

Hogyan termelik a csillagok az energiát?

Nagyon tanulságosak azok a gondolatok, amelyeket Dr. Kulin György fogalmazott meg Az ember kozmikus lény című könyvében: „A Nap másodpercenként $3,86 \cdot 10^{26}$ J energiát sugároz, ami megfelel $3,86 \cdot 10^{23}$ kilowatt teljesítménynek. A Föld azonban 150 millió km-re jár a Naptól, ezért keresztmetszetére a kisugárzott napenergiának mindössze 2,2 milliárdod része jut, azaz $1,6 \cdot 10^{14}$ kW teljesítmény. A nagy számok azonban soha nem annyira nem szemléletesek, mint az arányok. Ilyen összehasonlítás pl. az, hogy a Nap egyetlen másodpercben annyi energiát sugároz szét kozmikus környezetébe, amennyit a Föld egész társadalma – a mai szinten számítva – termelésben, közlekedésben, háztartásban egy millió év alatt használna fel. Talán még szemléletesebb: a Föld egésze egy negyedóra alatt kap annyi energiát a Naptól, amennyi az emberi társadalom egy évi energiaigénye. Minthogy egy évben több, mint 30 000 negyedóra van, úgy is mondhatjuk, hogy az emberiség mai tevékenysége a Nap földre jutó sugárzó energiájának harmincezred részét használja fel.

Meg kell mindjárt itt jegyeznünk, hogy az emberi társadalom felhasznált energiája nem abból származik, amely most éri el a Földet. A termeléshez, a közlekedéshez, stb. az ún. hagyományos energiahordozókat, a szenet, olajat és földgázt hasznosítjuk, amelyek tíz- és százmillió évek alatt képződtek, és kémiai kötésekben raktározták el a régmúlt napenergiáját. ... Elégetésükkor végeredményben az a napenergia szabadul fel, amely annakidején a kémiai kötésekkel létrehozta. A növények által előállított táplálékban is kémiai kötésekben tárolódik a Nap energiája. A táplálkozásban, az emésztésben, a biológiai hőtermelésben a vegyületek lebomlása folyamán az a napenergia szabadul fel, amely annakidején a kémiai kötésekkel létrehozta.”

A Nap című fejezetben már szó esett arról, hogy évezredekken át homály fedte csillagunk sugárzásának valódi okát. Csak 1937-ben sikerült ezt – a magfizika segítségével – megmagyarázni. A magfúzióról, azaz a magegyesülésről van szó.

A csillagászatban használjuk az *energiaprodukciónak* kifejezést. Ez azt jelenti, hogy a csillag 1 kilogramm tömegű anyaga mekkora energiamennyiséget állít elő. A Nap esetén ez $1,94 \cdot 10^{14}$ J, az UW CMa csillagnál 9(!) J, míg a Szíriusz fehér törpe kísérője esetén $5 \cdot 10^7$ J értéket állapítottak meg.

Korábban már szó volt a csillagunk központi részén lejátszódó fúziós folyamatról. Most részletesen ismertetjük ezt.

A HRD fősorozati (főág) csillagaiban a hidrogén-hélium fúzió termeli az energiát. Ez kétféleképpen valósulhat meg. A proton-proton és a szén-nitrogén ciklussal. Mindkettőnek az a lényege, hogy négy hidrogén atommagból egy hélium mag keletkezik.

A hidrogén magjának (proton) tömege: $1,6735 \cdot 10^{-24}$ g. Négy proton tömege: $6,694 \cdot 10^{-24}$ g. A hélium atommag tömege: $6,6458 \cdot 10^{-24}$ g. Azonnal szembeűnik, hogy a két tömeg értéke eltér egymástól! A különbség pedig: $\Delta m = 4,82 \cdot 10^{-26}$ g. Ez csupán hét ezreléke az

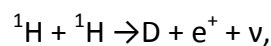
eredeti (négy proton) tömegnek. Az Einstein által felismert összefüggés alapján a keletkező energia:

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 4,3 \cdot 10^{-12} \text{ J.}$$

Mivel 1 kg hidrogén 10^{26} darab protont tartalmaz, így ennek fúziója során $6,5 \cdot 10^{14}$ J energia keletkezik.

A mérések alapján tudjuk, hogy a Nap másodpercenkénti energiatermelése $3,86 \cdot 10^{26}$ J, ezért minden másodpercben kb. $6 \cdot 10^{11}$ kg protonnak kell átalakulnia alfa részecskévé. Azaz másodpercenként $4 \cdot 10^9$ kg tömegből „születik” az energia. Ez azt jelenti, hogy a tömegdefektus értéke 400 ezer tonna másodpercenként. Ez csak földi mértékkel tűnik óriásinak, a Nap tömegéhez képest elenyésző anyagmennyiség. Ha a Nap tisztán hidrogénből állna – ami persze nem igaz –, akkor a jelenlegi sugárzási intenzitása 100 milliárd évig tartana. A reális számítások szerint csillagunk még legalább 10 milliárd évig biztosítani tudja a földi élet fenntartásához szükséges energiát. (Csillagunk kb. 5 milliárd éves.)

A proton-proton ciklus a magfizikai számítások alapján az alábbiak szerint játszódik le (animáció: youtube proton-proton chain reaction – fusion in stars):



ahol ${}^1\text{H}$ a protont, D a *deutériumot* (amely egy protonból és egy neutronból áll), e^+ a *pozitront* (az elektronnal azonos tömegű, de ellentétes töltésű részecske), a ν pedig a *neutrínót* jelöli. A pozitron rövid idő múlva találkozik egy elektronnal és *pármegsemmisülés* (*annihiláció*) történik, melynek eredménye két γ -foton lesz. Ez a folyamat is gyönyörűen tükrözi az Einstein által 1905-ben leírt összefüggést. Tehát egy részecske és annak anti párja találkozásakor elektromágneses sugárzás születik. Az antianyag lehetőségét *Paul Dirac* (1902-1984) Nobel-díjas angol fizikus vetette fel először. Elgondolását *Grigorij Gamow* (1904-1968) orosz fizikus írta le *A fizika története* című könyvében. „Képzeljünk el egy mélyvízi halat, amely soha nem kerül az óceán felszínére és ezért nem tudja, hogy a víz valahol fölötte véget ér. Ha ez a hal elég értelmes ahhoz, hogy a környezete felől elmélkedjék, akkor még csak nem is gondol a vízre mint „közegre”, hanem „szabad térnek” tekinti azt. ... Elképzeltük, hogy kialakult nála a gravitáció fogalma üres söröspalackok és más hulladékok, sőt az óceán fenekére elsüllyedő hajók megfigyelése által. De aztán egy szép napon az egyik elsüllyedt hajóba szorult levegő kiszabadult, és a mi intelligens halunk az óceán felszíne felé szálló, ezüstösen csillámló buborékok raját figyelte meg. A hal természetesen nagyon meg volt lepve, és kellő megfontolás után arra a következtetésre jutott, hogy ezeknek az ezüst gömböknek negatív tömegük van. Mert hát hogyan mozoghatnak felfelé, amikor a nehézkedés mindent lefelé húz?”

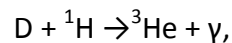
A deutérium előfordul a természetben. A közönséges víz H_2O összetételű, de minden ötszázadik molekula D_2O , azaz nehézvíz.

Aki pedig a neutrínókról szeretne többet tudni, annak figyelmébe ajánljuk *Toró Tibor: A neutrínó* című könyvét.

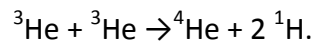
A fent leírt folyamat – mely több száz millió évig tart – során felszabaduló energia nem szolgálja teljes egészében a csillag központi részén lévő hőmérséklet növekedését, hiszen – az elméleti számítások alapján – a neutrínó, mely szinte akadály nélkül halad át a csillag anyagán, egy bizonyos energiát magával visz.

A számítások alapja: a központi hőmérséklet kb. 15 millió K, a sűrűség kb. 100 g/cm^3 , a nyomás pedig a földi érték több milliárdszorosa.

A második lépés:

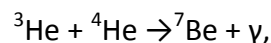
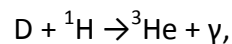


a ${}^3\text{He}$ két protonból és egy neutronból áll. Mint látható, itt is gamma sugárzás keletkezik. A számítások szerint mindössze néhány másodperc alatt történik mindez. Az utolsó lépés:

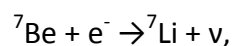


A néhány százezer éven át tartó folyamat során jön létre a hélium mag (α részecske), és két proton is keletkezik.

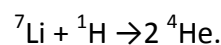
A proton-proton folyamat más módon is megvalósulhat. Például:



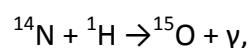
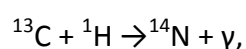
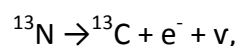
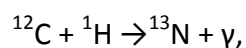
itt ${}^4\text{He}$ a hélium magját, ${}^7\text{Be}$ a berilliumét jelenti.

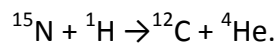
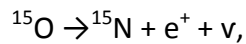


a ${}^7\text{Li}$ a lítiumot jelzi.

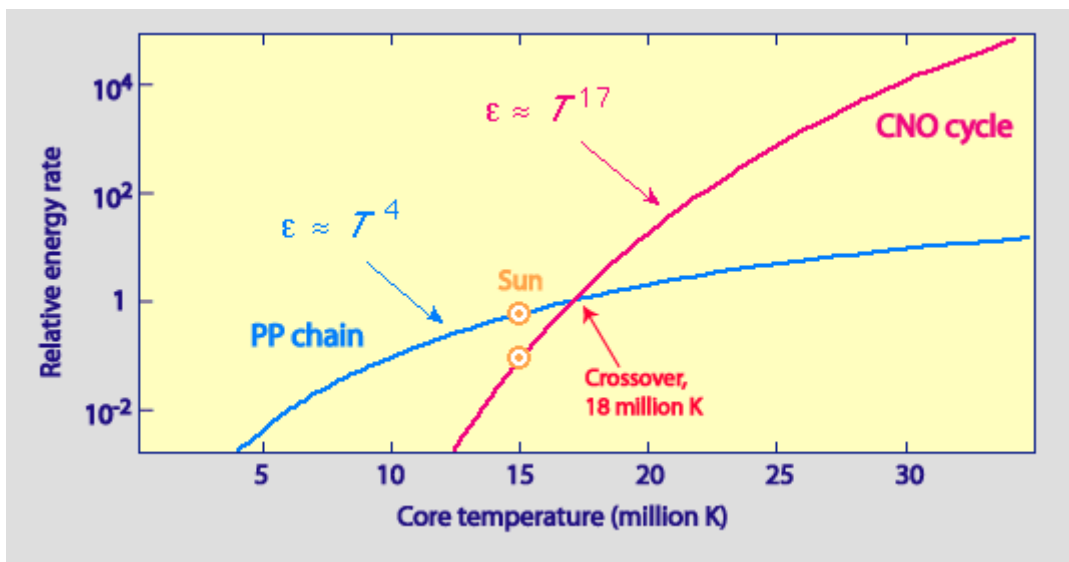


Az olyan csillagok központi részén, amelyek szén is tartalmaznak, az energiatermelő folyamatban ez az elem katalizátor (közvetítő) szerepet játszik, a *szén-nitrogén* ciklus fogja biztosítani az energiát.





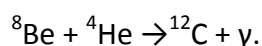
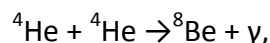
A Naphoz hasonló tömegű csillagok esetében a proton-proton folyamat kerül előtérbe. A szén-nitrogén ciklus már ott is megjelenik, de a nagyobb tömegű csillagok központi részén válik uralkodóvá. Ez a Napnál nagyobb tömegű csillagokra jellemző, melyek belsejében 50 millió fokat is elérhet a mag hőmérséklete.



A vízszintes tengelyen a csillag magjában uralkodó hőmérsékletet, a függőlegesen pedig a két energiatermelő folyamat arányát látjuk. Sun = Nap. A szén-nitrogén folyamatot CNO ciklusnak is szokták nevezni. (Forrás: Mike Guidry – Tennessee Egyetem.)

A fenti ciklus – az elméleti számítások szerint – jócskán nagyobb mennyiségű energiát állít elő, mint a proton-proton folyamat. Ennek megfelelően a csillag hamarabb emészti fel hidrogén készletét.

A hagyományos égéshez hasonlítva a hidrogén a „tüzelőanyag”, a hélium pedig a „hamu”. De a 100 millió K hőmérsékletű „atomkohóban” a hélium lesz a „tüzelőanyag”. Ilyen magas hőmérséklet csak a nagy tömegű csillagok belsejében jöhet létre. Az energiát a *Salpeter folyamat* biztosítja. A reakciót *Edwin Ernest Salpeter* (1924-2008) osztrák asztrofizikus írta le.



Ez a folyamat akkor indul be, amikor a csillagok központi részén a protonok jelentős része elfogyott, így a korábban említett energiatermelő folyamatok már nem játszódhatnak le a centrumban.

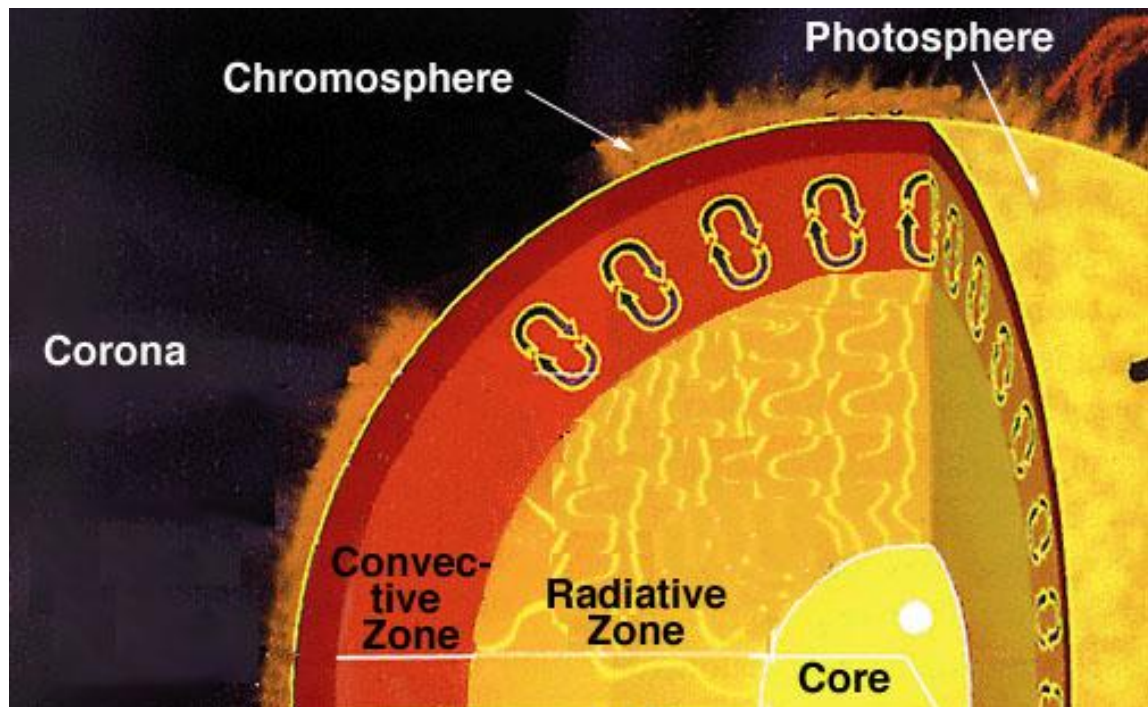
100-250 millió K közötti hőmérséklet esetén lesz a héliumból szén. 1 milliárd K-nél a szén már oxigénné, neonná és kalciummá épül fel. 3 milliárd K-es hőmérséklet esetén a magasabb rendszámú elemek jönnek létre a vasig bezárólag. Ti. ahhoz, hogy két vas atommag egyesüljön már energiát kell befektetni. Itt végéhez érkezik a fúziós lánc. De mi történik ezután? Erről később lesz szó.

Mikor van egy csillag egyensúlyi állapotban?

A belsejükben keletkező energia kifelé halad, így *sugárnyomást* hoz létre. Mivel a csillagokat izzó gázgömböknek tekintjük, ezért figyelembe kell venni a hőmérsékletükből adódó *gáznyomást* is. Mindenki jól tudja, ha egy palackban lévő gázt felmelegítünk, akkor annak nyomása megnő. (Például, ha a tűző napon áll egy autó, akkor a gumitömlőben lévő levegő nyomása jelentősen megváltozik. A különböző illatszerszóró palackokra nem véletlenül írják rá, hogy melegíteni vagy tűző napra tenni szigorúan tilos.) A két kifelé ható erővel szemben hat a *gravitáció*, vagyis a tömegvonzás. *Ha a három hatás eredője nulla, akkor a csillag egyensúlyban van, átmérője nem változik.*

Hogyan jut a keletkezett energia a felszínre?

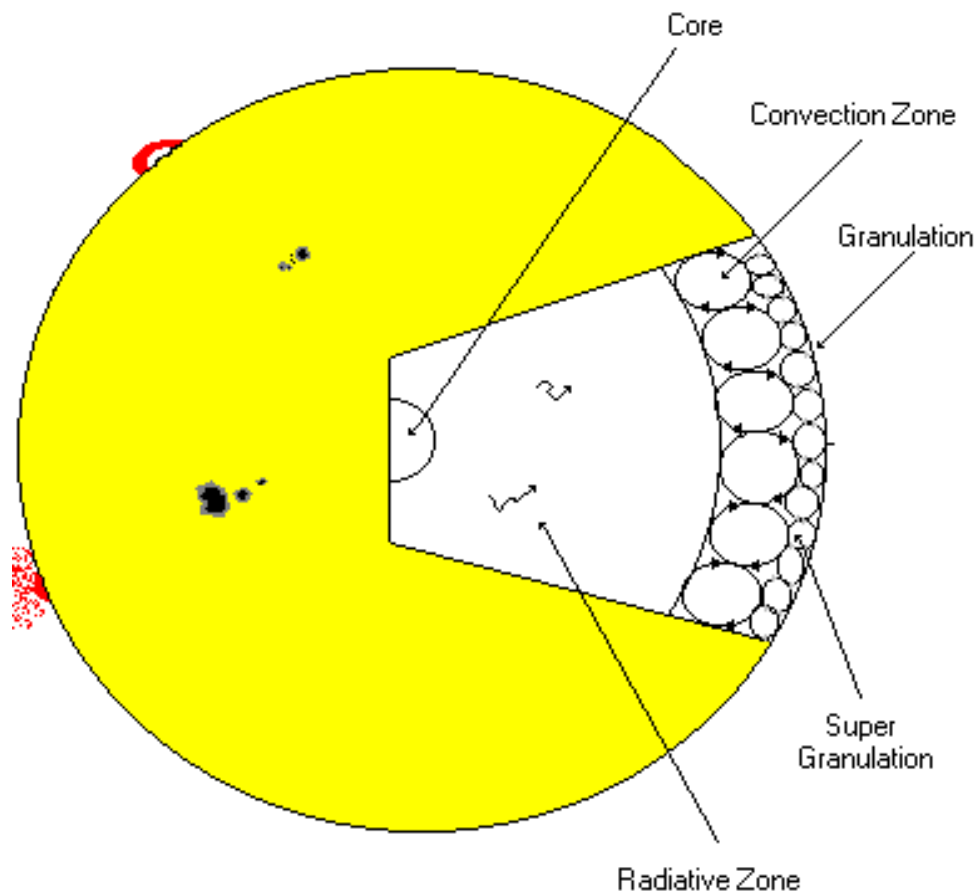
A magfúzió által létrejött energia sugárzás és áramlás (konvekció) révén éri el a felszínt. A Nap esetén ez 1 millió évig tart. A csillagok többségénél a sugárzási energiatranszport dominál, de számos csillagnál (pl. Nap) a konvektív energiaszállítás is komoly szerephez jut.



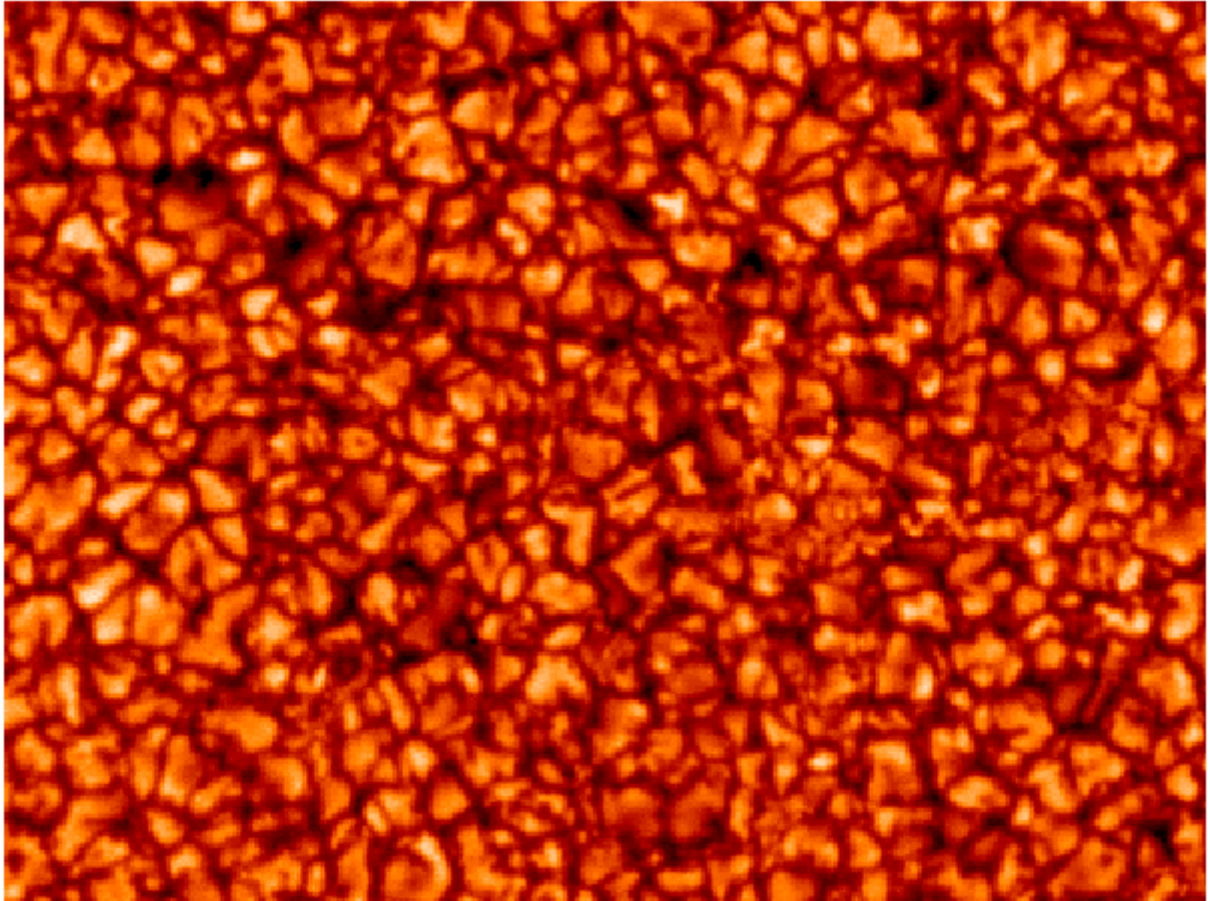
A Nap szerkezete. Legfelül találjuk a magot, majd a sugárzási tartomány és a konvektív zóna látható. A rajz a légkör három rétegét is feltünteti. (Forrás: khadley.com.)

A magban születő sugárzást elsősorban gamma-fotonok alkotják. Ez a legnagyobb energiájú elektromágneses sugárzás. Ezek indulnak a felszín irányába. Zeg-zugos útjuk során figyelembe kell venni a *csillag anyagának – a sugárzásra vonatkozó – átlátszóságát (opacitását)*. Minél nagyobb az átlátszóság értéke, annál kisebb lesz a fotonok elnyelődése. Ez pedig összefüggésben van a sűrűséggel is. A megfigyelésekre alapozott számítások azt mutatják, hogy a kifelé haladó fotonok energiája folyamatosan csökken, így a Nap felszínéről már a gamma fotonnál lényegesen kisebb energiájú sugárzás fog a világűrbe távozni.

A központi tartománytól kifelé haladva a hőmérséklet folyamatosan csökken. Konvektív áramlás csak akkor jöhet létre, ha egy ún. tömegelem (cella) hőmérséklete nagyobb lesz, mint a környezeté. Ekkor nyilván nyomáskülönbség lép fel, mely felhajtóerőt hoz létre. Tehát ez a cella felfelé indul el. Ha kifelé haladva a hőmérséklet különbség értéke folyamatosan nő, akkor a tömegelem egyre gyorsabban mozog a felszín irányába, míg végül eléri azt. Csillagunk felületén látjuk ezeket. Ez a *granulációs (szemcse) szerkezet*.



A konvekciós zóna és a granuláció. (Forrás: NIAAS.)



A granulák. (Forrás: NASA.)