

Prof.dr Dragan Gajić

Energija Sunca

i

*misterija deficita solarnih
neutrina*

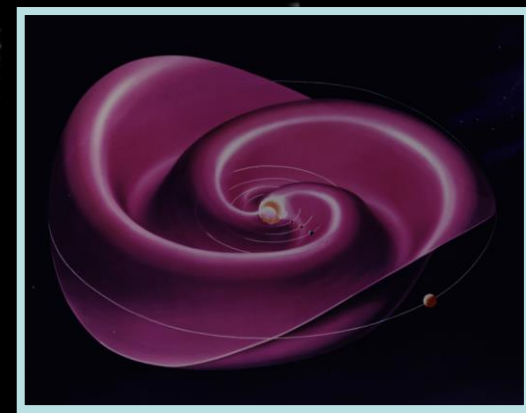


“Sunce, izvor osećajnosti i života, prosipa svoju vatrenu ljubav na ushićenu Zemlju”

Artur Rembo

Ono to radi milijardama godina, leti i zimi, darujući nam svetlost, toplotu i životodavnu snagu. Svaki složeniji živi oblik na našoj planeti je tu, jer biljke prihvataju i ugrađuju u sebe Sunčevu svetlost. Preko njih, kroz lanac ishrane to rade i drugi organizmi. U svakom od nas nalazi se deo Sunca i deo davno nestalih zvezda.

Sunce je usijana plazmena lopta koja brzo rotira (i to diferencijalno), što je uzrok stvaranja globalnog magnetnog polja, koje se u obliku tzv. Parkerovih spiralnih sektora širi kroz S.sistem. Zbog visokih temperatura iz korone Sunca "duva" korpuskularno zračenje, koje čine p , e i u manjoj meri jezgra He (**Sunčev vetar**). Svake sekunde sa Sunca u međuplanetarni prostor preko Sunčevog vetra isteče $10^8 - 10^9$ kg.



Heliosfera – područje širenja S. vetra i međuplanetarnog m. polja. Dimenzije su joj 50–200 AJ. Izdužene jeforme – u smeru antiapiksa, nasuprot kretanja Sunca među zvezdama, prostire se do 1000 AJ. Ona se suprotstavlja prodiranju galaktičkog protonskog vetra i kosmičkih zraka male energije u Sunčev sistem.

Najvei deo energije koja se u njemu produkuje Sunce emituje u vidu elektromagnetnog zračenja i to radi već 4.7×10^9 godina. Danas Sunce emituje $L_S = 3.84 \times 10^{26}$ J/s (luminoznost). To je ravno eksploziji 100 milijardi bombi od 1Mt TNT u 1s. Godišnja potrošnja energije na Zemlji danas je reda 10^{21} J. Svake s na S. se oslobodi energija koja bi se na Zemlji trošila 400 000 godina.



Svake s kilogram Sunca emituje $L_S/M_S = 0.0002$ J ($M_S = 2 \times 10^{30}$ kg –masa Sunca). Po jedinici mase to nije mnogo. Npr. kg drveta pri gorenju oslobodi oko milion puta veću energiju. Kolosalnost procesa je što se to na Suncu događa već milijardama godina. Do danas ono je emitovalo oko 5×10^{43} J (ili 2.5×10^{13} J/kg).



Koji mehanizam obezbeđuje Suncu toliku energiju?



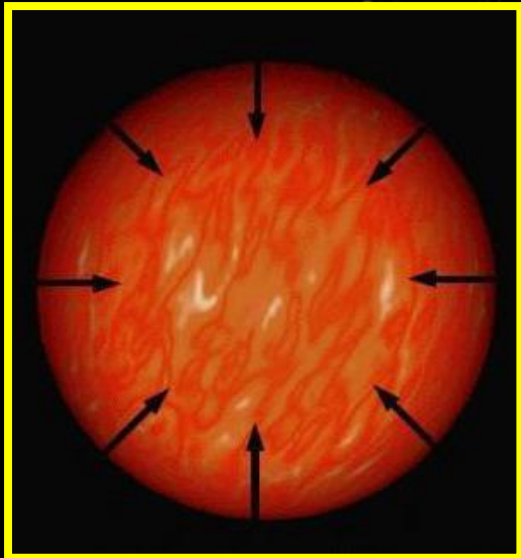
Prvo tumačenje izvora energije Sunca: to su **egzotermne hemijske reakcije (sagorevanje)**. Ali, maksimalna energija oslobođena po *kg* mase u ovim reakcijama je $\epsilon = 2 \times 10^8 \text{ J/kg}$. Ako je A_S starost Sunca onda se iz uslova

$$\epsilon M_S = L_S A_S$$

dobija da je starost Sunca oko 30 000 godina. To bi značilo da je život na Zemlji još mlađi, što je u suprotnosti sa Darwinovom teorijom o poreklu vrsta, ali i metodama i merenjima radioaktivnog raspada u geologiji.

Hemijske reakcije nisu osnovni izvor energije Sunca.

Gravitaciono sažimanje (bez smanjenja mase) je izvor energije Sunca: J. Majer (18. vek), V. Kelvin (19. vek).



H. Helmholtz (1884. g.) je, integracijom po sfernim ljuskama, izračunao da je gravitaciona energija Sunca 2×10^{41} kg, odnosno po kilogramu mase $\epsilon = 10^{11}$ J/kg. Kada bi se sva ova energija emitovala u vidu zračenja (što nije moguće), na osnovu jednačine

$$\epsilon M_S = L_S A_S$$

dobija se da je Sunce staro (najviše) oko 16.5 miliona godina. Sa druge strane, savremene procene su da je starost Sunca 4.57 milijardi godina, Zemlje 4.55 milijardi, a najstarijih tvrdih sastojaka meteorita 4.567 milijardi godina.

Osim toga, fundamentalne teorijske postavke (npr. teorema virijala) isključuju mogućnost da je gravitaciono sažimanje dominantan izvor energije Sunca.



Kakva teorema virijala?

Teorema virijala govori o tome da ravnotežni sastav tela ima negativnu potencijalnu energije $\frac{E_p}{2} = -E_k$ interakcije koja je po apsolutnoj vrednosti dva puta veća od kinetičke energije. Sistem koji se razleće ima višak kinetičke energije, a sistem koji se urušava ima njen manjak.

Kao što je poznato brzina kruženja u ravnotežnom gravitacionom sistemu dobija se izjednačavanjem gravitacione i centrifugalne sile:

$$\gamma \frac{mM}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \text{ odnosno } v_k = \sqrt{\frac{\gamma M}{r}}$$

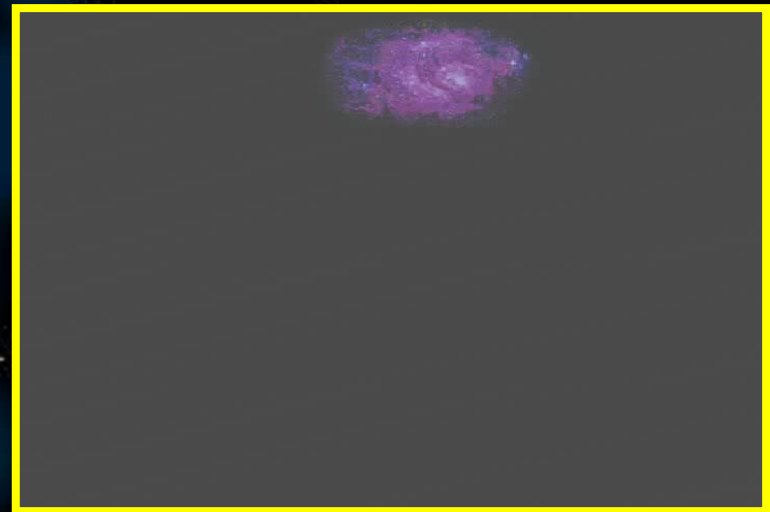
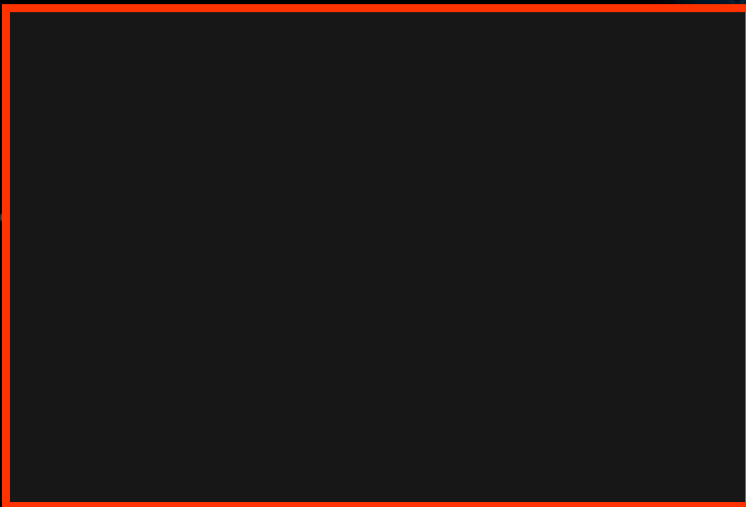
Nakon toga je ukupna mehanička energija $E = E_k + E_p$

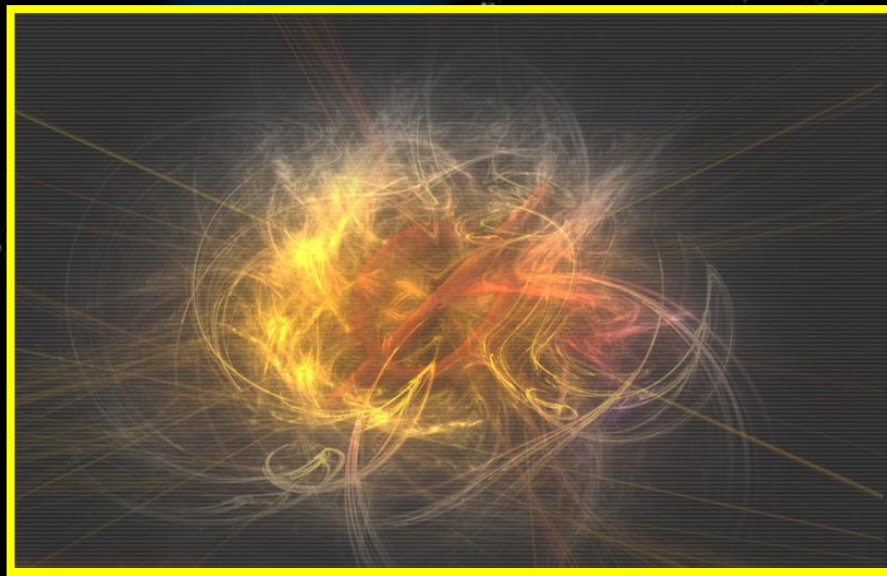
$$E_u = \frac{mv^2}{2} - \gamma \frac{Mm}{r} = -\gamma \frac{Mm}{2r} = \frac{E_p}{2} \text{ tj. } \frac{E_p}{2} = E_k + E_p$$

Odavde je za stabilne gravitacione sisteme $E_k = -E_p / 2$

Prema ovoj teoremi, za zvezde u hidrostatičkoj ravnoteži kod sporog sažimanja jedna polovina oslobođene gravitacione energije pretvara se u termalnu, a druga polovina se izrači. To znači da **gravitaciono sažimanje ne može da obezbedi luminoznost koju Sunce danas poseduje.**

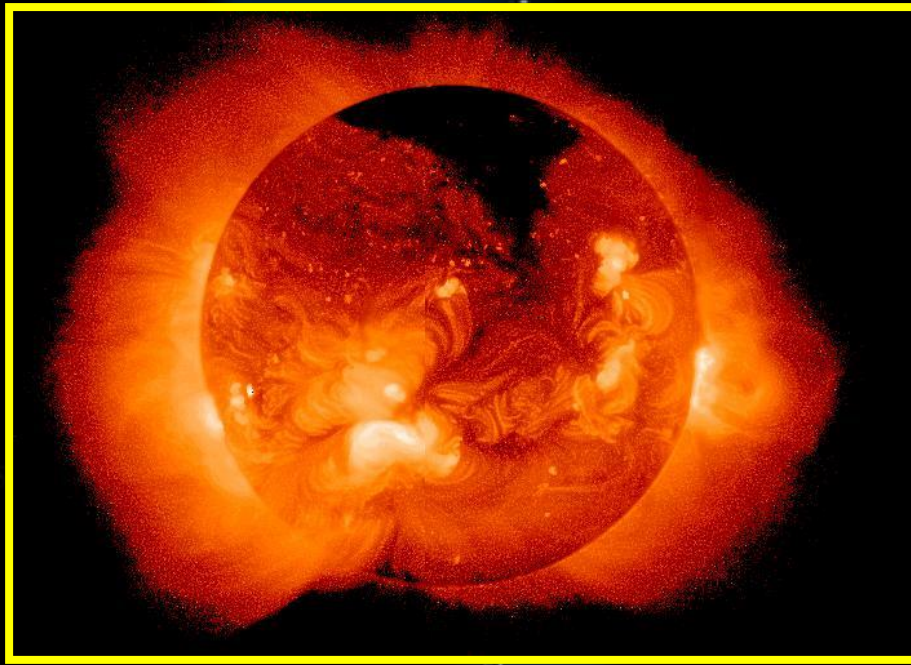
Zato je emisija energije gravitacionim sažimanjem dominantan mehanizam u ranim i poznim fazama evolucije zvezda, u vreme nastanka zvezde i u njenoj završnoj fazi evolucije.





Radioaktivnost kao izvor energije zvezda: Dž. Džins je smatrao da su u jezgri zvezda nepoznati transuranski elementi, koji se u radioaktivnom raspadu u potpunosti uništavaju pretvarajući se u "čistu" energiju. Takvi elementi ne bi mogli da budu dugo stabilni, a i nivo oslobođene energije pri radioaktivnom raspadu nije dovoljan da bi objasnio njihovu postojeću luminoznost. U spektrima zvezda nisu nađeni tragovi takvih elemenata.

Radioaktivnost nije dominantan izvor energije Sunca.



Fisija kao izvor energije na Suncu: Fisija je moćan izvor energije, mada ne toliko moćan za merenu luminoznost Sunca. Ima jedan veći problem: iako je Sunce zvezda druge ili treće generacije u njegovom spektru ni u tragovima nisu nađeni elementi koji bi bili fisioni učesnici.

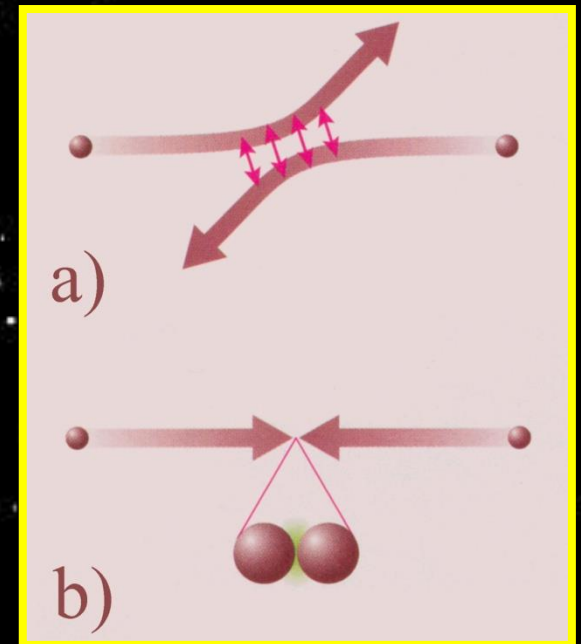
Definitivno, fisija nije izvor energije Sunca.

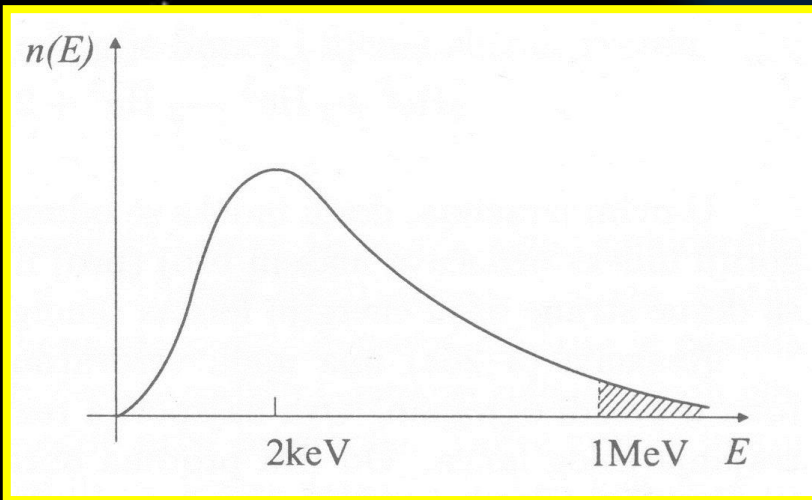


Pa dobro šta je onda?

Jedini mogući izvor energije, koji je u stanju da obezbedi izmerenu luminoznost Sunca je nuklearna fuzija.

Da bi došlo do fuzije lakših jezgara u teža, potrebno je da se nađu na rastojanjima manjim od 10^{-15}m , kada počinje da deluje privlačna jaka nuklearna sila. Na tako malim rastojanjima Kulonova odbojna sila je ogromna. Jedna od mogućnosti da se čestice toliko približe je da poseduju velike brzine (kinetičke energije).





Za fuziju dva protona potrebne su energije od 1MeV ($1\text{eV}=11600\text{K}$). Gas može da ima i niže temperature, ali tada manji broj čestica iz repa raspodele po brzinama učestvuje u fuziji.

Visoke temperature u unutrašnjosti zvezda obezbeđuju velike brzine čestica, a velike gustine veću verovatnoću za njihovo približavanje i odvijanje fuzije.

Visoka unutrašnja temperatura Sunca inicijalno je obezbeđena gravitacionom silom. Ona je posledica velike Sunčeve mase, koja sabija gas, zbog čega se on zagreva.

Procena srednje temperature u unutrašnjosti Sunca

Srednja kinetička energija:
$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} N \kappa \overline{T} = \frac{3}{2} \frac{M_S}{M_p} \kappa \overline{T}$$

gde je M_p – masa protona (uz pretpostavku da se Sunce sastoji samo od protona), κ – Bolcmanova konstanta.

Gravitaciona energija:
$$E_p \approx \gamma \frac{M_S^2}{R_S}$$

Korišćenjem **teoreme virijala**:
$$2\overline{E}_k + E_p \leq 0$$

za srednju temperaturu u unutrašnjosti Sunca dobija se $\overline{T} \approx 8 \cdot 10^6 K$. Ovo je t-ra dostignuta od sažimanja protosunca do danas. U središtu je viša, a na površini mnogo niža.

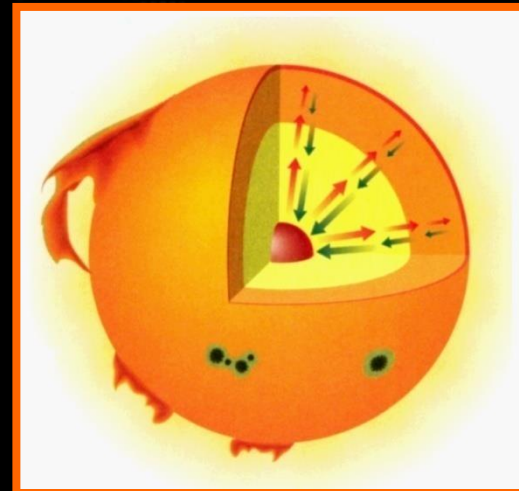
Polazeći od Edingtonovog modela zvezda, procena temperature i gustine solarne plazme, koje bi odgovarale nivou fuzionih reakcija neophodnih za savremenu produkciju energije i odgovarajuću luminoznost, R.L. Sirs (1964) je formulisao

Standardni model Sunca.

Model je pravljen za zvezde čija je starost 4.7 milijardi godina, sa masom, radijusom, sjajem i sastavom koji odgovaraju Suncu.

Pretpostavke:

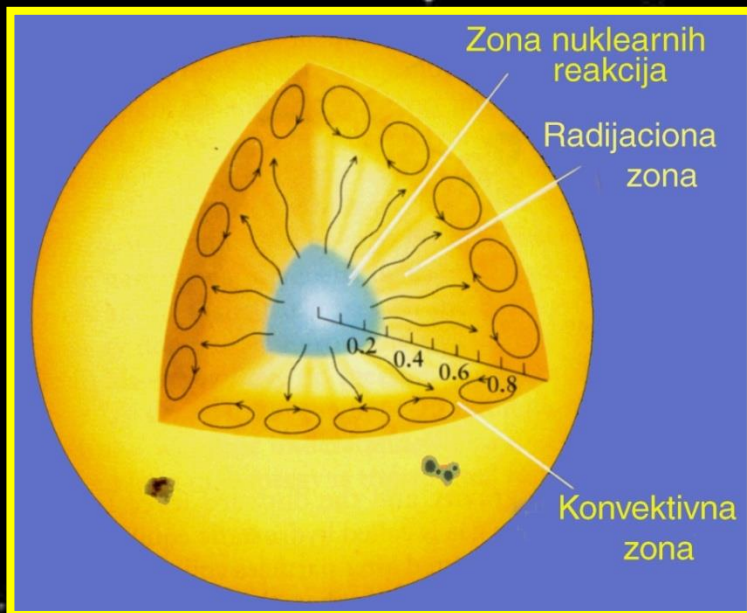
1. Sunce je sfernog oblika i u stanju je mehaničke ravnoteže. Ne rotira i nema magnetno polje.
2. U stanju je termodinamičke ravnoteže, uz male izmene entropije tokom evolucije
3. Promene hemijskog sastava uslovljene su fuzionim reakcijama $p-p$ lanca i CNO ciklusa.



4. Do mešanja Sunčeve supstance dolazi samo u konvektivnoj zoni.

5. Prvobitno Sunce bilo je homogeno i evoluiralo je bez promene ukupne mase tokom 4.7 milijardi godina.

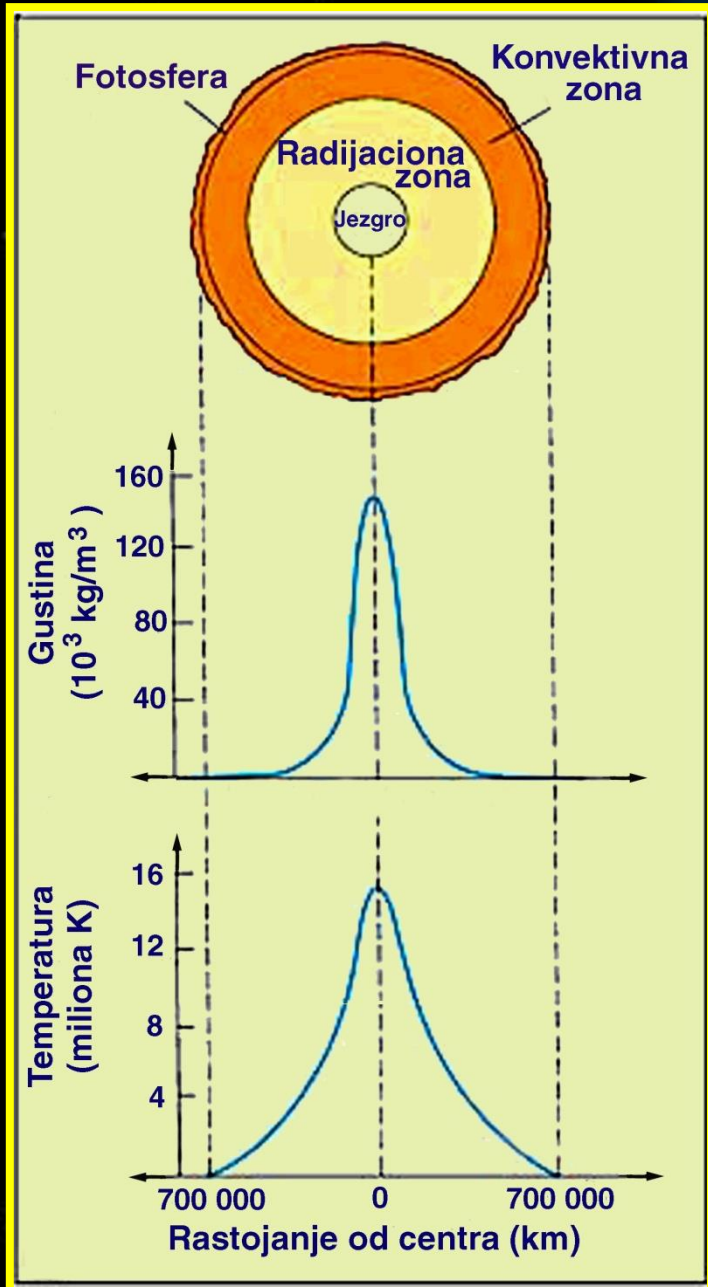
Zbog neusklađenosti uvedenih pretpostavki sa realnim i izmerenim podacima o Suncu model je pretrpeo modifikacije, ali je i danas aktuelan.



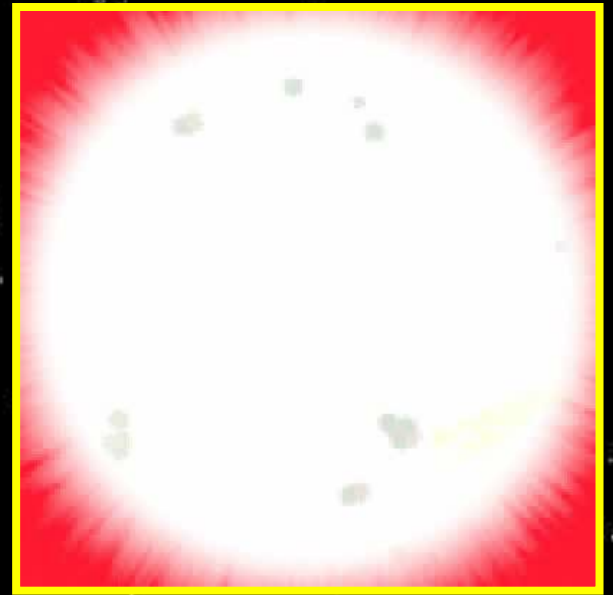
Prema Standardnom modelu unutrašnjost Sunca čine:

1. Jezgro (zona nuklearnih reakcija)
2. Radijaciona zona
3. Konvektivna zona

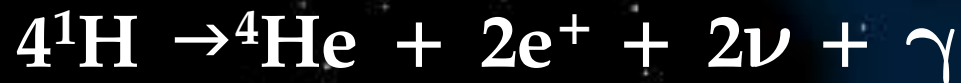
Prema modelu, u centru Sunca je temperatura 15 miliona K, gustina 150 000 kg/m³ i pritisak 35 000 Mbar.



Jezgro zauzima 1.6% zapremine Sunca (ne računajući njegovu atmosferu). U njemu se odvijaju fuzione reakcije u kojima se jezgra vodonika (protoni) pretvaraju u jezgra helijuma.



Konačan rezultat ovih reakcija je

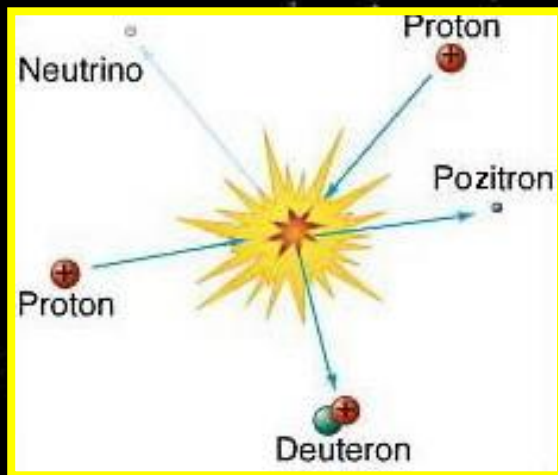


gde je e^+ pozitron, ν neutrino i γ gama kvant e.m. zračenja.

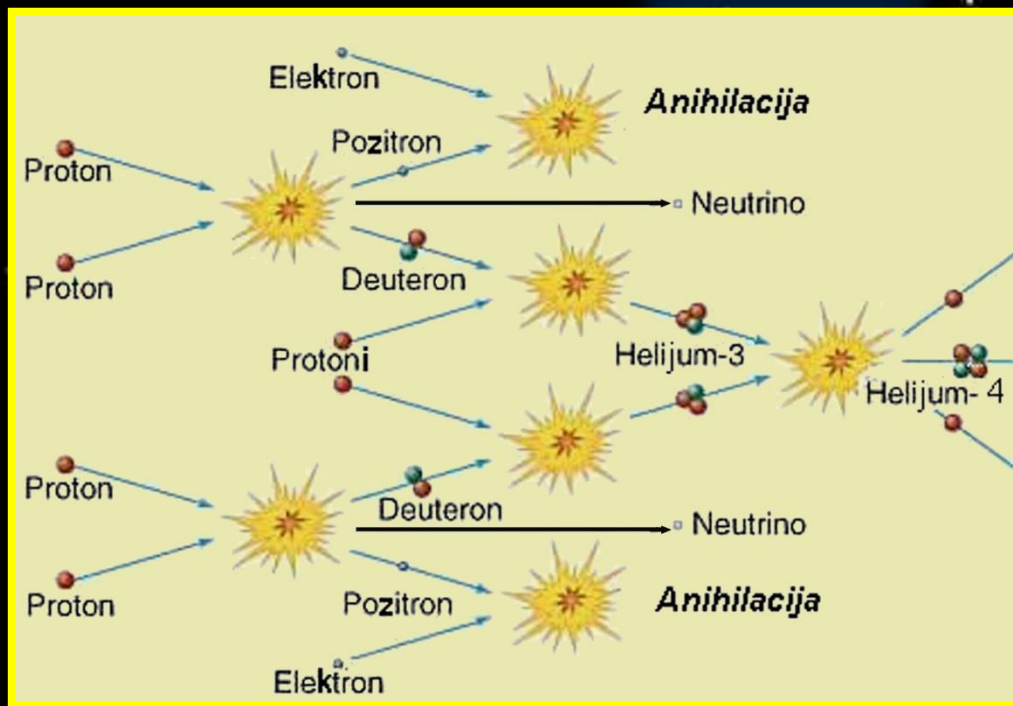


Masa 4 protona veća je od mase helijumovog jezgra. Javlja se **defekt mase** $\Delta M = 4M_p - M_{\text{He}}$, koji iznosi oko $0.048 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (oko 0.7% mase). Prema Ajnštajnovoj relaciji $E = \Delta M c^2$ to je ekvivalentno energiji $4.3 \times 10^{-12} \text{ J}$ (oko 27.6 MeV). Ova energija po jednom fuzionom aktu ne deluje kao mnogo velika, ali ne treba gubiti iz vida da svake sekunde na Suncu u nuklearnim reakcijama učestvuje $3.8 \cdot 10^{38}$ protona.

U odnosu na ukupan broj vodonikovih jezgara na Suncu ($8.7 \cdot 10^{56}$) broj fuzionih reakcija je relativno mali, ali ne treba gubiti iz vida da u reakcijama učestvuju samo protoni iz repa raspodele protona po brzinama.

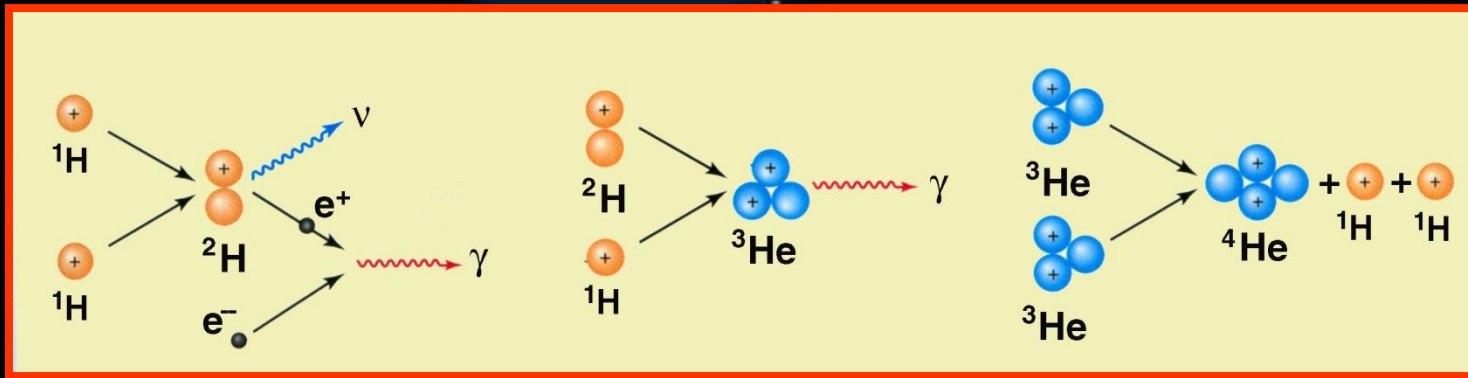


Interesantan detalj: kada bi Sunce "živelo" dok se svi protoni ne pretvore u helijum (što nije moguće) taj "životni vek" bi trajao oko 70 milijardi godina.



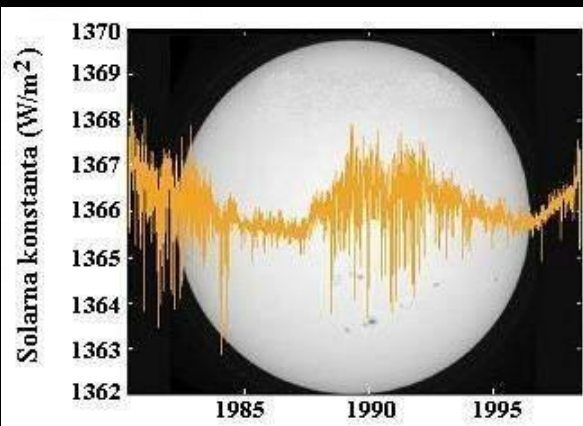
Za savremeni nivo luminoznosti, na Suncu svake sekunde oko 600 miliona tona vodonika pretvori se u 596 miliona tona helijuma. Preostala 4 miliona pretvara se u energiju tvrdog gama i rendgenskog zračenja i energiju neutrina.

Nastali fotoni kreću se ka "površini", apsorbuju se i reemituju, menjajući svoju talasnu dužinu i delom "grejući" Sunce, jer prilikom apsorpcije fotona deo njihove energije preuzimaju neutralni atomi ili joni. Put fotonske energije do fotosfere traje oko milion godina, tako da sada prispeli fotoni ne daju pravu informaciju o nivou fuzionih reakcija u jezgru.



Pozitroni nastali u reakcijama vrlo brzo anihiliraju sa prisutnim elektronima. Pri tom se u svakom aktu oslobodi energija od 1.02 MeV. Formirani neutrini, koji odnose oko 2% energije nastale u fuziji, neometano za oko 8 minuta stižu do Zemlje.

Od oslobođene energije samo dvomilijarditi deo dospeva do površine Zemlje. Na vrhu njene atmosfere snaga Sunčevog zračenja po m^2 iznosi oko 1367 W/m^2 (**solarna konstanta**). Merenjem solarne konstante možemo odrediti energiju e.m. zračenja koje napušta fotosferu Sunca.

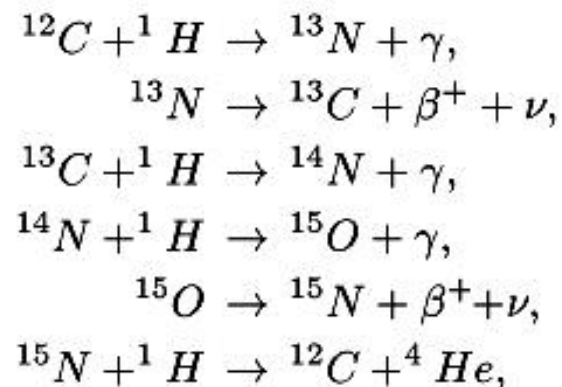


“Sagorevanje” vodonika u zvezdama odvija se preko dva tipa fuzionih reakcija:

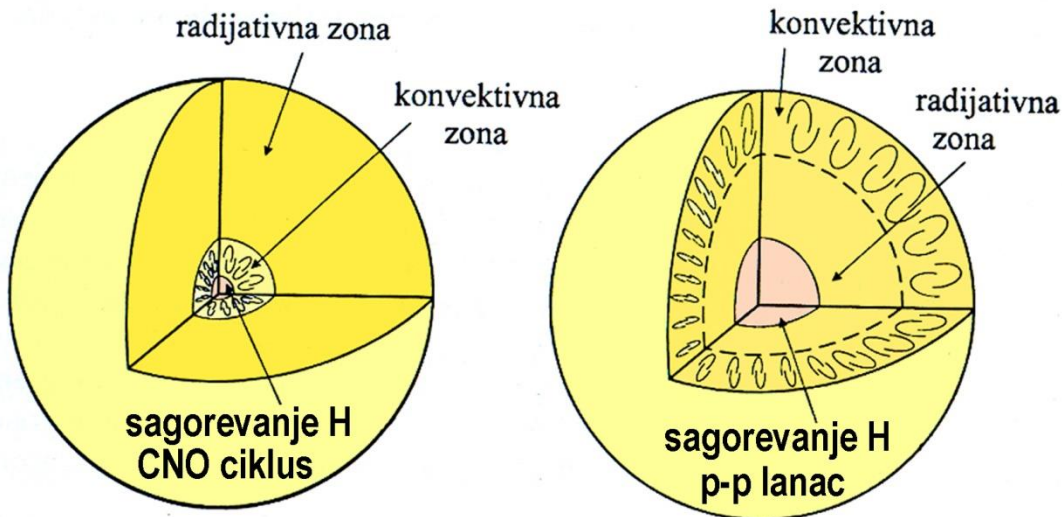
Proton–protonskog (*p–p*) lanca

${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e$	1.442 MeV	$E_{\nu \text{ max}} = 0.420 \text{ MeV}$
${}^1\text{H} + e^- + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{D} + \nu_e$	1.442 MeV	$E_{\nu} = 1.442 \text{ MeV}$
${}^2\text{D} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5.493 MeV	
(a) ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow 2 {}^1\text{H} + {}^4\text{He}$	12.859 MeV	
(b) ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	1.587 MeV	
(b1) ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	0.862 MeV	$E_{\nu} = 0.862 \text{ MeV (89.5%)}$
${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	17.346 MeV	$= 0.384 \text{ MeV (10.5%)}$
(b2) ${}^7\text{Be} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	0.135 MeV	
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	14.939 MeV	$E_{\nu \text{ max}} \approx 13.9 \text{ MeV}$
${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	3.132 MeV	

Ugljenično–azotnog (*Beteovog, CNO*) ciklusa



Konačan rezultat oba tipa procesa je isti. Proton–protonski je najefikasniji na t–rama oko 15 miliona K i pri gustinama 100 000 kg/m³. Na Suncu je on verovatniji jer je potrebno savladati relativno manje kulonovske barijere i u njega su uključeni protoni, koji su najzastupljeniji u Suncu. Zbog prisustva težih elemenata kao katalizatora (kojih je na Suncu malo) *CNO* ciklus je najefikasniji na višim t–rama (oko 20 miliona K). Za takve temperature potrebno je da zvezda bude masivnija.

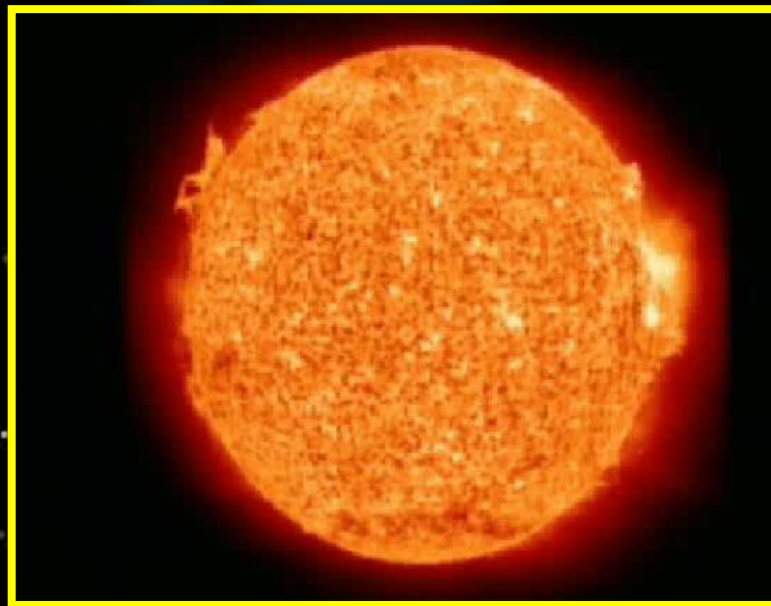


Zvezde velikih masa

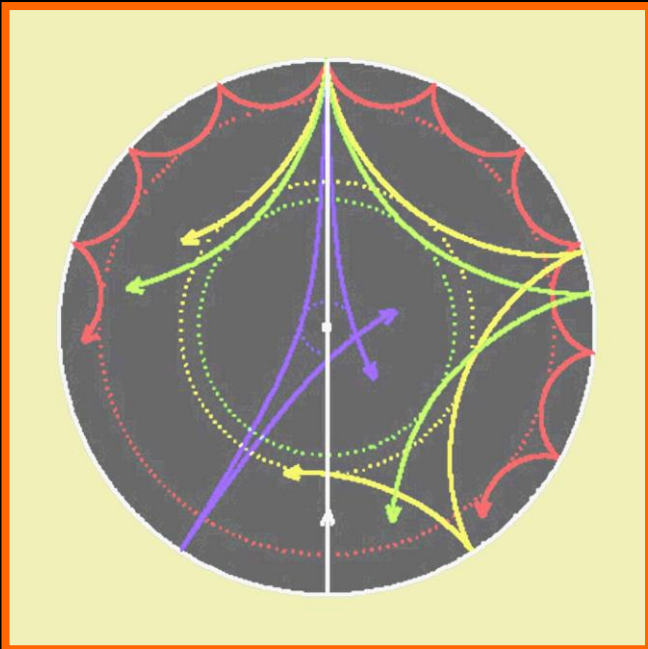
Zvezde malih masa

Zato je *p–p* lanac efikasniji kod zvezda manjih masa, a *CNO* ciklus kod masivnijih zvezda.

Prema Standardnom modelu oko 98.2% oslobođene energije potiče od $p-p$, a 1.8% od CNO procesa. Iz odgovarajućih procesa, oko 2% energije odnose neutrini iz $p-p$, a oko 7% iz CNO .



Provera valjanosti Standardnog modela ne može se obaviti na osnovu e.m. zračenja sa Sunca. U obliku u kojem dospeva do nas ono potiče iz fotosfere. Ona je prozirna do 300 km u "dubinu", pa zračenje sa nje daje informaciju samo o luminoznosti, a ne i o strukturi i tipu procesa u unutrašnjosti.



Potpuniju informaciju o unutrašnjoj građi Sunca pruža **helioseizmologija**. Strukturu, sastav i dinamiku unutrašnjosti Sunca ona proučava analizom i praćenjem talasa na njegovoj "površini". Poznato je da Sunce vibrira poput gonga, zbog postojanja ogromnog broja talasnih moda, koje nastaju na različitim mestima u vertikalnoj strukturi njegove unutrašnjosti. Najpoznatije su "petominutne oscilacije", nastale superpozicijom velikog broja moda (Lejton, 1960). Ovi procesi se stalno prate (GONG, SOHO,...).

Helioseizmologija je u velikoj meri potvrdila ispravnost Standardnog modela Sunca.

Jedinu pravu informaciju o unutrašnjosti Sunca nose neutriini koji nastaju u fuzionim procesima. Detekcijom njihovog fluksa može se utvrditi tip fuzionih reakcija, temperatura i gustina u središtu Sunca, hemijski sastav jezgra, itd. Proračuni pokazuju da promena t -re od 1% dovodi do promene od 30% u broju emitovanih neutrina, a 3% rezultira do promene broja neutrina sa faktorom 2.

Neutrino (mali neutron) – laka (možda bez mase) elektroneutralna čestica sa spinom $1/2$. Teorijski ga je predvideo Pauli (1930) u kontekstu rešavanja problema β -raspada, ime mu je dao Fermi. Eksperimentalno ga je registrovao Frederik Rejns 1956. godine, zašta je 1995. godine dobio nobelovu nagradu. Spada u leptonske čestice, a po statističkim svojstvima u fermione. Javlja se u tri modaliteta: elektronski, mionski i tau sa odgovarajućim antičesticama. Ima veliku prodornu moć pri niskim energijama i brzi rast preseka interakcije sa rastom njegove energije.

U Vasioni se javlja često kao i foton. Nastaje pri transformaciji jezgara i u raspadima čestica. Pri tom, bez gubitaka energije napušta izvor

Neutrino interaguje slabom interakcijom. Zato mu je dužina slobodnog puta pri energiji od 1MeV oko 100 s.g. kroz olovo. Za njega je materija praktično prozirna. Npr. presek za interakciju fotona je $10^{-16} - 10^{-24} \text{ cm}^2$, a kod neutrina za sudar sa neutronima 10^{-44} cm^2 .

Prema Standardnom modelu svake sekunde u Suncu nastane 1.38×10^{38} elektronskih neutrina, a od toga na Zemlju dospe $(6.5-8.6) \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$. Njihovom detekcijom proverila bi se ispravnost Standardnog modela. Problem detekcije je što on vrlo slabo reaguje sa materijom. Smatra se da ga u Kosmosu ima jako mnogo, poput fotona. Dugo se tvrdilo da je njegova masa mirovanja jednaka nuli, ali ukoliko bi ona bila različita od nule mnogi autori su smatrali da, zbog njihovog ogromnog broja, mogu da razreše kosmološko pitanje da li je Kosmos otvoren ili zatvoren.

Postoje dva fundamentalna načina za detekciju neutrina: rasejavanjem neutrina na nukleonima ili na elektronima. Kod rasejavanja na neutronu proizvodi se par proton–elektron, pri čemu se elektroni detektuju preko x – zračenja ili detekcijom brzih elektrona preko Čerenkovljevog efekta.

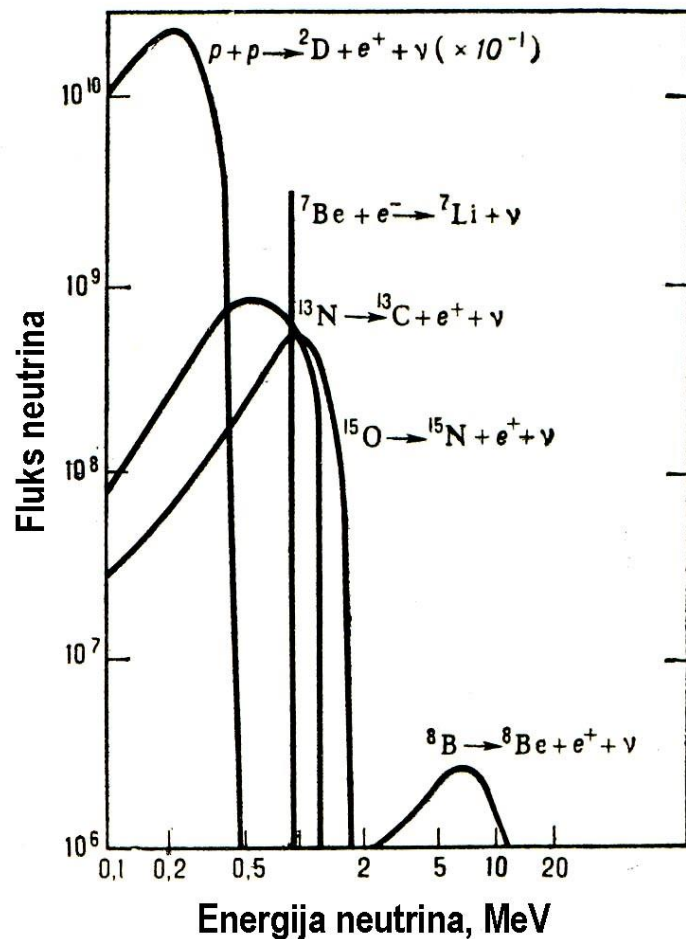


Drugi metod zasniva se na rasejanju na elektronima, kada dolazi do njihovog ubrzavanja i Čerenkovljevog efekta, koji se detektuje

Do sada je postavljeno šest jako preciznih (i skupih) eksperimenata za detekciju solarnih neutrina.

- a) Radiohemijski: **Homestake** (hlorni), **GALLEX** (galijumski), **SAGE** (galijumski)
- b) **Kamiokande**, **Super–Kamiokande** i **Sudbury (SNO)** – zasnovanih na merenju energije elektrona nastalih u interakciji neutrina sa vodom .

U ovim eksperimentima se detektuju neutrini sa različitim pragovima energije, pri čemu neutrini iz različitih reakcija imaju različite energetske spektre.



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

Homestake

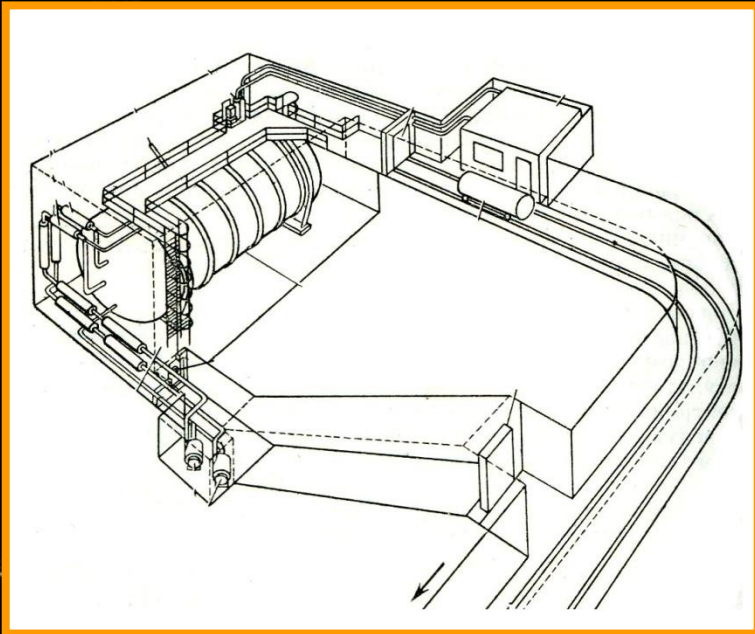
Zasnovan na inverznoj β koju je predložio Bruno Pontekorvo:



Za eksperiment su potrebne ogromne količine hlora.

Brookhaven National Laboratory u Homestake rudniku (Južna Dakota) 1967. g. na dubini od 1600 m postavila je čelični tank (6x15) m sa 3785 m³ perhloretilena (C₂Cl₄). Eksperimentom

rukovodio Rejmond Dejvis. U reakciji se dobijao radioaktivni argon sa poperiodom od 35 dana. Da bi se dovukao do brojnih detektora rezervoar je prodivavan tečnim helijumom. Argon i helijum su razdvajani aktivnim ugljem na -196 °C.



Radioaktivni argon detektovan je proporcionalnim brojačima. Ekspozicija je vršena sto dana.

Proračuni su pokazali da je trebalo da se detektuje 1 atom argona (neutrino) dnevno. **Detektovano je 3–6 puta manje neutrina od broja predviđenog standardnim modelom.**

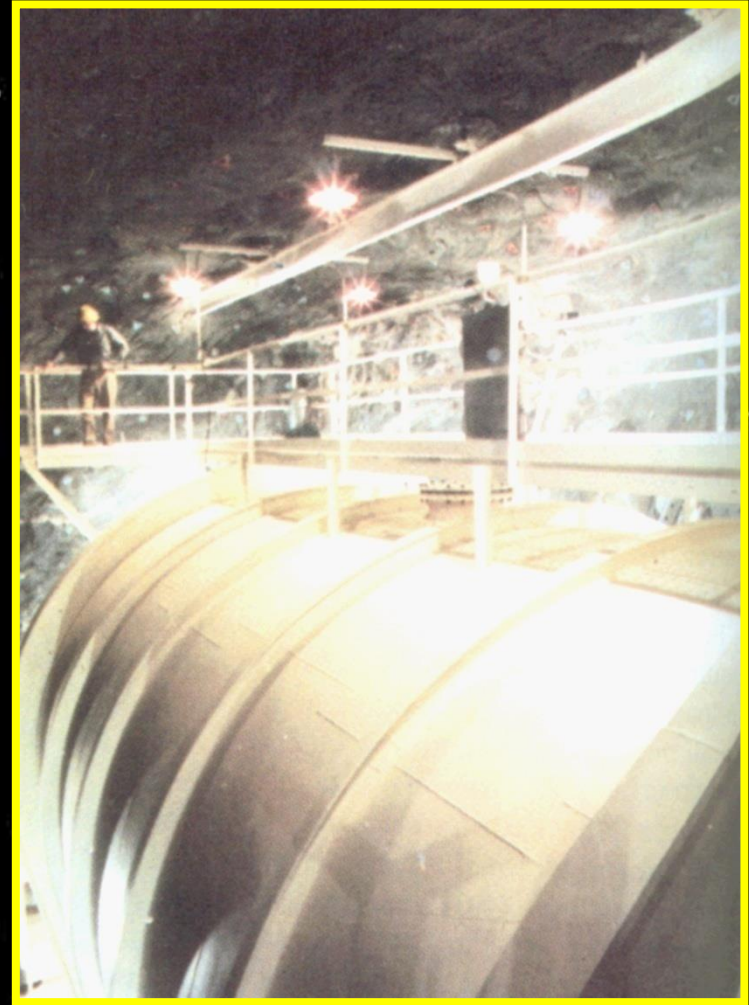


Možda su detektori nedovoljno osetljivi? Možda je bilo primesa? Veliki je problem izdvajanja malih količina argona u ogromnoj masi mete. Možda fon kosmičkih i atmosferskih neutrina nije eliminisan? Možda teorijski model eksperimenta nije dobar?



Eksperiment je nekoliko puta ponavljan. Rezultati su manje-više bili isto deprimirajući.

Možda teorijski model Sunca nije dobar? On je korigovan tako što je uzeto da je temperatura u centru Sunca 13.5 miliona K. Ali helioseizmička istraživanja potvrđuju da je ona 15 miliona K. Osim toga, niža temperatura u jezgru Sunca znači i niži nivo fuzije, manje neutrina, ali i manju luminoznost od merene. **Nešto tu nije bilo u redu!**



Možda se sa neutrinima na putu od jezgra Sunca do Zemlje događalo nešto što fizičari nisu znali!?

Energetski prag za detekcionu reakciju u ovom eksperimentu bio je 0.814 MeV. To znači da su mogli biti detektovani samo neutriini iz ${}^7\text{Be}$ i ${}^8\text{B}$ fuzionoj grani. Nedostajali su neutriini koji su imali niže energije od praga iz početnih fuzionih reakcija oba procesa. Prosečna energija neutrina je 0.26 MeV.

Trebalo je tragati za novim eksperimentima, uz dužno poštovanje pionirskom poduhvatu.

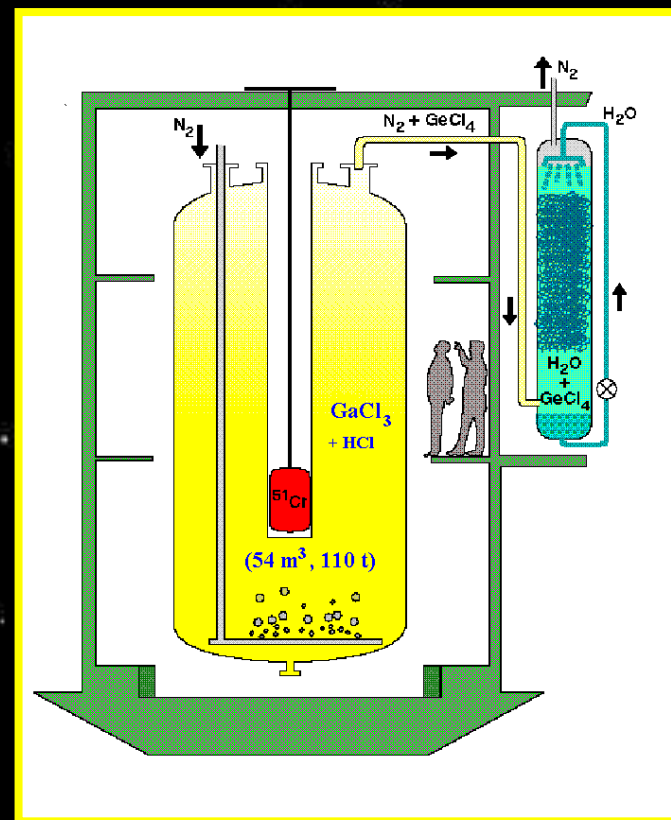
GALLEX i SAGE

Bazirani na reakciji: ${}^{71}\text{Ga} + \nu \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^{-}$

Prag reakcije je 0.233 MeV.

GALLEX–međunarodni projekat (Francuska, Nemačka, Italija, Izrael, Poljska I SAD). U podzemnoj italijanskoj stanici Gran Sasso (LNGS) na visini od 2912m.

Eksperimentom rukovodio T. Kirsten (Hajdelberg, Nemačka). Meta sadrži 30.3t skupog galijuma u 110t galijum–hlorida. Germanijum hemijski ekstrahovan i transformisan u obliku radioaktivnog GeCl_4 . Detekcija je vršena proporcionalnim brojačem.

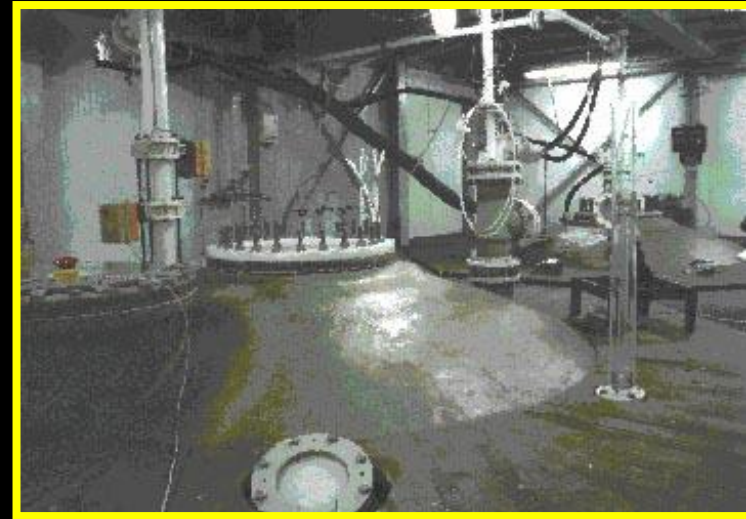


Eksperiment je funkcionisao od 1991. do 1997. g. Za to vreme bio je dva puta kalibrisan. Obavio je 65 "solarnih ekstrakcija".

Detektovao je skoro dva puta manje neutrina od teorijskih predviđanja. Izmerio je 77.5 SNU, a model predviđa između 125 i 140 SNU.

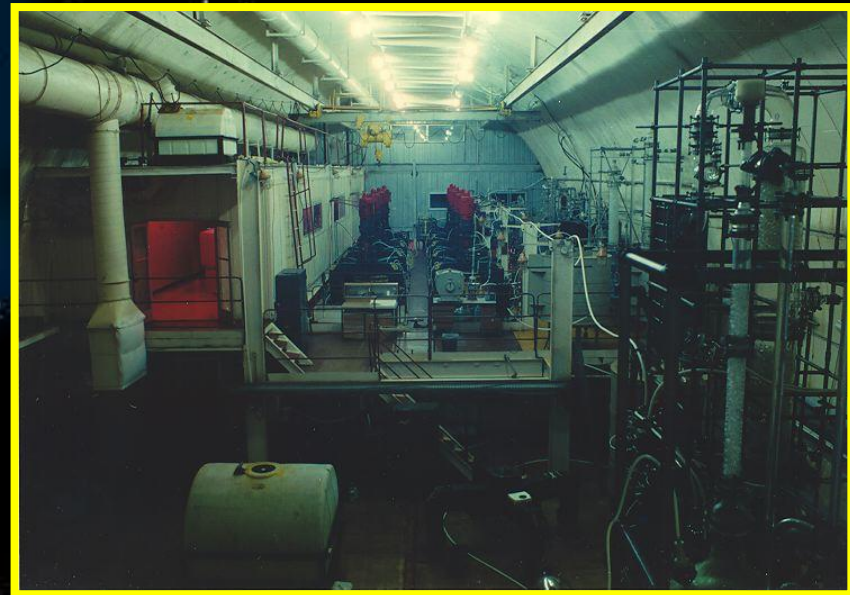
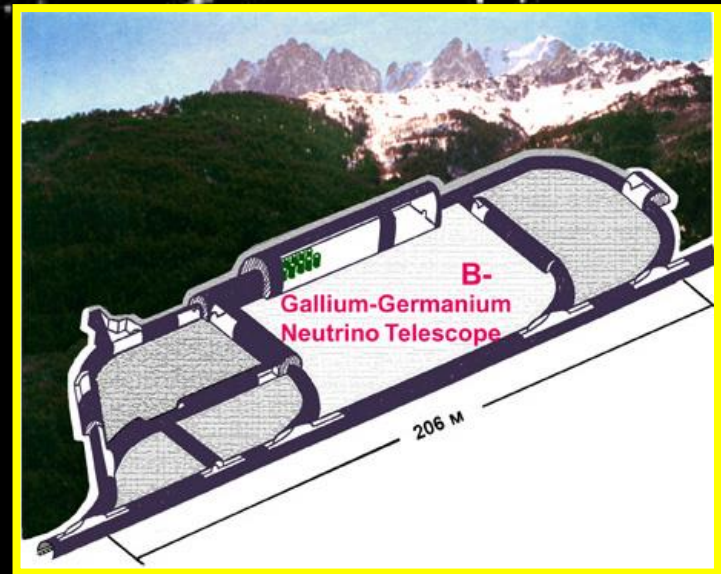
1 SNU (Solar Neutrino Units) – 10^{-36} zahvata neutrina u 1s po atomu mete, odnosno 1 reakcija neutrina u 1s na 10^{36} atoma mete.

SAGE–rusko–američki eksperiment. Uređaj je postavljen u Bakšan neutrinskoj opservatoriji na severnom Kavkazu. Eksperimentom je rukovodio Vladimir Gavrin.



Od 1990. do 2000. g. obavljeno je skoro 100 merenja neutrinskog fluksa. Germanijum se hemijski ekstrahovao iz mete sa 50 metričkih tona metalnog galijuma. Uzorci germanijumskog gasa bili su pomešani sa ksenonom. **Eksperiment je ukazivao na "oscilovanje" neutrina.**

KURIOZITET: 1986. godine u Jugoslaviji je bio pripremljen projekat LOREX. Trebalo je da bude uključeno preko 20 institucija iz Nemačke, Austrije, Švajcarske, Kanade, SSSR.

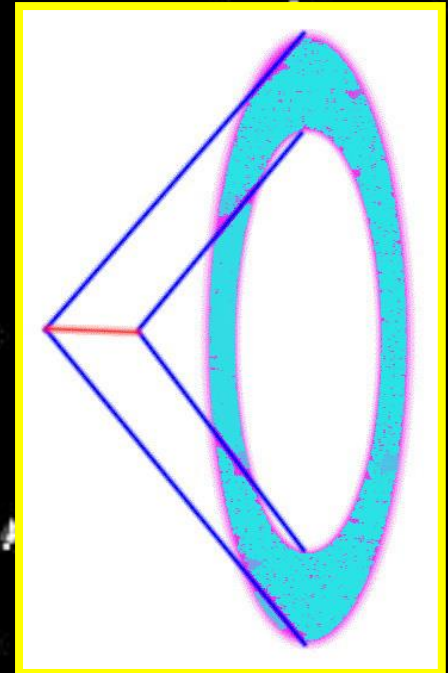
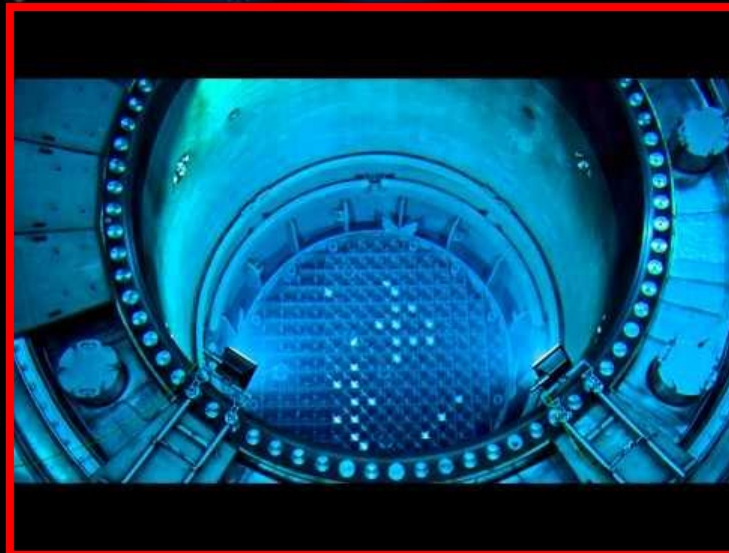
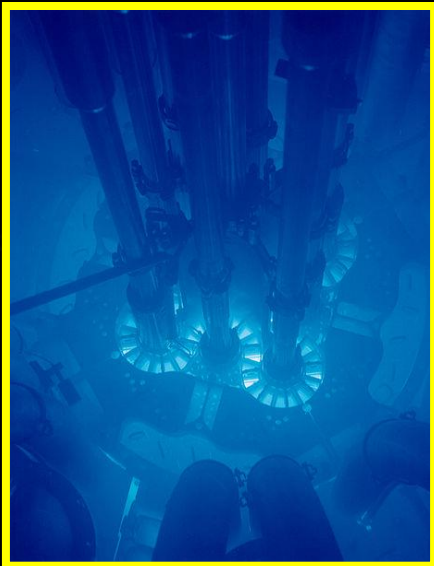


Detekcija bi se zasnivala na reakciji: $^{205}\text{Tl} + \nu \rightarrow ^{205}\text{Pb} + e^-$

Projektom je trebalo da rukovodi M.Fridman. Na planini Kožuf u Makedoniji otkriveno je ležište Alšar sa ogromnim količinama lorandita, minerala talijuma (TlAsS_2). Eksperiment nije realizovan.

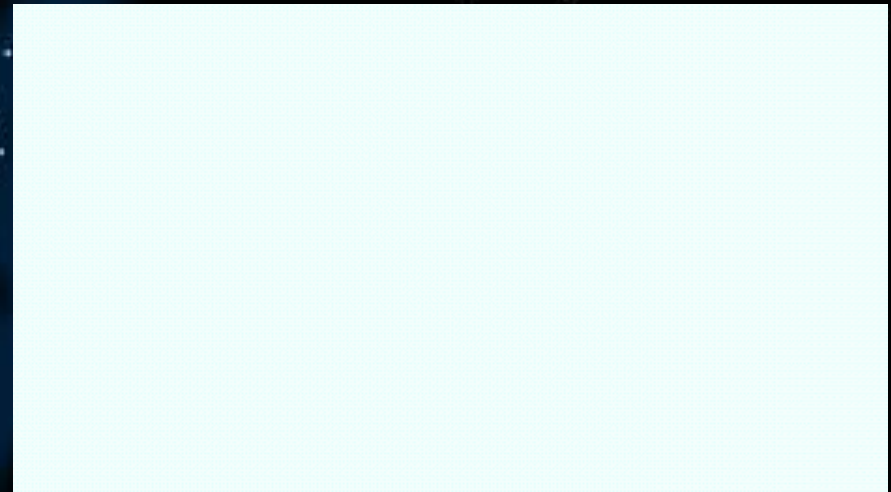
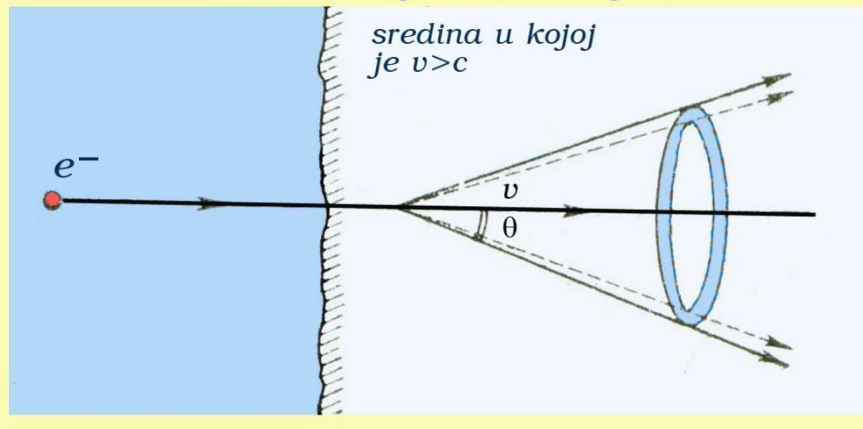
Kamiokande i Super-Kamiokande

Baziraju se na detekciji Čerenkovljevog zračenja, koje emituju elektroni nakon interakcije neutrina sa protonima u vodi.

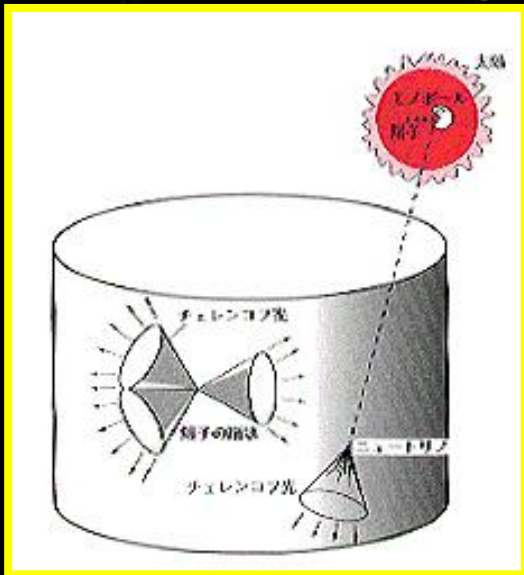


Čerenkovljevo zračenje – pojava emisije plavičastog sijanja ispred, u smeru kretanja, čestice koja se kreće brže od svetlosti u posmatranoj sredini (npr. vodi). Svetlost je u formi konusa i polarizovana je. Sjaj ne zavisi od hem. sastava, temperature.

Čerenkovljevo zračenje



Kamiokande—startovao 1983. godine. 1987. g. merio kosmičke neutrine pri eksploziji supernove SN1987 u Velikom Magelanovom oblaku. Detektor sa 2140 t čiste vode bio je smešten u rudniku cinka Kamioka Mozumi u japanskim Alpima. Projektom je rukovodio Masatoši Košiba.



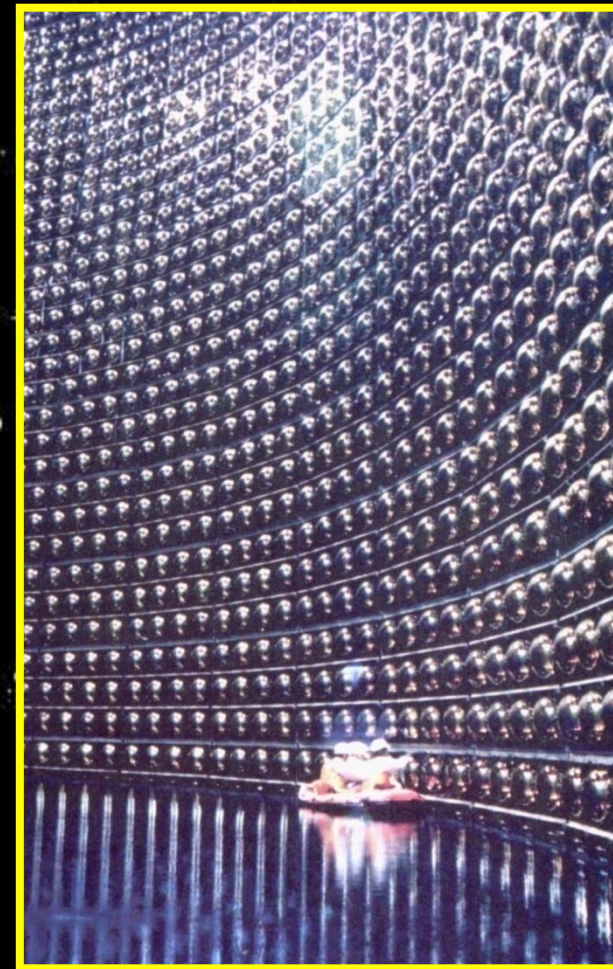
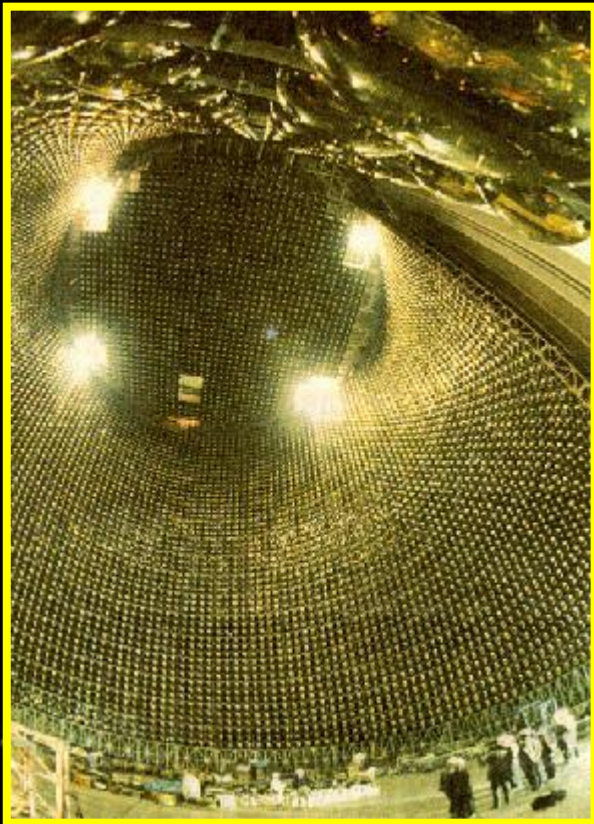
Pojedini rezultati bili su depresivniji od Dejvisovih.



Košiba je sa Dejvisom za ova istraživanja dobio Nobelovu nagradu za fiziku.

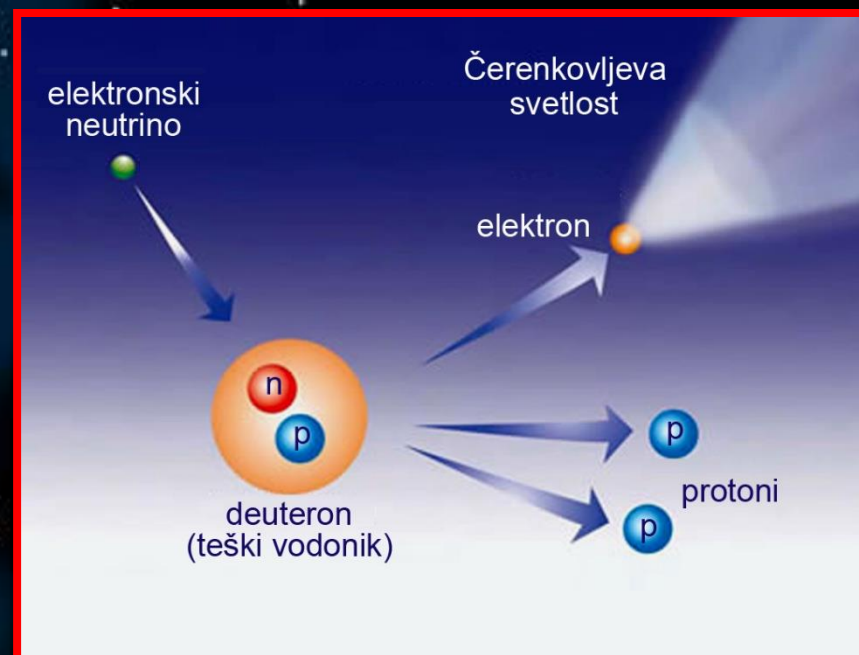
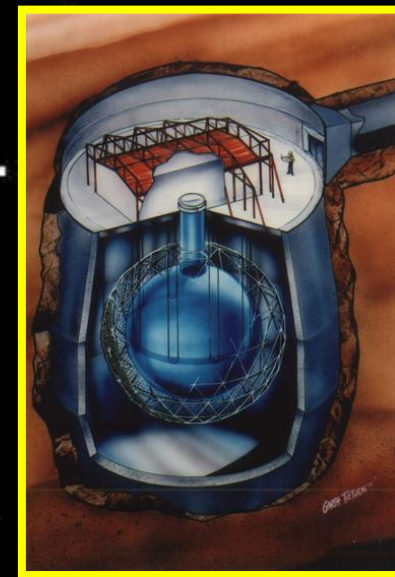
Super-Kamiokande—mnogo precizniji od svog prethodnika. Postao operativan 1996. g. Prvobitna namena mu je provera Teorije velike unifikacije polja. Fantastično je osetljiv i precizan (kao kada bi se sa Zemlje detektovala upaljena sveća na Mesecu). Energetski prag detekcije je 5 MeV. U cilindru 41.4x39.3 m, 1 km ispod Zemlje smešteno je 50 000 t čiste vode.

Tank sa spoljašnje strane ima 11 146 detektora–kolektora svetlosti dijametra 50 cm (foto–multiplikatorske cevi). Može da detektuje čak i 1 foton. Koštao je oko 90 miliona dolara. 2001. godine pretpeo je havariju, ali je sada ponovo u funkciji.



Detektuje sve tri vrste neutrina. Osim brzine, određuje i pravac kretanja čestica. Pokazao je dobro podudaranje merenja sa teorijskim predviđanjima.

Sudbury Neutrino Observatory – kanadski, američki i britanski eksperiment u rudniku nikla u Ontariju, 2 km ispod tla. Rezervoar sadrži 1000 t teške vode (D_2O). Voda je smeštena u čeličnu strukturu sa 10 000 fotomultiplikatorskih cevi. Spolja je kontejner sa običnom vodom. Eksperiment funkcioniše od juna 2001. g. pod rukovodstvom A. Mekdonalda.





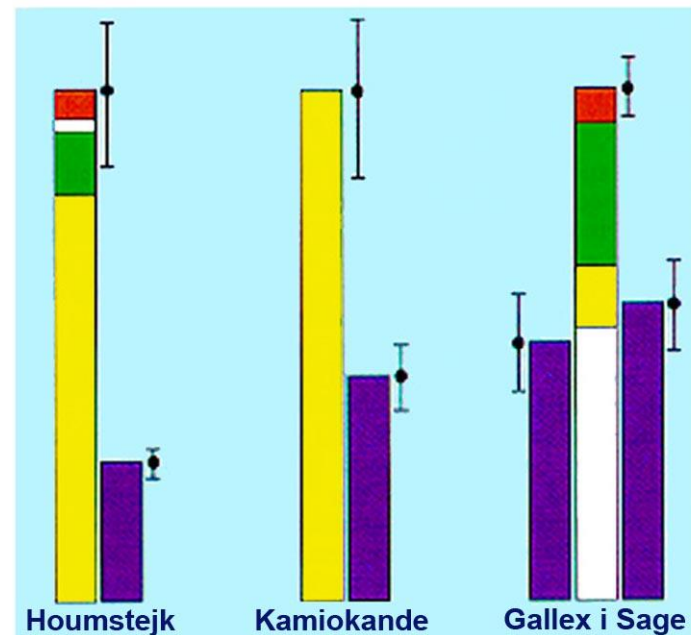
Uređaj detektuje mionske i tau neutrine.

U kombinaciji sa rezultatima u Super-Kamiokande eksperimentu uočljivo je približavanje rezultata predviđanjima Standardnog modela.



Razlike u odnosu na model različito su tumačene. Po jednom shvatanju (Fauler, Ezer, Kamerun, Sakurai) usled nestabilnosti, na svakih 100 miliona godina dolazi do mešanja materije u Suncu. To dovodi do širenja jezgra i pada temperature u njemu, a time i smanjenja nivoa fuzionih reakcija i manjeg broja oslobođenih neutrina. Takva stanja traju po desetak miliona godina. Po ovim autorima danas je Sunce upravo u takvom stanju. Tom stanju odgovara detektovan broj neutrina, dok luminoznost odgovara zračenju iz vremena kada je Sunce bilo u normalnoj fazi.

Komparacija teorijskih predviđanja i merenih vrednosti



Ljubičastom bojom označene su merene vrednosti

Poslednji eksperimenti potvrđuju ideju Pontekorva (1957.), da neutrimi "osciluju" –transformišu se iz jednog u drugo stanje (elektronski u mionski ili antineutrino) (efekat Smirnova–Mihejeva–Volkenštajna). Time se otklanja sumnja u Standardni model Sunca, koji je potvrđen brojnim kompjuterskim simulacijama i njihovom saglasnošću sa posmatračkim podacima.

Neutrini mogu da "osciluju" između svojih stanja jedino ako je njihova masa mirovanja različita od nule. Procene masa ovih čestica u literaturi su različite, ali sama činjenica o njihovoj nenuljoj masi uticaće bitno na kosmološke teorije. Možda baš u neutrinima leži skrivena masa koja će zaustaviti širenje Vasiona, premda novija merenja pokazuju da se njeno širenje ubrzava.

Neutrini
u standardnom modelu

Fermion	Simbol	masa
Generacija 1 (elektron)		
Elektronski neutrino	ν_e	< 2.5 eV
Elektronski antineutrino	$\bar{\nu}_e$	< 2.5 eV
Generacija 2 (muon)		
Mionski neutrino	ν_μ	< 170 keV
Mionski antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$	< 170 keV
Generacija 3 (tau)		
Tau neutrino	ν_τ	< 18 MeV
Tau antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$	< 18 MeV

Autor ovog predavanja je za poslednjih tridestak godina nekoliko puta pratio "najnovija" saznanja da je masa neutrina različita od nule. Nedugo potom o tim saznanjima se više nije govorilo. Nadajmo se da će eksperimenti sa solarnim neutrinima konačno utvrditi pravu istinu.

Ovo je bilo predavanje prof. Gajića!



Hvala na pažnji!

