

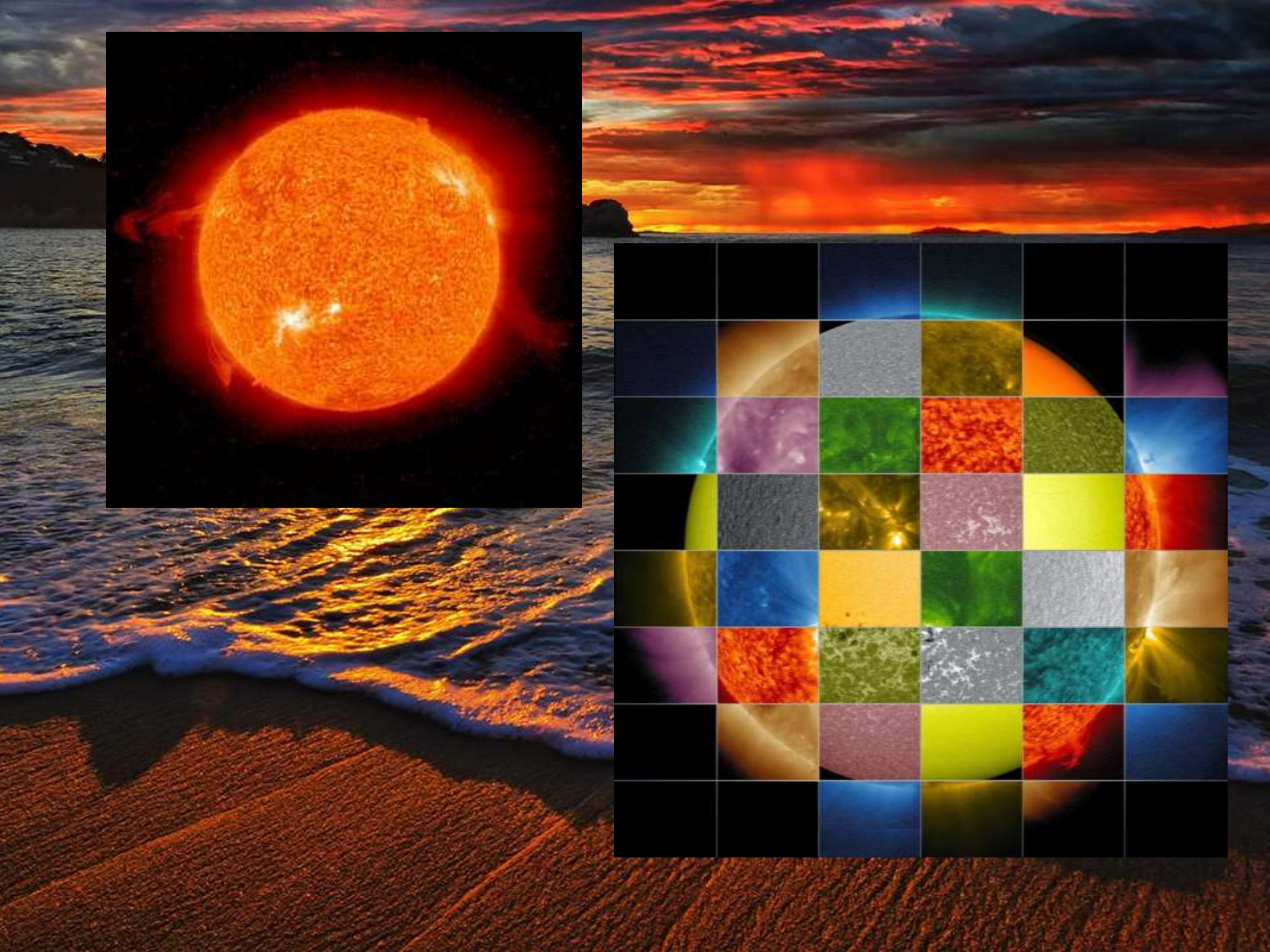
# *FIZIKA SUNCA*

**Milan Milošević**

*Prirodno-matematički fakultet, Niš*

**Akreditovani seminar "Sa krova do Zvezda"**  
**4 – 5 decembar 2015, PMF, Niš**

**Program stalnog stručnog usavršavanja ZUOV, kat. br. 590**



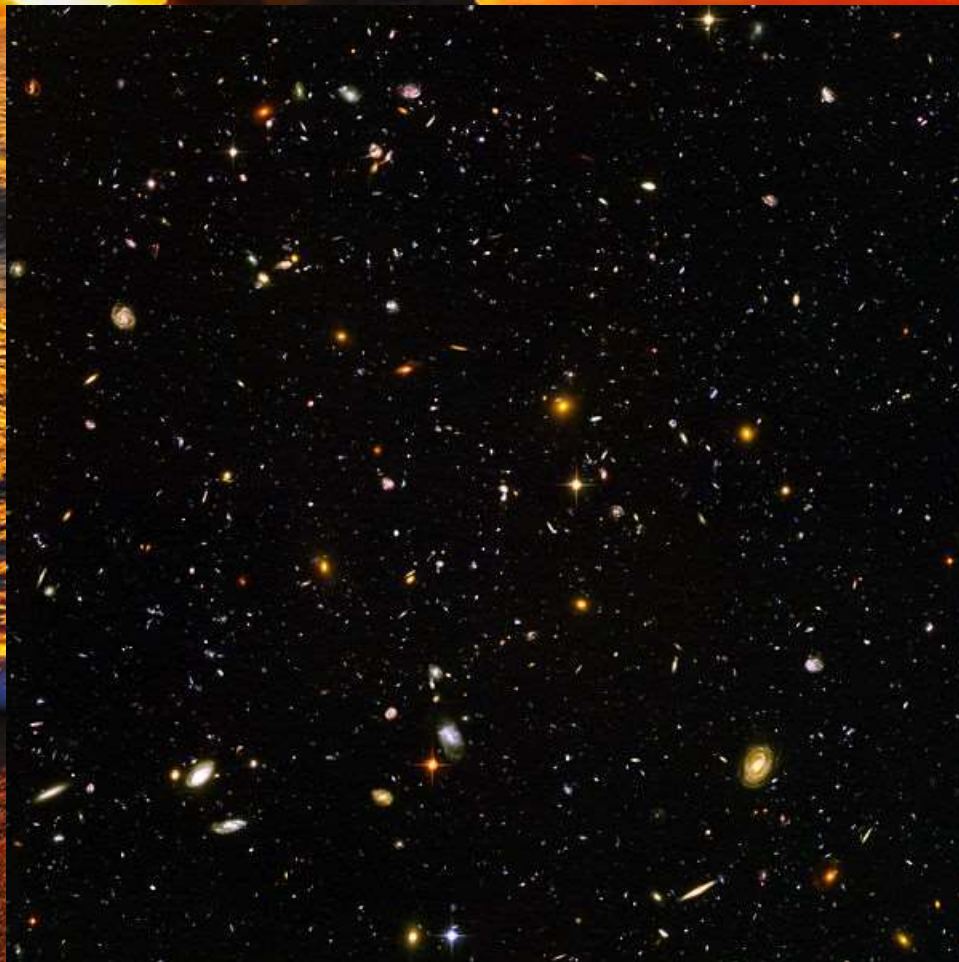
# “Kad je Sunce bilo Bog”



[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_deities](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_deities)

<http://ancienthistory.about.com/od/sungodsgoddesses/a/070809sungods.htm>

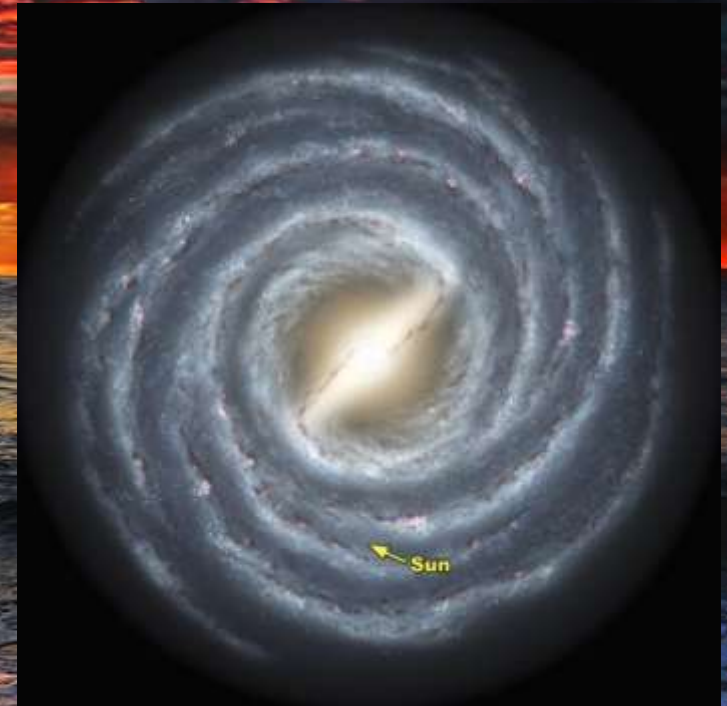
# Gde je Sunce?



*Hubble Ultra Deep Field*

# Mlečni put

- Galaktička ravan
- Orionov krak
- 8-10 kpc od centra (28.000 sg)
- 230 miliona godina oko galaksije
- Galaksija – 100.000 sg
- Na pravom mestu 😊



# Sunce – naša zvezda

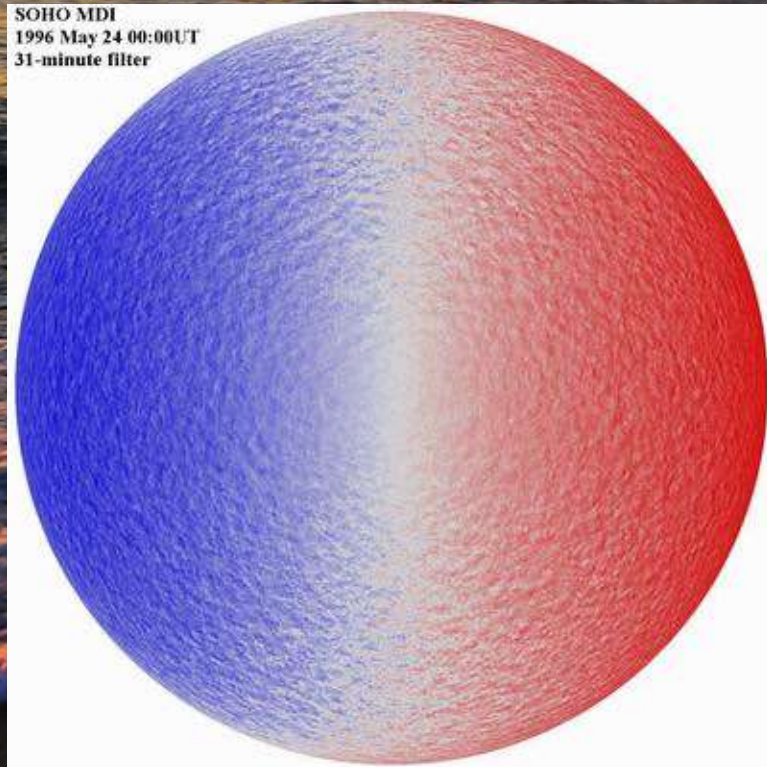


- poluprečnik 696.000 km
  - 109 puta veći od Zemlje
- zapremina 1,3 miliona puta veća od Zemljine
- masa  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg
  - 333.000 puta više nego masa Zemlje
- sve planete zajedno – 750 deo mase Sunca
- 99,87% ukupne mase Sunčevog sistema
- masa se godišnje smanji za  $1,5 \cdot 10^{17}$  kg

# Još malo podataka ☺

- period 27 dana – zvezda koja sporo rotira
- osa nagnuta za  $7,2^\circ$  u odnosu na normalu na ravan ekliptike
- 25 dana ekvator - 2 km/s; polovi 29 dana - 0,9 km/s
- diferencijalna (zonska) rotacija
- dokaz da nije kruto telo

SOHO MDI  
1996 May 24 00:00UT  
31-minute filter



I još.... ☹️☹️

- Usijano telo, zrači sopstevnu energiju
- svake sekunde  $3,86 \cdot 10^{26}$  J
- samo dvomilijarditi deo stiže na Zemlju
- elektromagnetno zračenje – najviše vidljiva svetlost (400 do 800 nm)



I još.... ☹️☹️☹️

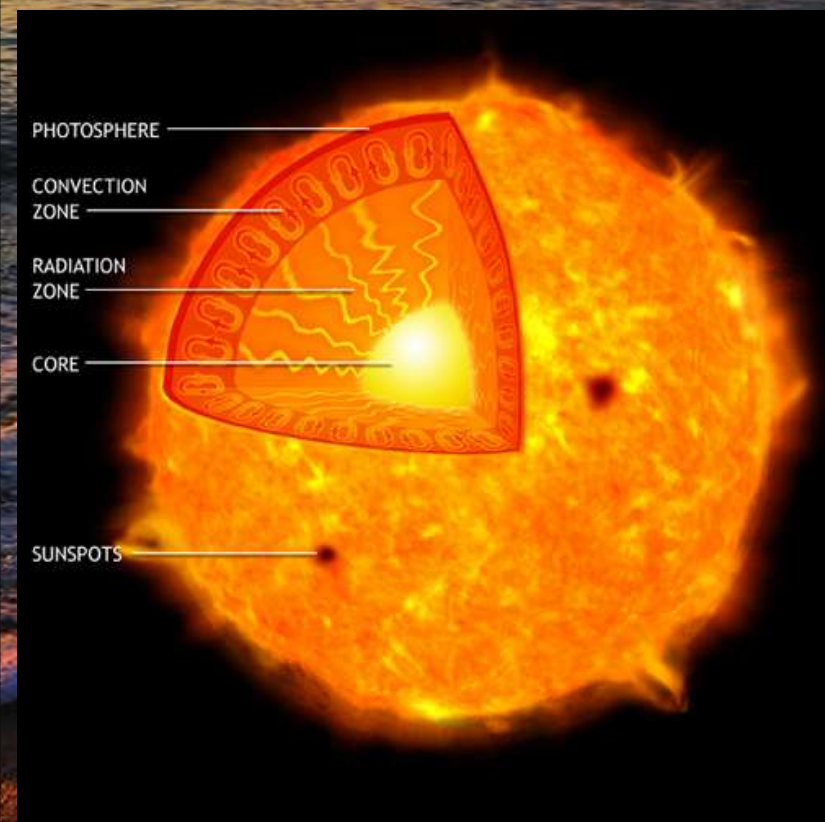
- zračenje dolazi sa površinskog sloja
  - dublji slojevi neprozračni
- unutrašnjost – teorijski modeli
  - Standardni model – R. Sears (1964)
  - za zvezde starosti oko  $4,7 \cdot 10^9$  god
  - temperatura  $15 \cdot 10^6$  K, pritisak  $3,4 \cdot 10^{16}$  N/m<sup>2</sup> – u jezgru

A dramatic sunset over the ocean. The sun is low on the horizon, casting a bright, shimmering path of light across the water. The sky is filled with vibrant, colorful clouds in shades of orange, red, and purple. In the distance, a large, dark, rocky island or headland is silhouetted against the bright sky. The foreground shows the gentle waves of the ocean washing onto a sandy beach, with the sand appearing wet and reflective. The overall mood is serene and majestic.

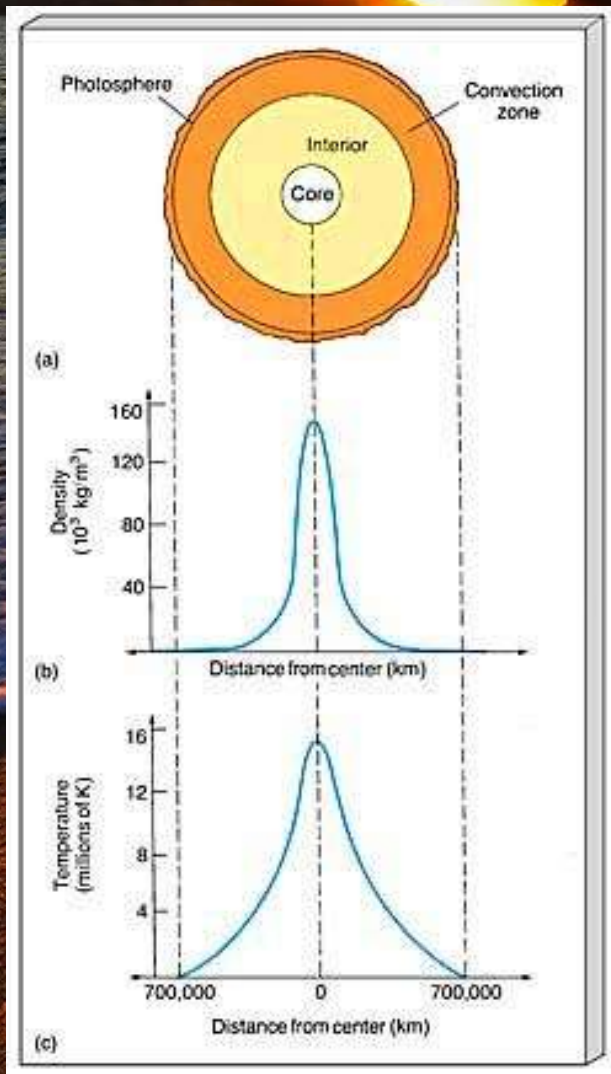
# UNUTRAŠNOST SUNCA

# Unutrašnjost Sunca

- Jezgro (25%)
- Radijaciona zona (45%)
- Konvektivna zona (30%)



# Gustina i temperatura

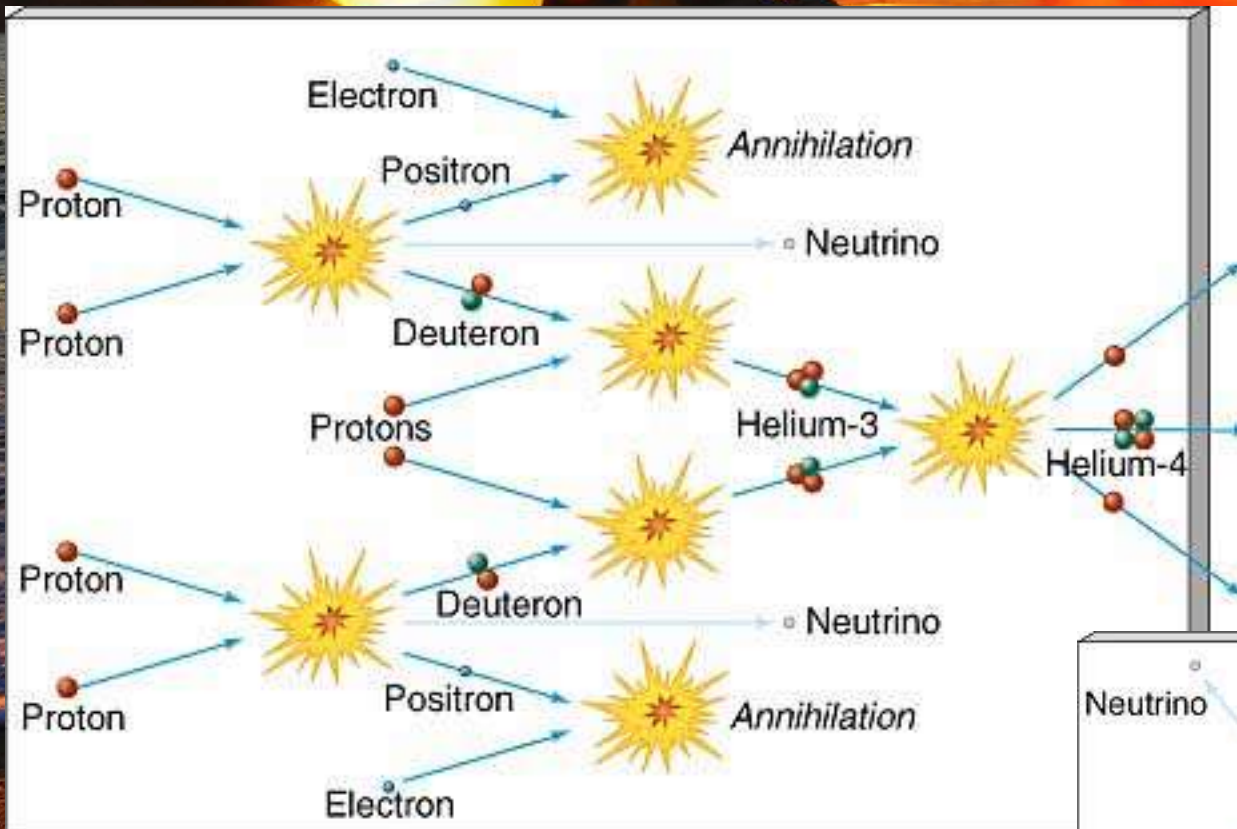


- prosečna gustina  $1408 \text{ kg/m}^3$ 
  - 4 puta manje od gustine Zemlje
  - 1,4 puta veće od vode
- sastav – usijan gas
  - vodonik 73,4% (92% broja atoma)
  - helijum 25% (7,8% broja atoma)
  - ostali (O, C, Fe, N, Ne) 1%
- na slici – zavisnost temperature i gustine od dubine
  - *temperatura* – u početku naglo opada , kasnije sve sporije
  - *gustina*
    - $1,5 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3$  u jezgru
    - $1.000 \text{ kg/m}^3$  na 350.000 km
    - $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$  fotosfera (10.000X manje od gustine vazduha)
    - $10^{-23} \text{ kg/m}^3$  korona (gustina najboljeg vakuuma)

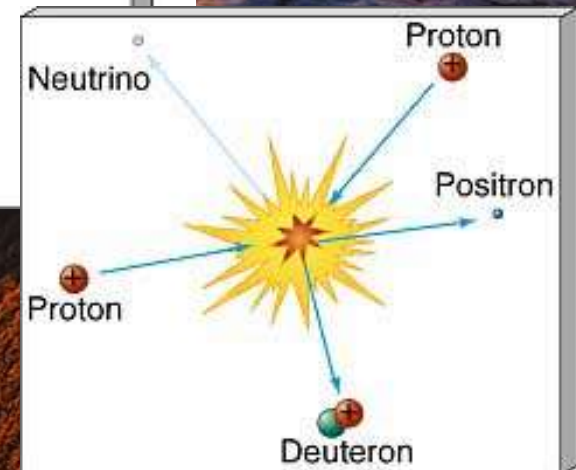
# Jezgro Sunca

- 1,6% zapremine Sunca, 0,25 poluprečnika
- Centar - 15 milijardi stepeni
- Gustina 150000 kg/m<sup>3</sup> (20 veća od gvožđa)
- Pritisak 35000 Mbar
  - Ogroman pritisak, ali...
- Potpuno jonizovana plazma
- Donja granica konvektivne zone
  - 1000 puta manja gustina

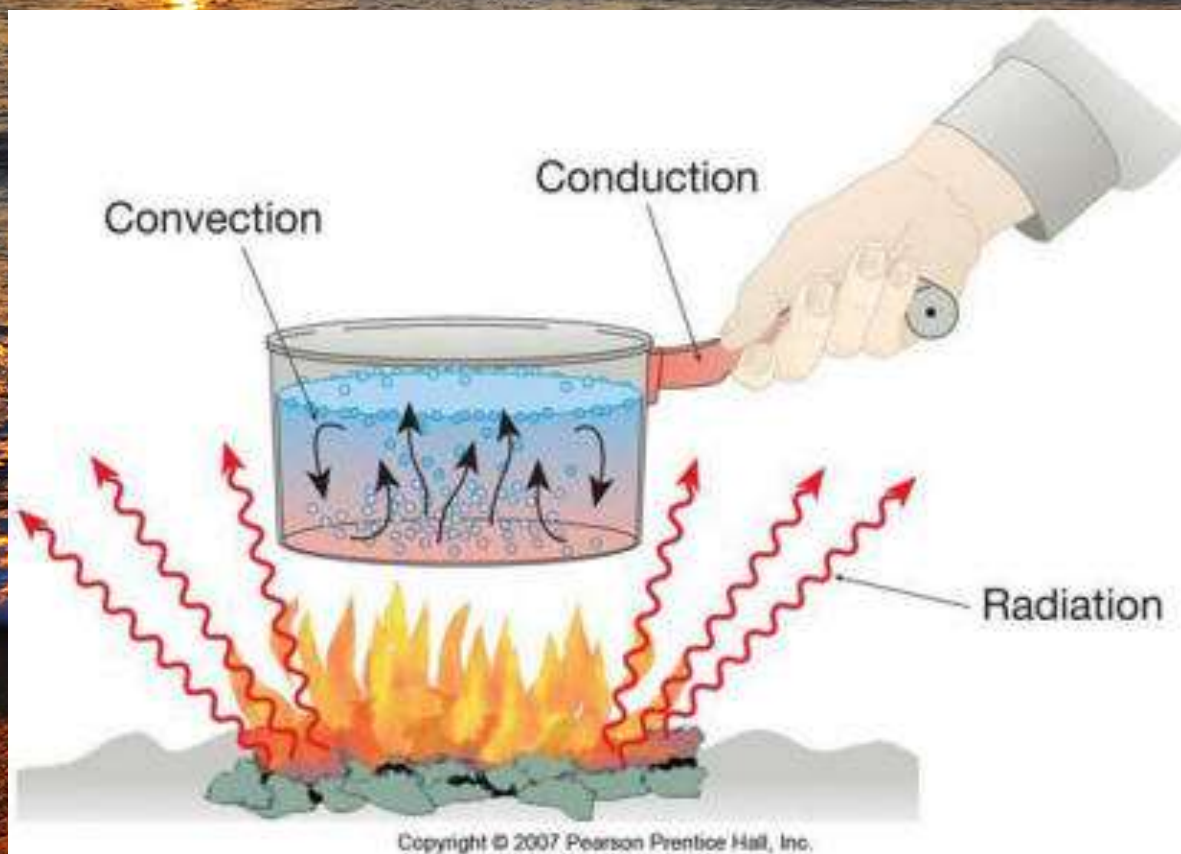
# Energija!



Proton-protonski ciklus (p-p)



# Prenos energije



# Radijaciona zona

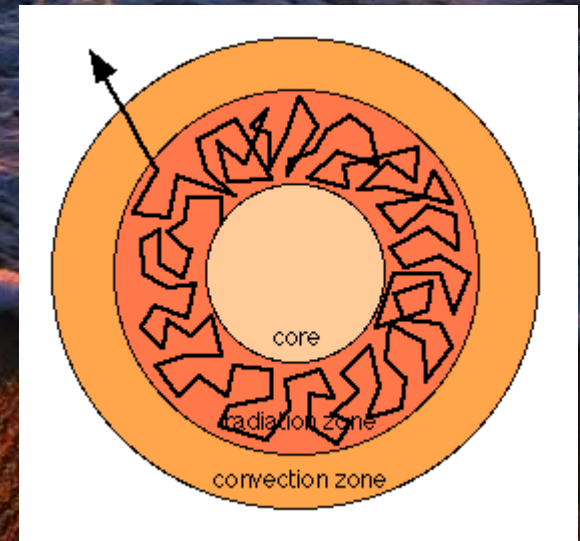
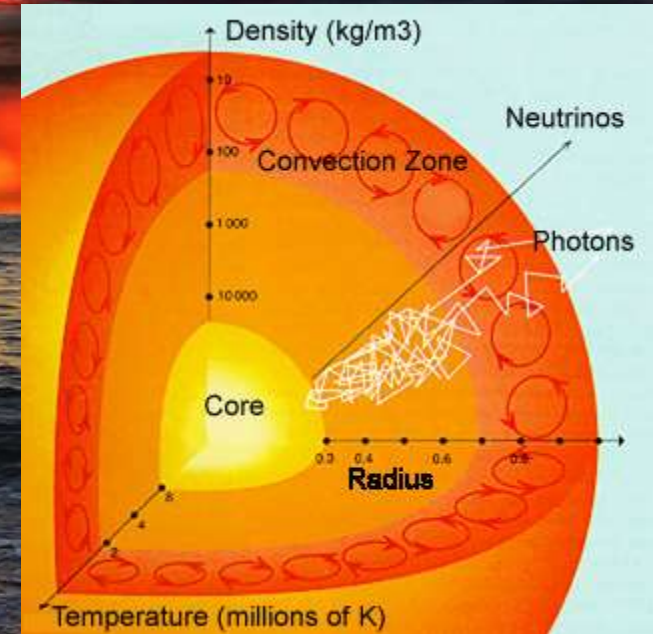
- prenos energije – zračenjem
- 0,25 – 0,85 radijusa Sunca
- temperatura postepeno opada
- Početak – 7 miliona stepeni
- $15000 \text{ kg/m}^3$  (2 puta *Fe*)
- 350000km – gustina vode
- Nema fuzionih reakcija!





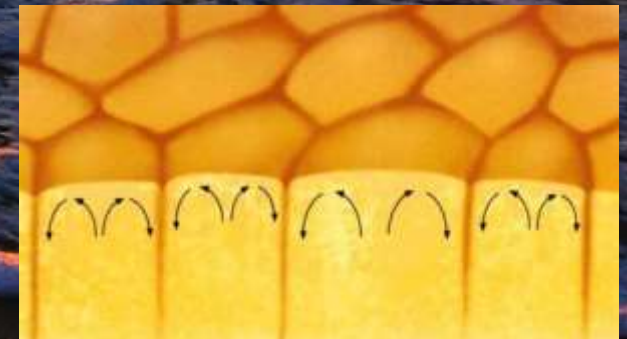
# Radijaciona zona

- Fotoni – višestruko rasejavanje
- Talasna dužina - od gama i X zračenja ka vidljivom
- Primarni fotoni – milion godina!
- gornja granica – temperatura je dovoljno niska pa se javljaju neutralni atomi (He, H)
- ***Neproзраčna !!!***



# Konvektivna zona

- Debljina – 150-200  $10^3$  km
- Početak, 500000 km od centra:
  - 2 miliona stepeni
  - $150 \text{ kg/m}^3$  (6 puta ređe od vode)
- kretanje velikih masa supstance
  - *toplije* (lakše) - podižu ka površini
  - *hladnije* (teže) – spuštaju u dubinu
- posledica Arhimedovog zakona
  - Zagreva i širi – ide gore
  - Hladi, postaje gušći – ide dole
- Promena temperature:
  - Spora – izjednačavanje, kraj
  - Brza – ostaje topliji, gubi energiju zračenjem
- Brzina:
  - 2-3 km/s na površini, 20 m/s u unutrašnjosti



A vibrant sunset over the ocean. The sun is low on the horizon, casting a golden glow across the sky and reflecting on the water. A rocky island is visible in the distance. Waves are breaking on a sandy beach in the foreground.

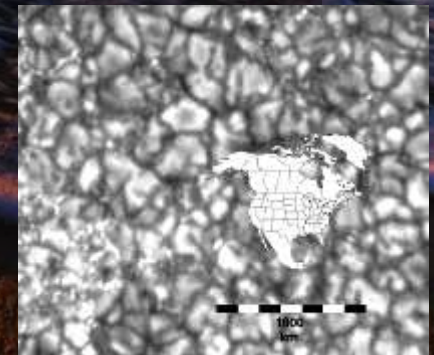
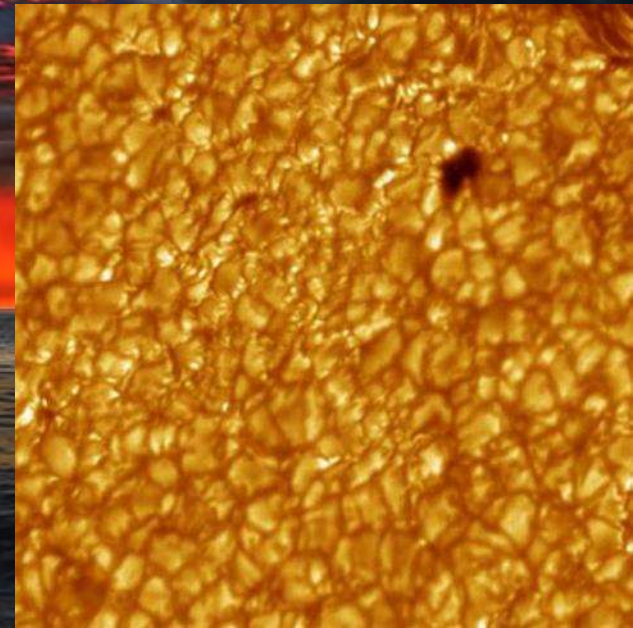
**POVRŠINA SUNCA**

# Fotosfera

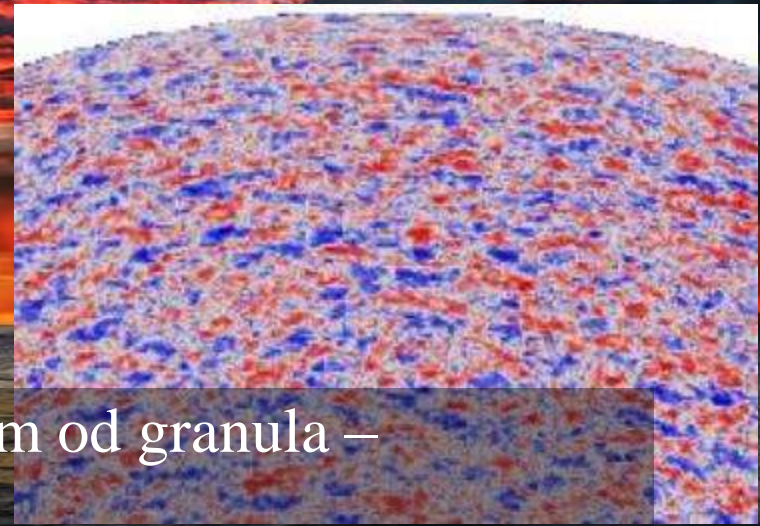
- Sjajan disk koji vidimo sa Zemlje
- 350 – 400 km iznad konvektivne zone
- Gustina – prepolovi na svakih 130 km
  - Srednja:  $(1 - 3) 10^{-4} \text{ kg/m}^3$
  - najgušći omotač, mnogo ređa od atmosfere Zemlje ( $\sim$  gustini na 60 km)
- Temperatura: 9000 – 4500 K
  - Jednostavni molekuli (CO, H<sub>2</sub>, CH, CN,...)
- Nije glatka i homogena – Dž. Šort (1784. godine)
  - “kao tanjir pirinčane supe”

# Fotosfera - Granule

- Mlazevi gasa
- 100 – 130 K viša temperatura
- 10 – 30% veći sjaj
- Tamna područija
  - 35-40% manjeg sjaja, 350-400 K hladnije
- Dimenzije
  - 200 – 1500 km, tamna područija 1000 km
- Oko 2 miliona u svakom trenutku
- 5 – 15 minuta, brzina (0,3 – 1) km/s



# Supergranule

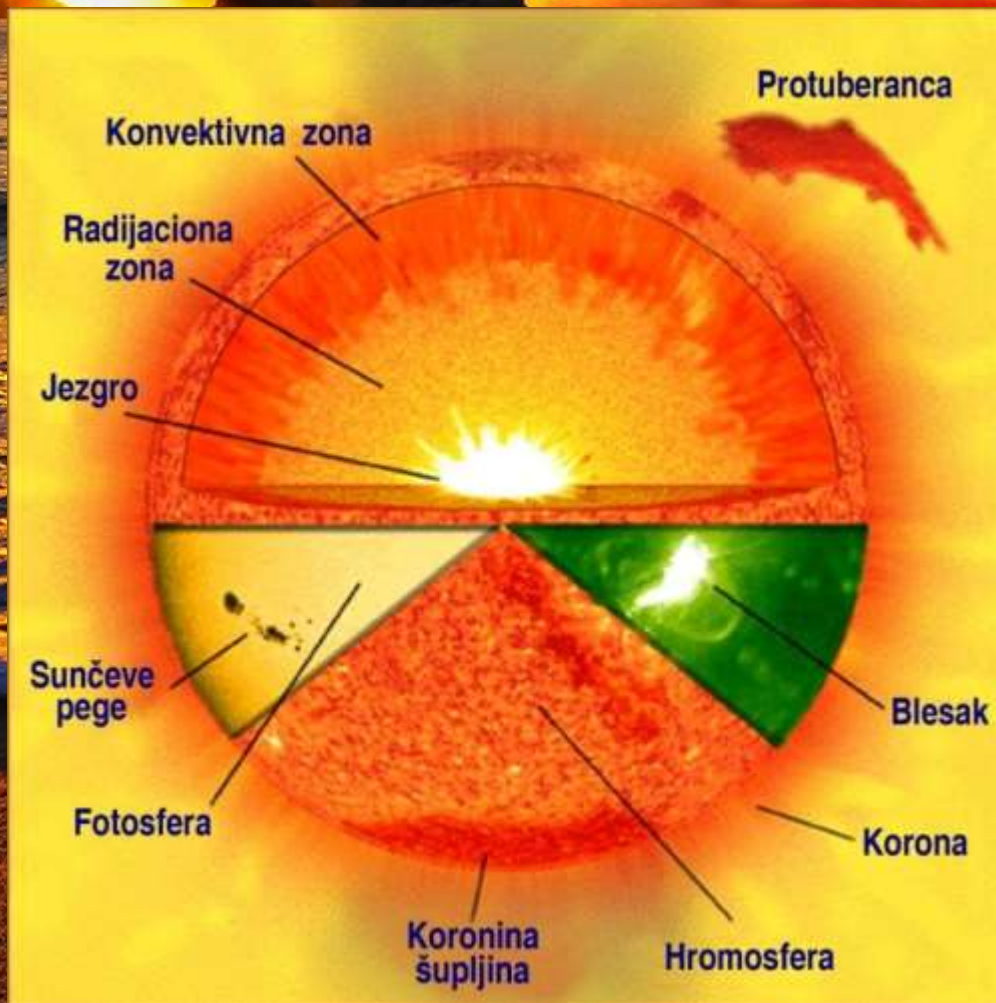


- konvekcija i u oblastima mnogo većim od granula – *supergranule*
- oblik poligonalnih ćelija
- prečnik oko 30.000 km, traju po nekoliko desetina sati
- Većih dimenzija, intenzivnija konvekcija
- Gas iz centra teče ka periferiji
- prekrivaju celu površinu Sunca, u svakom trenutku oko 2.000
- Pomeraju magnetno polje
  - Magnetne linije sabijaju na periferiji, pojačanje polja
  - Materija kreće po magnetnim linijama
  - Razdvaja supergranule i sprečava mešanje materije

A vibrant sunset over the ocean. The sun is low on the horizon, casting a golden glow across the sky and reflecting on the water. A rocky island is visible in the distance. Waves are breaking on a sandy beach in the foreground.

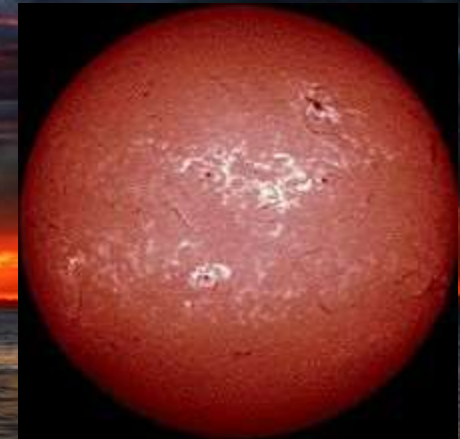
**ATMOSFERA SUNCA**

# Sunce





# Hromosfera



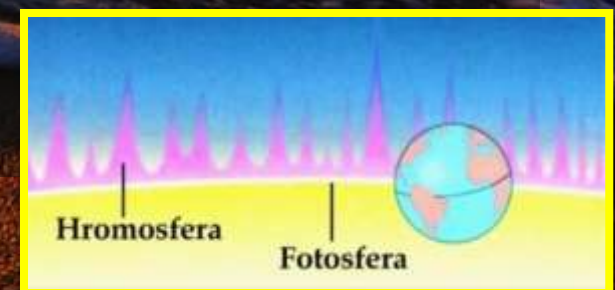
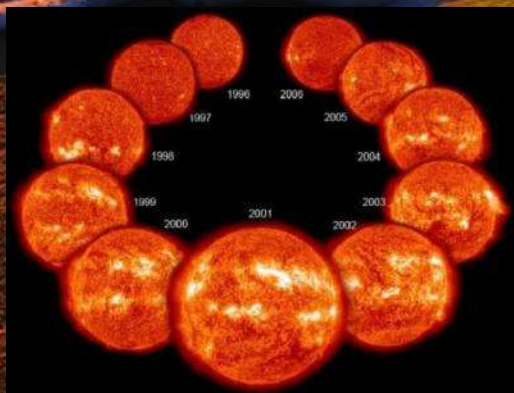
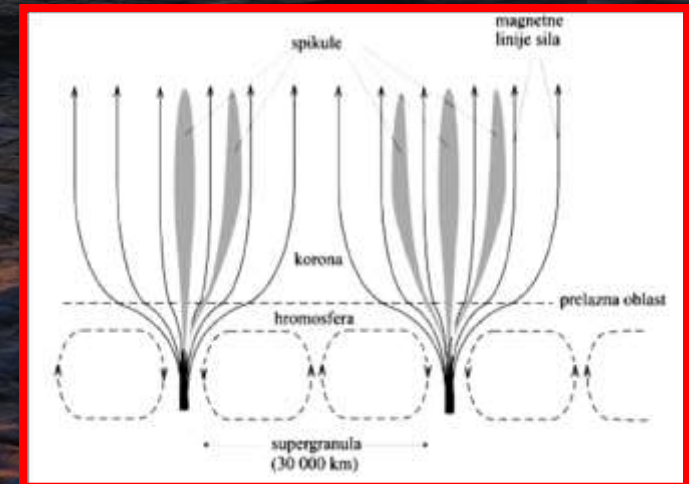
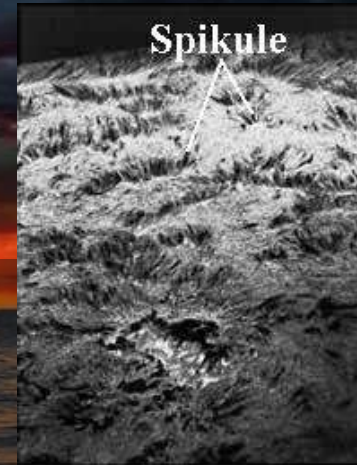
- Iznad fotosfere
- Crvene boje, emisija vodonikove  $H_{\alpha}$  linije
- Naziv – zbog intenzivne boje
- Dž. Lojker (1869. godine)
- Nehomogena
  - Niža (do 1500 km)
  - Srednja (1500 – 4000 km)
  - Gornja (4000 – 10000 km)
- Najniža temp. u nižoj hromosferi, 4200K
  - Počinje da raste, do 10000 K

# Hromosfera

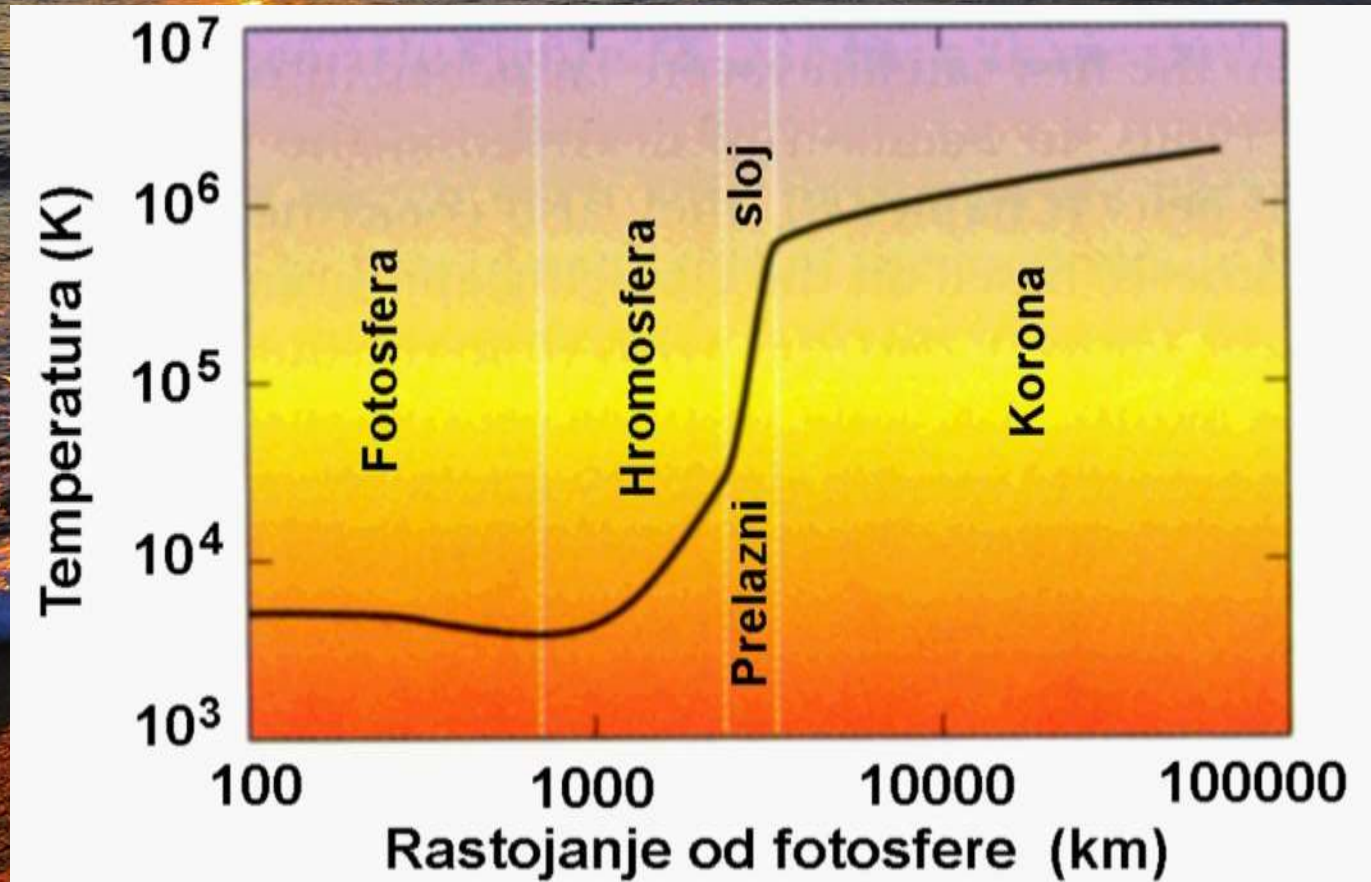
- Menja se spektar, javljaju se apsorpcione linije
- Opada koncentracija čestica
  - Na 1000 km –  $10^{-19} \text{ m}^{-3}$  vodonikovih atoma
  - Na 10000 km –  $10^{-15} \text{ m}^{-3}$
- Jonizacija
  - 2000 – 3000 km – uglavnom neutralan
  - Iznad 6000 km – jonizovan
  - Gornja hromosfera – jako jonizovana (25000 – 300000 K)
- Intenzivna, turbulentna kretanja
  - Na 500 km – 5 km/s, 5000 km – 20 km/s

# Hromosfera

- Supergranule “ograđene” gustim linijama magnetnog polja
- Obod supergranula – **spikule**
  - Male erupcije, oko 15000 K
  - Na visinama 3000 – 4000 km, do 7000 – 12000 km
- Hromosferske baklje (fakule)
  - Sjajne površine, 200 – 300 dana



# Prelazni sloj



# Korona

- Najtopliji i najređi sloj
- Najprostraniji, bleđa od hromosfere
- Veličina i oblik zavise od aktivnosti
  - Minimum – sabijena iznad polova
- Nekoliko radijusa Sunca
  - Prelazi u međuplanetarni prostor
- Stanje gasa - visoke temperature (i do nekoliko miliona stepeni) i jako male gustine
- Čudan spektar – *koronijum?*
  - $\text{Fe}^{13+}$  - zelena linija
  - 9, 10 i 13 puta jonizovano Fe, 11 i 12 puta Ca, 11-15 puta Ni
- Različite forme aktivnosti
  - Bleskovi, zraci, lukovi, perjanice, kondenzacije, šupljine, erupcije...



A vibrant sunset over the ocean. The sun is low on the horizon, casting a golden glow across the sky and reflecting on the water. A rocky island is visible in the distance. Waves are breaking on a sandy beach in the foreground.

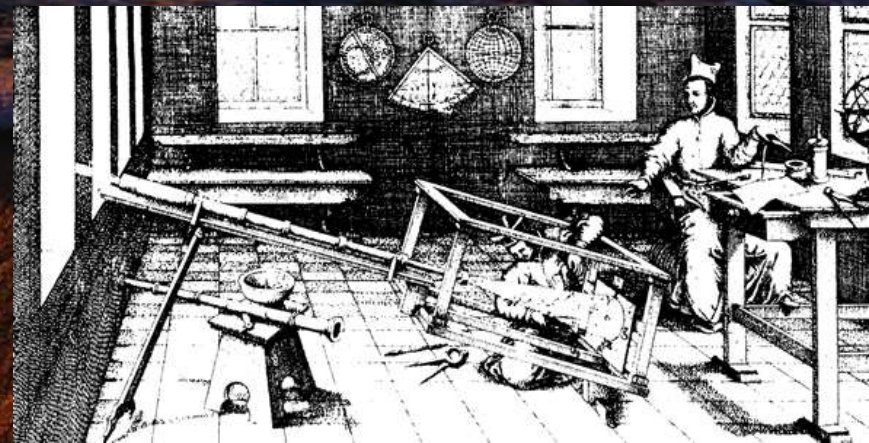
**AKTIVNOST SUNCA**

# Aktivnost Sunca

- **Mirno Sunce** - potpuno predvidljiva zvezda koja iz dana u dan sija na isti način.
- **Aktivno Sunce** - sporadično, nepredvidljivo zračenje. Aktivnosti imaju mali doprinos ukupnom sjaju, ali i te relativno male promene imaju direktan uticaj na Zemlju

# Sunčeve pege

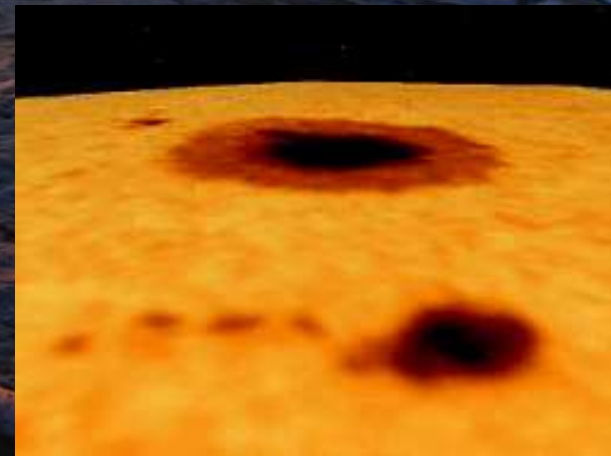
- Jedan od najznačajnijih oblika aktivnosti
- Tamna područija na disku
- Nekad golim okom (40000+ km)
- Prvi podaci – 320 g.p.n.e, Teofrast
- Prva posmatranja:
  - 1607-1611: Fabricijus, Kepler, Galilej



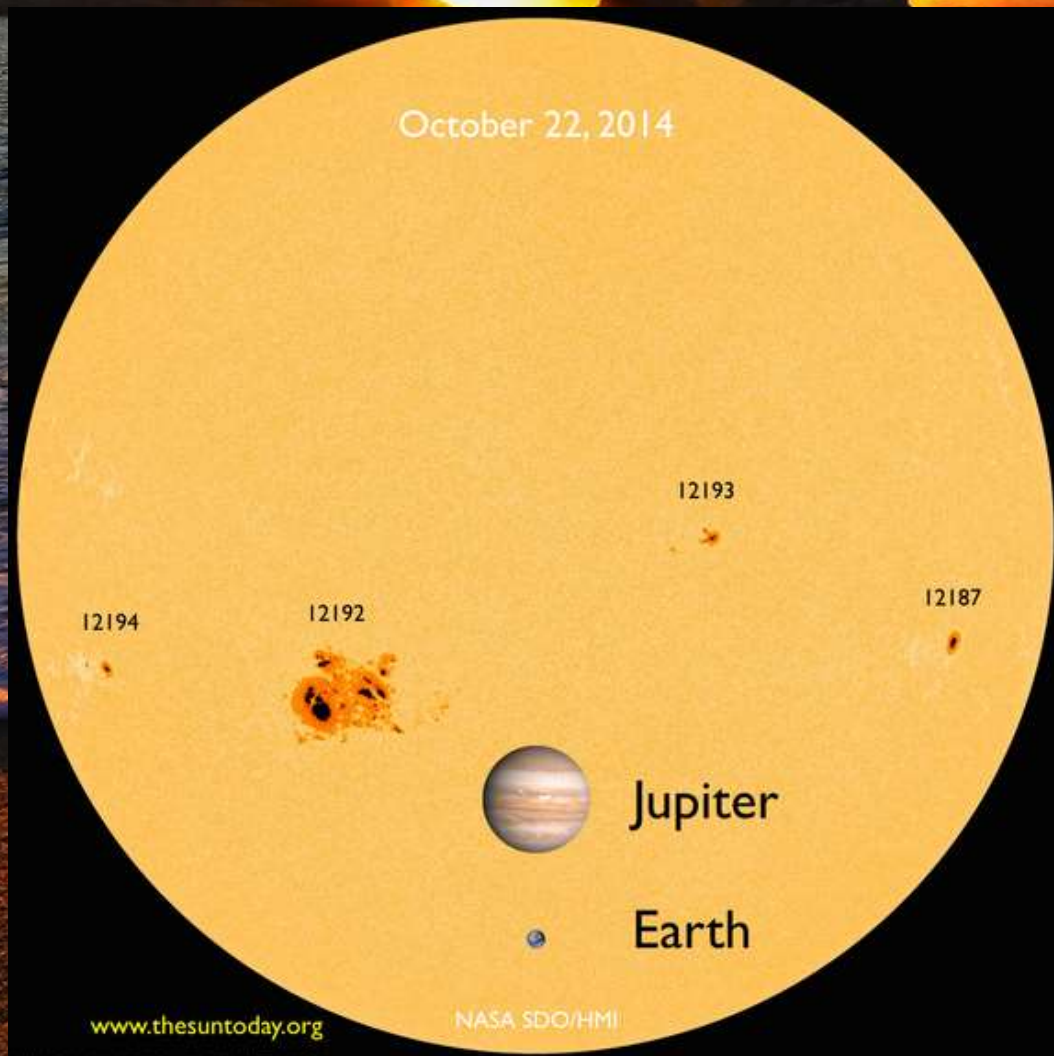


# Sunčeve pege

- Tamna pora koja se kasnije razvija
- Na 5 - 52 stepena širine, najčešće 8 – 30
- Prečnik 1000 – 100000 km (grupe pega)
- Manje pege 1-2 dana, razvijene 10-20 dana
- Senka (umbra) i polusenka (penumbra)
- Prosek:
  - 17500 km – senka, 37000 km polusenka
- Sjaj:
  - Senka 20-30%, polusenka 75-80%
  - 5000 puta veći od sjaja Meseca!
- Temperatura
  - 25-30% niža, 4200K
- Oko pege – *fotosferske fakule (buktinje)*, 10% veći sjaj od proseka
  - Grupe granula, 4000-6000km, lanci 5-10 hiljada x 50 hiljada km
  - Velike – nekoliko sati ili dana pre i posle pege

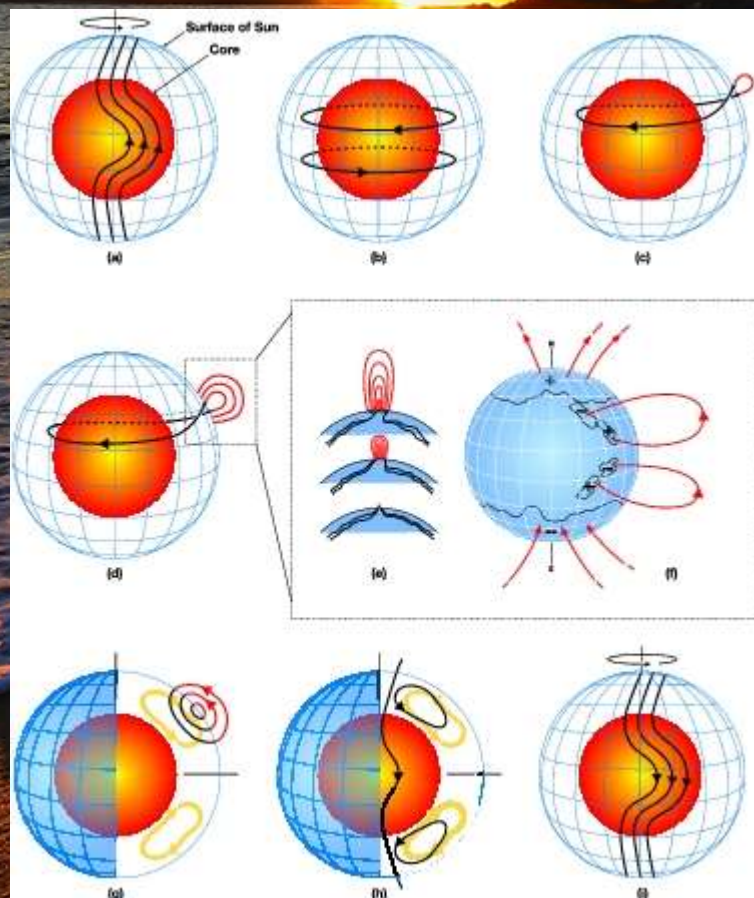


# Sunčeve pege

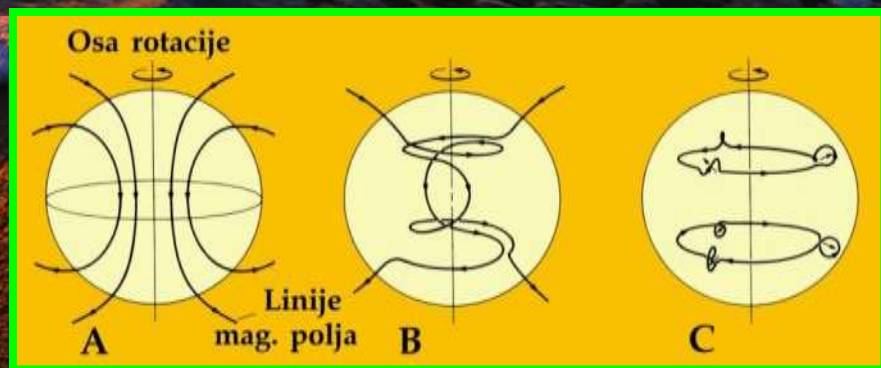


- AR 12192 – najveća aktivna oblast u prethodnih 25 godina
- 33. najveća od 32.908 aktivnih oblasti zabeleženih od 1874. god
- Vidljiva golim okom!

# Kako nastaju pege?

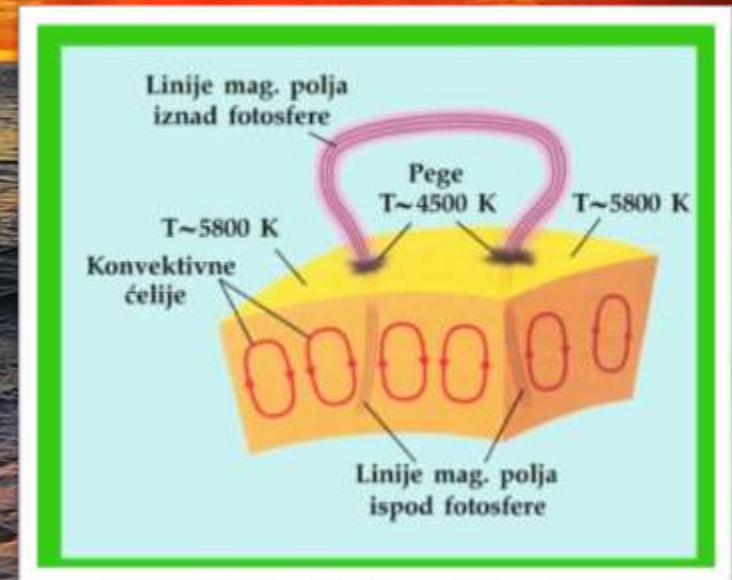


- Linije osnovnog magnetnog polja se, prolazeći kroz slojeve Sunca, deformišu i savijaju
- Razlog - radijalne konvekcije plazme i diferencijalna rotacija
- jedan njihov deo ide ispred drugog (teorija *Bebkoka*).

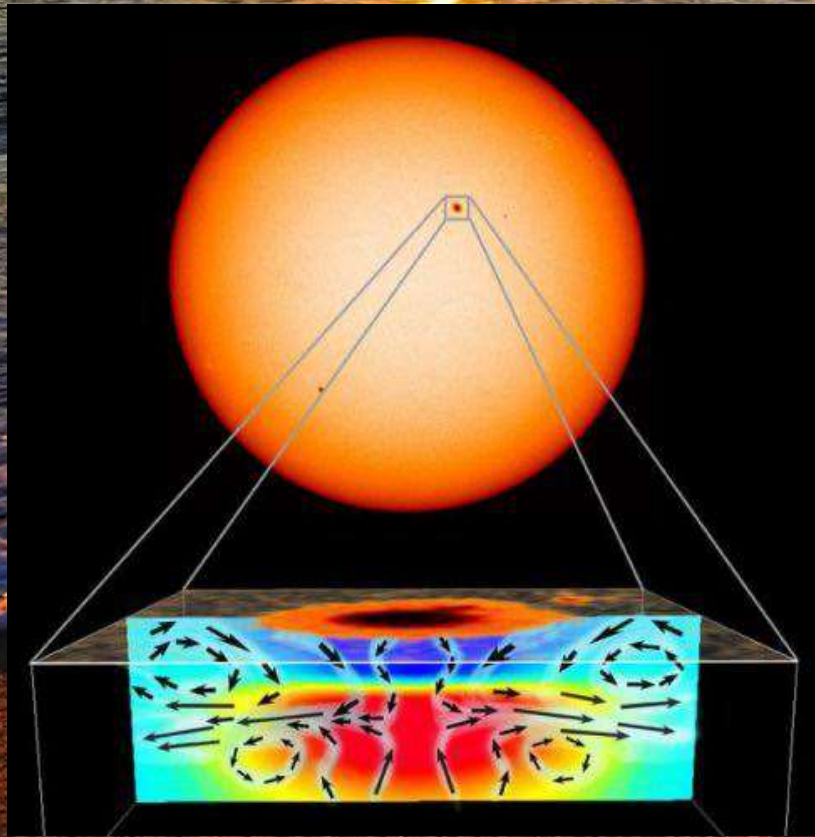


# Nastanak pega

- Linije polja su zatvorene i formiraju prsten.
- Jedan njegov deo je ispod fotosfere, a drugi deo je iznad (u obliku lukova ili petlji).
- U preseku prstena sa površinom fotosfere nastaju pege suprotnog magnetnog polariteta.
- Centri aktivnosti na Suncu javljaju se na mestima gde iskrivljene linije magnetnog polja izvire iz fotosfere.

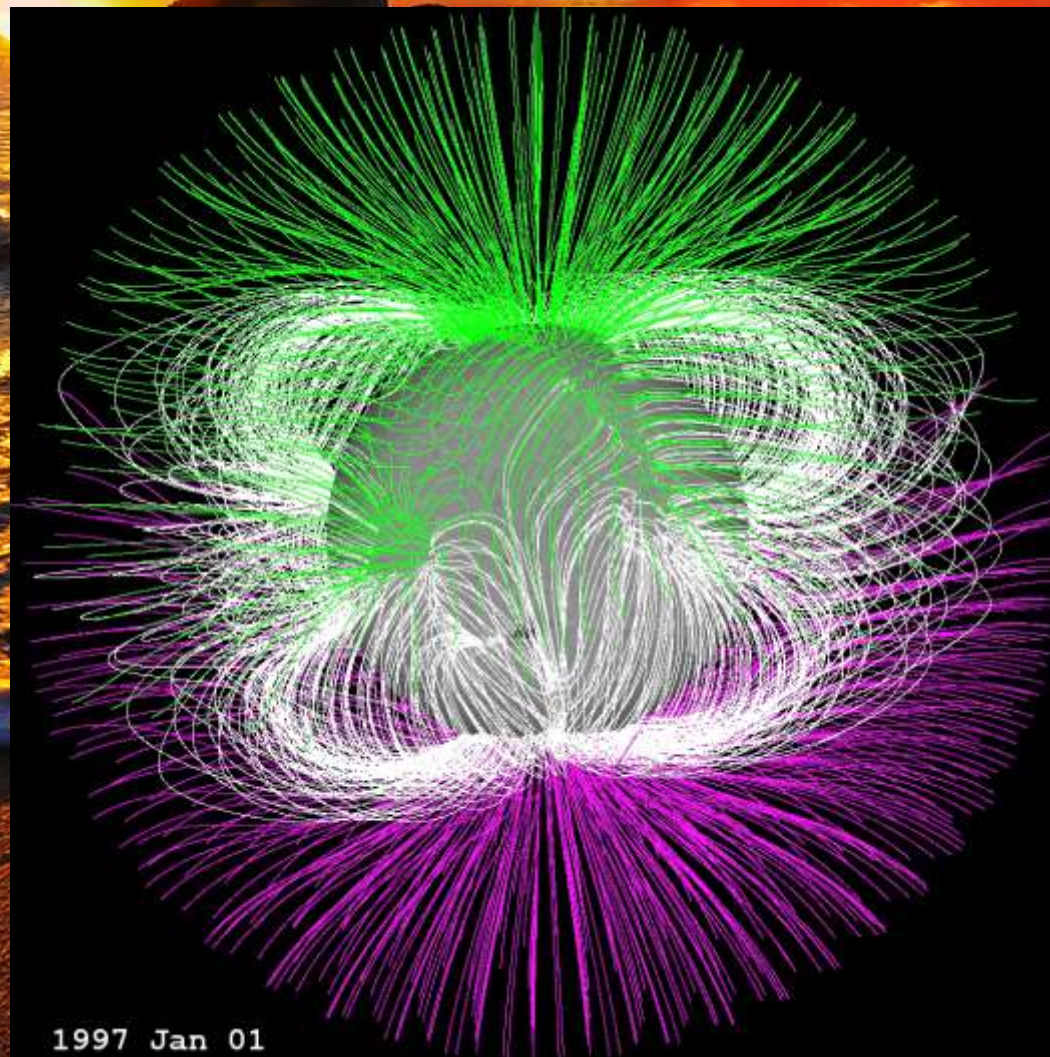


# Nastanak pega



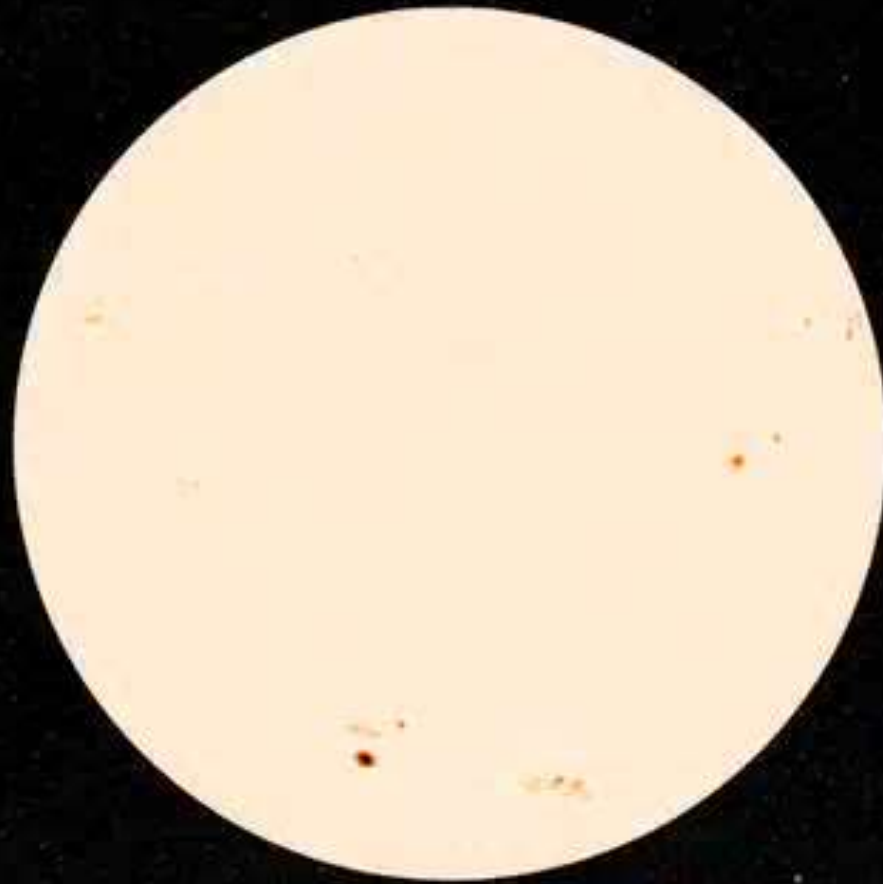
- Pojačano magnetno polje u pegama suprotstavlja se daljem konvektivnom kretanju.
- Slabljenje ili zaustavljanje konvekcije otežava dotok toplote
- Fotosferski gas u pegama se hladi, sjaj postaje manji od okoline.

# Magnetno polje Sunca



Credits: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

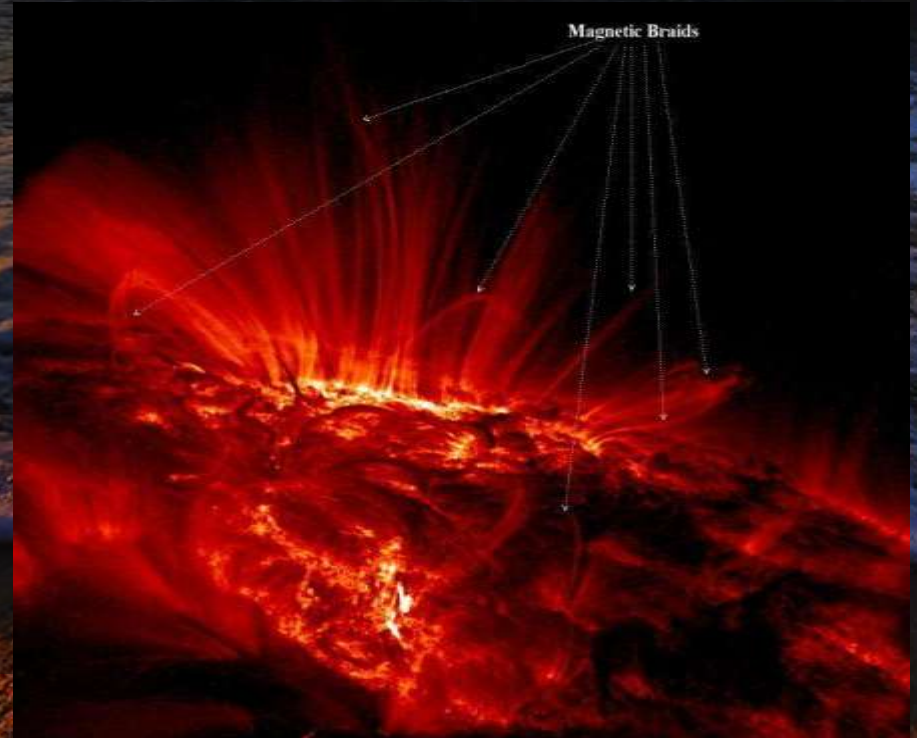
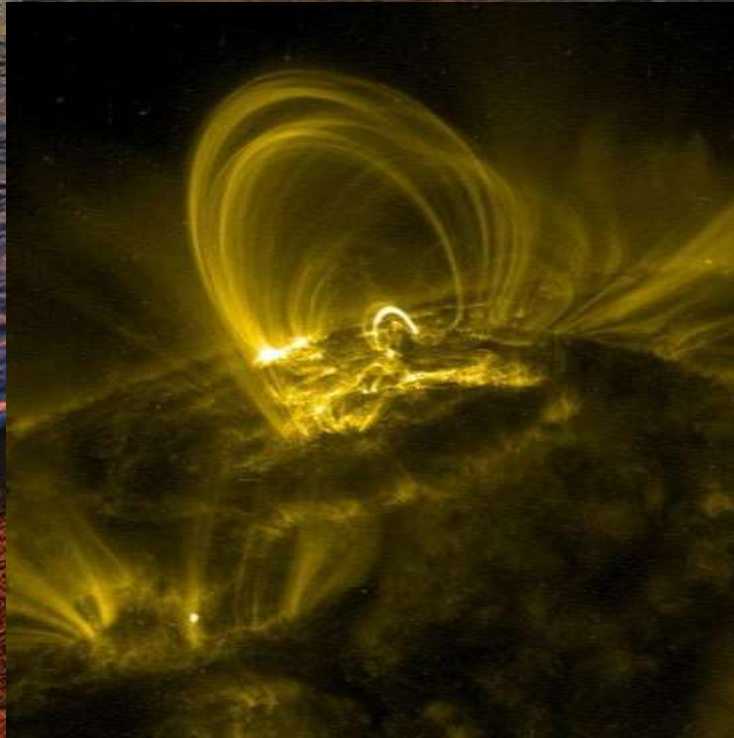
# “Dinamo” mehanizam



Credits: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

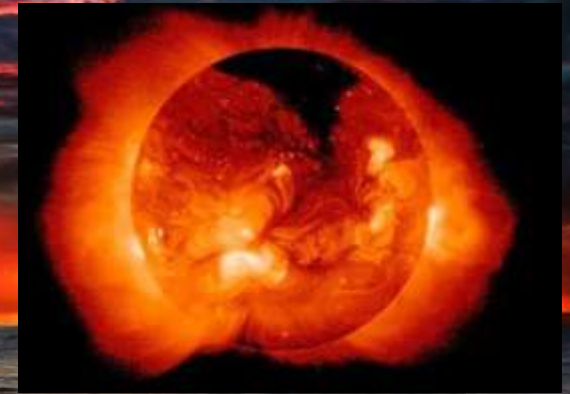
# Koronarni lukovi

- Linije magnetnog polja aktivnih oblasti





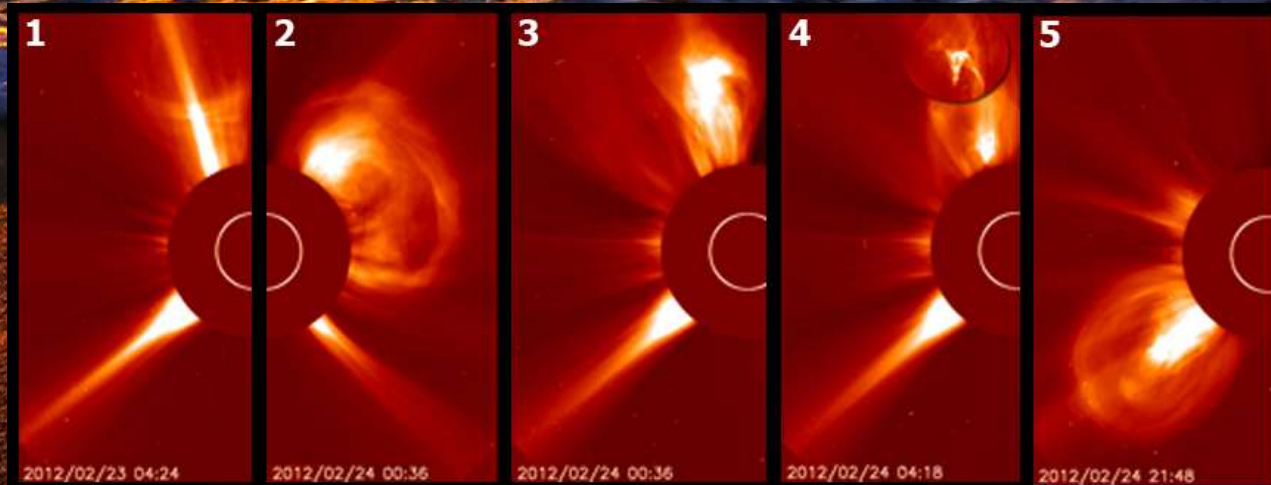
# Koronine šupljine



- Gustina oko 10 puta manja
- Linije mag. polja prostiru se od površine ka međuplanetarnom prostoru
- naelektrisane čestice prate linije polja
- u drugim oblastima – linije polja blizu površine Sunca
- dimenzije – najveće nekoliko stotina hiljada km (javljaju se retko), najčešće desetak hiljada kilometara – svakih nekoliko sati
- Kroz njih se emituje sunčev vetar, 600-800 km/s

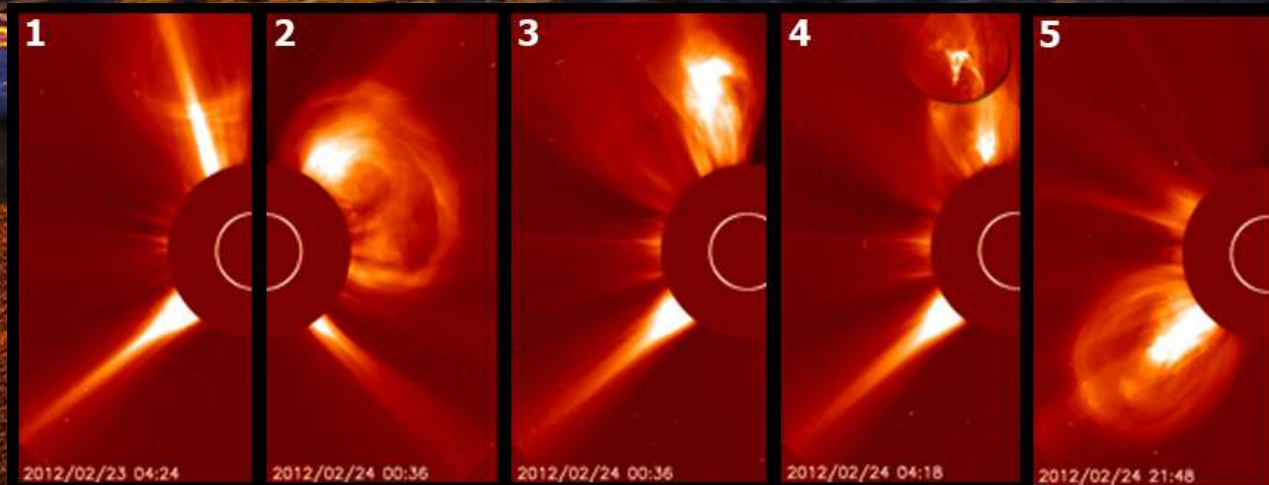
# Eksplozije u hromosferi i koroni

- Jedan od naznačajnijih oblika aktivnosti
- Iznanadni, kratkotrajni procesi u kojima dolazi do velikog pojačanja intenziteta zračenja u ograničenim oblastima fotosfere
- Rezultat naglog osobađanja magnetne energije i njenog prelaska u kinetičku energiju, toplotu i svetlost
- Nastaju iznad “neutralnih” oblasti između dve pege suprotnog polariteta; najčešće se javljaju u multipolarnim grupama



# Eksplozije u hromosferi i koroni

- Pre nastanka eksplozije – pojačanje zračenja jonizovanog gasa korone
- U trajanju od oko 1 min – ubrzavanje elektrona -> X-zračenje
- Za nekoliko minuta se dostiže najveći sjaj, intenzitet se smanjuje više sati
- Složene pojave, odigravaju u celoj dubini atmosfere

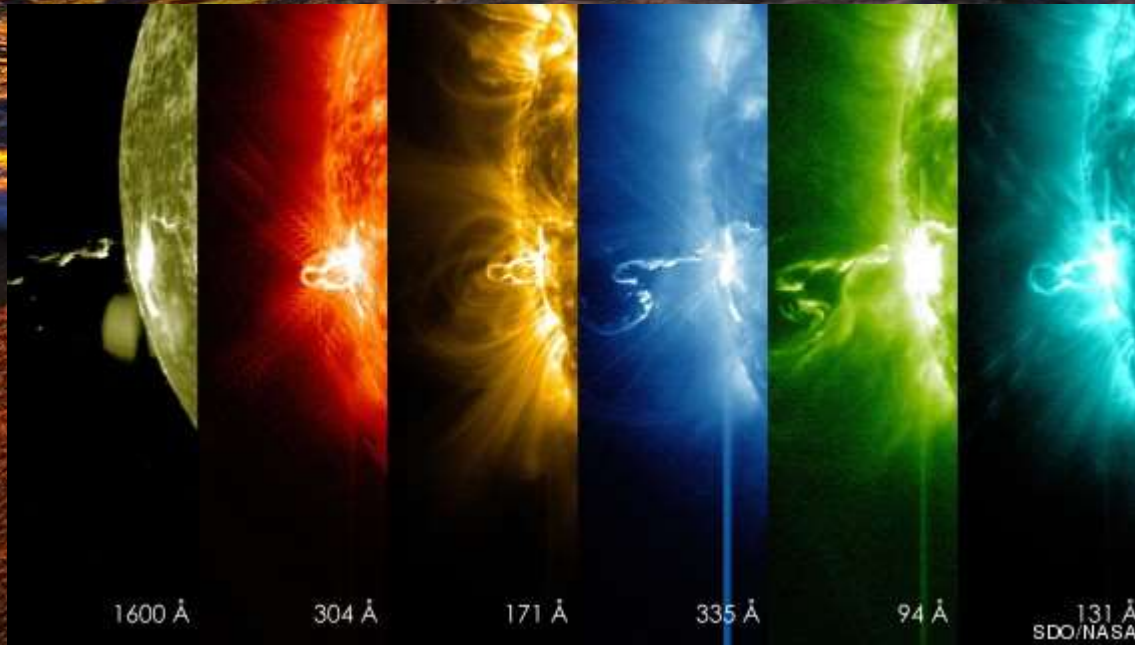


# Eksplozije u hromosferi i koroni

- 20% energije – optički spektar, ostalo UV, X i radio zračenje, zagrevanje i izbacivanje oblaka jonizovanog gasa - plazme
- kreće kroz međuplanetarni prostor brzinom od 1.500 km/s

# Eksplozije u hromosferi i koroni

- Tokom prlaska grupe pega preko diska – 30 – 50, maksimum aktivnosti i 300!
- 100+ dnevno na Suncu; jake – nekoliko puta godišnje



24. feb. 2014  
Klasa X4.9

# Protuberance

- različitih oblika i veličina
- temperatura – niža od okolne hromosfere i iznosi 10.000 K
- gustina veća – sjajnije
- traju oko 3 obrta Sunca, zabeležene – po nekoliko godina
- stabilnost i opstanak u ređoj koroni – jedino ako je pritisak gasa protuberance jednak pritisku gasa korone
- pritisak = gustina x temperatura; gustina 100 puta veća od korone
- kretanje supstance – pod uticajem magnetnog polja
- materijalizacija linija magnetnog polja

# Protuberance

- *Aktivne protuberance*

- vrlo brz razvoj (od 10 minuta do nekoliko sati)
- najčešće nastaju kondenzacijom u koroni i spuštanjem naniže u hromosferu
- aktivnosti, traju po nekoliko sati
- Brzina materijala – nekoliko stotina km/s
- temperatura 25.000 K



# Eruptivne protuberance

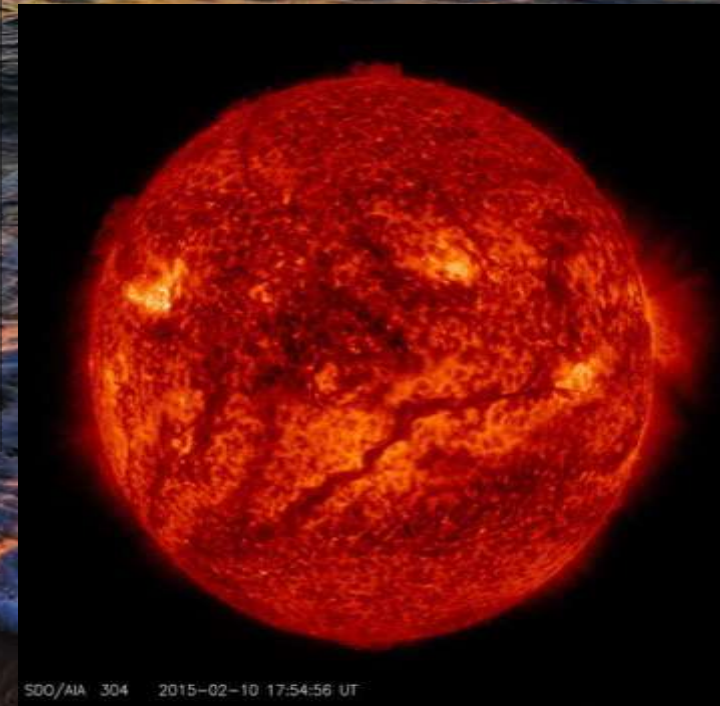
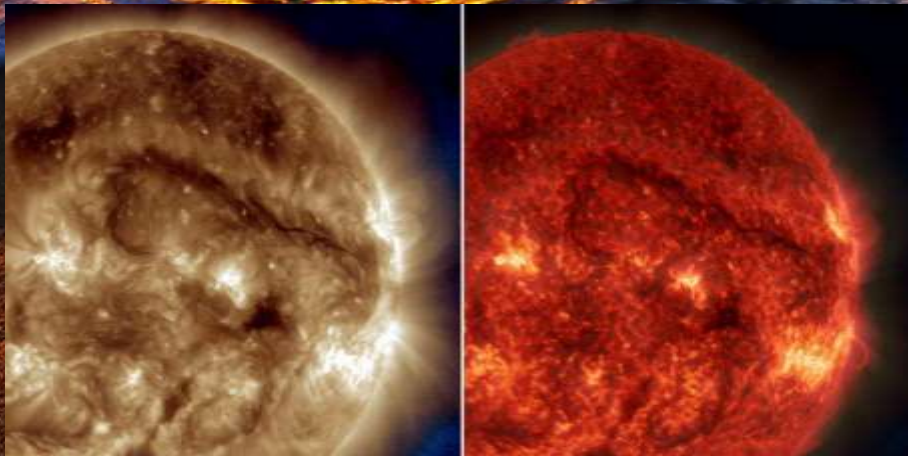
- Dostižu velike visine, preko milion kilometara
- Najčešće u obliku luka, brzo raste, nakon pucanja materijal pada nazad u hromosferu
- *protuberance Sunčevih pega* – uvek vezane za grupe pega; oblik strogo prati linije jakog mag. polja; kada su na rubu Sunca vide se u obliku petlji



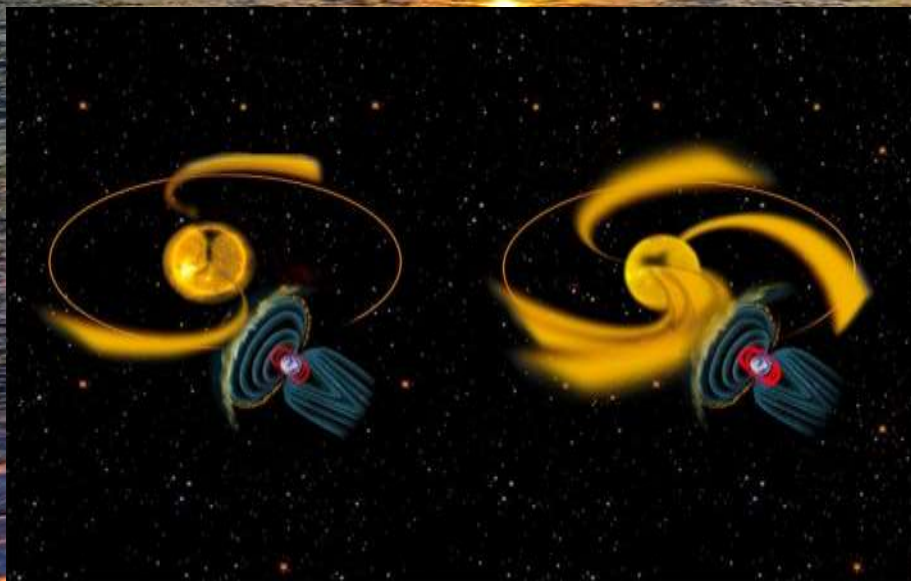


# Protuberance - filamenti

- Protuberance – na ivici diska
- Filamenti – protuberance posmatrane “odozgo”, projekcija protuberanci na površinu
- 10. februar, 858,000 kilometers (67x Zemlja)
- Oktobar 2014, 1 milion km!



# Sunčev vetar

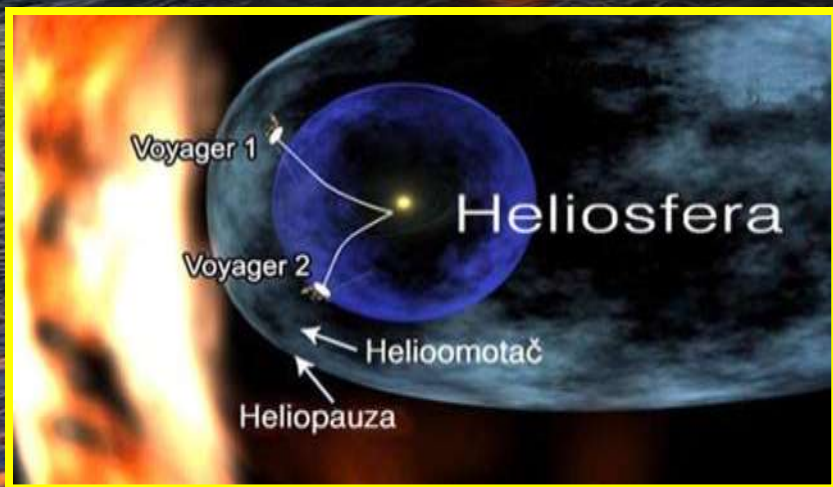


- EM zračenje i čestice stalno napuštaju Sunce.
- **Sunčev vetar** - korpuskularno zračenje (p, e, jezgra He)
- Visoka temperatura korone omogućava nastanak solarnog vetra.
- Prvi put - Mariner 2 (1962. godine)

# Sunčev vetar

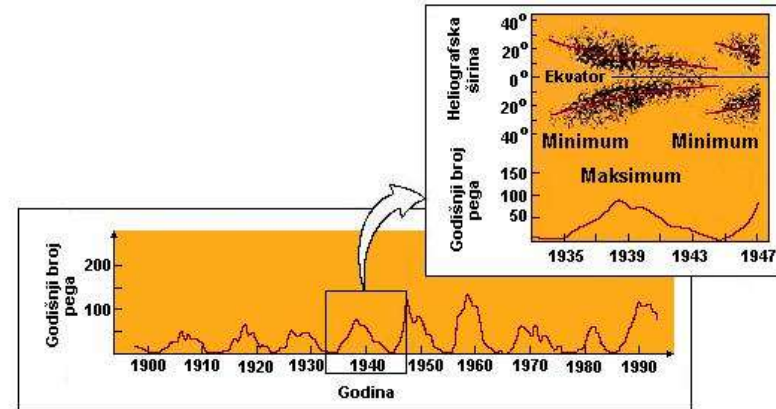
- 10 miliona km od Sunca – temp. dovoljno visoke -> čestice su dovoljno brze, pa mogu da savladaju gravitaciju Sunca.
- Sunčev vetra:  $10^8$  -  $10^9$  kg svake sekunde
- Izgubljeni materijal - nadoknađuje sa površine (isparila za samo 1-2 dana)
- Vetar je do sada odneo 0,1% ukupne mase Sunca.

# Sunčev vetar

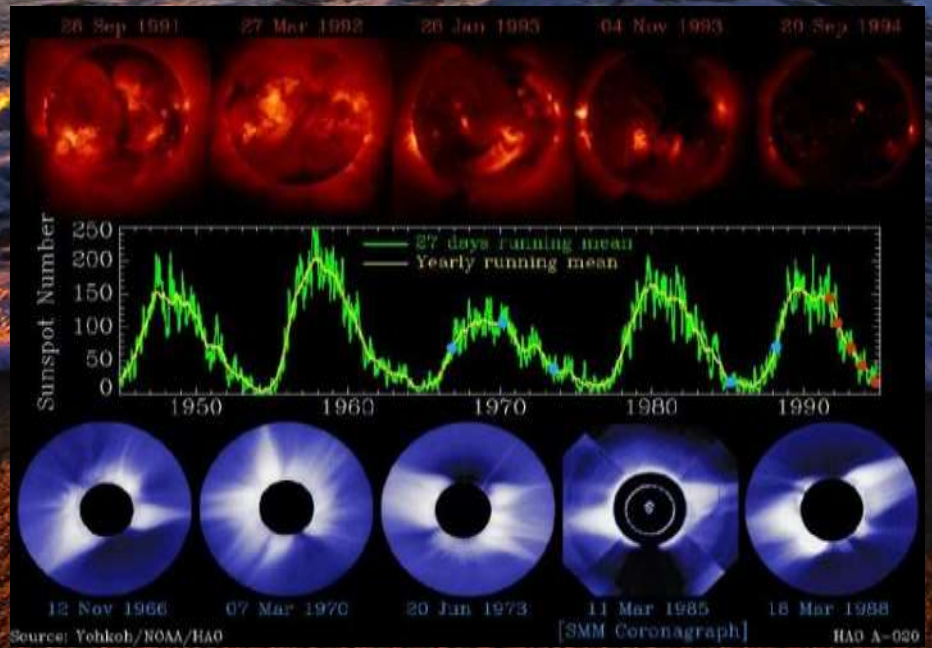
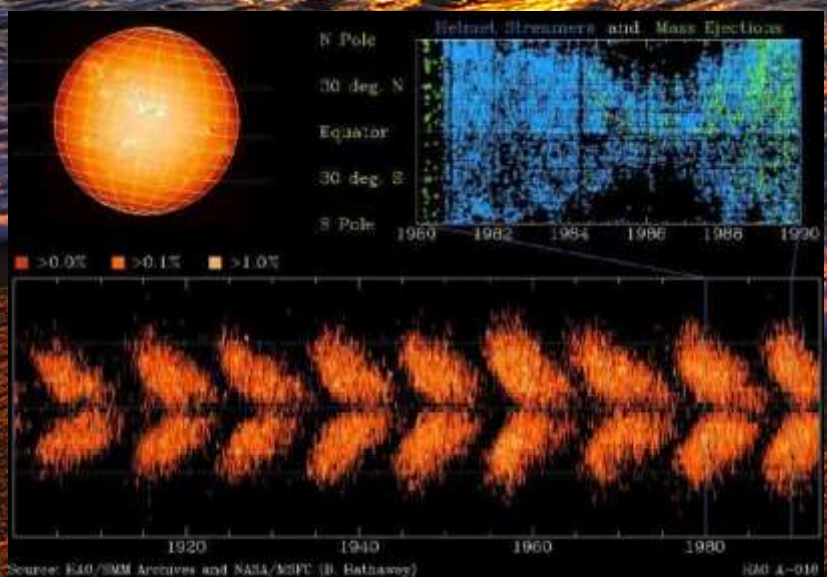
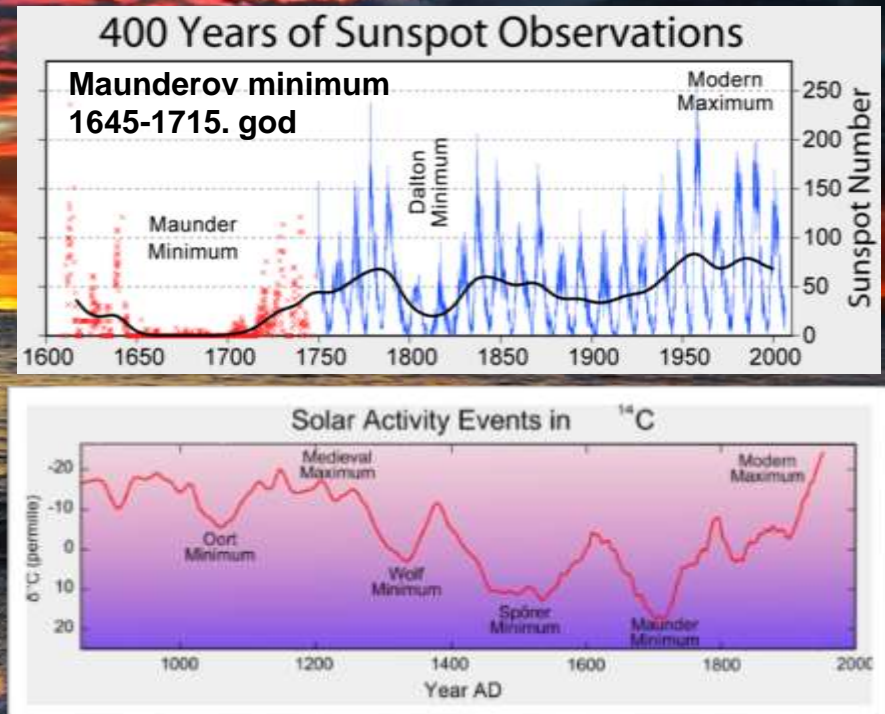
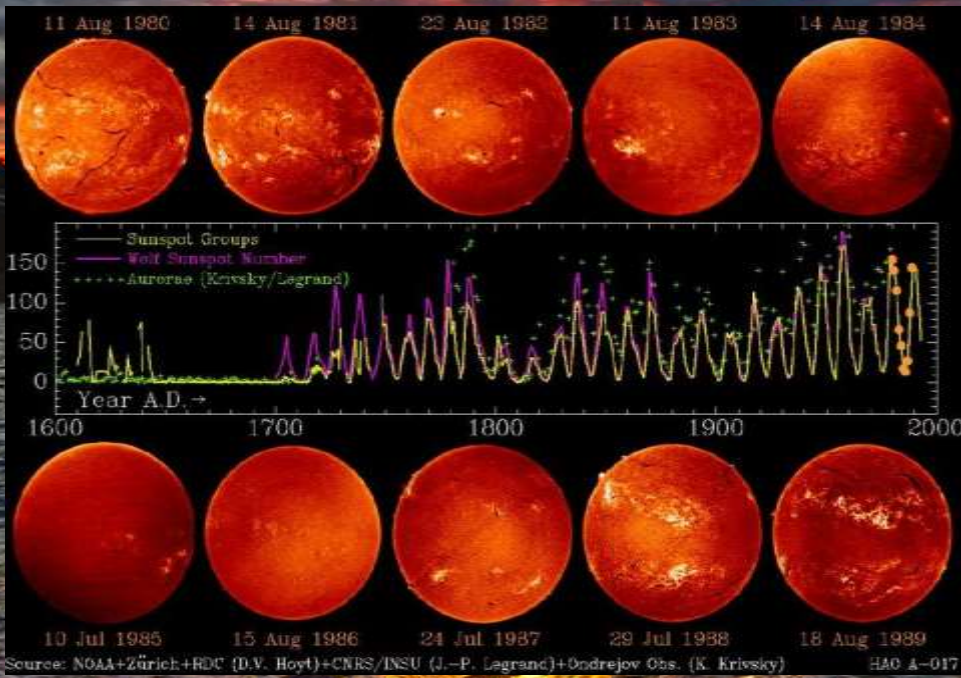


- Heliosfera – oblast delovanja vetra
- Vojadžer 1 – 120 AJ
- Brzina čestica – raste sa udaljavanjem od Sunca
- Od 50km/s (na udaljenosti od nekoliko radijusa) do nekoliko stotina km/s.
- Kod Zemlje - 300-750 km/s

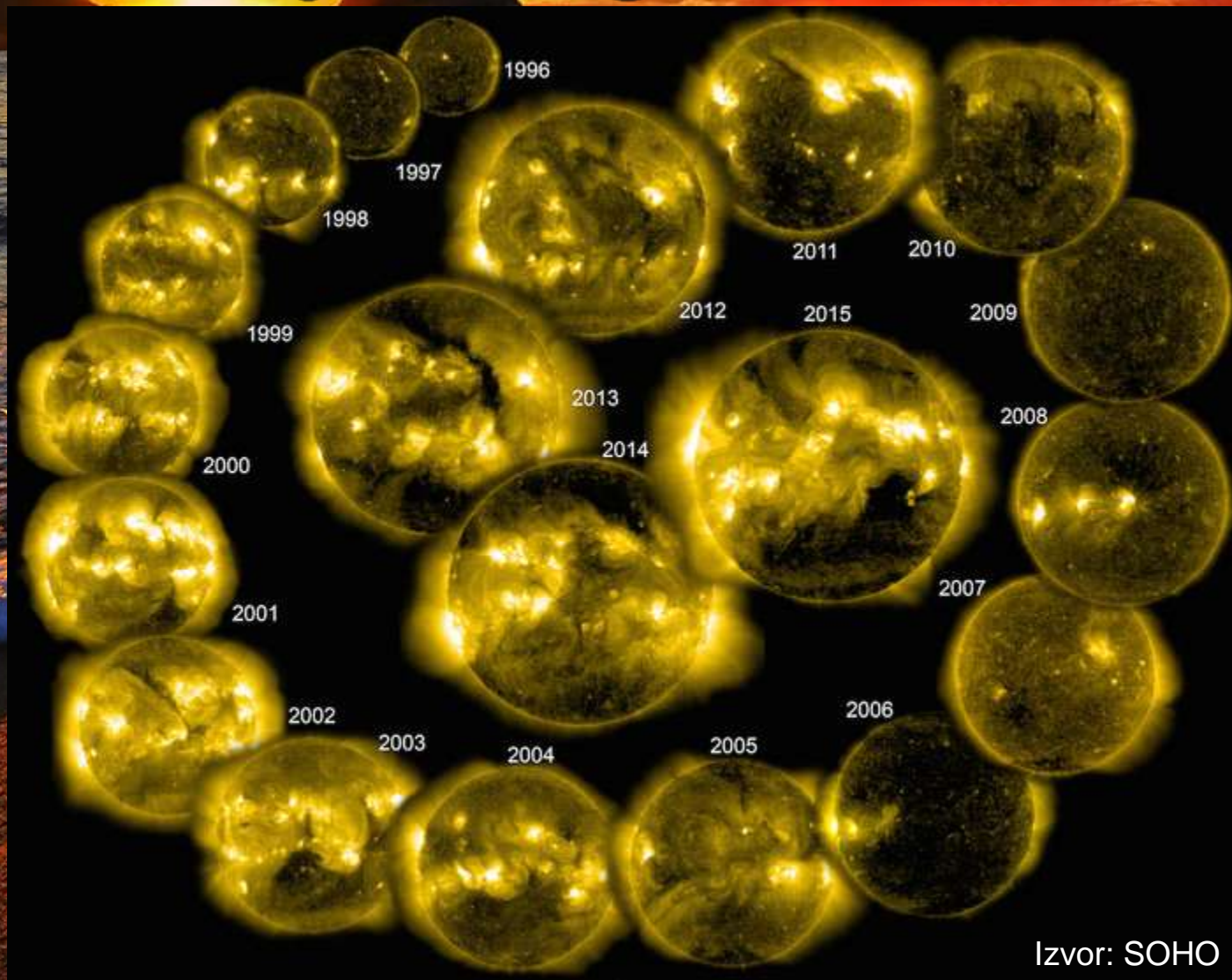
# Ciklus aktivnosti



- Ukupan broj pega na Suncu se periodično menja
  - zaključak – na osnovu neoliko vekova posmatranja
  - ciklusi pega
  - maksimum u proseku svakih 11 god, zatim opada
  - period između 7 i 15 god
- Heliografska širina na kojoj se pojavljuju pege
  - minimum – nekoliko pega, dve uske zone, 25 i 30° od ekvatora
  - maksimum – pojas od 15 do 20° severno i južno od ekvatora
  - kraj ciklusa – mali broj pega, pojas do 10° oko ekvatora
  - prva godina novog ciklusa poklapa se sa poslednjom godinom prethodnog



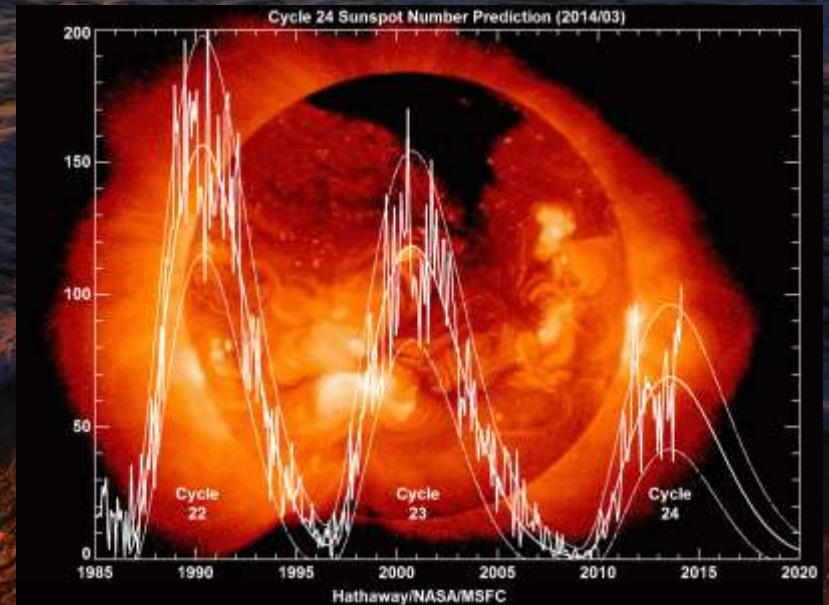
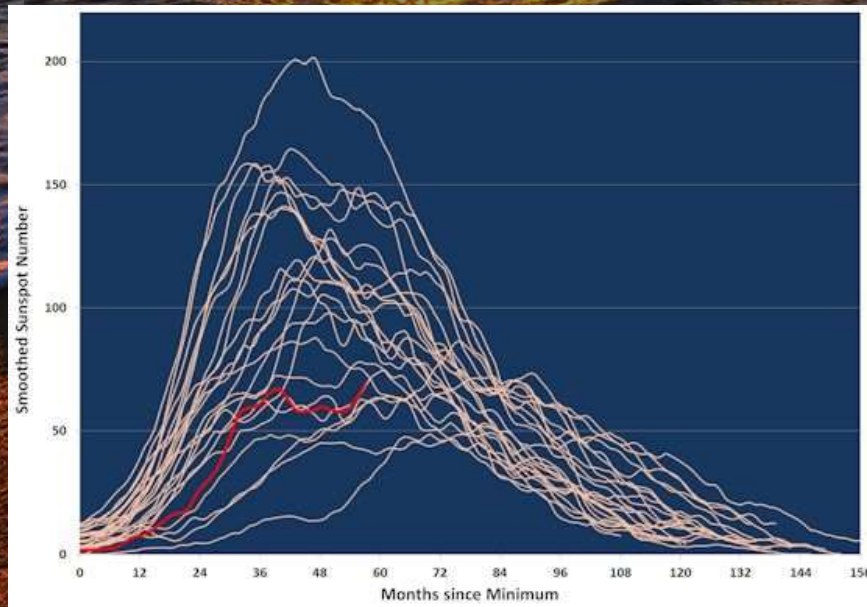
# Poslednjih 20 godina



Izvor: SOHO

# Poslednji maksimum

- 24. ciklus pega; očekivan maksimum 2014. god.
- “mini” maksimum

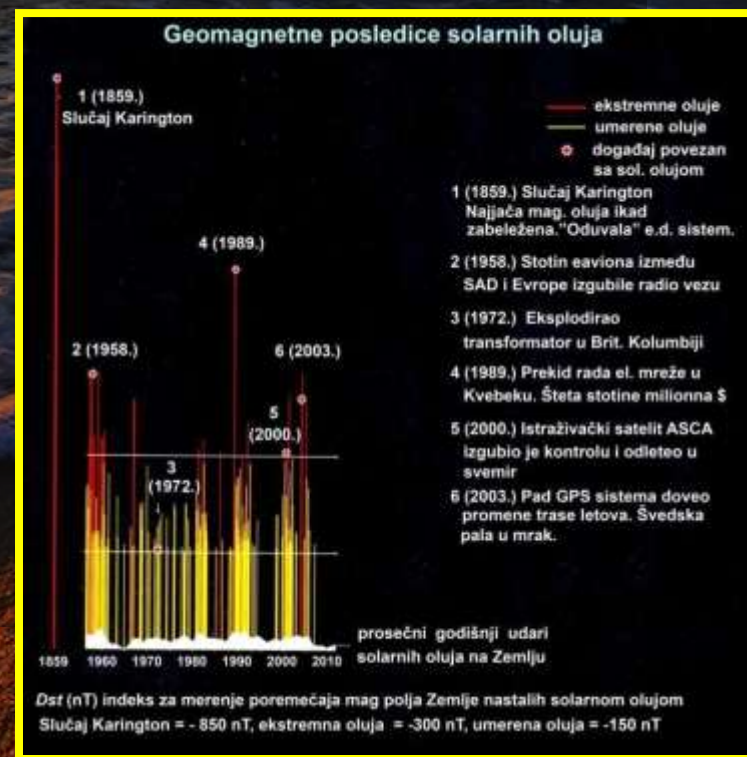




# Geomagnetne oluje



- 1 - 2 septembar 1859
  - Karingtonov “događaj”; najveća zabeležena!
  - Smetnje u telegrafskim linijama, strujni udari, požari
  - Aurora: Havaji, Meksiko, Kuba
- 13 mart 1989
  - Šest miliona ljudi bez struje, 9 sati
  - Kvebek, Kanada
  - Aurora u Teksasu
- 14 jul 2000
  - Klasa X5, pravo ka Zemlji
  - Nije bilo smetnji
  - Detektovali Vojadžer 1 i Vojadžer 2



# Sunce juče, danas, sutra...

- SOHO

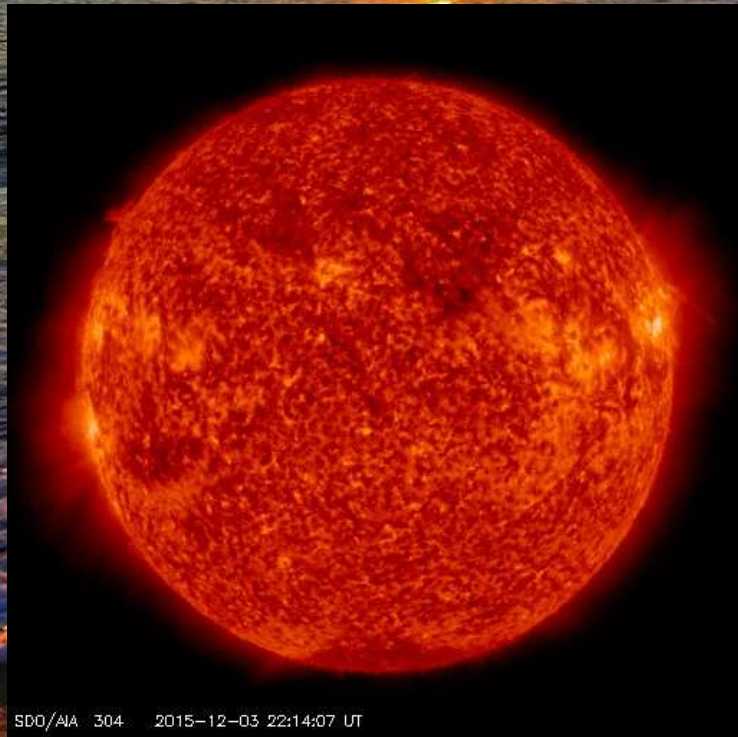
- Solar and Heliospheric Observatory
- 20 godina rada
- Lansiran 2. decembra 1995

- ESO

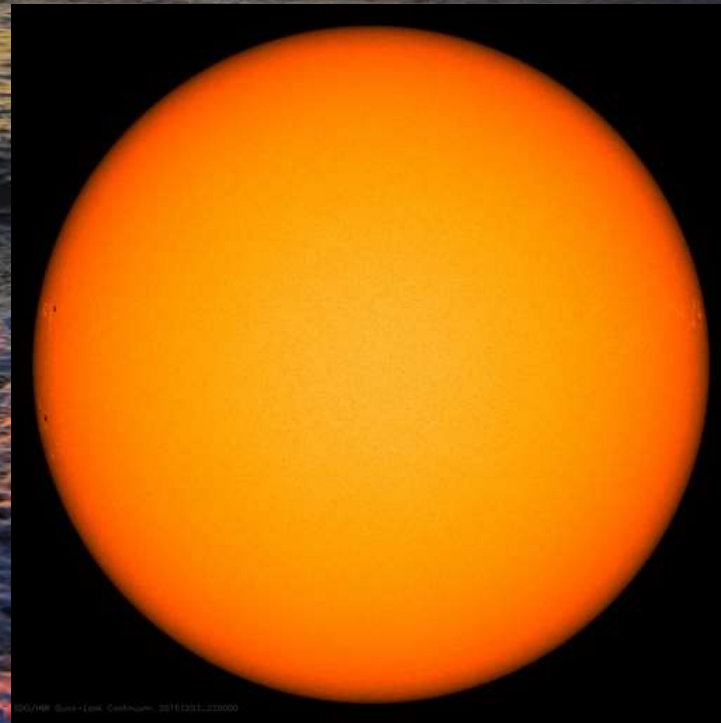
- Solar Dynamics Observatory
- Lansiran februara 2010



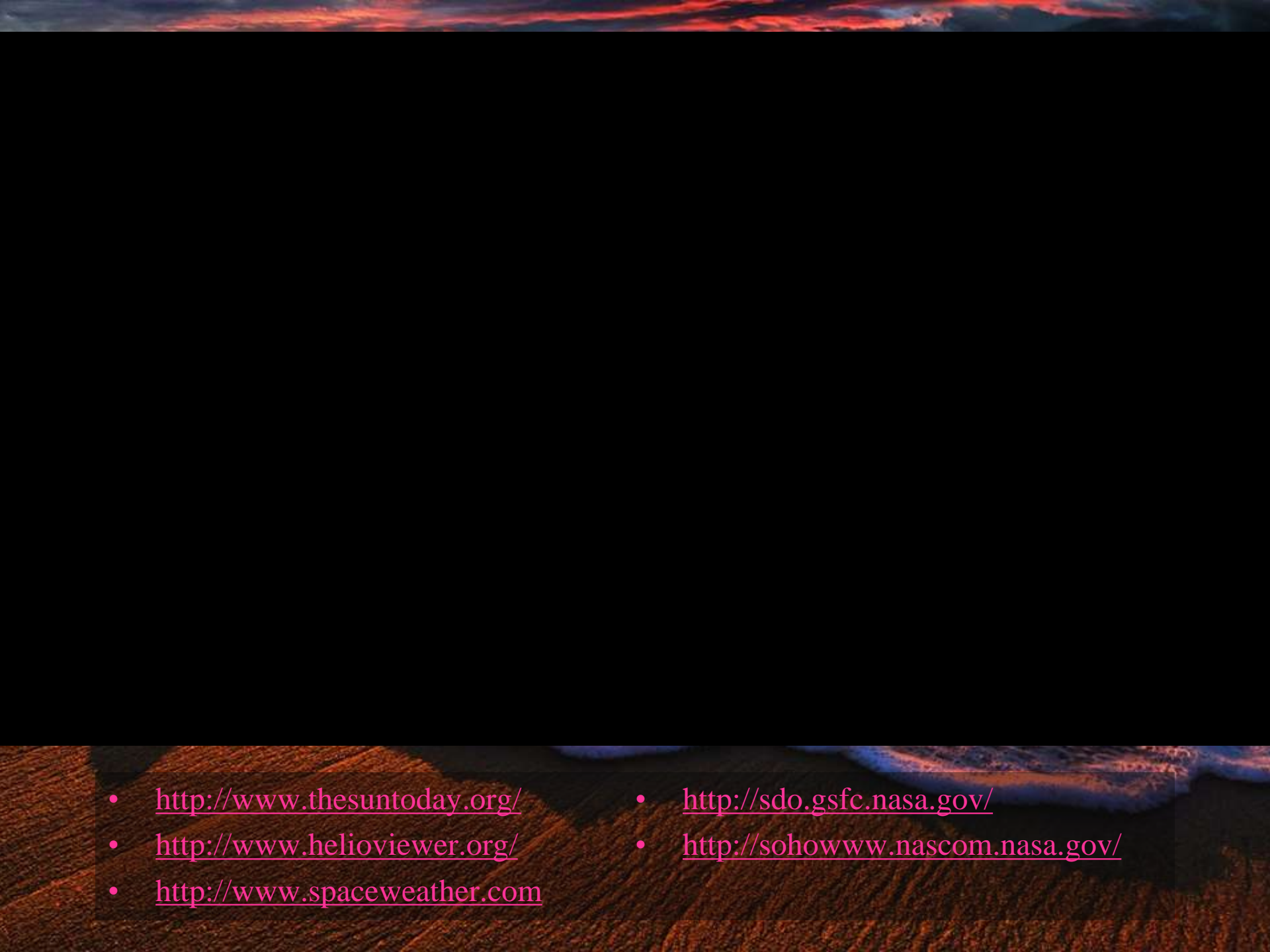
# Sunce danas



SDO/AIA 304 2015-12-03 22:14:07 UT



SDO/HRP 6868-Look South 20151203\_220000

- 
- <http://www.thesuntoday.org/>
  - <http://www.helioviewer.org/>
  - <http://www.spaceweather.com>

- <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>
- <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

# Pitanja?

[www.svetnauke.org](http://www.svetnauke.org)

[mmilan@svetnauke.org](mailto:mmilan@svetnauke.org)

[www.facebook.com/svetnauke.org](https://www.facebook.com/svetnauke.org)



<http://dfn.pmf.ni.ac.rs>

[www.facebook.com/dfn.nis](https://www.facebook.com/dfn.nis)