

Saule: 2. daļa

Astronomija un astrofizika, kurss 3F studentiem, 2009

Ilgonis Vilks un Dmitrijs Docenko

September 23, 2009

Lekcijas plāns

- 1 Saules iekšējā struktūra
 - Vispārīgs ieskats
 - Turbulence Saulē un zvaigznēs
- 2 Saules redzamā virsma
 - Fotosfēra
 - Saules seismoloģija
 - Saules aktivitāte uz virsmas
 - Hromosfēra
- 3 Saules vainags un Saules vējš
 - Saules izskats UV un rentgen- un radiostarojumā
 - Saules vējš, vainaga masas izvirdumi
- 4 Saules-Zemes sakari
 - Aptumsumi
 - Mijiedarība ar Zemes magnetosfēru
 - Ietekme uz cilvēku un ierīcēm

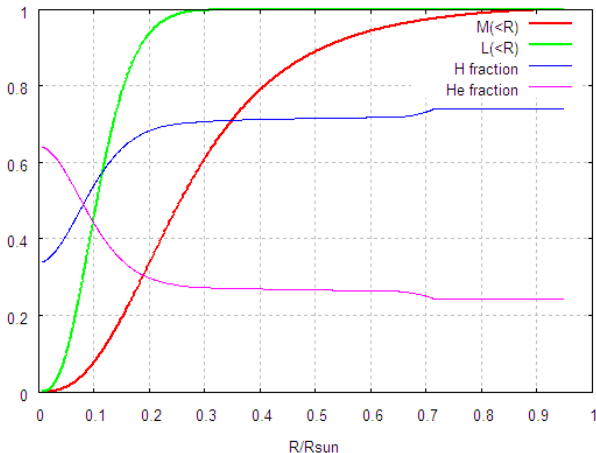
Outline

- 1 Saules iekšējā struktūra
 - Vispārīgs ieskats
 - Turbulence Saulē un zvaigznēs
- 2 Saules redzamā virsma
 - Fotosfēra
 - Saules seismoloģija
 - Saules aktivitāte uz virsmas
 - Hromosfēra
- 3 Saules vainags un Saules vējš
 - Saules izskats UV un rentgen- un radiostarojumā
 - Saules vējš, vainaga masas izvirdumi
- 4 Saules-Zemes sakari
 - Aptumsumi
 - Mijiedarība ar Zemes magnetosfēru
 - Ietekme uz cilvēku un ierīcēm

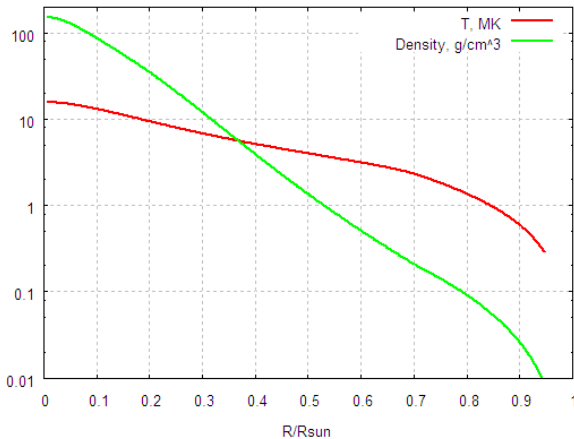
Saules standartmodelis

- Pagājušo lekciju beidzām ar pierādījumu tam, ka “Saules standartmodelis” ir pareizs
 - Kā šodien redzēsīm, tas nav pilnīgs
- Atnāca laiks iepazīties ar to, kas tad ir Saules modelis
- Daži raksturlielumi
 - 50% no diametra satur 90% no masas
 - 20% no diametra ražo 95% no jaudas (visa jauda: ap 27-30% no diametra)
 - Kodolā ir ap 34% H un ap 64% He
 - Centrā temperatūra ir 15.7 miljoni grādu, blīvums 152 g/cm^3

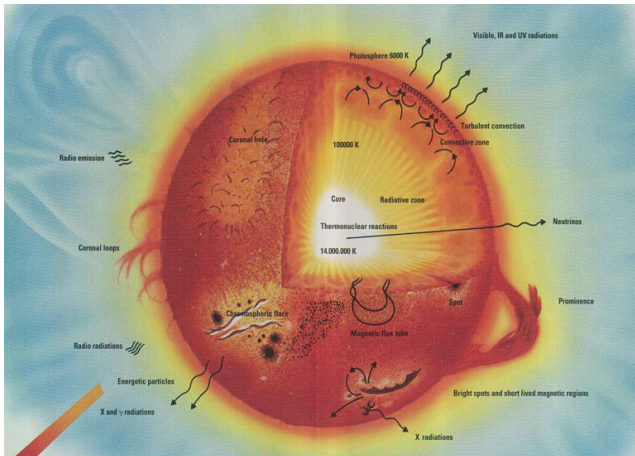
Masa, Starjauda, X, Y



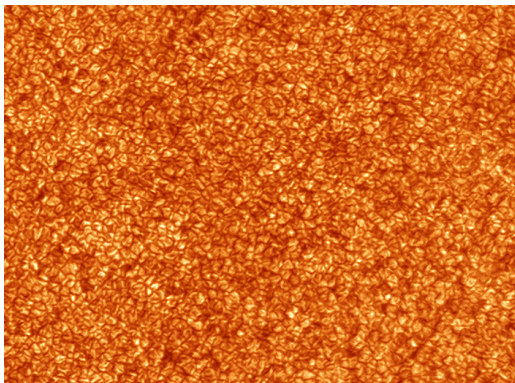
Temperatūra, blīvums



Saules iekšējā struktūra

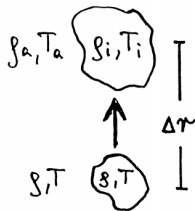


Saules granulācija: konvekcijas izpausme



Filmas: *gr10M_44_2.mpg*, *movie09_granulation_BigBear.mpg*

Konvekcija kā enerģijas pārnese



- Iedomāsimies, ka kāds vielas apgabals ar sākotnējo blīvumu ρ un temperatūru T adiabātiski ceļas augšā attiecībā pret apkārtējo vidi
- Ja tā blīvums pēc pacelšanas ρ_i būs mazāks par apkārtējās vides blīvumu ρ_a , tad tas turpinās savu kustību uz augšu: sāksies **konvekcija**
- Pretējs gadījums tiek saukts par **stabīlo stratifikāciju**

$$\text{Konvekcijas kritērijs: } \left| \frac{d\rho}{dr} \right|_i > \left| \frac{d\rho}{dr} \right|_a$$

Švarcšilda kritērijs

- Apgabals ceļas pietiekami lēni, lai izlīdzinātos blīvumi: $p_i = p_a$; $n_i k T_i = n_a k T_a$.
- Ievietojot koncentrācijas izteiksmi $n = \rho / \mu m_p$ (μ ir molārmasa, m_p ir protona masa), iegūsim, ka

$$\frac{k}{\mu m_p} \rho_i T_i = \frac{k}{\mu m_p} \rho_a T_a; \text{ vai } \rho_i T_i = \rho_a T_a.$$

- Tātad, pārrakstam konvekcijas kritēriju kā $\left| \frac{dT}{dr} \right|_i < \left| \frac{dT}{dr} \right|_a$
- Pārejām no rādiusa uz spiediena mainīgo: pareizinām abas puses ar $\frac{p}{T} \frac{dr}{dp}$

$$\left| \frac{d \ln T}{d \ln p} \right|_i < \left| \frac{d \ln T}{d \ln p} \right|_a,$$

- Šo sauc par **Švarcšilda turbulences kritēriju**.

Švarcšilda kritērijs: 2

- Apgabals ir pietiekami liels, lai tā parametri mainītos adiabātiski
 - Faktiski tas nozīmē, ka apgabalam jābūt optiski biežam attiecībā pret paša starojumu
 - Švarcšilda kritērijs nedarbojas virs Saules virsmas; tur turbulence apstājas
- Tad $pV^\gamma = \text{const}$, kur $\gamma = c_p/c_V$. Pārejot uz blīvuma mainīgo, iegūsim meklējamo

$$p \sim \rho^\gamma, \quad T \sim p/\rho \sim \rho^{\gamma-1}$$

$$dp \sim \gamma \rho^{\gamma-1} d\rho, \quad dT \sim (\gamma-1) \rho^{\gamma-2} d\rho$$

$$\frac{d \ln T}{d \ln \rho} = \frac{(\gamma-1)\rho^{\gamma-2}/\rho^{\gamma-1}}{\gamma\rho^{\gamma-1}/\rho^\gamma} = \frac{\gamma-1}{\gamma} = 1 - \frac{1}{\gamma}$$

Švarcšilda kritērijs: 3

- Vienatomu gāzei $\gamma = \frac{5}{3}$ un $\frac{d \ln T}{d \ln p} = \frac{2}{5}$.
 - Ja radiācijas procesi nosaka $\frac{d \ln T}{d \ln p} > \frac{2}{5}$, tad sākas konvekcija līdz tiek sasniegts $\frac{d \ln T}{d \ln p} = \frac{2}{5}$.
 - Neattiecas uz rekombināciju apgabaliem zvaigznēs
- Kāds ir temperatūras gradients kodolā?
 - Atkarīgs no enerģijas izdalīšanas mehānisma
 - Ja kodolreakciju ciklā ar temperatūras pieaugumu ātri aug enerģijas izdalīšanas, tad gradients ir liels un sākas konvekcija
- Kādu temperatūras gradientu ārpus kodola nosaka radiācijas procesi?
 - Atkarīgs no vielas absorbcijas koeficienta κ
 - Ja κ ir liels, fotoni ir vairāk pārstaroti vidē, kas arī sekmē konvekcijai

Konvekcija zvaigznēs

- Tātad, konvekcijas zvaigznēs notiek
 - Stiprā temperatūras gradienta rezultātā
 - Zvaigžņu enerģijas izdalīšanas apgabalos: vienmēr, izņemot zvaigznes ar p-p ciklu
 - Ja vielas absorbcijas koeficients ir pārāk liels
 - Rekombināciju apgabalos: atdziestot, viela rekombinē
 - “Fāzu pāreja”: c_p stipri palielinās, γ tuvojas vienam, kritiskā $\frac{d \ln T}{d \ln p}$ vērtība samazinās
- Konvekcija Saulē notiek tikai ārējos slāņos, sākot no aptuveni $0.7 R_{\odot}$

Outline

- 1 Saules iekšējā struktūra
 - Vispārīgs ieskats
 - Turbulence Saulē un zvaigznēs
- 2 Saules redzamā virsma
 - Fotosfēra
 - Saules seismoloģija
 - Saules aktivitāte uz virsmas
 - Hromosfēra
- 3 Saules vainags un Saules vējš
 - Saules izskats UV un rentgen- un radiostarojumā
 - Saules vējš, vainaga masas izvirdumi
- 4 Saules-Zemes sakari
 - Aptumsumi
 - Mijiedarība ar Zemes magnetosfēru
 - Ietekme uz cilvēku un ierīcēm

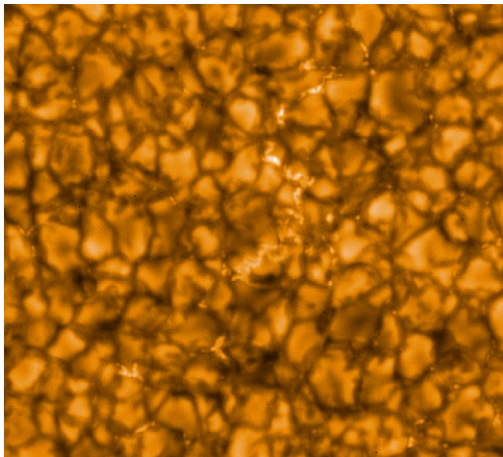
Saules fotosfēra



Fotosfēra: dati

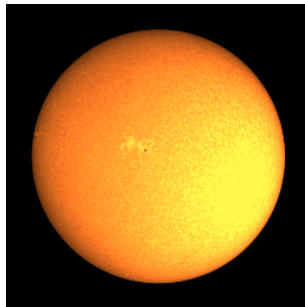
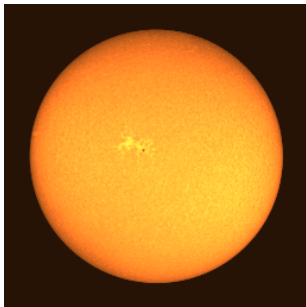
- Tas, ko var redzēt baltā gaismā: **redzamā Saules virsma**
- Protams, tā nav “virsma”, bet ir “slānis”, jo Saule ir plazmas lode
- Parametri
 - Temperatūra: ap 5000 – 6000 K
 - Blīvums: ap $10^{-3} - 10^{-2} \text{ kg/m}^3$, t.i. aptuveni tāds pats kā Zemes atmosfēras blīvums 50-80 km augstumā.
 - Biezums: ap 300-500 km
- Skala: 1" atbilst ap 725 km

Fotosfēra: sīkā struktūra



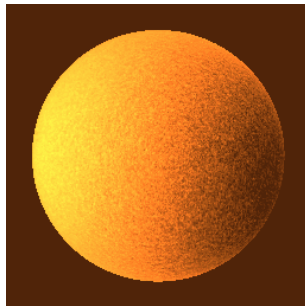
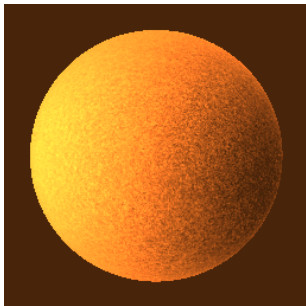
- Redzam konvekcijas šūnas
- Izmērs ap 1000 km
 - ap 0.0015 no Saules rādiusa
 - ap 1.0'' –1.5''
- Spožāki ir tie apgabali, kas ceļas augšā
- Filma: *Hinode_granule_gb_20061102*

Kā iegūt informāciju par Saules virsmas kustību



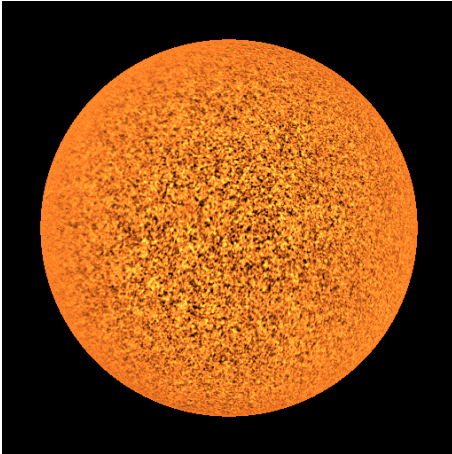
Šeit ir parādīti divi Saules virsmas attēli, kas ir iegūti Na D-līnijas zilajā (pa kreisi) un sarkanā (pa labi) pusē.

Doplerogramma: pirmais solis



Te var redzēt divus “starpības” attēlus starp zilo un sarkano gaismu, kas tika iegūti ar divu minūšu atšķirību. Tie parāda fotosfēras kustības ātrumu kartes dotos laika momentos.

Doplerogramma: rezultāts

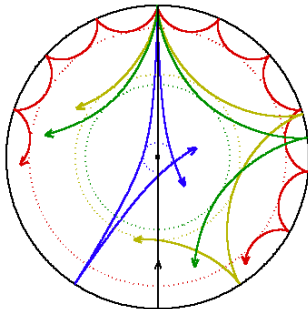


- Rezultāts - **dopplerogramma** - ir starpība starp divām ātruma kartēm
- Tā rāda kustību dinamiku
- Centrā radiālās kustības ir ātrākas, jo notiek virzienā uz mums

Doplerogrammas: filmas

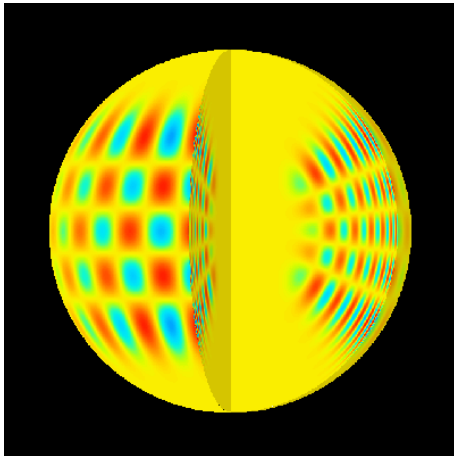
- Filmas
 - GONG: *gong_surface_motion_ctvdx.mov*
 - Var redzēt, ka ir kaut kādas kustības uz mērogiem ap 0.01 Saules diametra
 - Nav granulācija
 - SOHO MDI: *hr_V_sm_dopplergram.mpeg*
 - Saules virsmas fluktuācijas ar augstu leņķisko izšķirtspēju
- Tās ir tā sauktās **akustiskās svārstības**
 - Turbulence rada “troksni” – vielas akustiskās kustības
 - piemērs: *flare_waves.mpeg*
 - Uz rezonanses frekvencēm tie paliek stipri
 - Visas Saules oscilācijas

Saules seismoloģija



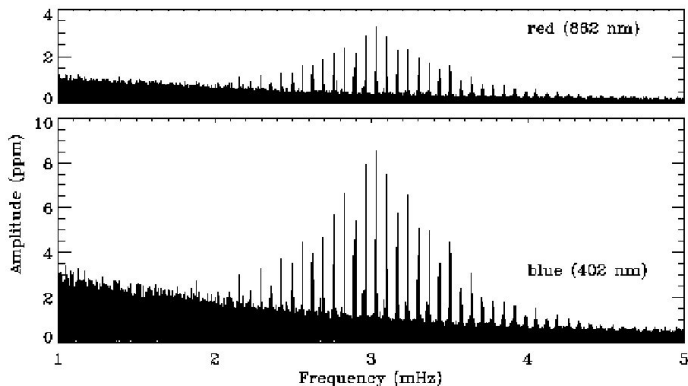
- Līdzīgi Zemes seismoloģijai, arī uz Saules var izmantot akustiskos viļņus, lai pētītu to iekšējo struktūru
- Tie izpaužas kā Saules virsmas periodiskās vertikālās kustības
 - Tipiskā amplitūda: daži kilometri
 - Tipiskais periods: 5 minūtes (frekvence ap 3 mHz)

Tipiskā Saules moda



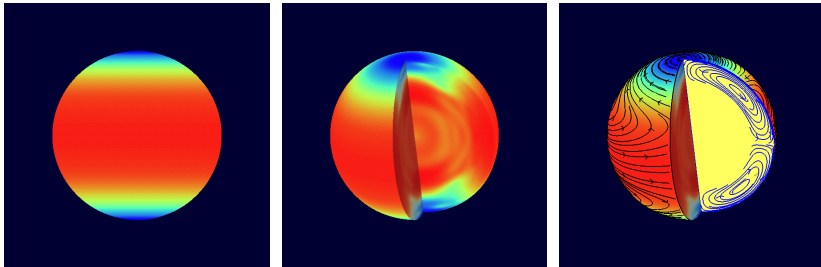
- Šim stāvvilnim ir sekojoši parametri
 - $n=14$, $l=20$, $m=16$
 - Frekvence 2.936 mHz
- Zilie un sarkanie apgabali: blīzumi
- Dzeltenās strīpas: mezglu līnijas

Saules frekvences spektrs



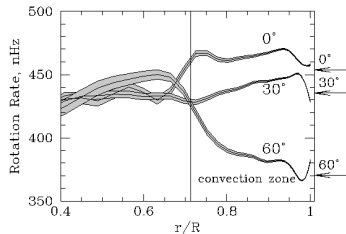
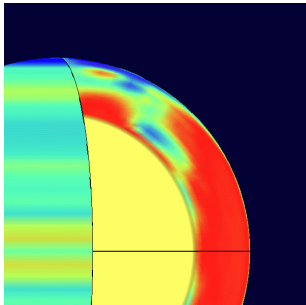
- Katrai līnijai atbilst noteikts (n, l, m) trijnieks: rezonanse
- Ir oscilācijas arī ar frekvencēm starp rezonansēm, bet tie ātri dilst

Saules seismoloģijas rezultāti



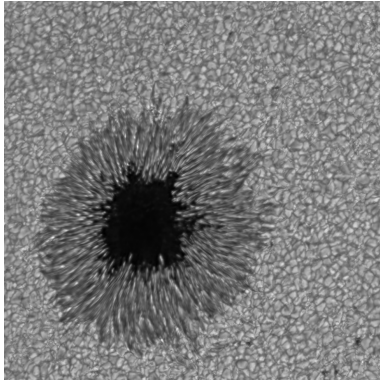
- Saules virsmas rotācijas ātrums ir atkarīgs no platuma
- Kodols un radiācijas zona rotē ka viens vesels
- Pastāv globāla konvekcijas zonas cirkulācija (virsmā virzas uz poliem)

Saules seismoloģijas rezultāti: 2



- Tika atrastas arī citas Saules rotācijas īpatnības
 - Ļoti daudz augstās kvalitātes novērojumu datu
 - Pilnas sapratnes nav...

Saules plankumi

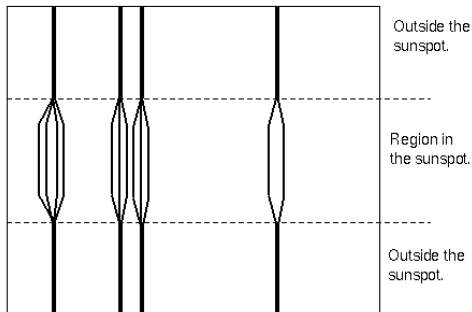


- Pastāv ēna (tumšākie rajoni) un pusēna (gaišāki rajoni)
- Plankumi veidojas augstā magnētiskā lauka apgabalos
 - Magn. lauks apstādina konvekciju (plazmas “iesaldēšana” laukā)
- Ēnā
 - Temperatūra 4000-4500 K
 - Magnētiskais lauks vertikāls
- Pusēnā
 - Temperatūra ap 5000 K
 - Magnētiskais lauks zem leņķa

Saules plankumi: Filmas

- Saules plankums:
 - *SST_gband_20Aug2004_sunspot_41min.mpg*
- Zem Saules plankuma
 - *UnderSunspot_final.mpg*
 - *UnderSunspot_combined.mpg*
- Pēc uzbūves Saules plankums ir līdzīgs Zemes cikloniem: zem tā ir konverģējošā vielas plūsma, kas satur to kopā
 - Citādi magnētiskā spiediena ietekmē plankums ātri izzustu
- Vājākas konvekcijas rezultātā veidojas īpatnējā temperatūras struktūra: plankums ir aukstāks par apkārtējo vidi uz Saules virsmas, bet karstāks zem virsmas.

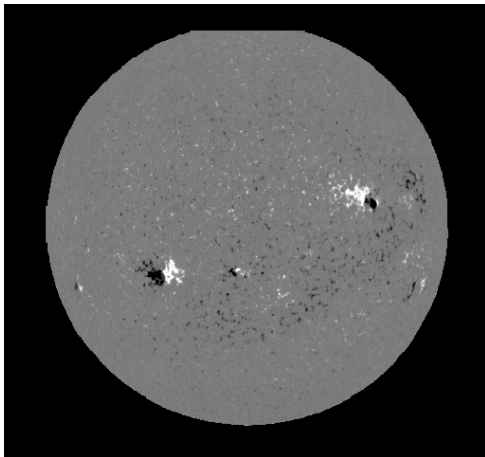
Magnetogrammas



The Zeeman effect: a strong magnetic field splits the spectral lines into two or more components. The strength of the magnetic field can be measured from the amount of separation of the components. Sunspots are regions of strong magnetic fields.

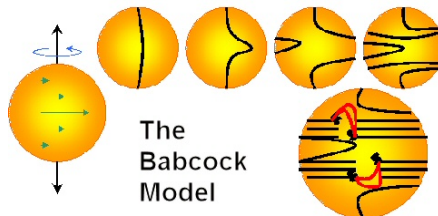
- Uz Saules fotosfēras līmeņa var pētīt arī magnētiskā lauka struktūru
- Tiek izmantots Zēmaņa efekts: daudzas līnijas sašķēlas vairākās komponentēs magnētiskā laukā
- Magnetogrammas uzbūves princips ir līdzīgs doplerogrammas principam: tiek atņemti divi Saules attēli, kas atbilst dažādiem lauka virzieniem

Magnetogramma



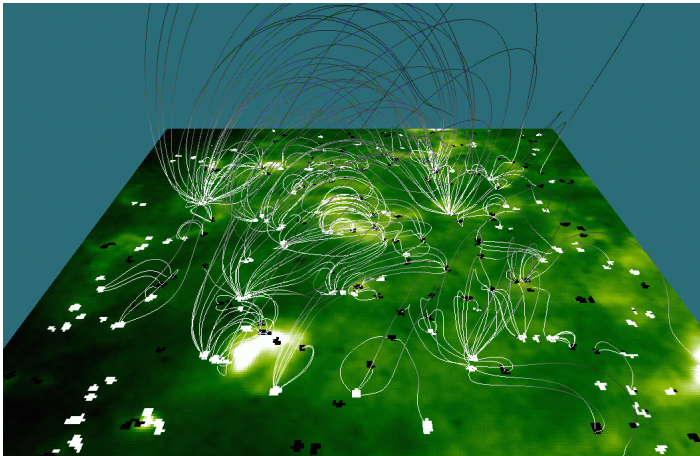
- Var redzēt, ka ir plankumi ar izejošo un ar ieejošo magnētisko lauku
 - Parasti plankumi izveidojas pāros
- Viegli var saskatīt arī vājāku struktūru - “magnētisko paklāju”
- Filma:
Hinode_magnetic_carpet.mov

Saules aktivitāte: modelis

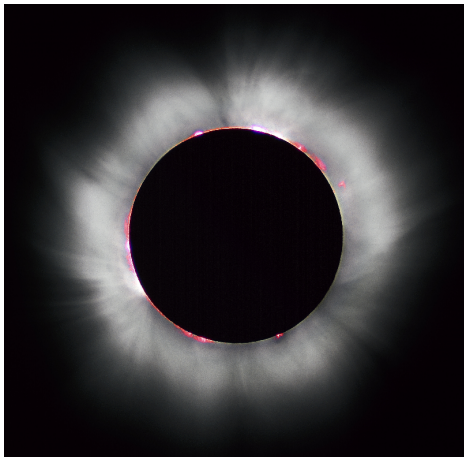


- Diferenciālās rotācijas rezultātā magnētiskais lauks pastiprinās
- Magnētiskā spiediena dēļ plazmas blīvums kļūst mazāks par apkārtējās vielas blīvumu: aktīvs rajons uzpeld uz virsmu
- Augšējā atmosfērā lauks pārsavienojas (uzliesmojumi, izvirdumi), samazinās
- Filma: *animation_dynamo.mpg*

Magnētiskās lauka līnijas virs plankuma



Augstāk par fotosfēru



- Saules aptumsuma laikā tiešā Saules gaisma tiek aizklātā ar Mēness disku, un pat ar neapbruņotu aci var redzēt daudz blāvākus Saules augšējās atmosfēras slāņus
- Šauru sarkanu strīpu veido **hromosfēra** (visstiprāk spīd H α līnija)
- Baltā gaisma nāk no **Saules vainaga**

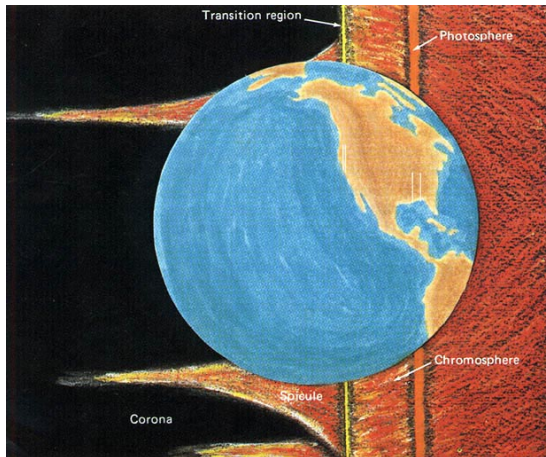
Saules iekšējā struktūra
Saules redzamā virsma
Saules vainags un Saules vējš
Saules-Zemes sakari

Fotosfēra
Saules seismoloģija
Saules aktivitāte uz virsmas
Hromosfēra

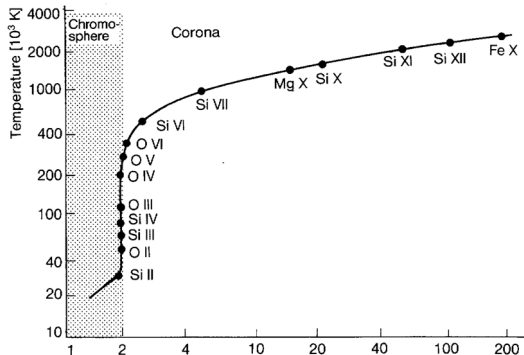
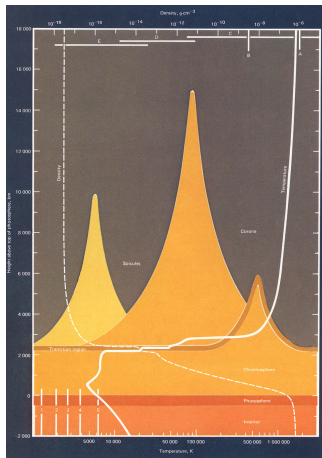
Hromosfēra



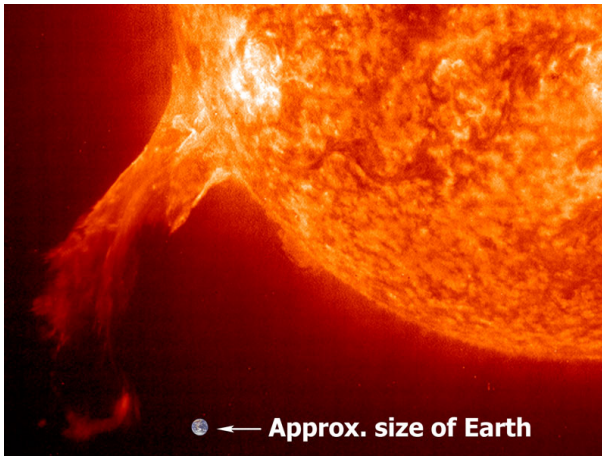
Virš fotosfēras: shēma



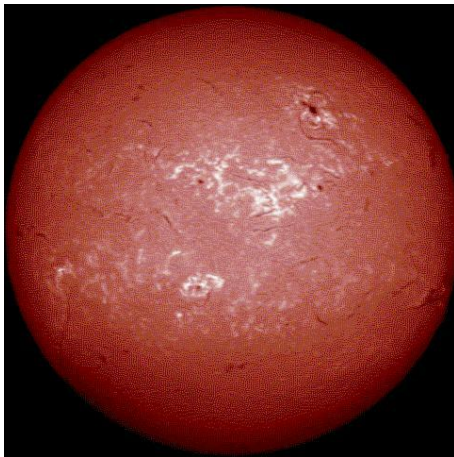
Virsa fotosfēras: blīvums un temperatūra



Protuberances

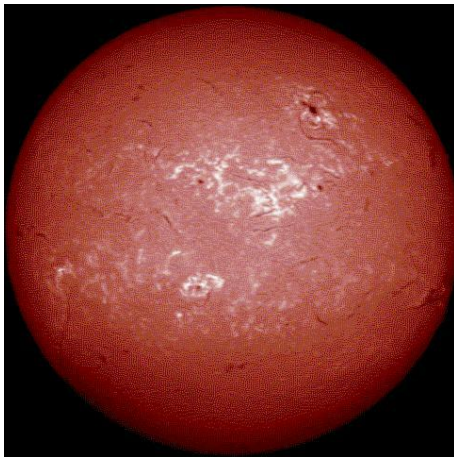


Hromosfēra $H\alpha$ līnijā



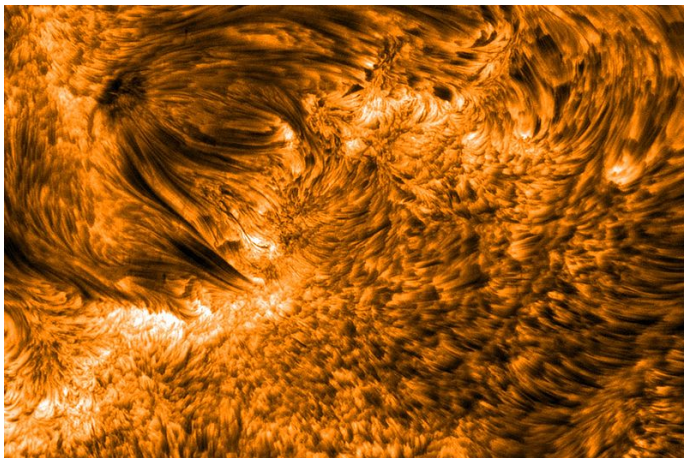
- Dažās spektrālīnijās ($H\alpha$, Ca H) hromosfēra ir optiski bieza
 - Spožums ir atkarīgs tikai no temperatūras
- To var novērot tieši izmantojot attiecīgus šaurus filtrus
 - Samazina apgaismojumu
 - Dažreiz izmanto pat šaurākus filtrus, kas laiž cauri tikai kādas līnijas spārnu

Hromosfēra H α līnijā: ko tur var ieraudzīt



- Tumšās līnijas: filamentu (tas pats, kas protuberances, tikai no augšas)
 - *Kāpēc filamentu ir tumši, bet protuberances ir gaišas?*
- Spožie plankumi: aktīvie apgabali
- Malas ir tumšākas: temperatūra krīt ar augstumu (zemā hromosfēra)

Spikulas tūvplanā



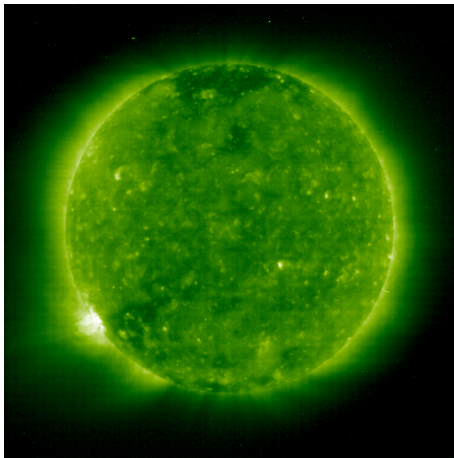
Hromosfēra: filmas

- Virs Saules plankuma:
 - *spotmorph_dot_big.gif*
- Spikulas un protuberances:
 - *Hinode_11302006_CaH_prom.avi*
 - *Hinode_okamoto.mpg*
- Spikulas, skats no augšas
 - *Hinode_chromosphere_cagb_20061102.mpg*

Outline

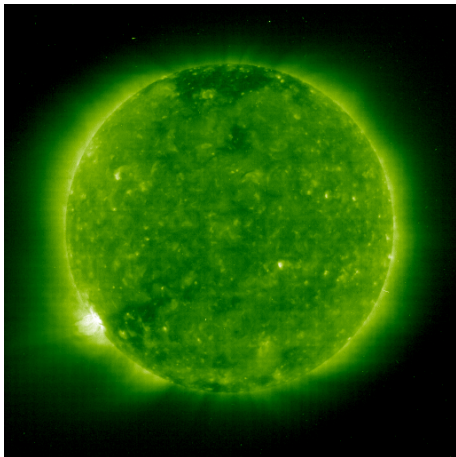
- 1 Saules iekšējā struktūra
 - Vispārīgs ieskats
 - Turbulence Saulē un zvaigznēs
- 2 Saules redzamā virsma
 - Fotosfēra
 - Saules seismoloģija
 - Saules aktivitāte uz virsmas
 - Hromosfēra
- 3 Saules vainags un Saules vējš
 - Saules izskats UV un rentgen- un radiostarojumā
 - Saules vējš, vainaga masas izvirdumi
- 4 Saules-Zemes sakari
 - Aptumsumi
 - Mijiedarība ar Zemes magnetosfēru
 - Ietekme uz cilvēku un ierīcēm

Ultravioletā Saule



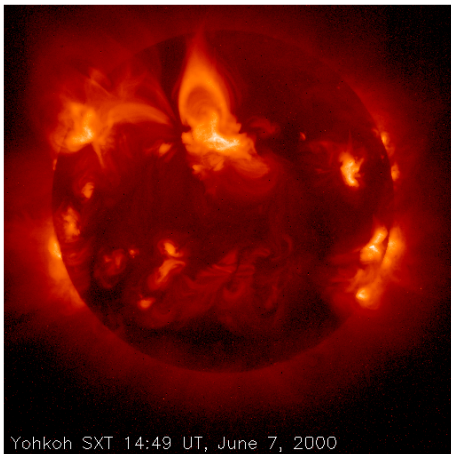
- Ultravioletā Saule izskatās stipri nepierasti
 - Spožas emisijas līnijas
 - Malas spožākas par centru (mazs optiskais biežums)
 - Daudz dažādu struktūru
- Šis ir uzņēmums Fe XII līnija ap 195 Å no SOHO
 - Jons eksistē pie temperatūras ap 1.5 MK
 - Ver redzēt vainagu un aktīvus apgabalus
 - Pie poliem: **vainaga caurumi**

UV Saule: filmas



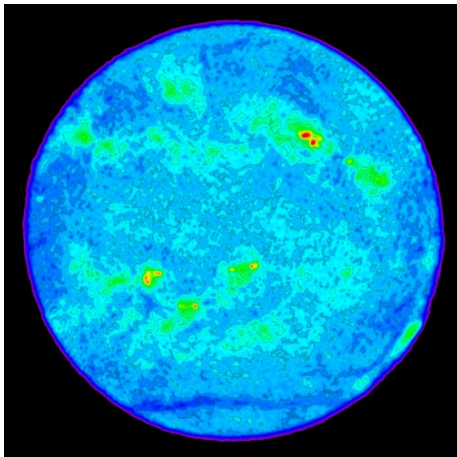
- Koronālās arkas, kas savieno plankumus
 - *T1600_X14_010415.mov*
- Saules uzliesmojumi
 - *T171_010415_22.mov*
 - *T171_X14_010415.mov*
 - *195erupt2004.mpg*

Rentgensaule



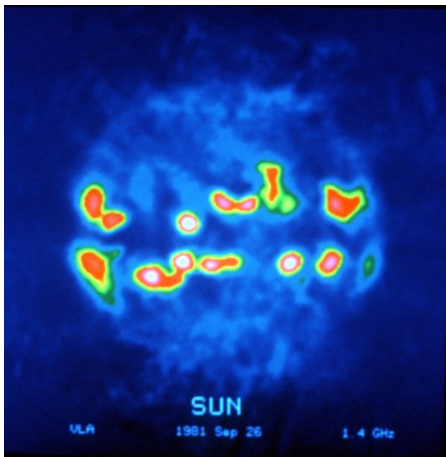
- Saule rentgendiapazonā izskatās vēl savādāk
 - Redz tikai visaugstākās temperatūras plazmu (virs 2 MK?)
- Šis ir *Yohkoh* uzņēmums, 0.4 - 4.0 keV
 - Ver redzēt vainagu un aktīvus apgabalus
 - Nav mazā mēroga struktūras
- Filma: *Hinode_xrt_1rot.mov*

Radiosaule: cm diapazons



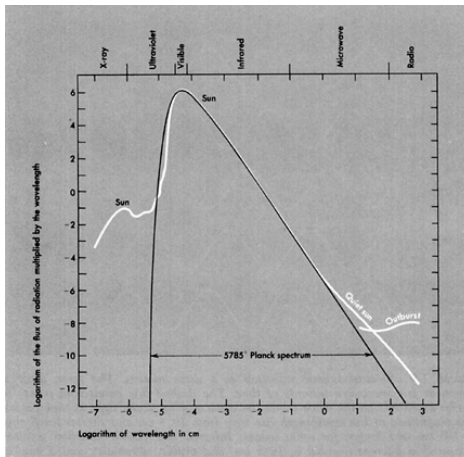
- Radiodiapazonā Saules izskats ir atkarīgs no viļņa garuma
- Šis ir VLA uzņēmums, 4.6 GHz (6.5 cm)
 - Izšķirtspēja ap 12'' (8500 km)
 - Sarkanais: ap 1MK plazma virs Saules plankumiem
 - Gaiši zils fons: ap 30 kK plazma
 - Saules izmērs ir par 20 tūkstošiem kilometriem lielāks, nekā redzamā gaismā

Radiosaule: 20 cm



- Arī VLA uzņēmums, 1.4 GHz (21 cm)
 - Spožu apgabalu temperatūra ir 2.5 MK (virs Saules plankumiem)
 - Diska temperatūra ap 50 – 100 kK
- Zemas izšķirtspējas dēļ nevar izšķirt visas detaļas...

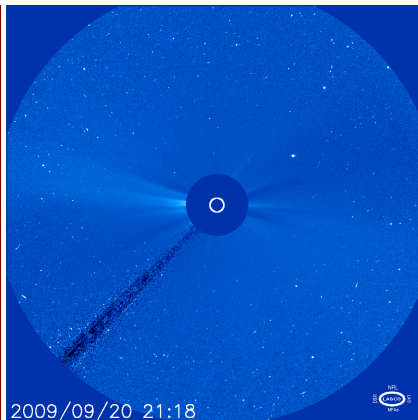
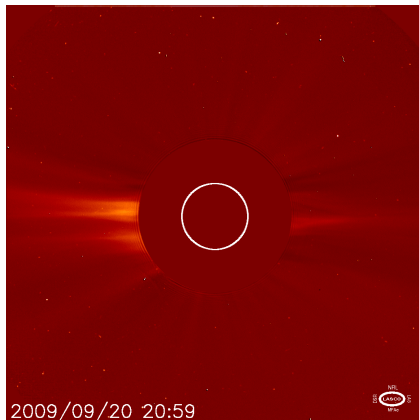
Saules spektrs plašā diapazonā



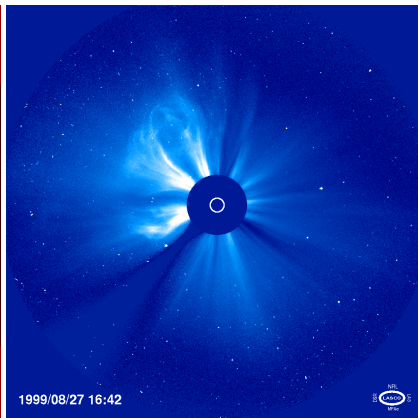
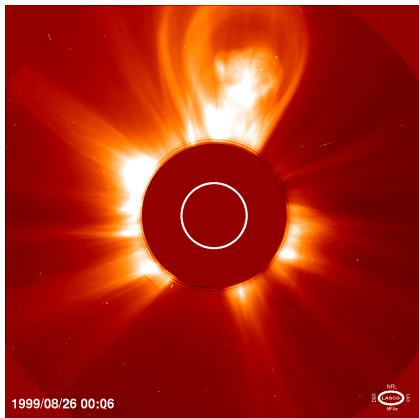
Saules vējš

- Lādēto daļiņu plūsma, kas kustās prom no Saules
 - Ap 1.3×10^{36} daļiņu sekundē
 - Saule ik gadu zaudē ap 3×10^{-14} no savas masas
- Visi parametri ir stipri mainīgi, ir divas komponentes
 - Ātrums: ap 400 km/s (lēns), ap 750 km/s (ātrs, virs vainaga caurumiem)
 - Sasniedz Zemi 2-5 dienu laikā
 - Temperatūra ap 0.15 MK (lēns), 0.8 MK (ātrs)
 - Daļiņu koncentrācija ap 1 cm^{-3} (ātrs: divreiz mazāk)
- Saules vējš izveido ap Sauli milzīgu burbuli starpzaigžņu telpā
 - Izmērs ap 100 a.v.

Vainaga izmērs



Vainags Saules izvirduma laikā



Filma: *lasco_C3_00apr.mpg*

Slānis	Veidojums	Izmērs, km	Temperatūra	Cik ilgi pastāv
Fotosfēra	Granulas	1000	5800 K	5-10 min.
	Lāpu lauki	simti t.	6100 K	nedēļas – mēneši
	Plankumi	līdz 100 t.	4200 K	dienas – mēneši
Hromosfēra	Spikulas	0.5 x 10 t.	8 – 20 kK	5-15 min.
	Protuberances	līdz 100 t.		dienas - mēneši
	Uzliesmojumi		līdz 20 MK	minūtes - stunda
Vainags	Koronāli caurumi	līdz 500 t.	1.5 MK	mēneši
	Koronāli izvirdumi	miljoni	vairāki MK	stundas

Outline

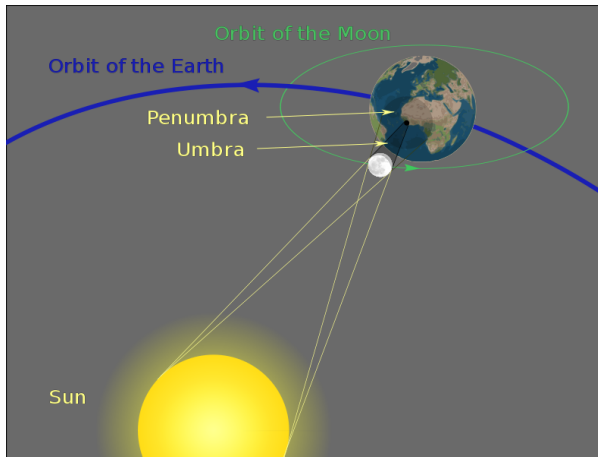
- 1 Saules iekšējā struktūra
 - Vispārīgs ieskats
 - Turbulence Saulē un zvaigznēs
- 2 Saules redzamā virsma
 - Fotosfēra
 - Saules seismoloģija
 - Saules aktivitāte uz virsmas
 - Hromosfēra
- 3 Saules vainags un Saules vējš
 - Saules izskats UV un rentgen- un radiostarojumā
 - Saules vējš, vainaga masas izvirdumi
- 4 Saules-Zemes sakari
 - Aptumsumi
 - Mijiedarība ar Zemes magnetosfēru
 - Ietekme uz cilvēku un ierīcēm

Saules aptumsums

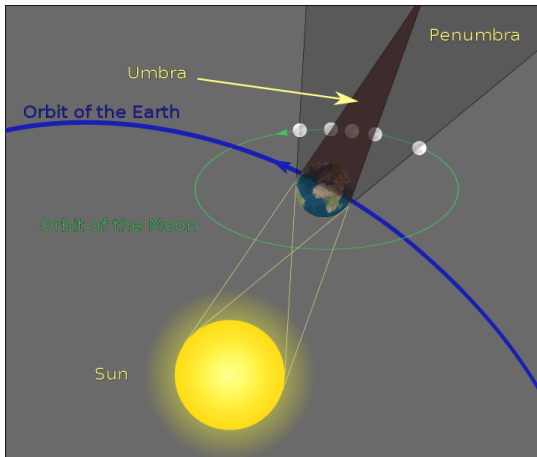


- Mēness iziet starp novērotāju un Sauli un pilnībā aizsedz Saules disku
 - Zemes un Mēness orbītu eliptiskuma dēļ var notikt pilnais vai gredzenveida aptumsums

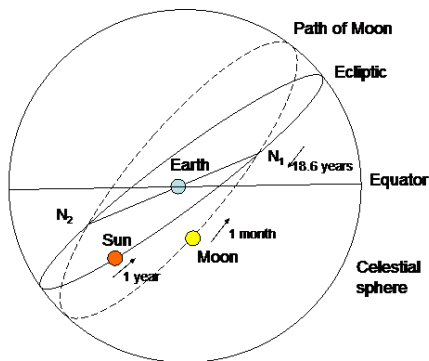
Saules aptumsuma ģeometrija



Mēness aptumsuma ģeometrija

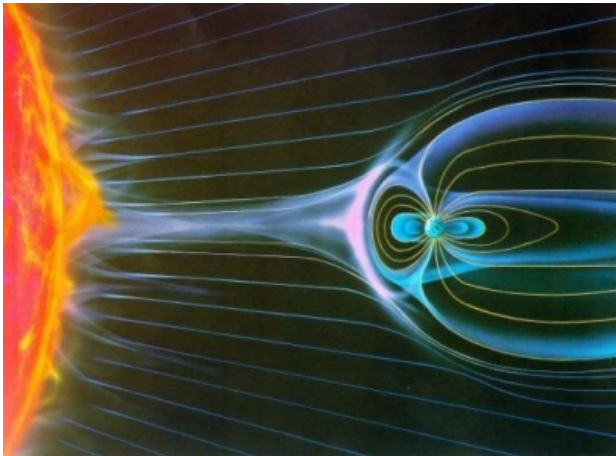


Aptumsumu nosacījums



- Nosacījums: Saulei jāatrodas tuvu Mēness orbītas mezglu punktiem N_1 un N_2
- Aptumsumi notiek pa pāriem divreiz gadā
- Katru pusgadu ir 1-2 Saules un 1-2 Mēness aptumsumi

Saules vējš un Zeme



Ietekme uz Zemi

Nedzīvā daba	Dzīvā daba	Tehnika
Magnētiskās vētras	Radiācija kosmonautiem	Elektroapgādes pārtraukumi
Polārblāzmas	Ietekme uz stresam pakļautu organismu	Īsviļņu radiosakaru traucējumi
Izmaiņas jonosfērā	Dažu dzīvnieku sugu vairošanās	Pavadoņu bremzēšanās
Klimata maiņa	Koku gadskārtu gredzenu biezuma maiņa	Pavadoņu elektronikas bojājumi

Saules iekšējā struktūra
Saules redzamā virsma
Saules vainags un Saules vējš
Saules-Zemes sakari

Aptumsumi
Mijiedarība ar Zemes magnetosfēru
Ietekme uz cilvēku un ierīcēm

Paldies par uzmanību!

