

Saule: 1. daļa

Astronomija un astrofizika, kurss 3F studentiem, 2009

Ilgonis Vilks un Dmitrijs Docenko

September 17, 2009

Lekcijas plāns

- 1 Vispārīgie dati
- 2 Optiskie novērojumi
 - Saules izskats redzamā gaismā
 - Saules aktivitātes optiskās izpausmes
 - Saules optiskais spektrs
 - Vienkāršākās interpretācijas
- 3 Saules enerģijas avots
 - Gravitācijas saspiešanās?
 - Kodolreakcijas?
 - Alternatīvie varianti
 - Kodolreakcijas kā Saules enerģijas avots

Outline

- 1 Vispārīgie dati
- 2 Optiskie novērojumi
 - Saules izskats redzamā gaismā
 - Saules aktivitātes optiskās izpausmes
 - Saules optiskais spektrs
 - Vienkāršākās interpretācijas
- 3 Saules enerģijas avots
 - Gravitācijas saspiešanās?
 - Kodolreakcijas?
 - Alternatīvie varianti
 - Kodolreakcijas kā Saules enerģijas avots

Saules diametrs

- Vidējais attālums no Zemes līdz Saulei: $r = 149.6$ milj. km
 - Astronomiskās vienības (a.v., u.a.) *definīcija*
- Saules vidējais leņķiskais diametrs, skatoties no Zemes:
 $\alpha = 32'$
- Gada ilgums (viens apgrieziena ap Sauli): $T_{\oplus} = 365.256$ dienas
- Saules diametrs ir $D_{\odot} = \alpha r = 1.392$ milj. km.
 - Salīdzinājumam, Zemes diametrs ir ap 0.012 milj. km.
- Zemes orbitāls ātrums ir $v_{\oplus} = 2\pi r / T_{\oplus} = 29.8$ km/s.

Saules diametrs

- Vidējais attālums no Zemes līdz Saulei: $r = 149.6$ milj. km
 - Astronomiskās vienības (a.v., u.a.) *definīcija*
- Saules vidējais leņķiskais diametrs, skatoties no Zemes:
 $\alpha = 32'$
- Gada ilgums (viens apgrieziens ap Sauli): $T_{\oplus} = 365.256$ dienas
- Saules diametrs ir $D_{\odot} = \alpha r = 1.392$ milj. km.
 - Salīdzinājumam, Zemes diametrs ir ap 0.012 milj. km.
- Zemes orbitāls ātrums ir $v_{\oplus} = 2\pi r / T_{\oplus} = 29.8$ km/s.

Saules masa

- Zemes orbīta ir tuva riņķveida, tātad spēkā ir līdzsvars:

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v_{\oplus}^2}{r}.$$

- Šeit r ir attālums no masas centra. Tā kā Saules masa ir daudz lielāka par Zemes masu, tad var neievērot attālumu starp Sauli un Zemes orbītas centru.
- No tā izsakām Saules masu: $M_{\odot} = v_{\oplus}^2 r / G = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$.
- Zinot masu un izmēru, izrēķinām vidējo blīvumu:

$$\rho_{\odot} = M_{\odot} / \left(\frac{1}{6} \pi D_{\odot}^3 \right) = 1.420 \text{ g/cm}^3.$$

Saules masa

- Zemes orbīta ir tuva riņķveida, tātad spēkā ir līdzsvars:

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v_{\oplus}^2}{r}.$$

- Šeit r ir attālums no masas centra. Tā kā Saules masa ir daudz lielāka par Zemes masu, tad var neievērot attālumu starp Sauli un Zemes orbītas centru.
- No tā izsakām Saules masu: $M_{\odot} = v_{\oplus}^2 r / G = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$.
- Zinot masu un izmēru, izrēķinām vidējo blīvumu:

$$\rho_{\odot} = M_{\odot} / \left(\frac{1}{6} \pi D_{\odot}^3 \right) = 1.420 \text{ g/cm}^3.$$

Saules starjaua

- Solārkonstante ir ap $k_{\odot} = 1370 \text{ W/m}^2$.
 - *Definīcija*: Saules starojuma enerģija, kas ārpus Zemes atmosfēras tuvu Zemei krīt laika vienībā uz laukuma vienību, kura normāle ir vērsta uz Sauli.
 - Atmosfēra daļēji absorbē un atstaro Saules starojumu. Zemes virsmu sasniedz ap 1 kW/m^2 .
- Tātad, Saules starjaua ir $L_{\odot} = 4\pi r^2 k_{\odot} = 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$.
- **Efektīvā** virsmas temperatūra T_{eff}
 - *Definīcija*: Tāda absolūti melnā ķermeņa temperatūra, kura katra laukuma vienība izstaro tikpat daudz enerģijas, kā dotam ķermenim.
 - Nosakāma no izteiksmes $T = \sqrt[4]{L_{\odot} / (\pi D_{\odot}^2 \sigma)} = 5780 \text{ K}$.

Zemes līdzsvara temperatūra

- Zeme saņem no Saules tikpat daudz enerģijas, cik izstaro kosmosā.
- Pieņemot Zemi par absolūti melno ķermeni ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$) un ņemot vērā ka $\alpha = 30\%$ no Saules enerģijas tiek atstarota, izrēķināsim tās līdzsvara temperatūru!
- $k_{\odot} \pi R_{\oplus}^2 (1 - \alpha) = \sigma T_{\oplus,eqil}^4 \cdot 4\pi R_{\oplus}^2$
- $T_{\oplus,eqil} = \sqrt[4]{k_{\odot} (1 - \alpha) / 4\sigma} = 256 \text{ K}$, t.i. ap -17 C .
- Reāli vidējā Zemes temperatūra ir ap 15 C !
 - Atšķirība ir tā sauktā “siltumnīcas efekta” dēļ.

Zemes līdzsvara temperatūra

- Zeme saņem no Saules tikpat daudz enerģijas, cik izstaro kosmosā.
- Pieņemot Zemi par absolūti melno ķermeni ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) un ņemot vērā ka $\alpha = 30\%$ no Saules enerģijas tiek atstarota, izrēķināsim tās līdzsvara temperatūru!
- $k_{\odot} \pi R_{\oplus}^2 (1 - \alpha) = \sigma T_{\oplus,eqil}^4 \cdot 4\pi R_{\oplus}^2$
- $T_{\oplus,eqil} = \sqrt[4]{k_{\odot} (1 - \alpha) / 4\sigma} = 256 \text{ K}$, t.i. ap -17 C.
- Reāli vidējā Zemes temperatūra ir ap 15 C !
 - Atšķirība ir tā sauktā “siltumnīcas efekta” dēļ.

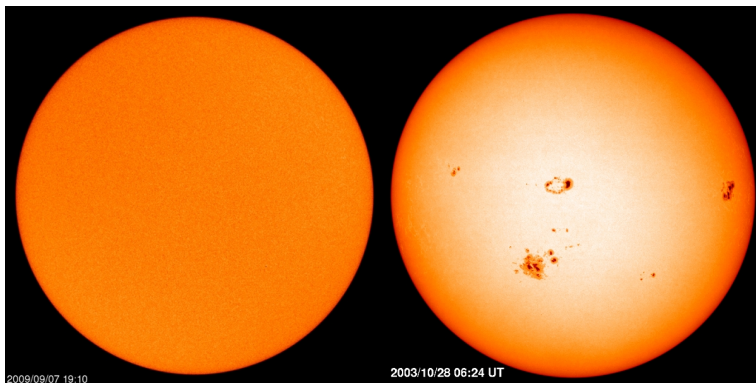
Zemes līdzsvara temperatūra

- Zeme saņem no Saules tikpat daudz enerģijas, cik izstaro kosmosā.
- Pieņemot Zemi par absolūti melno ķermeni ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$) un ņemot vērā ka $\alpha = 30\%$ no Saules enerģijas tiek atstarota, izrēķināsim tās līdzsvara temperatūru!
- $k_{\odot} \pi R_{\oplus}^2 (1 - \alpha) = \sigma T_{\oplus,eqil}^4 \cdot 4\pi R_{\oplus}^2$
- $T_{\oplus,eqil} = \sqrt[4]{k_{\odot} (1 - \alpha) / 4\sigma} = 256 \text{ K}$, t.i. ap -17 C.
- Reāli vidējā Zemes temperatūra ir ap 15 C !
 - Atšķirība ir tā sauktā “siltumnīcas efekta” dēļ.

Outline

- 1 Vispārīgie dati
- 2 **Optiskie novērojumi**
 - Saules izskats redzamā gaismā
 - Saules aktivitātes optiskās izpausmes
 - Saules optiskais spektrs
 - Vienkāršākās interpretācijas
- 3 Saules enerģijas avots
 - Gravitācijas saspiešanās?
 - Kodolreakcijas?
 - Alternatīvie varianti
 - Kodolreakcijas kā Saules enerģijas avots

Saule optiskā gaismā



- Filma:
<http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/Movies/10th/MDI-Sunspot-Crossings-2001-large.mpg>

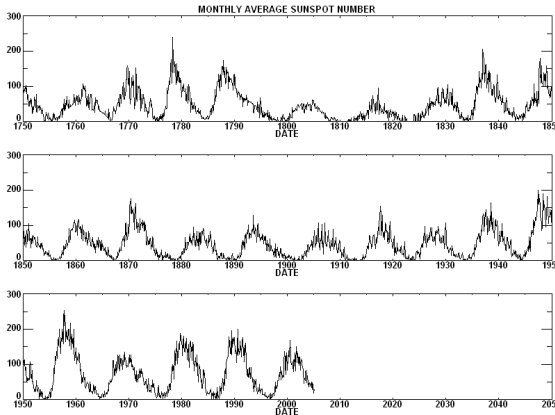
Saules diferenciālā rotācija

- Rotācijas periods tiek noteikts no Saules plankumu novērojumiem
- Ap ekvatoru sideriskais periods ir visātrākais: 24.47 dienas
- Ap 45 grādu platumu: sideriskais periods ir 27.55 dienas
- Atkarība no platuma tiek aprakstīta ar izteiksmi $\omega = A + B \sin^2 \varphi + C \sin^4 \varphi$, kur B un C ir negatīvi
- Atkarība no dziļuma: nav līdz galam saprasta.
 - Saules centrālā daļa rotē kā ciets ķermenis (līdz 0.7 no rādiusa)
 - Saules ārpusē rotē kā virsma (*diferenciālā rotācija*)

Volfa skaitlis

- Lai skaitliski raksturotu Saules aktivitāti, tiek izmantots tā sauktais **Volfa skaitlis**, kas tiek rēķināts no formulas $R = k(10g + s)$, kur
 - k ir “jutības koeficients” (mazāks lielākiem novērošanas instrumentiem)
 - g ir Saules plankumu grupu skaits
 - s ir Saules plankumu skaits
- Tātad, ja uz Saules ir novērojams viens plankums, $R = 11k$.
- Formulu piedāvāja Rudolfs Volfs (Rudolf Wolf) 1849. gadā
 - Tiešo novērojumu dati ir no 1750. gada!

Volfa skaitlis: novērojumu rezultāti

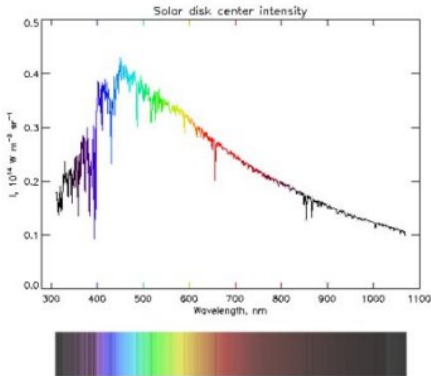


- Ir acīmredzams, ka plankumu skaits mainās cikliski, ar minimumiem, kas atkārtojas ik pēc 9-13 gadu.
- Vidēji, cikla periods ir 10.5 gadi

Saules aktivitātes optiskās izpausmes

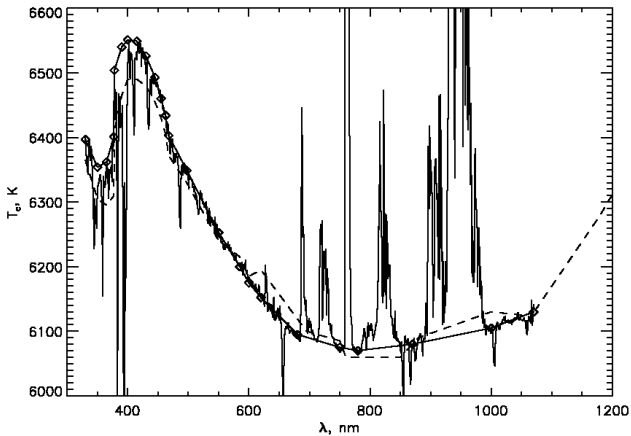
- Sīkāk Saules aktivitāti izpētīsim nākamajā lekcijā
- Šobrīd tikai pieminēsim, ka
 - Saules aktivitātei ir magnētiskā daba
 - Bez 11 gadu cikla ir arī citi
 - Saules cikls nav regulārs!

Saules optiskais spektrs

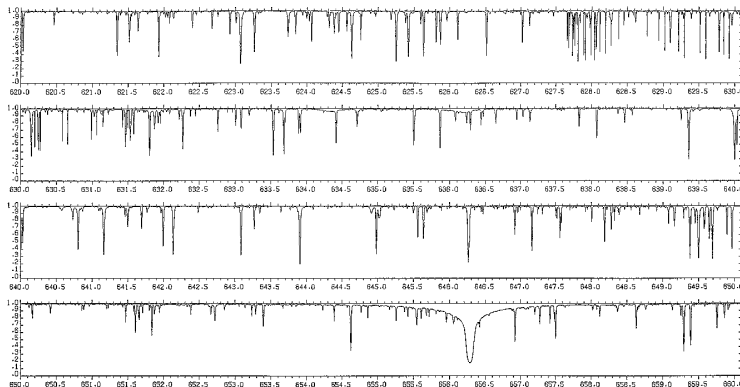


- Redzams, ka šis spektrs neatbilst vienas temperatūras AMĶ starojumam
- Tāpēc ievie jēdzienu *krāsas temperatūra*
 - *Definīcija:* Tāda AMĶ temperatūra, kura starojuma intensitāte tuvu dotam viļņa garumam ir tāda paša kā dotam ķermenim

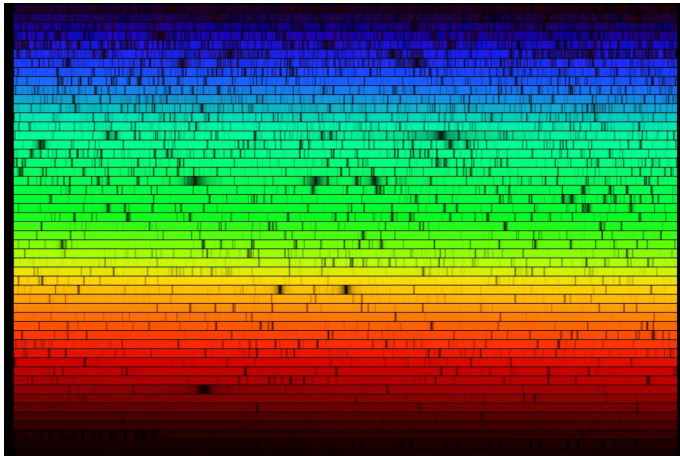
Saules krāsas temperatūra



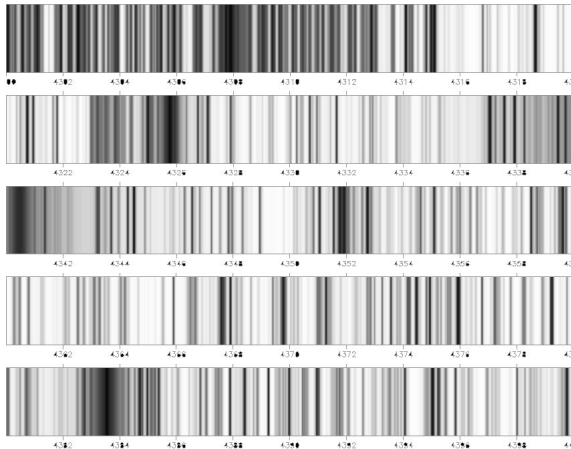
Saules spektra fragments: 620-660 nm, augsta izšķirtspēja



Saules optiskais spektrs: cita reprezentācija



Saules spektra fragments: 430-440 nm



Skaidrs, ka Saules spektrs satur milzīgu informācijas daudzumu. Kosmisko objektu spektru pētījumi – *astro spektroskopija* – ir nozare, kas dod vislielāku informāciju par tiem.

Kvalitatīvie spriedumi

- Saules redzamā virsma nav cieta vai šķidra
 - Ir šauras spektrālīnijas, tātad vielas atomiem ir diskrēti enerģijas līmeņi, tātad ir maza mijiedarbība starp atomiem, tātad attālums starp atomiem ir daudz lielāks par to izmēriem
 - Saules virsma ir gāze vai plazma (jonizētā gāze)
 - Protams, to varētu sagaidīt no temperatūras aprēķiniem, bet astrofizikā mēdz būt dažādi “brīnumi”
 - No spektrālās analīzes var izsecināt, ka tā ir plazma
 - Tātad, Saulei ir dažāds blīvums uz virsmas un iekšā (jo vidējais blīvums ir salīdzinoši liels: 1.4 g/cm^3)
- Saules redzamās virsmas temperatūra samazinās ar augstumu
 - Redzamajā spektrā mēs novērojam absorbcijas, nevis emisijas, līnijas

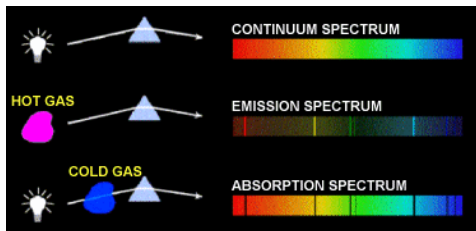
Kvalitatīvie spriedumi

- Saules redzamā virsma nav cieta vai šķidra
 - Ir šauras spektrālīnijas, tātad vielas atomiem ir diskrēti enerģijas līmeņi, tātad ir maza mijiedarbība starp atomiem, tātad attālums starp atomiem ir daudz lielāks par to izmēriem
 - Saules virsma ir gāze vai plazma (jonizētā gāze)
 - Protams, to varētu sagaidīt no temperatūras aprēķiniem, bet astrofizikā mēdz būt dažādi “brīnumi”
 - No spektrālās analīzes var izsecināt, ka tā ir plazma
 - Tātad, Saulei ir dažāds blīvums uz virsmas un iekšā (jo vidējais blīvums ir salīdzinoši liels: 1.4 g/cm^3)
- Saules redzamās virsmas temperatūra samazinās ar augstumu
 - Redzamajā spektrā mēs novērojam absorbcijas, nevis emisijas, līnijas

Kvalitatīvie spriedumi

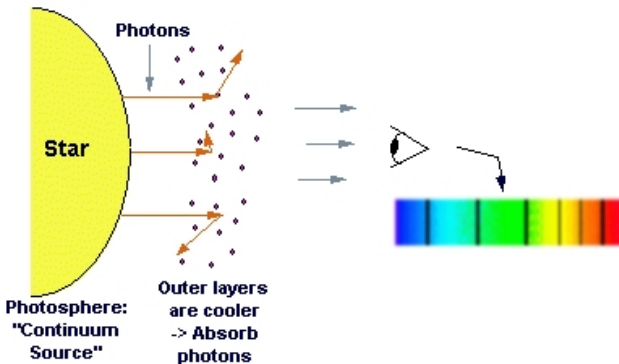
- Saules redzamā virsma nav cieta vai šķidra
 - Ir šauras spektrālīnijas, tātad vielas atomiem ir diskrēti enerģijas līmeņi, tātad ir maza mijiedarbība starp atomiem, tātad attālums starp atomiem ir daudz lielāks par to izmēriem
 - Saules virsma ir gāze vai plazma (jonizētā gāze)
 - Protams, to varētu sagaidīt no temperatūras aprēķiniem, bet astrofizikā mēdz būt dažādi “brīnumi”
 - No spektrālās analīzes var izsecināt, ka tā ir plazma
 - Tātad, Saulei ir dažāds blīvums uz virsmas un iekšā (jo vidējais blīvums ir salīdzinoši liels: 1.4 g/cm^3)
- Saules redzamās virsmas temperatūra samazinās ar augstumu
 - Redzamajā spektrā mēs novērojam absorbcijas, nevis emisijas, līnijas

Solis uz malu: Kirhofa likumi

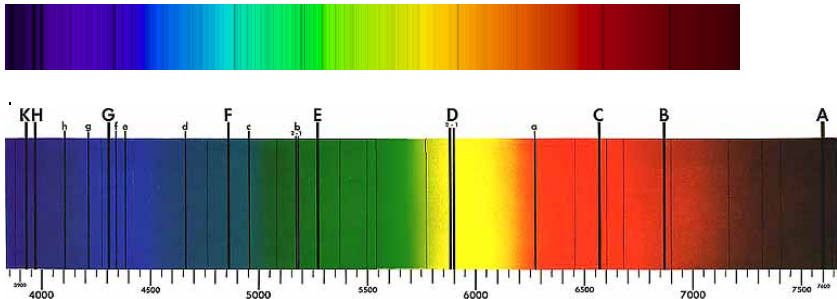


- 1 Karsts ciets ķermenis, šķidrums vai augsta spiediena gāze staro nepārtrauktu spektru
- 2 Karstā mazā spiediena gāze staro emisijas līnijas
- 3 Auksta mazā spiediena gāze dod absorbcijas līnijas spektrā
 - Kad pieskarsimies starojuma emisijas un absorbcijas mehānismiem, apspriedīsim, kur ir robeža starp “augsto” un “zemo” spiedienu.

Absorbcijas spektra rašanās: ilustrācija

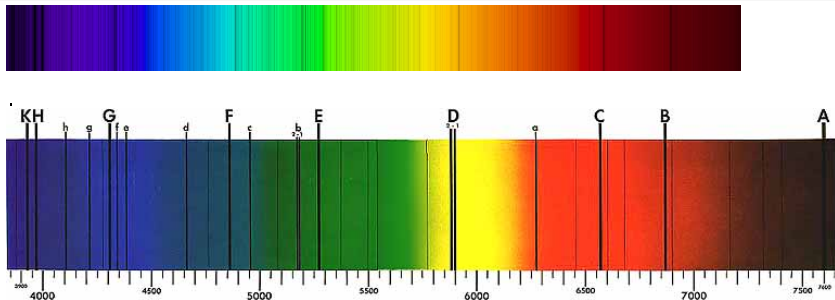


Saules spektrs: Fraunhoferu līnijas



- A, B, a: O_2 Zemes atmosfērā
- C, F, G', h: Ūdeņraža Balmera sērija
- D_1 un D_2 : Nātrija dublets
- G, H, K: Kalcija atomu un jonu līnijas
- Citas galvēnokārt dzelzs līnijas
- D_3 (vāja līnija): hēlijs

Saules spektrs: Fraunhoferu līnijas



- A, B, a: O_2 Zemes atmosfērā
- C, F, G', h: Ūdeņraža Balmera sērija
- D_1 un D_2 : Nātrija dublets
- G, H, K: Kalcija atomu un jonu līnijas
- Citas galvēnokārt dzelzs līnijas
- D_3 (vāja līnija): hēlijs

Saules ķīmiskais sastāvs

- Spektrālo līniju intensitātes ir atkarīgas
 - no atbilstošā ķīmiskā elementa daudzuma,
 - no jona daudzuma (katrai līnijai atbilst tikai viens elementa jons, piemēram, Na^+), kas savukārt ir atkarīgs no temperatūras un blīvuma
 - no pārejas augšējā līmeņa ierosmes efektivitātes (kas arī ir atkarīga no temperatūras)
- Veicot Saules virsmas spektra spektrālo analīzi, tika noteikts tās sastāvs:
 - 73% H
 - 25% He
 - mazāk par 2% pārējie elementi (0.3% C, 0.8% O, 0.2% Ne, 0.07% Mg, 0.07% Si, 0.05% S, 0.15% Fe, ...)

Kvalitatīvs Saules modelis

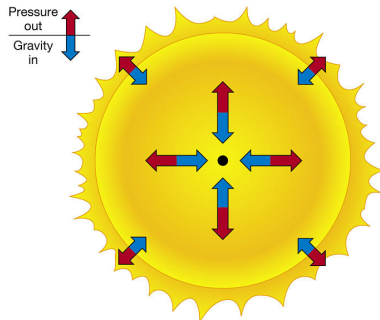
- Acīmredzams, ka Saule ir makroskopiskā līdzsvarā
- Pievilkšanas spēku kompensē plazmas spiediena spēks:

$$G \frac{M(r)dm}{r^2} = -Sdp,$$

kur $S = 4\pi r^2$ un $dm = 4\pi r^2 \rho dr$.

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

Tas ir hidrostatiskā līdzsvara nosacījums.



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Kvalitatīvs Saules modelis: 2

- Nemēģināsim uzbūvēt ļoti precīzu Saules modeli
- Vienkārši aizstāsim diferenciāļus ar vērtību starpībām zvaigznes ārpusē un iekšpusē
 - Izradās, ka šis pieņēmums strādā

$$\frac{p}{r} = G \frac{M \rho}{r^2}, \text{ kur } p = nkT = \frac{\rho}{\mu_{av} m_p} kT$$

$$T_{c,\odot} \approx \frac{\mu_{av} m_p}{k} \cdot \frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}} \cong 1.5 \times 10^7 \text{ K}$$

(te vidējā molārmasa ir paņemta kā $\mu_{av} = 0.65$; tā izriet no Saules sastāva un jonizācijas)

- Precīzāks modelis dod vērtību $T_{c,\odot} \cong 1.3 \times 10^7 \text{ K}$

Kvalitatīvs Saules modelis: 2

- Nemēģināsim uzbūvēt ļoti precīzu Saules modeli
- Vienkārši aizstāsim diferenciāļus ar vērtību starpībām zvaigznes ārpusē un iekšpusē
 - Izradās, ka šis pieņēmums strādā

$$\frac{p}{r} = G \frac{M\rho}{r^2}, \text{ kur } p = nkT = \frac{\rho}{\mu_{av} m_p} kT$$

$$T_{c,\odot} \approx \frac{\mu_{av} m_p}{k} \cdot \frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}} \cong 1.5 \times 10^7 \text{ K}$$

(te vidējā molārmasa ir paņemta kā $\mu_{av} = 0.65$; tā izriet no Saules sastāva un jonizācijas)

- Precīzāks modelis dod vērtību $T_{c,\odot} \cong 1.3 \times 10^7 \text{ K}$

Outline

- 1 Vispārīgie dati
- 2 Optiskie novērojumi
 - Saules izskats redzamā gaismā
 - Saules aktivitātes optiskās izpausmes
 - Saules optiskais spektrs
 - Vienkāršākās interpretācijas
- 3 Saules enerģijas avots
 - Gravitācijas saspiešanās?
 - Kodolreakcijas?
 - Alternatīvie varianti
 - Kodolreakcijas kā Saules enerģijas avots

Gravitācijas saspiešanās?

- Gravitācijas saspiešanas rezultātā potenciālā enerģija samazinās (pēc vērtības)
- Šī enerģija izdalās siltuma veidā un var sildīt debess ķermeni
- Saules gravitācijas saites enerģija šobrīd ir ar kārtu $GM_{\odot}^2/R_{\odot} \approx 4 \times 10^{41} \text{ J}$.
- Spīdot ar mūsdienu starjaudu $L_{\odot} \approx 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$, šīs enerģijas pietiek aptuveni $t_{sasp} \approx 10^{15} \text{ sek}$, t.i., aptuveni 30 miljoniem gadu.
- Zemes vecums ir daudz lielāks, un spriežot pēc ģeoloģijas atziņām, Saules spožums nav mainījies daudz ilgākā laikā (ap 3 miljardi gadu)
- Tātad, šis modelis neder
 - Tiesa gan, gravitācijas saspiešanās ir svarīga katras zvaigznes evolūcijas sākumā, kad zvaigznes kodols ir jāsasilda

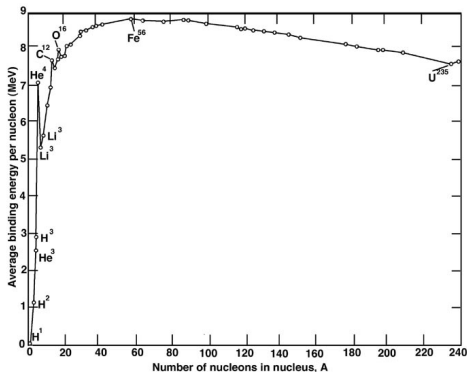
Kodolreakcijas?

- Saule sastāv galvenokārt no ūdeņraža
- Pārveršoties četriem ūdeņraža atomiem hēlijā, siltuma veidā izdalās 26 MeV (ap $4.2 \times 10^{-12} \text{ J}$)
 - t.i. ap 0.0007% no miera masas pārveršas enerģijā
- Tātad, “sadegot” visam Saules ūdeņradim, izdalītos ap $1 \times 10^{45} \text{ J}$
- Atbilstoši, ar pašreizējo starjaudu Saule varētu eksistēt ap $t_{\text{kodolreakcijas}} \approx 2 \times 10^{18} \text{ sek.}$, t.i. ap 50 miljardiem gadu
 - Ir dzīvotspējīgs variants
 - Izradās, ka arī pareizs!
 - Saulei ir mazāks (paredzēts) dzīves ilgums, jo viss ūdeņradis nesadeg evolūcijas gaitā - *radiācijas zonā nav konvekcijas*

Alternatīvie enerģijas avoti

- Astronomijā reti kad var izslēgt kādu eksotisku variantu
- Piemēram, kā var izslēgt šādu variantu:
 - Saule spīd, jo tajā anihilē kaut kādas tumšās matērijas daļiņas. Tie nemijiedarbojas ar parasto matēriju (izņemot gravitācijas pievilkšanos), tikai ar sevi; un anihilācija notiek Saules centrā, jo Saule gravitatīvi pievelk tumšās matērijas elementārdaļiņas.
- Saules gadījumā to var izdarīt.
- Parasti ir pārāk maz datu, lai precīzi noteikt procesa detaļas
 - Saule ir izņēmums: par to ir zināms ļoti daudz

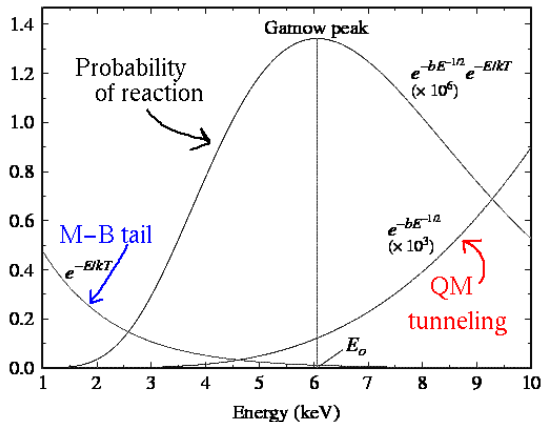
Nuklonu saites enerģija



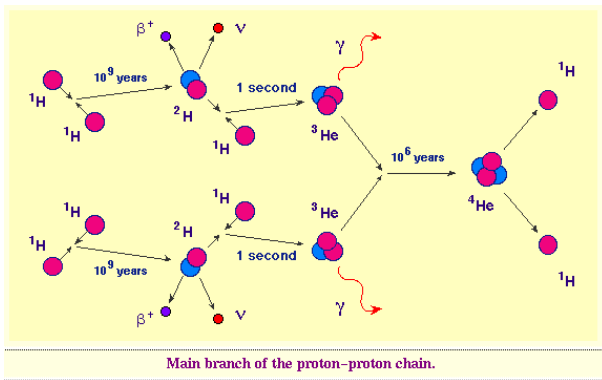
- Pārveršoties ūdeņradim hēlijā, no katra protona izdalās visvairāk enerģijas

- Vienas daļiņas kinētiskā enerģija Saules centrā ir ap $E = \frac{3}{2}kT \approx 1.7 \text{ keV}$
- Protona potenciālās barjeras augstums ir ap 1 MeV
- Klasiski, varbūtība pārvarēt barjeru būtu aptuveni e^{-700} , bet Saulē ir tikai ap 10^{57} protonu
 - Kodolreakcijas nebūtu iespējamās
- Kodolreakcijas Saulē var izskaidrot tikai kvantu tunelēšana, kas dod varbūtību ap 10^{-10}
 - Tas izskaidro arī ilgu zvaigžņu mūža ilgumu: reakcijas ir ārkārtīgi mazvarbutīgas

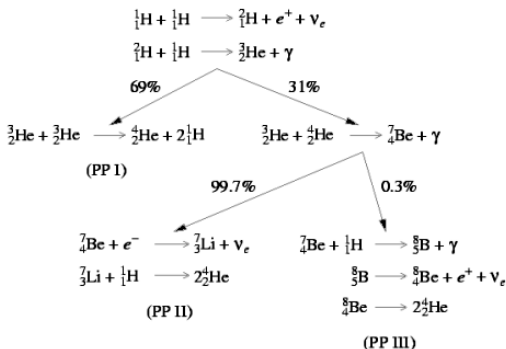
Gamova pīķis



Protona-protona cikla reakcijas

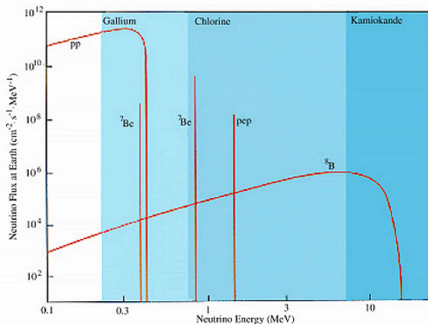


Protona-protona cikla reakciju varianti



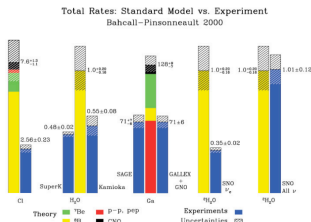
- Piezīme: p-p cikls nodrošina ap 99% no Saules enerģijas; pārējais nāk no CNO cikla (apskatīsim vēlāk)

Rezultējošais neitrīno spektrs



- Novērojot starojumu, mēs neredzam dziļāk par Saules virsmu
 - Nav tiešas informācijas par enerģijas izdalīšanas mehānismu
- Neitrīno spektrs (sadalījums pa enerģijām) nes informāciju tieši no tās Saules zonas, kur izdalās enerģija

Saules neitrīno novērojumi



- Neitrīno novērojumu (zilie stabi) salīdzinājums ar modeļa paredzējumiem dažādiem neitrīno detektoru tipiem.
- Visi detektori, izņemot “SNO All ν ”, ir jutīgi tikai pret elektrona neitrīno ν_e
 - Sistemātiski zemāki rezultāti (2-3 rezes) salīdzinot ar modeli
 - Tā ir tā sauktā **“Saules neitrīno problēma”**
 - SNO novērojumi pierādīja, ka kopējā neitrīno plūsma ($\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$) sakrīt ar Saules modeļa paredzējumu

Sudbury Neutrino Observatory

