcal{M}(r)} j(r) d\mathcal{M}(r) = \int_0^{V(r)} j(r) \rho(r) dV(r) = \int_0^r j(r) \rho(r) 4\pi r^2 dr$$

\Rightarrow

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) j(r)$$

Raspodela temperature (prenos energije)

Prenos energije zračenjem

$$\frac{dp_{zr}(r)}{dr} = -g_{zr}(r)g(r)$$

$$g_{zr} = \frac{\kappa F(r)}{c} = \frac{\kappa L(r)}{c 4\pi r^2}$$

$$\frac{dp_{zr}}{dr} = \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{3} a T^4 \right) = \frac{4aT^3}{3} \frac{dT}{dr} = - \frac{\kappa g}{c} \frac{L}{4\pi r^2}$$

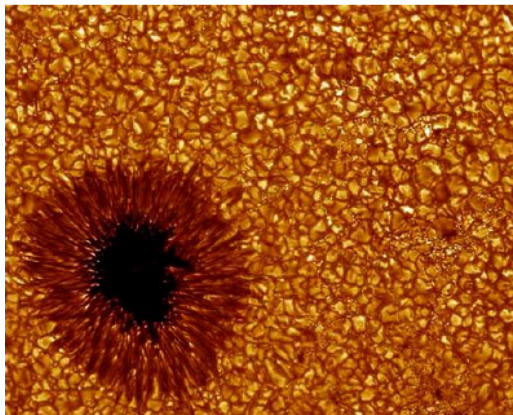
⇓

$$\frac{dT(r)}{dr} = - \frac{3\kappa}{4ac} \frac{g(r)}{T^3(r)} \frac{L(r)}{4\pi r^2}$$

g_{zr} = ubrzanje gasa usled
apsorpcije zračenja =
impulsu koji fotoni
predaju svakom gramu gasa u 1s

Impuls fotona je E/c , a
energija koju u jedinici
vremena apsorbuje jedinica
mase koeficijenta apsorpcije
 κ , κF

Prenos energije konvekcijom



$$2 \text{ --- } \textcircled{\text{---}} \text{ --- } T_2 < T_1, p_2 < p_1, \rho_2 < \rho_1 \quad \boxed{p_2^* = p_2}$$

$$T_2^*, p_2^*, \rho_2^*$$

$$1 \text{ --- } \textcircled{\text{---}} \text{ --- } T_1, p_1, \rho_1 \quad T_1^* = T_1, p_1^* = p_1, \rho_1^* = \rho_1$$

$$T_1^*, p_1^*, \rho_1^*$$

- pretpostavke:
- Kretanje sporo (uslov H.R.)
 - Kretanje adijabatsko (nema razmene energije sa okolinom)

$$\underline{p_2^* = p_2} \Rightarrow \rho_2^* T_2^* = \rho_2 T_2$$

(a) ako je $T_2^* < T_2 \Rightarrow \rho_2^* > \rho_2$
element tone - vraća se

(b) ako je $T_2^* > T_2 \Rightarrow \rho_2^* < \rho_2$ element isplivava

Uслов за konvekciju: $|\text{grad } T|^* < |\text{grad } T|_{\text{okoline}}$

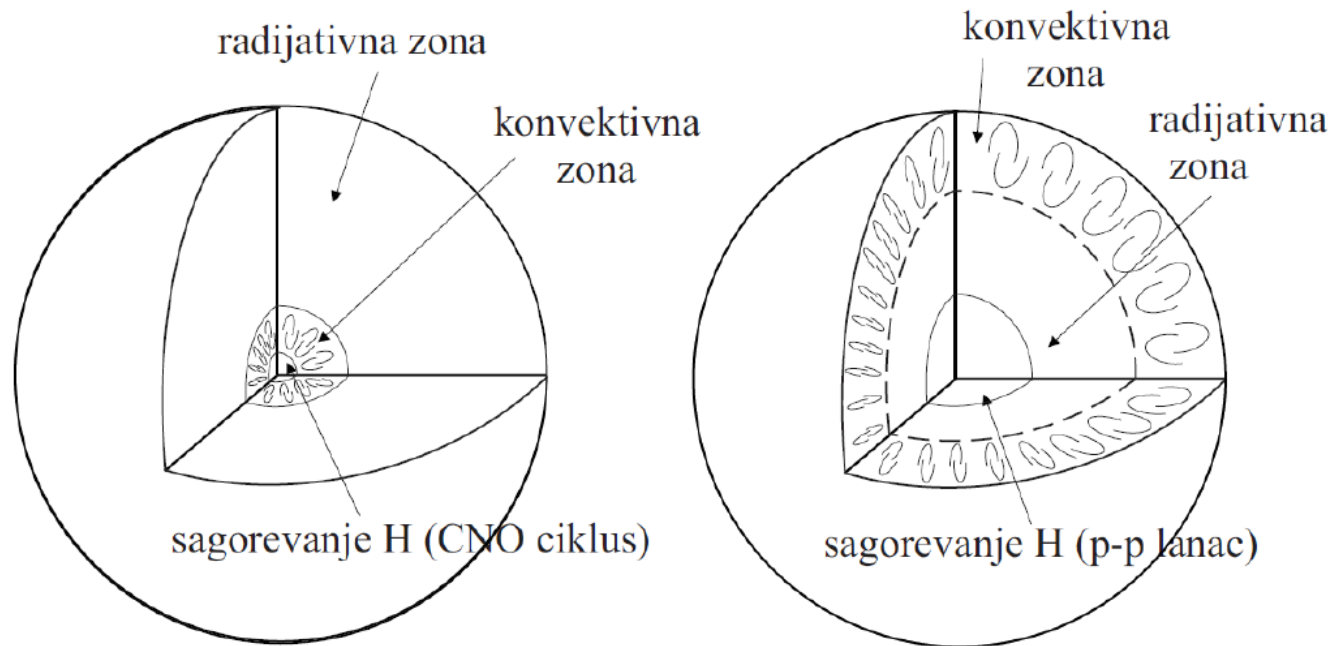
Adijabatski proces:

$$T = C \cdot p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \text{const})$$

$$\Rightarrow \frac{dT}{dr} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{T}{p} \frac{dp}{dr}$$

$$\boxed{\frac{dT(r)}{dr} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{T(r)}{p(r)} \frac{dp(r)}{dr}}$$

Modeli zvezdane unutrašnjosti



masivna sjajna zvezda ($10M_{\odot}$),

Sunce

$$j = j(\rho, T, \text{hemijski sastav}) \quad j = j_0 \rho^a T^n \quad [\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}]$$

$a = 1$ za reakcije sagorevanja vodonika

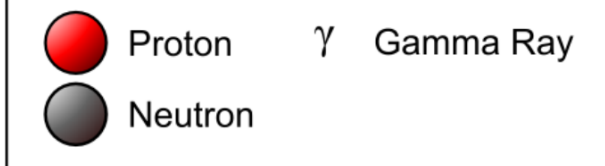
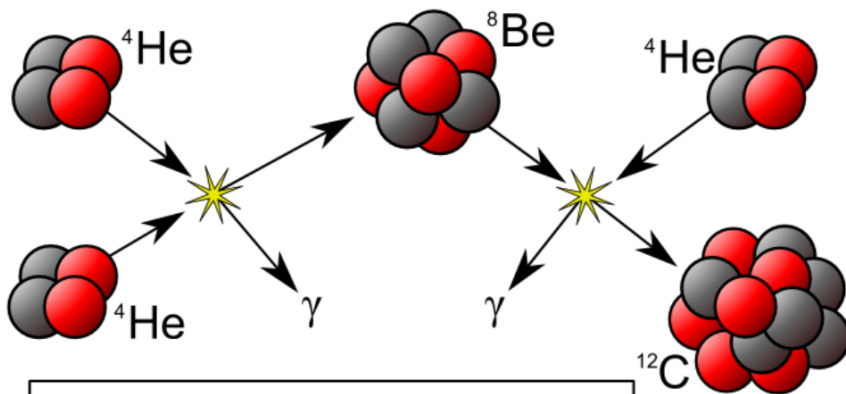
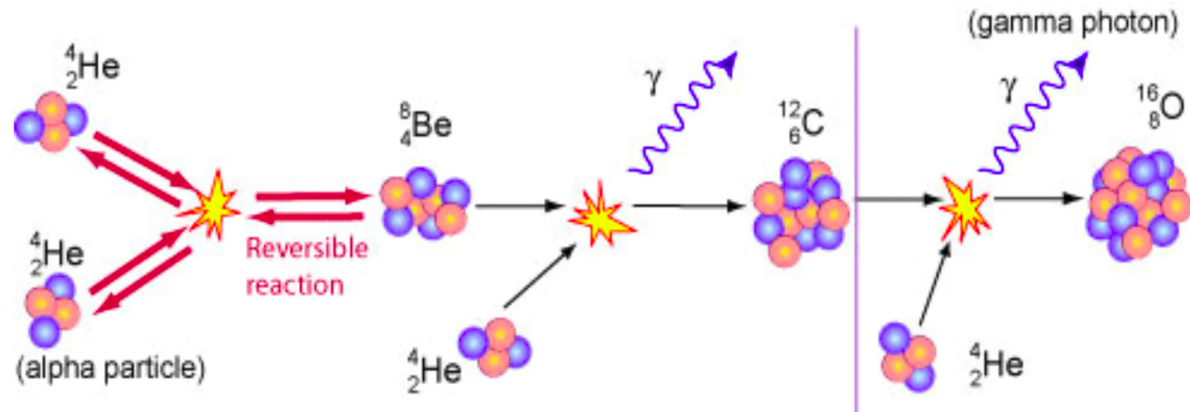
$n = 4$ (za p-p lanac)

$n = 18$ (za CNO ciklus)

Bitno za priču o evoluciji zvezda zvezde nakon glavnog niza

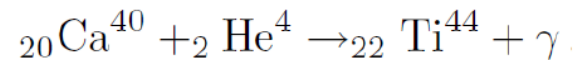
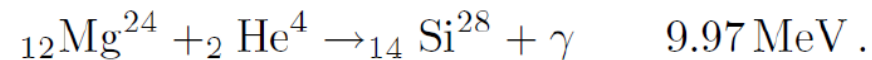
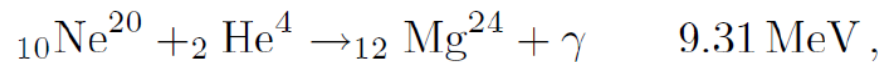
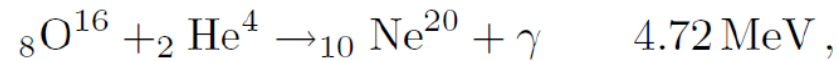
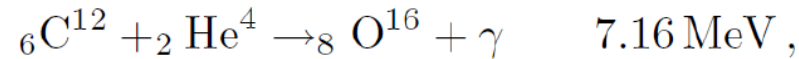
Sagorevanje helijuma – trostruka alfa, $>10^8$ K

Sagorevanje helijuma

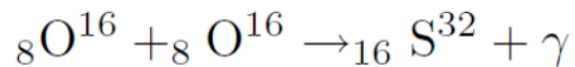
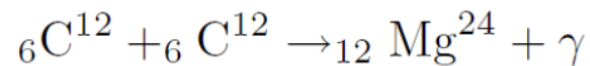
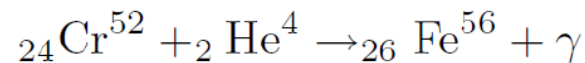


Salpeter i Fred Hojl 50tih 20. veka

Formiranje težih elemenata



...



Gorivo

T[K]

H

10^7

He

10^8

C

$4 - 7 \times 10^8$

O

$1.4 - 2 \times 10^9$

Si

$3 - 5 \times 10^9$

Ukupni energetski ekvivalent celokupne mase Sunca iznosi

$$E = M_{\odot} \cdot c^2 = 1.79 \times 10^{47} \text{ J}$$

Od toga, samo oko 10% zvezdane mase predstavlja nuklearno gorivo

U reakcijama sagorevanja vodonika samo se 0,7% transformiše u energiju.



Ako pretpostavimo da je Sunčeva luminoznost konstantna, onda bi **Sunce trebalo da ima goriva za ukupno**

$$t = \frac{0.1 \times E \times 0.007}{L_{\odot}} = 10 \times 10^9 \text{ godina}$$

- Pod elementarnim se smatraju samo one čestice koje nemaju unutrašnju strukturu, a uobičajeno je da se one opisuju kao pobuđena stanja odgovarajućih kvantnih polja.
- Standardni model – trenutno podržana naučna teorija fizike čestica.
- U pojedinoj literaturi za sve subatomske čestice koristi termin elementarne, a baš za one, za koje se danas smatra da su bez unutrašnje strukture koristi izraz fundamentalne.
- U elementarne čestice se danas ubrajaju samo leptoni, kvarkovi, kao i tzv. fundamentalni bozoni.


- Veliki je problem kada su nosioci informacija naelektrisane čestice, kako na njih magnetna polja, različitih stepena kompleksnosti, i na mikro i makro skalama, imaju veliki uticaj
- Takođe, nosioci informacija bi trebalo da budu stabilni, bar za vreme neophodno da stignu od izvora do nas kao posmatrača (zato slobodni neutroni, na primer nisu tako pogodni za razmatranje).
- Nosioci informacija ne bi trebalo da budu pod veoma izraženim uticajem okolne materije kroz koju se prostiru na putu do posmatrača

- Tako, konačno dolazimo do različitih neutrina i odgovarajućih antineutrina, električno neutralnih, izrazito stabilnih leptona sa veoma malom masom mirovanja, koji se obično posebno izdvajaju kao specijalni nosioci informacija
- Ove čestice nam omogućavaju direktno upoznavanje sa npr. fizičkim karakteristikama unutar jezgra Sunca (i drugih sličnih zvezda) u kojem se formiraju i neometano ga napuštaju
- Ipak, upravo je baš veoma mala verovatnoća interakcije neutrina sa običnom materijom ujedno i otežavajuća okolnost pri detekciji ovih nosioca informacija
- Zanimljivo je i to da spomenuta verovatnoća u većini slučajeva raste sa porastom energije ovih čestica
- Planeta Zemlja je skoro potpuno prozračna za neutrine energija do oko 1 MeV.

- Neutrini mogu interagovati samo slabim nuklearnim međudejstvom (interakcijama koje podrazumevaju W^{\pm} i Z^0 bozone, odnosno slabe naelektrisane i slabe neutralne struje), kako se gravitacioni uticaj uglavnom može potpuno zanemariti
- Kod Suncu sličnih zvezda osnovni izvor energije je p-p lanac
- CNO ciklus ima kod Sunca zanemarljivi udeo – bitan kod vrelih zvezda sa konvektivnim jezgrima

Problem neutrina

Neutrini – neutralne subatomske čestice izuzetno male mase, koje vrlo slabo interaguju sa materijom kroz koju prolaze, što ih čini ekstremno teškim za detekciju.

Količina oslobođene energije u vidu neutrina zavisi od tipa reakcije u kojoj su nastali  **neutrini sa Sunca pružaju direktnu informaciju o uslovima i procesima u Sunčevom jezgru.**

Postoje tri vrste neutrina: elektronski, mionski i tau neutrina. U termonuklearnim reakcijama na Suncu proizvode se **elektronski neutrina**.

Reakcija	Energija neutrina [MeV]
$H^1 + H^1 \rightarrow H^2 + e^+ + \nu_e$	0.26
$Be^7 + e^- \rightarrow Li^7 + \nu_e$	0.86
$B^8 \rightarrow Be^{8*} + e^+ + \nu_e$	7.2
$N^{13} \rightarrow C^{13} + e^+ + \nu_e$	0.71
$O^{15} \rightarrow N^{15} + e^+ + \nu_e$	1

Problem: detektovan 3 puta manji fluks od teorijski predviđenog (Raymond Davis, 1964)

- Specijalno dizajnirani prijemnici vasijskih neutrina su uglavnom smešteni duboko pod zemljom kako bi se smanjio uticaj drugih čestica, konkretno sekundarnih kosmičkih zraka
- Događaji koji označavaju detekciju neutrina su obično veoma retki, pa i mala količina sporednih čestica atmosferskog porekla bitno pojačava pozadinu u odnosu na sam signal
- Iz tog razloga je važno poznavati kako sastav (tip), tako i količinu sekundarnih kosmičkih zraka koji u jedinici vremena prodiru dovoljno duboko u unutrašnjost planete Zemlje

**Detektori neutrina
– veliki rezervoari
tečnosti**

**Cl detektori,
vodeni detektori,
Ga detektori,...**

**Neutrinski
teleskopi su
ogromne
zapremine**



Rešenje problema – hipoteza o “oscilacijama” neutrina je potvrđena u Kamiokande detektoru (Masatoshi Koshiba, Superkamiokande, 1996)

Nobelova nagrada za fiziku 2002:

Za detekciju kosmičkih neutrina i rad na problemu solarnih neutrina:

Raymond Davis Jr.



Masatoshi Koshiba



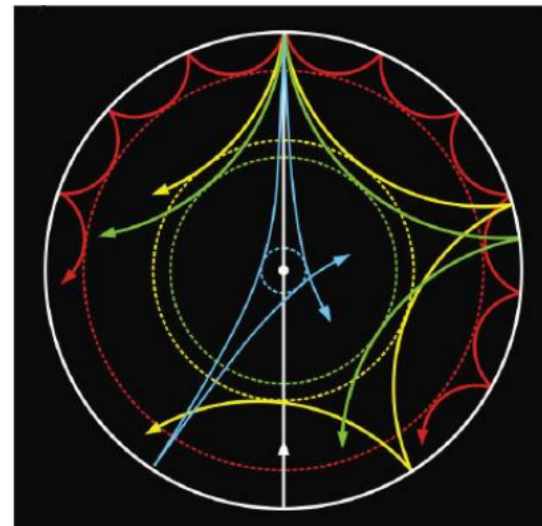
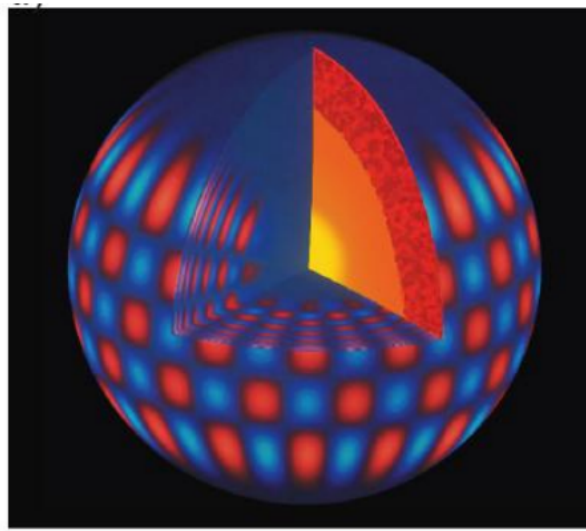
- Sa druge strane, ispostavlja se da neutrimi ipak imaju konačnu, ali veoma malu sopstvenu masu (za razliku od predikcije koju daje Standardni model fizike čestica da neutrimi imaju nultu masu), kao i da tokom kretanja od izvora do posmatrača neutrimi mogu menjati ukus (eng. *flavor oscillation*)
- Zbog toga je prilikom osmišljavanja načina detekcije različitih vrsta (ukusa) neutrina i antineutrina važno biti veoma obazriv

Helioseizmologija

Oscilacije na Suncu su otkrivene 1962. godine – detektovani su mali, periodični (5 min) Doplerovi pomaci spektralnih linija koji su ukazivali na to da površina Sunca osciluje.

Oscilacije su rezultat prostiranja talasa koji nastaju u konvektivnoj zoni, odbijaju se o fotosferu i kreću kroz Sunčevu unutrašnjost.

Pošto brzina prostiranja talasa zavisi od temperature i gustine sredine, detekcijom i analizom njihovih refleksija o površinu Sunca izučavaju se uslovi u Sunčevoj unutrašnjosti.

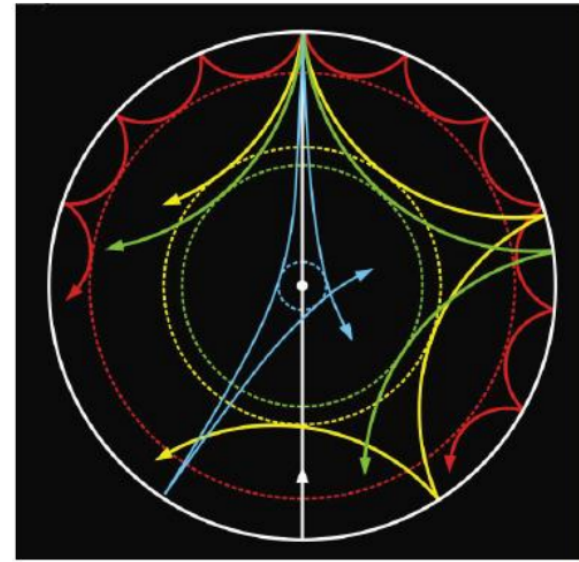
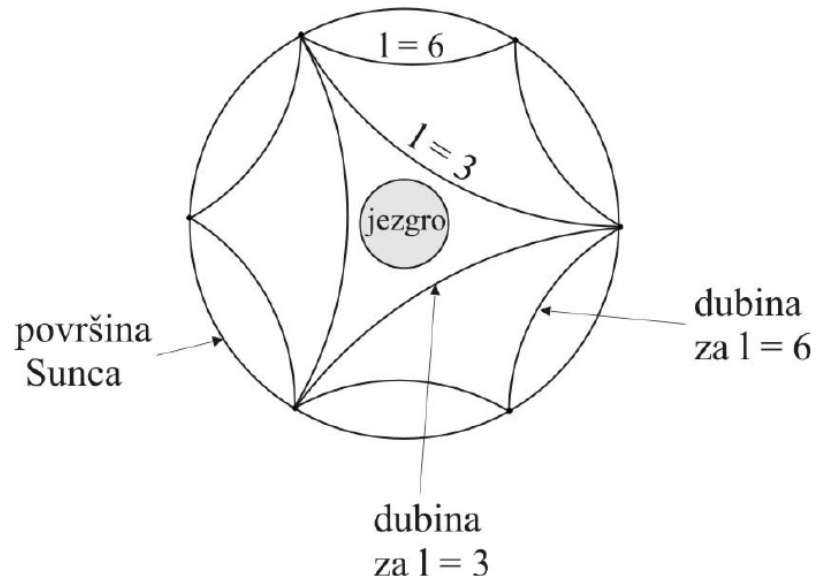


Iz posmatranja oscilovanja površine Sunca (slika levo) određuju se karakteristike talasa koji se prostiru kroz unutrašnjost Sunca (slika desno).

Helioseizmologija

- Proučavanjem **prostiranja akustičkih talasa** kroz unutrašnjost nekog tela možemo odrediti njegovu strukturu (primer: na osnovu prostiranja seizmičkih talasa ispitana je unutrašnjost Zemlje)
- Konvekcija “pravi buku” i pri prostiranju talasa kroz unutrašnjost Sunca formira se **sistem stojećih talasa** (kao u bubnju). **Na površini Sunca talasi izazivaju periodična makroskopska kretanja koja posmatramo.**
- **Otkriće 5 minutnih oscilacija** na površini Sunca (Leighton et al. **1962**). To su **vertikalna fotosferska kretanja malih amplituda** (do 25m) koje izazivaju **nisko-frekventni zvučni talasi**.
- **1975** – oscilacije na Suncu nisu sporadične i lokalne, već globalne.
- **1984** – otkrivene oscilacije i na drugim zvezdama (α Cen A).

Helioseizmologija



- Kraći talasi se prostiru bliže površini dok duži dublje prodiru u unutrašnjost. Pošto brzina prostiranja talasa zavisi od temperature i gustine sredine, njihovo proučavanje omogućava sondiranje Sunčeve unutrašnjosti.
- Od 1991. projekat **G**lobal **O**scillations **N**etwork **G**roup (na 6 opservatorija: Hawaji, Arizona, Čile, Kanarska ostrva, Indija, Australija mere se radijalne brzine u 40000 tačaka na Sunčevoj površini)
- Od 1996. satelit **SOHO** (**S**olar and **H**eliospheric **O**bservatory) registruje globalne Sunčeve oscilacije i proučava heliosferu.