

Sonce je zvezda, razbeljena plinasta krogla s premerom, ki je 109-krat večji od Zemlje. Temperatura na njegovem površju je okrog 5800 kelvinov, v središču pa doseže 15 milijonov kelvinov. Če Sonce opazujemo s teleskopom, opazimo pege, blišče in velike izbruhe. Najburnejši procesi pa se dogajajo v središču. Tam je termonuklearni reaktor, v katerem vsako sekundo zgori 600 milijonov ton vodika, ki se pretvori v helij, pri tem pa se v samo enem utripu našega srca sprosti kolosalna energija, enaka eksploziji 100 milijard jedrskih bomb. Sonce Zemljo oskrbuje s svetlobo in toploto, dvema oblikama energije, ki vzdržujeta življenje.

Sonce

Marino Fonovič

Sonce je najbližja zvezda, povsem običajna, ena od več kot 100 milijard drugih, ki sestavljajo naše zvezdno mesto - Galaksijo. Sonce leži na robu galaktičnega diska, v galaktični ravnini, oddaljeno približno 25.000 svetlobnih let od središča. Za en obhod okoli središča Galaksije potrebuje 225 milijonov let.

Niti po velikosti niti po izsevu niti po kakšni drugi lastnosti se Sonce ne odlikuje med zvezdami. Ne glede na to pa je za nas prav posebna zvezda, saj je podarila življenje našemu planetu. Rastline iz Sončeve svetlobe dobivajo energijo za rast. Ocenjeno je, da zelene rastline, zahvaljujoč Sončevi energiji, na planetu letno proizvedejo okrog 450 milijard ton organskih snovi in s tem vzdržujejo vse življenje na Zemlji. Fosilna goriva, kot je na primer premog, samo sproščajo nakopičeno Sončevo energijo, saj so ogljik, ki je v njem, zbrale rastline pred milijonom ali celo pred sto milijoni let.

Sonce je razmeroma blizu, v povprečju je od Zemlje oddaljeno 150 milijonov kilometrov. Svetloba, ki je najhitrejša v vesolju, potrebuje od njega do nas malo več kot 8 minut, z najbližje zvezde pa kar 4,2 leta. Astronomi se trudijo, da bi razumeli, kaj se dogaja na in v Soncu in kako vpliva na Zemljo. S proučevanjem Sonca lahko bolje razumemo tudi dogajanje v večini zvezd.

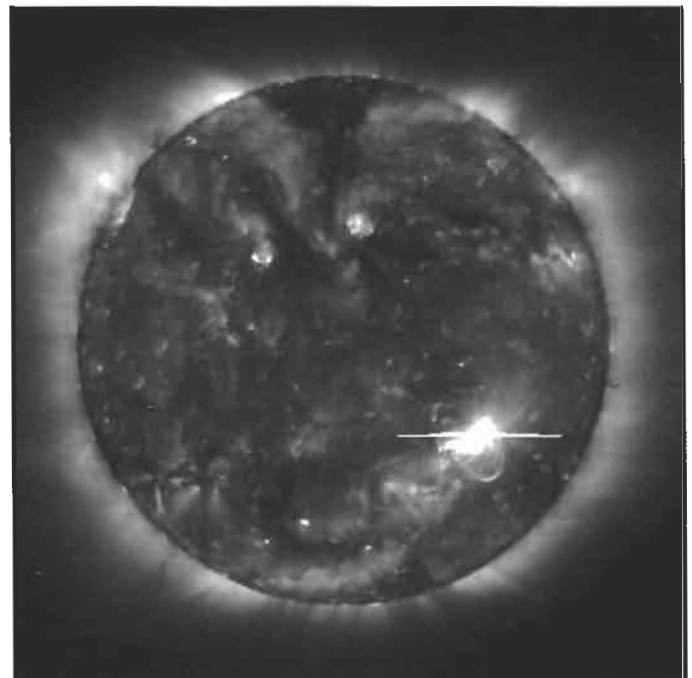
FIZIKALNE LASTNOSTI SONCA

V primerjavi z Zemljo in drugimi planeti je Sonce zares ogromno. Njegova masa je $1,99 \cdot 10^{30}$ kilogramov oziroma 333.000-krat je masivnejše od Zemlje. V Soncu je zbrane okrog 99,87 odstotka celotne mase Osončja oziroma 750-krat je masivnejše od vseh ostalih planetov skupaj. Planeti in njihovi sateliti, asteroidi, meteoriti in kometi so v primerjavi z njim res brezpomembni, majhni delci.

Sonce je žareča plinasta krogla (slika 1) s premerom 1.392.000 kilometrov, kar pomeni, da je 109-krat večje od Zemlje. Volumen Sonca je 1,3-milijonkrat večji od Zemljinega. V primerjavi z drugimi zvezdami naše Galaksije je Sonce srednje velikosti. Nekatere nadorjakinje, kot je na primer Antares, so 300- in celo 400-krat večje od njega. Isto lahko ugotovimo tudi za temperaturo na Sončevem površju. Pri zvezdah raznih velikosti se ta giblje med 3000 in 30.000 kelvinov, pri Soncu pa znaša 5780 kelvinov.

Po spektralni klasifikaciji spada Sonce med rumeno oranžne zvezde spektralnega tipa G2. Na slavnem Hertzsprung-Russellovem diagramu se sedaj nahaja v središču glavne veje, kjer bo ostalo še okrog 5 milijard let, kar predstavlja približno polovico njegove življenjske dobe.

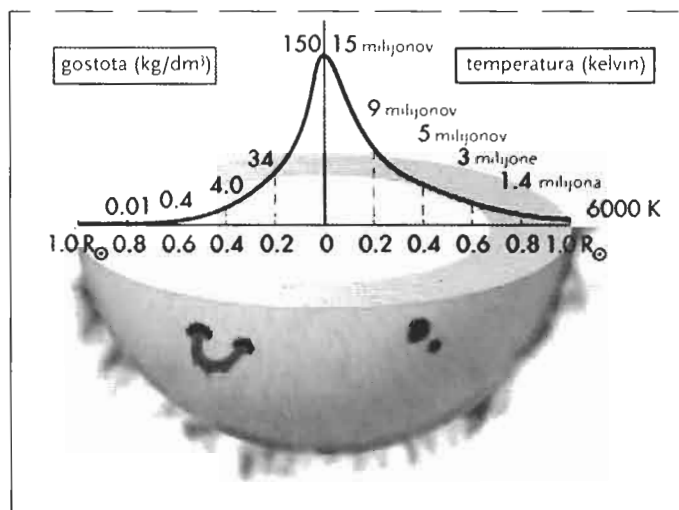
Sonce se vrti okoli svoje osi, ki je nagnjena na ekliptiko za 7,2 stopinje. Zaradi tega nagiba se Sončeva krogla z Zemlje ne vidi stalno v isti projekciji. V povprečju se Sonce zavrti okoli svoje osi enkrat v 27 dneh, kar ga uvršča med zvezde, ki se vrtiljo počasi. Različni deli Sonca se vrtiljo različno hitro. To je eden od dokazov, da ni trdno,



Slika 1. Sonce v ultravijolični svetlobi, posneto s satelitom SOHO. Svetla področja so najbolj vroči deli atmosfere, kjer se temperatura dvigne tudi do milijon kelvinov.

ampak plinasto telo. Ekvatorska področja se zavrtijo najhitreje, enkrat v 25 dneh (linearna hitrost ekvatorja je 2 kilometra na sekundo), na primer področja okrog 60 stopinj heliografske širine pa se zavrtijo v 29 dneh (linearna hitrost 0,87 kilometra na sekundo). Hitrost rotacije se torej manjša od ekvatorja proti poloma. Da obstajajo razlike v hitrosti vrtenja Sonca so astronomi ugotovili iz dolgotrajnih opazovanj različnih nehomogenosti, ki se pojavljajo na njegovem površju, pa tudi na osnovi Dopplerjevega premika spektralnih črt. Podobno neenakost v hitrosti vrtenja imata tudi Jupiter in Saturn. Omeniti moramo še to, da vse zvezde ne rotirajo na tak način. Pri nekaterih se področja okoli polov vrtiljo hitreje kot ob ekvatorju. Zaradi gibanja Zemlje okoli Sonca se zdi, da se le-to okoli osi vrtili počasneje, področja ob ekvatorju na primer v 27 dneh, namesto v 25 dneh - to je tako imenovani sinodski vrtilni čas.

Masa in volumen telesa določata njegovo povprečno gostoto, ki za Sonce znaša 1408 kilogramov na kubični meter, kar je skoraj 4-krat manj od povprečne gostote Zemlje. Gostota v Soncu je največja v središču, kjer znaša $1,6 \cdot 10^5$ kg/m³, nato pa proti površju pada: na oddaljenosti 350.000 kilometrov od središča je 1000 kg/m³ (gostota vode), v zunanjih plasteh pa le še $2 \cdot 10^{-4}$ kg/m³, kar je 10.000-krat manj



Slika 2. Potek gostote in temperature v notranjosti Sonca.

od gostote zraka na Zemljinem površju (slika 2). Zaradi izjemno velike gostote v središču se v prvi polovici polmera Sonca nahaja preko 90 odstotkov njegove skupne mase.

Gledano v celoti je Sonce sestavljeno iz izredno vročega plina, ki ga v glavnem sestavljata vodik in helij. Vodika je 73,4 odstotka skupne mase, helija pa 25 odstotkov. Ostali težji elementi (kisik, ogljik, železo, dušik, neon...) predstavljajo le malo več kot 1 odstotek Sončeve mase.

SONCE – VIR ENERGIJE

Sonce seva lastno energijo. Vsako sekundo v vesolje odda energijo $3,86 \cdot 10^{26}$ J. Samo izjemno majhen, dvomilijardni del pride na Zemljo. Gostota svetlobnega toka Sonca na srednji oddaljenosti Zemlja-Sonce je 1360 W/m^2 , kar je tako imenovana solarna konstanta.

Največji del energije oddaja Sonce v obliki elektromagnetnega valovanja (in to največ v optičnem delu spektra med 400 in 800 nanometri), znatno manjši del s Sonca odnesejo delci.

Elektromagnetno valovanje, ki prispe do nas, prihaja iz razmeroma tankega površinskega sloja, imenovanega fotosfera. Globlji sloji Sonca so povsem neprozorni, celo za najmočnejše sevanje gama in rentgensko svetlobo. Prav zato ne moremo »videti« v notranjost Sonca, ampak lahko na dogajanje v njem sklepamo le na podlagi teoretičnih modelov.

Leta 1964 je R. L. Sears izdelal teoretični model zvezde, katere starost je okrog 4,5 milijarde let, po masi, velikosti, izsevu in kemijski sestavi pa je podobna Soncu. Po tem modelu globoko v notranjosti Sonca visoke temperature onemogočajo obstanek atomov, ki so zato povsem ionizirani, jedra so torej povsem ločena od elektronov, snov pa je zelo zgoščena. Jedra vodika so osamljeni protoni, jedra helija pa skupki dveh protonov in dveh nevtronov. Dimenzije jeder vodika in helija so okrog 100.000-krat manjše od dimenzij atomov vodika in helija, zato imajo jedra ne glede na ogromno gostoto celo več prostora kot atomi v trdni snovi. To je osnovni vzrok, da snov v Soncu uvrščamo v tako imenovano četrto agregatno stanje – ionizirani plin ali plazmo.

Sonce neprestano proizvaja velike količine energije, ki jo pošilja v okoliški prostor in tako segreva planete. Od kod Soncu tako velika moč? Kateri procesi segrevajo Sonce, da ohranja temperaturo tekom milijard let? Neka knjiga iz leta 1892 trdi, da je Sonce velikanska peč, polna plamenov in žerjavice. Druga teorija iz 19. stoletja pa pravi, da Sonce segrevajo meteoriti, ki padajo na njega. Oboje je seveda

napačno. Iskanje odgovorov na to vprašanje je ena najpomembnejših nalog astronomije. Brez tega odgovora je nemogoče razumeti nastanek in življenje zvezd, galaksij in celo nastanek in razvoj življenja.

VIR SONČEVE ENERGIJE – REAKCIJA PROTON-PROTON

Na osnovi znane mase Sonca in skupne energije, ki jo oddaja, lahko z enostavnim deljenjem teh dveh vrednosti dobimo podatek, da vsak kilogram njegove snovi odda energijo 0,0002 joula na sekundo. Za primerjavo povejmo, da kos gorečega polena oddaja milijonkrat večjo energijo na enoto mase na sekundo. A obstaja pomembna in bistvena razlika – kdo je že videl poleno, ki lahko gori milijarde let?! Če hočemo izračunati resnično količino energije, ki jo Sonce oddaja v vesolje, moramo najprej izračunati celotno energijo, ki jo je oddalo tekom dosedanjega življenja. Tega ni težko izračunati. Vrednost, ki jo dobimo, je $3 \cdot 10^{43}$ joulov na kilogram. Ta številka pa je ogromna! Trideset bilijonov joulov energije se je od nastanka do danes sprostito iz vsakega kilograma Sončeve snovi! Sproščanje energije ni eksplozivno, ne nastane ogromna količina energije v kratkem času. Nasprotno, proces je počasen in stabilen in omogoča dolgotrajno oskrbo Sonca s prepotrebno energijo. Poznamo samo en mehanizem, ki lahko na ta način zagotavlja zvezdam energijo. To je jedrska fuzija, spajanje lažjih atomski jeder in nastanek težjih.

Da bi prišlo do zlitja jeder, sta potrebni predvsem visoka temperatura in gostota. Ker poznamo maso Sonca, lahko določimo tlak v središču (okrog $3,4 \cdot 10^{16} \text{ N/m}^2$), ki preprečuje, da bi se Sonce sesedlo pod lastno težo. (Večina zvezd je v stanju idealnega hidrostatskega ravnovesja. Zvezda se ne sesede pod lastno težo, ker je protiutež gravitaciji tlak plina, pri masivnejših zvezdah pa sevalni tlak fotonov. To mehansko ravnovesje je pogoj za stabilnost zvezde.) Iz teh podatkov lahko izračunamo temperaturo v središču Sonca, ki znaša približno 15 milijonov kelvinov, kar je dovolj za sprožitev termonuklearne reakcije, pri kateri se vodik pretvarja v helij, pri tem pa se sprošča ogromno energije. Tej reakciji pravimo protonsko-protonski proces (slika 3 na strani 233). Pri tako visokih temperaturah v središčnih predelih Sonca imajo atomska jedra visoke hitrosti in pogosto pride do trkov med njimi. Največkrat se ne zgodi nič. Včasih pa dva protona (jedri vodika) trčita tako močno, da se združita in nastane jedro devterija ^2D (težki vodik), ki ga sestavljata proton in nevtron. Taka jedra, ki imajo enako število protonov in različno število nevtronov, se imenujejo izotopi in predstavljajo različne oblike istega elementa. Hitrost, ki je potrebna za to reakcijo, je večja od nekaj sto kilometrov na sekundo. Tako veliko hitrost imajo lahko protoni le v središču Sonca in drugih zvezd.

Pri teh trkih nastaneta še dva nova delca: majceni nevtrino (ν) in pozitron (e^+). Nevtrini nimajo mase in električnega naboja, le energijo. Gibljejo se s hitrostjo svetlobe ali malo manjšo in skoraj ne sodelujejo z okoliško snovjo. Brez izgube energije lahko preletijo svinčni zid, debel nekaj svetlobnih let. Z drugimi delci sodelujejo le preko šibke jedrske sile. Zaradi teh lastnosti nevtrinov jih je izjemno težko zaznavati. Na Zemlji jih lovijo v posebnih pogojih s tako imenovanimi nevtrinskimi detektorji, o čemer smo v *Spiki* že večkrat pisali.

Drugi delec je pozitron (e^+), povsem enak elektronu, le električni naboj ima pozitiven. Take delce, ki se samo po naboju razlikujejo med seboj, fiziki imenujejo antidelci. Novonastali pozitron je v trenutku obkrožen z elektroni in z enim od njih se združi v procesu, imenovanem anihilacija.

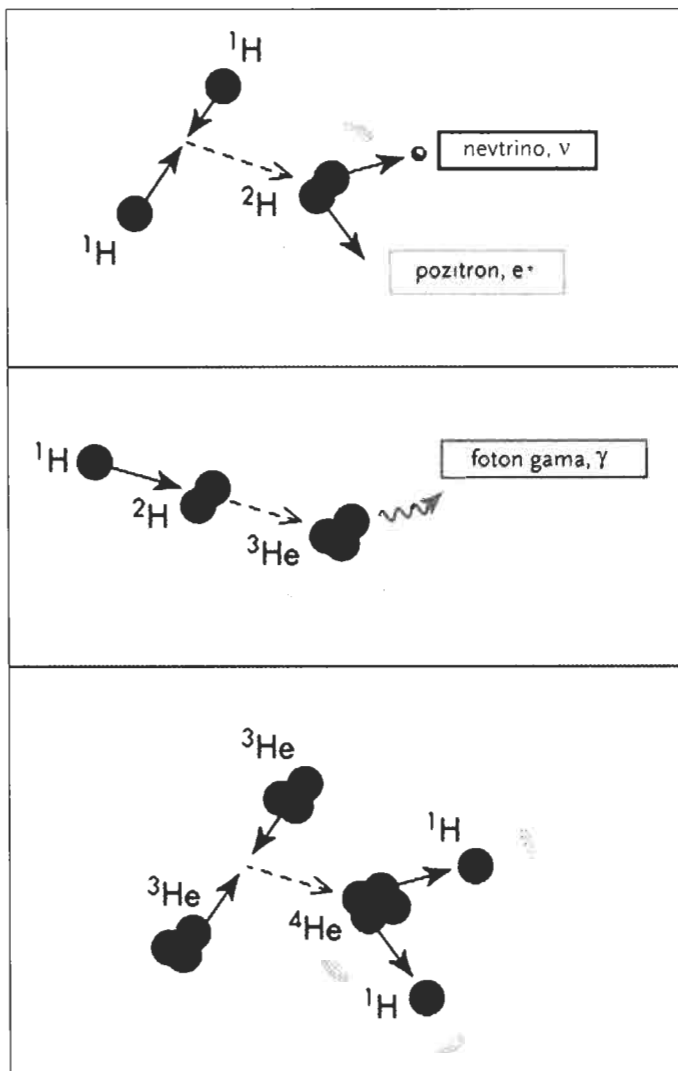
Naslednji korak zlitvanja je nastanek izotopa helija. Protonsko-nevtronski par se združi še z enim protonom in nastane jedro lahkega helija ^3He , ki nima dveh nevtronov, kot navadni helij, temveč samo

nadaljevanje na strani 234...

...nadaljevanje s strani 207

enega. Energija, ki pri tem nastane, je v obliki sevanja gama. In končno v tretjem koraku reakcije proton-proton trčita dve jedri lahkega helija in nastane stabilno jedro navadnega helija, ostaneta pa dva protona in energija.

V središču Sonca lahko torej iz štirih protonov nastaja helij, pri tem pa se sprošča ogromno energije predvsem v obliki sevanja gama. Ma-



Slika 3. Reakcija proton-proton: iz štirih protonov nastane jedro helija, pri tem pa se sprosti ogromno energije. Številke ob jedrih so atomske mase.

sa štirih protonov je le neznatno večja – približno za 0,7 odstotka – od mase jedra helija. Razlika v masi se spremeni v energijo. Po znameniti enačbi Alberta Einsteina $E = mc^2$ vidimo, da že zelo majhne količine mase sproščajo ogromno energije. Iz te načbe sledi, da je kilogram snovi enakovreden energiji $9 \cdot 10^{16}$ joulov. S to neprestano pretvorbo naše Sonce izgublja maso. A odkar je nastalo (pred približno 4,5 milijarde leti), je izgubilo le 3 promile svoje mase.

Z jedrskim zlivanjem nastaja energija v središču Sonca. V hladnejših slojih, ki jo proizvede Sonce, nastane v samem središču, v volumnu, ki znaša le 1,6 odstotka skupnega volumna Sonca (slika 4). Energija se proti površju prenaša na dva načina: s sevanjem in s konvekcijo. V središču, kjer potekajo jedrske reakcije, se energija prenaša s sevanjem. Tudi v drugi tretjini Sonca se energija prenaša s sevanjem, v zadnji

tretjini pa s konvekcijo (mešanjem). Zaradi zapletenega načina prenosa energije proti površju je potrebnih kar 10 milijonov let, da energija iz središča pride do površja! Fotoni elektromagnetnega valovanja zapuščajo Sonce predvsem v obliki vidne svetlobe. Nevtrini praktično brez izgub odletijo v vesolje. Helij pa ostane ujet v jedru.

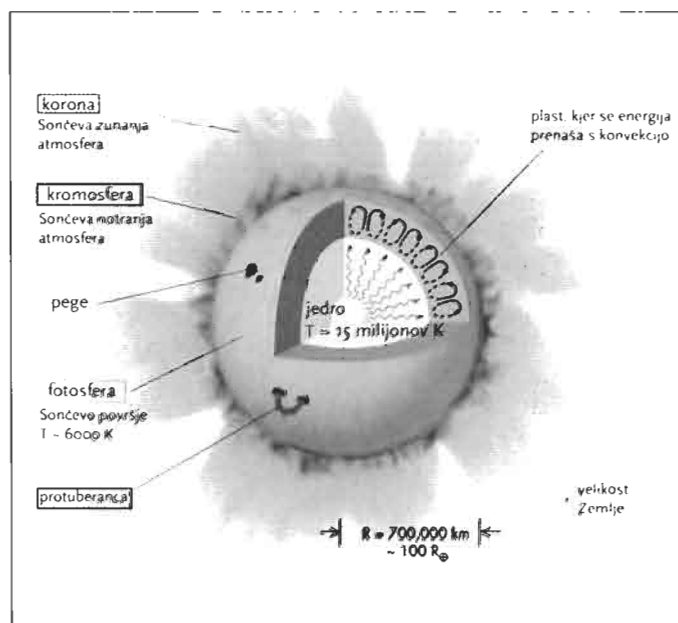
Enake ali podobne reakcije jedrskega zlivanja potekajo v središčih vseh normalnih zvezd. Poleg reakcije proton-proton k Sončevi energiji prispevajo še drugi procesi. V Soncu so majhne količine težjih elementov od vodika in helija, ki prav tako lahko sodelujejo v jedrskem zlivanju. V eni od teh reakcij iz izotopov helija ^3He in ^4He nastaja berilij ^7Be . Če berilij ujame prosti elektron, se spremeni v litij ^7Li , ki lahko trči s protonom in nastane dve jedri helija ^4He .

V drugem procesu lahko nastalo jedro ^7Be reagira s protonom, pri čemer nastane bor ^8B , ki je radioaktiven in razpade v berilij ^8Be . Nastali izotop berilija prav tako ni stabilen in razpade na dve jedri helija ^4He . Pomen tega procesa je v tem, da pri razpadu bora nastane nevtrino, ki so ga zaznali detektorji na Zemlji, s čemer so neposredno dokazali potek jedrskih reakcij v Soncu.

Tretji proces, pri katerem iz vodika nastaja helij, pa je znan kot reakcija ogljik-dušik-kisik (CNO). Tudi v ogljikovem ciklu iz štirih vodikov nastane jedro helija. Ogljik sodeluje v procesu kot katalizator in se pri tem ne spreminja, med reakcijami pa začasno nastajajo tudi jedra kisika in dušika.

Rakcija proton-proton je glavni vir energije v zvezdah, kjer je središčna temperatura nižja od 16 milijonov kelvinov. Pri višjih temperaturah pa prevlada ogljikov cikel.

Sonce vsako sekundo predela okrog 600 milijonov ton vodika v helij in pri tem shujša za 4 milijone ton, saj se toliko mase pretvori v energijo. Če primerjamo hitrost porabe mase z maso Sonca, se lahko vprašamo: kako dolgo lahko Sonce sveti? V približno 5 milijardah let bo naša zvezda porabila polovico vodika. V naslednjih milijardah bo postajala vse toplejša in večja. Ko bo v središčnih predelih zmanjkalo vodika, se bo Sonce napihnilo in spremenilo v rdečo orjakinjo, več stokrat večjo od današnje velikosti. Zemljo bo pogoltnilo in njene trdne kamnine se bodo spremenile v tekočo lavo. Globoko v središču Sonca se bodo začela helijeva jedra spajati v ogljik in težje ele-



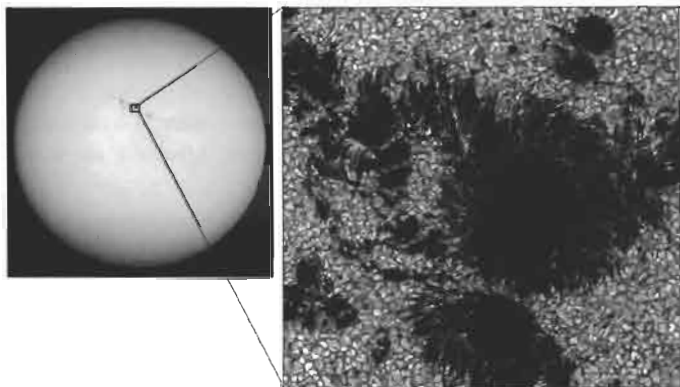
Slika 4. Notranjost in atmosfera Sonca. Premer jedra je okrog štirikrat manjši od premera samega Sonca, a je v njem kljub temu zbrana večina mase.

mente. Na koncu se bo Sonce ohladilo v kroglo jedrskih odpadkov, tako imenovano belo pritlikavko.

SONČEVO POVRŠJE – FOTOSFERA

Praktično vsa Sončeva energija, torej tudi svetloba in toplota, ki pride do Zemlje, se izseva v 300 do 400 kilometrov debeli plasti v nje-govi atmosferi, tako imenovani fotosferi. Temperatura fotosfere je med 4400 in 6400 kelvini, gostota pa v povprečju znaša $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, kar pomeni, da je znatno redkejša od Zemljine atmosfere. Skozi foto-sfero se energija prenaša v glavnem s sevanjem, navzoča pa je tudi konvekcija. To vidimo v obliki zrnate strukture Sončevega površja, tako imenovane granulacije. Granule so curki plina, ki prodrejo na površje iz nižje ležečih slojev (slika 5). Temperatura plinov v granu-li je v povprečju od 400 do 500 kelvinov višja od temnejšega medgran-ularnega področja. Granula bruhne na površje s hitrostjo okrog ki-lometra na sekundo. Plini se ohladijo in potonejo nazaj v globino, od koder pa že prihaja nov vroč plin. Skupaj s plinom, ki je delno ioniziran, prihaja na površje tudi magnetno polje. Posamezna granu-la je kratkoživa, saj jo po desetih minutah ne moremo več prepozna-ti. Njihove dimenzije so okrog 1000 kilometrov, na Sončevem povr-šju pa jih je v vsakem trenutku okrog 2 milijona.

Poleg gibanja plina v granulah se snov na Soncu pravilno giblje tu-di v večjih dimenzijah, v tako imenovanih supergranulah. Tudi te pre-



Slika 5. Sončeva fotosfera s pegami. Na povečanem posnetku: svetla zrnca v okolici peg so mehurji vročega plina (granule), ki iz globin prihajajo na površje. Pegi se zdijo temne samo zato, ker so hladnejše od okolice. Foto: NOAO/SVST La Palma.

krivajo vse površje Sonca. Supergranule so v povprečju velike 32.000 kilometrov in v vsakem trenutku jih je na Soncu več kot 2000. V središču vsake supergranule plin priteka na površje, na robovih pa ponia nazaj v globino. Trajanje posamezne supergranule je težko določiti, v povprečju pa trajajo okrog 20 ur. Pojav supergranulacije je težje opazovati kot granulacijo. Povezanost supergranulacije z ostalimi pojavi na Soncu še ni povsem znana. Kljub temu pa je povsem jasno, da je njihov izvor v konvektivnih tokovih plinov.

Pravilno gibanje plinov na še večjih dimenzijah pa opazimo v pojavu oscilacije. V 60-ih letih XX. stoletja so astronomi opazili, da se zgornje plasti fotosfere dvigujejo in spuščajo v povprečju vsakih pet minut. To pomeni, da Sonce niha kot zvon. Valovanje se širi po velikem delu notranjosti Sonca, podobno kot se po notranjosti Zemlje širijo potresni valovi. Valovanje se odbija od zunanjih plasti Sonca, ki so redkejša. To nihanje fotosfere povzroča tlak plina, ki ga poganja-jo konveksijski tokovi v globini Sonca. Kot lahko potresne valove seizmologi izkoristijo za preučevanje notranjosti Zemlje, astronomi upajo, da bodo s preučevanjem teh valov na Soncu izvedeli kaj več o njegovi notranjosti (tako imenovana helioseizmologija).

SONČEVE PEGE IN AKTIVNOST SONCA

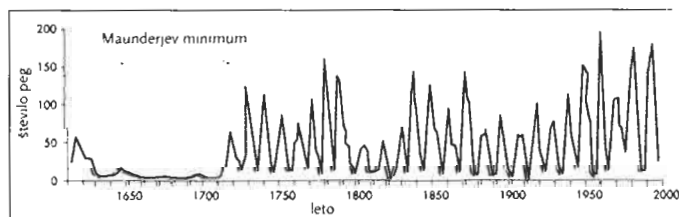
V površinskem sloju Sonca lahko opazimo področja, ki so hladnejša in manj svetla od okoliške fotosfere (slika 5). Občasno lahko temne pege ob zahodu Sonca vidimo celo s prostim očesom, zato so jih poznali že kitajski astronomi pred 2000 leti. Takrat so mislili, da se pege pojavljajo v naši atmosferi. Šele v 17. stoletju je Galileo Galilei s svojim prvim teleskopom ugotovil nekaj pomembnih dejstev. Odkril je, da se pege pojavljajo in izginjajo, da se jim spreminja velikost in oblika; to je bil prvi dokaz, da Sonce ni popolno in nespremenljivo, da se tudi na njem neprestano dogajajo spremembe. S spremljanjem gibanja peg je ugotovil, da se tudi Sonce vrti okoli svoje osi.

Temperatura plinov v pegah je za 1500 kelvinov nižja od tempera-ture fotosfere, zato so videti temnejše od okolice. Velikosti peg so različne. Od majcenih, ki jim pravimo pore, ki so le malo večje od granul, pa vse do orjaških, ki so nekajkrat večje od Zemlje. Pegi se lahko pojavljajo posamično, največkrat pa so v skupinah, ki štejejo več deset in celo do sto peg. Pegi se pojavljajo samo v pasu med 5 in 45 stopinjami heliografske širine, kar pomeni, da jih v bližini polov nikoli ni.

Če si pego ogledamo podrobneje, opazimo temnejše osrednje področ-je, ki mu pravimo senca (umbra). Senca je obkrožena s svetlejšo pol-senco (penumbra). Postopno spreminjanje barve je posledica spremin-janja temperature fotosfere. Temperatura v področju sence je okrog 4500 kelvinov, v polsenci pa 5500 kelvinov. Sij sence je 30 od-stotkov, sij polsence pa 75 odstotkov sija normalne fotosfere.

Sončeve pege so področja, kjer se močno magnetno polje iz notra-njosti Sonca prebija proti površju. Magnetno polje v pegi je okrog 1000-krat močnejše od okoliškega (magnetna indukcija v pegah doseže 0,4 Tesla). Skozi pego teče plin. Tok ioniziranega plina je v bistvu električni tok, in ker se okoli vsakega vodnika ustvari magnetno polje, se tudi okoli toka ioniziranega plina pojavi magnetno polje. Astro-nomi menijo, da so pege hladnejše zato, ker močno magnetno polje zaustavi ali preusmeri normalne konveksijske tokove, ki teče-jo proti površju Sonca.

Posamezne pege trajajo povprečno okrog 10 dni, skupine okrog 50 dni. Skupine imajo jasno vidno zgradbo – ena pega je vodilna, dru-ga spremljevalka. To sta dve največji pegi z najmočnejšim magnet-nim poljem, okoli njiju pa se kot okrog težišča zbirajo ostale člani-ce skupine. Vodnica je dobila tako ime zato, ker je pomaknjena na-prej v smeri vrtenja Sonca, spremljevalka pa ji zadaj sledi. Vodnica je vedno bližje ekvatorju kot spremljevalka, zato je veznica med nji-ma nagnjena na ekvator. Vodnica in spremljevalka imata nasprotna magnetna pola. Obstaja pa tudi razlika v polariteti parov peg, ki so na severni in južni Sončevi polobli. Če ima na primer na severni pol-obli vodnica severni magnetni pol, ima spremljevalka južnega. Če je istočasno na južni polobli drug par, je polariteta peg obratna – vod-nica ima južni pol, spremljevalka pa severnega. Vrtni red polaritete se zamenja na začetku vsakega 11-letnega cikla Sončeve aktivnosti, o čemer bomo govorili kasneje. Astrofiziki menijo, da magnetno po-lje Sonca nastane in spreminja svojo jakost zaradi neprestanega raz-



Slika 6. Graf Sončeve aktivnosti. Lepo se vidi Maunderjev mini-mum in 11-letni cikli.

tezanja, vrtnčenja in zgoščevanja silnic polja, kar povzroča različna rotacija delov Sonca in konvekcijski tokovi plinov.

Če redno beležimo število peg na Soncu ali računamo njihovo skupno površino, lahko opazimo, da obstajajo minimumi in maksimumi Sončeve aktivnosti. Švicarski astronom R. Wolf je leta 1849 aktivnost Sonca opisal s tako imenovanim Wolfovim številom

$$R = k (10g + f)$$

kjer je k korekcijski faktor, odvisen od inštrumenta in načina opazovanja, g je število skupin peg, f pa število vseh peg, vidnih tistega dne. Dovolj zanesljive vrednosti Wolfovega števila segajo v leto 1749. Cikel Sončeve aktivnosti (čas od enega maksimuma do naslednjega maksimuma) traja v povprečju 11,1 leta, posamezni cikli pa od 7,3 do 17,1 leta. Da se pege pojavljajo periodično, je odkril amaterski astronom Samuel H. Schwabe leta 1843. Na sliki 6 je prikazano spreminjanje srednje vrednosti Wolfovega števila po letih od odkritja teleskopa do danes. Opazimo lahko številne nepravilnosti v ponavljanju ciklov. Med leti 1650 in 1715 skoraj ni bilo peg, kot da se je Sončeva aktivnost povsem umirila. V čast britanskemu astronomu E. W. Maunderju, ki je na podlagi starejših podatkov prvi opazil ta pojav, imenujemo to 70-letno obdobje zmanjšane aktivnosti Maunderjev minimum. Maunderjev minimum sovпада z obdobjem zelo hladnih zim v Evropi in Severni Ameriki. Ledeniki v Alpah so se povečali, reke so prej zamrzile in se kasneje odtalile, zamrznilo je Severno morje. To obdobje je znano tudi pod imenom »mala ledena doba«.

Brez popolnega razumevanja vzrokov za nastanek Sončevega cikla ostaja velika neznanka, zakaj prihaja do občasnih prekinitev aktivnosti. Čeprav še ni povsem dokazana povezanost dogajanja na Soncu z dolgotrajnimi spemembami klime na Zemlji, je že dolgo znano, da Sonce na različne načine vpliva na Zemljo.

KROMOSFERA

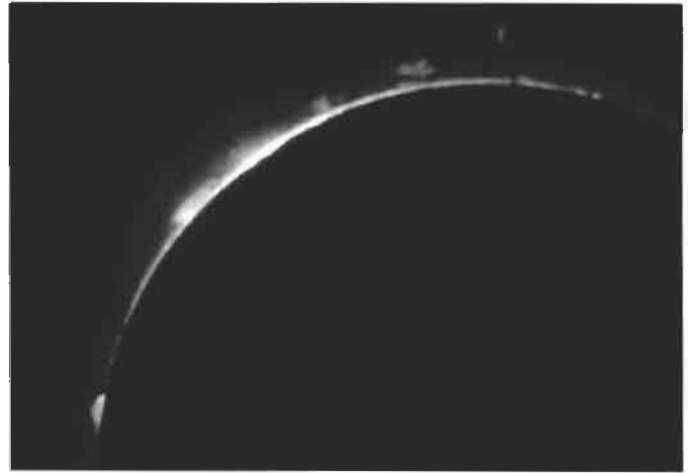
Plast nad fotosfero se imenuje kromosfera. Z Zemlje je vidna le ob popolnih Sončevih mrkih kot rdečkasto obarvan sij neposredno ob temnem robu Sonca (slika 7a). Kromosfera je ime dobila prav zaradi izrazite rdečkaste barve, ki jo dajejo emisijske črte vodika (H- α) in vijolične črte kalcija.

Kromosfera se deli na tri plasti: nižja kromosfera sega do 1500 kilometrov nad fotosfero, srednja kromosfera leži med 1500 in 4000 kilometri, zgornja kromosfera, ki jo v glavnem sestavljajo ionizirani plini, pa se širi od 4000 do nekako 10.000 kilometrov.

Gostota plina v kromosferi se z višino naglo manjša. Ob fotosferi je približno 10^{19} atomov vodika/cm³, na višini 10.000 kilometrov pa le še 10^9 atomov vodika/cm³. Nižji sloji kromosfere so dokaj homogeni in tam temperatura postopno pada z oddaljenostjo od fotosfere. Od dna fotosfere do začetka kromosfere temperatura pade od 9000 do 4500 kelvinov. Padanje se nadaljuje še v nižji kromosferi, nad njo pa začne temperatura ponovno rasti in na vrhu doseže 10.000 kelvinov.

Na posnetkih v vodikovi H- α svetlobi in svetlobi ioniziranega kalcija lahko opazimo, da ima kromosfera mrežasto strukturo z zrnji v obliki vlaken, ki jim pravimo flokule. Ta zrna so večja od granul v fotosferi, velika so kot supergranule, nad katerimi se tudi nahajajo. Če Sonce opazujemo v beli svetlobi, lahko v kromosferi vidimo večje svetlejše lise, tako imenovane kromosferske bakle ali fakule, ki se nahajajo točno nad pegami v fotosferi. Sončeve pege in kromosferske bakle predstavljajo različne oblike istih aktivnosti na Soncu. V področju bakel je magnetno polje ojačano, temperatura je višja. Pojav bakel napoveduje nastanek peg.

Pomemben pojav v kromosferi so spikule – manjši izbruhi vročega plina s temperaturo okrog 15.000 kelvinov, ki se s hitrostjo nekaj de-



Slika 7a. Kromosfera med popolnim Sončevim mrkom.

set kilometrov na sekundo dvigujejo iz fotosfere in dosežejo višino med 7000 in 9000 kilometri. Spikule najpogosteje trajajo okrog 15 minut. Najbolje jih vidimo v monokromatski vodikovi in kalcijevi svetlobi in predstavljajo pline, ki so nekoliko toplejši od okolice (slika 7b). Kalcijeve spikule so temnejše od vodikovih, obstaja pa povezava med spikulami in nižje ležečimi granulami. V vsakem trenutku je v kromosferi okrog milijon spikul.

EKSPLOZIJE V KROMOSFERI

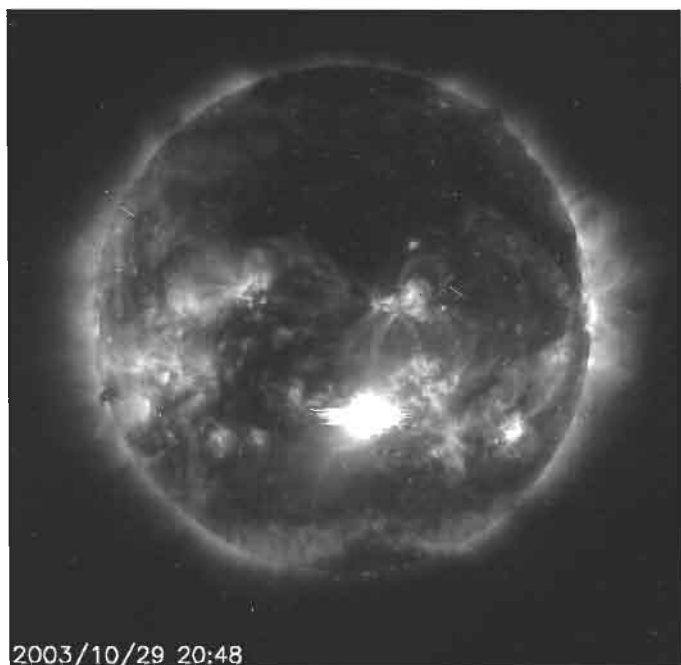
Najpomembnejši pojavi v kromosferi so zagotovo blišči in protuberance. Kot vsi drugi pojavi tudi ti sledijo Sončevemu 11-letnemu ciklu. Najpogosteje se pojavljajo ob maksimumu aktivnosti, ko so tudi najmočnejši.



Slika 7b. Spikule v kromosferi. Foto: NOAO.

Blišče so odkrili šele takrat, ko so za opazovanja Sonca začeli uporabljati monokromatske filtre. Opazili so, da se področjem v kromosferi nad pegami občasno, v trajanju od nekaj minut pa vse do nekaj ur, znatno poveča sij, pokaže pa se kaotična, nepravilna struktura. Blišči so videti kot vulkani, iz katerih bruha snov iz globin Sonca. Obstaja zelo očitna povezanost med pegami in blišči, saj se ti v večini primerov pojavljajo na meji, ki ločuje pege nasprotnih magnetnih polov v skupini.

Blišč je zelo kompleksen pojav, ki se odvija po vsej globini Sončeve atmosfere, nastane pa kot posledica hitre sprostitve magnetne energije in njene pretvorbe v kinetično energijo, toploto in svetlobo. Sončeva plazma se lahko na teh mestih segreje tudi do temperatur 10 milijonov kelvinov. Energija, ki se sprosti ob tipičnem Sončevem blišču, je enaka energiji, ki bi se sprostila, če bi sočasno eksplodiralo milijon 100-megatonskih vodikovih bomb! V času bliščev se pojavijo močno radijsko valovanje, ki je posledica gibanja relativističnih elektronov v močnem magnetnem polju. Ko je Sonce mirno, ne oddaja sevanja gama, v času bliščev pa se pojavi tudi to. Astrofiziki me-



Slika 8. Sončev blišč (najsvetlejša področja na sliki), posnet 28. oktobra 2003 s satelitom SOHO. Foto: NASA.

nijo, da se fotoni gama rojevajo v medsebojnih interakcijah elektronov, ki so pospešeni skoraj do hitrosti svetlobe.

V času bliščev Sonce v vesolje izvrže tako imenovane Sončeve kozmične delce, visokoenergetske relativistične delce, kot so elektroni, atomska jedra in drugi elementarni delci. Ti delci imajo skoraj svetlobno hitrost, zato pridejo do Zemlje praktično istočasno s svetlobo blišča. Čeprav še ne poznamo vseh mehanizmov, ki povzročajo pospeševanje teh delcev, pa povezanost z eksplozijami bliščev kaže na to, da lahko Sonce občasno deluje kot ogromen in zelo učinkovit pospeševalnik delcev. Enega najmočnejših bliščev v zgodovini opazovanj so zabeležili 28. novembra 2003, ko je Sonce za kratek čas v rentgenskem področju zasijalo 100-krat svetleje kot običajno.

PROTUBERANCE

Protuberance (tudi prominence) so rožnati curki razbeljene snovi, ki jih lahko ob popolnih mrkih vidimo na robu Sonca. Protuberance so različnih oblik in velikosti (slika 9). Spikule imamo lahko za majh-

ne protuberance. Temperatura protuberanc je nižja od okoliške in znaša okrog 10.000 kelvinov, ker pa je gostota plinov v njih večja, so videti svetlejša.

Njihov obstanek v redki kromosferi je mogoč le, če je tlak plina v protuberanci enak tlaku v okolici. Tlak plina je sorazmeren z gostoto in temperaturo, zato velja, da kolikokrat gostejša je snov v protuberanci, tolikokrat hladnejša je od okolice. Ker je gostota plinov v protuberanci okrog 100-krat večja, je njena temperatura prav tolikokrat nižja. Na gibanje delcev znotraj protuberance vpliva magnetno polje, zato so pravi pokazatelj magnetnih silnic nad aktivnimi področji. V povprečju trajajo protuberance okrog tri Sončeve obrate, opazili pa so že tudi take, ki so trajale več let. Najpogosteje se pojavljajo v obliki tako imenovanih mirnih protuberanc, ki so dolgožive in se pojavljajo na vseh heliografskih širinah. Dolge so okrog 200.000 kilometrov, v izjemnih primerih pa se lahko raztegnejo tudi do 1.900.000 kilometrov. Dvignejo se do višine 50.000 kilometrov, njihova širina pa ne preseže 6000 kilometrov. Protuberance sestavljajo manjša vlakna, katerih premeri so okrog 1000 kilometrov. Temperatura mirnih protuberanc je najpogosteje okrog 15.000 kelvinov. Po obliki jih lahko primerjamo z mostom ali viaduktom. Spodnji konci protuberanc se začenjajo med supergranulami, selijo se po površju in spreminjajo smer.

Poleg mirnih pa se pojavljajo tudi aktivne protuberance. Te se zelo hitro razvijajo (od deset minut do nekaj ur), pojavljajo pa se na vseh heliografskih širinah. Najbolje jih opazujemo, ko se formirajo v obliki zanke. V tem primeru lahko opazujemo gibanje snovi v sami protuberanci: kako se snov z vrha zliva na oba kraka zanke, ali kako snov izvira iz kromosfere na eni strani, se vzpenja po zanki in ponikne na drugi strani nazaj v kromosfero. Plin se giblje vzdolž silnic magnetnega polja s hitrostjo nekaj sto kilometrov na sekundo. Povprečna temperatura plina v aktivni protuberanci je okrog 25.000 kelvinov.



Slika 9. Velikanska protuberanca: plin teče vzdolž magnetnih silnic s hitrostjo več sto kilometrov na sekundo. Foto: National Solar Observatory's Sacramento Peak Observatory.

V področjih peg pa se pojavljajo tako imenovane eruptivne protuberance. Za razliko od prej omenjenih se te dvigajo v velike višine, celo več kot milijon kilometrov. Najpogosteje so v obliki loka, ki se hitro veča, razpade, snov pa pade nazaj v kromosfero.

Zadnja skupina pa so tako imenovane protuberance Sončevih peg. Samo ime pove, da so vedno povezane s skupinami peg. Njihove oblike določajo silnice močnih magnetnih polj, zato so vedno v obliki zanke.

KORONA

Najspektakularnejši pojav, ki ga s prostim očesom lahko vidimo ob popolnih Sončevih mrkih, je korona. Njena vlakna se širijo radialno

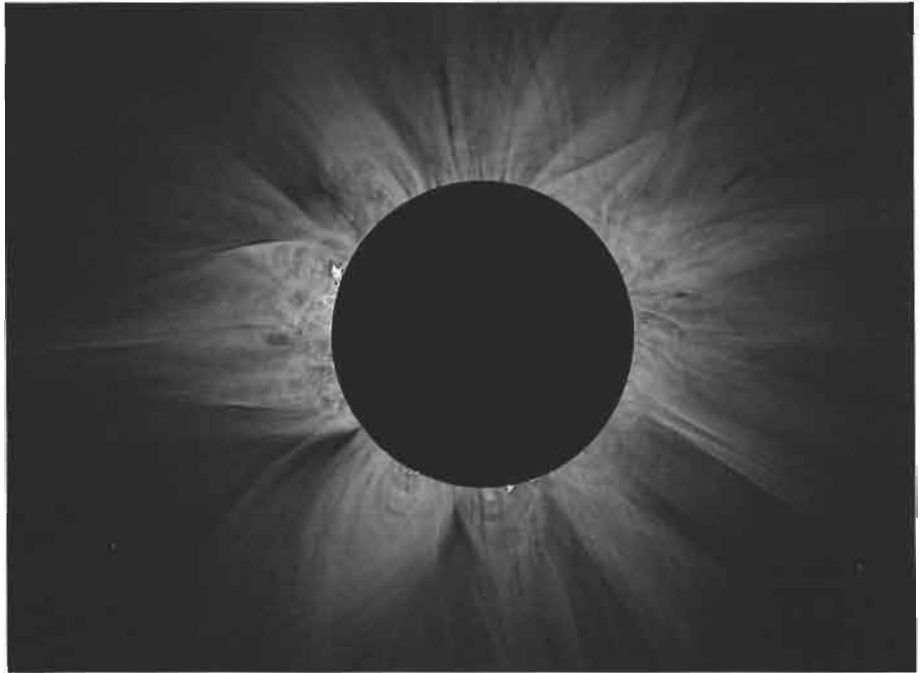
iz Sonca (slika 10). Opazimo lahko svetlejša vlakna, ki ponavadi nastanejo nad flokulami in poli. Korona je najvišja plast Sončeve atmosfere in se širi od 10.000 kilometrov nad fotosfero pa vse do 10 polmerov Sonca. Plini v njej so zelo redki in za astrofizike je to enkratni naravni laboratorij, v katerem lahko opazujejo obnašanje snovi v pogojih, ki jih je na Zemlji nemogoče ustvariti. Visoka temperatura korone povzroča večkratno ionizacijo lahkih elementov, zato visokoionizirano plazmo korone imenujemo tudi elektronski plin.

Kemijska sestava korone je taka kot drugod na Soncu. Plin je izredno redek in segret na temperaturo od milijon do nekaj milijonov kelvinov. Svetloba korone je sestavljena iz svetlobe njenih ioniziranih plinov, del pa je tudi odbita in sipana svetloba iz fotosfere, kar povzročajo delci prahu iz medplanetnega prostora. Korono delimo na notranjo in zunanjo. Notranja ali K korona je svetlejša in se širi do nekega 200.000 kilometrov nad kromosfero. Barva te plasti je podobna barvi Sonca v beli svetlobi. Temperatura plinov v notranji koroni je velika in znaša nekaj milijonov kelvinov. Njen spekter je zvezen in je brez absorpcijskih črt, ki so zabrisane zaradi velikih hitrosti elektronov, na katerih se svetloba sipa.

V spektru zunanje F korone ni svetlih emisijskih črt, temveč so absorpcijske, sam spekter je enak fotosferskemu, torej zvezen s Fraunhoferjevimi absorpcijskimi črtami. V tej plasti najdemo tudi že oblake delcev (ionizirani plin in prah), ki obkrožajo Sonce in sipajo njegovo svetlobo.

Oblika korone se spreminja z 11-letnim ciklom aktivnosti. V času največje aktivnosti je povečana, skoraj simetrična in krožna, v obdobju minimuma pa lahko v bližini ekvatorja vidimo posamezne dolge pramene, v bližini polov pa kratke.

V koroni opazimo številne oblike: pramene, loke (koronine silnice), perjanice, zgostitve in razredčitve, izbruhe... Korona zelo slabo seva v vidni svetlobi, močno pa v rentgenski. Če jo opazujemo v rentgenski svetlobi vidimo, da ni povsod enako svetla. Svetle koronarne lise (tako imenovane koronarne kondenzacije) imajo temperaturo višjo od milijona kelvinov in so v resnici nadaljevanje aktivnih področij v fotosferi. Hladnejša področja korone, kjer je snov manj gosta, vidimo kot temne votline, skozi katere lahko ionizirani delci odletijo v medplanetni prostor in naprej v vesolje. Za razliko od svetlih



Slika 10. Korona, posneta med popolnim mkom leta 2001. Foto: M. Druckmüller.

področij, kjer je magnetno polje bipolarno, zaprto, tako da silnice izhajajo iz Sončevega površja in se vračajo vanj, je v temnih področjih magnetno polje unipolarno, silnice so usmerjene iz Sonca v medplanetni prostor. Največje koronarne votline imajo premer več sto tisoč kilometrov in se lahko obdržijo več rotacij Sonca.

Korona je izredno močan vir radijskih valov, najmočnejši na vsem nebu. Večina pojavov na Soncu (pege, blišči...) vpliva na jakost sevanja radijskih valov.

SONČEV VETER

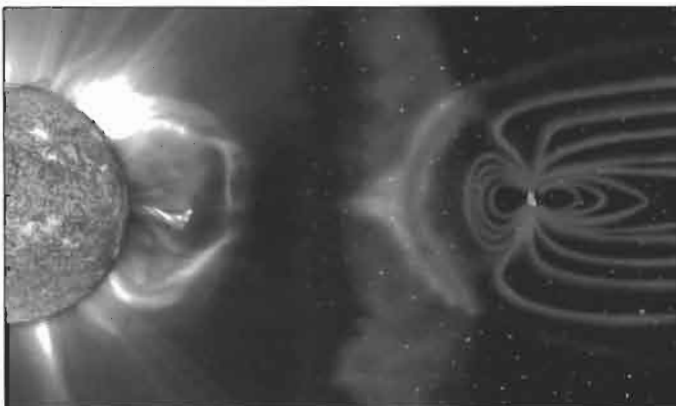
Sonce stalno odpiljuje zunanje dele svoje korone, delci v medplanetni prostor letijo s hitrostmi okrog 500 kilometrov na sekundo in do Zemlje potujejo približno 10 dni. Ta stalni tok ioniziranega plina se imenuje Sončev veter, sestavljajo pa ga električno nabiti delci, v glavnem elektroni in protoni, nekaj pa je tudi jeder težjih elementov. Sončev veter poganja tlak in visoka temperatura korone, ki je mejno področje Sonca. V koroni je plin tako segret, da se delci gibljejo s hitrostmi, ki presegajo ubežno hitrost s Sonca (ta na površju znaša 600 km/s), zato lahko pobegnejo v medplanetni prostor. Istočasno korona izgubljen snov nadomešča iz globljih plasti atmosfere. Če bi se dotok nove snovi prekinil, bi korona izginila v dveh dneh!

Sonce torej neprestano ispareva in tako izgublja maso, ki jo odnaša Sončev veter. Vendar pa ima Sončev veter izredno majhno gostoto. In kljub temu, da Sonce vsako sekundo odda med 10^8 in 10^9 kilogramov snovi, je na ta način od nastanka do danes izgubilo le 0,01 odstotka svoje mase.

Področje vpliva Sončevega vetra se imenuje heliosfera. Širi se vse do 100 astronomskih enot od Sonca, kar je mnogo dlje od Plutonovega tira. Za astrofizike je preučevanje delcev Sončevega vetra izrednega pomena, saj lahko na podlagi sestave bolje razumejo dogajanje na Soncu. Sončev veter in sevalni tlak fotonov sta bila bistvena dejavnika tudi pri nastanku planetov iz protoplanetarne meglice.



Astronomi danes že dobro poznajo mehanizme in delovanje najbližje zvezde. Veliko vprašanj pa še vedno nima pravega odgovora. In mnoga med njimi so povezana z Zemljo in življenjem na njej. ●



Slika 11. Sončev veter in Zemljina magnetosfera.