

Solen



Lektion 7

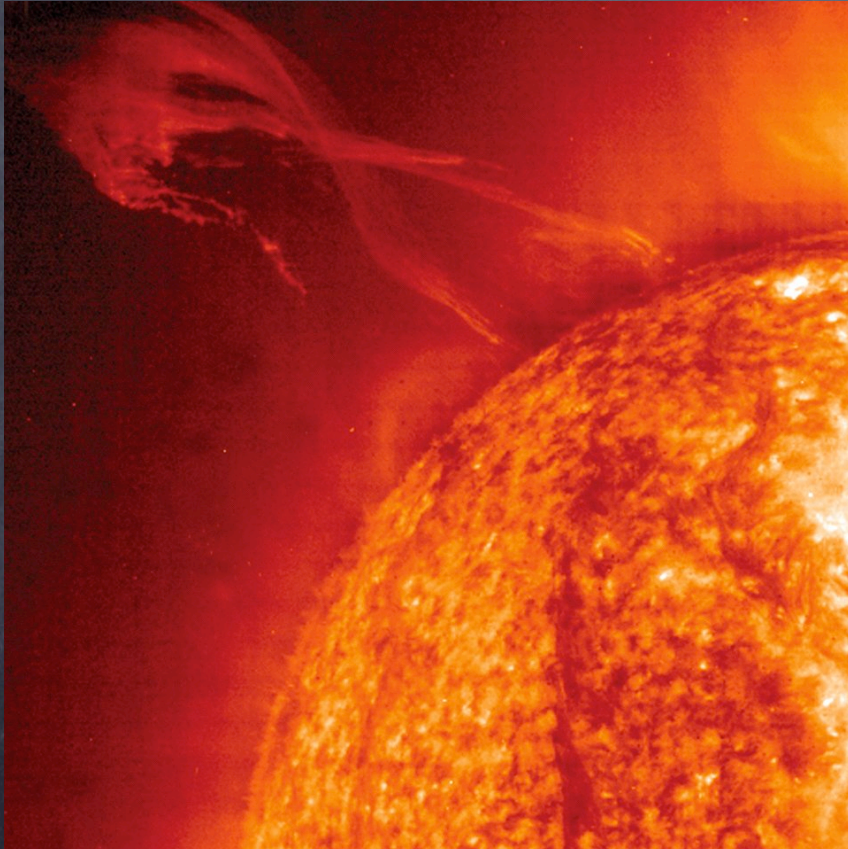
table 18-1

Sun Data

Distance from the Earth:	Mean: 1 AU = 149,598,000 km Maximum: 152,000,000 km Minimum: 147,000,000 km
Light travel time to the Earth:	8.32 min
Mean angular diameter:	32 arcmin
Radius:	696,000 km = 109 Earth radii
Mass:	1.9891×10^{30} kg = 3.33×10^5 Earth masses
Composition (by mass):	74% hydrogen, 25% helium, 1% other elements
Composition (by number of atoms):	92.1% hydrogen, 7.8% helium, 0.1% other elements
Mean density:	1410 kg/m ³
Mean temperatures:	Surface: 5800 K; Center: 1.55×10^7 K
Luminosity:	3.86×10^{26} W
Distance from center of Galaxy:	8000 pc = 26,000 ly
Orbital period around center of Galaxy:	220 million years
Orbital speed around center of Galaxy:	220 km/s



Solens energi alstras genom fusionsreaktioner i dess inre



- När solen skickar ut ljus förlorar den också energi. Det måste finnas en mekanism som alstrar denna energi annars skulle solen slockna
- Energin som frigörs i en kärnreaktion motsvarar en liten minskning av massan enligt Einsteins ekvation: $E = mc^2$
- Fusionsreaktioner fortlöper bara vid mycket höga temperaturer; ex. vätefusion vid $T > 10^7$ K
- I solen råder sådana temperaturer bara i den täta inre kärnan

Hur länge kan solen lysa?

Einstein: materia är en form av energi

$$E = mc^2$$

Ändring av solens energi innehåll pga utstrålningen

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} = L$$

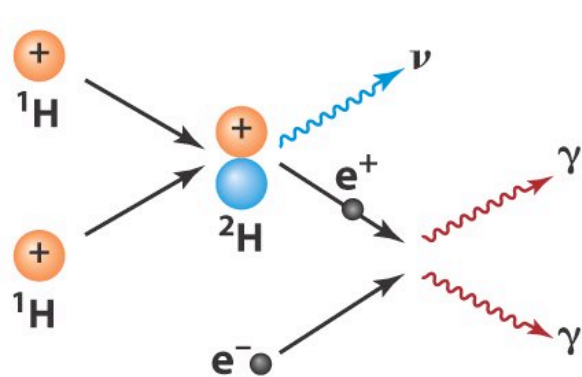
gör att solen tappar i massa

$$\dot{m} = \frac{L}{c^2} = \frac{4 \times 10^{26}}{(3 \times 10^8)^2} \text{ kg s}^{-1} = 4.4 \times 10^9 \text{ kg s}^{-1}$$

men bränsleförrådet räcker i

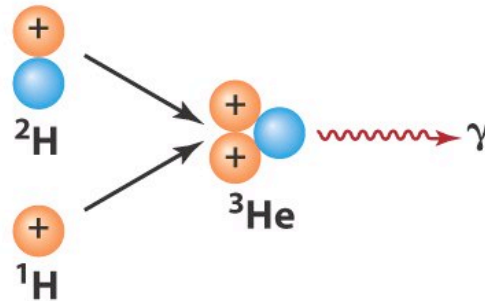
$$t = \frac{M_{\odot}}{\dot{m}} = \frac{2 \times 10^{30}}{4.4 \times 10^9} \text{ s} = 4.5 \times 10^{20} \text{ s} = 1.4 \times 10^{13} \text{ yr}$$

Solens energi kommer från vätefusion, en serie termonukleära reaktioner där fyra vätekärnor (protoner) slås samman och bildar en heliumkärna



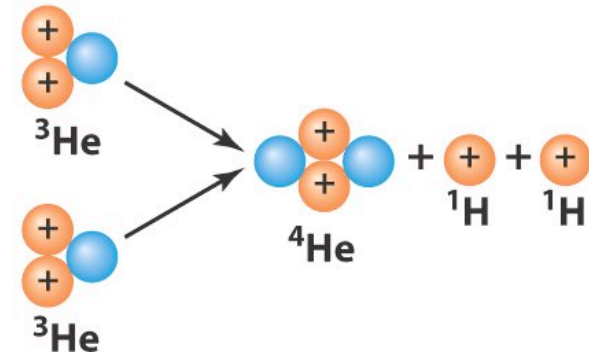
(a) Step 1:

- Two protons (hydrogen nuclei, ^1H) collide.
- One of the protons changes into a neutron (shown in blue), a neutral, nearly massless neutrino (ν), and a positively charged electron, or positron (e^+).
- The proton and neutron form a hydrogen isotope (^2H).
- The positron encounters an ordinary electron (e^-), annihilating both particles and converting them into gamma-ray photons (γ).



(b) Step 2:

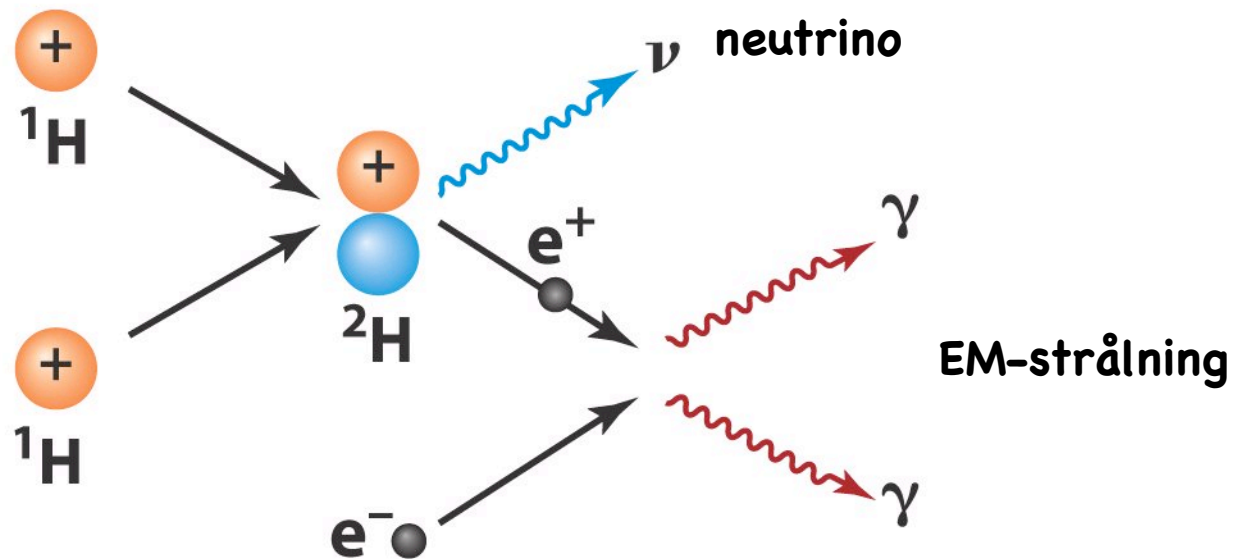
- The ^2H nucleus from the first step collides with a third proton.
- A helium isotope (^3He) is formed and another gamma-ray photon is released.



(c) Step 3:

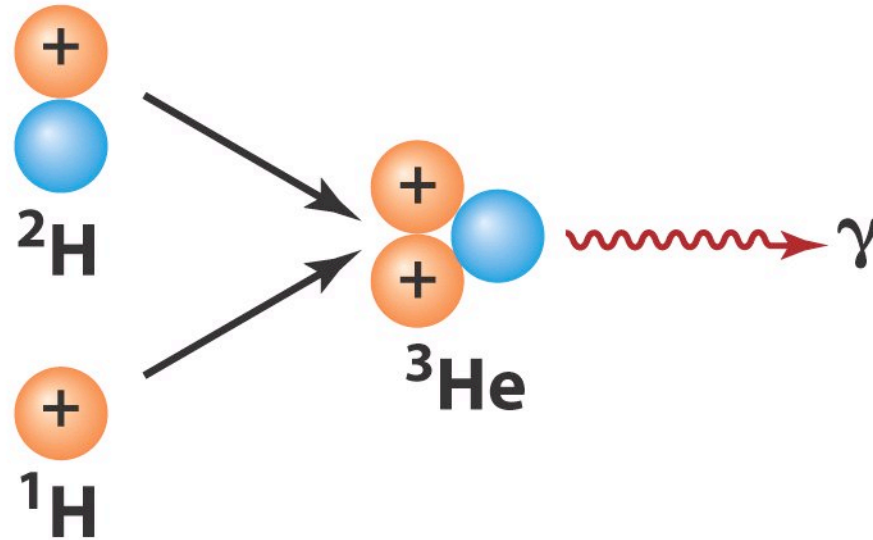
- Two ^3He nuclei collide.
- A different helium isotope with two protons and two neutrons (^4He) is formed and two protons are released.

Proton-proton-kedjan



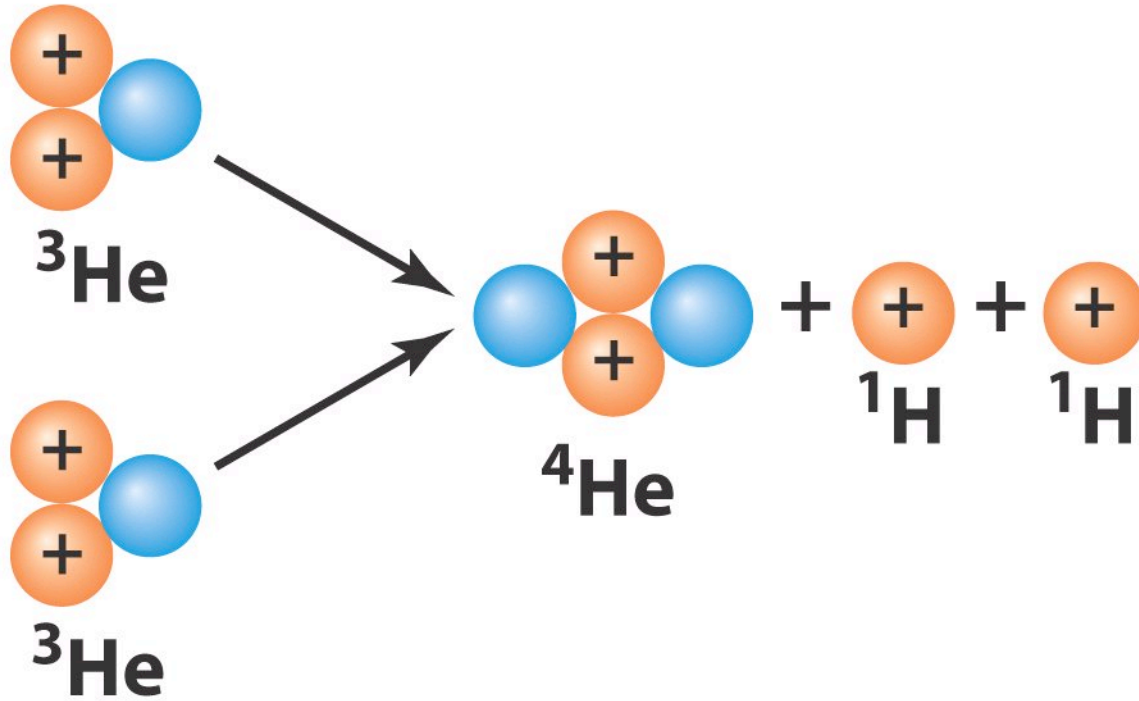
Step 1:

- Two protons (hydrogen nuclei, ${}^1\text{H}$) collide.
- One of the protons changes into a neutron (shown in blue), a neutral, nearly massless neutrino (ν), and a positively charged electron, or positron (e^+).
- The proton and neutron form a hydrogen isotope (${}^2\text{H}$).
- The positron encounters an ordinary electron (e^-), annihilating both particles and converting them into gamma-ray photons (γ).



Step 2:

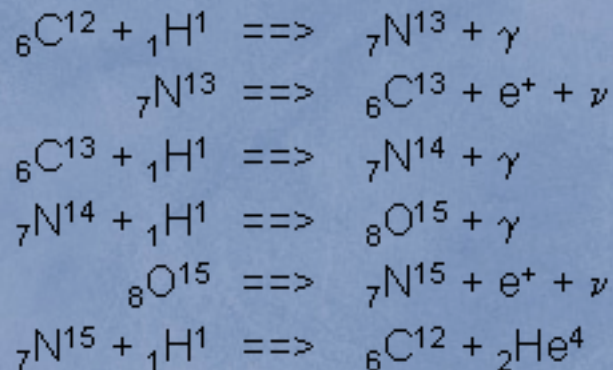
- The ^2H nucleus from the first step collides with a third proton.
- A helium isotope (^3He) is formed and another gamma-ray photon is released.



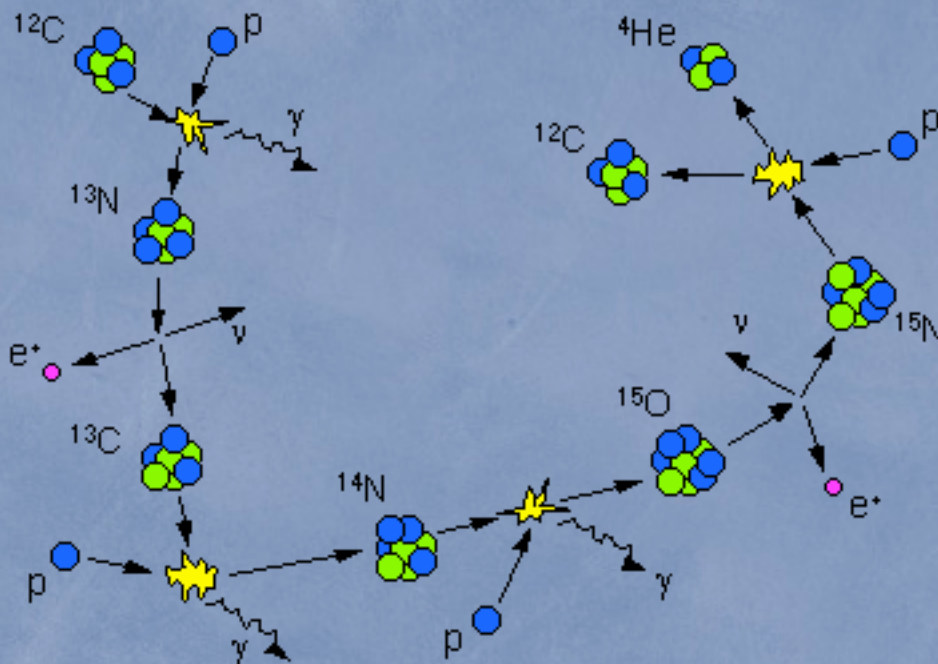
Step 3:

- Two ${}^3\text{He}$ nuclei collide.
- A different helium isotope with two protons and two neutrons (${}^4\text{He}$) is formed and two protons are released.

kol-kväve-syre cykeln



Plus ENERGY



- Då $T > \text{ca. } 16 \text{ miljoner Kelvin}$ dominerar denna process. Kolet är katalysator
- I solen nås dessa temperaturer bara i de absolut centrala delarna och energi produktionen domineras av p-p-kedjan
- För en huvudseriestjärna med 1.5 solmassor väger CNO-cykeln och p-p-kedjan jämt
- Då $M > 1.5$ solmassor dominerar CNO-cykeln

Även i solens centrala delar kan man betrakta materien som en gas (plasma)

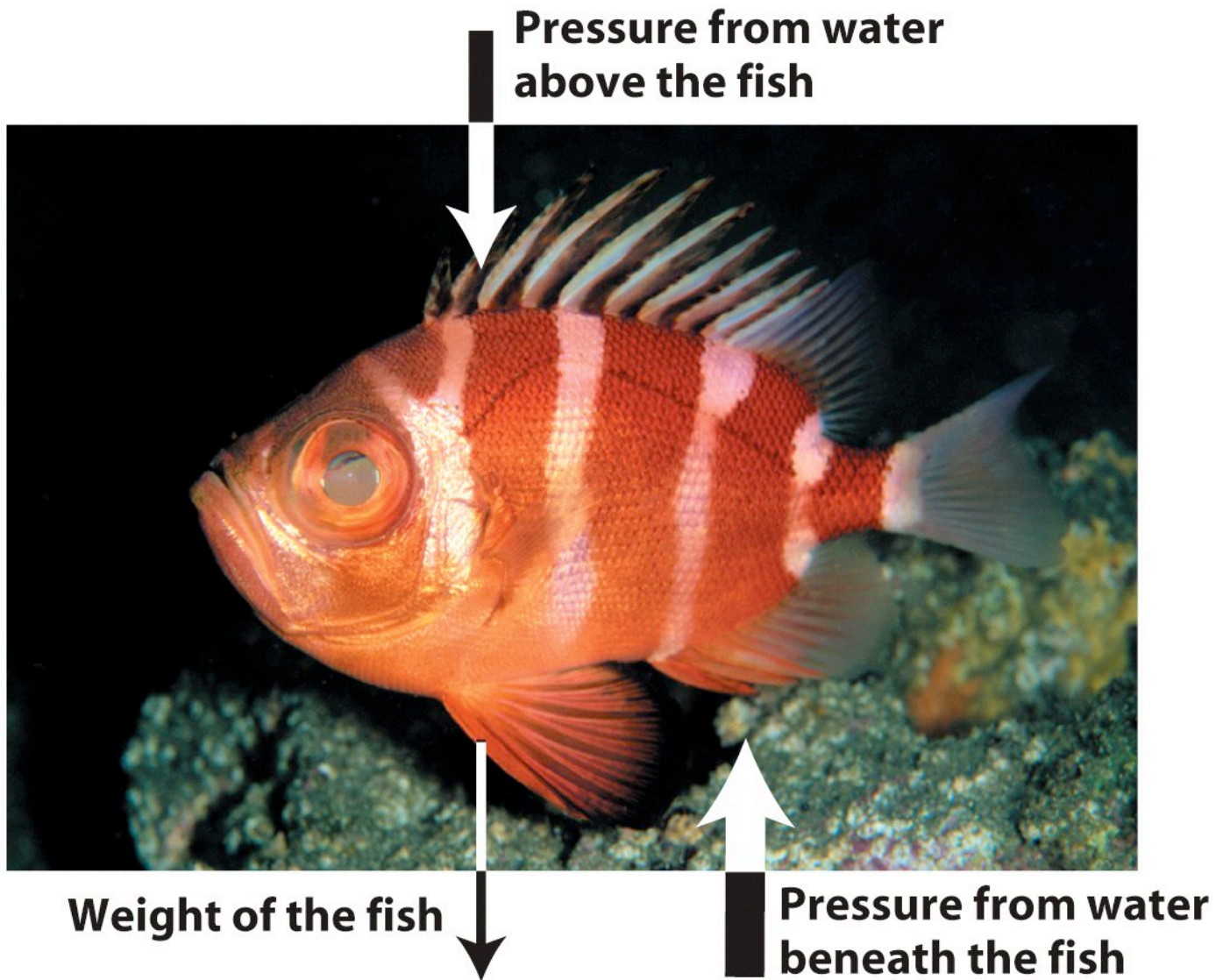
table 18-2 A Theoretical Model of the Sun

Distance from the Sun's center (solar radii)	Fraction of luminosity	Fraction of mass	Temperature ($\times 10^6$ K)	Density (kg/m^3)	Pressure (relative to pressure at center)
0.0	0.00	0.00	15.5	160,000	1.00
0.1	0.42	0.07	13.0	90,000	0.46
0.2	0.94	0.35	9.5	40,000	0.15
0.3	1.00	0.64	6.7	13,000	0.04
0.4	1.00	0.85	4.8	4,000	0.007
0.5	1.00	0.94	3.4	1,000	0.001
0.6	1.00	0.98	2.2	400	0.0003
0.7	1.00	0.99	1.2	80	4×10^{-5}
0.8	1.00	1.00	0.7	20	5×10^{-6}
0.9	1.00	1.00	0.3	2	3×10^{-7}
1.0	1.00	1.00	0.006	0.00030	4×10^{-13}

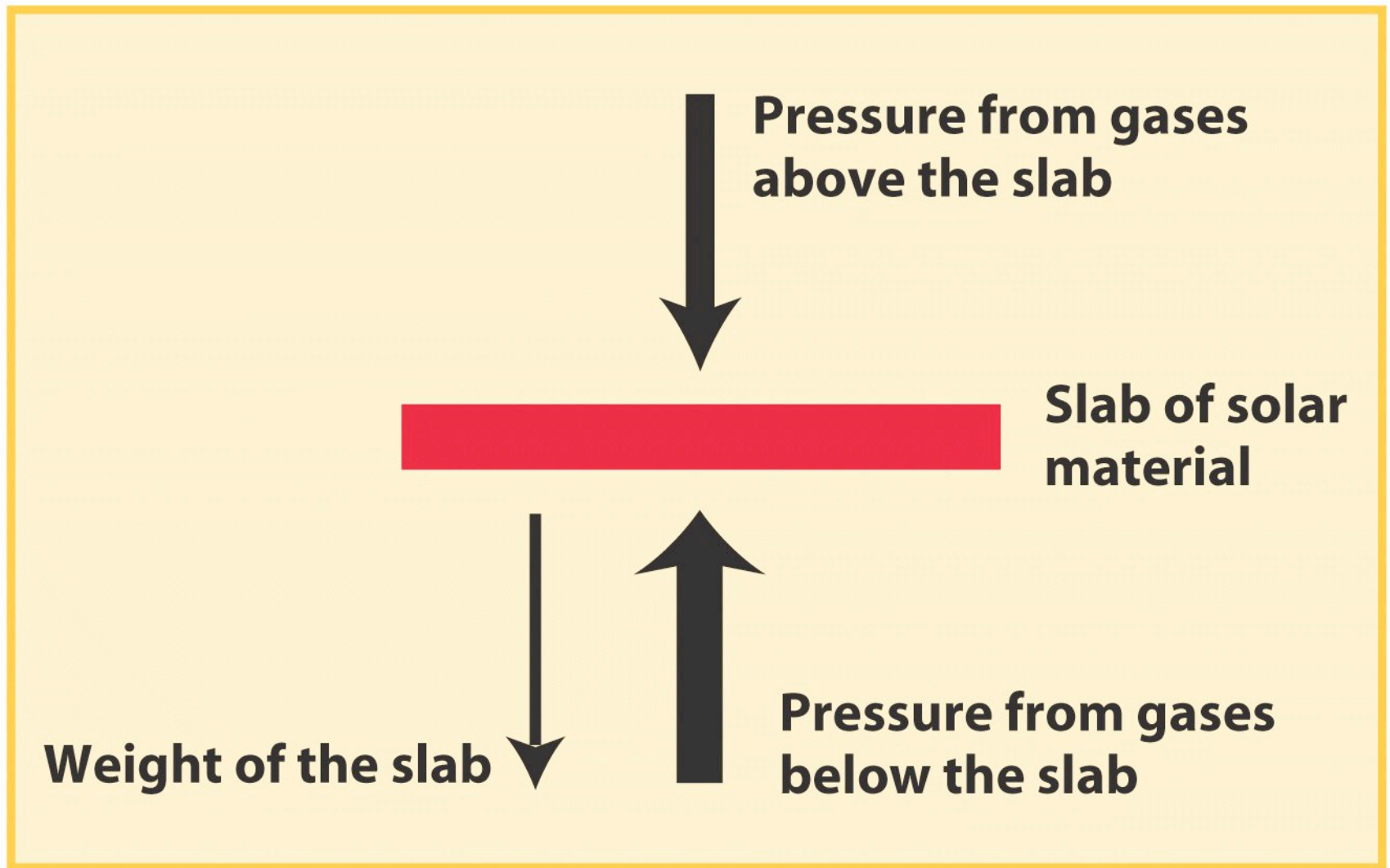
Note: The distance from the Sun's center is expressed as a fraction of the Sun's radius ($R_{\odot}$). Thus, 0.0 is at the center of the Sun and 1.0 is at the surface. The fraction of luminosity is that portion of the Sun's total luminosity produced within each distance from the center; this is equal to 1.00 for distances of $0.25 R_{\odot}$ or more, which means that all of the Sun's nuclear reactions occur within 0.25 solar radius from the Sun's center. The fraction of mass is that portion of the Sun's total mass lying within each distance from the Sun's center. The pressure is expressed as a fraction of the pressure at the center of the Sun.

Hydrostatisk jämvikt

- Balansen mellan gravitation och tryck i varje lager i en stjärna hindrar den från att kollapsa
- Denna balans fortsätter att råda då en stjärna utvecklas och dess storlek kan på så sätt ändras (annan energiproduktion, mass förlust)



A fish floating in water is in hydrostatic equilibrium, so forces balance



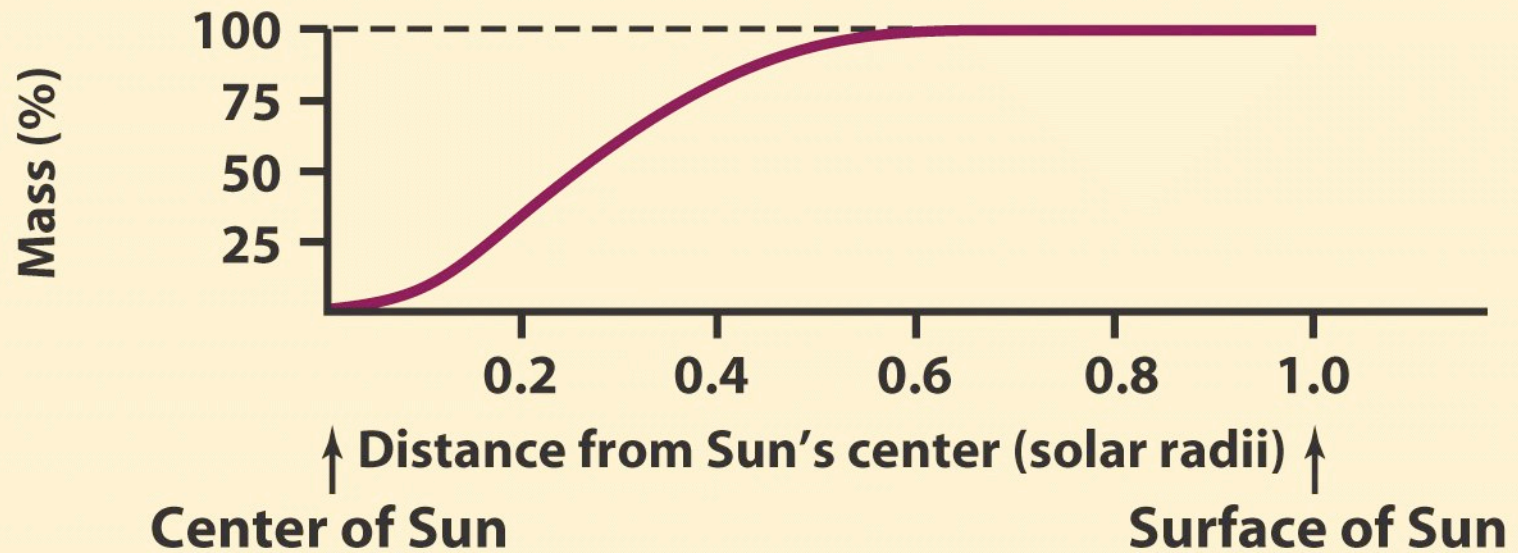
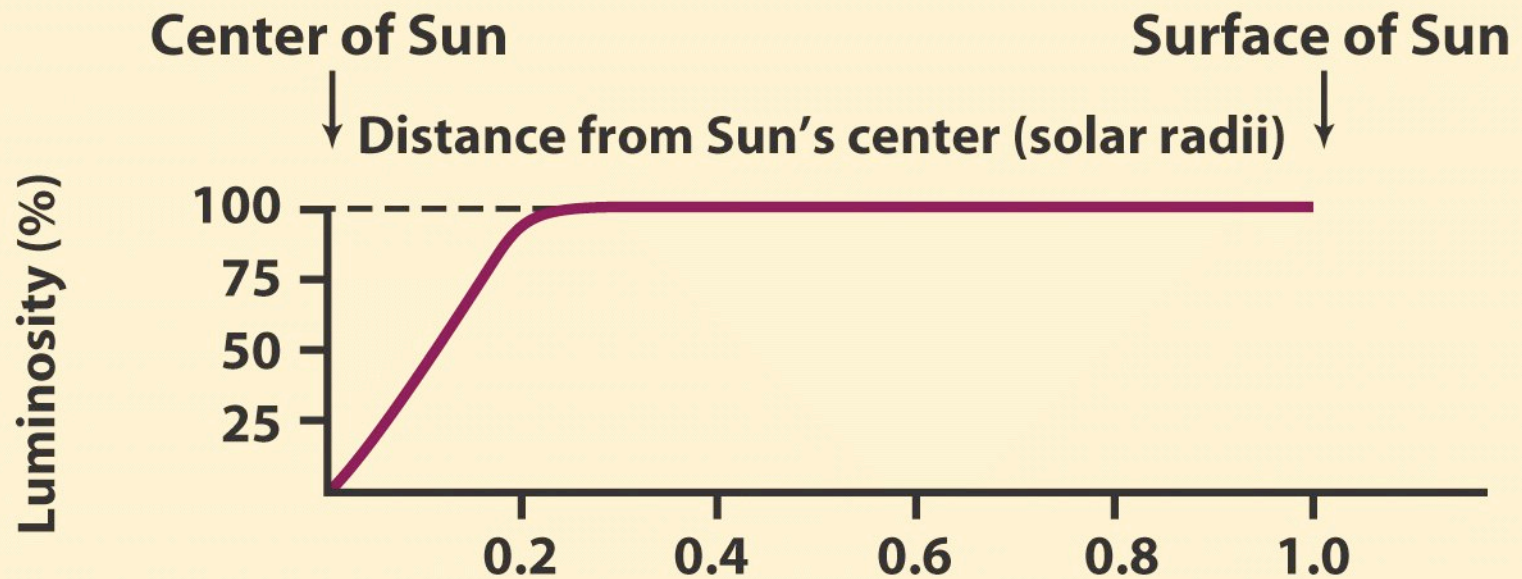
Material inside the sun is in hydrostatic equilibrium, so forces balance

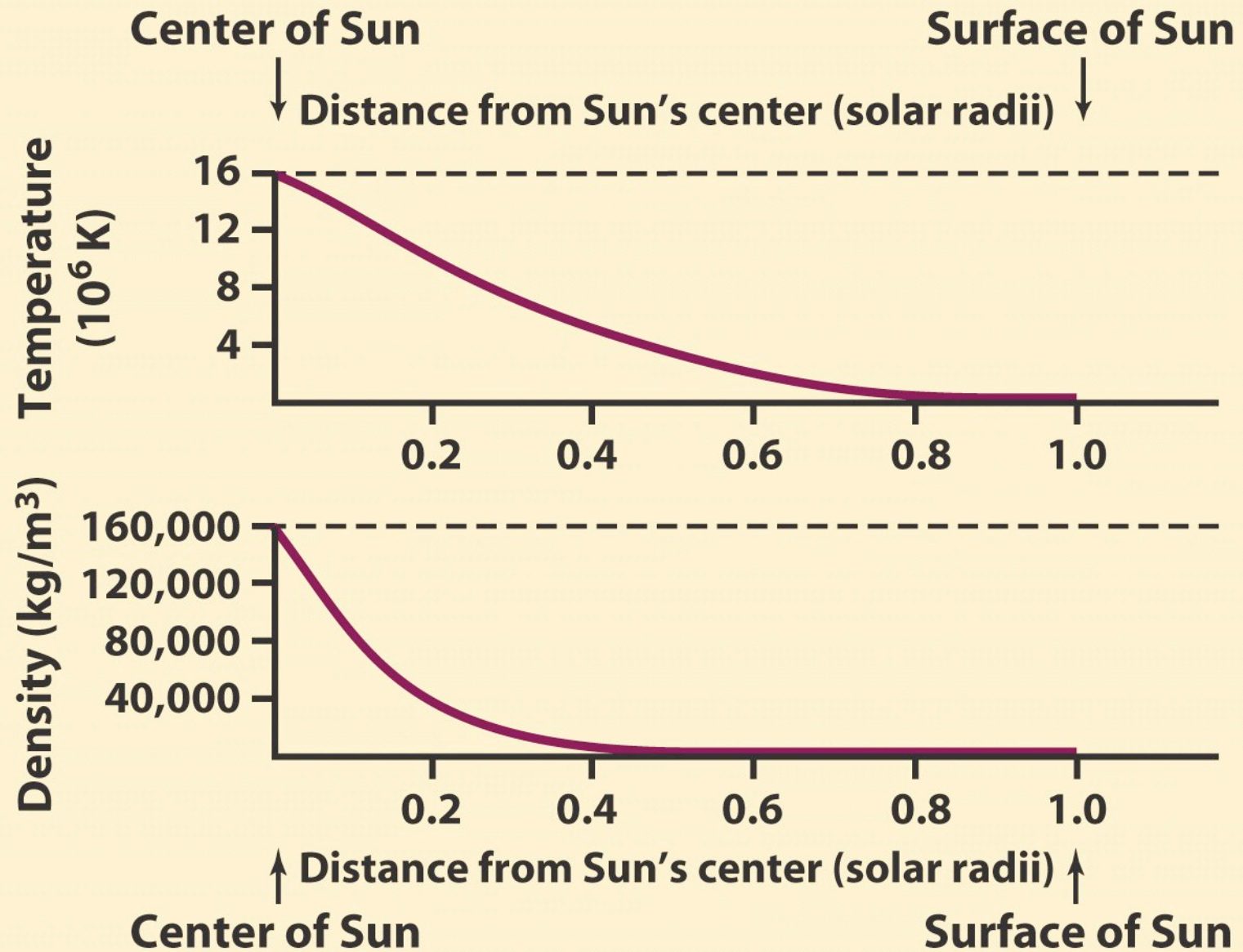
Termisk jämvikt

- Temperaturen vid en given radie i solens inre ändras inte
- Dock kan man ha en gradient i temperatur

Modell för solen

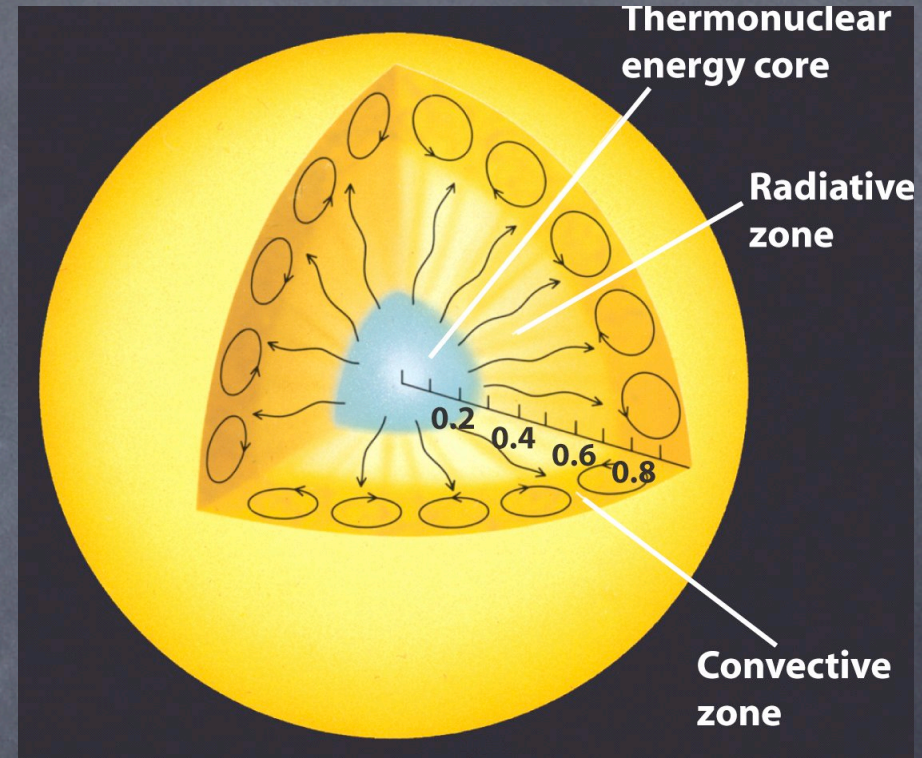
- Hydrostatisk jämvikt
- Termisk jämvikt
- Energitransport
- Ger uppsättning av ekvationer
- Observationer av solens yta ger randvillkor





Teoretiska modeller för Solen visar hur energin transporteras från dess centrala delar ut till ytan

- Vätefusion fortlöper i kärnan, från Solens centrum räknat ut till ca. 0.25 solradier. Kärnan är kovektiv
- Kärnan omges av ett joniserat område (ut till 0.71 solradier) där energin transporteras av elektromagnetisk strålning
- I den yttre kovektionszonen rekombinerar protoner och elektroner till atomer som lättare kan absorbera ljus. Konvektion sätter in och temperaturen faller snabbt och trycket är relativt lågt, varm materia transporteras utåt och kall materia ned



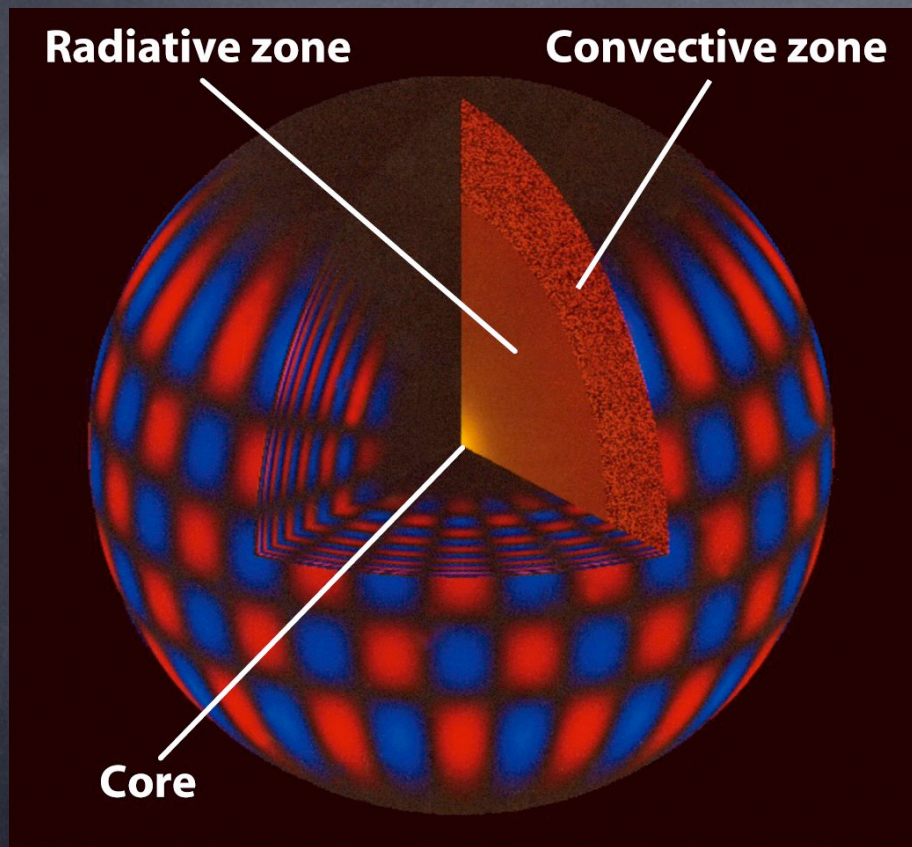
Tre sätt att transportera energi:

- 1) Värmeledning
- 2) Strålningstransport
- 3) Konvektion

En fotons väg

- Det tar en foton ca 170000 år att färdas från solens centrala delar till dess yta
- Detta ger en medelhastighet på 50 cm i timmen
- Från ytan tar det sedan 8 minuter för ljuset att nå oss

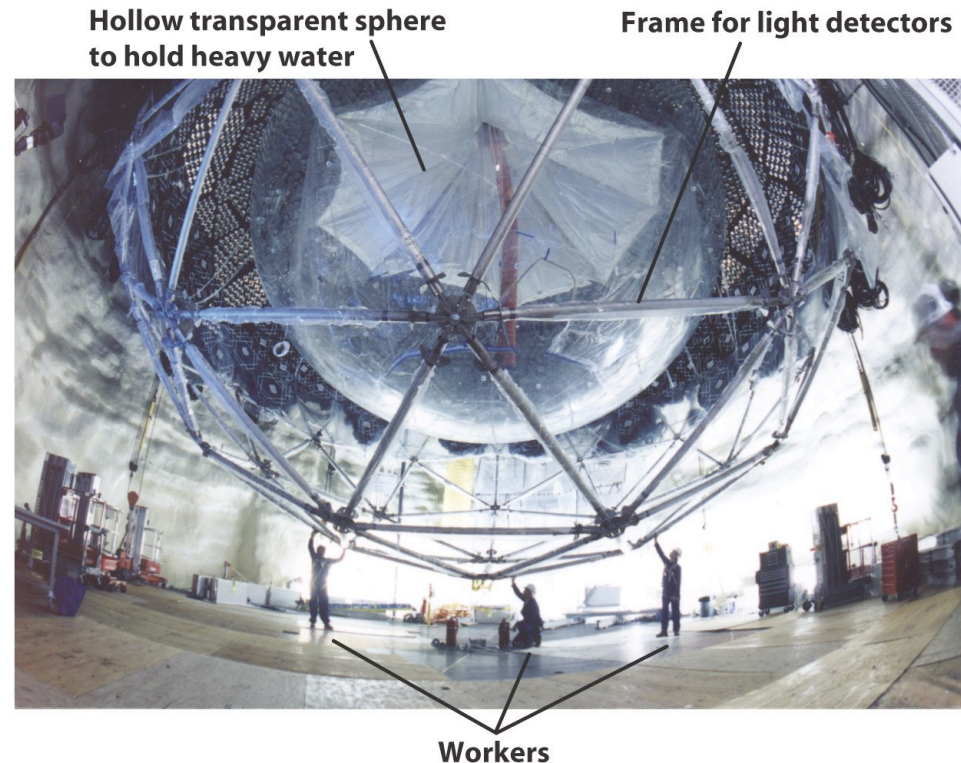
Modeller för solens inre kan testas genom helioseismologi



- Helioseismologi är studiet av hur solen vibrerar
- Dessa vibrationer har använts till att bestämma tryck, täthet, kemisk sammansättning och rotation i solens inre delar

Neutriner ger oss information om solens kärna

- Neutriner som produceras i de termonukleära reaktioner som fortlöper i solens inre kan fångas upp här på jorden
- Dess antal är mindre än först väntat ($1/3$, solar neutrion problem)
- Nya neutrino-experiment kan nu förklara detta (neutrino-oscillation, tre typer av neutriner)



Sudbury Neutrino Observatory (SNO) kan detektera alla tre typer av neutriner

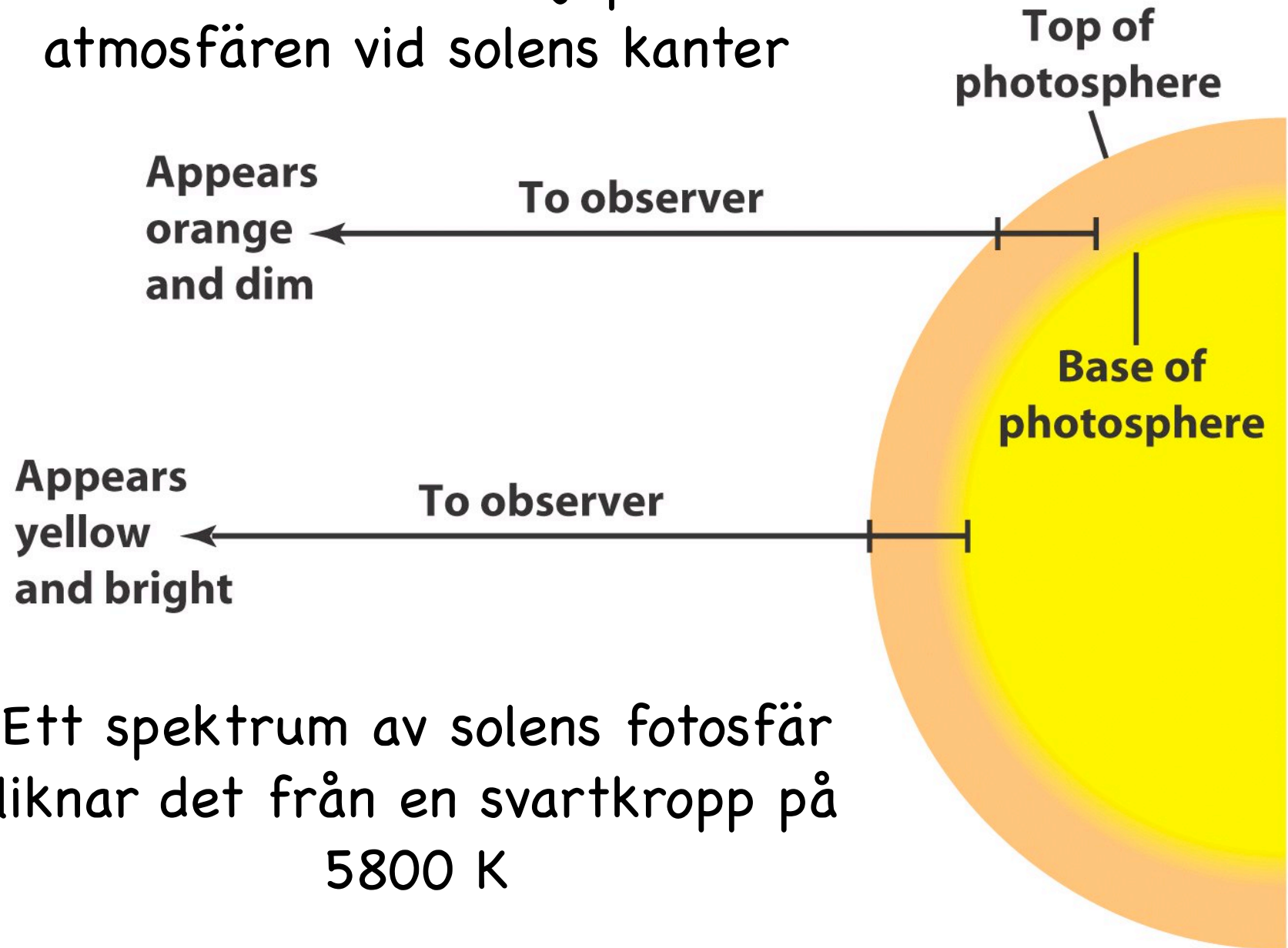
Solens atmosfär



Solens fotosfär. Notera den så kallade randfördunklingen (solen mörkare i kanterna)

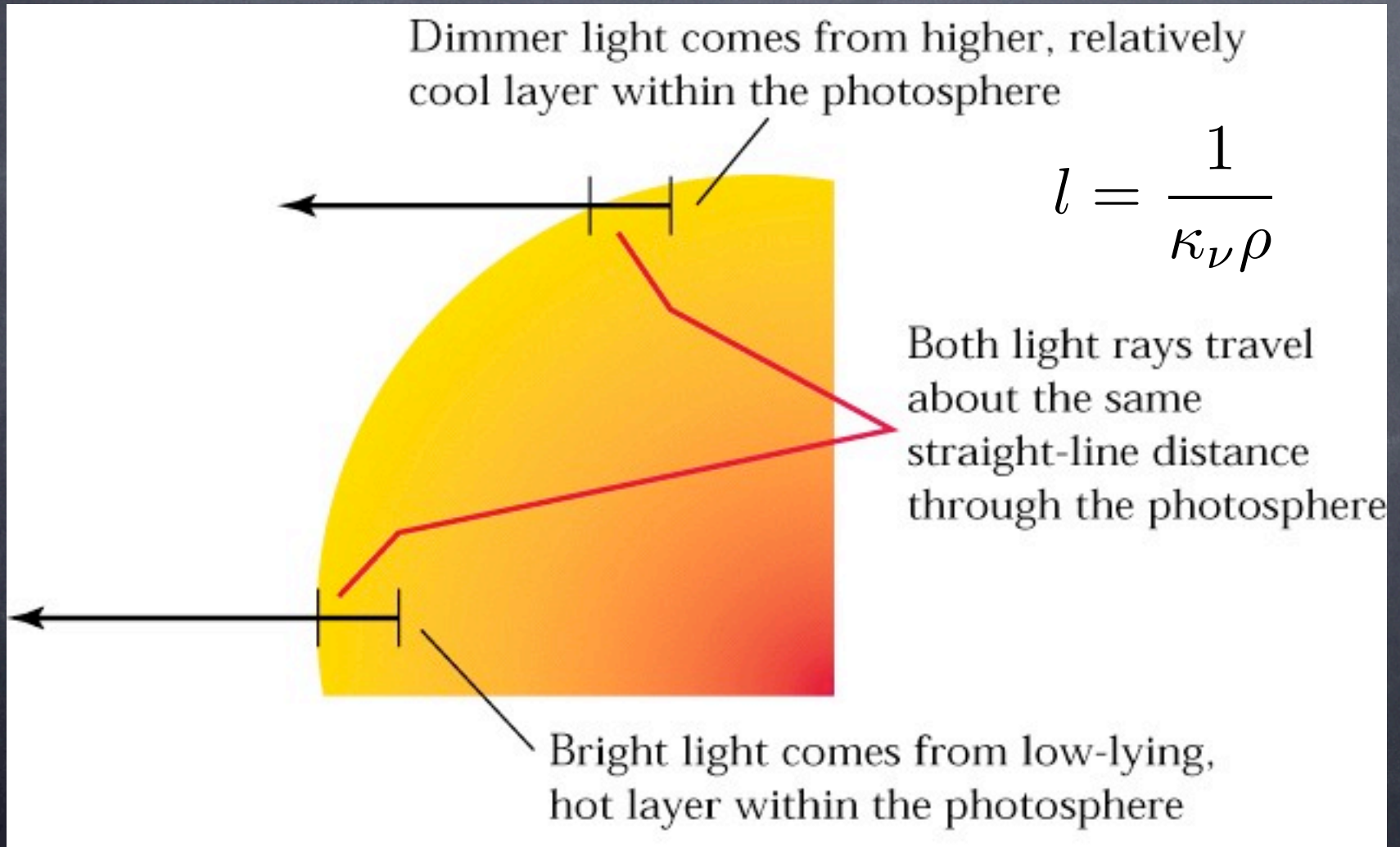
- Solens atmosfär kan i huvudsak delas in i tre lager: fotosfären, kromosfären och koronan
- Den som finns innanför atmosfären kallas solens inre
- Den synliga ytan hos solen, fotosfären, är det lägsta lagret i dess atmosfär

Randfördunklingen uppkommer av
att vi inte ser lika djupt ner i
atmosfären vid solens kanter

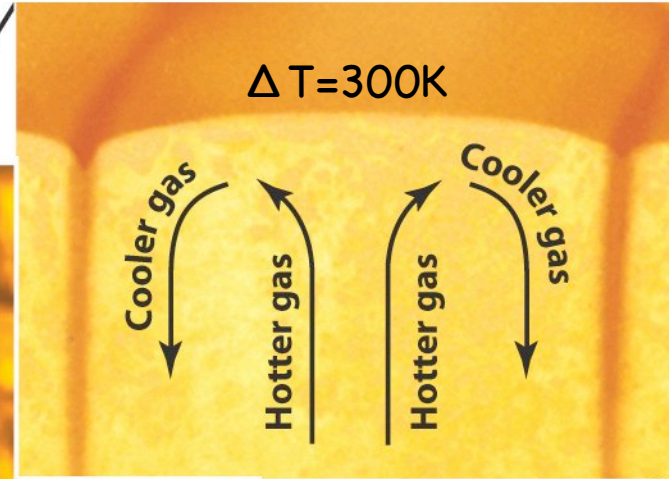
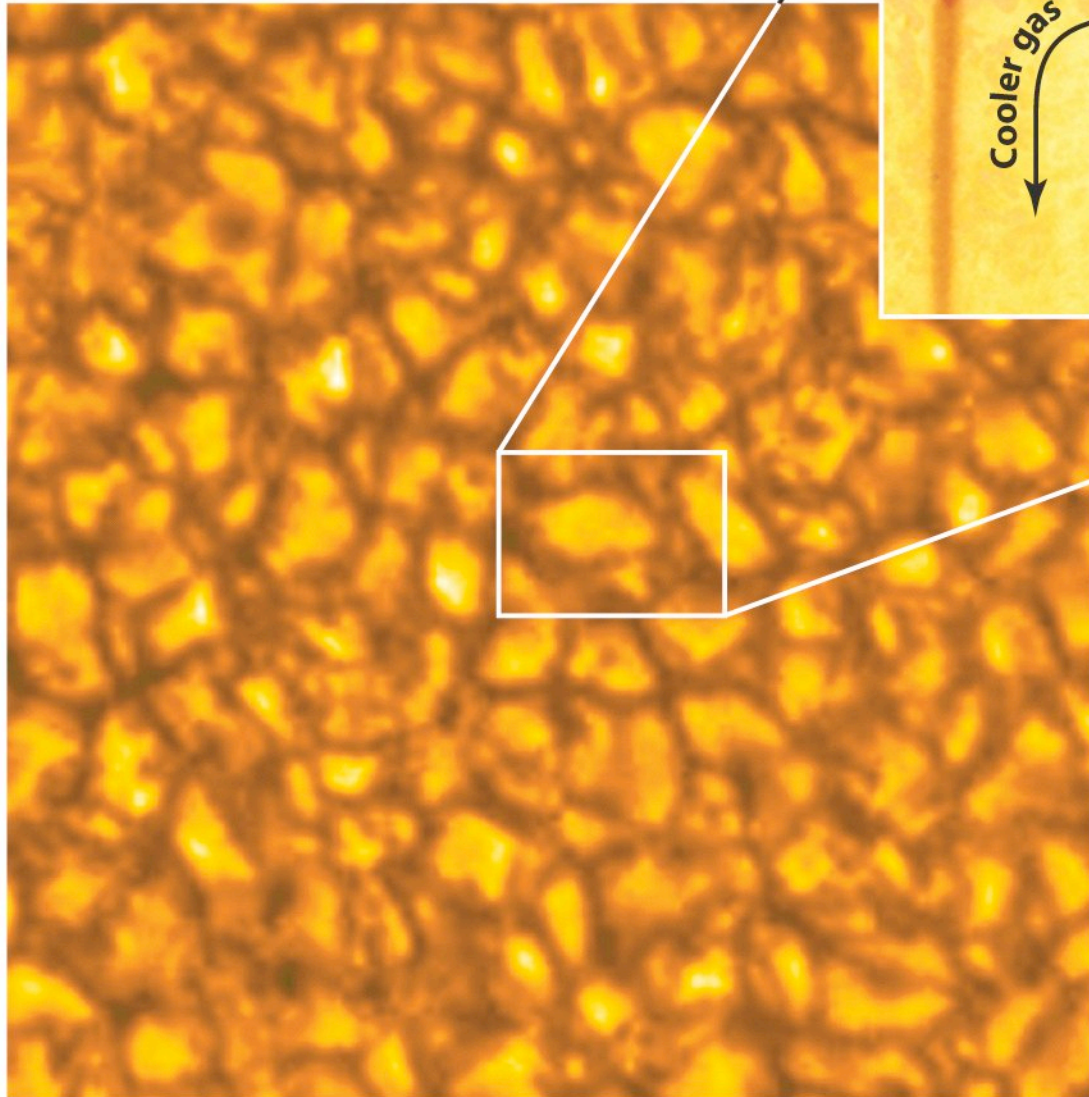


Ett spektrum av solens fotosfär
liknar det från en svartkropp på
5800 K

Medelfri väglängd, l , hos en foton beror på densitet, ρ (kg m^{-3}) och materialegenskaper, κ ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)



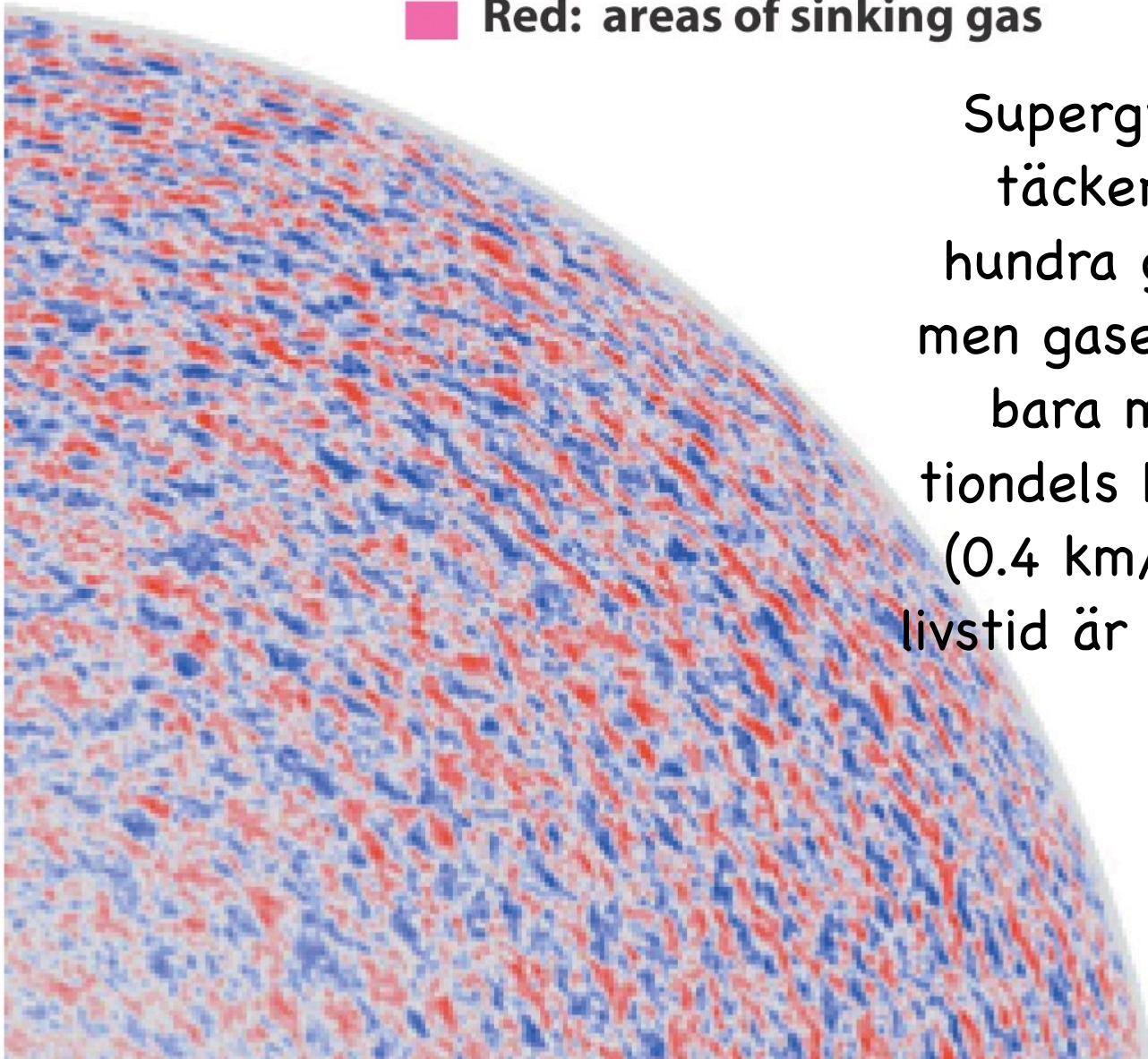
Konvektion i fotosfären skapar granulation



Jätteceller på 200000 km
längst ned i solens
konvektiva zon som övergår i
supergranulationsceller på
30000 km och närmast ytan
(i fotosfären)
granulationsceller på 1000
km tvärs över och 2000 km
djupa. Detta kan bara ske om
temperaturen avtar snabbt
med radien

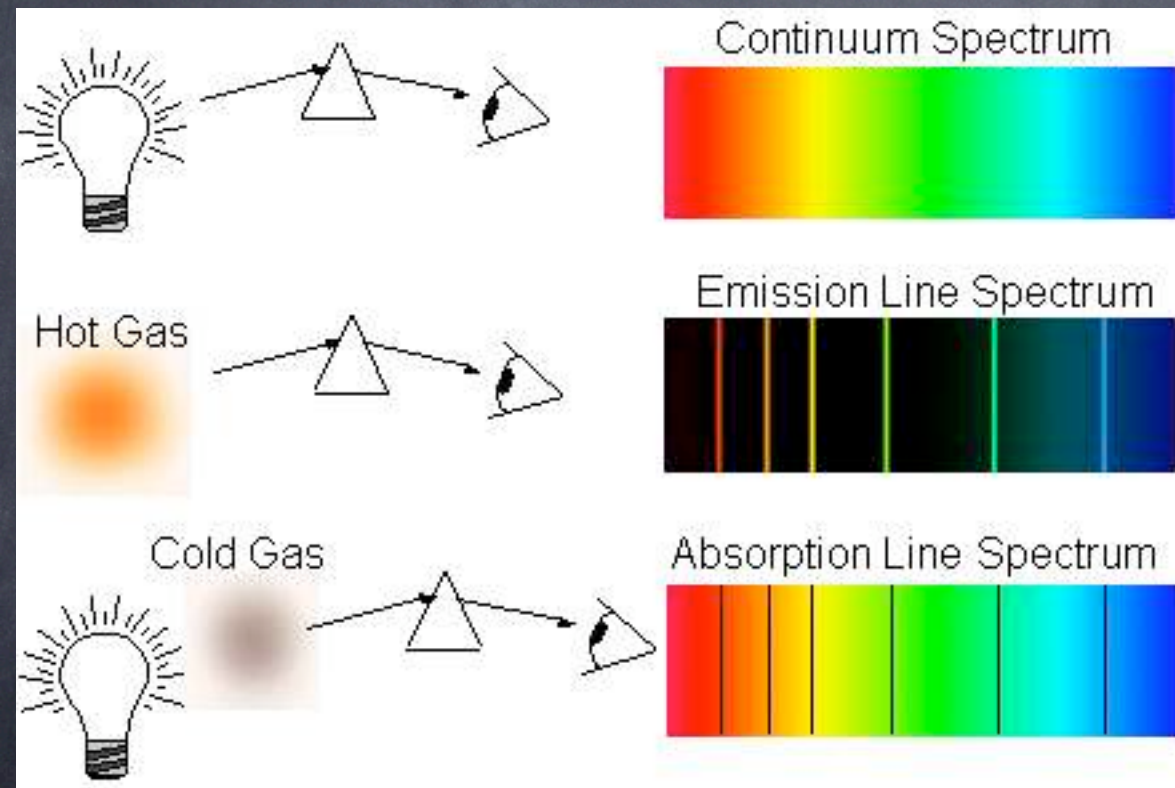
Doppler
bild

■ Blue: areas of rising gas
■ Red: areas of sinking gas



Supergranuler,
täcker flera
hundra granuler
men gasen rör sig
bara med en
tiondels hastighet
(0.4 km/s). Dess
livstid är ca en dag

Spektra från solen säger något om temperaturen hos gas i dess atmosfär

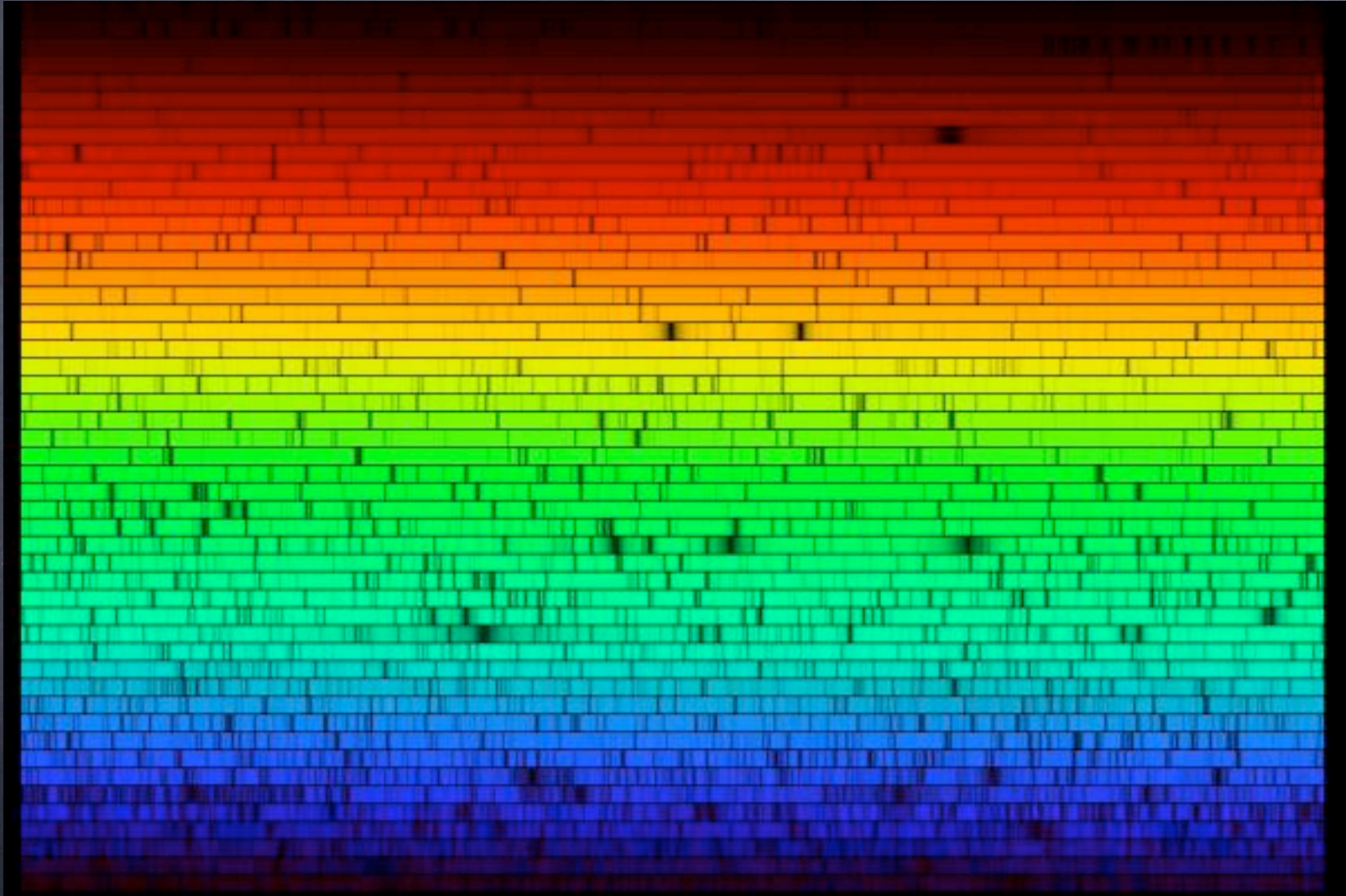


- Ingen atmosfär ger ett kontinuerligt spektrum
- Varm gas ($T > 5800 \text{ K}$) ger emissionslinjer
- Kall gas ($T < 5800 \text{ K}$) ger absorptionslinjer

(information om kemi, densitet, kinematik fås också)

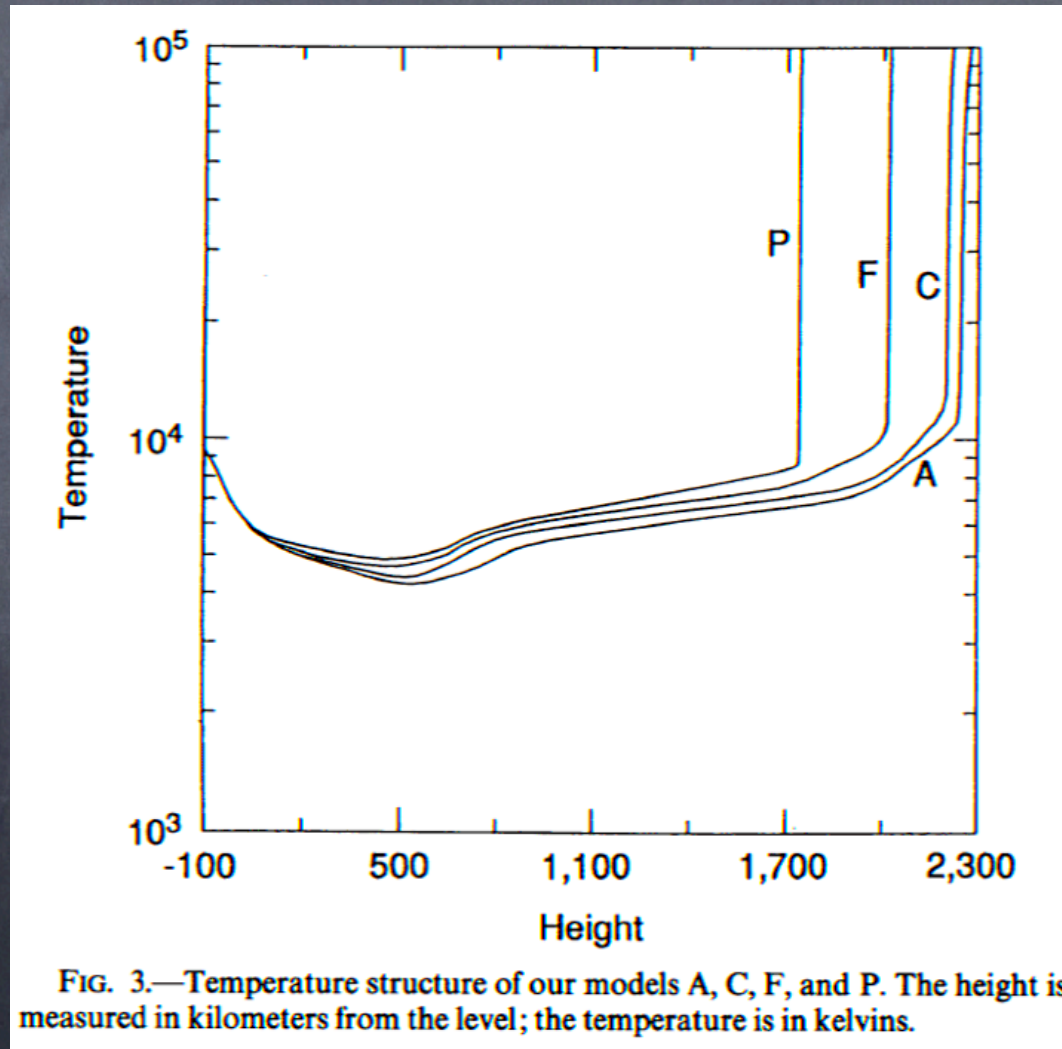
(se RÖ 4)

Spektrum från fotosfären



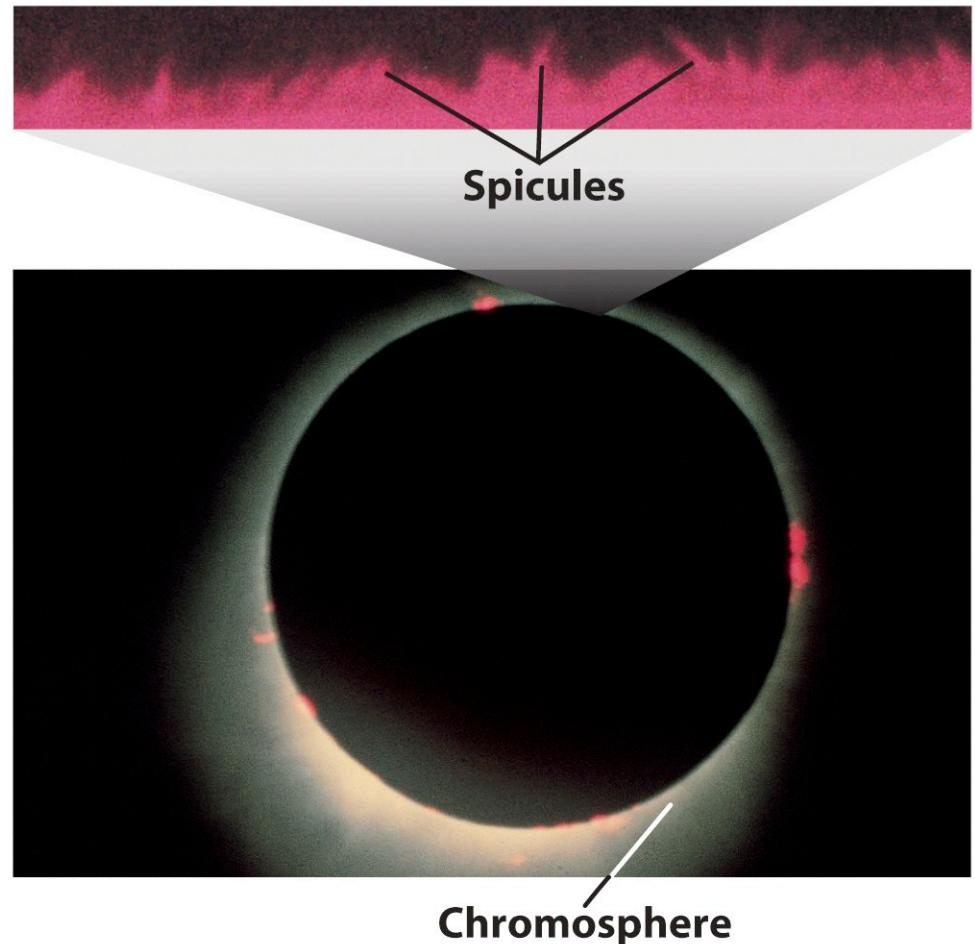
Fullt med absorptionslinjer ger att temperaturen avtar i fotosfären

Temperatur gradient i solens atmosfär



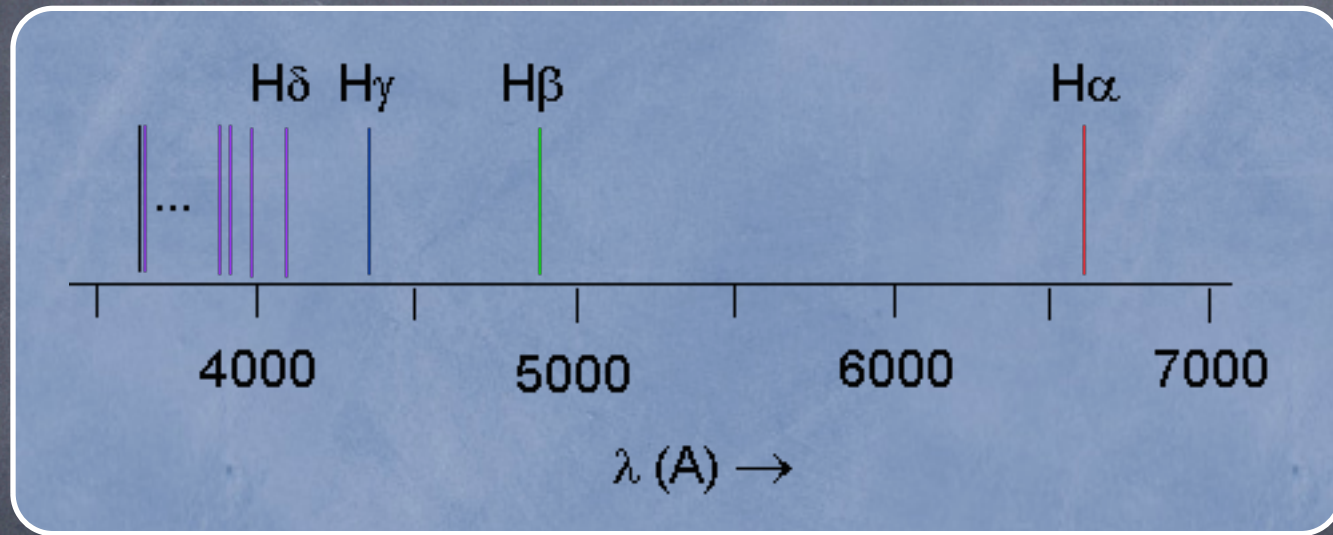
Kromosfären

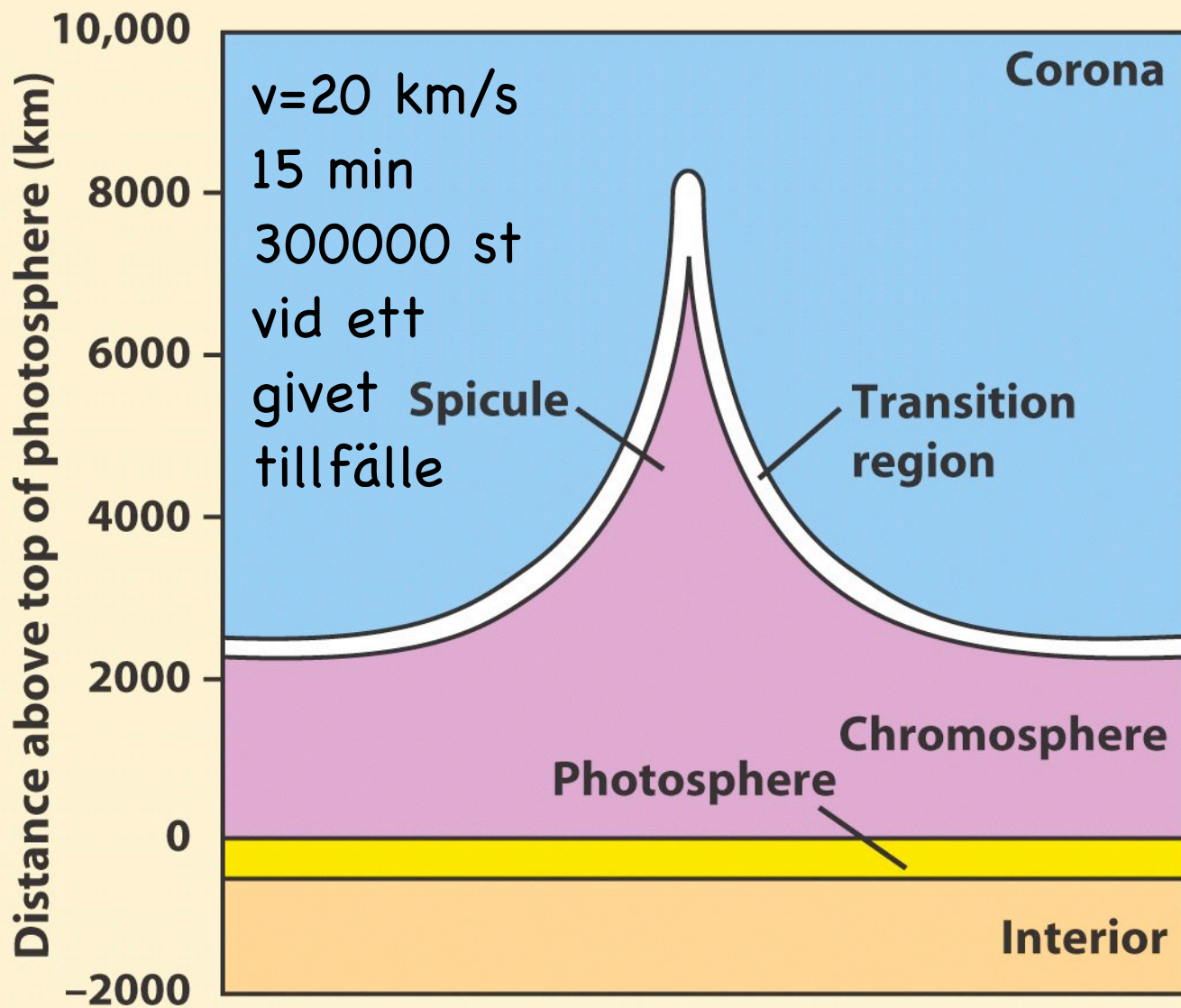
- Ovanför fotosfären finns ett lager där tätheten är mindre men temperaturen högre (emissionslinjer), kromosfären (energi från mekaniska vågor alstrade av granulation)
- Spicules sträcker sig uppåt från fotosfären in i kromosfären längs avgränsningarna mellan supergranuler



H α emission vid 656.3 nm

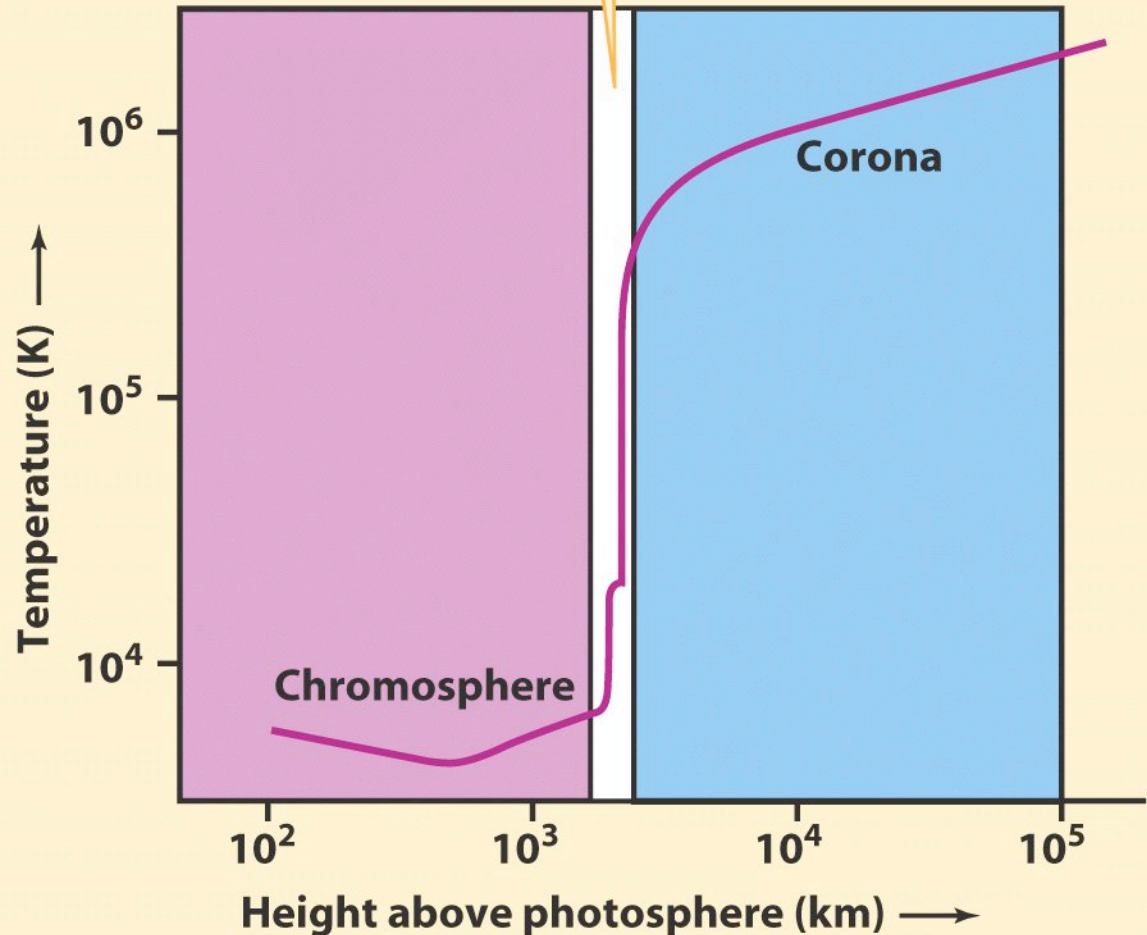
Balmerlinjer finns i de flesta stjärnor (se lab2).
Övergångar mellan en nivå med $n > 2$ och $n = 2$





- Solatmosfärens yttre lager, koronan, består av gas med mycket hög temperatur men väldigt låg täthet
- Koronan övergår i solvinden på större avstånd från solen

In this narrow transition region between the chromosphere and corona, the temperature rises abruptly by about a factor of 100.

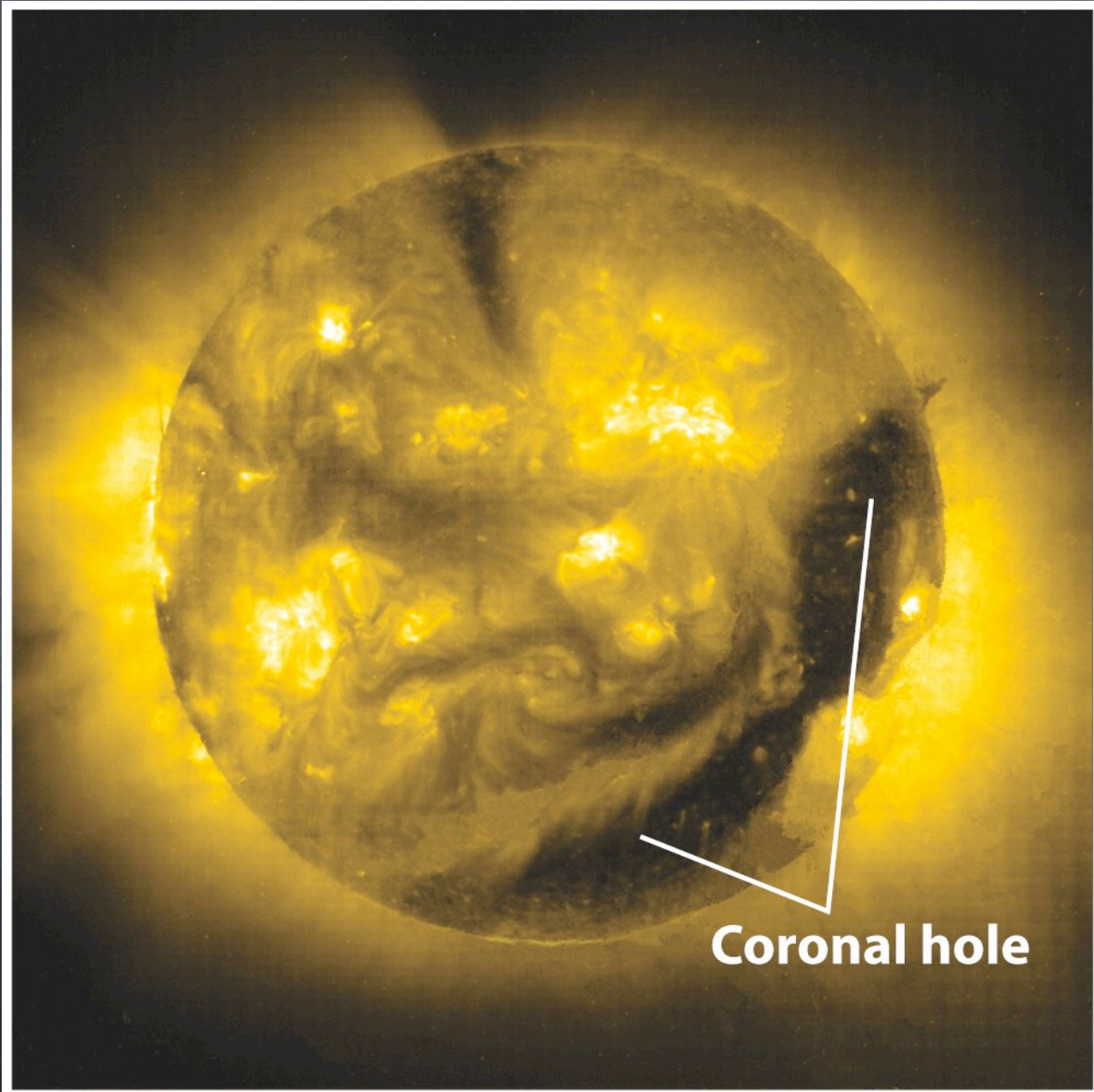


Koronan kastar ut materia i rymden som bildar solvinden

Emission från tex FeXVII (sexton gånger joniserat!)



Den aktiva koronan



Coronal hole

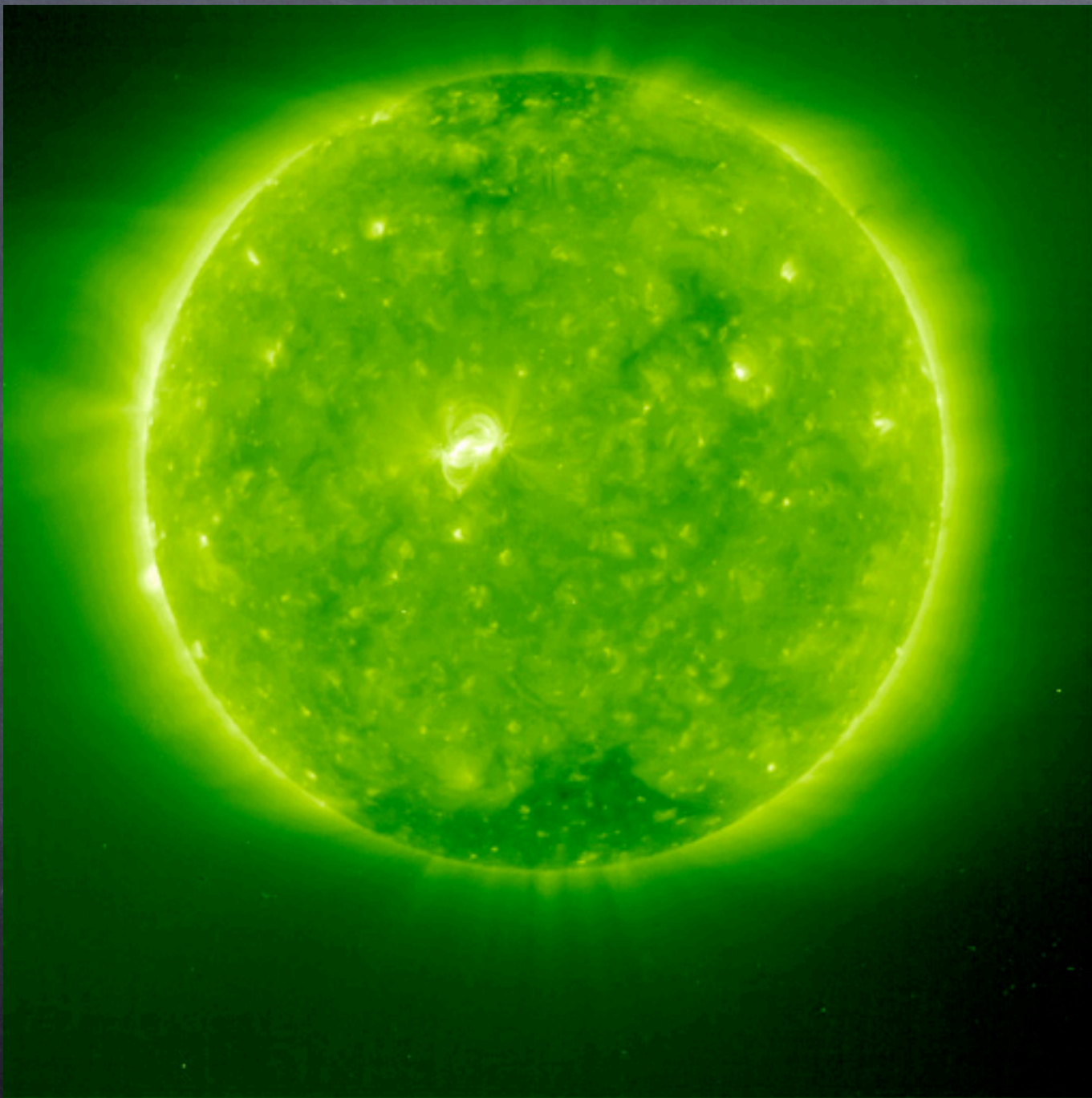
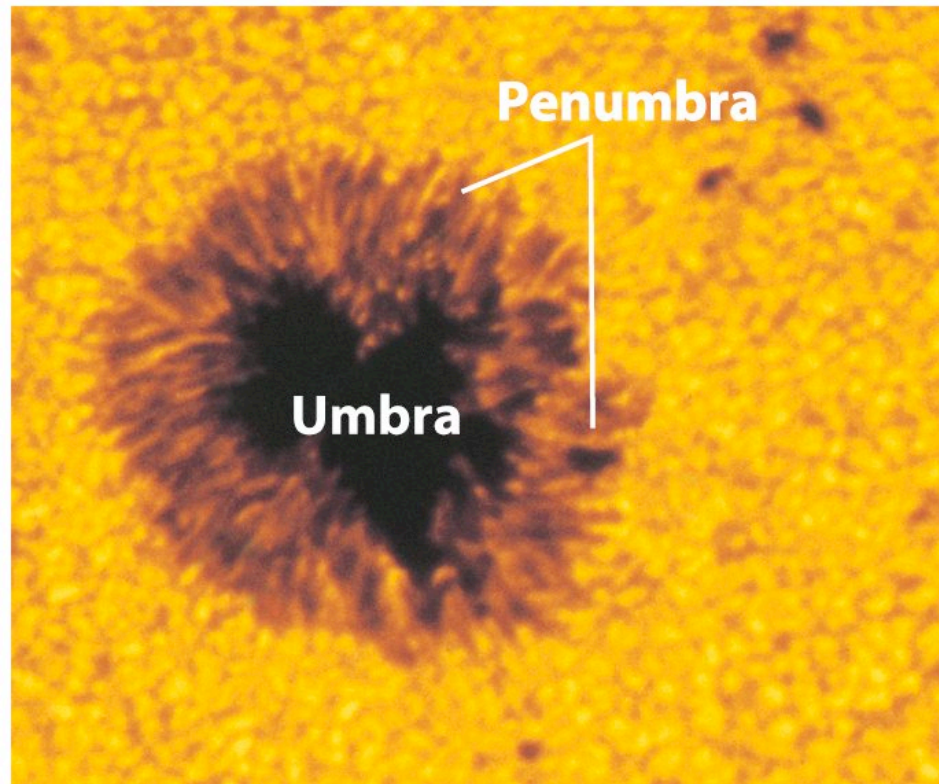
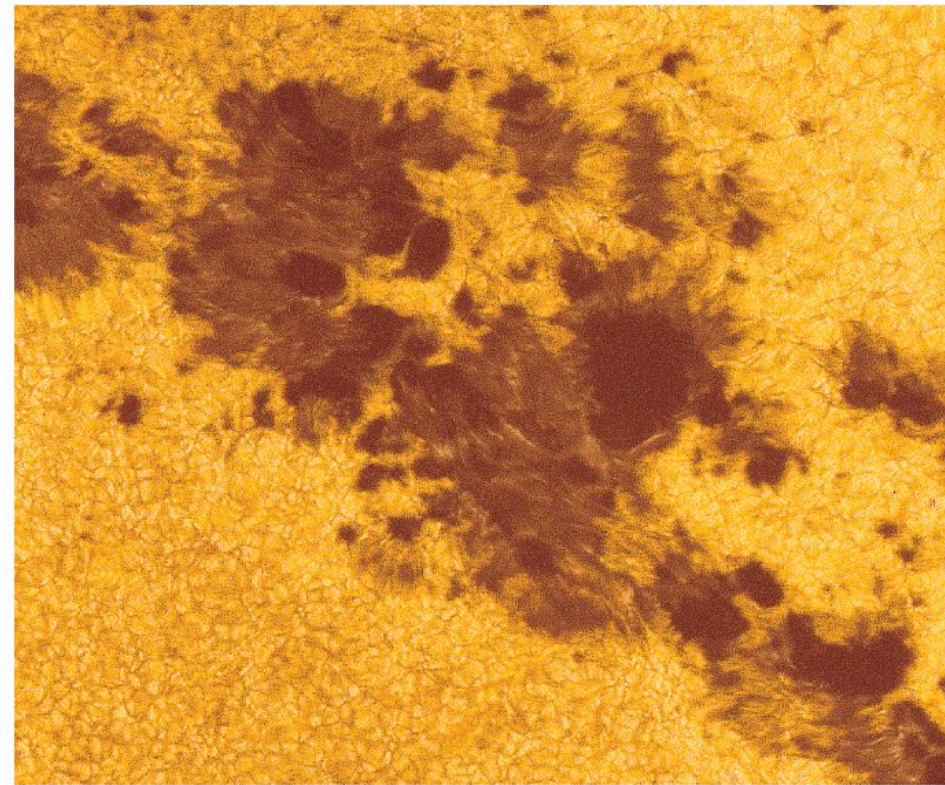


Bild tagen av
SOHO
satteliten i
ultraviolett

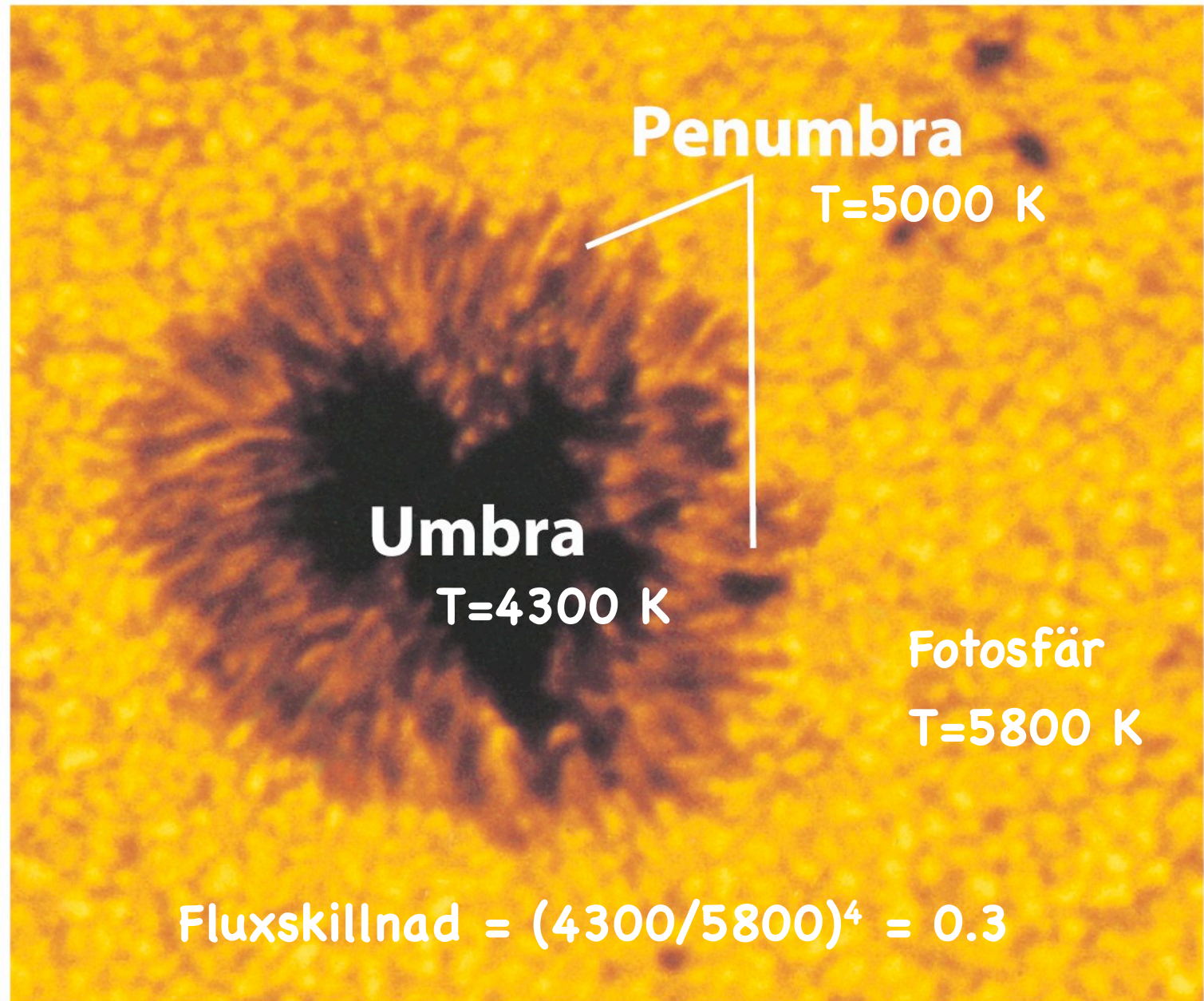
Solfläckar är områden med lägre temperatur än fotosfären i stort

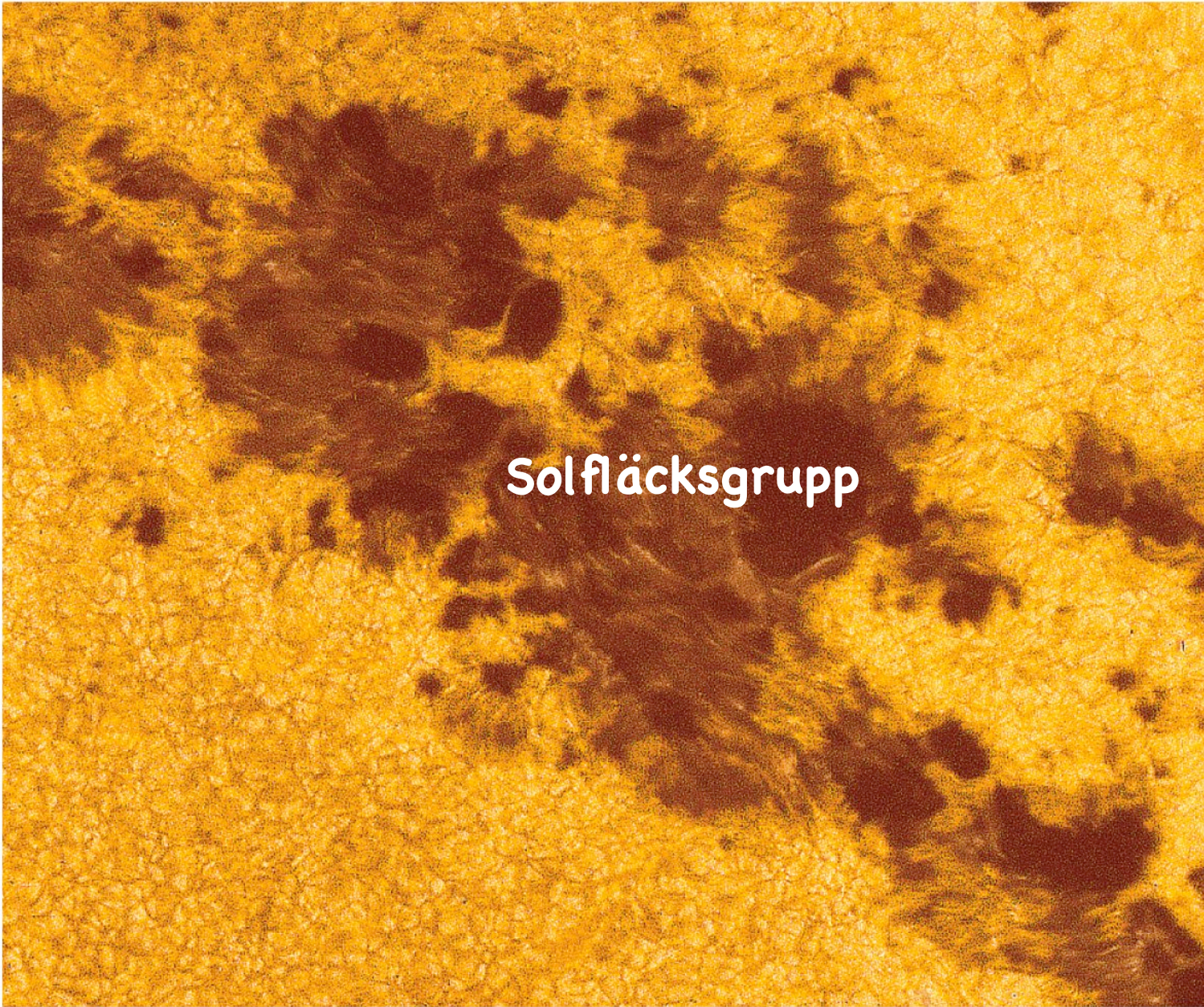


(a)

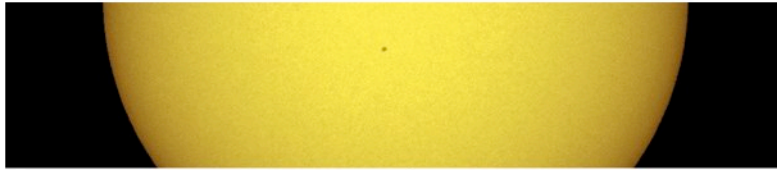


(b)





Sol fläcksgrupp



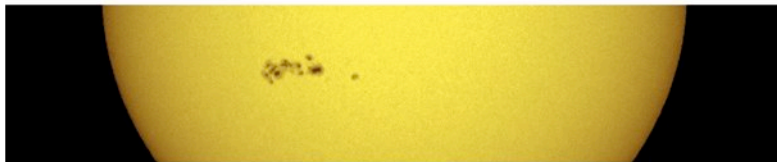
November 9



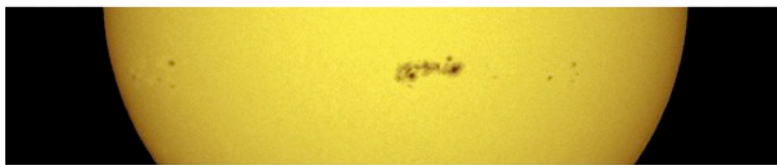
November 12



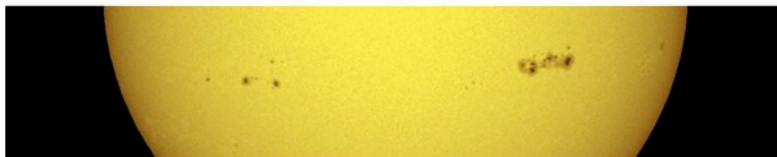
November 14



November 15

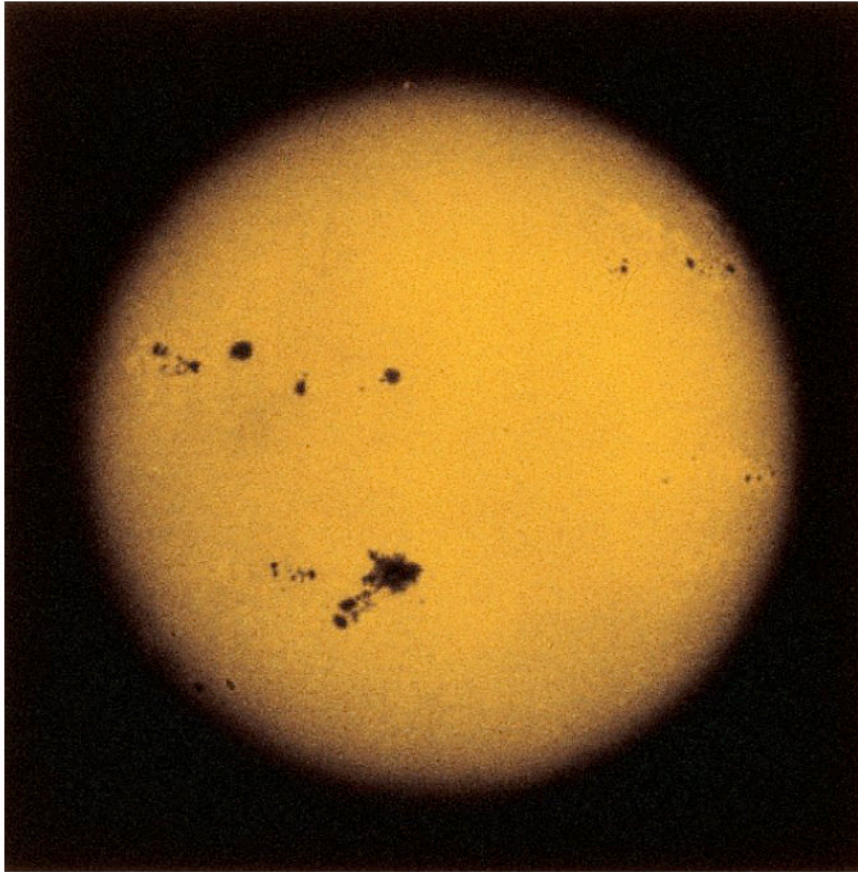


November 17

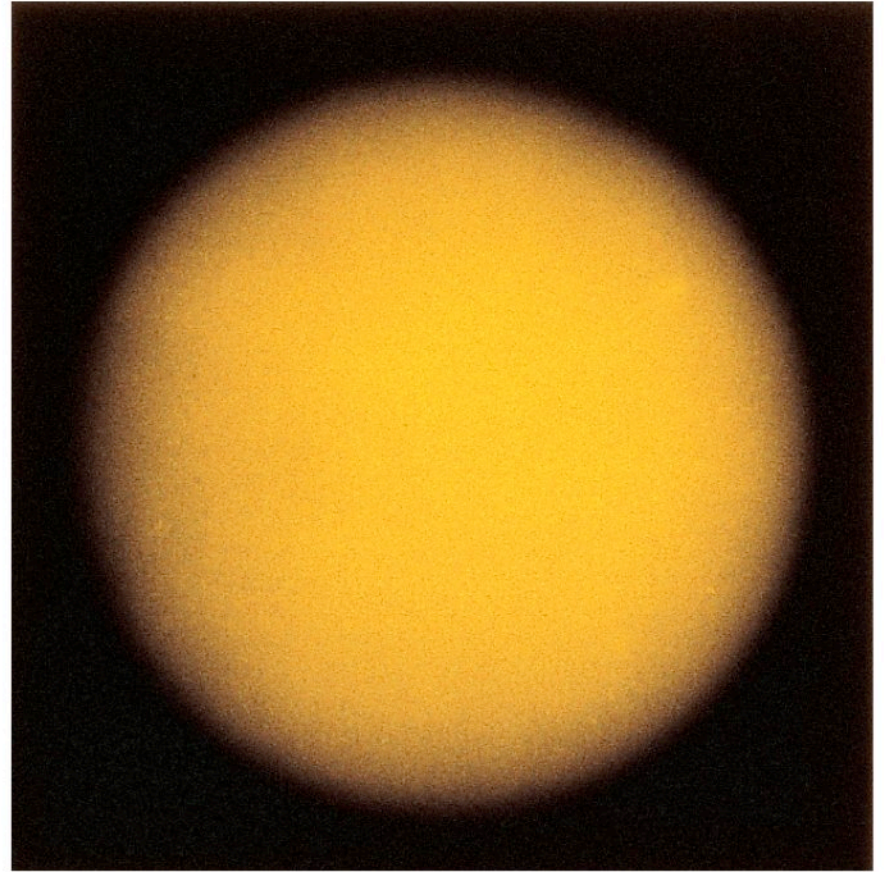


November 19

Solen roterar ett varv på ungefär två månader men snabbare vid ekvatorn än polerna, differentiell rotation (25-35 dagar beroende på latitud)

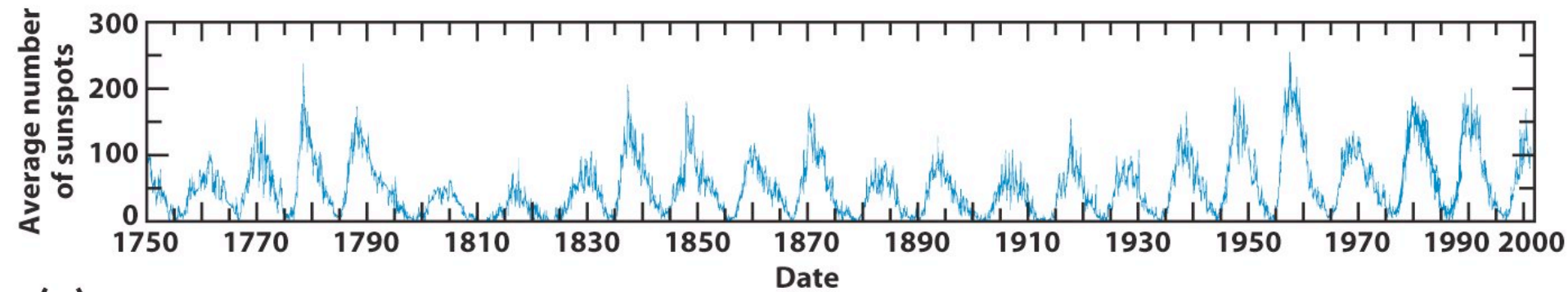


Near sunspot maximum

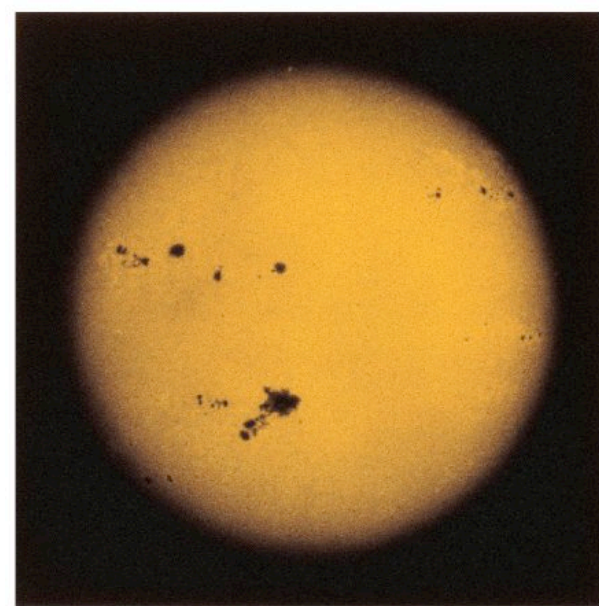


Near sunspot minimum

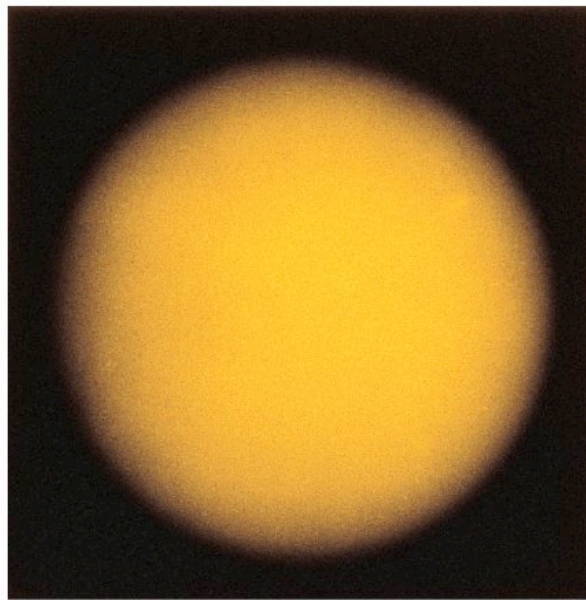
Solfläckscykeln på 22 år skapas av solens regelbundna ändring av solens magnetfält



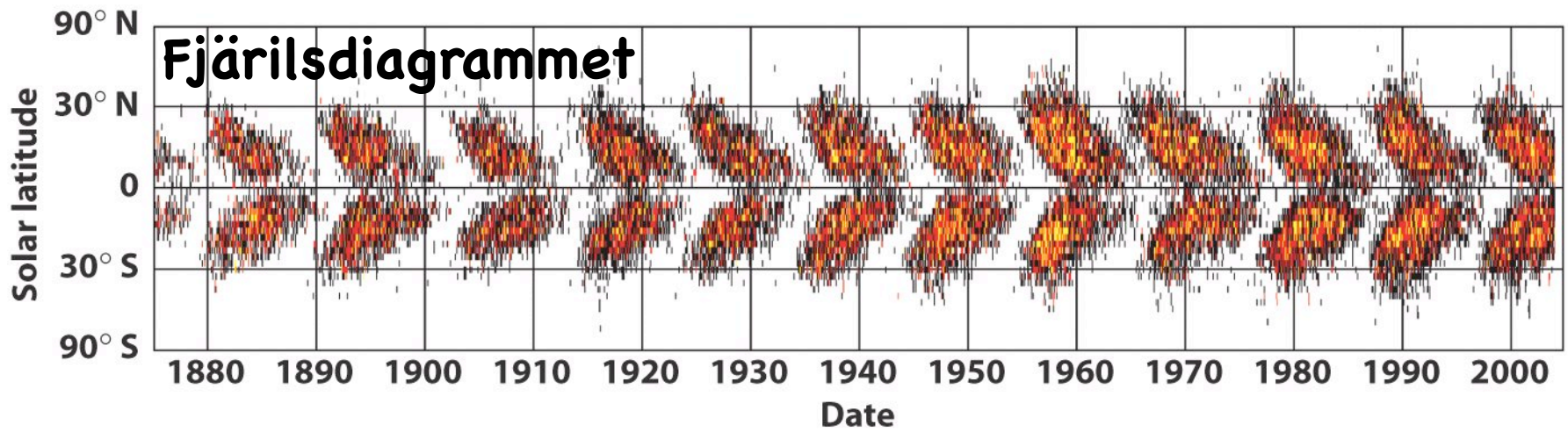
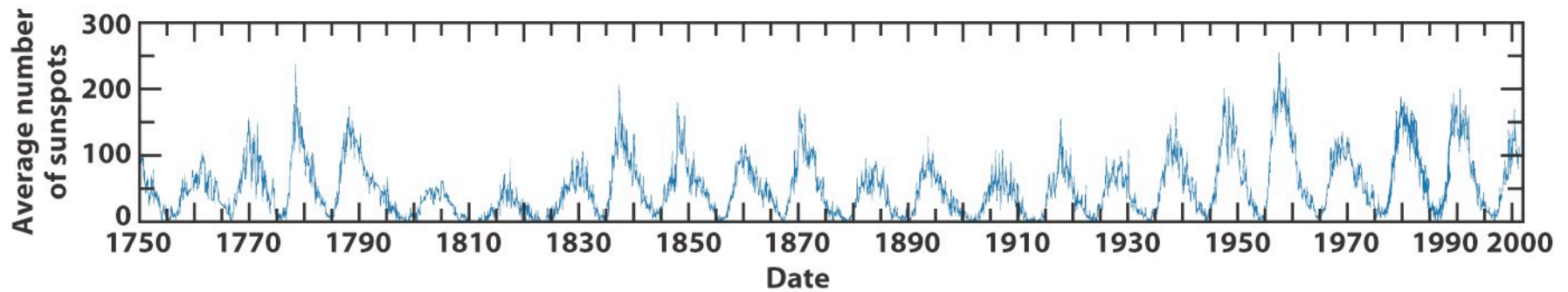
(a)



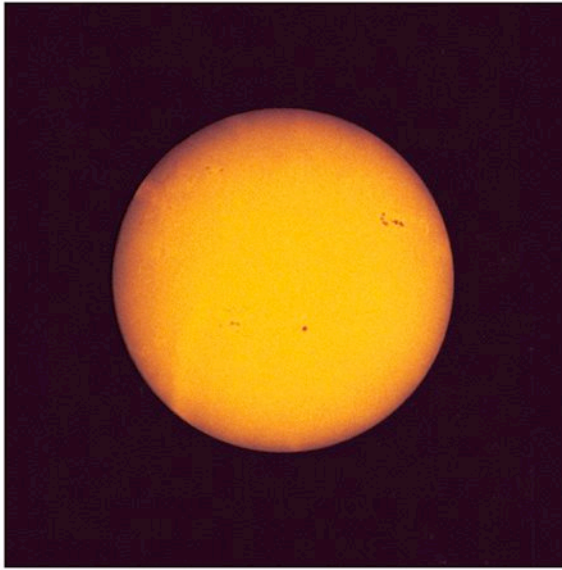
(b) Near sunspot maximum



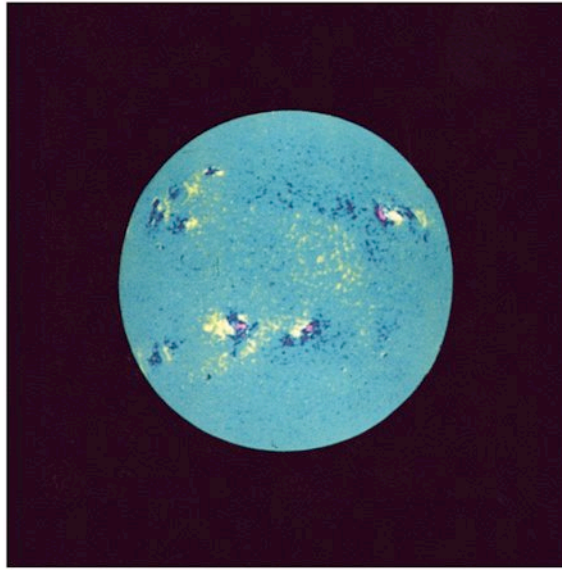
(c) Near sunspot minimum



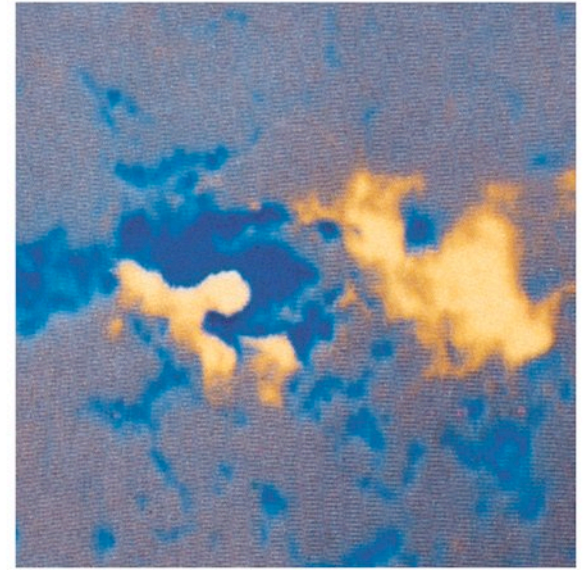
- Solfäcksaktiviteten har en 11 årig cykel
- Denna är relaterad till en 22 årig cykel där magnetfältet vid ytan ökar, minskar och ökar igen med motsatt polaritet
- Medeltalet av solfläckar ökar och minskar i en reguljär cykel på 11 år, med omvända magnetiska poler från en 11 år period till en annan
- Två sådana cykler utgör den 22 åriga solcykeln



(a) Visible-light image



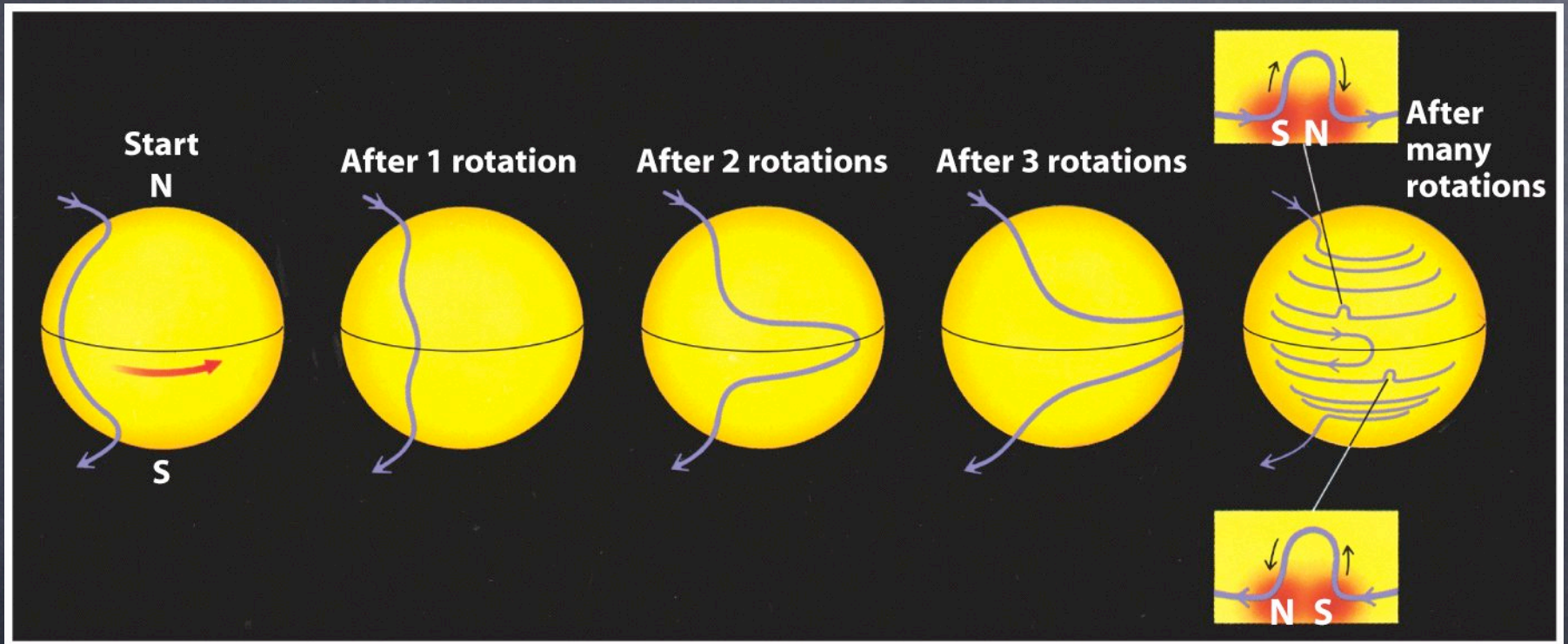
(b) Magnetogram



(c) Magnetogram of a sunspot group

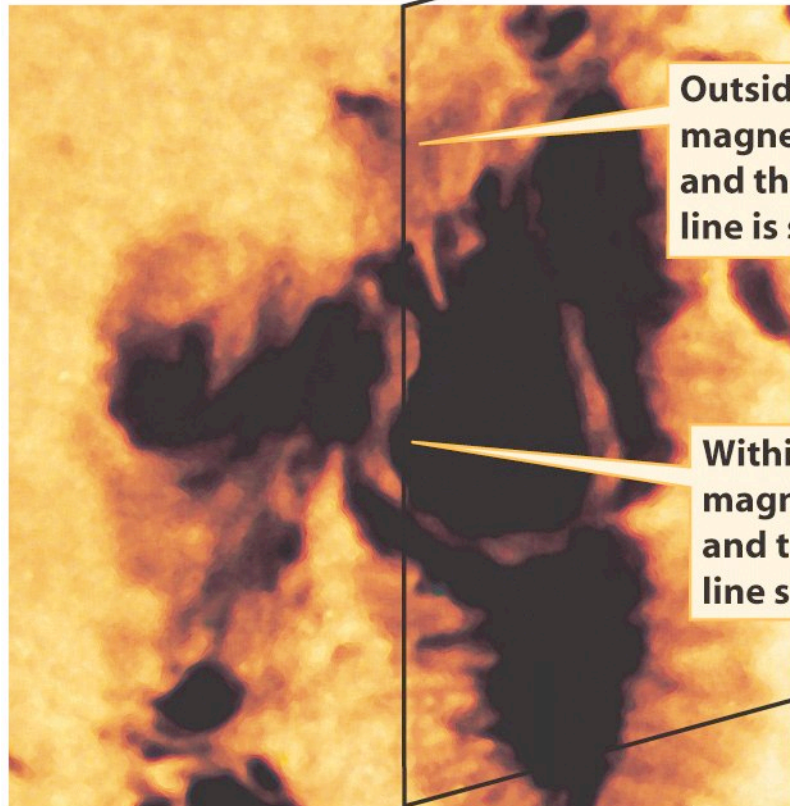
Den magnetiska-dynamo modellen kan förklara många av solcykeln fenomen genom ändringar av solens magnetfält

Dessa ändringar skapas av konvektion
och solens differentiella rotation



Babcocks modell

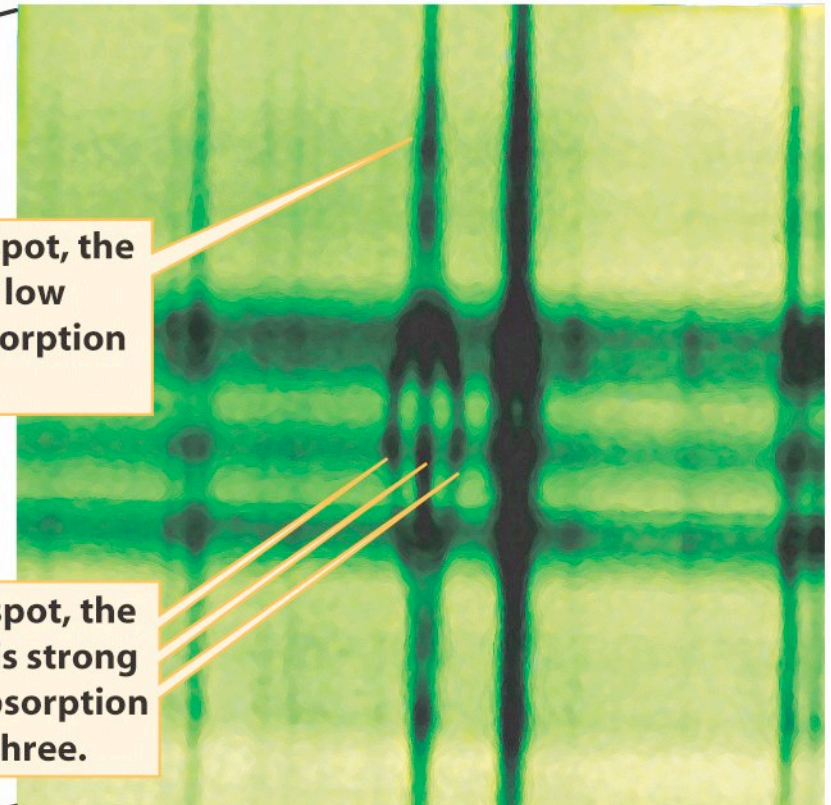
Zeeman effekten



(a) A sunspot

Outside the sunspot, the magnetic field is low and this iron absorption line is single.

Within the sunspot, the magnetic field is strong and this iron absorption line splits into three.



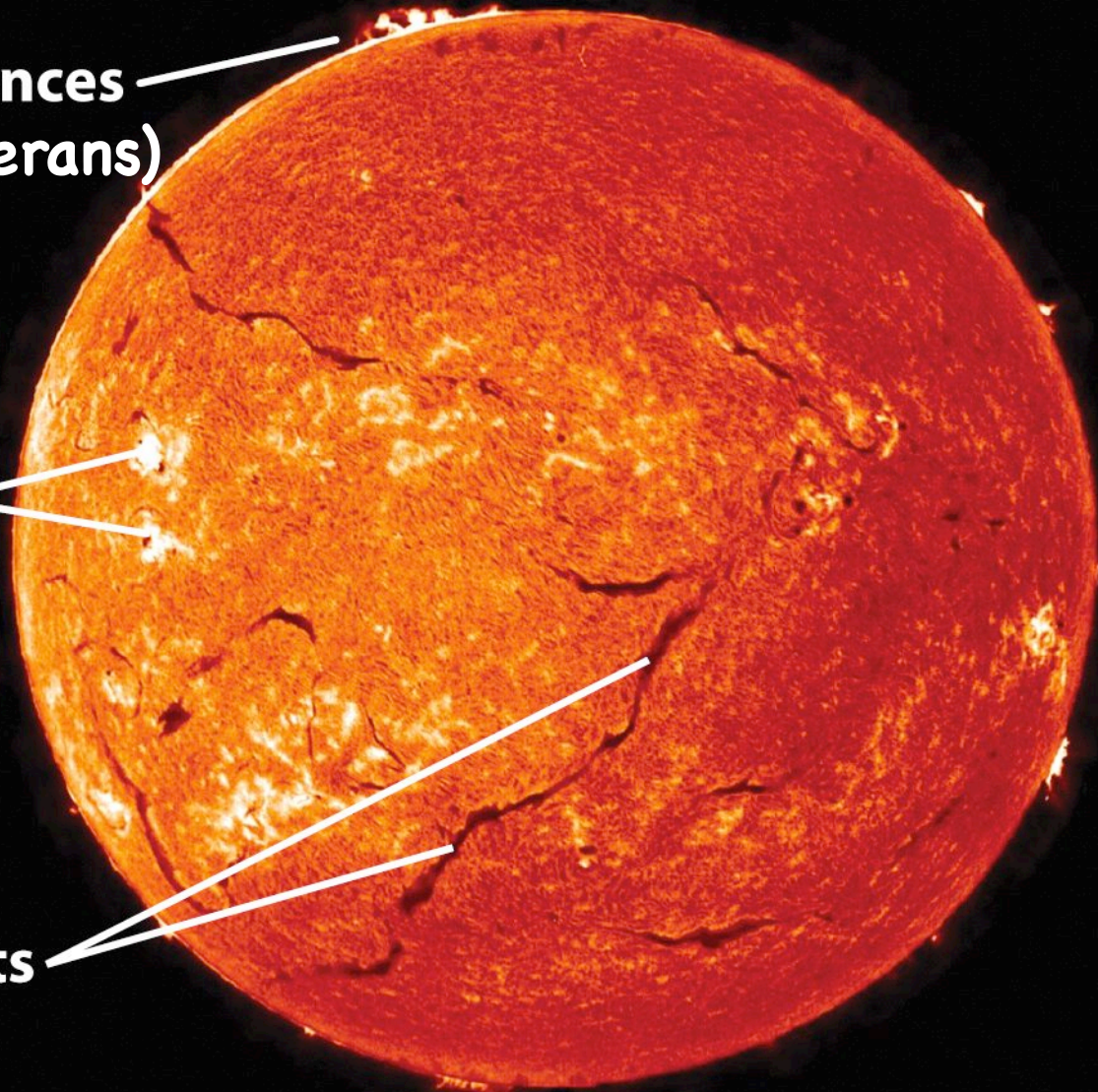
(b) The spectrum in and around the sunspot

Uppsplittningen är proportionell mot magnetfältet

**Prominences
(Protuberans)**

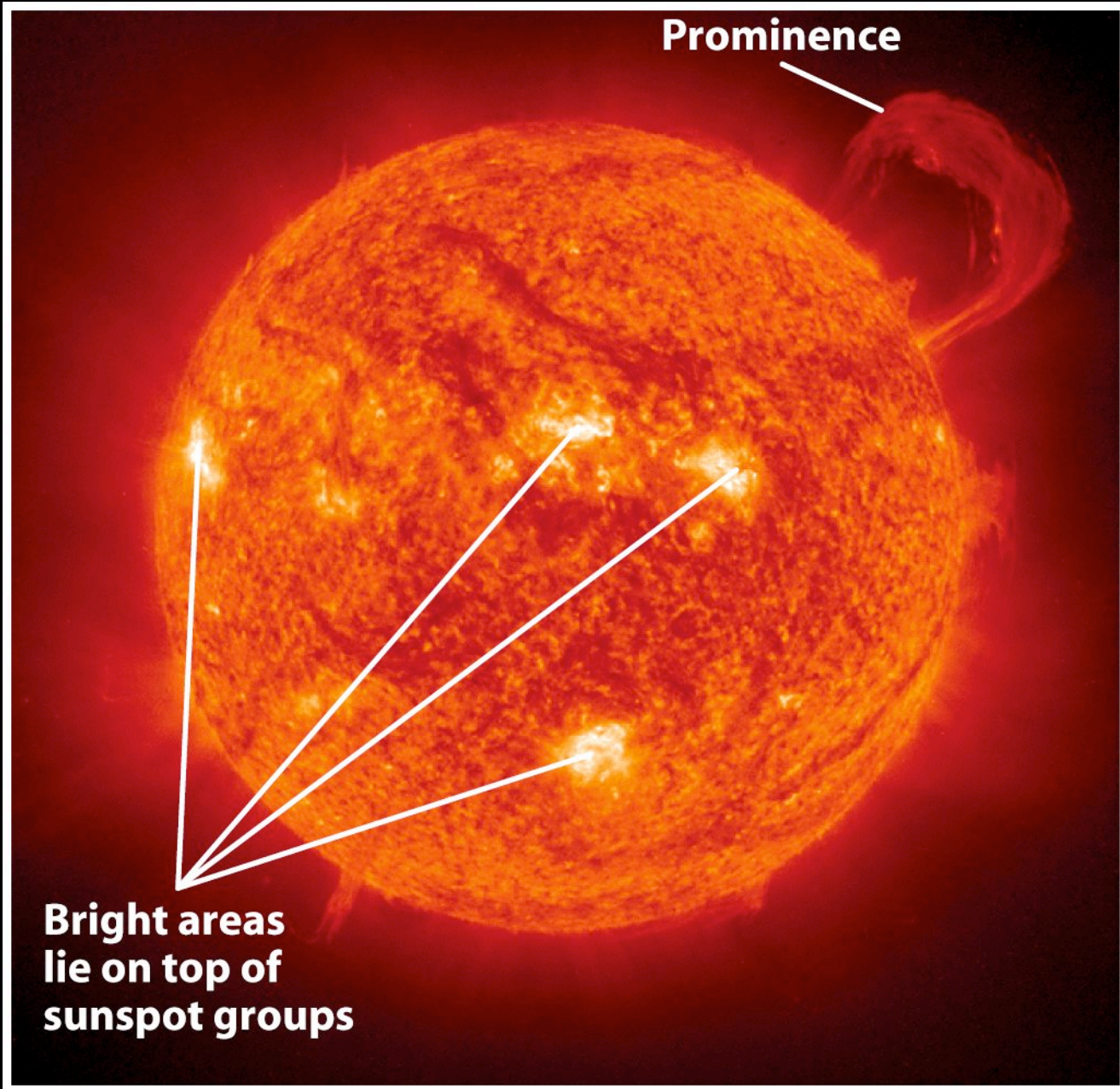
Plages

Filaments

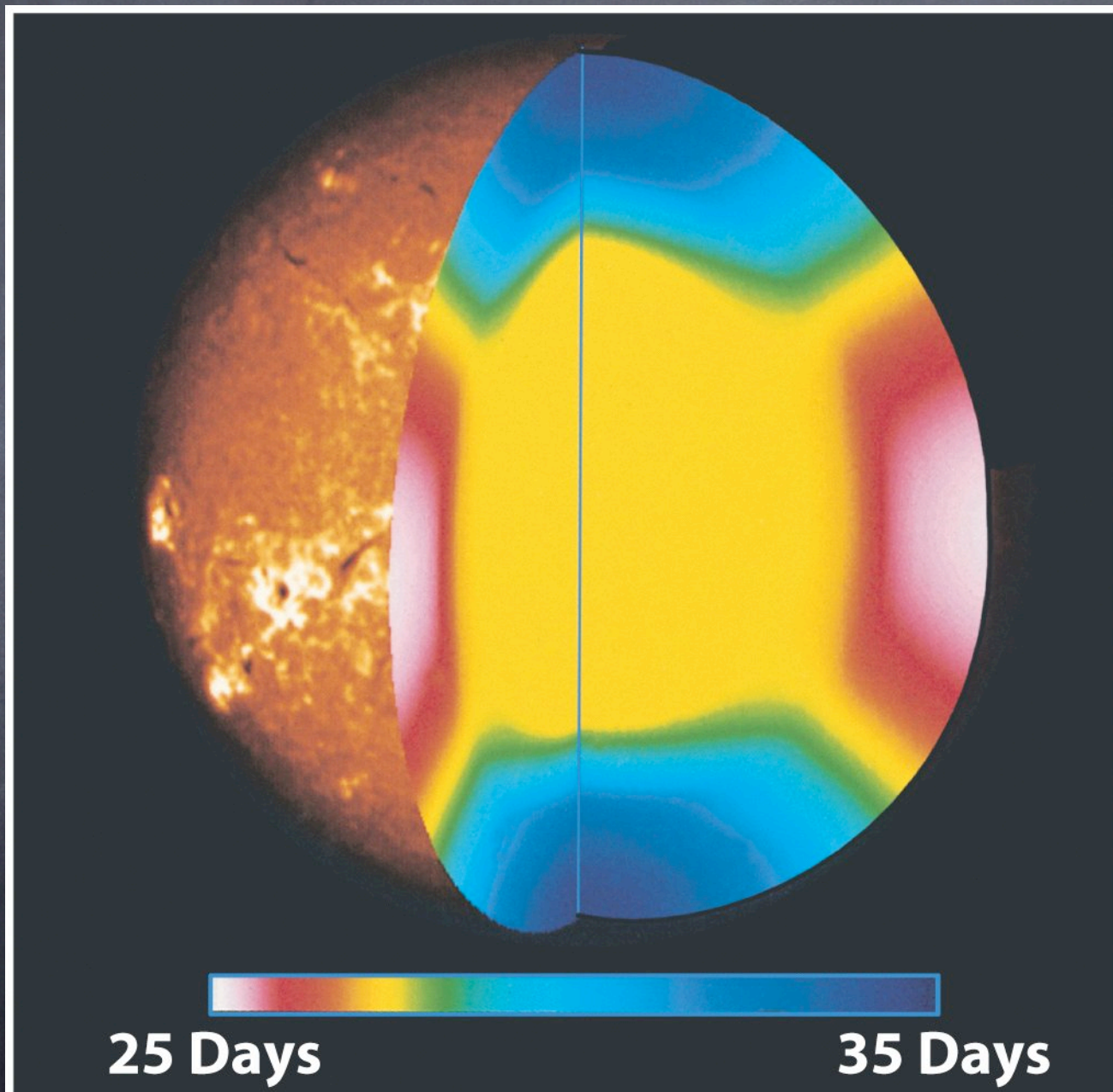


Prominence

**Bright areas
lie on top of
sunspot groups**

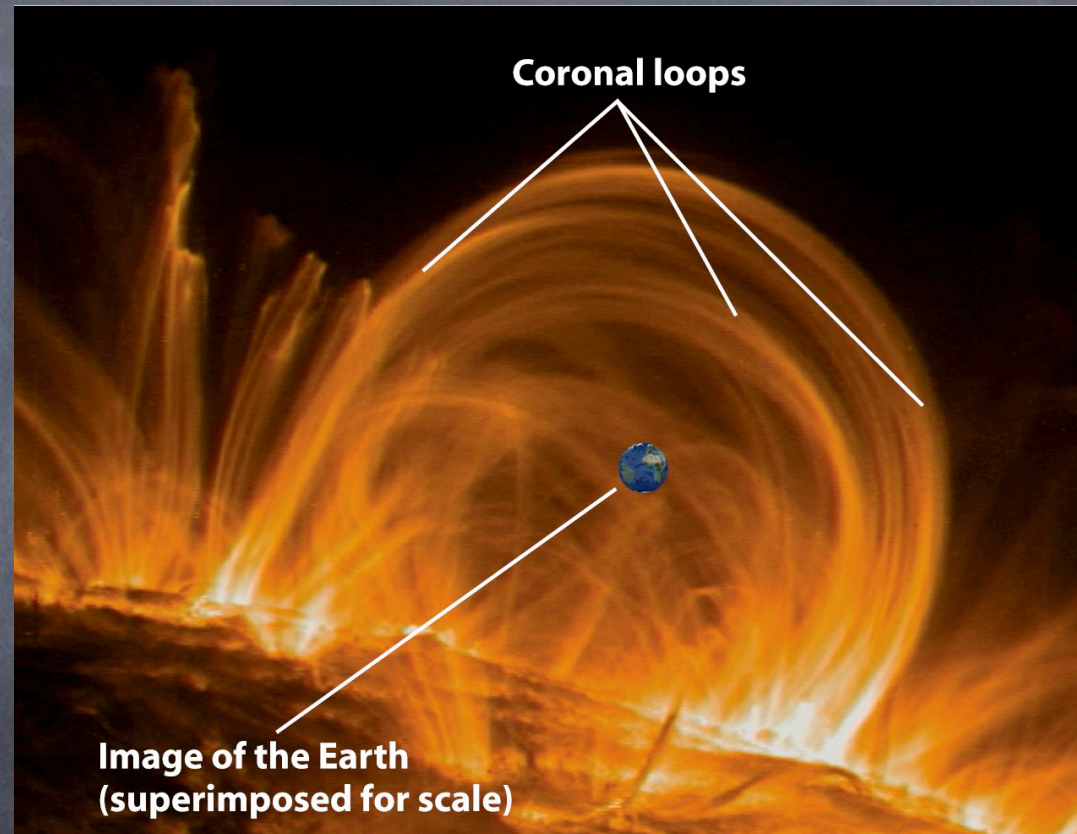


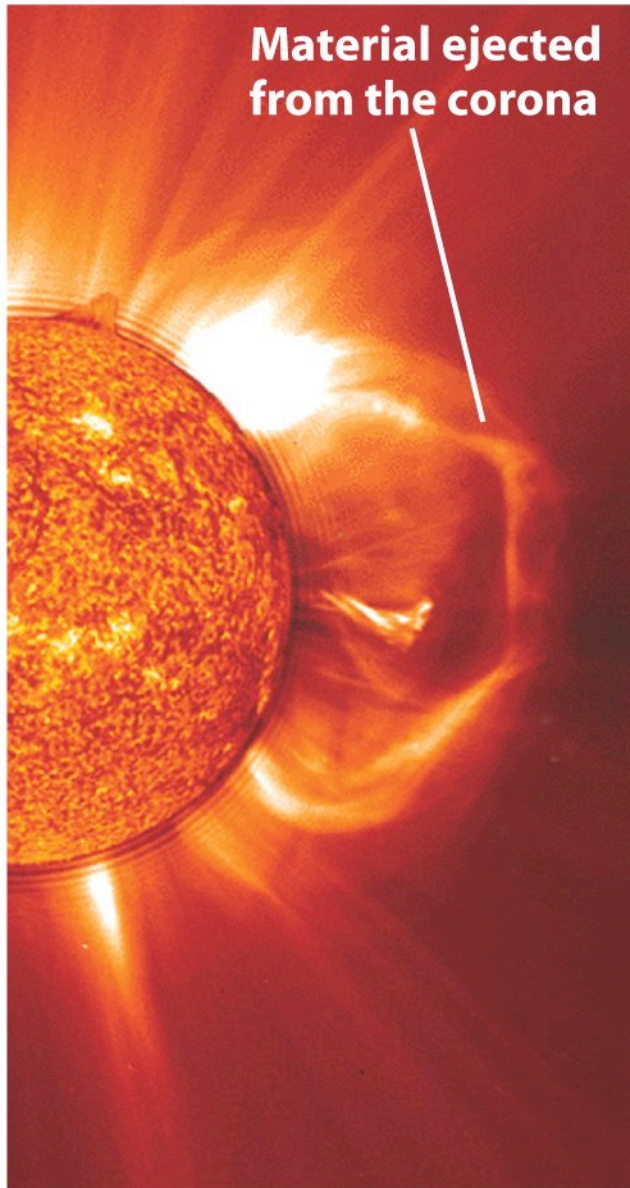
Rotation of the Solar Interior



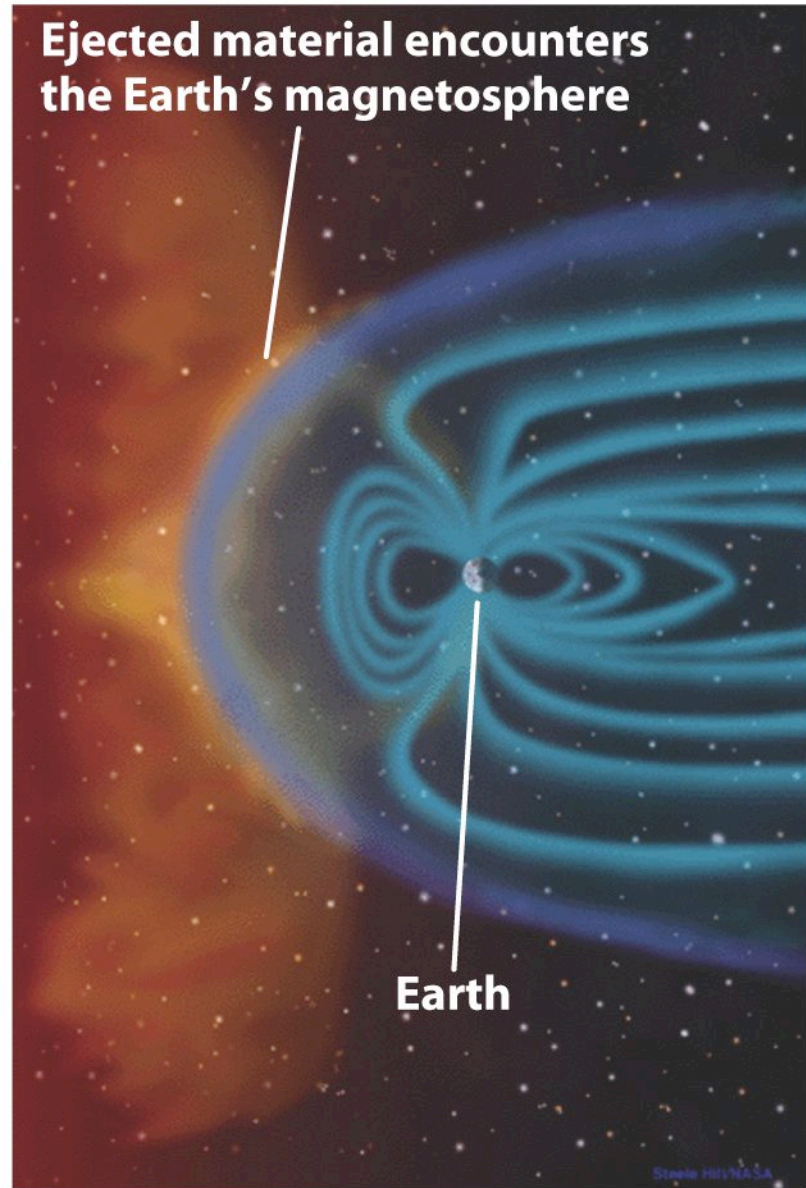
Solens magnetfält skapar också andra former av aktivitet

- En soleruption (solar flare) är ett kort utkast av het, joniserad gas från en solfäcksgrupp
- Ett massutkast från koronan är mycket större





(a) A coronal mass ejection



(b) Two to four days later