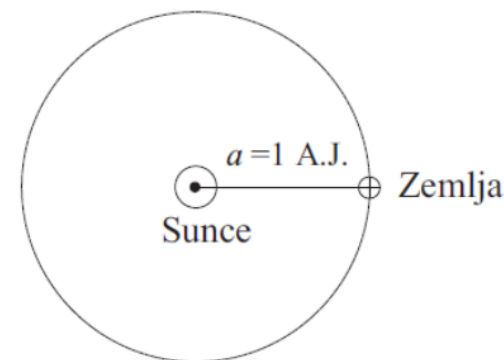


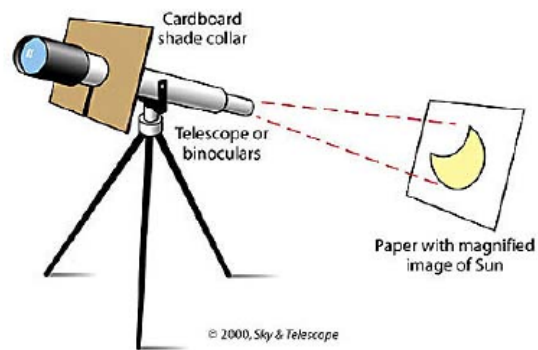
Opšte karakteristike Sunca

- Žuta zvezda na glavnom nizu (**G2 V**)
- Starost oko **5×10^9 god**
- Srednje rastojanje od Zemlje **$a = 1 \text{ a.j.} = 149.6 \times 10^6 \text{ km}$**
- Uglovni radijus **$\rho = 960'' = 16'$**
- Radijus = **696000 km** ($R=a \sin \rho$)
- Masa Sunca = **$2 \times 10^{30} \text{ kg}$**
- Solarna konstanta **$C = 1367 \text{ W/m}^2$** - ukupna količina energije koja padne normalno na jediničnu površinu na rastojanju a u jedinici vremena van Zemljine atmosfere
- Luminoznost Sunca **$L = 4\pi a^2 C = 3.84 \times 10^{26} \text{ W}$**
- Efektivna temperatura **$T_{\text{ef}} = 5777 \text{ K}$**

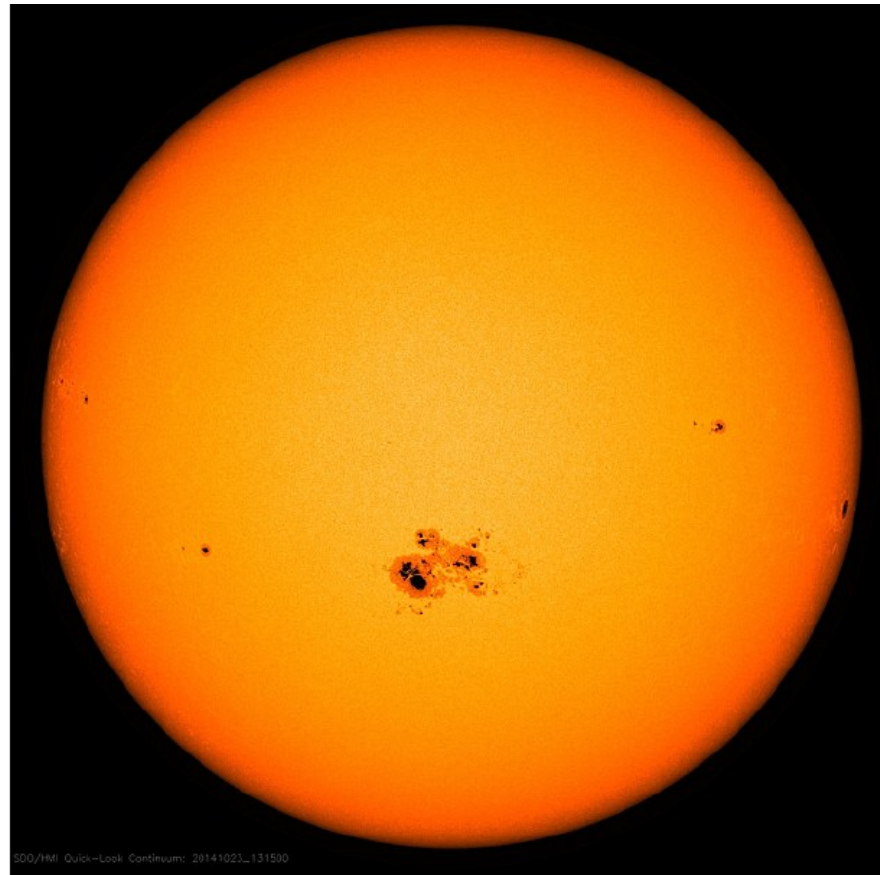
$$M_{\oplus} \cdot \frac{v^2}{a} = G \cdot \frac{M_{\oplus} M_{\odot}}{a^2}$$

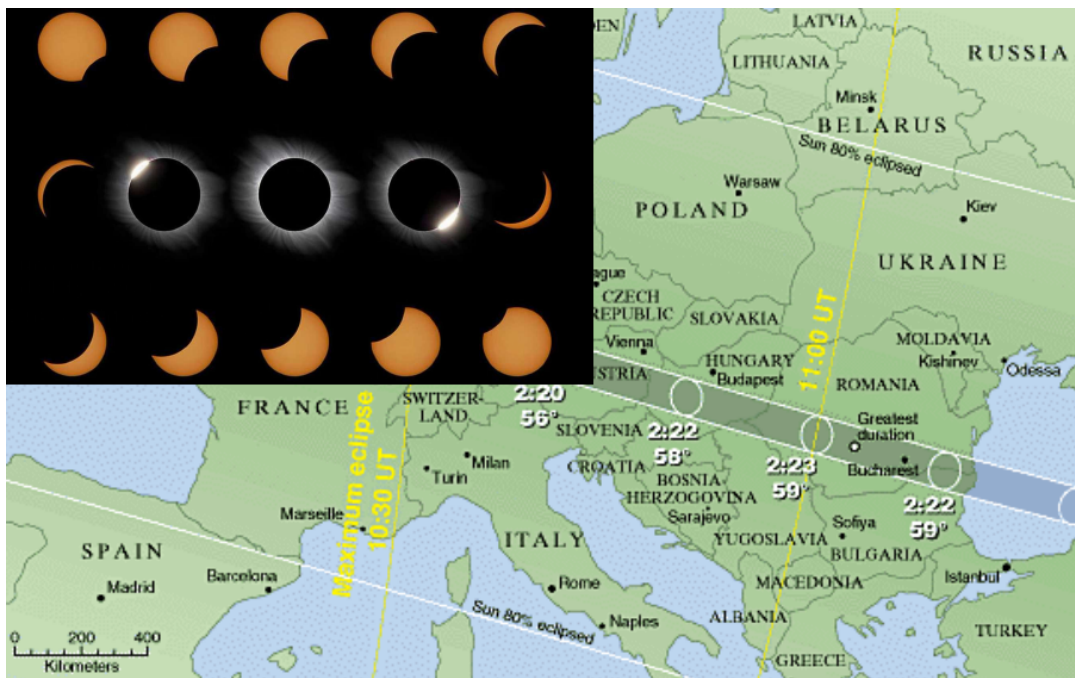
$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\text{ef}}^4$$



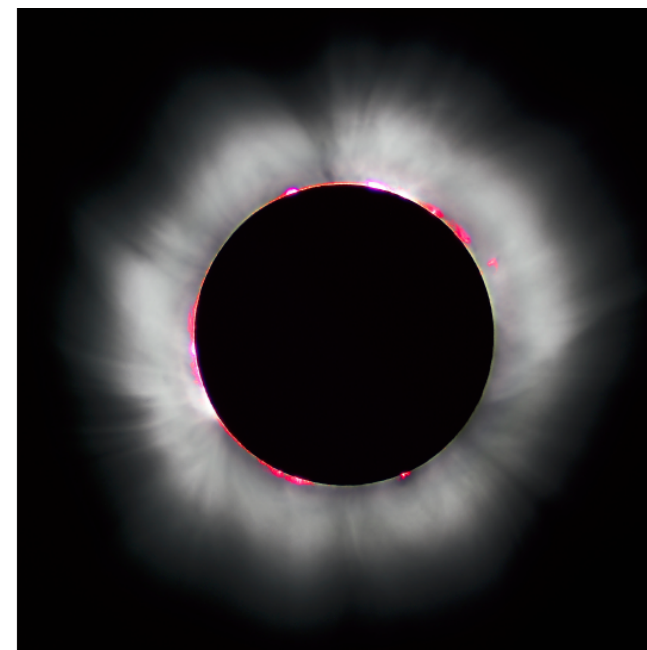


**NIKAKO
GOLIM
OKOM!!!**





**Totalno pomračenje Sunca avgusta 1999.
godine – vidljivo iz Srbije – TOTALITET SME I
VALJA DA SE POSMATRA GOLIM OKOM,
DOK SE DELIMIČNO I NEPOMRAČENO
SUNCE NE SME GLEDATI BEZ ZAŠTITE!!!**



**Nažalost, trenutno
vlada velika
astronomska
nepismenost!!!**

U poslednje vreme je veliki procvat PSEUDONAUKA

Problemi naučne popularizacije

Dositej Obradović: prosvetiteljstvo i đavolja biljka!!!

Rotacija Sunca

- Rotacija je diferencijalna:

$$\omega = 14.4 - 2.7 \sin^2\varphi$$

Brzina rotacije na ekvatoru je oko 2 km/s.

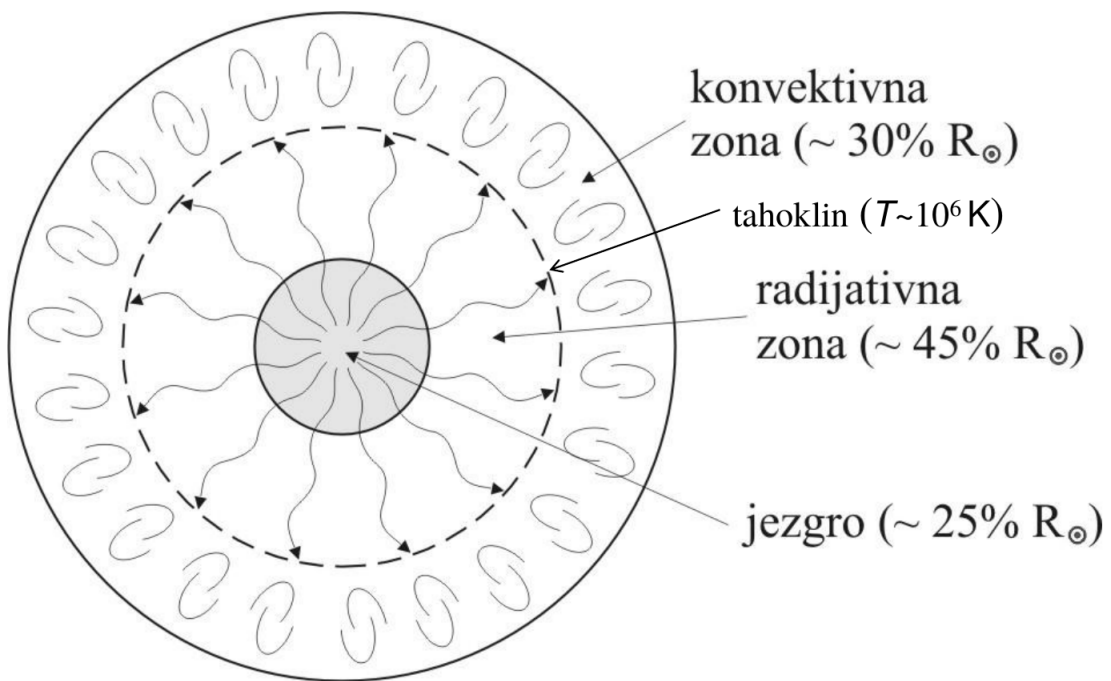
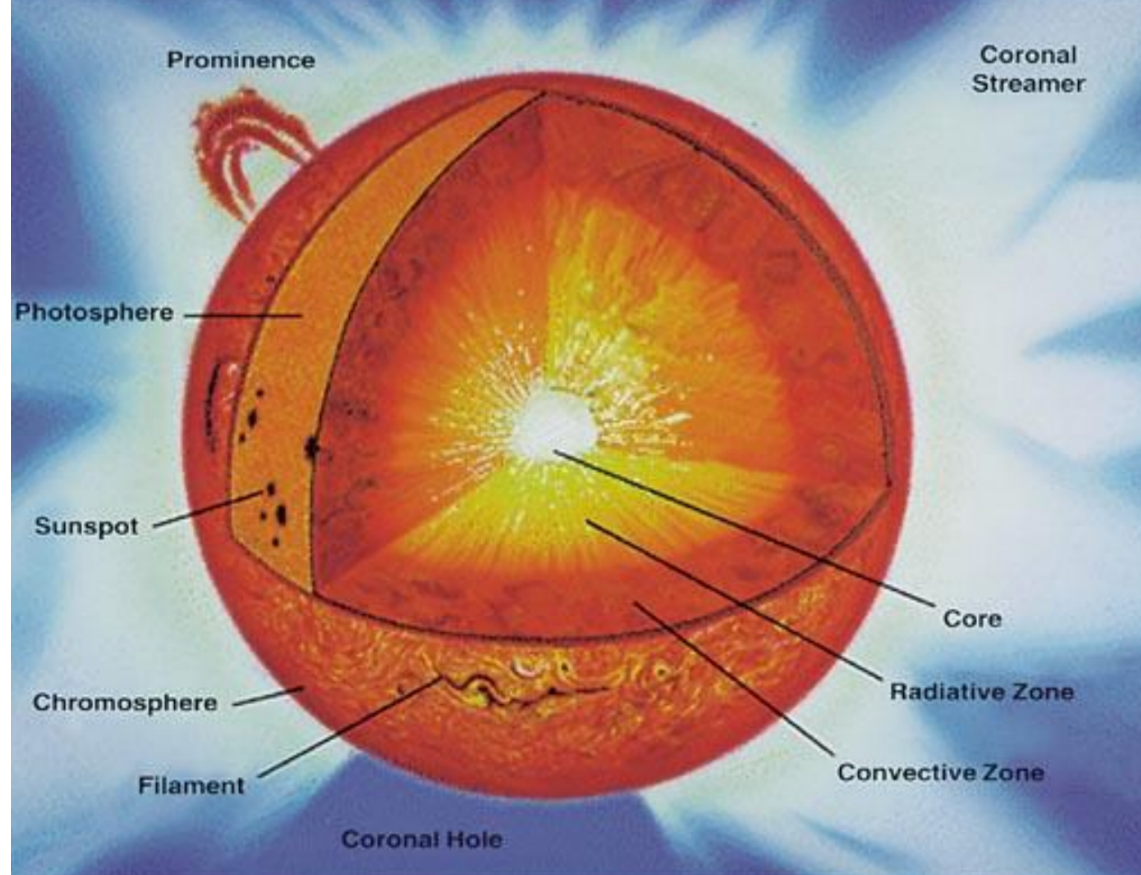
- Period sideričke rotacije na ekvatoru je oko 25 dana i raste ka polovima (oko 30 dana).

Rotacija je diferencijalna – promenljiva ugaona brzina
(tako rotiraju gasovita tela i tela sačinjena od gasne
plazme, kao što su zvezde)

Proučavanje Sunca

- Samo su spoljašnji slojevi Sunca (atmosfera) dostupni direktnom posmatranju (EM zračenje).
- Unutrašnje oblasti su nedostupne direktnom posmatranju. Do nedavno je unutrašnjost samo teorijski modelirana. Danas informacije o unutrašnjosti Sunca dobijamo zahvaljujući helioseizmologiji i detekciji neutrina.

Unutrašnjost Sunca



Rotacija Sunčeve unutrašnjosti

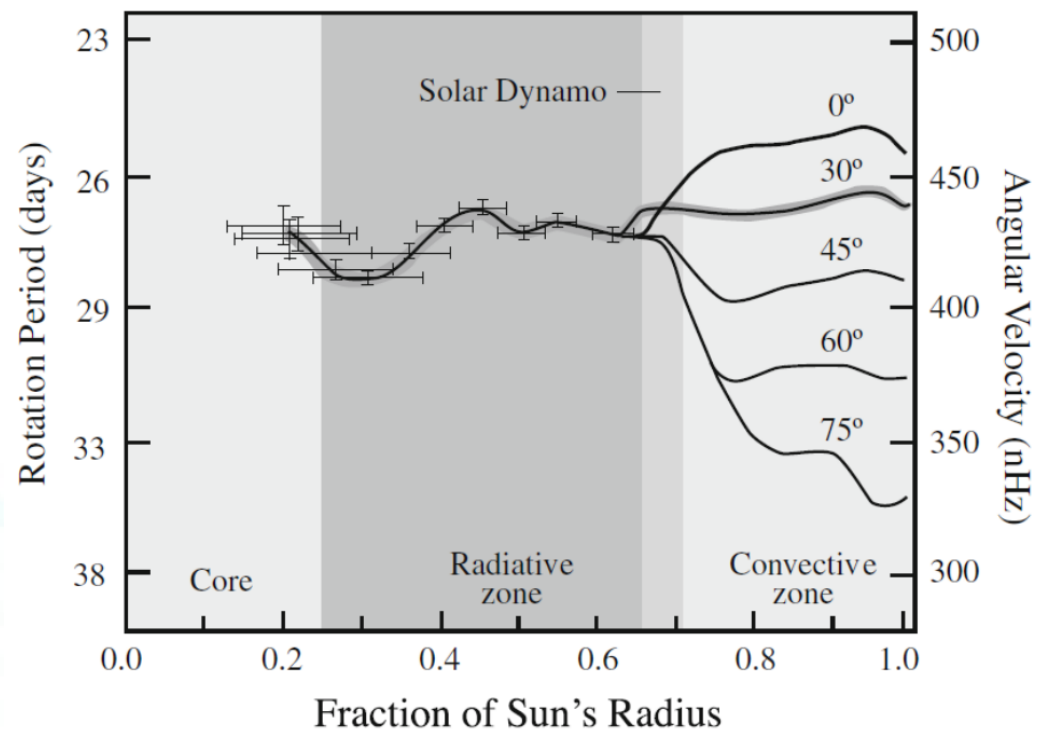
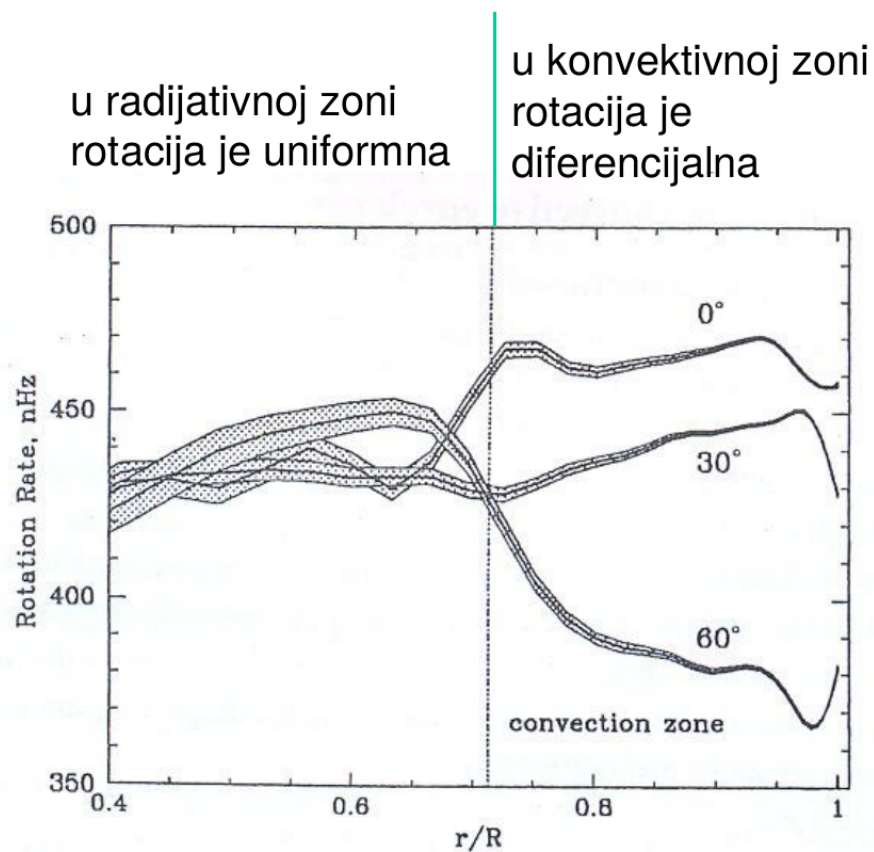
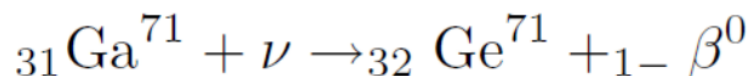
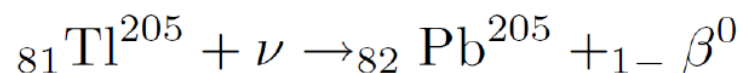
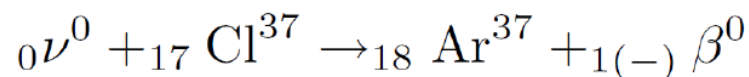


Fig. 3.3. Internal sidereal solar rotation $1/P(\theta)$ as inferred from helioseismological measurements. Three curves show the rotation profile for 0° , 30° , and 60° in latitude θ (from Kosovichev *et al.*, 1997).

Detekcija neutrina

1. Zahvat neutrina jezgrom atoma (neutron → proton):



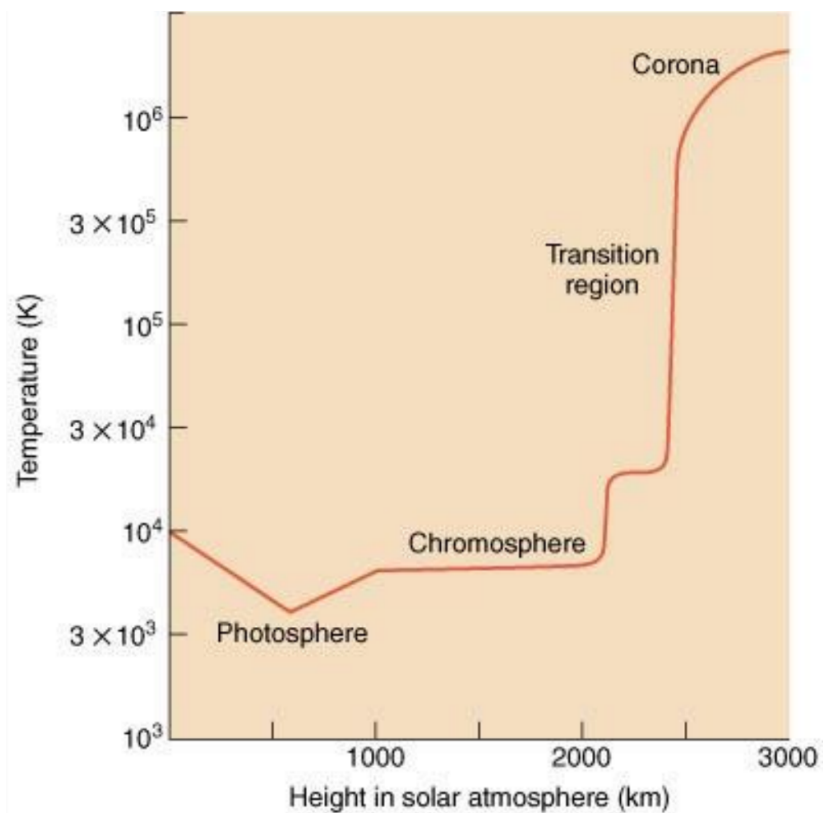
Davis-ov detektor, GALLEX, SAGE,...

2. Rasejanje neutrina o elektrone u molekulima vode

Super Kamiokande, SNO

i zatim Čerenkovljevo zračenje

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



Sunčeva atmosfera

- Fotosfera
- Hromosfera
- Korona

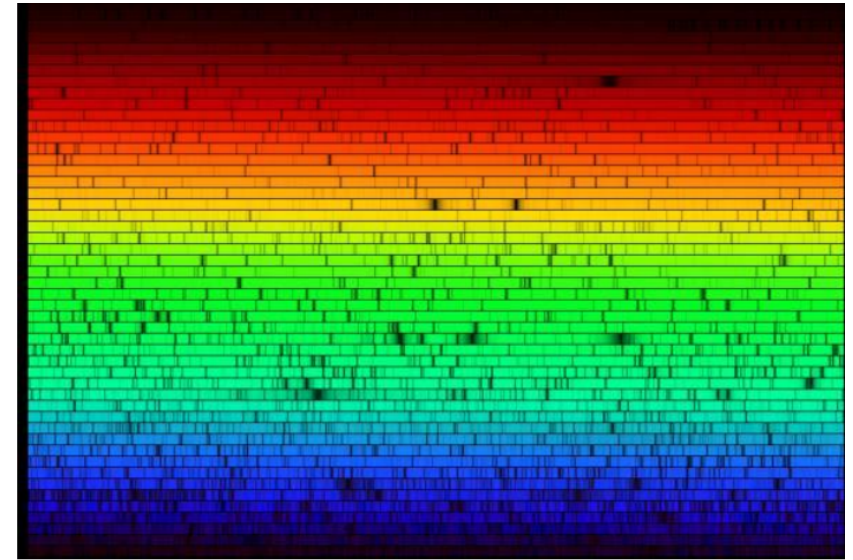
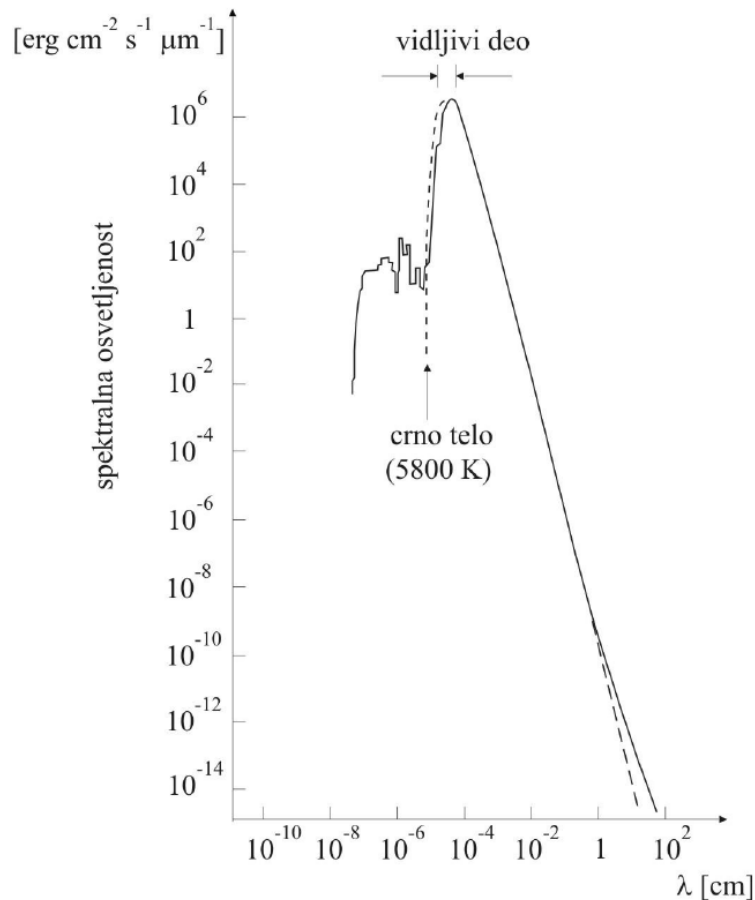
Fotosfera (sfera svetlosti)



- Vidljiva blještava Sunčeva površina
- **Tanak i gust sloj.**
- Vibrira (oscilacije) i ključa (granule).
- **Debljina fotosfere ~ 300 km**
- Koncentracija opada od 10^{16} čestica po cm^3 na donjoj granici do gornje granice za red veličine
- Temperatura opada od oko **7000 K** (na donjoj granici) do oko **4000 K** (na gornjoj granici)
- **Efektivna temperatura: $T_{\text{eff}} = 5777 \text{ K}$**
- Vodonik i helijum uglavnom neutralni, teži elementi uglavnom jonizovani.

Spektar fotosfere

- Skoro svu energiju koju Sunce emituje izrači **fotosfera**.

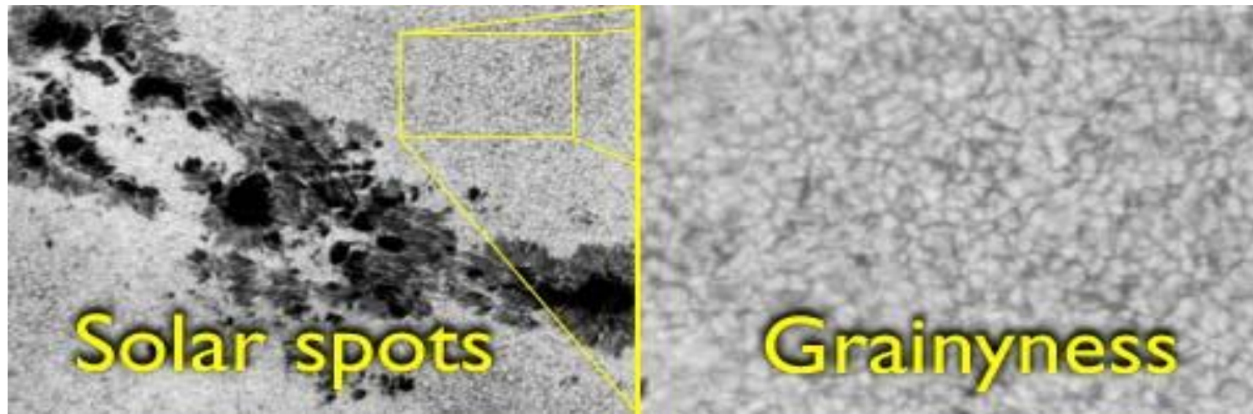


Spektar Sunca u vidljivoj oblasti (~400nm-700nm)

93% ukupne izračene energije fotosfere izrači se u vidljivom (41%) i infracrvenom (52%) delu spektra.

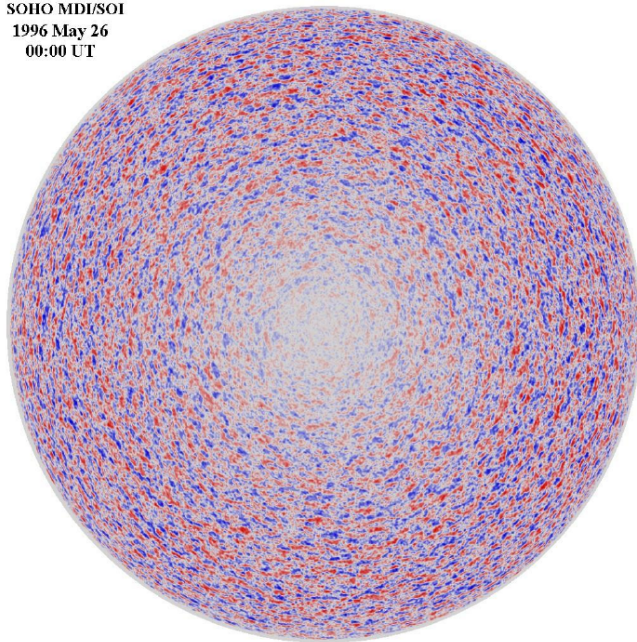
Spektar fotosfere je apsorpcioni:
kontinuum sa maksimumom u žuto-zelenoj boji **sa tamnim (apsorpcionim) linijama** raznih hemijskih elemenata

Fotosferske granule



Granule su mlazevi vrela plazme koji iz konvektivne zone izbijaju na površinu. **Granule čine normalnu strukturu fotosfere**. "Žive" oko 5-10 minuta. **Prečnik im je oko 1000 km.**

SOHO MDI/SOI
1996 May 26
00:00 UT



Supergranule

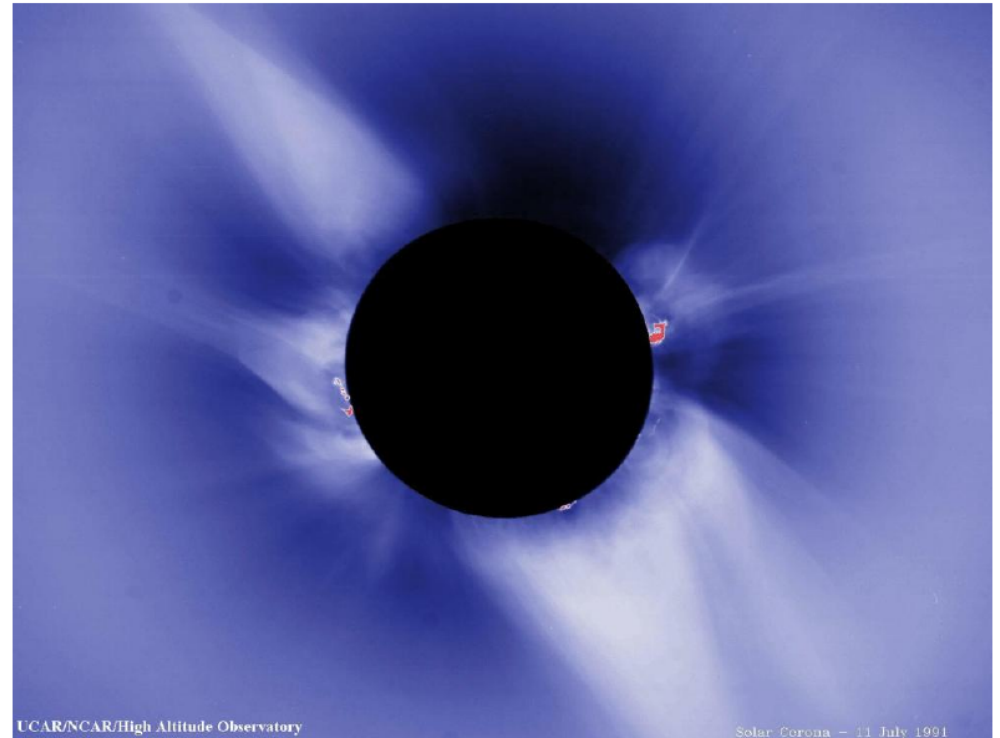
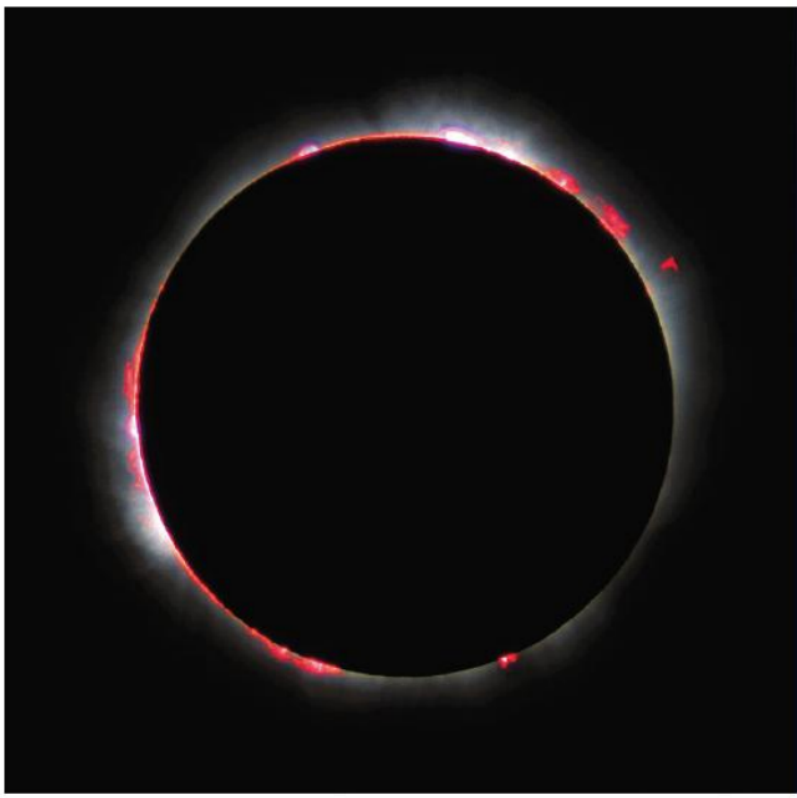
- Doplerovi pomaci spektralnih linija fotosfere otkrivaju podizanje i spuštanje struktura (plazmenih masa) velikih razmera (**prečnika oko 30000km**), koje "žive" oko 20 časova.

Hromosfera (obojena sfera)

- Sloj iznad fotosfere **debljine oko 3000 km** sa mlazevima plazme koji dostižu do 10000 km (dinamički nestabilna sredina)
- Transparentna oblast niske gustine (**milijon puta redja od fotosfere**)
- **Oko 100 puta je manjeg sjaja od fotosfere**
- **Temperatura raste sa visinom: od oko 4000 K** (na donjoj granici hromosfere – temperaturni minimum) **do 10^4K – 10^6 K** (na gornjoj granici) u tzv. prelaznoj oblasti

Hromosfera

- Najbolje se vidi golim okom neposredno pre totalnog pomračenja Sunca



Linijski emisijski spektar
skoro bez kontinuuma

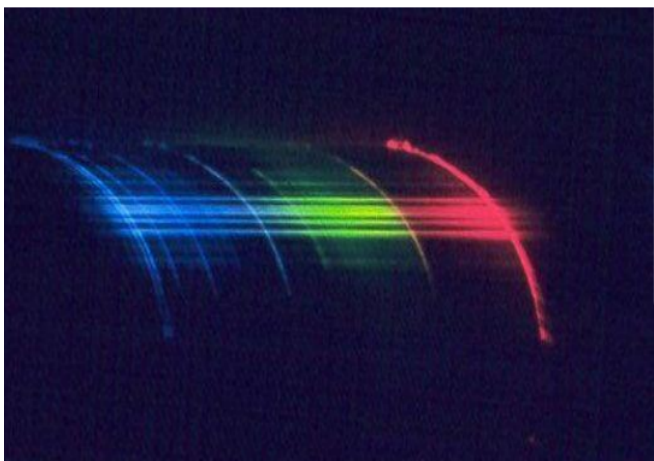
Jake linije vodonika.

Najjača je $H\alpha$ $\lambda 656.3$ nm
(crvena)

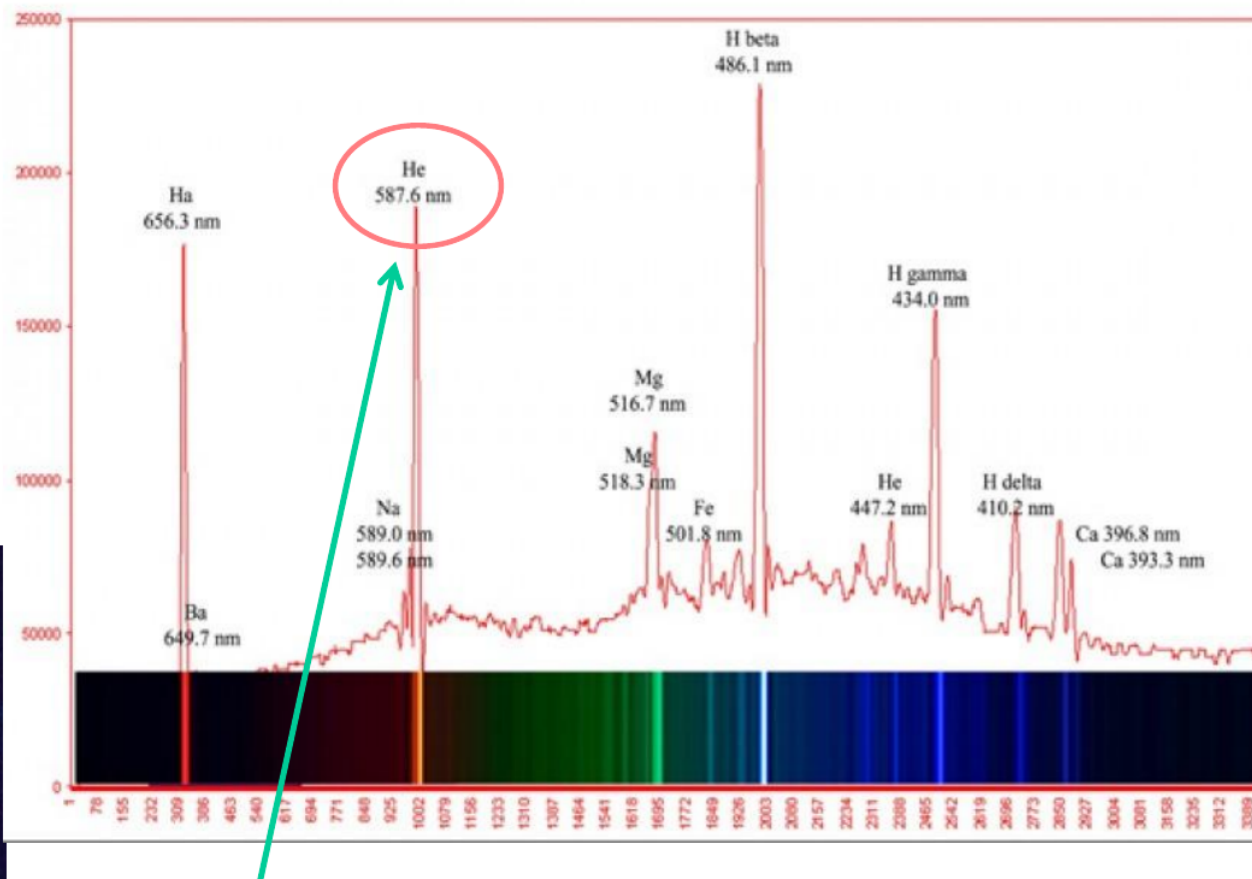
Jake linije Ca II:

linije H i K na $\lambda 393.4$ nm
i $\lambda 396.8$ nm (ljubičasta)

Linije helijuma



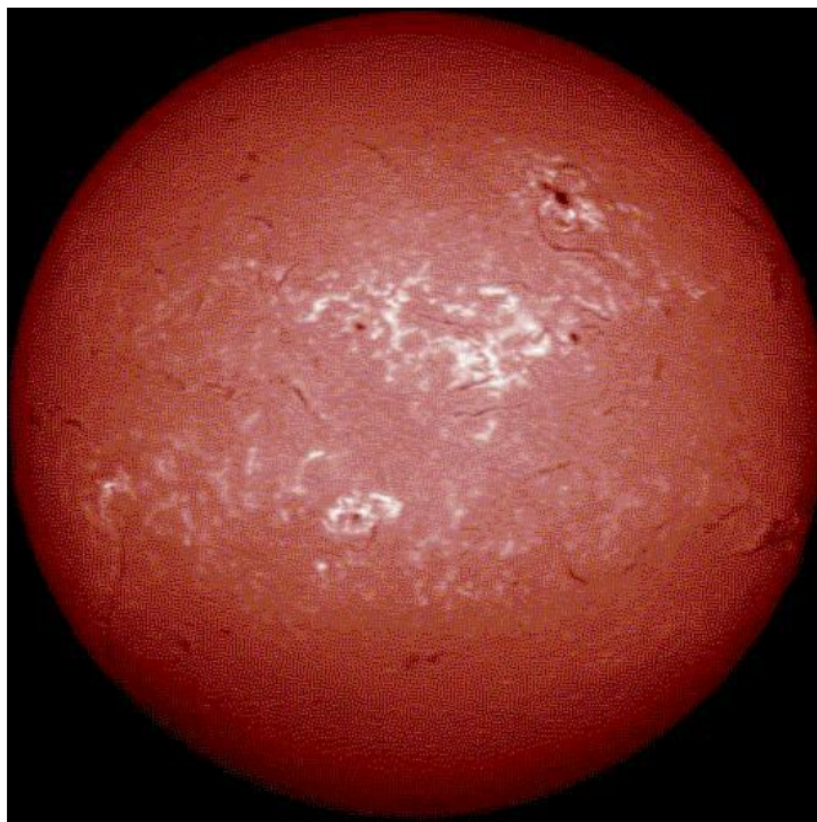
Spektar Sunčeve hromosfere



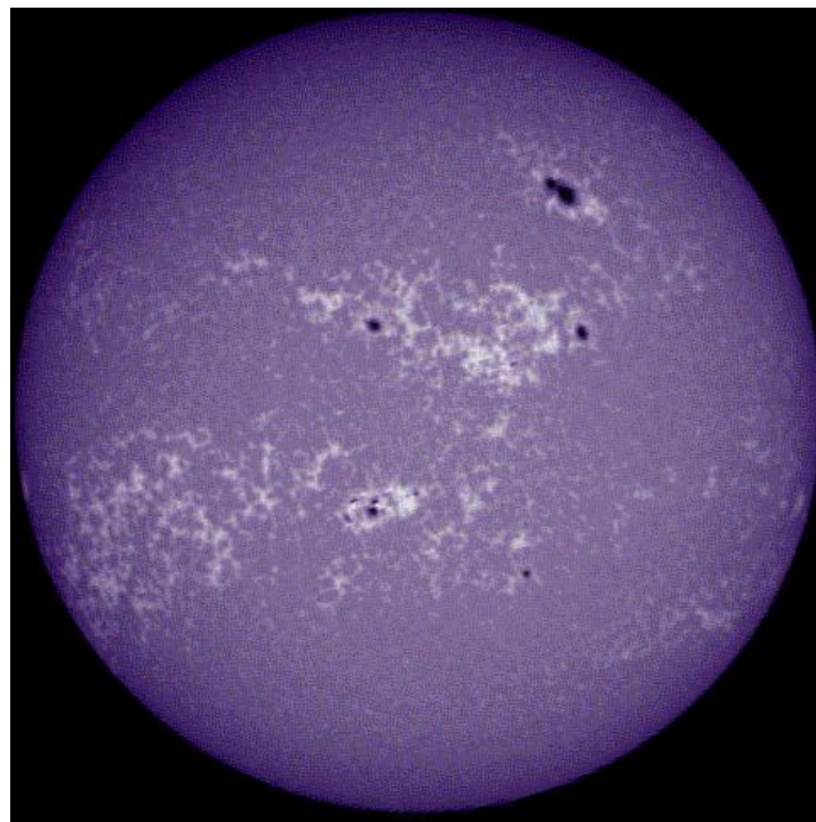
1868. – otkriće helijuma na Suncu (Janssen i Lockyer)

**Hromosfera se može posmatrati i van pomračenja
korišćenjem usko-pojasnih filtara (u određenim
spektralnim linijama)**

spektroheliogrami – snimci Sunca na talasnoj dužini jedne
linije u spektru



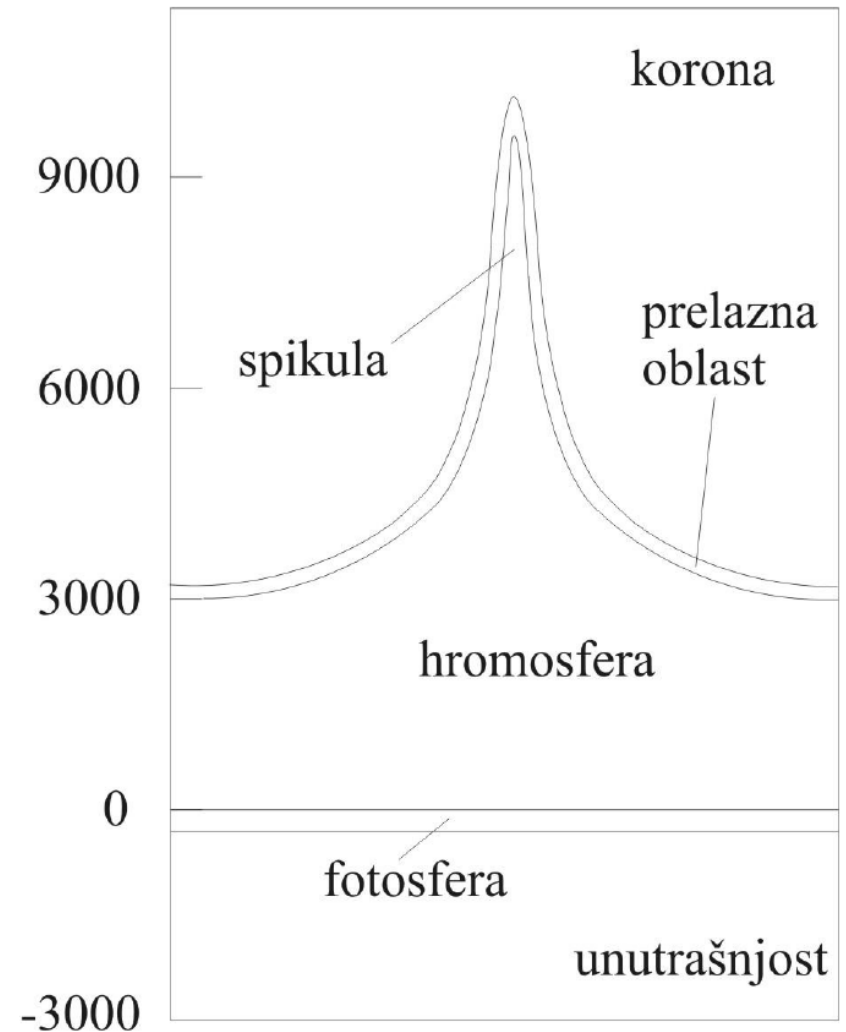
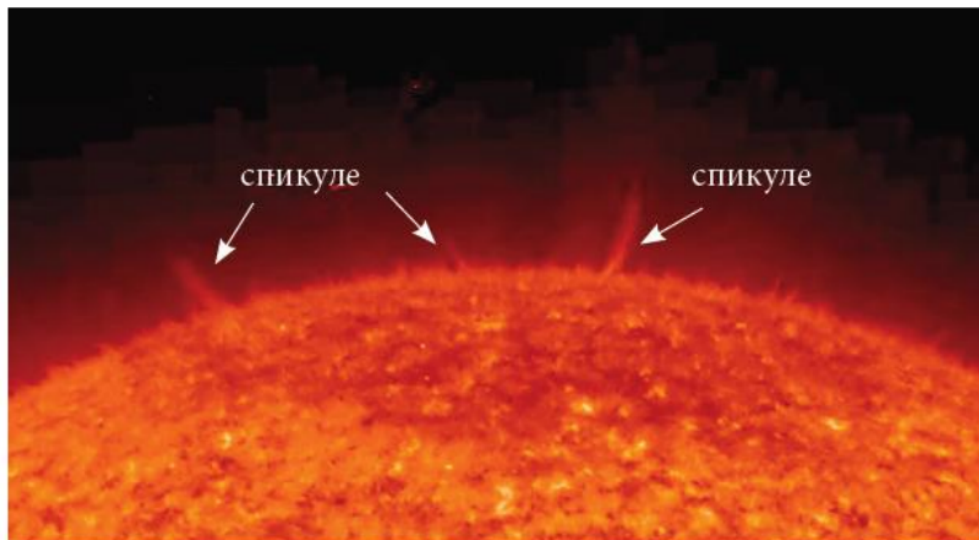
Zračenje H α na 656 nm

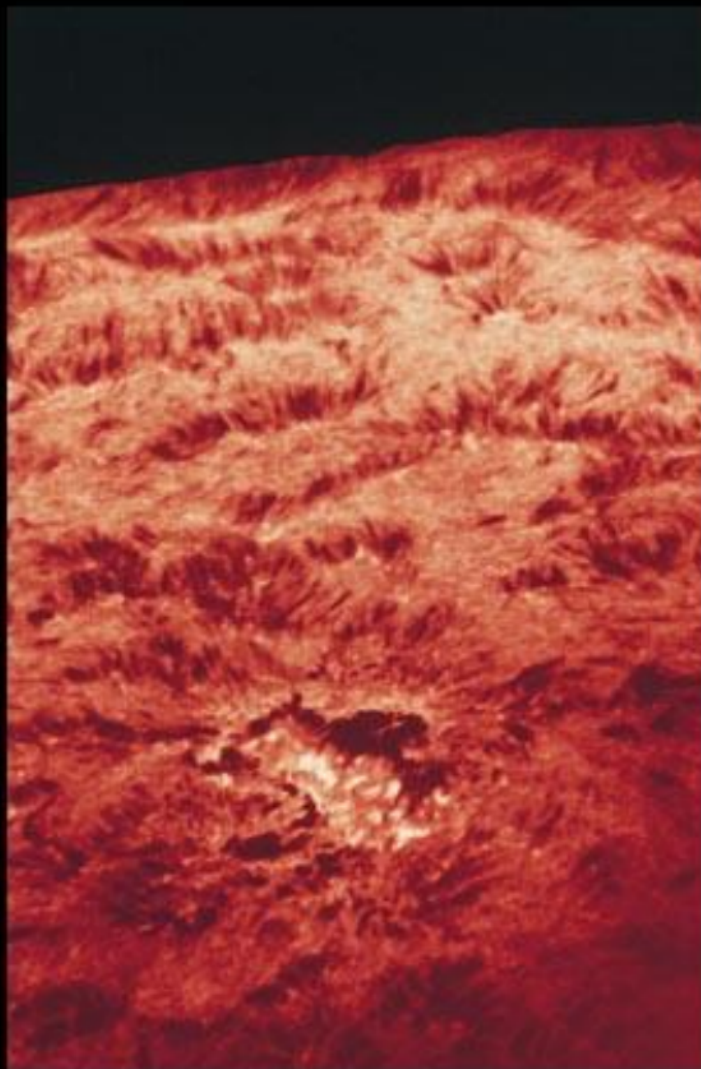


Zračenje Ca II na 393 nm

Hromosfera sa spikulama

Spikule - mlazevi hromosferske plazme
Dostižu visinu od 10000 km.
Prečnici kao prečnici granula.
Spikule žive 5-10 minuta





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

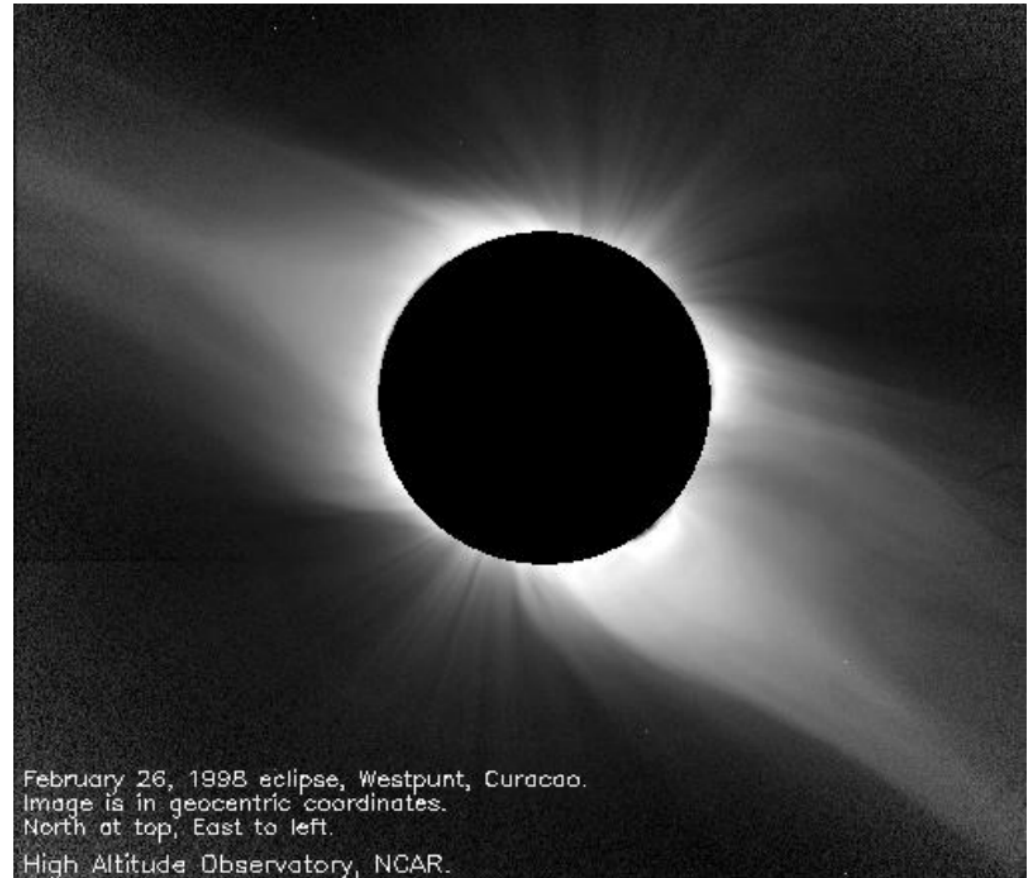
Spikule: mlazevi hromosferske plazme brzinom od oko 20km/s nose materiju u koronu i dostižu visinu i do 10000km

Mreža u K Call je mesto najvećeg vertikalnog kretanja plazme.

Fotosferske supergranule, hromosferske spikule i mreža u K Call liniji su tesno povezani fenomeni.

Korona

- **Ektremno redak gornji sloj Sunčeve atmosfere**
- Vrlo prostrana oblast:
 - Proteže se milionima km (nekoliko Sunčevih radijusa)
- Oblast vrlo visoke temperature:
 - **Temperatura: 1–2 miliona stepeni!**
 - Emituje najviše u X i UV oblasti spektra
- Vrlo je **niske gustine** zbog čega je, uprkos visokoj temperaturi, **sjaj korone oko milion puta manji nego sjaj fotosfere**



Kinetička vs. termodinamička temperatura

KORONA



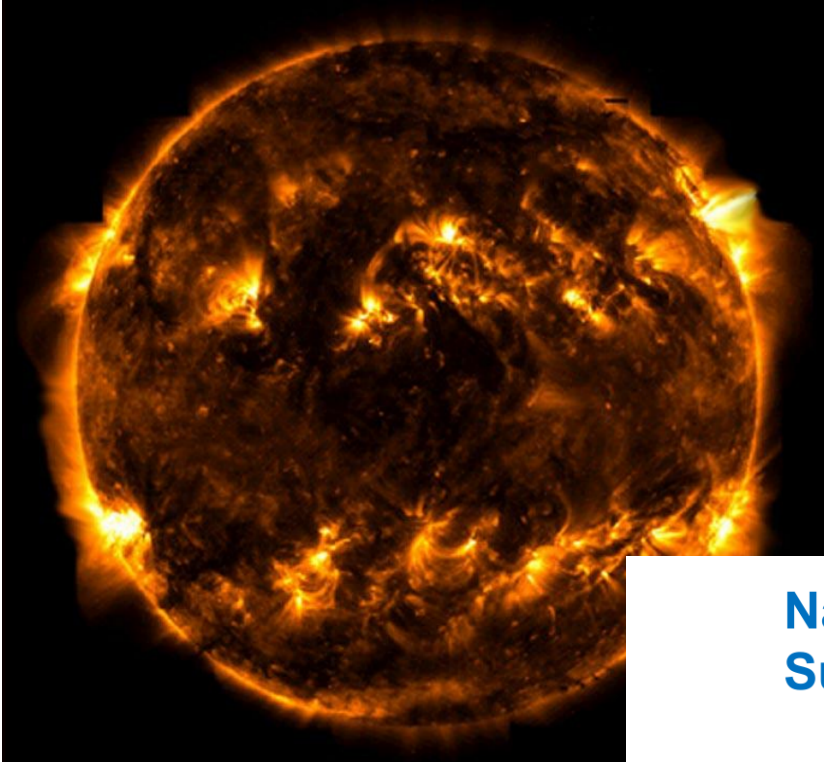
- **K-korona:** unutrašnja korona visoke temperature; spektar je **kontinuum** (svetlost fotosfere je rasejana na slobodnim elektronima) **sa emisionim linijama (E-korona)**
- **F-korona:** spoljašnja korona niže temperature; spektar je **kontinuum** (rasejana svetlost na medjuplanetskim česticama prašine) **sa apsorpcionim (Fraunhoferovim) linijama**

E-korona

- **Linijski emisioni spektar**
- Problem identifikacije – “**koronijum**”
- **Grotrian (1937)** identifikovao crvenu liniju ($\lambda 637.4$ nm) sa linijom **FeX**, a **Edlen (1942)** zelenu liniju ($\lambda 530.3$ nm) sa linijom **FeXIV**. U pitanju su tzv. zabranjeni prelazi.

Wavelength (nm)	Ion	Name	Wavelength (nm)	Ion
338.8	Fe XIII		670.2	Ni XV
423.2	Ni XII		789.2	Fe XI
530.3	Fe XIV	Green line	802.4	Ni XV
569.4	Ca XV	Yellow line	1074.7	Fe XIII
637.4	Fe X	Red line	1079.8	Fe XIII

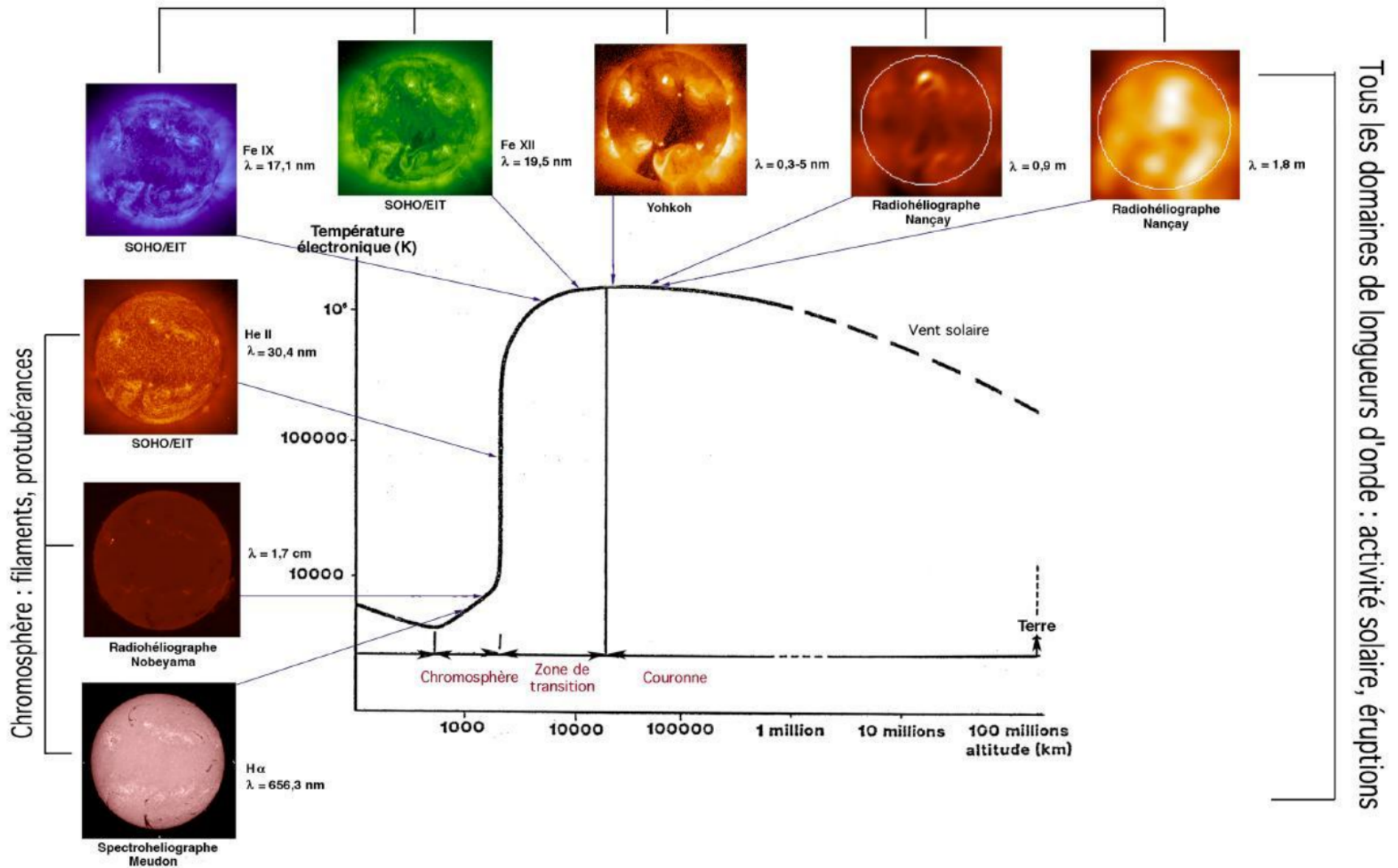
- Znači, **temperatura u koroni mora biti reda milion K !**
- **Problem zagrevanja korone?** Udarni talasi, magnetna rekonekcija,...



Najjače X i UV emisione linije koje potiču iz Sunčeve donje korone i prelazne oblasti

Wavelength (nanometers)	Emitting ion	Formation temperature (kelvin)
1.70	Iron, Fe XVII	4,000,000
1.90	Oxygen, O VIII	3,100,000
2.16	Oxygen, O VII	2,000,000
3.37	Carbon, C VI	1,300,000
17.11	Iron, Fe IX	630,000
17.45	Iron, Fe X	1,000,000
18.40	Oxygen, O VI	320,000
19.51	Iron, Fe XII	1,400,000
28.42	Iron, Fe XV	2,100,000
30.38	Helium, He II	60,000
33.54	Iron, Fe XVI	2,500,000
33.61	Iron, Fe XVI	2,500,000
46.52	Neon, Ne VII	630,000
60.98	Magnesium, Mg X	1,300,000
155.0	Carbon, C IV	126,000

Couronne solaire : boucles magnétiques, trous coronaux



Sunčev vetar

- Stalno isticanje materije iz korone u međuplanetski prostor
- Sastoji se od elektrona i protona
- Napušta koronu brzinom od oko 15km/s, dok njegova brzina dostiže **oko 400km/s u blizini Zemlje**
- U blizini Zemlje koncentracija je **oko 10 čestica po cm³**
- Brza komponenta Sunčevog vetra (oko 800km/s)
- Sunčev vetar se proteže desetinama AJ od Sunca

Oblici Sunčeve aktivnosti

- **Fotosfera:**
 - **Pege** (niža T nego u fotosferi, jako B)
 - Fakule (gušće, toplije i sjajnije oblasti nego fotosfera)
- **Hromosfera:**
 - Plaže (gušće, toplije i sjajnije od hromosfere)
 - **Protuberance** (mlazevi hromosferske plazme u koroni)
 - **Erupcije** (kratkotrajni bljeskovi; iznad pega)
- **Korona:**
 - Koronalne rupe
 - Koronalne kondenzacije
 - Sporadični impulsi radio-zračenja

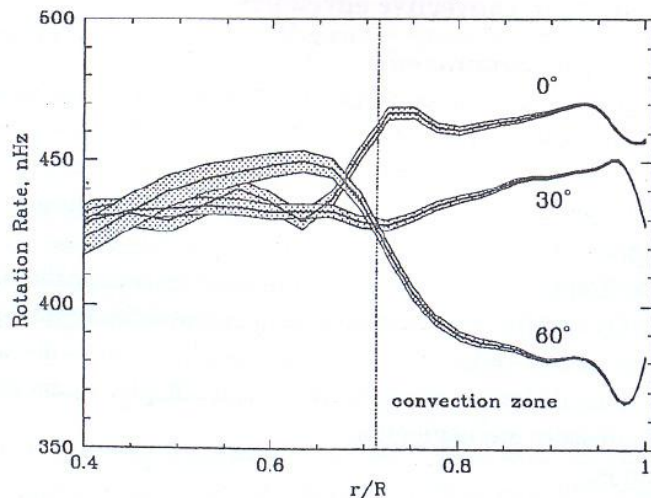
Zajednički uzrok svim oblicima Sunčeve aktivnosti je **magnetno polje**.

Svi oblici aktivnosti pokazuju **promene u toku 11-godišnjeg ciklusa**.

Sunčevo magnetno polje

- Opšte magnetno polje Sunca je **dipolno** (magnetne linije sile su u meridijanskoj ravni) i slabo (1-5G)
- Zbog diferencijalne rotacije i “zamrznutosti” magnetnog polja u plazmi, dolazi do namotavanja magnetnih linija sile i stvaranja **toroidalnog** magnetnog polja.

Diferencijalna rotacija u konvektivnoj zoni

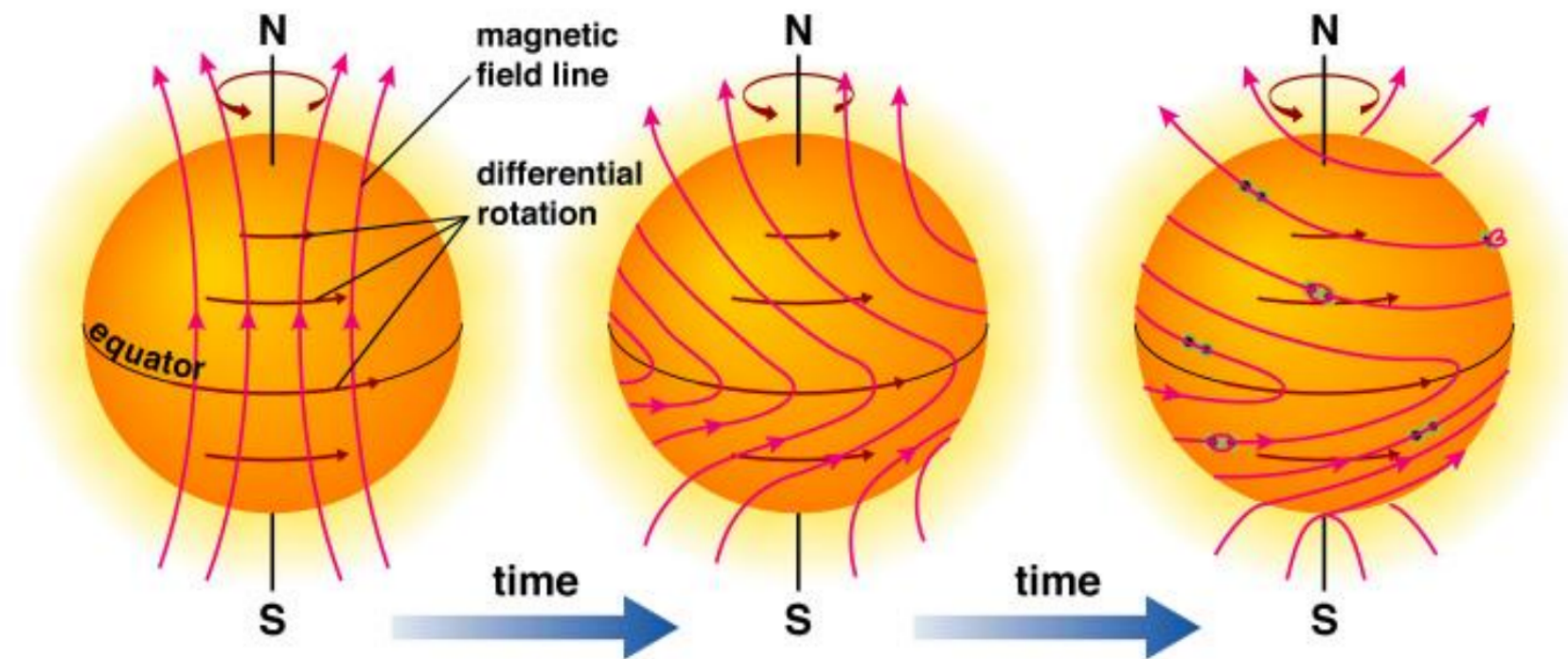


Alfvenova teorema o zamrznutosti magnetnog polja u plazmi

U fluidu beskonačne elektroprovodnosti magnetno polje je “zamrznuto” u fluidu i mora se kretati zajedno sa njim. Fluks magnetnog polja kroz zatvorenu konturu sastavljenu od istih delića fluida ne menja se u toku kretanja konture - kao da su delići fluida “zalepljeni” za magnetne linije sile.

Uslov održanja magnetnog fluksa kroz zatvorenu provodnu konturu pri njenoj deformaciji : $\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \text{const.}$

Stvaranje toroidalnog polja



Izbijanjem gusto pakovanih linija sile toroidalnog polja na površinu nastaju jaka lokalna magnetna polja ($> 2000\text{G}$), javljaju se **pore** koje rastu i obrazuju se **pege**.

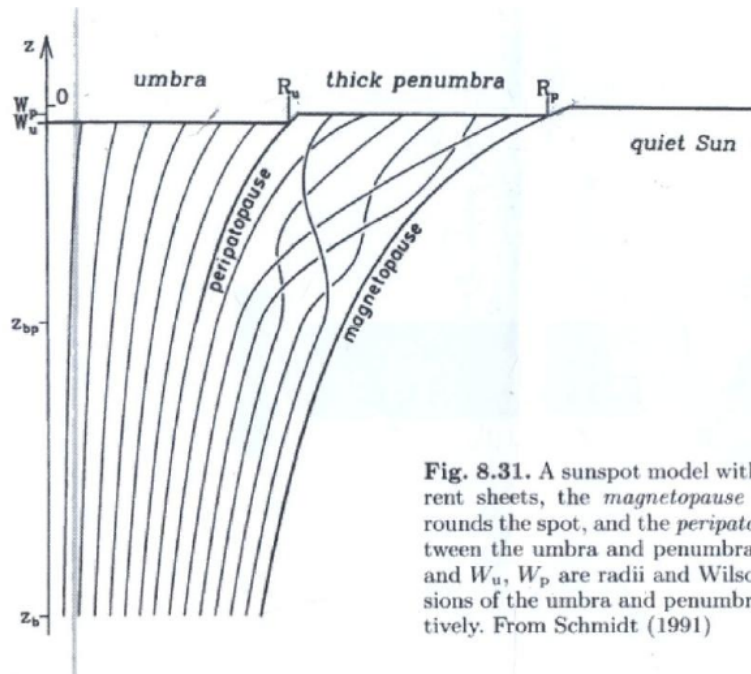
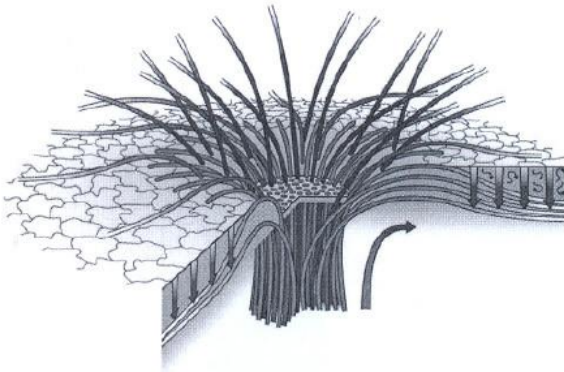
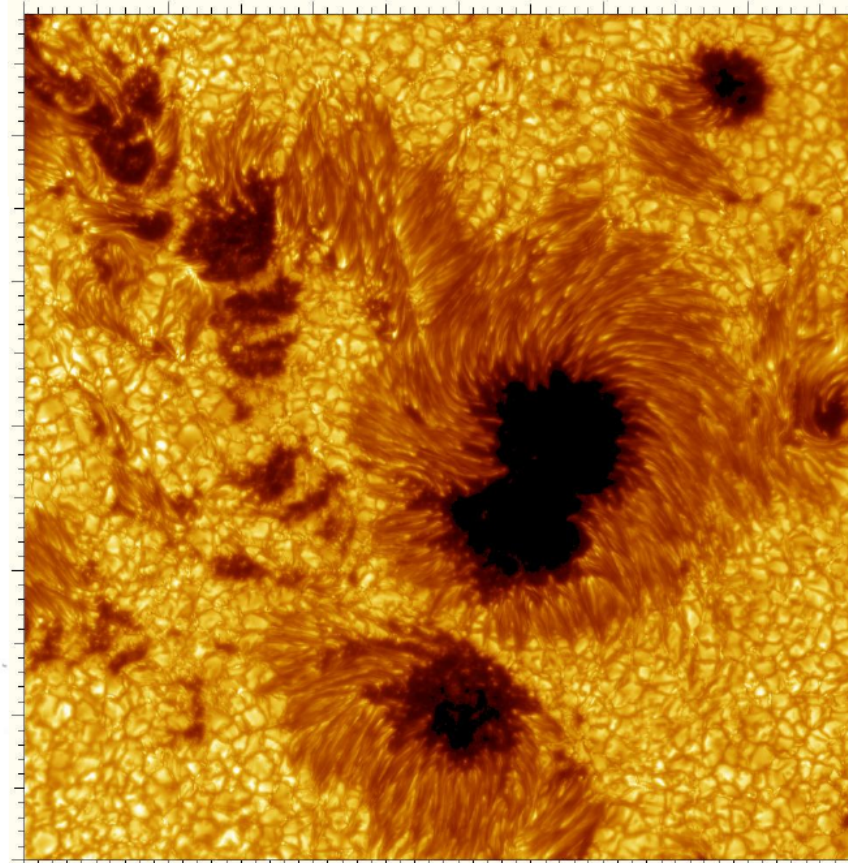
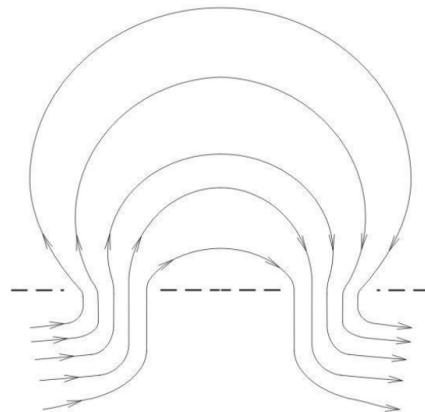


Fig. 8.31. A sunspot model with two current sheets, the *magnetopause* that surrounds the spot, and the *peripatopause* between the umbra and penumbra. R_u , R_p , and W_u , W_p are radii and Wilson depressions of the umbra and penumbra, respectively. From Schmidt (1991)

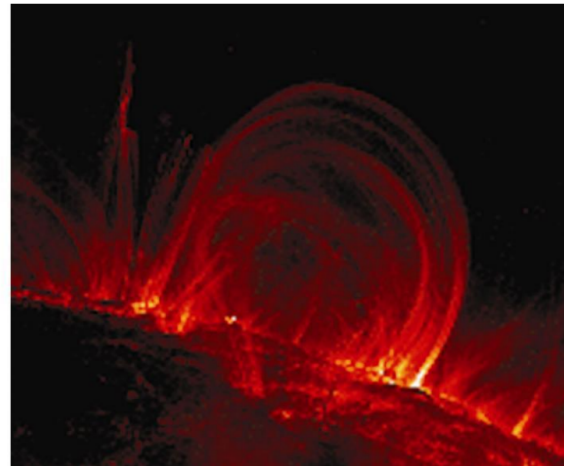


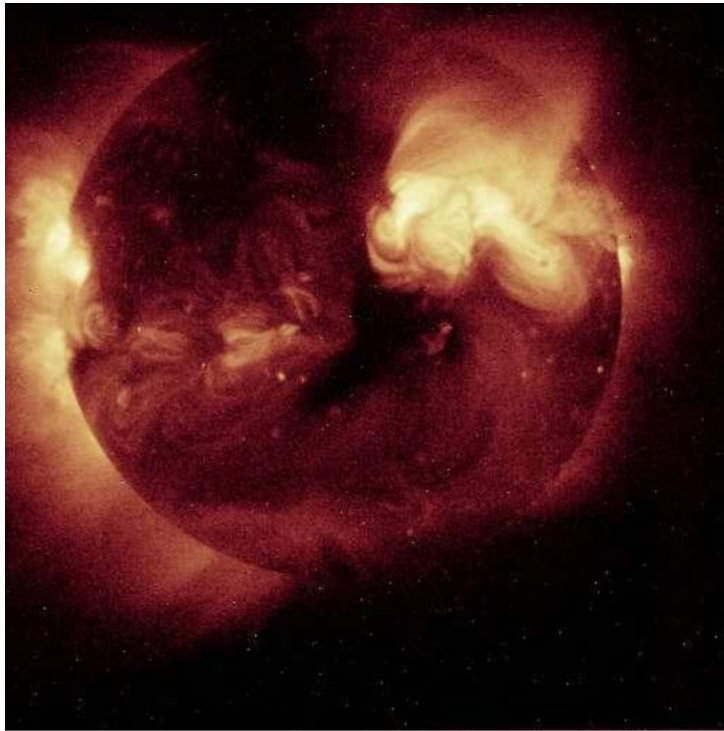
- Lokalna magnetna polja isplivavaju kroz fotosferu i hromosferu do korone kao zatvorene petlje (lukovi) – **oblasti zatvorenog magnetnog polja** sa većom koncentracijom čestica (**koronalne kondenzacije**).
- Kroz **oblasti otvorenog magnetnog polja** plazma ističe u više slojeve i napušta Sunce – to su oblasti smanjene koncentracije čestica (**koronalne rupe**)

Magnetni lukovi kao “klopke” za plazmu
oblasti zatvorenog magnetnog polja na Suncu
(potoci jonizovanog gasa duž magnetnih linija sila)



Koronalne petlje

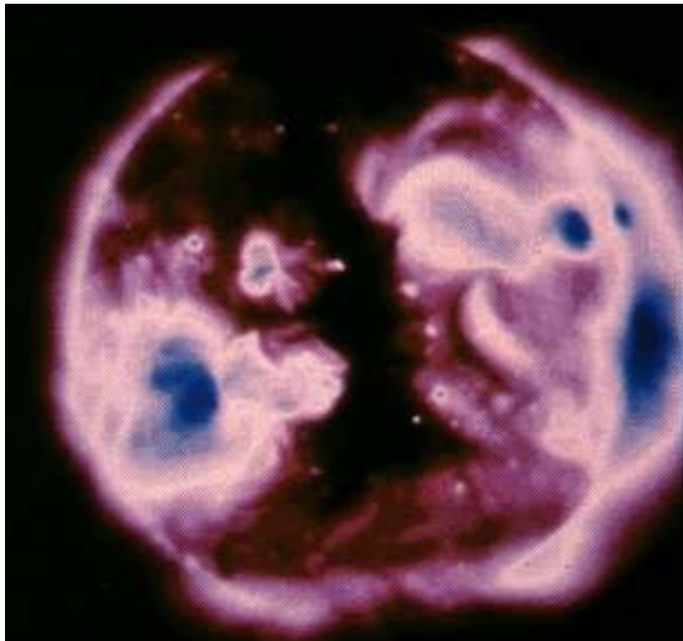
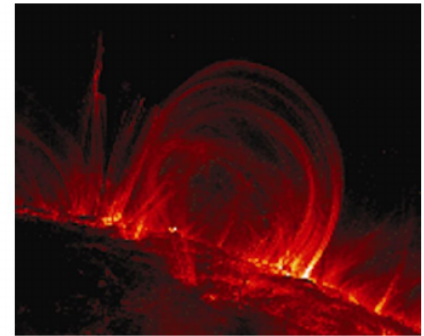
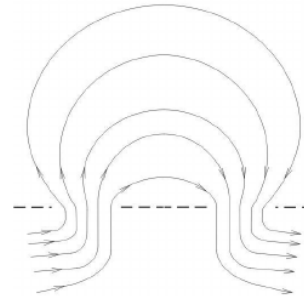




Korona

Sateliti sa detektorima UV i X zračenja pokazuju:

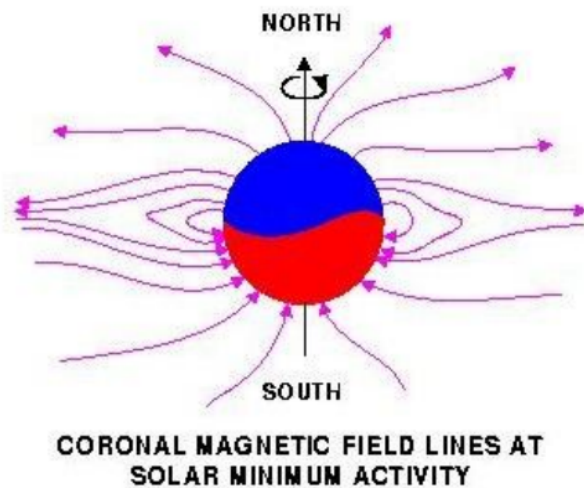
- **vrlo sjajne aktivne regione** - oblasti zatvorenog magnetnog polja na Suncu



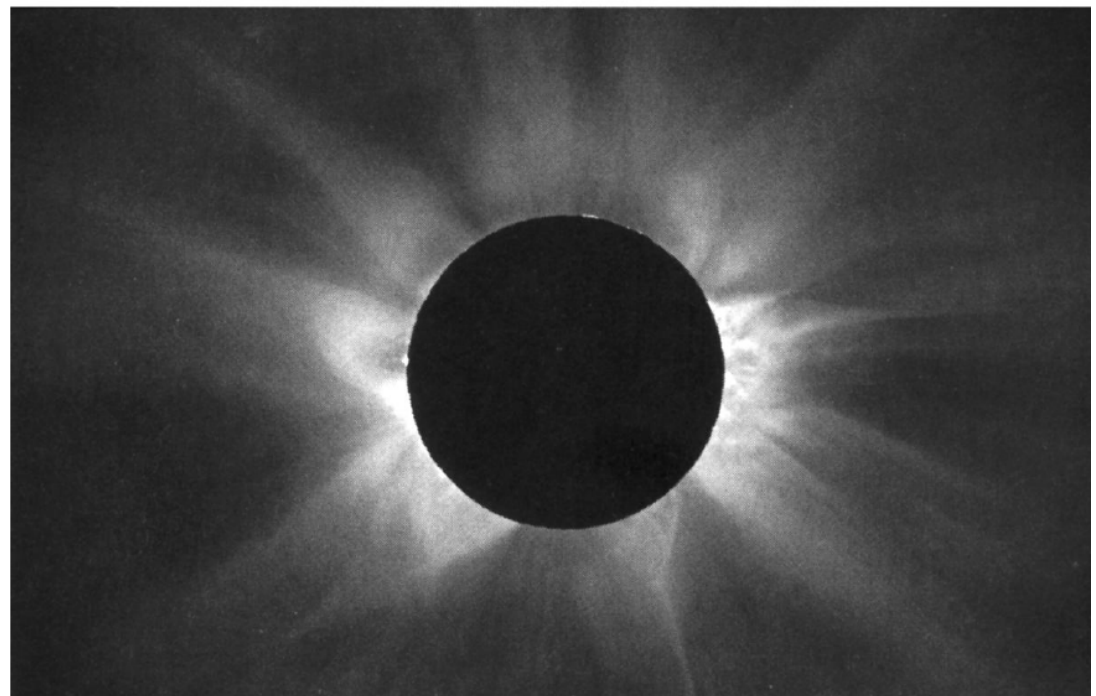
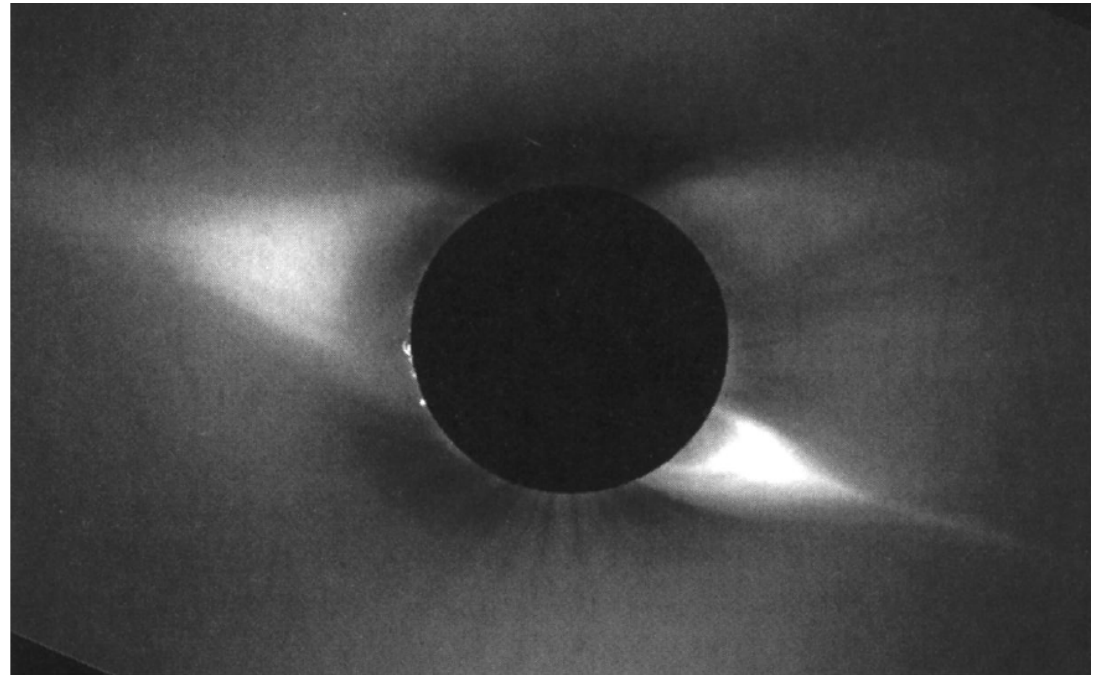
- **tamne “koronalne rupe”** iz kojih ističe gas (hladniji i ređi) - oblasti otvorenog magnetnog polja na Suncu

Korona u minimumu i maksimumu aktivnosti

U minimumu Sunčeve aktivnosti najjače je **dipolno** (**poloidalno**) magnetno polje



U maksimumu Sunčeve aktivnosti najjače je **toroidalno** (**azimutalno**) magnetno polje



**U svakom novom ciklusu
magnetno polje menja
polaritet!**

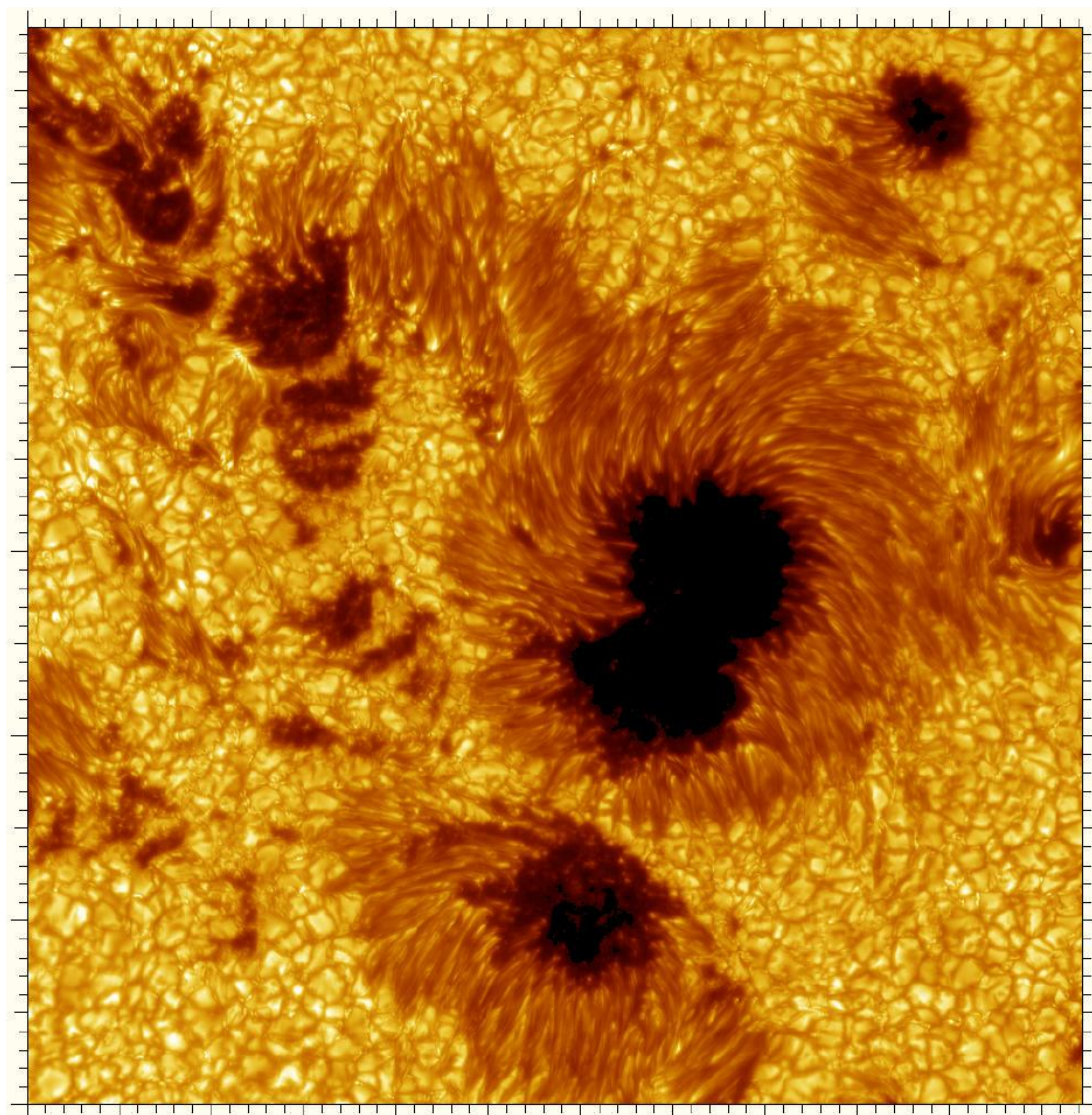
Promena polariteta objašnjava se pojavom novog dipolnog magnetnog polja suprotno orijentisanog u odnosu na prethodno.

**Najvažniji oblici Sunčeve
aktivnosti**

- Pege
- Protuberance
- Erupcije

Sunčeve pege

osnovni indeks Sunčeve aktivnosti



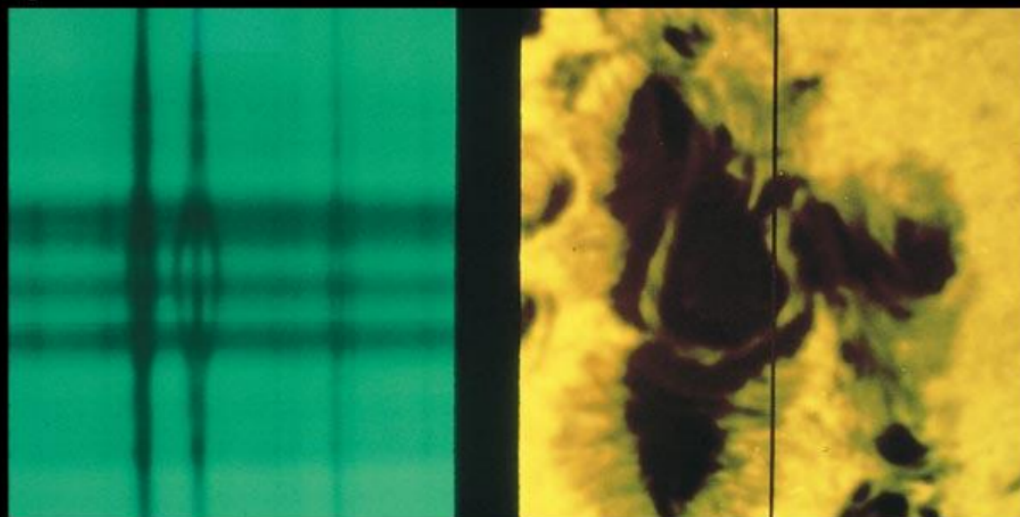
Pege su oblasti izuzetno jakog magnetnog polja

George Hale (1908)

Zeemen-ov efekat

Cepanje spektralnih linija u magnetnom polju. Rastojanje medju komponentama linije proporcionalno je jaćini magnetnog polja.

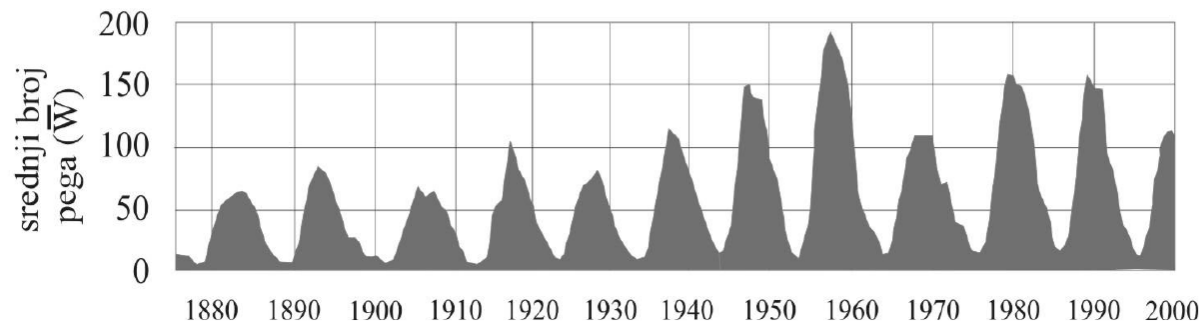
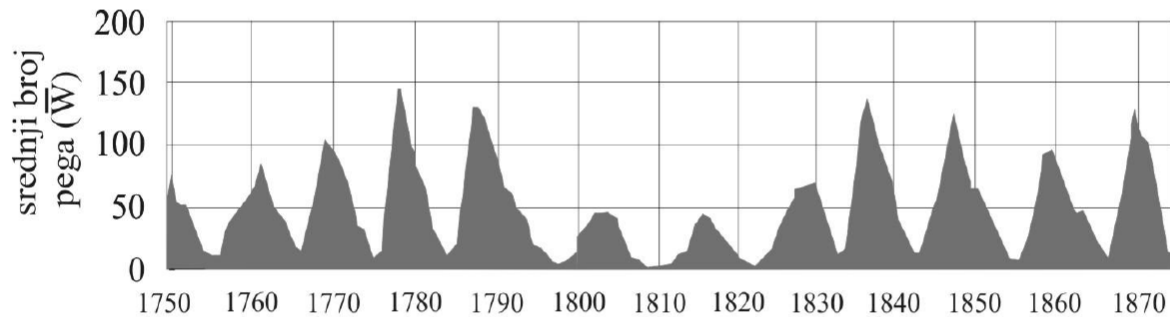
Fraknoi/Morrison/Wolff, Voyages Through the Universe, 2/e
Figure 14.15 The Zeeman Effect



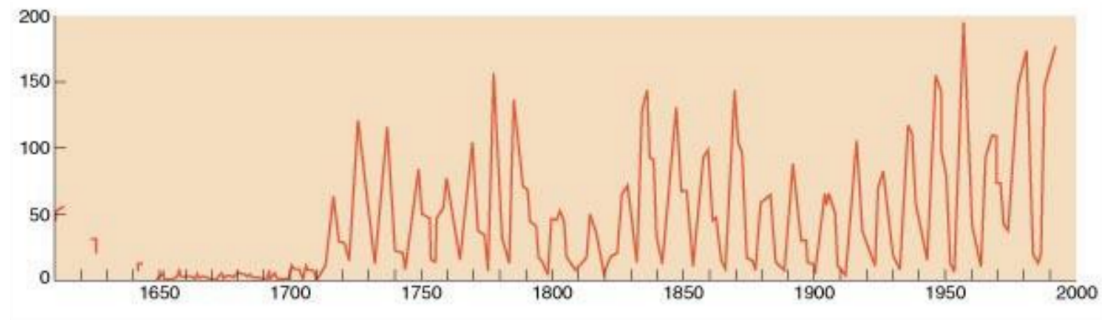
Schwabe (1843) je prvi otkrio 11-godišnju periodičnost
u broju pega na Suncu

Volfov (Wolf, 1848) broj pega $W=k(10g+f)$

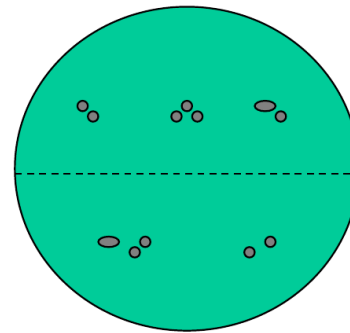
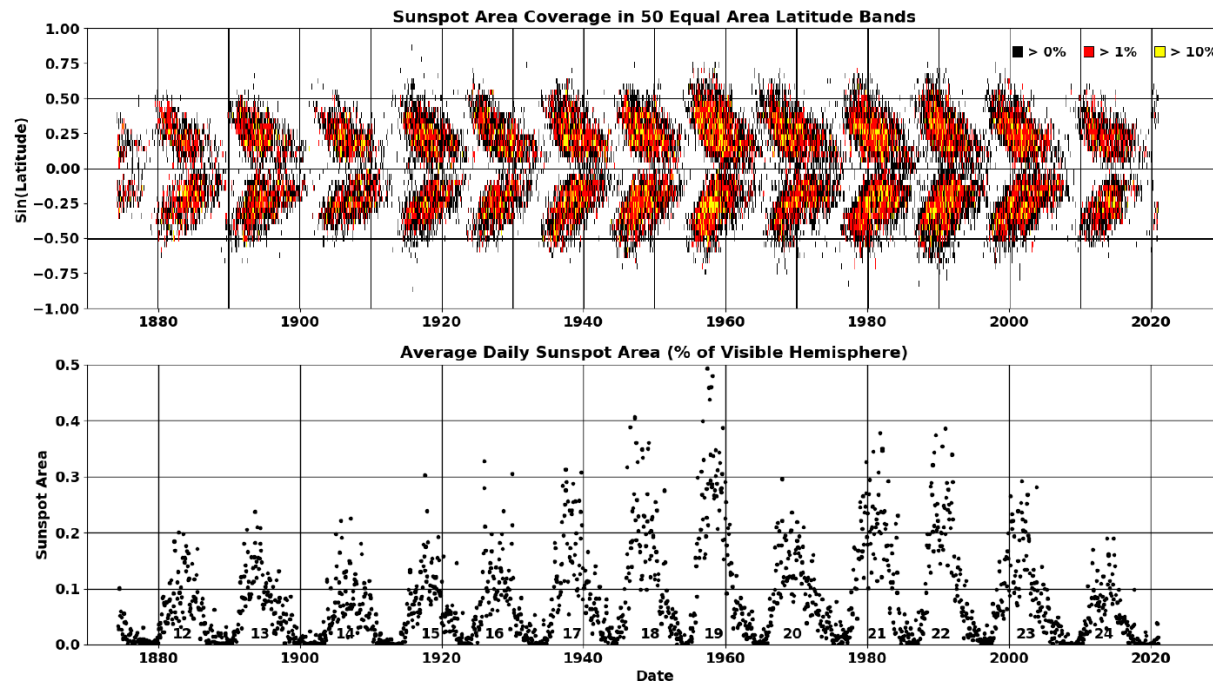
Ciklusi Sunčeve aktivnosti



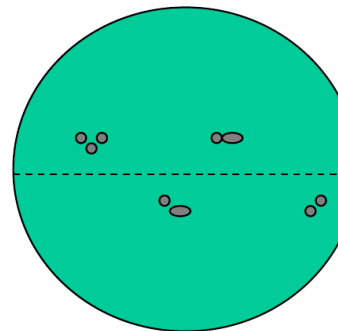
**Maunderov minimum
(1645-1715)**



“Leptir dijagram”



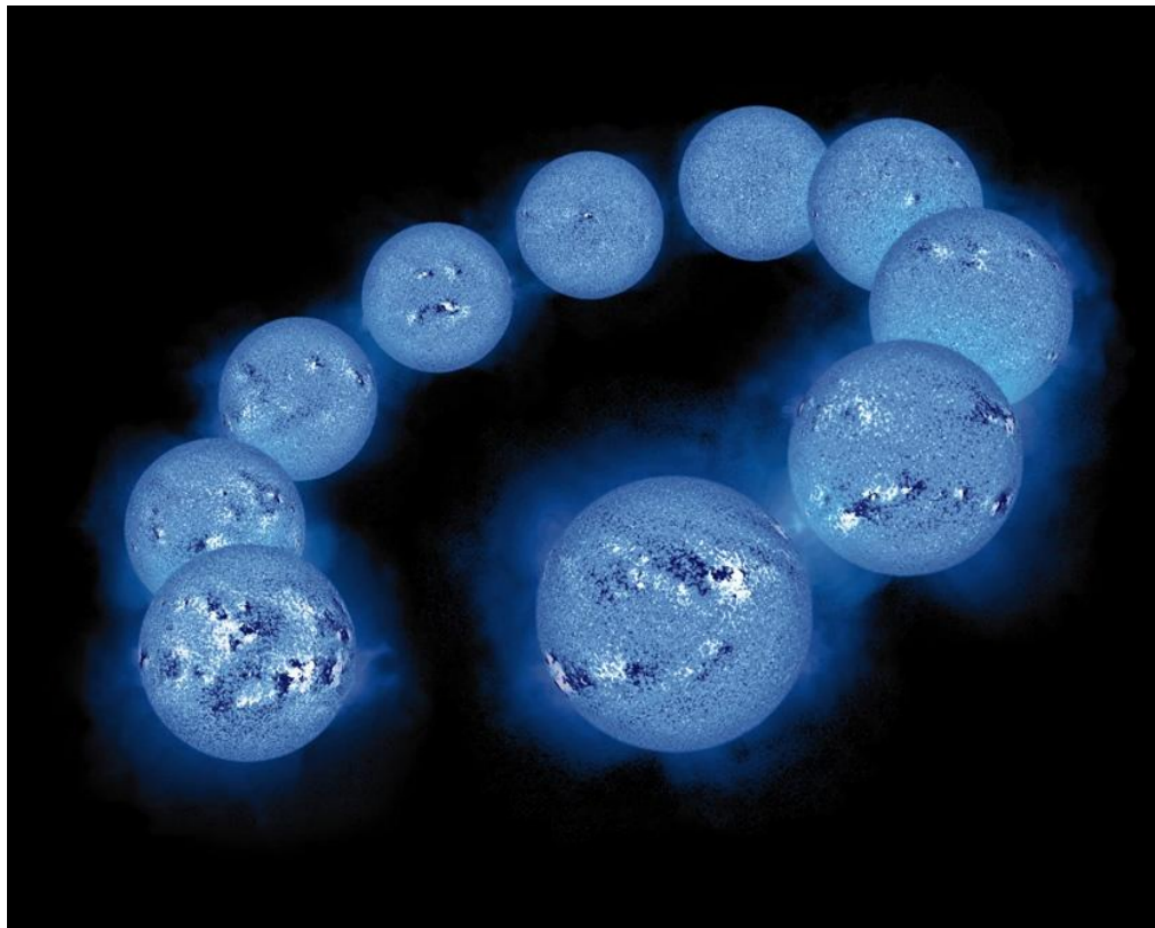
Prve pege ciklusa se javljaju na višim latitudama



Kako aktivnost raste, nove pege se javljaju sve bliže ekvatoru

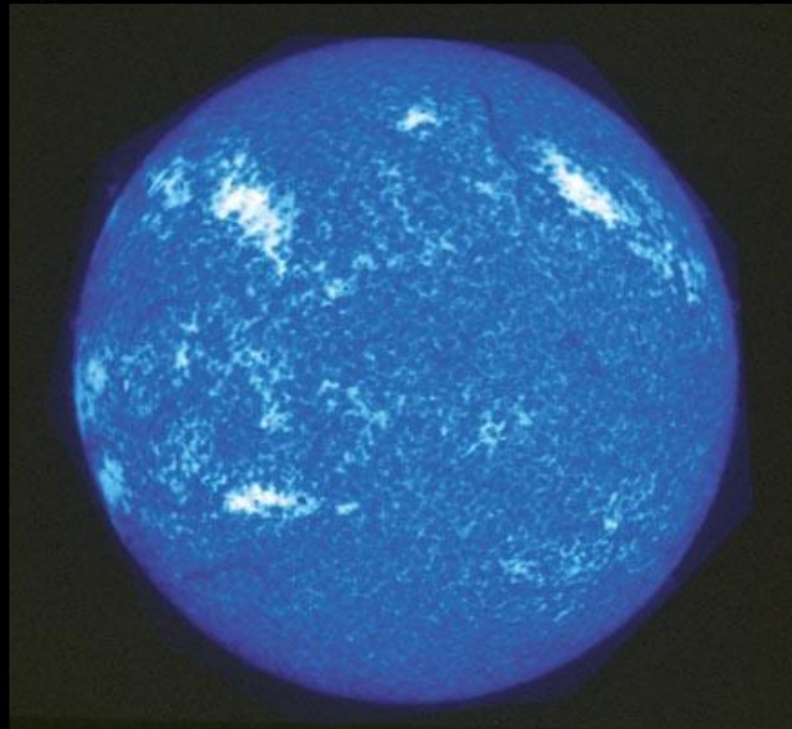
Ciklus Sunčeve aktivnosti
– 11-godišnji ciklus

Magnetni ciklus –
22-godišnji ciklus
(promene polariteta
magnetnog polja svakih
11 godina)



Plaže (sjajne oblasti): svetlost emituje vreo gas iznad pega

Fraknoi/Morrison/Wolff, Voyages Through the Universe, 2/e
Figure 14.16 Plages on the Sun



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

*Sve “pege vodilje” su
uvek istog polariteta na
jednoj hemisferi*



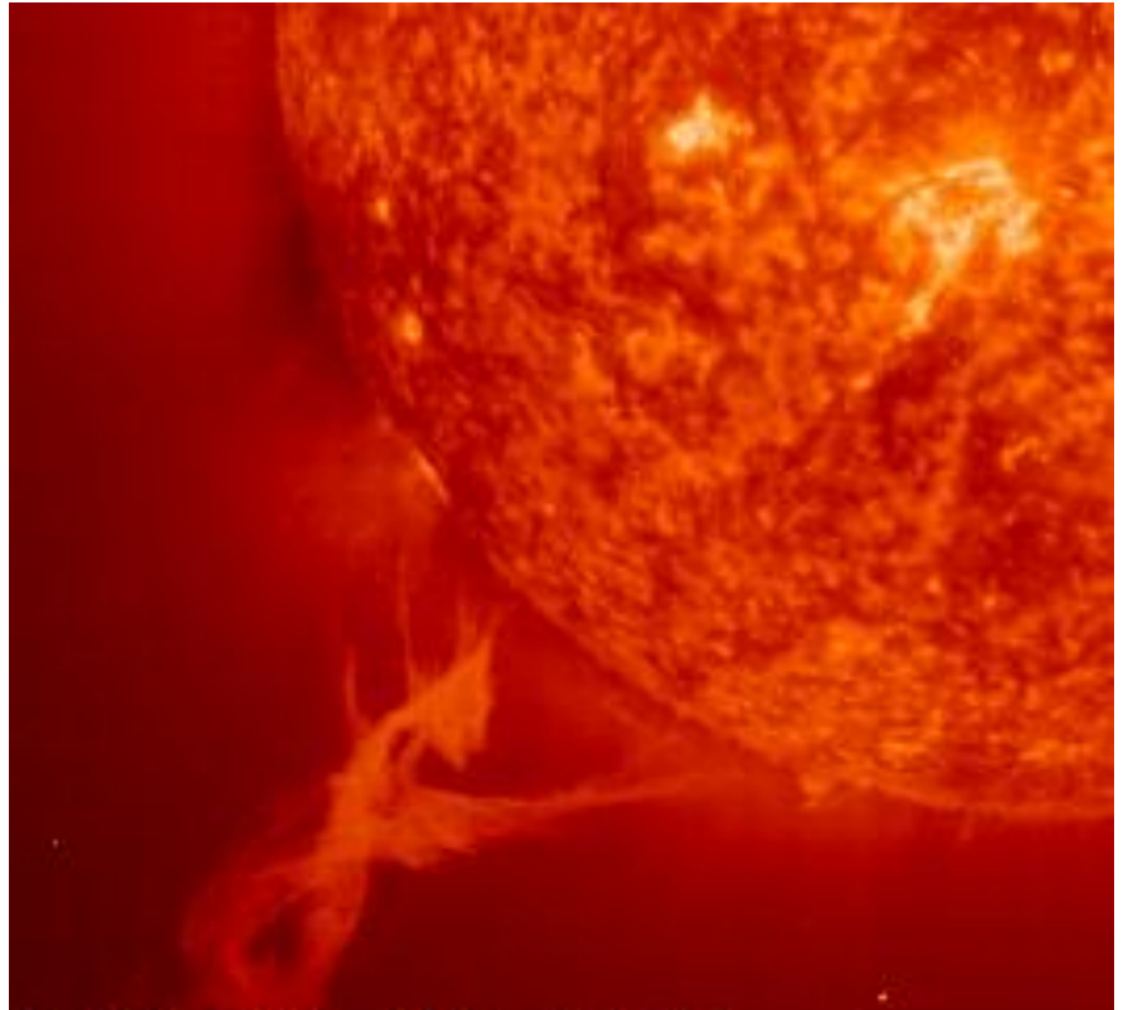
Poredjenje aktivnog i mirnog Sunca

Zapadna pega u paru – pega vodilja

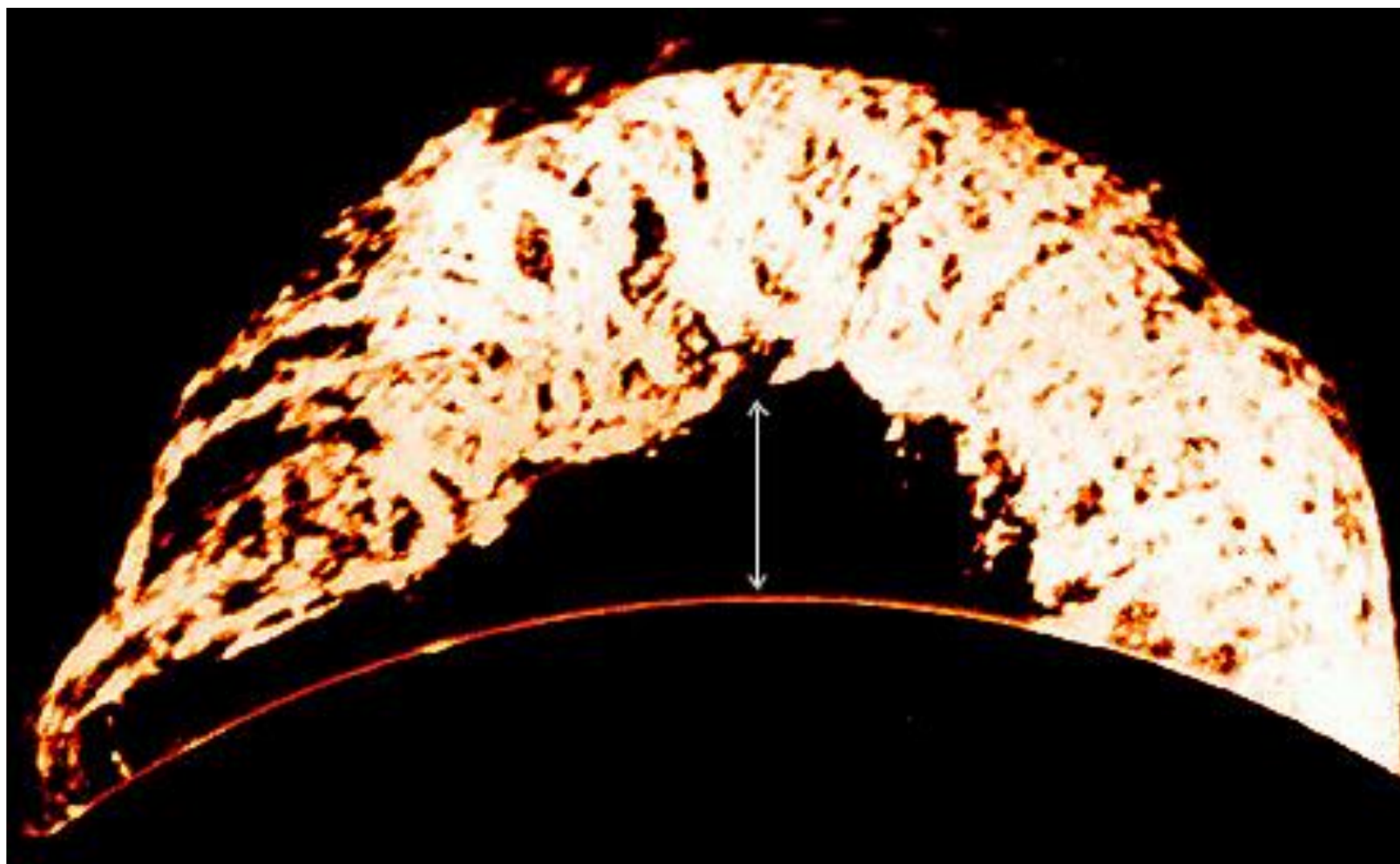
Bipolarne pege su najčešće

Protuberance

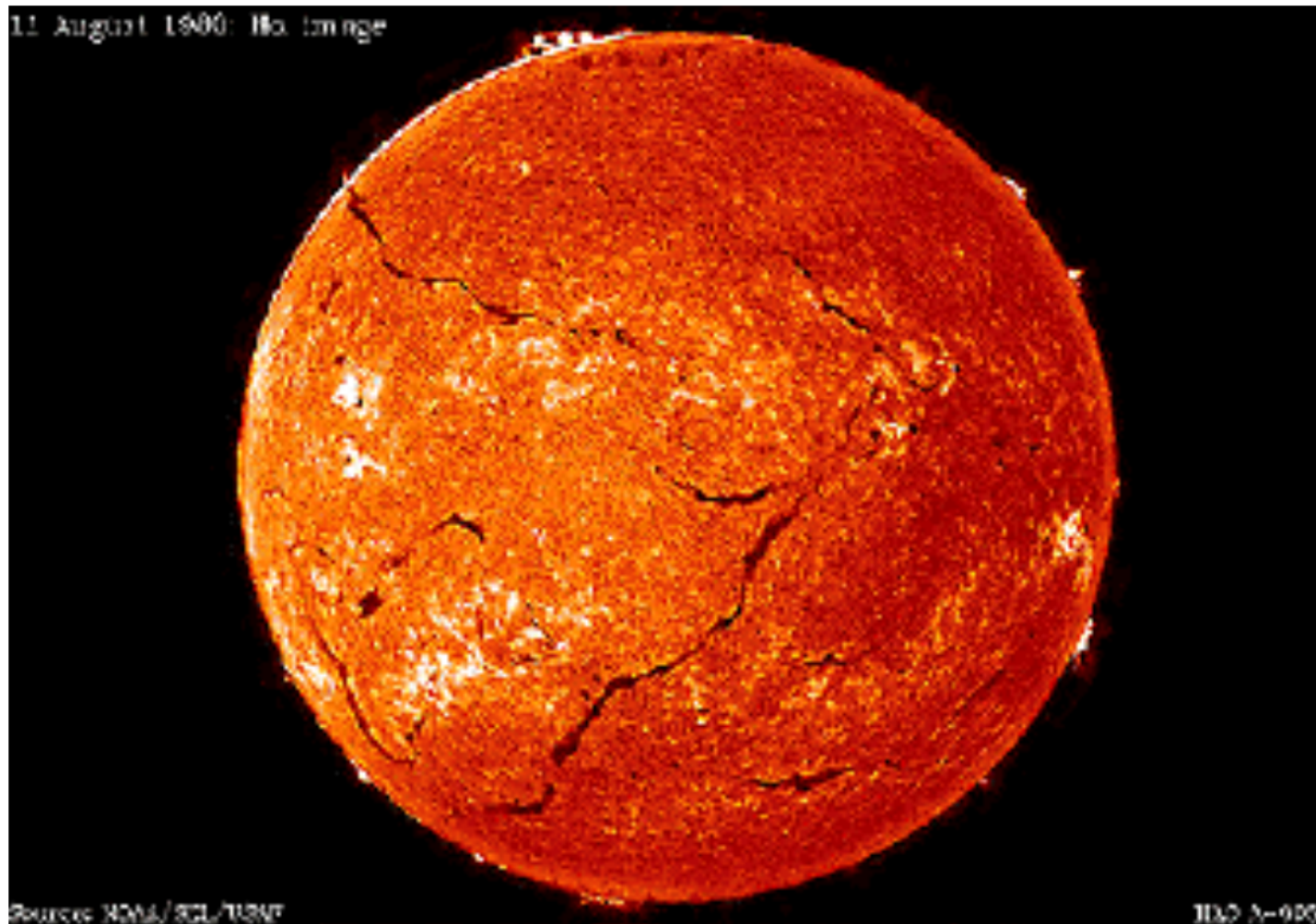
- Protuberance - džinovski mlazevi hromosferske plazme u koroni
- Vide se u spektralnim linijama u kojima se posmatra hromosfera (Ha i K Call)
- Mlazevi hromosferskog gasa u koroni (10 do 1000 km iznad hromosfere)



Džinovska protuberanca (4.juna 1946)

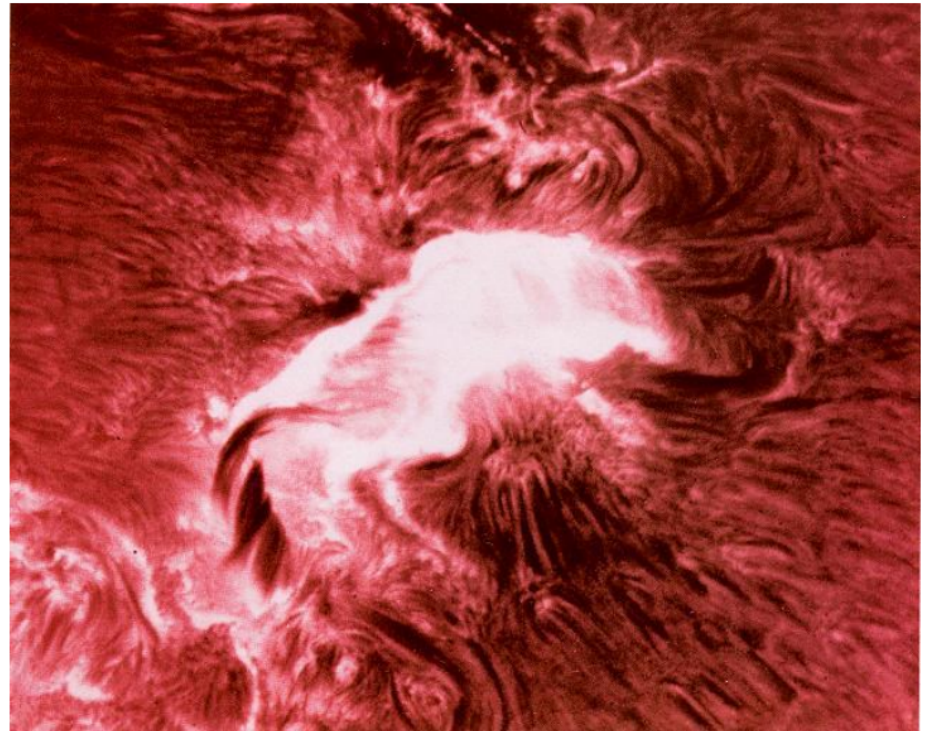


Filamenti - tamna vlakna hladnijeg gasa
(protuberance projektovane na disk Sunca)



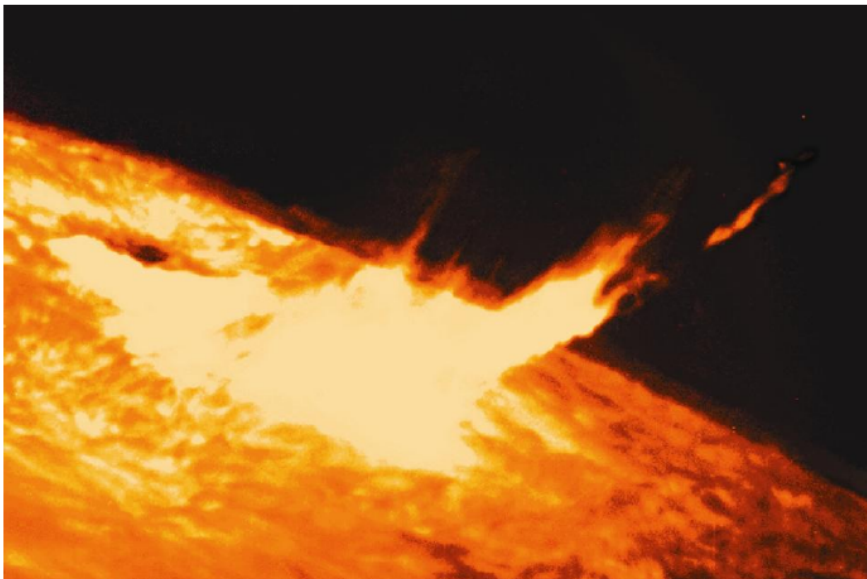
Erupcije (flerovi)

- Iznenadni kratkotrajni bljeskovi (eksplozije) u hromosferi
- Male površine (iznad grupe pega)

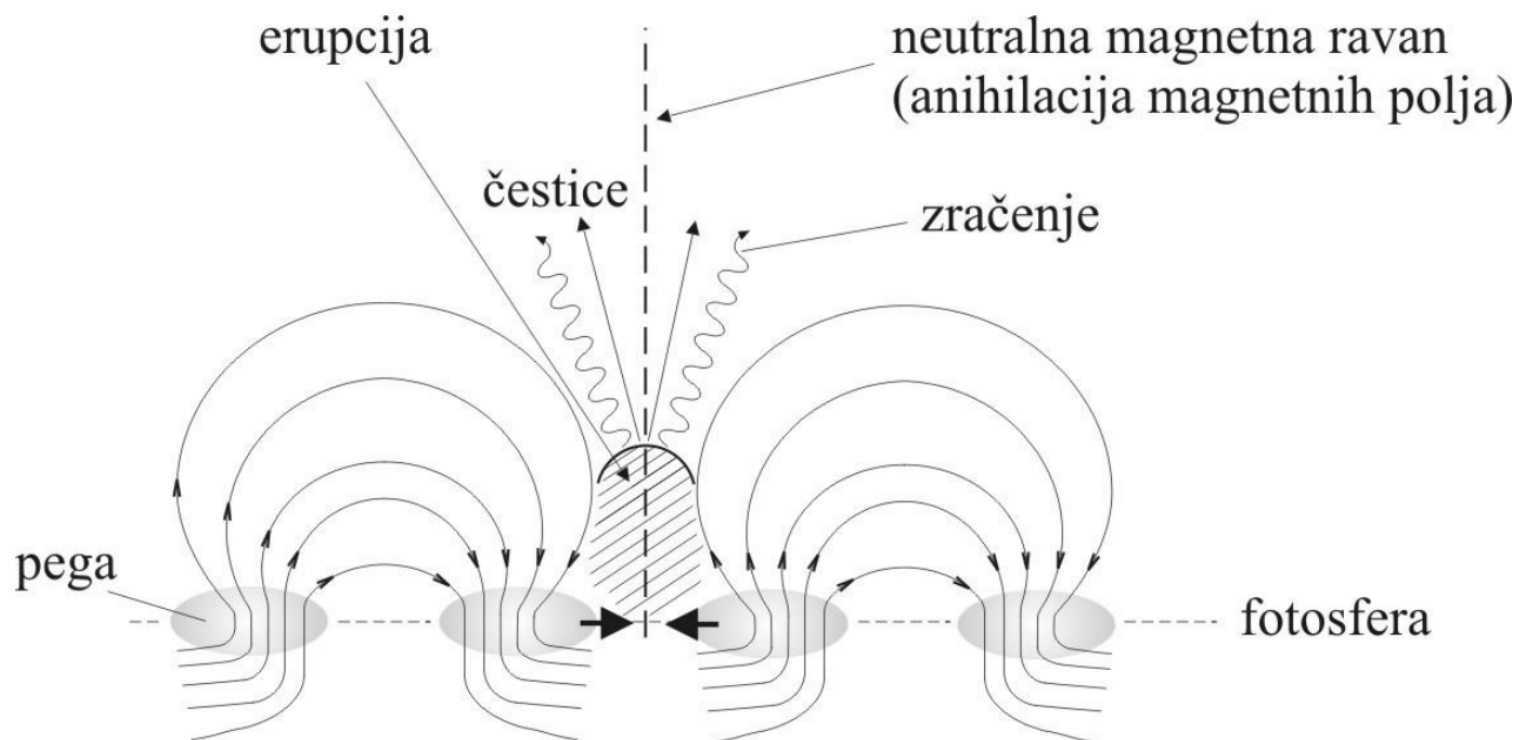


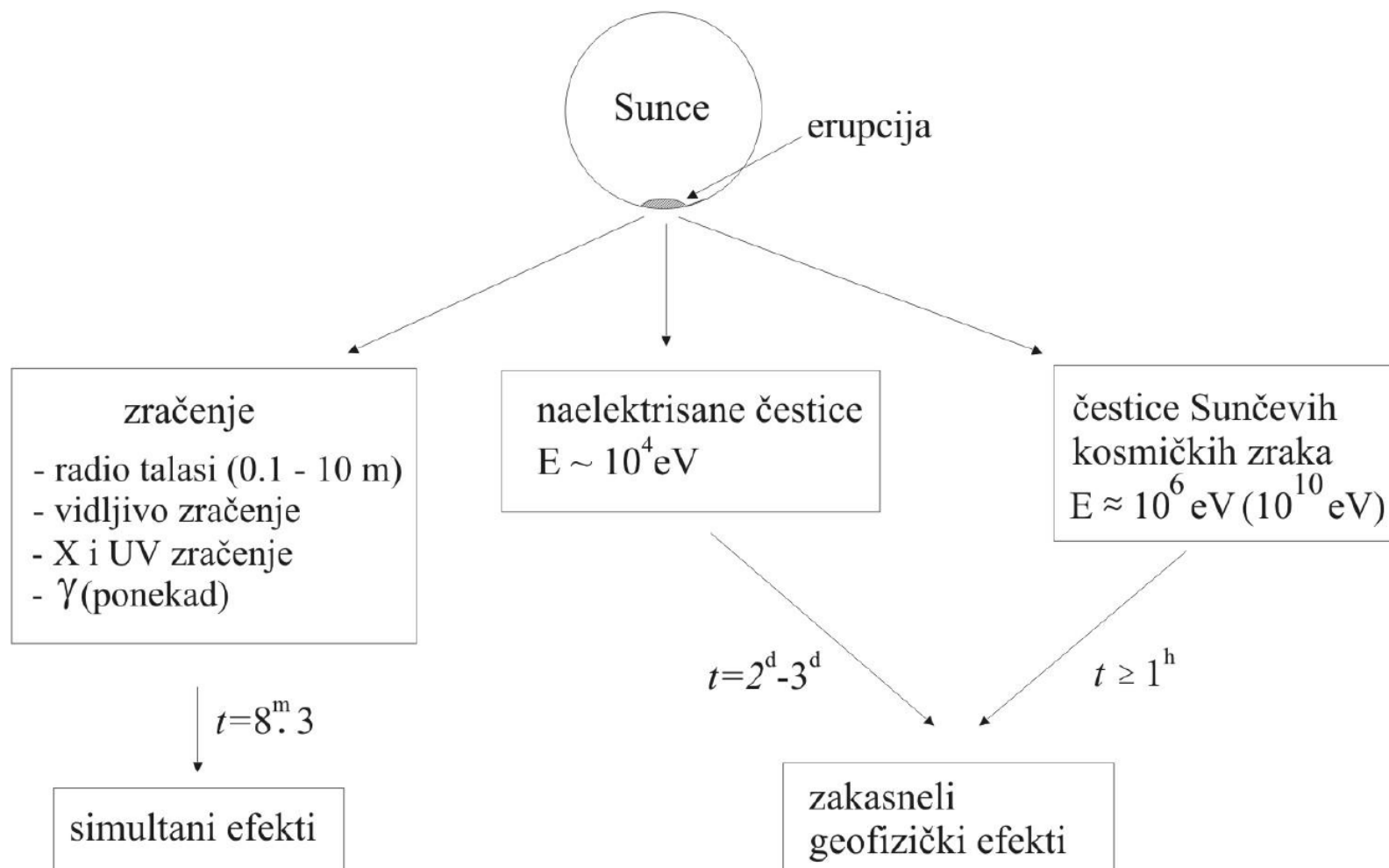
Erupcije počinju naglo, za nekoliko minuta dostižu maksimum i traju do 1 sat.

Emituju pojačano zračenje u X, UV, vidljivom i radio domenu, kao i čestice visokih energija (10^4 - 10^{10} eV)



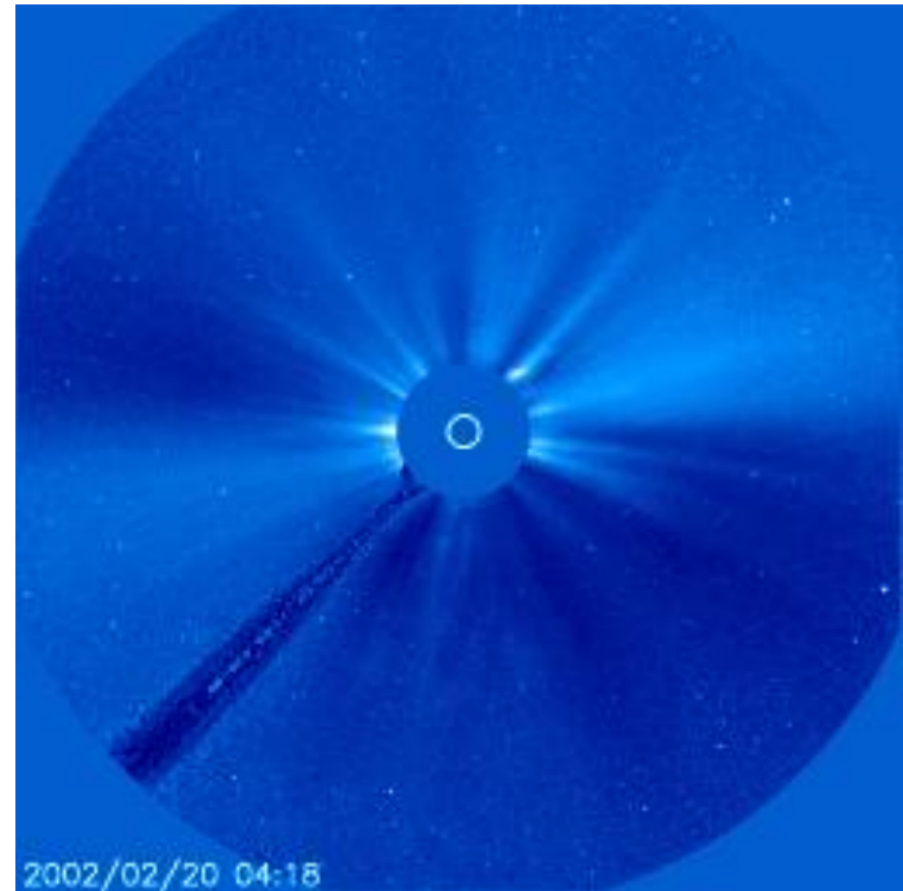
Erupcija **(eksplozivno oslobađanje energije verovatno nastaje** **anihilacijom magnetnog polja)**

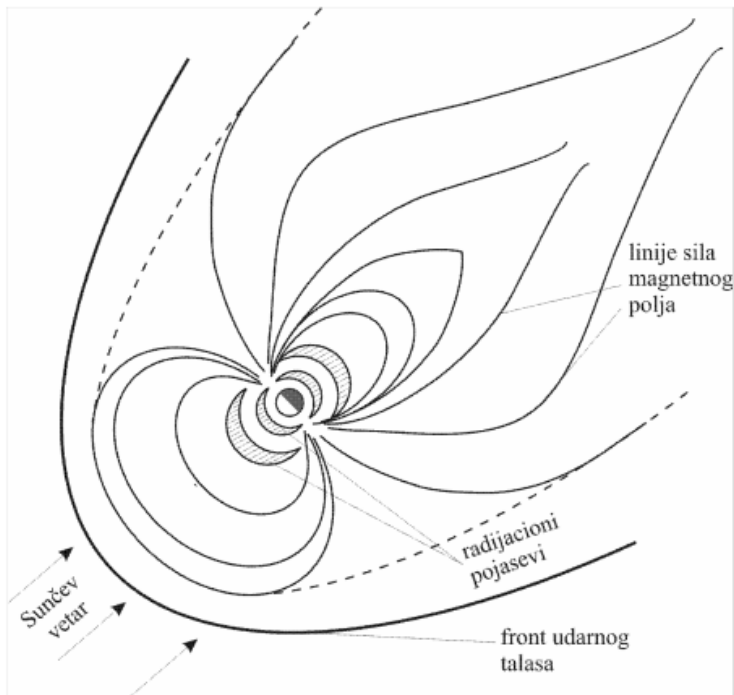




“Aktivni regioni” na Suncu

- Izbacivanje koronalne mase (CME)
 - U vezi je sa velikim erupcijama
 - Oblaci gasa sa milijardama tona solarnog materijala
 - Najenergetskiji događaji u Sunčevom sistemu

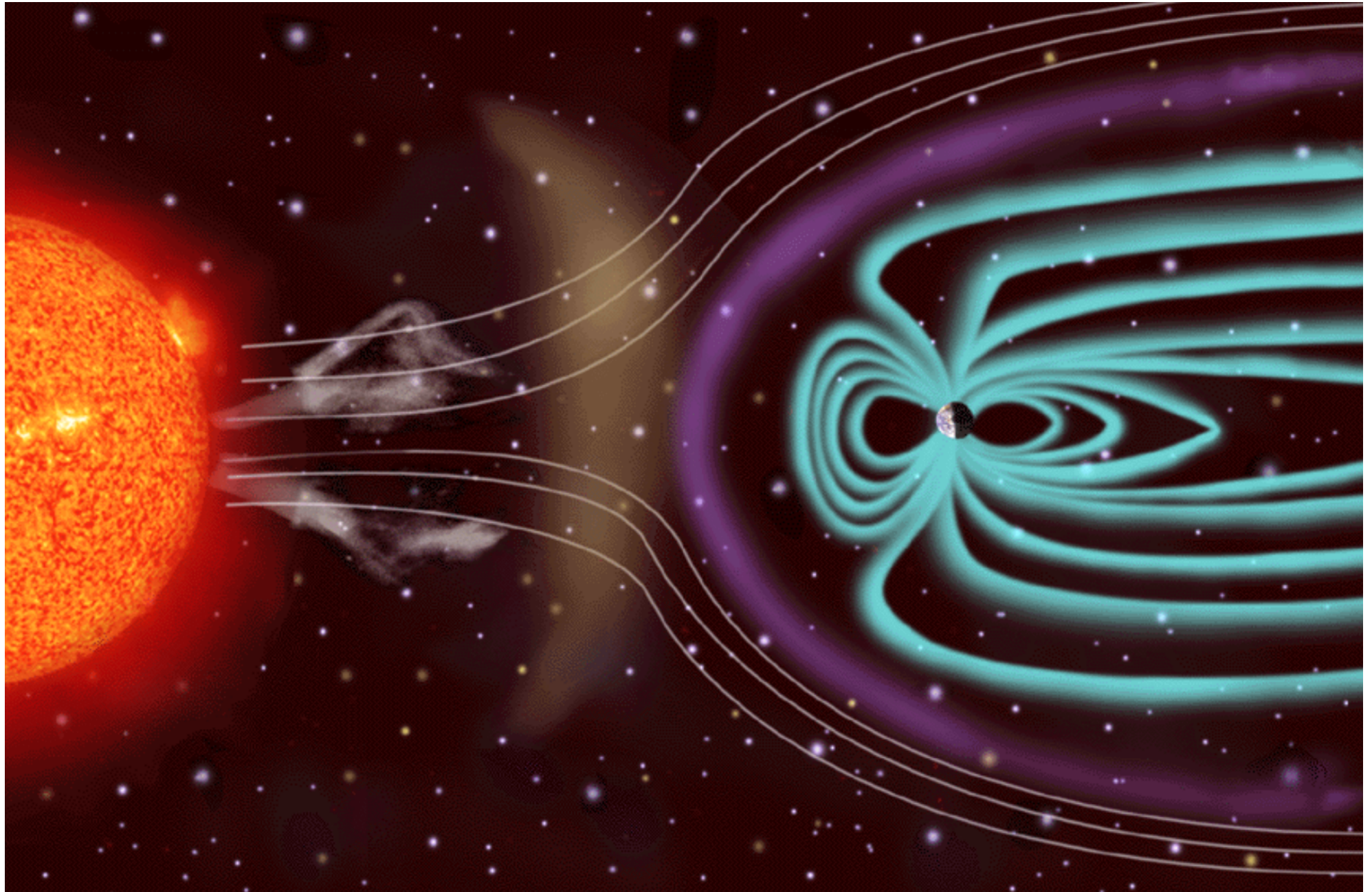




Zemljino magnetno polje u najgrubljoj aproksimaciji je dipolno – Sunčev vetar ga menja!!!

Zamagnetisana plazma koja čini Sunčev vetar ne može lako prodreti kroz zatvorene linije sile Zemljinog magnetnog polja. Međutim, u godinama pojačane Sunčeve aktivnosti, u Sunčevom vetru se nalaze i čestice većih energija koje prodiru u magnetosferu Zemlje i izazivaju poremećaje geomagnetnog polja. Nastaje niz geofizičkih pojava od kojih ćemo ovde pomenuti **polarnu svetlost i geomagnetne bure**

Polarna svetlost je atraktivan fenomen koji se vidi u polarnim oblastima na visini od oko 100 do 120 km. Ona je posledica sudara gorepomentnih naelektrisanih čestica sa atomima i molekulima kiseonika i azota u Zemljinoj atmosferi. Sudari dovode do ekscitacije atoma i molekula, a pri njihovoj deekscitaciji emituje se crvena, zelena i ljubičasta svetlost raznih oblika



Polarna svetlost

