

Zonnewetika

In het begin was er het licht

Het licht was de eerste verschijsningsvorm in het Niets van het heelal, vele miljarden jaren geleden. Licht is het resultaat van een fusie van waterstof-atomen tot heliumatomen.

Door de vorming van lichtdragers zou het met gas gevulde heelal zich voortdurend in alle richtingen hebben uitgezet. Om een indruk te krijgen van de afmetingen van het universum, wijzen wij erop, dat de, tot op heden verst verwijderde nevelvlek, Ursa Major II $2 \cdot 10^8$ lichtjaren van ons verwijderd is. (Een lichtjaar is de afstand die het licht, dat zich met een constante snelheid van 300 000 km/s voortplant, in een jaar aflegt, namelijk 9463 000 000 000 (negen biljoen vierhonderd drie en zestig miljard) kilometer!)

Dat is dus de "stralings-kosmos", waarbij de overige in het heelal aanwezige materie te verwaarlozen is.

Een andere hypothese is dat zich, in een onvoorstelbaar lang verleden, alle materie op een plaats in het heelal zou hebben bevonden, een kolossale concentratie van massa, zoals men die tegenwoordig nergens meer kan aantreffen.

Explosies van reusachtige omvang zouden het heelal als het ware uit elkaar hebben gedreven. In de Kosmos zelf vormden zich daarbij sterren, conglomeraten van sterren, melkwegstelsels en supermelkwegstelsels. De zon heeft sindsdien haar chemische samenstelling als waterstofbol niet gewijzigd.

De theorie van het oorspronkelijke samenballen der materie op een punt in het heelal, wordt bijvoorbeeld daardoor ondersteund, dat zelfs heden nog volkomen lege ruimten in het universum voorkomen, waarin blijkbaar geen oermaterie terecht is gekomen.

De beweging van de materie wordt door de, door Newton ontdekte, aantrekkingskracht tussen massa's (het "gravitatieveld") bepaald. Oorspronkelijk bevond zich de materie in de eenvoudigst denkbare toestand. Voorbeelden hiervan zijn de volkomen structuurloze gasniveaus. In de laatste tijd uitgevoerde metingen hebben bewezen, dat hetgeen binnen

een ver verwijderd melkwegstelsel voor "sterren" werd gehouden, in werkelijkheid alleen maar wolken gloeiend waterstofgas zijn.

Kunstmatige lichtboog in het laboratorium

Hoe staat het echter met het licht dat het waterstofgas kan afgeven? De proeven van P. Wildt en E. Vitense hebben opheldering gegeven over een continu zonnenspectrum. Door daarop aansluitende proeven met een zuurstoflichtboog kon worden aangetoond dat het voortbestaan van de zon in stand wordt gehouden door negatieve waterstofionen, d.w.z. door het samenspel tussen neutrale waterstofatomen en vrije elektronen die zich gedurende korte tijd adderen, resp. elkaar op zeer kleine afstand voorbijvliegen.

Het bleef prof. Walter Lichte-Holtgreven en W. Nissen te Kiel voorbehouden in het jaar 1952, tijdens proeven met een boogontlading in waterstof, lichtbogen van twee en meer centimeter lengte, bij 0,3-1 atm (335-1013 mbar) en 600 V, te laten ontstaan. Deze experimentele waterstoflichtboogemissies zijn een authentiek hulpmiddel bij de beschrijving van zonlichtstraling.

De structuur van de zon

In de sterrenwereld is het een kwestie van een voortdurend "sterven en geboren worden". Elk jaar verdwijnen er sterren door explosie, zelfvernietiging of door het totale verlies van de waterstofmassa.

Hoe meer waterstof de sterren verbruiken, des te meer neemt de dichtheid toe, terwijl de lichtsterkte daarentegen vermindert. Zoals alle sterren eens miljarden jaren geleden ontstonden (waarvan er vele ook weer zijn verdwenen) is ook de zon eens "geboren".

Over de structuur van de zon heeft men zich soms zeer vreemde voorstellingen gemaakt. In de Oudheid heeft Ptolemeus de zon eenvoudig een vuurbal genoemd. De tegenwoordige voorstelling van de zon is, dat deze in hoofdzaak een gasbal is, die in de buitenste lagen ongeveer 65% waterstof, 23% helium en resten van andere gloeiende gassen bevat.

Een feit is echter dat er ook sterren bestaan die veel op onze zon lijken, maar die veel groter zijn en een nog grotere lichtsterkte bezitten. Hiertoe behoort Sirius, die "slechts" een half miljoen maal verder van de aarde verwijderd is dan de zon. Tengevolge van de kolossale afstand maakt Sirius op ons de indruk van een heldere ster; de lichtsterkte van de zon is, daarbij vergeleken, 13 miljoen maal sterker.

Pas toen de spectrograaf zijn intrede deed en mannen als Von Fraunhofer, Bunsen en Kirchhoff naar voren traden, bleken de vroegere, vage theorieën niet meer juist te zijn.

De eerste theorie over de structuur van de zon die als wetenschappelijk werd erkend, is afkomstig van de Duitse natuurkundige Gustav Kirchhoff (1824-1887). Deze theorie is gebaseerd op het principe van de "spectraalanalyse"*. Joseph von Fraunhofer (1787-1826) stelde in het jaar 1814 *donkere lijnen* in het zonnenspectrum vast. Veertig jaar later ontdekte Kirchhoff de betekenis daarvan en met behulp van de spectraalanalyse stelde hij de aanwezigheid van metalen op andere hemellichamen vast. Hij toonde op de zon natrium, ijzer, calcium, magnesium, nikkel, barium, koper en zink aan. Evenzo werden chemische verbindingen op de zon aangetoond, die men op aarde niet aantreft, o.a. CN (koolstof-stikstof), FeO (ijzer-zuurstof), NH (stikstof-waterstof), CaH (calcium-waterstof), MgH (magnesium-waterstof), SiH (silicium-waterstof), TiO (een verbinding van titanium en zuurstof).

Door middel van de spectraalanalyse werd ook aangetoond dat op de oppervlakte van de zon de verhouding waterstof:zuurstof 20:1 is.

Thermonucleaire processen in het binnenste van de zon.

Dat straling, lichtsterkte en warmteontwikkeling van de zon, sedert vele eeuwen, vrijwel gelijk zijn gebleven, zonder dat de zon "uitbrandt", rechtvaardigt de vraag welk mechanisme de zon in staat heeft gesteld, gedurende zo'n lange tijd de enorme warmte-energie uit te stralen en welke regelmechanismen eventueel deze prestatie op hetzelfde niveau houden.

Reeds in 1939 heeft de Duitse geleerde Hans Bethe op overtuigende wijze aangetoond dat de zon zelf een reusachtige thermonucleaire reactor is:

Tijdens een thermonucleair proces wordt voortdurend energie door middel van fusie van 4 waterstofatomen (atoomgewicht 1) tot helium (atoomgewicht 4) afgegeven. Volgens dit principe is ook een waterstofbom ontwikkeld.

De waterstofbom moet door een atombom tot explosie worden gebracht, want pas de grote hitte, die bij de explosie van een atombom (met uranium als uitgangsmateriaal) ontstaat, kan de fusie van waterstofatomen bewerkstelligen.

Het vreedzame gebruik en het onder controle houden van thermonucleaire reacties willen wij niet alleen tot de atoomenergie beperken. Wij moeten er ook achter zien te komen hoe de thermonucleaire processen in de zon te bepalen zijn, hoe deze "gecontroleerd" en eventueel geëxploiteerd zouden kunnen worden.

Eigenlijk is het niet helemaal juist wanneer we over waterstofatomen spreken, die fuseren teneinde helium in de zon te vormen. Bij de buitengewoon

* Isaac Newton (1643-1727) ontdekte dat een witte lichtstraal die door een prisma wordt geleid in diverse kleuren wordt ontleed en dat men, onder bepaalde omstandigheden, de kleu-

ren van de regenboog als het zgn. zonnenspectrum kan zien.

hoge temperaturen, waarbij die fusie in het binnenste van de zon plaatsvindt (16 miljoen graden Kelvin), geven volgens prof. George Gamow, die de theorie betreffende nucleaire omzettingen in de zon heeft opgesteld, de enorme drukken de doorslag. De snelheid en de frequentie van deze "thermische botsing" maken thermonucleaire reacties veel en veel effectiever dan de gebruikelijke "bombardements"-methode in natuurkundige laboratoria.

De vrijkomende energie bij de vorming van helium uit 1 kg atomaire waterstof bedraagt $190 \cdot 10^6$ kW.h. Bij het splijten van 1 kg uranium²³⁵ zijn het daarentegen minder dan $19 \cdot 10^6$ kW h (1 kW.h komt overeen met 3,6 MJ).

Ter vergelijking kan de volgende berekening dienen:

De hoeveelheid energie, die bij het splijten van alle atoomkernen in een kilogram uranium²³⁵ vrijkomt, komt overeen met de warmte-energie die door het verbranden van 2500 ton steenkool wordt verkregen, terwijl bij de vorming van een kilogram helium uit waterstof dezelfde hoeveelheid energie vrijkomt als bij het verbranden van 27 000 ton steenkool wordt verkregen. (Daarin bestaat een analogie met de in vergelijking met atombommen zeer veel grotere vernietigingskracht van de waterstofbom).

Gaat men uit van het feit dat bij hoge temperaturen de atomen ioniseren dan betekent dit dat het inwendige van de zon als een warrelende hoeveelheid vrije elektronen en atomen zou moeten worden beschouwd. De ionisatiegraad van de atomen en de snelheid, waarbij de botsing plaatsvindt, nemen naar het midden van de zon gaande toe.

De thermonucleaire reactie werd in het jaar 1938 door Hans Bethe en Carl von Weizsäcker als een "gesloten ketting", of een cyclisch proces beschreven, niet als een opeenvolging van nucleaire omzettingen. In deze cyclus worden ook de kernen van koolstof en stikstof betrokken, die voortdurend geregenereerd worden, d.w.z. van stabiele in onstabiele isotopen veranderen. Tenslotte dienen zij alleen als katalysatoren in het hoofdproces van de omzetting van waterstof in *helium* hetgeen gepaard gaat met het afgeven van energie.

Geïoniseerde atomen, elektronen en stralingen nemen dus aan een cyclus van voortdurende veranderingen in de zon deel. Maar er bestaat een principiële verschil tussen het gedrag van atomen en elektronen enerzijds en de zonnestraling anderzijds.

Atomen en elektronen zijn gebonden aan de zwaartekracht van de gehele massa, elektrostatische krachten houden een constante verhouding tussen het aantal elektronen in stand.

Straling daarentegen verwijdt zich van het midden van de zon, waar haar

intensiteit het grootste is, om zich vervolgens in de vrije ruimte te begeven. Metingen hebben uitgewezen dat de energie van de zonnestraling $3,79 \cdot 10^{26}$ J/s bedraagt; daarvan ontvangt de aarde slechts 0,135 J/s per cm^2 .

Sir Joseph Lockyer (1836-1920) heeft het helium in het zonnespectrum ontdekt, lang voordat het op onze planeet door Sir William Ramsay in het jaar 1895 werd geïdentificeerd.

Het waterstofatoom "bestaat" uit een positieve en een negatieve lading – een proton als kern en één elektron op de elektronenbaan. In het heliumatoom zouden dus de energieën van vier waterstofatomen aanwezig moeten zijn. Maar die rekening gaat toch niet helemaal op. Helium heeft een massa van 3,97, zodat 0,03 massa "verloren gaat", wanneer helium op deze manier wordt gevormd. Er gaat echter niets verloren, want massa en energie zijn immers gelijkwaardig aan elkaar.

De massa wordt eerder gedeeltelijk *in energie omgezet*. De gloed die van de zon uitgaat, is het resultaat van het proces, dat per seconde in het binnenste van de zon 654 miljoen ton waterstof in 650 miljoen ton helium wordt omgezet. Het verschil van 4 miljoen ton, dus maar een fractie van de massa van de oorspronkelijke waterstofatomen, wordt omgezet in energie.

Waardoor wordt die energie nu vrijgemaakt? Van de 4 elektronen, die afkomstig zijn uit de 4 waterstofatomen, worden er slechts 2 met de 4 protonen uit de heliumkern verenigd, de beide andere blijven achter in de "schil" van het heliumatoom.

Nobelprijswinnaar Francis W. Aston (1877-1945) heeft deze cijfers voor de atomaire omzetting van waterstof in zuurstof bevestigd door toepassing van zijn massaspectrograaf. Ook Jean Baptiste Perrin (1870-1942), een Frans natuurkundige, eveneens Nobelprijswinnaar, zette reeds belangrijke berekeningen op aangaande atomaire processen in de zon. Hij paste het getal 1,0077 als atoomgewicht van waterstof toe en stelde vast dat, daar de atoomgewichten van zuurstof, koolstof, helium en waterstof 16, 12, 4 resp. 1,0077 zijn, de vorming van helium, koolstof of zuurstof uit waterstof per gram waterstof een "rest" van 7,7 mg opleverde die in warmte-energie wordt omgezet.

De totale straling wordt klaarblijkelijk niet beïnvloed. Volgens Einstein's formule $E = mc^2$ (energie is gelijk aan massa maal lichtsnelheid in het kwadraat), kunnen we in verband met het voorgaande stellen: Aangezien elk gram van de zonnemassa enorme energieën afgeeft (meer dan 6 J per jaar), is het duidelijk, dat de vorming van heliumatomen genoeg energie kan opleveren om de zonnestraling nog voor vele miljarden jaren in stand

te houden.

Britse onderzoekers hebben een versie opgesteld, volgens welke bij de hoge temperaturen in het binnenste van de zon, zich twee verschillende nucleaire processen afspelen: de proton-proton-reactie en de koolstof-stikstof-cyclus.

Bij de proton-proton-reactie wordt een heliumkern gevormd, hetgeen in het binnenste van de zon 10^{10} jaren duurt. Deuteronen en lichte heliumkernen worden als tussenprodukten gevormd. Positronen en neutrino's zijn bijprodukten.

In de koolstof-stikstof-cyclus werkt een koolstofkern als katalysator om een heliumkern, bestaande uit 4 protonen, door de tussentijdse vorming van een serie stikstof-isotopen, te vormen. Bijprodukten zijn weer positronen en neutrino's. De koolstof-stikstof-cyclus heeft hiervoor maar 10^8 jaar nodig. Al naar gelang van de heersende temperatuurverdeling, overheerst of het ene, of het andere proces.

De nieuwste berekeningen wijzen erop, dat de proton-proton-reactie het meest voorkomt.

Zonne-neutrino's .

Bij de kernfusie die zich in het binnenste van de zon voltrekt, ontstaan, naast andere elementaire deeltjes, ook de bovengenoemde neutrino's. Van het bestaan van deze deeltjes heeft de Oostenrijkse natuurkundige en Nobelprijswinnaar Wolfgang Pauli voor de eerste maal in het jaar 1931 gewag gemaakt. De neutrino's zijn massaloze, ongeladen, oneindig kleine deeltjes, zonder magnetisch moment. Neutrino's kunnen daarom bijna ongehinderd door grote materiaalmassa's heendringen. Van een miljoen neutrino's, die dwars door de aardbol vliegen, wordt er hoogstens maar een geabsorbeerd.

De neutrino's zijn, in het kader van de "zonnephysica" in zoverre interessant, dat ze door het zonnestelsel worden uitgestoten en in een hoeveelheid de aarde treffen, die geschat wordt op enkele honderden miljoenen per seconde en per cm^2 .

W. A. Fowler (Caltech, USA) stelt de reisduur van een neutrino, van de zon naar de aarde, op 8 minuten. Een opmerkelijk, kostbaar, experiment voor het aantonen van neutrino's werd in het jaar 1973 door prof. Davies en zijn medewerkers van het Brookhaven Laboratorium op 1500 m diepte in een verlaten goudmijn in de Rocky Mountains in Zuid-Dakota (USA) begonnen. Een reservoir met een inhoud van 400 000 liter werd met tetrachlooretheen en voor een kleiner gedeelte met een chloormassa, die de chloorisotoop ^{37}Cl bevat, gevuld. Wanneer nu een der talloze zonne-neutrino's te

gen een ^{37}Cl -isotoop botst, ontstaan een ^{37}Ar (argon)-isotoop en een elektron.

Op grond van zijn experimenten kwam Davies tot de conclusie, dat de door hem aangetoonde neutrino's meer dan 150 miljoen kilometer moeten hebben afgelegd en daarom uitsluitend uit de zonnestraling afkomstig konden zijn.

De diepte van de goudmijn werd gekozen om geen verkeerd beeld te krijgen door de inwerking van kosmische stralen. Het onderzoek naar neutrino's is nog lang niet afgesloten.

De toekomst van de zon

Zoals bij talrijke sterren het geval is, wordt ook in het binnenste van de zon waterstof verbrand, zoals reeds gezegd, bij temperaturen in een orde van grootte van ongeveer 16 miljoen graden Kelvin.

Helium en zware atomen zullen de chemische samenstelling van de zon gaan wijzigen. De temperatuur zal geleidelijk stijgen tot 100 miljoen graden Kelvin. Vermindert echter de waterstofreactie tot op de helft, dan zal ook helium worden verbrand. Door de stijging van de temperatuur in het binnenste van de zon, zal de zon volgens de Britse wiskundige Fred Hoyle en de Amerikaan A. Fowler, *groter* worden en tegelijkertijd veel helderder worden. Ten slotte zal ze in een reusachtige, rode ster veranderen, die haar planeten vernietigt. Maar wanneer "de oven uit is", d.w.z. wanneer alle nucleaire energiebronnen zijn verbruikt, is het laatste evolutionaire stadium bereikt. De zon wordt dan een "witte dwerg", met een aanzienlijk kleinere radius dan thans het geval is. En wanneer de temperatuur in het inwendige van de zon verder sterk is gedaald en haar lichtsterkte ten einde is gekomen, zal ze ten slotte een "zwarte dwerg" worden. Deze voorstellingen komen ook overeen met waarnemingen, die in het Mt. Palomar-observatorium op Messier-3-sterren werden uitgevoerd.

Prof. George Gamow van de universiteit van Washington houdt eerder een *inkrimping* van de zonne-radius van 0,0003% (ongeveer 2 km) per 10 jaren voor mogelijk, terwijl de lichtsterkte van de zon zou toenemen. Zo komt hij tot de conclusie, dat de zonnestraling mettertijd – en daarbij komt het op honderden, misschien zelfs duizenden jaren, niet aan, – steeds intensiever moet worden. Een toename van de zonnestraling mag u echter niet doen schrikken; want praktisch is, in het verloop van duizenden jaren, deze straling tot nu toe ongeveer gelijk gebleven. En tenslotte gaat deze waarschijnlijk gepaard met een onmerkbare aanpassing of ook met het gedeeltelijk uitsterven van het leven op aarde, dus zonder de catastrofe van een plotseling verdwijnen van alle levensmogelijkheden.

Alle vroegere theorieën over het bevriezen van de aarde, tengevolge van een veronderstelde *afname* van de zonnestraling, kunnen niet geheel ad absurdum worden doorgetrokken. Tot afkoeling zal het echter pas komen wanneer de zon in het stadium van de "zwarte dwerg" komt. De reusachtig grote Sirius die zijn brandstof, volgens berekening van prof. Gamow, 15 maal sneller dan onze zon schijnt te verbruiken, zal nog eerder uitbranden dan de zon.

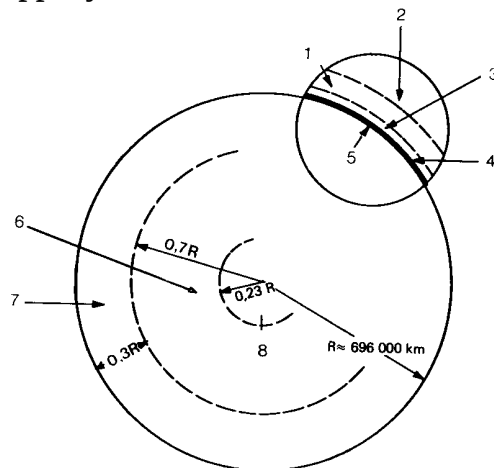
Belangrijke gegevens over de zon

Afstand zon-aarde 147 000 000 - 152 100 000 km
 volgens de zonne-parallax van 8,80" 149 600 000 km

zonne-parallax

(De hoek, waaronder de straal van de aarde van de zon uit gezien zou worden)

Wetenschappelijk erkende waarde 8,80 boogseconden (")



1. chromosfeer:
 $D = 8000$ tot $10\,000$ km;
 $d = 10^{-11}$ tot 10^{-15} g/cm³;
 $T = 5776$ tot $300\,000$ K
 (naar buiten toenemend).
2. corona:
 $D =$ niet begrensaar;
 $d =$ slechts 10^{-19} tot 10^{-16} g/cm³;
 $T =$ ca. 10^6 K.
3. fotosfeer:
 terugkaatsende laag;
 $D = 400$ tot 500 km;
 $d = 10^{-7}$ tot 10^{-8} g/cm³;
 $T = 4000$ tot 7000 K.
4. bovenste laag van de convectiezone;
 bron van het grootste gedeelte van de zonnestraling (zonoppervlak).
5. structuur van de zonne-atmosfeer.
6. inwendige van de zon:
 $d = 100$ g/cm³;
 $T = 8$ tot $40 \cdot 10^6$ K.
7. waterstof convectiezone:
 $d = 0,07$ g/cm³;
 $T = 130\,000$ K.
8. 35-40% van de massa;
 15% van het volume;
 90% van de geproduceerde stralings-capaciteit;
 $R \approx 696\,000$ km.

Afb. 1. Schematische voorstelling van de structuur van de zon. (Schets uit "Solar Energy Thermal Process" door J. A. Duffie en W. A. Beckmann, het fysisch-technisch leerboek voor alle vraagstukken betreffende het gebruik van zonnewarmte.)

Nauwkeuriger berekend	8,7914181"
Afstandsverschil van de zon tussen januari en juli	4 980 000 km
Grens van het zonnestelsel (baan van Pluto)	5 800 000 000 km
Zonneconstante, (extraterrestrisch = buitenaards)	8,12 J/(cm ² -min)
Buitenlaag van de zon 75% waterstof, 23% helium, 2% andere gassen.	
Middellijn van de zon ca. 109 maal groter dan de middellijn van de aarde, ca. 1392 000 km	
Oppervlakte van de zon 11 930 maal groter dan de oppervlakte van de aarde	6,087x10 ¹² km ²
Volume van de zon 1 304 000 maal groter dan het volume van de aarde	1,412x10 ¹⁸ km ³
Massa van de zon overeenkomend met 333 000 maal de massa van de aarde, of 745 maal zo- veel als de massa van alle planeten.	
Gemiddeld soortelijk gewicht van de zon 0,253 x het soortelijk gewicht van de aarde resp. 1,41 x het soortelijk ge- wicht van water.	
Helling van de as van de zon t.o.v. een loodlijn op het vlak van de aardbaan	7°15".
Sterkte van het magnetisch veld van de zon	10 ⁻⁴ tesla
Leeftijd van de zon, volgens vroegere schattingen van vooraanstaande geleerden: 10 tot 24 miljard jaar; in de laatste tijd neemt men 5 mil- jard jaar aan.	
Omloopsnelheid van de aarde om de zon	30 km/s
Siderische rotatieduur aan de equa- tor	25,03 dagen
aan de polen	29 dagen.

<i>Evenwichtstemperatuur aan de oppervlakte van de zon</i>	5,776 °K
<i>Temperatuur in het binnenste van de zon</i>	16 000 000 °K
<i>Energie-voorraad van de zon</i>	$1,8 \cdot 10^{47}$ J
<i>Energie-afgifte door de zon, per jaar</i>	$1,2 \cdot 10^{34}$ J
<i>Uitstraling van 1 cm² zonne-oppervlakte per seconde</i> (volgens Stefan en Boltzmann)	1490 cal = 6,3 kJ
<i>Lichtsterkte van de zon, absolute oppervlakte-emissie</i> totaal per seconde uitgestraalde energie	$3,76 \cdot 10^{23}$ kJ
<i>Ultravioletuitstraling van de zon</i> (beneden deze waarden door zuurstof en ozon vrijwel geheel geabsorbeerd)	315-280 nm
<i>Reflectie-verhouding van de aarde</i> (percentage van de ontvangen zonnestralen)	35 tot 43%
<i>Dikte van een ijslaag die op de oppervlakte van de zon in een minuut zou smelten</i>	14,75 m
<i>De zonne-atmosfeer (van binnen naar buiten)</i>	
1. <i>Chromosfeer</i> : (lichtzwakke laag, van waaruit de protuberanties tot 2 miljoen km omhoog stijgen).	
Massa (volgens Eddington): 120 miljoen ton	
Dikte: 8-10 000 km	
Temperatuur (naar buiten toe toenemend): 5000 – 300 000 °K	
Soortelijk gewicht van de dunne laag: $1 \cdot 10^{-13}$ g/cm ³	
2. <i>Corona</i> (weinig lichtgevende gaswolk om de zon, helderheid ongeveer een miljoenste van de helderheid van de zonneschijf).	
3. <i>Fotosfeer</i> (zichtbaar, lichtgevend oppervlak van de zon met korrelige structuur)	
Dikte van de laag (de reflectielaag) slechts 400-500 km	
Druk 0,006 - 0,22 atm = 6,75-22,25 mbar	
Temperatuur 4000 °K tot 7000 °K	
(in de donkere, door magnetische velden veroorzaakte zonnevlekken, tot 1200 °K minder).	
Soortelijk gewicht (1/1000 van het soortelijk gewicht van lucht) 10^{-8} g/cm ³	
<i>Dichtheid</i> (hoog-geïoniseerd gas)	5×10^8 atomen/cm ³
<i>Kinetische temperatuur tot:</i>	2000 000 °K

Relatieve aanwezigheid van atomen in de zon

Waterstof (H) als vergelijkingsmaatstaf	1 miljard
Helium (He)	150 miljoen
Lithium (Li)	1
Beryllium (Be)	0,3
Borium (B)	0,7
Koolstof (C)	300 000
Stikstof (N)	100 000
Zuurstof (O)	700 000
Fluor (F)	250
Neon (Ne)	300 000
Natrium (Na)	1600
Magnesium (Mg)	30 000
Aluminium (Al)	1700
Silicium (Si)	30 000
Fosfor (P)	350
Zwavel (S)	16 000
Chloor (Cl)	250
Argon (Ar)	4000
Kalium (K)	80
Calcium (Ca)	1600
Scandium (Sc)	1
Titanium (Ti)	70
Vanadium (V)	6
Chroom (Cr)	250
Mangaan (Mn)	120
IJzer (Fe)	8000
Kobalt (Co)	50
Nikkel (Ni)	850
Koper (Cu)	45
Zink (Zn)	26

(en nog ongeveer 35 andere elementen)

Reistijd van het licht van de zon naar de aarde

8 minuten, 18 seconden

Snelheid van het licht in een luchtledige ruimte volgens berekeningen van Millikan, Nicholson, Newcomb, Young en Forbee, bijna overeenstemmend

300 000 km/s

*Lichtjaar 9453 000 000 000 km = 0,3068 parsec (1 parsec = 3,26 lichtjaar)**Luchtdruk van de aarde uit gerekend. Gewicht van een luchtzuil*

Hoogte boven de zeespiegel van 1 cm² doorsnede

1m	1,0	kg
10 000 m	0,360	kg
20000 m	0,108	kg
30000 m	0,00834	kg
80 000 m	0,0000329	kg
180 000 m	0,00000000585	kg
500 000 m	0,00000000000473	kg

De zonneconstante

De zonnestraling die het aardoppervlak bereikt, is slechts een deel van die, welke aan de bovenste rand van de atmosfeer wordt aangetroffen.

De *zonneconstante* geeft de hoeveelheid zonne-energie aan die de aarde aan de grens van de atmosfeer per cm² per minuut bereikt. De tegenwoordig erkende gemiddelde waarde van deze buitenaardse zonneconstante is: $1,94 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})^* = 8,12 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}) = 1,354 \text{ kW}/\text{m}^2$.

De baan die de aarde om de zon beschrijft is niet geheel cirkelvormig zodat de afstand tussen de aarde en de zon verschillende waarden kan hebben.

Als gevolg hiervan is ook de waarde van de zonneconstante onderhevig aan fluctuaties van +/- 3,5% en door storingen zoals zonnevlekken nog eens aan fluctuaties van +/- 1,5%.

Het begrip zonneconstante is door de Franse natuurkundige Claude Pouillet in het jaar 1837 geformuleerd. Hij kwam destijds echter tot een iets lagere waarde.

Intussen is ook het begrip *directe zonneconstante* ingevoerd en wel voor die hoeveelheid energie die in een minuut per oppervlakte-eenheid op een bepaalde plaats op het aardoppervlak valt.

De *directe zonneconstante* is ongeveer 23% kleiner dan de eerstgenoemde, aangezien juist in de atmosfeer veel energie verloren gaat. Zo werd bijvoorbeeld op de Monte Rosa, op een hoogte van 4560 m (46° N.B.) een intensiteit van $7,41 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ gemeten, in Montpellier (44° N.B.), op een hoogte van slechts 40 m $6,28 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ en in Leningrad (56° N.B.) in de zomer $6,15 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$.

* Bij de invoering van het SI-stelsel is de cal als eenheid van warmte-energie vervallen. Ook deze energie dient te worden uitgedrukt in joule (J).

1 cal = 4,1855 J (W. s)

1 J = 0,239 cal

**Overgenomen uit het boek ZONNE-ENERGIE
Oorspronkelijke titel HELIOTECHNIEK (3. Aufl.)**

Hans Rau.

Kluwer Technische Boeken B.V.

1^e druk 1979
ISBN 90 201 1078 0