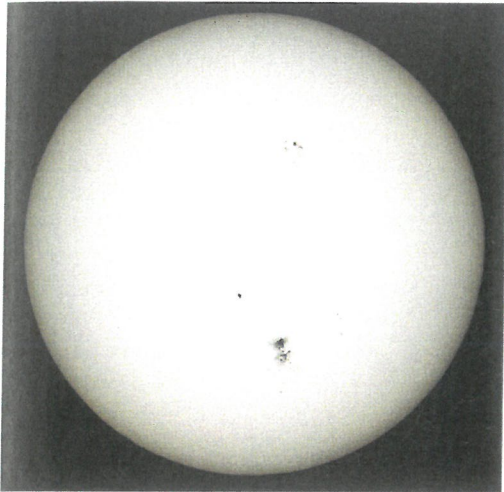
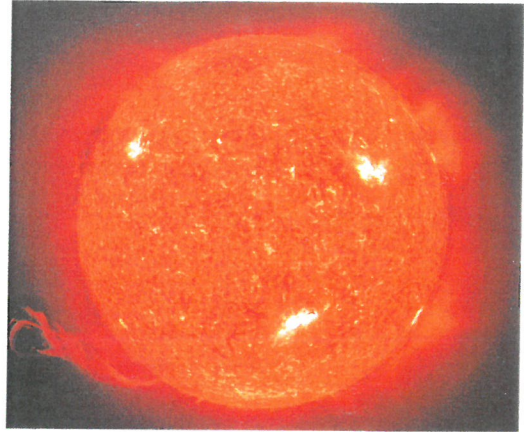


Kapitel 4 Solen



Solen med mørke solpletter og lyse fakkelområder.

Solprotuberans optaget fra satellitten SOHO.



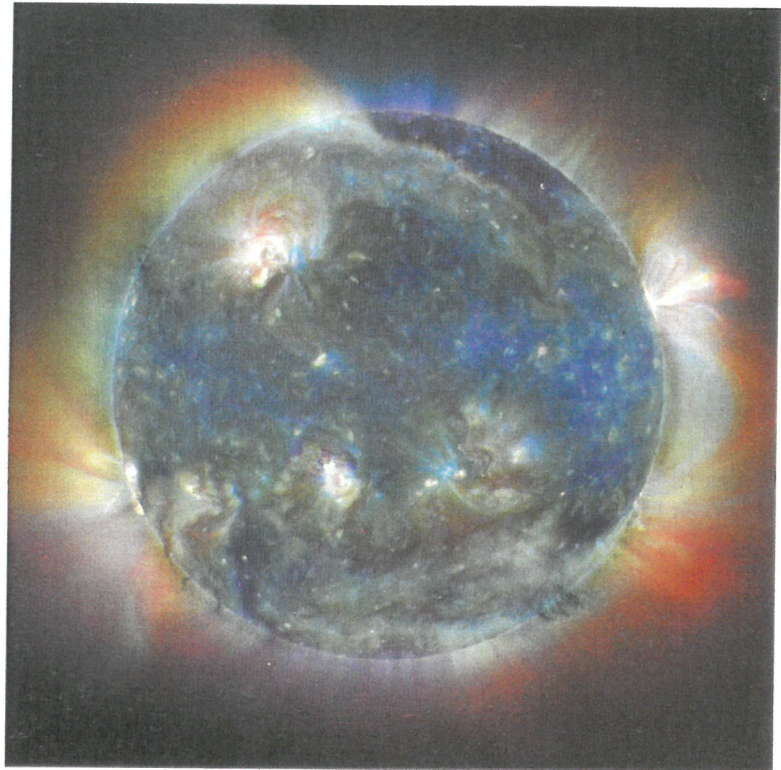
Den urolige Sol optaget i røntgenlys.

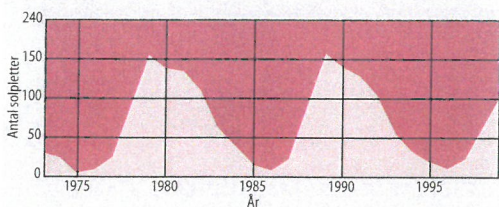
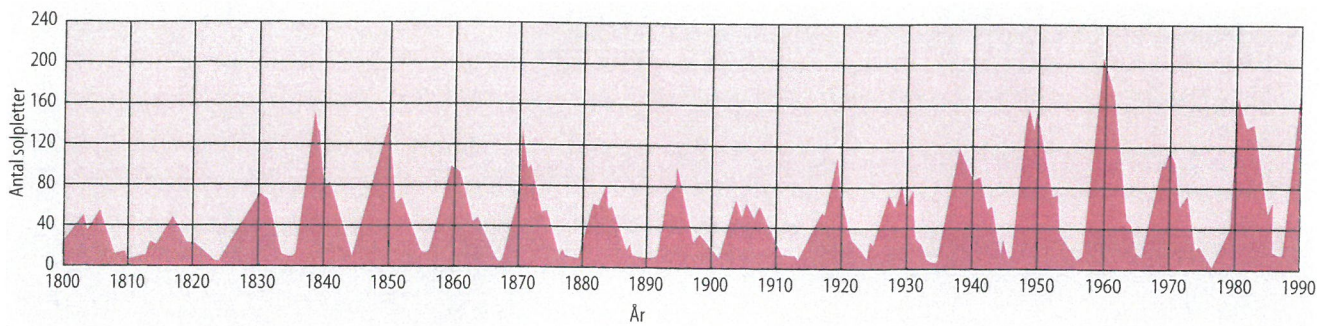
Solens lys er grundlag for alt liv her på Jorden. Uden den ville vi ganske enkelt ikke være her. Astronomisk set er Solen også enestående for os. Det er den nærmeste stjerne, vi kan udforske. Og uden en detaljeret forståelse af Solen, skal vi ikke nære alt for store håb om at forstå nattehimmels mange stjerner til bunds.

Ganske vist overgår detaljerigheden i vores viden om Solen da også langt den information, det er lykkedes at indsamle om andre stjerner, men det betyder på den anden side langt fra, at vi fuldt ud forstår alle aspekter af dens virkemåde.

Solpletter

I blot en lille kikkert (NB: Altid behørigt forsynet med et beskyttende filter – i modsat fald bliver man blind!) fremtræder Solens overflade som regel med en del mørke pletter, de såkaldte solpletter. Nøjagtig hvorfor og hvordan solpletterne opstår er stadig et emne, der forskes meget





De seneste 190 års solpletaktivitet.

De seneste to solpletcykler med maksimum i 1979-80 og 1989-90.

er der registreret solpletaktivitet. Og i alt fald siden begyndelsen af 1700-tallet er der konstateret klare maksima og minima med en periode på gennemsnitlig 11,1 år. Man siger derfor, at perioden for en solpletcyklus er ca. 11 år. Men der kendes dog tilfælde, hvor intervallerne har været så lange som 15 år og så korte som 8 år. I år med svag solpletaktivitet kan Solen i ugevis være helt fri for solpletter. I år med maksimum kan der derimod observeres mere end 100 enkelte pletter ad gangen.

i. Men der synes ikke at være tvivl om, at oprindelsen hænger sammen med forekomsten af stærke magnetfelter på og omkring det, der for os fremtræder som selve overfladen, Solens skarpe kant. Langs magnetfeltlinierne kastes en stor del af overfladens materiale ud i rummet i store buer, de såkaldte *protuberanser*. Temperaturen i disse områder er ca. 4.500 K, omtrent 1.500 grader lavere end de ca. 6.000 K, der råder på den omliggende del af Solens overflade. Netop kontrasten bevirker at områderne for os kommer til at fremtræde som mørke pletter. De 4.500 K er mere end overfladetemperaturen på mange af nattehimmels stjerner.

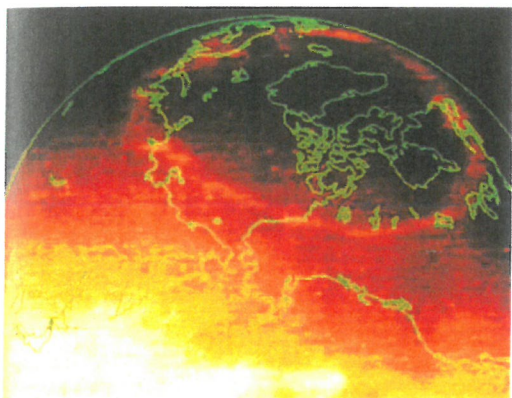
Størrelsen af solpletterne varierer en del. De mindste strækker sig over områder på ca. 1.000 km. Mange bliver større end Jordens knap 13.000 km store diameter, og enkelte kan blive helt op til 50.000 km. Men de enkelte solpletter varer ikke ved. Med tiden opløses de igen. Varigheden er typisk fra nogle få dage til få måneder. Men der er store variationer.

Særlig markant er langtidsvariationen i antallet af solpletter pr år. Helt tilbage fra begyndelsen af 1600-tallet (hvor kikkerten blev opfundet)

Nordlys over Sønderborg april 2000.



står en slags kortslutning, indtræffer en næsten eksplosionsagtig, voldsom forøgelse af solvinden i det, der betegnes som en *flare*. I løbet af typisk 10–15 min frigøres herved en energimængde svarende til detoneringen af 10 millioner af de kraftigste atombomber. Her på Jorden giver det sig udslag i en markant forøgelse af det område, hvori aurora-fænomenet kan opleves. På den nordlige halvkugle betegnes fænomenet som *nordlys*. Et helt tilsvarende fænomen opleves på den sydlige halvkugle.



Jorden set fra satellit, der viser ovalen, hvor nordlys på dette tidspunkt forekommer. Solens lys kommer ind fra venstre.

I et ovalt område med centrum i Jordens magnetiske poler indfanges de ladede partikler af Jordens magnetfelt og bevirker, at især ilt- og kvælstofatomerne i den højere del af Jordens atmosfære bringes til at lyse med karakteristiske, meget imponerende farver. I højder på ca. 100 km forekommer hovedsagelig blålige og rødlige farver, der stammer fra kvælstof-atomerne. De mere grønne farver stammer fra iltatomerne i højder mellem ca. 200 og 250 km, mens de klare, røde farver menes at stamme fra ilt-atomer i højder mellem ca. 300 og 400 km over jordoverfladen.

Normalt forekommer nordlyset geografisk set i et område, som her i Europa ikke strækker sig længere mod syd end til omtrent midt i Norge. Men netop når solvinden forøges – som i perioder med forøget solplet-aktivitet – kan ovalen udvides og derved få udløbere, der strækker sig helt ned på vore breddegrader. I perioden med

solplet-maksimum omkring 1990–91 blev der observeret nordlys flere steder i Tyskland. I Mellemamerika blev der endda i samme periode rapporteret om nordlys så langt sydpå som i Honduras og på øen Dominica i det Caribiske hav. I april 2000 kunne man se nordlys i selve København, og det blev endda iagttaget så langt sydpå som Sicilien.

Solens atmosfære

Den inderste del af Solens atmosfære – netop det, vi opfatter som Solens rand – går under betegnelsen *fotosfæren*. Den er ca. 500 km tyk. I bunden af den er temperaturen 5.800 K, og her opstår den kontinuerte del af Solens lys. Det svarer meget nøje til den varmestråling, som udsendes fra det, fysikerne betegner som et sort legeme med temperaturen 5.800 K. Det er den del af Solens lys, der bliver til alle spektrets farver, når det passerer gennem et prisme.

Hovedsagelig i de yderste ca. 100 km af fotosfæren dannes de såkaldte absorptionslinier i Solens spektrum. Det sker ved, at atomerne i det forholdsvis koldere gaslag (ca. 4.400 K) absorberer stråling ved helt bestemte bølgelængder, svarende til helt bestemte farver i spektret – farver, som derfor kommer til at mangle og i stedet fremstår som sorte linier i selve det kontinuerte spektrum fra fotosfæren.

Forholdene i *kromosfæren* – fra 0–1.500 km over fotosfæren – kan kun studeres under totale solformørkelsér. Kromosfæren fremtræder da med en meget karakteristisk rød farve, som stammer fra det, der kaldes Balmerlinien, H-alfa. Det er lysudsendelse – emission – fra brintatomer med en bølgelængde på 656,3 nm, en af kromosfærespektrets stærkeste linier.

Bemærkelsesværdig er også tilstedeværelsen af en karakteristisk emissionslinie stammende fra ioniseret helium. Faktisk blev denne linie observeret allerede i 1868 under en total solformørkelse. Det specielle ved den var, at der ikke fandtes noget modstykke til den i absorptionsspektret, hvad man ellers forventede. Bølgelængden af heliumlinien er 587,6 nm. Det er meget tæt på



to natriumlinier, men i laboratorieforsøg var det umuligt at frembringe denne linie med natrium. Og endnu mere bemærkelsesværdigt: heller ikke med noget andet grundstof lykkedes det.

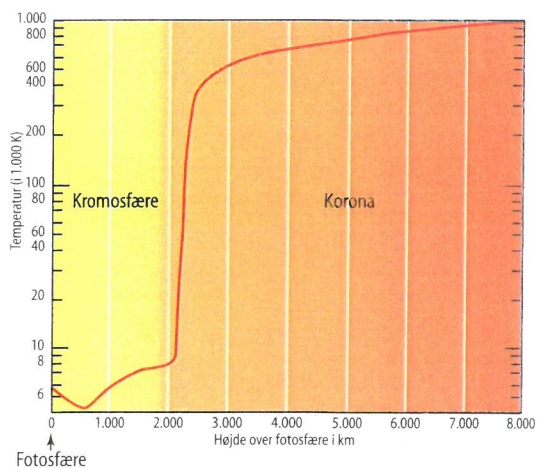
Den umiddelbare konklusion var derfor, at der måtte være tale om et grundstof, som kun fandtes i Solen. Og netop derfor fik grundstoffet tildelt navnet helium, efter det græske ord *helios* for Solen. Senere viste det sig dog at være en gal konklusion. Den skotske kemiker William Ramsay (1852-1916) havde i 1895 held til at isolere helium fra et uran-holdigt mineral. Men den omstændighed, at linien kun findes i spektret fra kromosfæren og ikke i Solens normale absorptionsspektrum, var et første tegn på, at forholdene i Solens atmosfære ikke var helt, som man umiddelbart skulle tro. Den nødvendige temperatur til at skabe emissionen fra helium er nemlig en del højere end fotosfærens temperatur. Stik mod den umiddelbare og intuitive opfattelse af, at temperaturen burde aftage hele vejen ud gennem Solens atmosfære.

Allerede i 1869 havde amerikaneren Charles Young (1834-1908) – også under en total solformørkelse – undersøgt linierne i spektret fra den

Gennemsnitstemperaturens variation med højden i Solens atmosfære. Nulpunktet i højde svarer til den synlige fotosfære. De første ca. 500 km falder temperaturen til ca. 4.400 K. Det er her absorptionslinierne dannes. Herefter begynder temperaturen at stige ud gennem kromosfæren. I ca. 2.000 km's højde nås ca. 8.500 K. Så kan brinten ikke længere udstråle den spredte varme, og temperaturen stiger voldsomt i en meget tynd overgangszone mellem kromosfæren og koronaen. På blot få hundrede km nås 500.000 K. Derpå stiger temperaturen mindre voldsomt til 1 mio. K i ca. 11.000 km's højde, og stigningen fortsætter, indtil et maksimum på ca. 2 mio. K, der nås i adskillige tusind km's højde.

mere udstrakte *korona* uden for kromosfæren. Én for én kunne linierne fra fotosfæren og kromosfæren identificeres med linier fra grundstoffer fundet på Jorden. Men linierne fra koronaens spektrum passede overhovedet ikke med nogen af linierne fra laboratorieforsøgene! Specielt en karakteristisk, stærk, grøn linie ved 530,3 nm kunne ikke tilskrives noget kendt, jordisk grundstof. Ingen bedre idé end at tilskrive linierne til et særligt, hypotetisk grundstof, coronium, kom på nogens tanker førend i 1940. Grunden var den samme som med helium-problematikken. Ingen var rigtig villig til at acceptere en stigende temperatur ud gennem Solens atmosfære.

Men som tiden gik, og den nye videnskab, atomfysikken, kom på fode, viste det sig, at der ikke rigtig var plads til noget nyt grundstof i det periodiske system. Coronium måtte være en eller anden speciel form af et kendt og almindeligt grundstof. Det var den svenske fysiker, Bengt Edlén, der i 1940 løste gåden ved at vise, at 13 gange ioniseret jern udsendte nøjagtigt den stærke, grønne linie ved 530,3 nm. I mellemtiden havde der vist sig endnu flere uforklarlige linier i koronaens spektrum. Flere af dem kunne også tilskrives linier fra andre højt ioniserede, kendte grundstoffer som for eksempel calcium og nikkel. Der er med andre ord ingen vej uden om. Vi må acceptere, at koronaens temperatur er ekstremt høj.

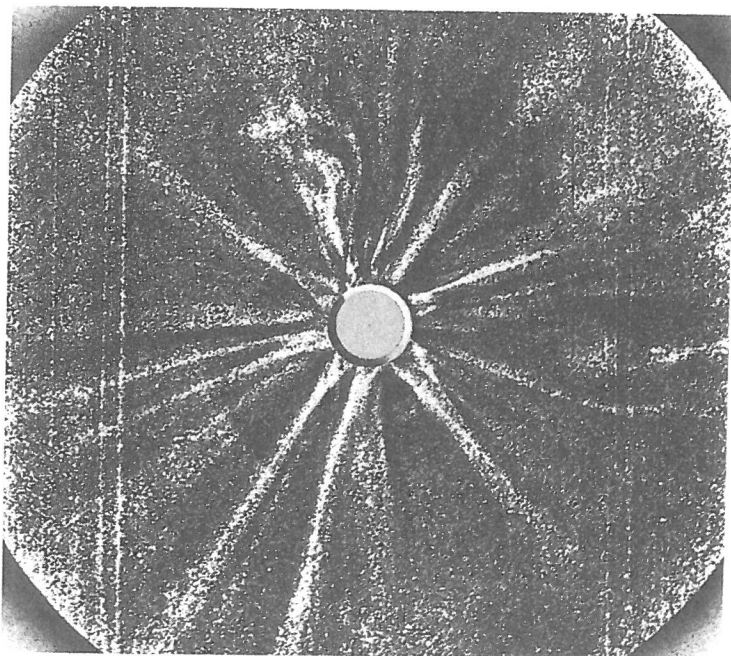


I korthed kan forholdene i Solens atmosfære i dag skitseres på følgende måde. Gennem de første ca. 500 km – fotosfæren – falder temperaturen fra ca. 5.800 K til ca. 4.400 K, hvorefter temperaturen ud gennem kromosfæren igen begynder at stige. I ca. 2.000 km's højde nås ca. 8.500 K, og på blot få hundrede km stiger temperaturen derpå drastisk til ca. 500.000 K, hvorefter en mindre drastisk temperaturstigning finder sted ud gennem selve koronaen indtil et maksimum på ca. 2 millioner K nås i adskillige tusinde km's højde.

Energioverførsel

Forklaringen på stigningen i temperaturen kan ikke være stråling fra selve Solen. Det ville svare til at hævde, at personen foran den tændte pejs varmer pejsen op, og ikke omvendt. To muligheder har været foreslået: den ene er chokbølger fra den turbulente bevægelse i fotosfæren, den såkaldte granulation, og den anden er energi-overførsel via magnetfelter – eksempelvis som dem, der skaber solpletterne.

Jet-strømme i Solens korona observeret under en total solformørkelse i 1980 fra et højtgående, amerikansk overlydsfly. Kun under en total solformørkelse er baggrunden mørk nok til, at den meget svage ydre del af koronaen kan detekteres. Jet-strømmene her strækker sig ud til mere end 12 gange Solens radius. Skiven i midten dækker over ca. 4 solradier.



To slags observationer fra solsatellitter sidst i 1970'erne og i begyndelsen af 1980'erne ser ud til at tale imod chokbølgeteorien. I et ellers omhyggeligt forsøg på direkte at detektere chokbølger på bunden af Solens varme korona fandt man nemlig ikke chokbølger hverken i tilstrækkeligt antal eller i tilstrækkelig styrke. Konklusionen heraf er, at den energi, der ganske givet følger med granulationen som en slags bevægelsesenergi, sandsynligvis i stedet afgives allerede i den dybereliggende kromosfære.

At det i stedet kan være energioverførsel ved hjælp af magnetfelter, som er ansvarlig for temperaturens stigning, blev understøttet fra en helt anden side. Nogle af de mindste stjerner, der betegnes som K og M dværgstjerner, har nemlig så lave hastigheder i deres ydre konvektionszoner, at der ikke ved granulationen opstår chokbølger, som er stærke nok til forårsage en varm korona. Til gengæld viste observationerne, at nogle af disse stjerner har stærke magnetfelter, blandt andet ud fra forekomsten af kæmpemæssige stjernepletter – helt analogt til solpletterne.

Under forudsætning af, at der kun kan være tale om disse to mekanismer, så er det i princip muligt at afgøre, hvilken af de to, der i virkeligheden er den ansvarlige. Hvis disse stjerner rent faktisk har koronaer, kan det jo ikke skyldes chokbølger.

Allerede i begyndelsen af 1980'erne gav Røntgen-satellitten, *Einstein Observatorium*, et foreløbigt svar: Flere af K og M dværgene viste sig at have endog meget stærke koronaer!

På den baggrund ser det derfor ud til, at magnetfelter ikke blot leverer den nødvendige energi til at opvarme Solens korona. Det kunne også godt se ud til, at det er dem, der former dens struktur. Magnetfelter kan indeholde energi, som enhver, der har leget med et par hesteskomagneter, ved. Og energien kan nemt afgives igen enten som bevægelsesenergi, (som to magneter, der tiltrækker hinanden, når man giver slip på dem) eller som elektriske strømme.

Den detaljerede udredning af, hvordan overførslen af magnetisk energi til varmeenergi i Solens korona helt nøjagtigt foregår, er stadig et

emne for aktiv forskning. I generelle vendinger involverer det formentlig svingninger af magnetfeltlinierne dybt i Solens indre, som så igen forårsager, at strømme flyder op i den overliggende korona. En fyldestgørende forståelse af processen kræver både kompliceret teoretisk plasmafysik og langt mere fuldstændige observationer, end man for tiden råder over. I særdeleshed er det nødvendigt at kortlægge selve strukturen af de karakteristiske loops i koronaen – og ikke mindst selve svingningen af magnetfeltlinierne.

Solens indre

Tankevækkende nok er det faktisk ikke mere end godt 60 år siden, det for første gang lykkedes at give en holdbar videnskabelig beskrivelse af Solens struktur. Først med Einsteins påvisning af, at stof kan omdannes til energi, blev det muligt at forstå den mekanisme, der sætter Solen i stand til – gennem milliarder af år – at producere de enorme mængder af energi, som den til stadighed leverer.

I dag regner vi med, at temperaturen i Solens centrum er ca. 15 millioner K. Det betyder, at der for hvert sekund, der går, sammensmeltes – fusioneres – ca. 600 millioner tons brintkerner til heliumkerner. Solfysikerne regner med, at hovedparten af Solens energi frigøres i en kæde af kernereaktioner – den såkaldte proton-proton cyklus, der som nettoresultat omdanner fire brintkerner (protoner) til en heliumkerne. En mindre del af energien frigøres ved en anden kæde af kernereaktioner – den såkaldte CNO-cyklus (se boks side 53). Den blev oprindeligt foreslået sidst i 1930'erne af den tysk-amerikanske fysiker, Hans Bethe. En bedrift, der indbragte ham Nobelprisen i 1967.

Teorien om Solens indre struktur beror først og fremmest på antagelsen om, at Solen befinder sig i ligevægt. De gasmasser, der udgør Solen, holdes sammen af den indbyrdes tyngdepåvirkning mellem gassens bestanddele. Og gasmasserne forhindres på den anden side i at falde helt sammen, netop fordi der til stadighed produce-

res energi fra kerneprocesserne i den centrale del af Solen. De to effekter: sammentrækning ved tyngdepåvirkning og udvidelse på grund af energifrigørelsen fra kerneprocesserne i centrum holder hinanden fuldstændig i balance.

Men det skal understreges, at informationer om Solens indre ikke kan opnås ved direkte observationer. Energien, der produceres ved fusionsprocesserne, optræder i form af det, der betegnes som fotoner eller lyspartikler. På deres vej ud gennem Solen støder de hele tiden sammen med de atomer, de møder på vejen. Sammenstødene er helt tilfældige, men overordentlig hyppige. Fotonerne bliver ustandselig slået ud af kurs. Og derfor mister de detaljeret information om de betingelser, hvorunder de blev skabt.

Langsomt er der dog tale om, at fotonerne foretager en slags diffusion med retning ud mod den forholdsvis kølige overflade – ca. 700.000 km længere ude – hvorfra de så endelig undslipper som sollys. I gennemsnit regner man med, at det varer rundt regnet 1 million år, fra fotonerne skabes i Solens centrum, til de langt om længe når overfladen. Det svarer til, at de effektivt nærmer sig overfladen med lidt under 2 meter om dagen, til trods for at de hele tiden bevæger sig med den formidable hastighed af 300.000 km i sekundet.

Neutrinoerne

Samtidig med kerneprocessernes frigørelse af energi i form af fotoner, produceres der også et væld af de elementarpartikler, der kaldes neutrinoer. De er af en helt anden natur end fotonerne. Neutrinoerne passerer stort set uhindret gennem alt stof. Med fysikernes betegnelser hedder det, at neutrinoer har en meget ringe grad af sandsynlighed for at vekselvirke med noget som helst stof. Desværre betyder det jo så også, at de er tilsvarende vanskelige at opfange i detektorer her på Jorden.

Forsøg på at detektere neutrinoer fra Solen har faktisk stået på i mere end 30 år. Ud fra de modeller af Solens struktur, som det er muligt at opstille og beregne ved hjælp af computere, får