

# Innhold

<b>1</b>	<b>VÅR STJERNE - SOLEN.....</b>	<b>1</b>
1.1	LUMINOSITET, ENERGIFLUKS, OVERFLATETEMPERATUREN OG SORT LEGEME .....	2
1.2	ENERGIPRODUKSJONEN I KJERNEN AV SOLA - HYDROGENBRENNING .....	3
1.3	EN TEORETISK MODELL AV SOLEN .....	6
1.4	SOLENS VIBRASJONER GIR INFORMASJON OM SOLENS INDRE .....	9
1.5	NØYTRINOENE GIR INFORMASJON OM SOLENS KJERNE.....	10
1.6	FOTOSFÆREN ER DET NEDERSTE AV TRE LAG I SOLENS ATMOSFÆRE.....	12
1.7	FOTOSFÆREN HAR FLEKKER – SOLFLEKKER - OMRÅDER MED LAVERE TEMPERATUR .....	14
1.8	KROMOSFÆREN BLIR SYNLIG GJENNOM ET H-ALFA FILTER .....	19
1.9	KORONAEN.....	21
1.10	NORDLYS.....	23
1.11	AKTIVITETER .....	26
1.12	ANIMASJONER .....	27
1.13	OPPGAVER .....	27

## 1 Vår stjerne - Solen



En stor gruppe mørke flekker på Sola 12. mai 2005. Solflekker er områder på overflaten som har lavere temperatur en 5800K. Antall solflekker varierer etter et mønster som har en periode på 11 år. Bildet er tatt med UiA teleskopet (Meade 10”) som telelinse. Kameraet er et Canon EOS 20D (lukkehastighet: 1/50s og ISO: 100).

Det er Solens overflatetemperatur og Solens totale overflate som bestemmer energien som Solen sender ut i løpet av ett sekund. Populært kan man si at Solen er en lyspære på  $3,9 \cdot 10^{26}$  watt. Solens overflate må nødvendigvis tilføres energi hele tiden fordi temperaturen på overflaten er tilnærmet konstant. I dag vet astronomene at i sentrum av Sola produseres store mengder

gammastråling, det er denne strålingen som holder temperaturen på overflaten konstant. Legg merke til at det må skje noe med gammastrålingen på veien opp til overflaten, den forsvinner (se avsnitt 11 i Leksjon 4 "Lysets natur"). Gammastrålingen produseres når hydrogen fusjonerer til helium, denne energiproduksjonen (hydrogenbrenning) krever høy temperatur, flere millioner grader. Det dannes det også en partikkel som har fått navnet nøytrino i denne fusjonsprosessen. Nøytrino strømmen fra Solens kjerne er stor, noen av disse "fanges" av astrofysikere på Jorden og studeres i detalj.

Solen har enorme dimensjoner, **den har volum nok til å romme 1,3 millioner jordkloder** og inneholder mer enn 99 % av all masse i solsystemet.



Solen går ned over UiA teleskopet 27. mars 2007. "Bildet viser tydelig at Solen er en stjerne". Stjernemønsteret viser seg når lyset passer spalten mellom teleskoprøret og fundamentet for søkekikkerten.

I dag forskes det også på om variasjon i solaktiviteten kan ha innflytelse på klimaet på Jorden og vårt teknologiske samfunn.

## 1.1 Luminositet, energiflukt, overflatetemperaturen og sort legeme

Blant det store mangfold av stjerner som vi ser på himmelen er Solen en stjerne "midt på treet". Solens høye overflatetemperatur (5800K) gjør at store energimengder stråler ut som synlig lys. Denne høye overflatetemperaturen fører til en rekke fundamentale spørsmål som for eksempel:

**Hvordan kan Solen opprettholde en så høy temperatur og hvilken energikilde kan gi den enorme luminositeten over så lang tid?**

Svarene på disse spørsmålene forutsetter at Solens luminositet er kjent. **Luminositeten** er den energien som Solen sender ut i løpet av ett sekund (se forelesningen om "Lysets natur"). Observasjoner og beregninger viser at Solens luminositet er

$$L = 3,9 \cdot 10^{26} \cdot \text{W}$$

(Astronomene benytter ofte symbolet:  $\odot$  som et ikon for Solen, skrifttype Wingdings 8)

En lyspære på 40 watt bruker den energien 40 joule i løpet av ett sekund. Joule er enheten for energi i SI-systemet. Astronomene vil si at lyspæra har **luminositeten** 40 watt. Vi sier ofte at lyspæras effekt er 40W, eller at lyspæra har lysstyrken 40 watt. Populært kan man si at Solen er en lyspære på  $3,9 \cdot 10^{26}$  watt

Det er Stefan-Boltzmanns lov for et sort legeme som gir oss Solens overflatetemperatur når energifluksen (F) på Solens overflate er kjent. **Solens energifluks** (F) er den energimengden som hvert sekund passerer gjennom en kvadratmeter på solens overflate (enheten er watt/m<sup>2</sup>).

Astronomene har vist at det er mulig å måle Solens energifluks. De tar i bruk satellitter i bane rundt Jorden. Instrumenter om bord i satellittene måler energifluksen, en størrelse som kalles for **solarkonstanten** (F = 1370W/m<sup>2</sup>).

Solens overflatetemperatur er gitt av Stefan-Boltzmanns lov dersom vi kjenner Solens energifluks på Solens overflate.

$$F = \sigma \cdot T^4$$

Stefan-Boltzmanns lov sier at energifluksen er proporsjonal med overflatetemperaturen i fjerde potens. Når solarkonstanten er kjent og avstanden til solen er kjent (149,6 millioner km) kan vi beregne energifluksen (F) på Solens overflate.

Først må vi finne Solens luminositet, deretter etter beregner vi energifluksen på Solens overflate, denne beregningen forutsetter at Solens radius er kjent. Solens radius er 109 Jordradier eller 696 000km:

$$L = 4 \cdot \pi \cdot (149.6 \text{ M} \cdot \text{km})^2 \cdot 1370 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 3.85 \cdot 10^{26} \cdot \text{W}$$

$$F = \frac{(3.853 \times 10^{26} \text{ W})}{4 \cdot \pi \cdot (696000 \text{ km})^2} = 6.41 \cdot 10^7 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Hver eneste kvadratmeter på Solen overflate har effekten 64 millioner watt.

Stefan-Boltzmann lov gir Solens overflatetemperatur når energifluksen på overflaten er kjent:

$$F = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5.670410^{-8} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Løser vi denne likningen får vi solens overflatetemperatur, T = 5800K

## 1.2 Energiproduksjonen i kjernen av Sola - hydrogenbrenning

### Hvordan kan Solen opprettholde en nesten konstant overflate temperatur på 5800 K?

Vi har sett at gravitasjonskraften og friksjon er årsaken til at stjerner dannes inne i roterende tåker. Temperaturen i sentrum av tåka øker fordi gravitasjonsenergien overføres til termisk

energi. Spørsmålet er om gravitasjonskraften er årsaken til Solens energiproduksjon i dag? I forelesningen "Vårt solsystem, hvordan ble det til?" kom det fram at tyngdekraften kan produsere stjerner men den kan ikke "holde liv" i stjernene over lang tid.

Kjemiske forbrenning kan heller ikke være årsak til den enorme luminositeten og solsystemets lange levetid. Beregninger viser at energiproduksjonen etter denne metoden kun vil vare i 10000 år. Ved kjemisk brenning frigis det alt for lite energi pr atom (ca  $10^{-19}$  joule).

Spørsmålet er om der finnes prosesser i naturen som kan frigi mer energi pr atom, en prosess som kan være i overensstemmelse med Jordens alder. Albert Einstein fant nøkkelen til en slik prosess i 1905. Han fant at masse i prinsippet kan gå over til energi:

$$E = m \cdot c^2$$

Lyshastigheten er et stort tall, lyshastigheten kvadrert er et enda større tall. Av den grunn kan små mengde stoff frigi en formidabel energimengde.

Den høye temperaturen i Solens sentrale områder vil ionisere atomene, hydrogenkjerner og elektroner vil bevege seg rundt uten å være bundet til hverandre mente den britiske astronomen Arthur Eddington (1920).

Astronomen Robert Atkinson antydte at i Solens kjerne kan hydrogen smelte sammen til helium, i denne fusjonsprosessen kan tilstrekkelig energi frigjøres.

Laboratorieforsøk viser at ved tilstrekkelig høy temperatur kan hydrogen begynne "å brenne". Den høye temperaturen i Solens sentrale områder fører til fusjon på grunn av "nærkontakten", De elektriske kreftene klarer ikke å holde dem fra hverandre. Det er viktig å legge merke til her at ordinær kjemisk forbrenning skjer når de ytre elektronene blir reorganisert og nye stoffer dannes (og energi blir frigitt). Når hydrogen begynner å brenne vil atomkjernene bli reorganisert og nye tyngre kjerner oppstår

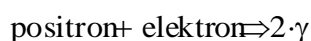
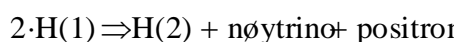
Hydrogenbrenningen er som sagt et litt misvisende begrep for energiproduksjonen i Solen.

**Termonukleær fusjon** er bedre fordi to nøytroner og to protoner fusjonerer og danner en ny kjerne, en prosess som krever 10 millioner kelvin. Energi frigjøres fordi protonene og nøytronene har mindre masse i heliumkjernen sammenliknet med massen de hadde før fusjonen. Partiklene "brenner ikke opp og forsvinner", de grupperer seg og danner nye kjerner

## PP-1 kjeden i Solen

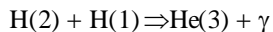
Det viser seg at overgangen fra hydrogen til helium foregår i flere steg, den overgangen som skjer oftest kan vi se i [animasjon 16.1](#)

1. steg:



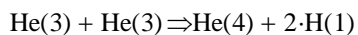
Steg (1): To hydrogenisotoper H(1) fusjonerer (smelter sammen) og hydrogenisotopen H(2) (deuterium) dannes. I denne prosessen blir energi frigitt. Energien er i første omgang bevegelsesenergi på positronet og nøytrinoet. Nøytrinoet forlater raskt Solen. Positronet som er antipartikkelen til elektronet reagerer umiddelbart med et elektron og det dannes 2 gammafotoner. Protonet går over til et nøytron, nøytrino og ett positron, denne prosessen krever energi fordi protonet har mindre masse enn nøytronet. Nøytronet og protonet finner hverandre og danner deuterium (H(2)).

2. steg



Steg(2): Hydrogenisotopen H(2) fusjonerer med isotopen H(1) og en heliumisotop He(3) dannes. Stegene 1 og 2 viser heliumisotopene He(3) dannes av tre lette hydrogenkjerner. I denne prosessen dannes ett gammafoton.

3. steg



Steg(3) viser at det trengs to He(3) isotoper til produksjonen av en He(4) isotop og to hydrogenisotoper H(1).

PP-1 kjeden viser at når hydrogen går over til helium blir 6 gammafotoner, en heliumkjerne He(4) og 2 nøytrinoer frigjort. I alt vil fire lette hydrogenkjerner forsvinne når helium dannes. Fusjonsprosessene PP-2 og PP-3 er ikke pensum.

85 % prosent av energien i Sola produseres av [PP-1 kjeden, resten \(15%\) produseres i PP-2 kjeden](#)

### **Solen mister 600 millioner tonn hydrogen hver sekund**

Det kan vises at bare 0,7 % av hydrogen massen forsvinner i fusjonsprosessen. Konverteres ett kg hydrogen til helium går 0,007 kg (7 gram) over til energi. Den energimengden som frigis svarer til 20 000 tonn kull.

Vi kan benytte likningen til Einstein og finne hvor mye energi som blir frigitt når fire hydrogenkjerner går over til en heliumkjerne. Se boks 16-1 i Universe: Oppgave 6 og Oppgave 7

Solens luminositet krever at 600 millioner tonn hydrogen går over til helium hvert sekund. Beregningene viser at solen har nok hydrogen til å produsere energi i ytterligere 5 milliarder år.

Proton-proton kjedene (PP-1, PP-2 og PP-3) er energikilden for de fleste stjernene vi ser på himmelen.

### 1.3 En teoretisk modell av Solen

Den matematiske modellen astrofysikerne lager baserer seg på at Solen er i hydrodynamisk- og termisk likevekt og at energien transporteres ut ved konveksjon og strålingsdiffusjon. Modellen er ett sett med differensiallikninger som blir løst av datamaskiner, Løsningene tar utgangspunkt i de observerte overflatestørrelsene som temperatur, tetthet (nesten null) og luminositet.

Astrofysikerne beregner seg inn til Solens sentrum. Resultatet viser hvordan temperatur, tetthet, trykk, massefordeling og luminositeten varierer fra overflaten til Solens sentrum.

(Meteorologene for eksempel observerer trykket, temperatur etc. og beregner seg inn i framtiden og gir prognoser på hvordan været skal bli)

Her er resultatet av beregningene, kurvene ligger på nettstedet til Universe: [A Teoretical Model of The Sun](#)

- **Temperaturen varierer fra 5800 kelvin (R) til 10 millioner grader kelvin (0,25R)**

Disse termonukleære fusjonsprosessene kan ikke foregå på overflaten, her er temperaturen bare 5800K. Temperaturen i Solens sentrale områder må være minst 10 millioner kelvin dersom PP-1 kjeden produserer energien. Astronomene antar at all energiproduksjon på skje i sentralkulen, utenfor sentralkulen er temperaturen mindre enn 10 millioner grader. Sentralkulens radius er 0,25R. Legg merke til at avstanden fra Solens sentrum uttrykkes som en del av Solens radius (R). I sentrum viser beregningene at temperaturen er steget til 15,5 millioner kelvin. Trykket er 340 milliarder atmosfærer. I sentrum

- **Luminositeten avtar fra  $3,9 \cdot 10^{26}$  watt (0,25R) til 0 watt i sentrum av Sola**

Beregningene viser også at luminositeten stiger med 100 % fra sentrum til 0,25R, det betyr at energiproduksjonen skjer i Solens kjerne. Utenfor denne radien er tettheten og temperaturen så lav at fusjonsprosessene opphører.

- **Massetettheten avtar fra  $0 \text{ kg/m}^2$  til  $160\,000 \text{ kg/m}^2$  (14 ganger tettheten for bly)**

Resultatet av beregningene viser at i sentrum av Solen er tetthet, temperatur og trykk henholdsvis  $160\,000 \text{ kg/m}^3$  (14 ganger tettere enn bly).

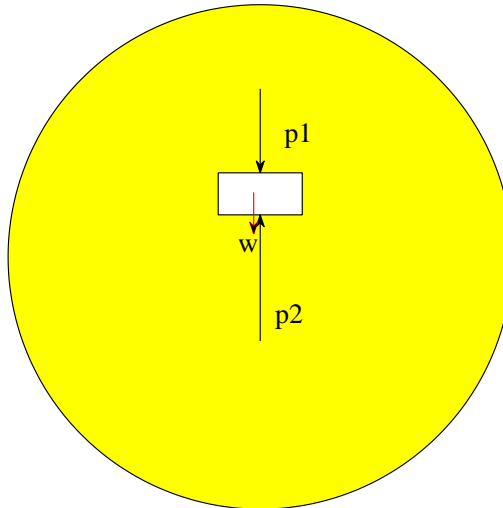
- **94 % av Solen masse ligger innenfor en radius på 0,5R**

Modellberegningene viser at 94 % av solmassen ligger innenfor 0,5R

## Litt om fysikken bak modellen

Astronomene lager en modell som baserer seg på fysiske lover. Solen må være i hydrodynamisk- og termisk likevekt fordi Solen er relativt stabil stjerne med konstant. Vi skal ikke gå inn i teorien bak modell, kun nøye oss med hva som menes med hydrostatisk likevekt og termisk likevekt. Til slutt skal vi si litt om hvor energien transporteres fra produksjonsstedet til overflaten.

- **Hva menes med hydrodynamisk likevekt?**



Vi må tenke oss en skive (et volum) med solmateriale. I likevekt vil denne skiven verken bevege seg opp eller ned inne i Sola fordi **Trykket på overflaten av skiven og vekten av skiven må balansere trykket mot bunnen av skiven**. En annen måte å si det på er at oppdriften av skiven må balansere tyngden av skiven, den tenkte skiven er da i hydrostatisk likevekt. Solens indre er i en fullstendig gasstilstand på grunn av den høye temperaturen. Gassens presses mer og mer sammen inn mot Solens sentrum, av den grunn vil massetettheten og trykke øke mot sentrum av Sola.

- **Hva menes med termisk likevekt?**

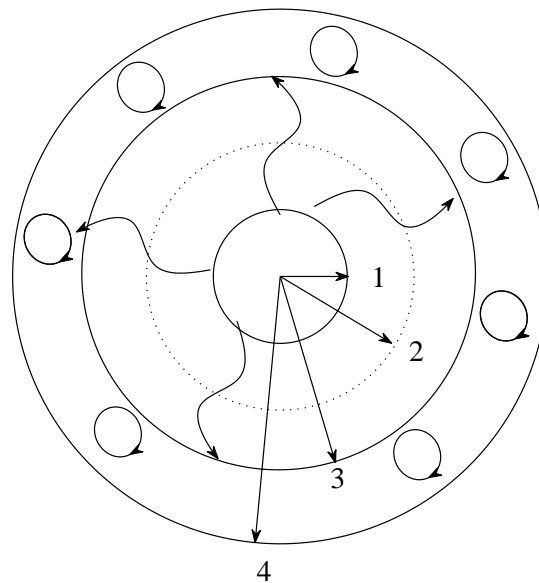
All energien som blir produsert i Solens kjerne må bli transportert ut til overflaten og derfra vil energien bli transportert ut i rommet. Dersom det blir transportert mer energi vekk fra kjernen enn den som blir produsert vil temperaturen i kjernen avta og kjerneprosessene vil tilslutt opphøre. Hva skjer med temperaturen i kjernen dersom det transporteres mindre energi vekk fra kjernen enn den som blir produsert i kjernen? Da vil trykke i sentrum av Sola øke, som følge av denne trykkøkningen vil Solens volum øke.

Solen må være i termiske likevekt, det vil si at i Solens indre må temperaturen i hvert dyp være konstant og øke på veien mot sentrum av Sola.

Den energien som produseres i sentrum av Sola må fraktes vekk på en eller annen måte, ellers vil Solen bli ustabil og i verste fall eksplodere.

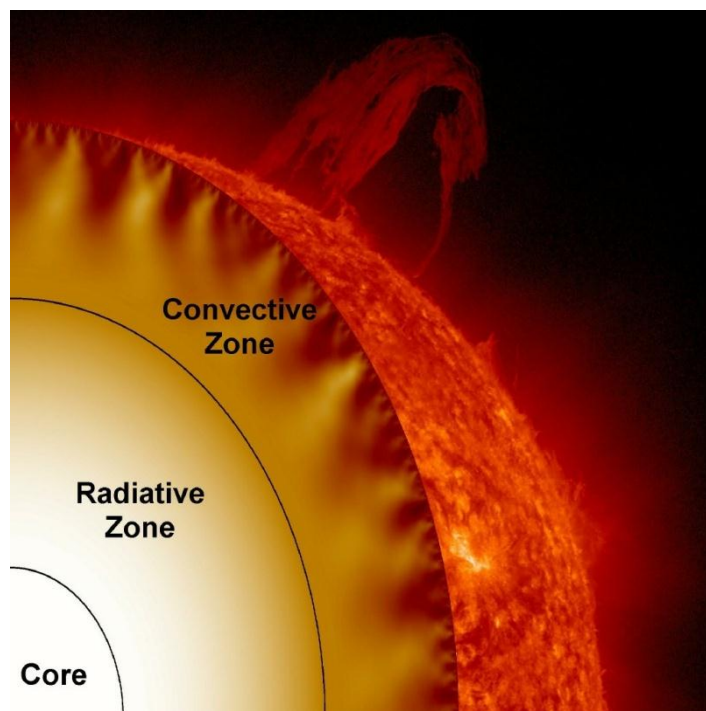
- **Hvordan transporteres energien til Solens overflate?**

I solen transporteres energien både ved konveksjon og strålingsdiffusjon.



- 1: Energiproduksjon i kjernen ( $0,25R$ )
- 2: 94% av Solens masse innenfor  $0,5R$
- 3: Strålingssonen fra  $0,25R$  til  $0,71R$
- 4: Konveksjonssonen fra  $0,71R$  til  $R$

**Konveksjon** er sirkulasjon av den solare gassen på grunn av temperaturforskjellen mellom kjernen og overflaten. Varme gasser beveger seg opp mot overflaten og kalde gasser beveger seg tilbake mot sentrum av Solen. En konveksjonsanalogi er energitransport av varmt vann fra bunnen av kaffekjelen til det kalde vannet på overflaten.



Illustrasjon: [Nasa](#)



I **strålingssonen** skjer energitransporten ved strålingsdiffusjon fra sentrum og ut til  $0,71R$  (strålingssonen) og konveksjon utenfor  $0,71R$  (konveksjonssonen). På grunn av den høye tettheten tar det lang tid for fotoene å passere strålingssonen. Det tar omtrent 170 000 år fra energien blir produsert i kjernen til den kommer opp til overflaten (50cm/time), Lyset som treffer Jorda i dag ble produsert for 170 000 år siden. Er energien først kommet opp til overflaten får den fart på seg, det tar 8 minutter å komme til Jorden. Gammafotoene som genereres i fusjonsprosessene absorberes og emitteres av gassene de møter på sin vei til overflaten(i strålingssonen), denne prosessen kalles for **strålingsdiffusjon**

## 1.4 Solens vibrasjoner gir informasjon om solens indre

Hvordan kan den solare modellen kontrolleres?

En metode er å undersøke solens vibrasjoner, dette forskningsområdet kalles for **helioseismologi**.

To analogier: Det er mulig å banke på en melon, lytte på vibrasjonene og finne ut om den er moden. Etter et Jordskjelv kan geologene bruke seismografer (registrere vibrasjoner i jordskorpen) og bestemme jordens indre strukturer.

I 1960 oppdaget Robert Leighton Solens vibrasjoner for første gang, han observerte at deler av solens overflate beveget seg opp og ned 10 meter i løpet av 5 minutter. Hans observasjons metode var høyoppløselig Dopplerforskyvning. I dag forskes det på vibrasjoner som varer fra 20 til 160 minutter, det brukes teleskoper som går i bane rundt jorden og i bane rundt Solen (SOHO).

Vibrasjonene på Solen kan sammenlignes med lydbølger, de er ikke "hørbare" fordi frekvensen er for liten (0,003Hz, periode 5 minutter).

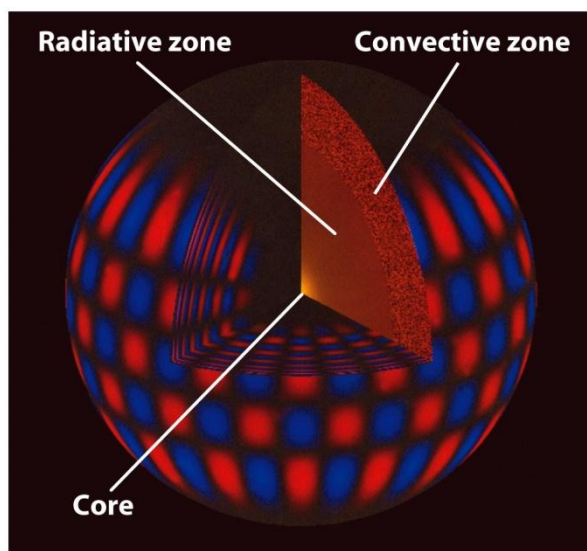


Figure 16-5  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

Univers: Datasimulasjon av et oscillasjonsmønster på Solen. De blå flatene beveger seg utover, de blå flatene beveger seg innover. Det er lydbølgene inne i Sola som setter opp dette mønsteret på Solens overflate. Dette mønsteret gir et bilde av de fysiske forholdene inne i Solen

Man tenker seg Solen som en stor resonanskasse, fordi lydbølgene som kommer ut mot overflaten reflekteres og beveger vekk fra overflaten, de brytes og treffer overflaten et annet sted, reflekteres ned igjen. Alle disse lydbølgene vil interferere med hverandre og lage et interferensmønster på overflaten. Astrofysikerne legger forskjellige solmodeller inn i sin datamaskin, sammen med lysbølge-teorien og forsøker å simulere oscillasjonsmønsteret som observeres på overflaten. Mønsteret som observeres på overflaten av Sola forteller hvordan tilstanden er i Solens indre. De har klart å justere grensene for de ulike sonene der energien blir transportert. Grensen for overgangen mellom strålingssonen og konveksjonssonen er som nevnt 0,71R.

**Helioseismologien har også vist at differensiert rotasjon fortsetter inn i konveksjonssonen og at strålingssonen roterer som et stivt legeme** (periode 27 døgn). Det er i overgangen mellom de to soner at magnetfeltet dannes.

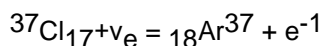
## 1.5 Nøytrinoene gir informasjon om Solens kjerne

- Det solare nøytrinoproblemet

Vi mangler avgjørende bevis for at PP-kjedene virkelig foregår i solens indre. Vibrasjonene astronomene ser på solens overflate når ikke inn til solen kjerne. Lyset vi mottar fra Solen her på Jorden er ikke produsert i kjernen, men produseres på overflaten på grunn av den høye temperaturen. Vi kan ikke finne informasjon om kjernen i den elektromagnetiske delen av solstrålingen. Solvibrasjonene kan heller ikke hjelpe oss. Biproduktet av PP-kjedene kan hjelpe forskerne på vei mot det avgjørende bevis for at det virkelig er hydrogen som fusjonerer til helium.

I PP-kjeden (steg(1) går protonet over til et nøytrino og et positron på grunn av den høye temperaturen.  $\gamma$ -fotonet og nøytrinoet transporterer energi vekk fra Solens kjerne, Nøytronet har ikke ladning og nesten ikke masse. I motsetning til gammafotoner vekselvirker nøytrinoet nesten ikke med materien. Selv Solens kolossale volum hindrer ikke nøytrinoet å komme ut i rommet. På grunn av den enorme luminositeten vil  $10^{14}$  pr sekund nøytrinoer passere gjennom hver kvadratmeter på Jordens overflate. En observasjon av denne nøytrinomengden vil være det avgjørende bevis for PP-kjedens eksistens i solens sentrum. Hvordan få det til?

Allerede på 1960 tall begynte forskerne å bygge nøytrinodetektorer på jakt etter PP-kjedens eksistens. Dette var en vanskelig oppgave fordi nøytronene lot seg nesten ikke stoppe av Solens kolossale volum, de fleste vil da fare gjennom Jorden uten å tape energi. Raymond Davis bygde en tank på 400 000 liter, plasserte den i en grube 1,5 km under Jordens overflate, han fylte tanken med et klorholdig rensmiddel ( $C_2Cl_4$ ). De fleste nøytrinoene gikk gjennom tanken, men noen traff klorkjernene  $Cl(37)$  og den radioaktive partikkelen argon  $Ag(37)$  ble dannet.

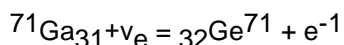


**Når et nøytrino treffer et nøytron klorkjernen, vil nøytronet gå over til et proton og argon dannes.**

Davis hadde klart å registrere nøytrinofluksen ved å telle de radioaktive argonatomene. Davis oppdaget færre nøytrinoer en teorien skulle tilsi. Denne uoverensstemmelsen ble kalt for **det solare nøytrinoproblemet**. Men Davis satte fart i andre forskere som ønsket å løse dette problemet.

Det viste seg nøytronene fra PP-1 kjeden ikke hadde nok energi til å omdanne  $Cl(37)$  til  $Ag(37)$ . *Davis registrerte høyenergetiske nøytroner, nøytroner som ikke stammet fra steg(1) i PP-1 kjeden, men fra PP-3 kjeden.* Hele 77 % av nøytronene stammet fra denne kjeden.

Fysikerne (Soviet-American Gallium Experiment) endret metoden, de benyttet gallium Ga(71) for registrering av nøytrinoene med mindre energi produsert i PP-1 kjeden. Hver gang et nøytrino traff en Ga(71)- kjerne ble en radioaktiv isotop av germanium produsert (Ge(71)). Forskere fra Italia utførte også dette (GALLEX), de fant nøytronfluks på 50% til 60% i forhold til teoretisk verdi.



Japanske forskere (Super-Kamiokande observatoriet) fant en nøytrinofluks som var 45% av teoretisk verdi, de benyttet en helt annen observasjonsmetode (lys fra raske elektroner, såkalt Cerenkov light), de kunne bestemme retningen på nøytrinostrålingen og fant at de kom fra Solen.

### Det solare nøytrinoproblemet ble løst

Fysikerne har funnet tre ulike nøytrinotyper, de har også oppdaget at nøytrinoene kan gå fra en type til en annen i løpet av den tiden det tar å bevege seg fra Solens kjerne og til detektoren. Dette fenomenet kalles for **nøytrino oscillasjon**. Bekreftelsen kom i 1998 fra Japan (Super-Kamiokande) de kunne bekrefte at nøytrino oscillasjoner skjer i virkeligheten. At nøytrino oscillasjoner skjer i naturen ble bekreftet av Sudbury Neutrino Observatory (SNO). SNO observatoriet fant alle tre nøytrino typene i sin underjordiske vanntank.

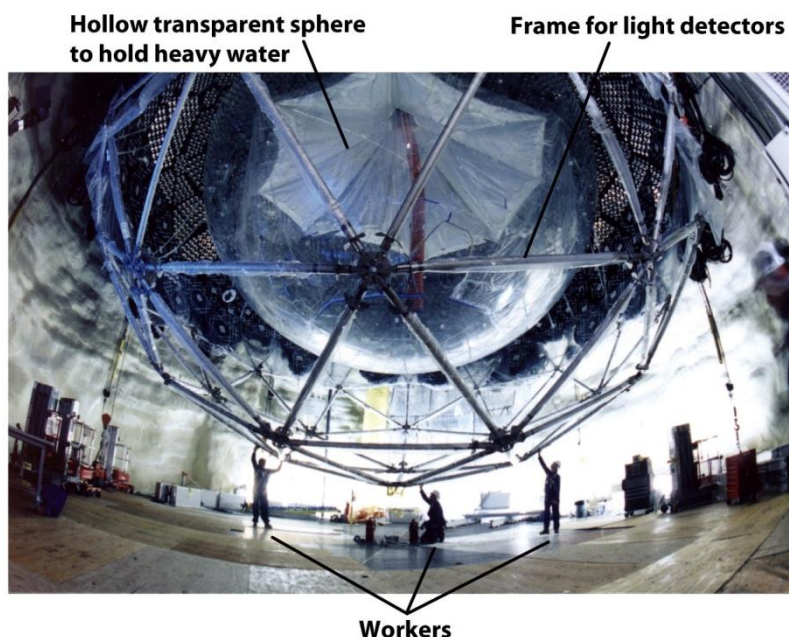


Figure 16-6  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

Bildet viser Sudbury Neutrino Observatory (SNO) i Canada.

**Den gjennomsiktige kulen i midten inneholder 1000 tonn tungtvann. Nøytrinoene vekselvirker** med tungtvannet og i denne prosessen oppstår et lysglimt. 9600 lyssensorer utenfor tanken har evnen til å observere lysglimtene.

Det som skjer i denne tanken fylt med tungt vann (D<sub>2</sub>O) er følgende. Nøytrinoet slår ut nøytronet i det tunge hydrogenkjernen (deuterium). Dette frie nøytronet blir deretter fanget opp

av en annen hydrogenkjerne, når det skjer sender atomet ut et lysglimt. SNO forskerne har vist at deres observasjonsmetode har løst nøytrinoproblemet, detektoren klarte og observerer de tre nøytrinotypene.

[Det drives også nøytrino forskning på Sydpolen.](#)

Forskerne mener i dag at nøytrinoproblemet er løst, nøytrinoene endrer seg på veien fra Solen til Jorden. Før nøytrinoene har nådd Jorden har 2/3 av denne eksotiske partikkelen foretatt en spontan oscillasjon og blitt en ny nøytrinotype.

[Nobelprisen i fikk 2002, ble tildelt nøytrinoforskere: Raymond Davis og direktøren for Kamiokande "research group" Masatoshi Koshiba.](#)

## 1.6 Fotosfæren er det nederste av tre lag i Solens atmosfære



HiA 12.05.05 (Canon EOS 20D med Meade 10" som telelinse, lukkehastighet 1/50s og ISO 100)

Fra det nederste laget (**fotosfæren**) i Solens atmosfære oppstår det synlige lyset. Bildet over viser at fotosfæren har en klar veldefinert sirkelrund rand. Den store kontrasten på randen er et synsbedrag, elektroniske bilder med høy oppløsning som viser at randen er diffus. Det er hovedsakelig Jordens atmosfære som gjør randen uskarp. Ser man bort fra jordatmosfærens spredning av sollyset er randen skarp fordi lyset kommer fra et tynt lag. Dette laget har en tykkelse på 400km og kalles for fotosfæren.  
spå

Over fotosfæren ligger **kromosfæren** og **koronaen**, det synlige lyset går uhindret gjennom disse lagene. Alt under fotosfæren kalles for **solens indre**.

Bildet av solen over antyder at fotosfæren er mørkere ved randen, denne effekten kalles ”limb darkening”. Denne reduksjonen av lysverdiene i bildet fra sentrum til randen forklares ved temperaturøkningen innover i fotosfæren, vi ser lenger inn i fotosfæren i sentrum enn ved randen.

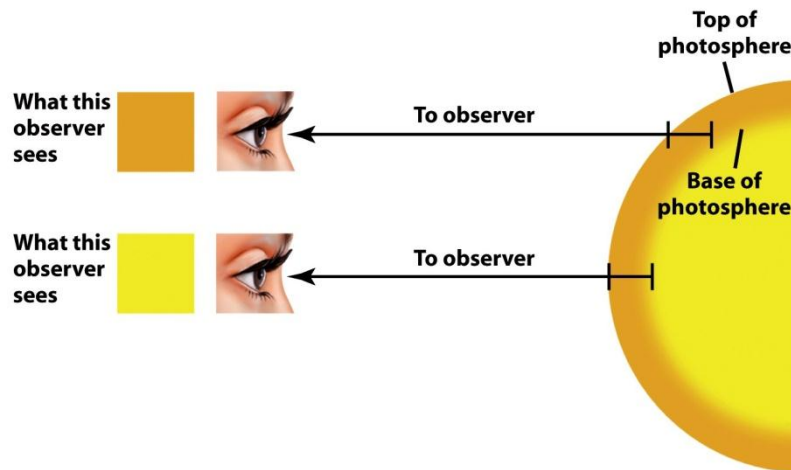


Figure 16-8  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

Den ytre delen av fotosfæren er ”kald”, ”bare” 4400K, det er i dette området **absorpsjonslinjene** dannes (Fraunhofer linjene).

**Observasjon av fotosfæren krever filter, å se på Solen i et teleskop uten filter kan føre til permanent blindhet.**

Fotosfæren observert gjennom et godt teleskop og under gode forhold viser en kornet struktur. Disse kornene har en utstrekning på 1000km og har fått navnet **granulasjon**. Granulasjonene er lyse i midten og mørke i kantene, her er temperaturen 300K lavere enn i sentrum. Granulasjoner er **konveksjon av gass i fotosfæren**. I det lyse område strømmer gassen opp og brer seg ut mot kanten av granulasjonen, her tar gassen turen ned i atmosfæren igjen. Dette ”lappeteppe” forandrer seg hele tiden, levetiden for en ”lapp” kan være fra fem til ti minutter

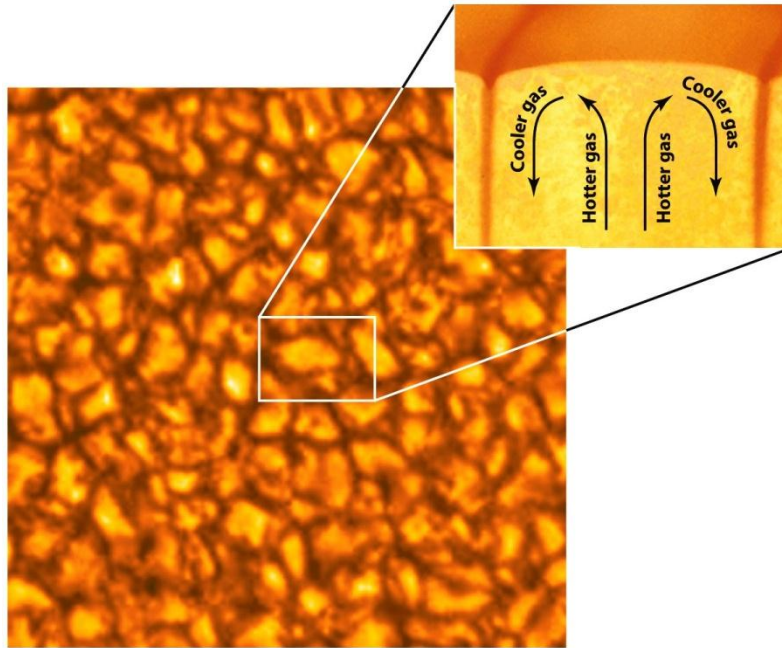
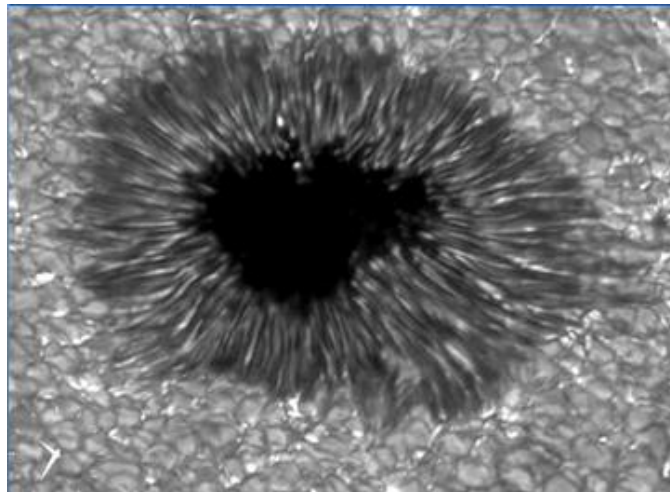


Figure 16-9  
*Universe, Eighth Edition*  
 © 2008 W. H. Freeman and Company

Tettheten i fotosfæren er bare 0,01 % av tettheten i Jordens atmosfære, på tross av denne lave tettheten er fotosfæren ugjennomsiktig, vi kan ikke se lenger ned enn 400km. **Det er det negative hydrogenionet som hinder lyset å skinne igjennom.** De negative hydrogenionene absorberer lysfotonene og frigjør dermed elektronene: Der er disse frie elektronene som gjør at Solen stråler som et ”sort legeme”.

### 1.7 Fotosfæren har flekker – solflekker - områder med lavere temperatur



Temperaturen i de sentrale områder (umbraen) av en solflekk er omtrent 4300 K. Overgangen mellom sentrum av solflekken og fotosfæren kalles penumbra, her er temperaturen ca. 5000 K. Denne temperaturforskjellen mellom umbra og penumbra fører til at flekkens sentrale deler sender ut 30 % mindre lys. Aktivitet 5: Kjør animasjonen 5: "Nærbilde av en solflekk"

Den britiske astronomen Robert Carrington oppdaget at solen ikke roterte som et stivt legeme, ekvatorområdene roterte raskere enn polområdene. Dette fenomenet kalles for **differensiell rotasjon**. Rotasjonstiden er 25 dager ved ekvator, 27,5 ved 30 grader, 33 dager ved 57 grader og 35 dager nær polene. (Aktivitet 2: Kjør animasjonen 2: "Ustabil magnetfelt og differensiert rotasjon")

Antall solflekker varierer fra år til år, og følger en periode på 11 år, vi har solflekk minimum i 2007 og et solflekkmaksimum i 2012. Det viser seg at flekkene begynner å vise seg ved 30 grader i starten av solflekkperioden. I 2007 vil solflekkene først vise seg ved rundt breddegraden 30 (syd og nord). Ved solflekkmaksimum vil de aller fleste flekkene oppstå ved ekvator. Antall solflekker plottet i et bredde-tid diagram ser ut som et **sommerfugl diagram**

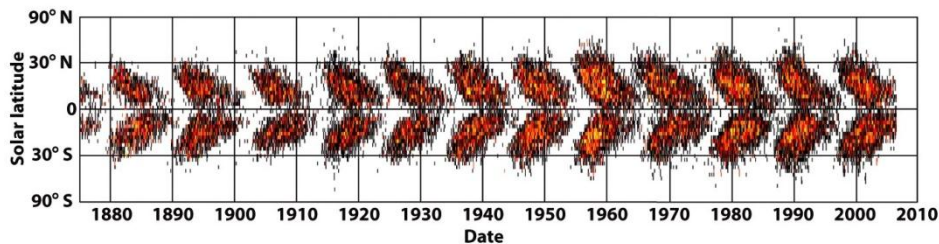
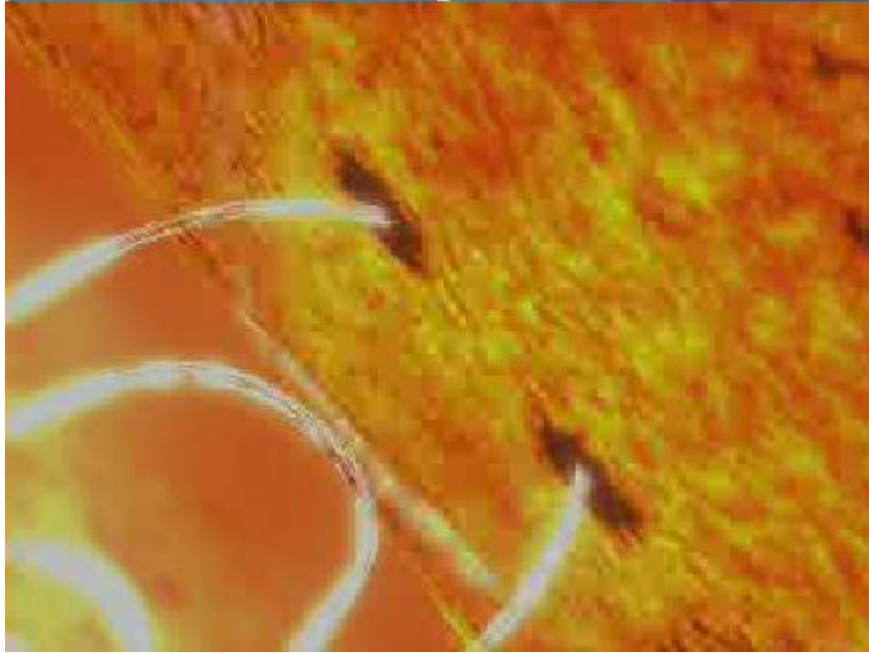


Figure 16-19  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W.H. Freeman and Company

Diagrammet viser 12 solflekkperioder

I 2001-2003 hadde vi et solmaksimum, Solen var i denne perioden svært eksplosiv og vi kunne observere stor nordlysaktivitet som følge av disse utbruddene på Sola. Etter denne enorme aktiviteten roet Solen seg som antatt, og alle begynte å vente på starten på en ny solsyklus. Denne starten er forsinket. I februar 2010 (to år før solflekkmaksimum) var aktiviteten (antall solflekker) lengre vekk fra Solen ekvator, det er unormalt. Utviklingen på Solen de aller nærmeste årene blir meget spennende. Går vi inn i en ny periode med lav solaktivitet? Tidligere har forskerne sett en sammenheng mellom en kjølig periode på Jorden og lav solaktivitet (1645-1715 og 1790-1830).

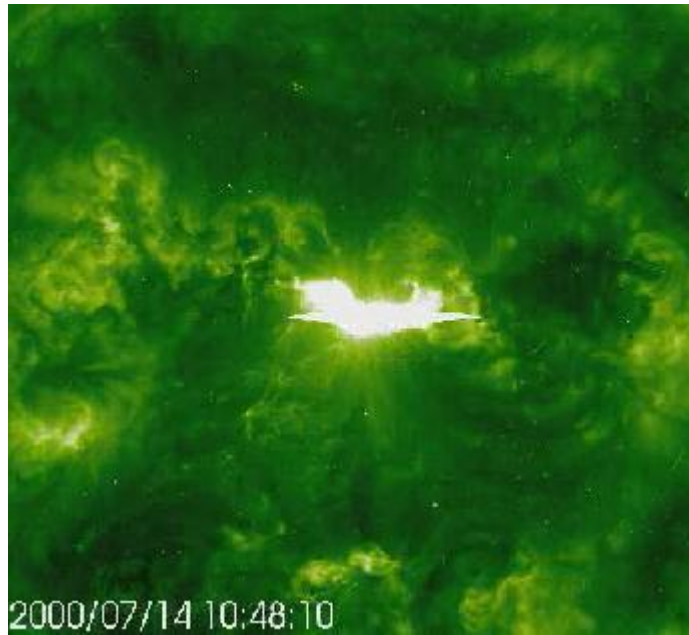
Hvordan oppstår solflekkene?



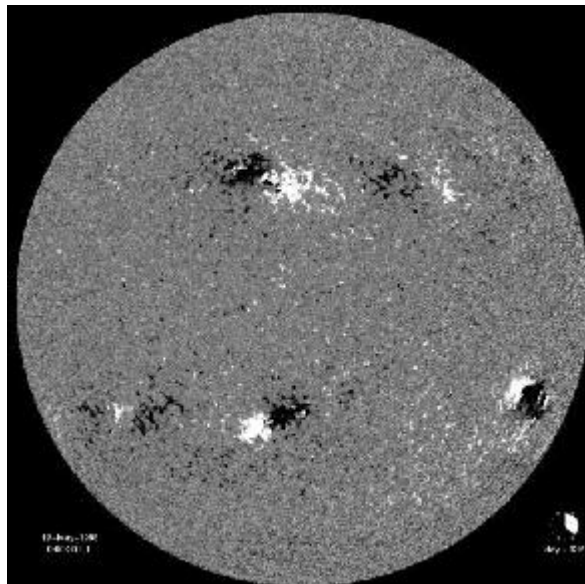
Det var den amerikanske astronomen George Ellery Hale som i 1908 oppdaget sterke magnetfelter i solfleckene. Det er dette magnetfeltet som danner områder med lavere temperatur enn fotosfærens gjennomsnittlige temperatur på 5800K.

Aktivitet 3: Kjør animasjonen 3: "Kraftige solflekkaktivitet ("flares")". Animasjonen viser hvordan kraftige utbrudd ("flares") i solflekker, de dannes når magnetfeltlinjene "kortsluttes". Animasjonen viser også hvordan solfleckene dannes når magnetfeltet skjærer gjennom fotosfæren.





Aktivitet 4: Kjør animasjonen 4: "Flare" er et intenst hvit lys nær solflekker  
Temperaturen kan ligge mellom 10 og 20 millioner grader i flare-glimtet, denne høye temperaturen fører til at alle jernatomet i gasskyen har mistet alle 26 elektroner. Røntgenstråling oppstår når elektroner "vender" tilbake til skallene i jernatomene. Dette bildet viser aktiviteten i Solens røntgenstråling.



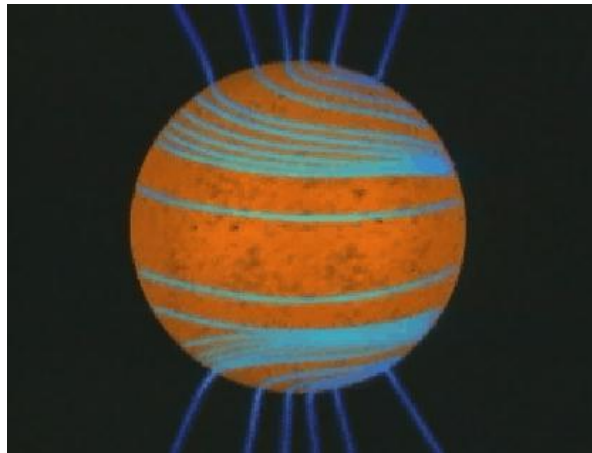
Der er mulig å kartlegge polariteten på solflekkgruppene. Astronomene benytter de såkalte Zeemanlinjene i solflekk-spekteret og lager bilder av magnetfeltets polaritet (magnetogram). Bildet over viser et magnetogram. En solfleck har to poler en nordpol (N) og en sydpol (S). En solfleck på den nordlige halvkule vil flekkes nordpol ligge foran under rotasjonen. Motsatt på den sydlige halvkule. Det lyse områdene viser altså flekkens nordpol, de mørke områdene viser flekkens sydpol. Syd for ekvator er polariteten, den "sorte flekken" beveger seg først.

Aktivitet 6: Kjør animasjonen 6: " Magnetogrammet viser at solfleckgruppene har ulik polaritet"

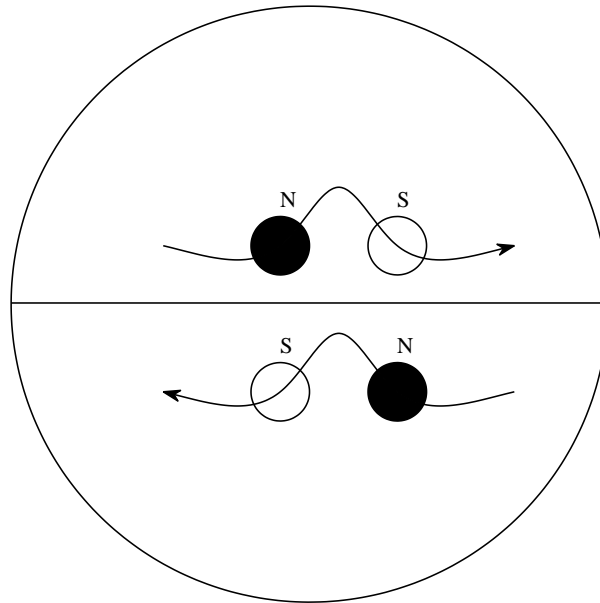
Nord og sydpolen på Solen skifter plass hvert 11 år, solens magnetfelt vil repetere seg selv hvert 22 år. Solens skiftet polaritet i januar 2001. Ved neste solfleck maksimum (2012) vil polariteten skifte igjen.

**Den magnetisk-dynamiske modellen** (Babcocks:1960) forklarer både sommerfugl diagrammet og solflekkens polaritet. Modellen baserer seg på differensiert rotasjon og konveksjonsforholdene i fotosfæren.

Aktivitet 2: Kjør animasjonen 2: "Ustabil magnetfelt og differensiert rotasjon". De to neste figurene forklarer flekkens polaritet på den nordlige og sydlige halvkule.

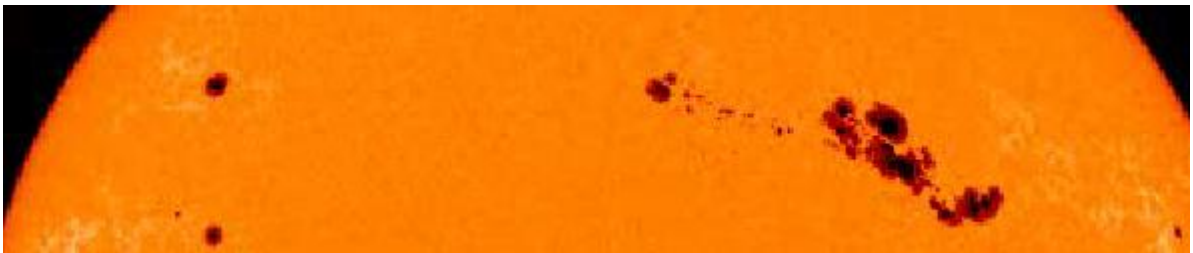


Den differensierte rotasjonen fører til at magnetfeltlinjene leger seg parallelt med Solens ekvator. På den nordlige halvkulen har linjene en retning fra øst mot vest (venstre mot høyre). På den sydlige halvkule fra vest mot øst (høyre mot venstre).



Flekkens nordpol (N) oppstår når magnetfeltet kommer fra solens indre og skjærer gjennom fotosfæren, flekkens sydpol oppstår når magnetfeltet går gjennom fotosfæren og tilbake til solens indre.

Hvor store er solflekkene?



Enheten for solflekkens størrelse er et areal som er lik en million ganger mindre enn Solens synlige overflate (Oppgave 9). En typisk flekk har størrelse fra 300 til 500 milliondeler. Jordens overflate er 163 milliondeler. Aktivitet 7: Kjør animasjonen 7: "Mål for solflekkens størrelse"

## 1.8 Kromosfæren blir synlig gjennom et H-alfa filter

Setter vi et H-alfa filter foran teleskopet blir kromosfæren synlig, det lyset som passerer filteret har en bølgelengde på 656,2nm. Hydrogen sender ut rødt lys når elektronet hopper fra bane 3 til bane 2. Se forelesningen om "Lysets natur"

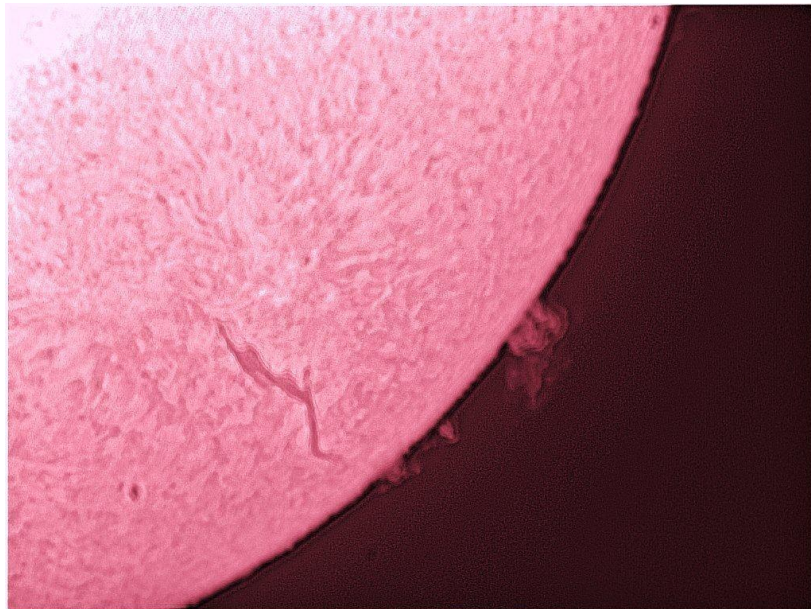
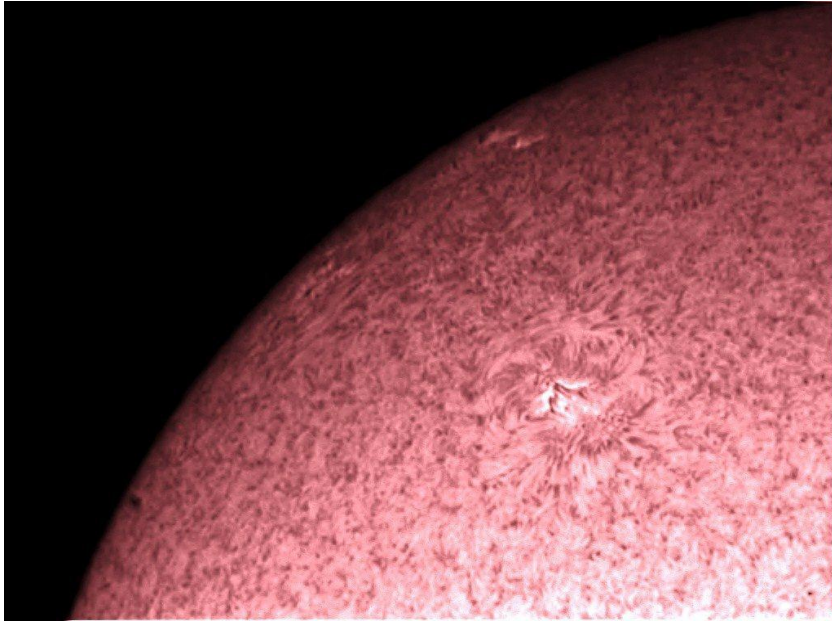


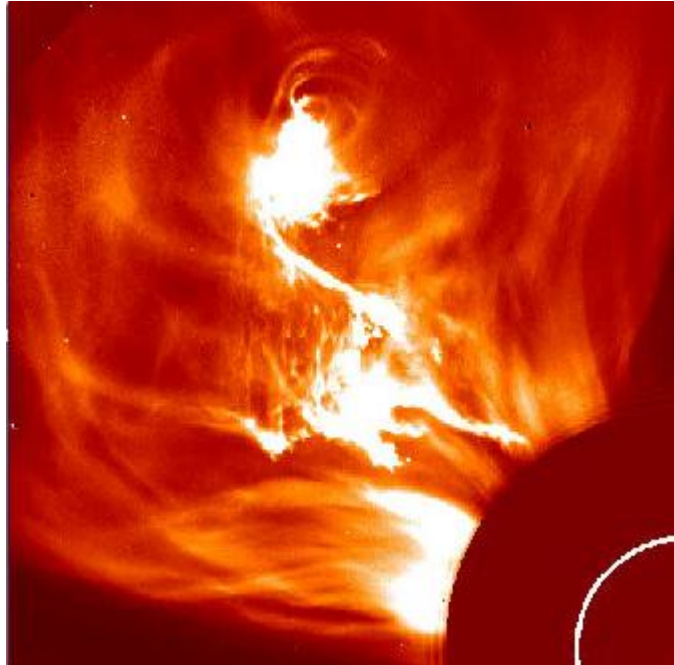
Foto: Trond Hermansen

Bildene er tatt med et videokamera i "primærfokus" (Image Source DMK 31) og Barlow linse (2x) mellom videokameraet og solteleskopet (Lunt 60/50) med Vixen GP ekvatorialmontering. H-alfa filteret har en båndbredde på 0,5nm. Vi ser Solens kromosfære (20000 km tykt) og solaktivitet på randen (protuberanser)

Lys fra ionisert helium ble oppdaget i kromosfærespekteret i 1868, 30 år før gassen ble produsert på Jorden. Spekteret av kromosfæren viser også at temperaturen øker med høyden. På toppen av fotosfæren er temperaturen 4400K og 2000km høyere er temperaturen økt til 25000K.

## 1.9 Koronaen

Solen ytre atmosfære kalles for **koronaen**. Den starter på toppen av kromosfæren og når flere millioner km ut i rommet. Koronaen lyser svakt, kan sammenliknes med lyset fra fullmånen.



Lyset fra koronaen kan kun bli synlig dersom lyset fra solens fotosfære blokkeres. Bilde over viser en kunstig solformørkelse om bord i SOHO

(Aktivitet 1: Kjør animasjonen 1: "SOHO i bane rundt Sola" og kjør Aktivitet 13: Kjør animasjonen 13: "Et SOHO bilde av koronaen i synlig lys" ), vi ser at koronaen strekker seg flere sol diameterer ut i rommet.

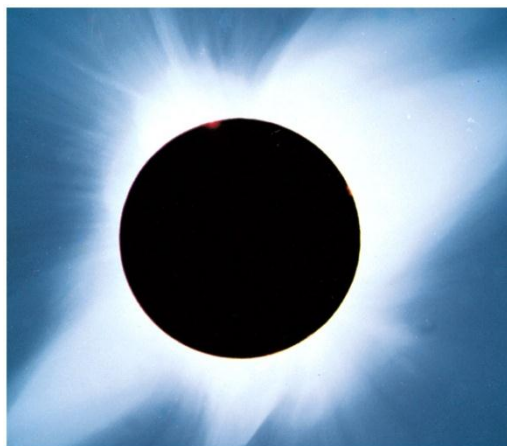
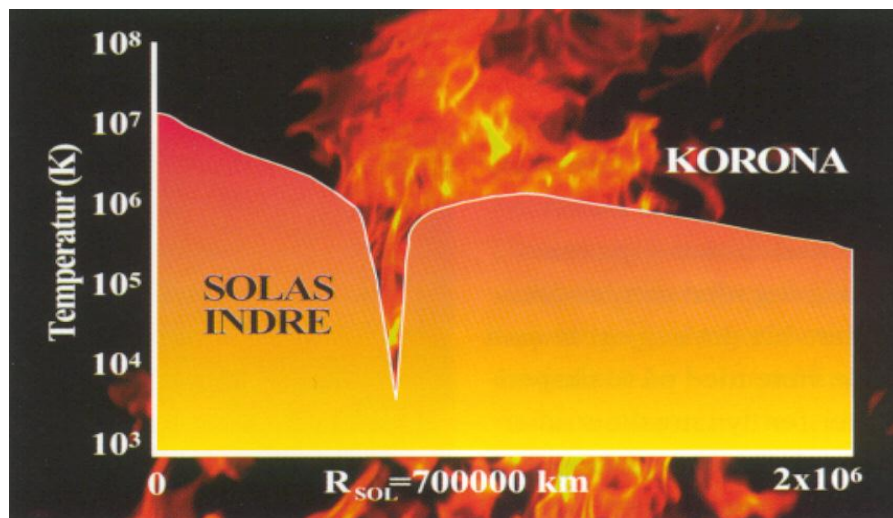


Figure 16-13  
Univers: Eighth Edition  
© 2008 W.H. Freeman and Company

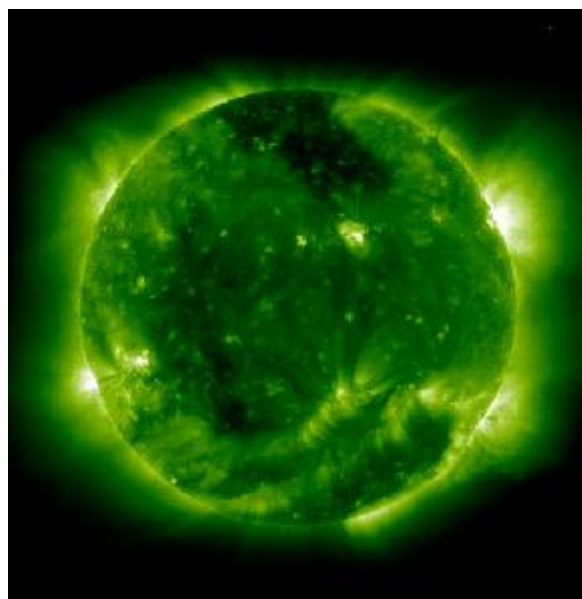
Bildet av koronaen ble tatt under solformørkelsen 11. juli 1991. Under en total solformørkelse vil koronaen synlig, vi ser gassen ”stråler” mange hundre millioner ut i verdensrommet.

Astronomene fant på tidlig 1900 tallet linjer som de aldri hadde sett i observatoriet. I 1930 fant de at den grønne linjen på 530,3nm kom fra jernatomene i koronaen, disse atomene var ioniserte, de hadde mistet 13 av sine 26 elektroner. Denne høye ionisasjonsgraden krever 2 millioner kelvin. Det betyr at temperaturen i koronaen stiger fra 25 000K til 2 000 000K.

Selv om temperaturen er veldig høy er ikke energien pr volumenhet særlig høy i koronaen. Det er koronaens lave tetthet som er årsaken, nesten vakuum. Det er denne lave tettheten som gjør at koronaen lyser så svakt selv om temperaturen er høy.

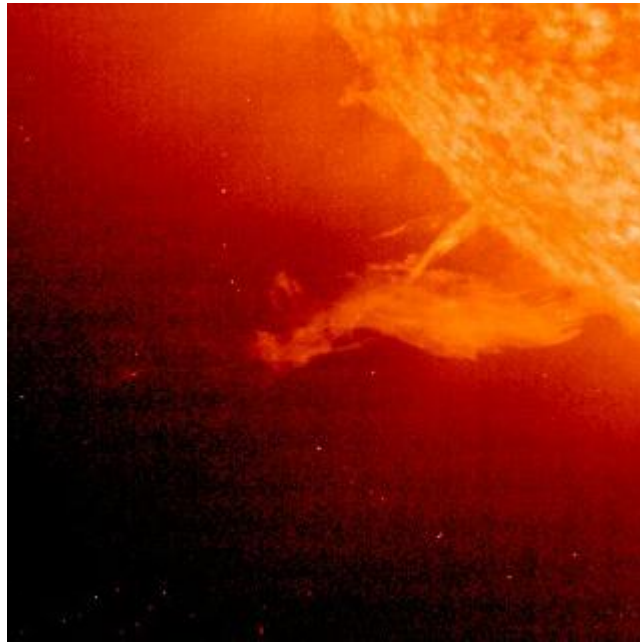


Bildet viser temperaturen varierer fra sentrum av Sola ut gjennom koronaen til 2 millioner km. Hvorfor temperaturen øker med økende høyde er et mysterium for astronomene, forklaringen på dette har astronomene ennå ikke funnet.



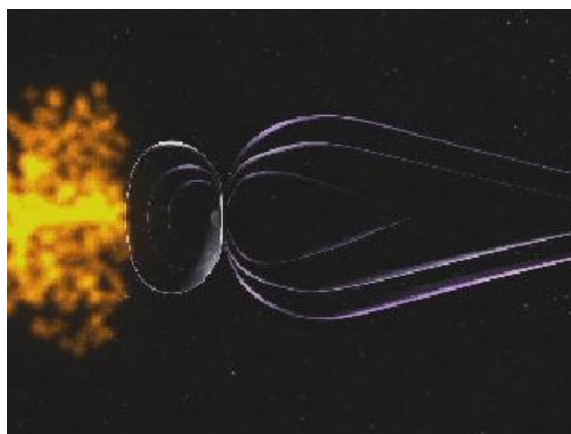
Aktivitet 8: Kjør animasjonen 8: "Et røntgenbilde av Solens korona".

SOHO astronomene har plassert et " FeXII-filter" foran teleskopet. Gjennom dette filteret passerer det elektromagnetisk stråling som har bølglengde 19,5 nm. Vi ser med andre ord røntgenstråling fra ionisert jern, jern som har mistet 12 elektroner på grunn av den høye temperaturen i koronaen. (1,5 millioner grader). De mørke områdene på bildet kalles for koronahull, her strømmer gassen bort fra solen med stor hastighet (solvind), magnetfeltet er åpent i dette området, gassen kommer seg vekk fra Sola i disse områdene (magnetfeltet går ikke i buer her)

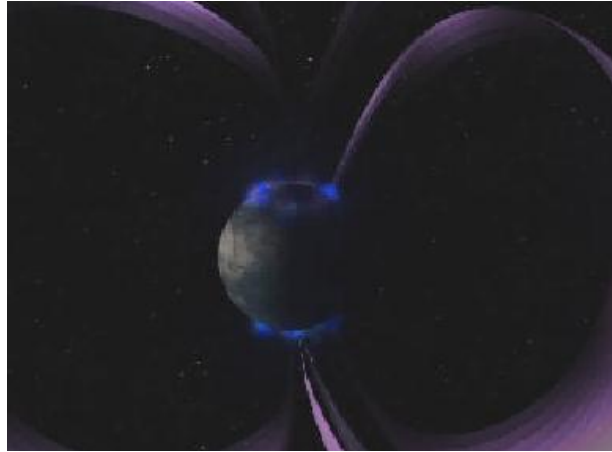


Aktivitet 12: Kjør animasjonen 12: "Protuberans i koronaen", bildet er tatt iUV lys.

## 1.10 Nordlys



Bildet viser Jordens magnetfelt som er i ferd med å fange opp solvinden



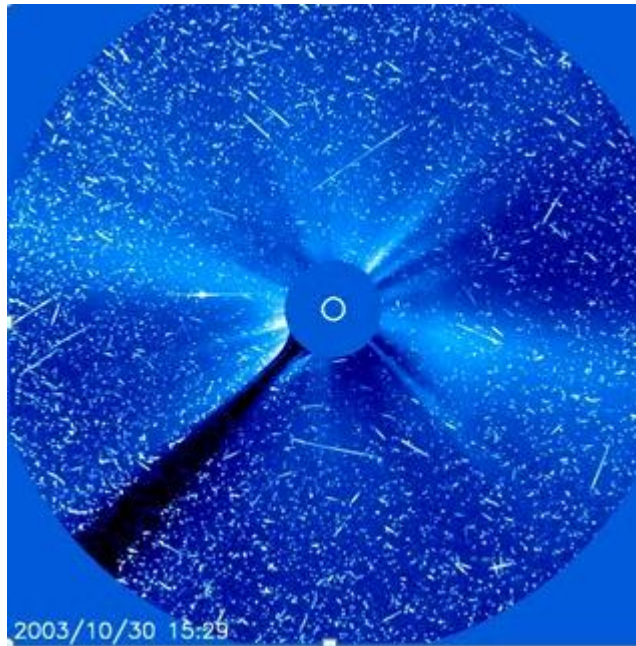
Jordens magnetfelt fører solvinden (protoner etc.) langs det jordmagnetiske feltet og inn i Jordens atmosfære. Protonene i solvinden "tenner" nitrogenet og oksygenet, dette lyset kaller vi for nordlys. Bildet viser også sydlys.

Aktivitet 9: Kjør animasjonen 9: "Nordlysanimasjon"



Bildet viser nordlyset, atmosfæren i brann





SOHO har tatt bilde av solvinden 30. oktober 2003, strekene på bildet er spor etter partiklene i solvinden. Aktivitet 10: Kjør animasjonen 10: "SOHO har tatt bilde av solvinden"

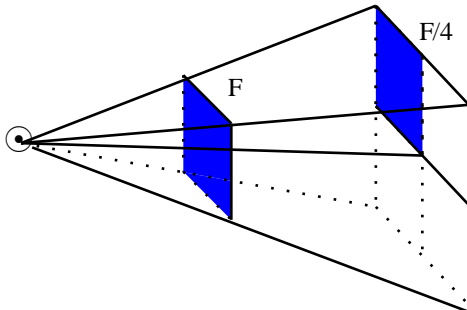


Solvinden endrer styrken og retningen på det jordmagnetiske feltet. En endring som kan ødelegge kraftforsyningen, som her i Canada, det skjedde i 1989 og 6 millioner var uten elektrisk kraft.

Aktivitet 11: Kjør animasjonen 11: 6 millioner uten elektrisk kraft i Canada (1989)

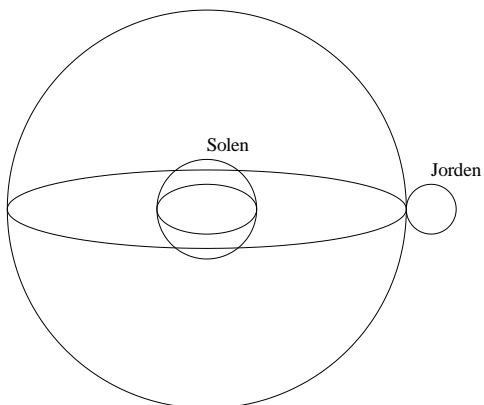
## 1.11 Aktiviteter

1. Studer avstandsregelen:



Avstandsregelen for elektromagnetisk stråling: ”Energifluksen reduseres med en fjerdedel når avstanden fordobles”

2. Anta at energifluksen på Solen overflate er kjent, hvordan skal vi finne energifluksen (solarkonstanten) når strålingen treffer Jorden?



Figuren viser to konsentriske kuler. Den innerste kule er Solens overflate, den ytterste kule har radien en astronomisk enhet. Luminositeten for Solen er den totale energien som pr sekund strømmer gjennom den ytterste kule.

## 1.12 Animasjoner

Disse animasjonene finner dere på fronter

- Aktivitet 1: Kjør animasjonen 1: "SOHO i bane rundt Sola"
- Aktivitet 2: Kjør animasjonen 2: "Ustabilt magnetfelt og differensiert rotasjon"
- Aktivitet 3: Kjør animasjonen 3: "Kraftige solflekkaktivitet ("flares")"
- Aktivitet 4: Kjør animasjonen 4: "Flare" er et intenst hvit lys nær solflekker
- Aktivitet 5: Kjør animasjonen 5: "Nærbilde av en solflekk"
- Aktivitet 6: Kjør animasjonen 6: "Magnetogrammet viser at solflekkgruppene har ulik polaritet"
- Aktivitet 7: Kjør animasjonen 7: "Et mål for solflekkenes størrelse"
- Aktivitet 8: Kjør animasjonen 8: "Et røntgenbilde av Solens korona"
- Aktivitet 9: Kjør animasjonen 9: "Nordlysanimasjon"
- Aktivitet 10: Kjør animasjonen 10: "SOHO har tatt bilde av solvinden"
- Aktivitet 11: Kjør animasjonen 11: 6 millioner uten elektrisk kraft i Canada (1989)
- Aktivitet 12: Kjør animasjonen 12: "Protuberans i koronaen"
- Aktivitet 13: Kjør animasjonen 13: "Et SOHO bilde av koronaen i synlig lys"

## 1.13 Oppgaver

### Oppgave 1 Kjemisk energi

Astronomene kan si at Solen består av  $10^{57}$  atomer, Det er Solens masse og den kjemiske sammensetningen som bestemmer dette tallet. Finn tiden det tar å bruke opp brennstoffet derom det frigis  $10^{-19}$  joule pr atom. Solens luminositet er  $3,9 \times 10^{26}$  W (8 tusen år). Se løsningen side 405 i Universe

### Oppgave 2 Energiproduksjonen på Sola

Finn frigitt energi når 4 hydrogenkjerner (protoner) går over til helium (26MeV)

### Oppgave 3 Energiproduksjonen på Sola.

Hvor mye energi blir frigitt når ett kg hydrogen går over til helium? ( $6.3 \times 10^{14}$  J)  
Hvor mye hydrogen går over til helium i løpet av ett sekund. Ta utgangspunkt i Solen luminositet (se Box 16.1)

### Oppgave 4

Temperaturen i de sentrale områder (umbraen) av en solflekk er omtrent 4300 K. Overgangen mellom sentrum av solflekken og fotosfæren kalles penumbra, her er temperaturen ca 5000 K. Vis at denne temperaturforskjellen mellom umbra og penumbra fører til at flekkens sentrale deler sender ut 30 % mindre lys. Tips: Benytt loven til Stefan Boltzmann

## Observasjonsoppgaver:

### Oppgave 1

Benytt metoden til Galileo og bestem solens rotasjonsperiode. Legg merke til at en typisk solflekkgruppe kan eksistere i over to måneder.

Oppgave 2  
Ta bilde av en solfleck

Oppgave 3

Observer kromosfæren