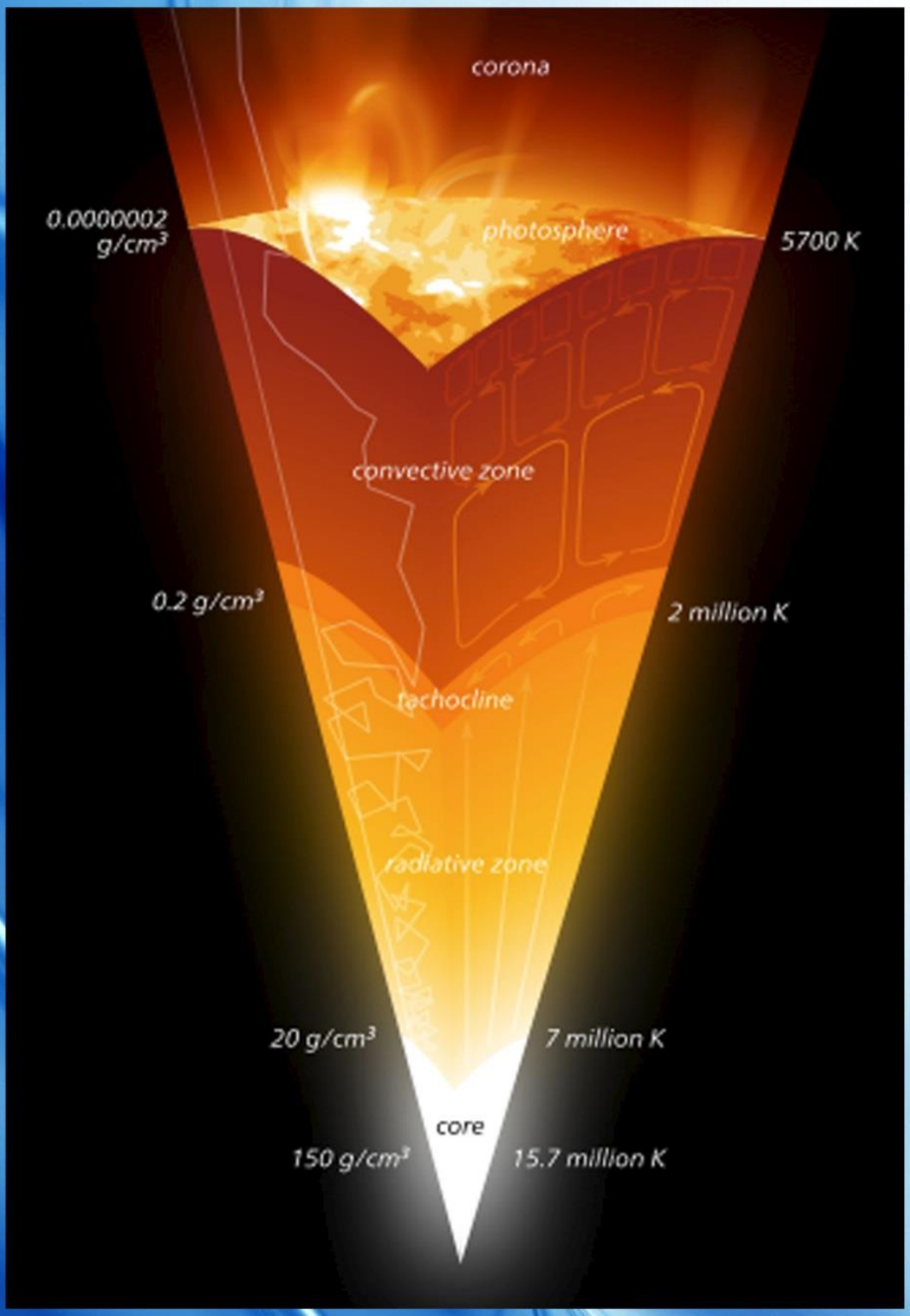
1.2 Stavba Slnka a termojadrová fúzia



Slnko sa skladá z viacerých vrstiev, konkrétne: jadra, zóny žiarivej rovnováhy a konvektívnej zóny.

1.2.1 Jadro

Najhlbšie, zhruba do troch desatín polomeru sa nachádza jadro. Teplota jadra je približne 14,5 milióna K a jeho hustota je približne 150 tisíc $kg.m^{-3}$. Tieto vysoké hodnoty teploty a hustoty znamenajú, že jadro Slnka je miestom, kde sa tvorí takmer všetka žiarivá energia mechanizmom termojadrovej fúzie štyroch jadier vodíka ${}^{1}_{1}H$ na jedno jadro hélia ${}^{4}_{2}He$. Termojadrová fúzia sa deje najmä pomocou tzv. protón-protónového reťazca, ktorého medziprodukty sú jadro deutéria (ťažkého vodíka) ${}^{2}_{1}D$ a jadro ľahkého hélia ${}^{3}_{2}He$:

$$ {}^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}D + e^{+} + \nu_e \qquad (2x) \qquad (1) $$

$$ {}^{2}_{1}D + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma \qquad (2x) \qquad (2) $$

$$ {}^{3}_{2}He + {}^{3}_{2}He \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \qquad (3) $$

pričom celková uvoľnená energia pripadajúca na jednu sériu reakcií je 26,2 MeV. Z reakcií vystupuje ako vedľajší produkt elektrónové antineutríno ν_e, odnášajúce asi 2 % uvoľnenej energie, pozitrón e^{+} a γ–fotón. Okrem vyššie uvedenej hlavnej vetvy protón-protónového reťazca môže reakcia bežať s menšou pravdepodobnosťou i vetvami zahŕňajúcimi berýlium. Ich schématický zápis (bez protónových čísel) je

$$ {}^{1}H({}^{1}H;\, e^{+},\nu_e){}^{2}D({}^{1}H;\, \gamma)\ \ {}^{3}He({}^{3}He;\, 2\,{}^{1}H)\,{}^{4}He \qquad (4) $$

$$ {}^{3}He({}^{4}He;\, \gamma){}^{7}Be({}^{1}H;\, \gamma){}^{8}B(\, e^{+},\nu_e){}^{8}Be({}^{4}He){}^{4}He \qquad (5) $$

$$ {}^{7}Be(e^{-},\nu_e)\,{}^{7}Li({}^{1}H;\, {}^{4}He){}^{4}He. \qquad (6) $$

Protón-protónový reťazec sa podieľa na tvorbe žiarivého výkonu Slnka asi 99%. Asi 1% energie je tvorené CNO cyklom, pri ktorom izotop uhlíka ${}^{12}_{6}C$ funguje ako katalyzátor:

$$ {}^{12}C({}^{1}H;\, \gamma){}^{13}N(\, e^{+},\nu_e){}^{13}C({}^{1}H;\, \gamma){}^{14}N({}^{1}H;\, \gamma){}^{15}O(\, e^{+},\nu_e){}^{15}N({}^{1}H;\, {}^{4}He){}^{12}C \qquad (7) $$

CNO cyklus sa väčším percentom podieľa na tvorbe energie u hmotnejších hviezd. Pretože pri termojadrovej fúzii dochádza k spaľovaniu vodíka na hélium, v jadre Slnka s postupom času klesá obsah vodíka a pribúda obsah hélia. Héliový popol sa ukladá vo vnútornom jadierku zasahujúcom v súčasnosti približne do 3% polomeru Slnka. Obsah vodíkového paliva v jadre Slnka je však natoľko veľký, že Slnko bude môcť jeho spaľovaním produkovať energiu ďalších približne 5 miliárd rokov.

Správnosť teoretických modelov slnečného jadra bola potvrdená prvýkrát koncom 60-tych rokov 20. storočia Davisovým experimentom (oceneným Nobelovou cenou za fyziku v roku 2002), v ktorom bol pozorovaný tok slnečných neutrín pochádzajúcich z inverzného β-rozpadu izotopu ${}^{8}B$ na ${}^{8}Be$ v druhej vetve protón-protónového reťazca. Hoci bol pozorovaný tok neutrín menší ako pôvodné teoretické predpovede, tento problém sa podarilo vyriešiť

objavom oscilačnej povahy neutrín v dôsledku ich nenulovej hmotnosti. Výsledky teoretických modelov sú v súčasnej dobe v dobrej zhode s pozorovaniami.

Nad jadrom Slnka sa nachádza zóna žiarivej rovnováhy. Je to miesto, ktorým sa fotóny uvoľnené pri termojadrových reakciách pomaly dostávajú smerom k povrchu Slnka. Teplota a hustota s narastajúcou vzdialenosťou od jadra klesajú, látka je však dostatočne nepriepustná pre žiarenie. Dochádza k interakciám fotónov s nabitými časticami, pri ktorých sa fotón absorbuje a neskôr opäť vyžiari do náhodného smeru. Tento proces sa opakuje a výsledná „difúzia“ fotónu cez zónu žiarivej rovnováhy trvá približne 1 milión rokov.

Zóna žiarivej rovnováhy končí približne v 70 % polomeru Slnka. Nad ňou leží konvektívna zóna, kde je energia smerom von prenášaná prúdením vo forme stúpajúcich bublín horúcejšej plazmy podobne ako vo variacej sa vode. Vrcholky konvektívnych prúdov môžeme pozorovať ako fotosférickú granuláciu a supergranuláciu. Typický priemer jednotlivých granúl je 1000 km a doba ich života je asi 5 minút. Naproti tomu priemer supergranúl je asi 10 tisíc km a doba života približne deň.

- ✓ **Radiačná zóna**

Má teplotu 7 000 000 K až 2 000 000 K. Je to priestor medzi jadrom Slnka a styčnou vrstvou. Teplota tejto vrstvy už nedostačuje na prebiehanie termojadrových reakcií. Všetka energia vznikajúca v jadre sa cez túto oblasť prenáša žiarením. Vzhľadom na veľkú hustotu prostredia a neustále pohlcovanie fotónov sa žiarenie pohybuje smerom k povrchu len veľmi pomaly. Zároveň klesá jeho vlnová dĺžka.

- ✓ **Tachoklíma**

Tachoklíma je medzivrstva. Táto pomerne tenká vrstva bola objavená meraniami družice SOHO. Predpokladá sa, že tu sa generuje magnetické pole Slnka. Dochádza tu tiež k zmene rýchlosti prúdov plazmy a zmene rotačnej rýchlosti.

- ✓ **Konvektívna zóna**

Konvektívna zóna je najvrchnejšia časť vnútra Slnka a začína asi 200 km pod viditeľným povrchom Slnka. Energia sa z vnútorných oblastí do vonkajších prenáša prúdením - konvekciou. Pri konvekcii sa prenášaný plyn rýchlo ochladzuje a rozpína. Má teplotu 2 000 000 K až 6 000 K.

- ✓ **Fotosféra**

Fotosféra je viditeľný povrch Slnka, na ktorom sa zjavujú tmavé miesta - slnečné škvrny alebo naopak jasné fakulové polia. Má hustotu 1023 častíc na m^3. Teplota je asi 5 700 K. Fotosféra je najchladnejšia časť Slnka. Jej hrúbka je asi 200 až 300 km. Na povrchu Slnka je pozorované veľké množstvo vertikálnych pohybov. Celú fotosféru pokrývajú slnečné granuly - stúpajúce a klesajúce plazmové útvary s veľkosťou asi 1000 km. Ich predĺžením vznikajú spikuly, niekoľko tisíc kilometrov vysoké plazmové útvary zasahujúce až do chromosféry. Ďalšie vertikálne pohyby sa nazývajú supergranulácie, obrie cely a slnečné oscilácie. Slnečné

oscilácie vznikajú vďaka zvukovým vlnám v konvektívnej vrstve Slnka. Ich skúmaním sa zaoberá helioseizmológia.

- ✓ **Chromosféra**

Chromosféra je vrstva silno ionizovaného plynu (plazmy) hrubá asi 15 000 km. Je to spodná časť slnečnej atmosféry. Počas zatmenia Slnka ju je vidno ako červenkastý svetelný úkaz. Má hustotu plynu 10-15 $g.cm^{-3}$. Teplota so stúpajúcou výškou vzrastá a jej priemer je 300 000 K. V chromosfére pozorujeme úkazy zvané flokuly, fibrily, protuberancie a erupcie. Z fotosféry sem zasahujú spikuly, vrcholky konvektívnych prúdov (granúl).

- ✓ **Prechodová oblasť**

Prechodová oblasť (v niektorých zdrojoch sa neuvádza) je tenká a nepravidelná vrstva slnečnej atmosféry, ktorá oddeľuje horúcu korónu od chladnejšej fotosféry. Teplota sa tu náhle mení z 20 000 K (na hranici s chromosférou) na 1 milión K (na hranici s korónou). Táto vrstva sa skúma hlavne v ultrafialovej časti spektra.

- ✓ **Koróna**

Koróna je hrubá 15 000 km až 1 alebo 2 milióny km. Je to vrchná vrstva slnečnej atmosféry. Jej teplota dosahuje 1 000 000 K. Príčina vysokej teploty koróny dodnes nie je uspokojivo vysvetlená. Má hustotu 1011 častíc na m^3. Hustotu plynu nej je 10-19 $g.cm^{-3}$. Aj v koróne sa vyskytujú erupcie a protuberancie. Za vrchnú časť koróny možno považovať celú oblasť, kam siaha slnečný vietor, až po heliopauzu.