

**Varga Andrea: Geokémia olvasóleckék
4. olvasólecke****Az elemkeletkezés geokémiai vonatkozásai**

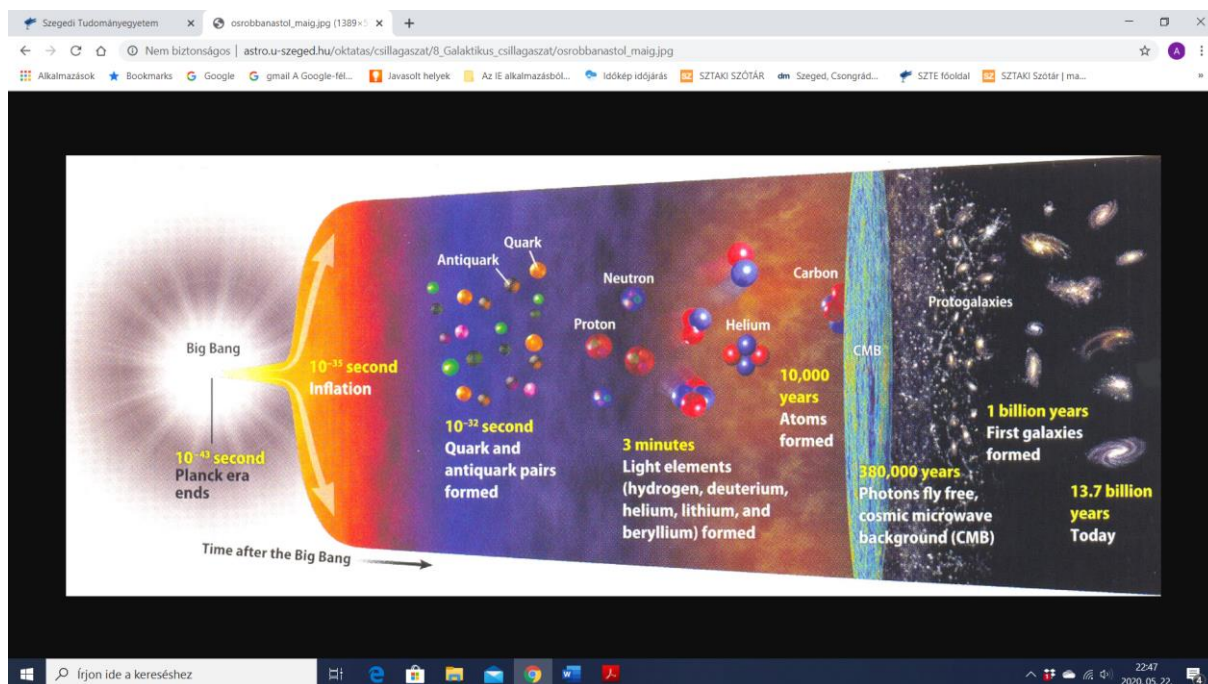
Az olvasólecke célja: a természetben előforduló elemek eredetét magyarázó tudományos elméletek bemutatása; az Ősrobbanás-elmélet és az azzal összefüggő kísérleti tények ismertetése; az elemszintézis bemutatása és magyarázata a csillagok fejlődésének tükrében (a feldolgozáshoz szükséges idő kb. 60 perc)

A világegyetem eredete: az Ősrobbanás-elmélet (Big Bang Theory)

A világegyetem – és benne az elemek – eredetével kapcsolatban még napjainkban is a leginkább elfogadott természettudományos magyarázat az **Ősrobbanás-elmélet** (angolul *Big Bang Theory*). Ez a világegyetem kialakulását mintegy 14–15 milliárd évvel ezelőtti időpillanatba helyezi (~13,7 milliárd éves a legősibb ismert csillag), amikor a világegyetem összes anyaga egy nagy sűrűségű (~10⁹⁶g/cm³), nagy nyomású (komprimált) és nagy hőmérsékletű (~10³² K) térrészben koncentrált. Ez az **„ősmag”** – pontosan nem ismert okból – hirtelen felrobbant, ami a tágulással, továbbá az anyag és a sugárzás egyenletes szétszóródásával párhuzamosan a sűrűség és a hőmérséklet csökkenésével járt.

A hőmérséklet csökkenése (~10¹² K-re) tette lehetővé, hogy **az erőhatások négy fő típusa** (gravitáció elkülönülése: „kvark-korszak”; erős magerők elkülönülése az elektromágneses erőhatásoktól, majd a gyenge magerők elkülönülése) **és az elemi részecskék főbb típusai kialakuljanak**. A részecske–antirészecske kölcsönhatások eredményeként a kvarkokból protonok és neutronok képződtek, majd lehetőség nyílt az elektronok stabilizálódására is. Mindez az ősrobbanást követő első másodpercben lezajlott. Ezt követően az erős magerők kölcsönhatásának következményeként a protonok és a neutronok egyesültek, kialakítva a deutérium- (1 proton és 1 neutron) és héliumatommagokat (2 proton és 1 vagy 2 neutron), ami az elemszintézis első fázisának tekinthető. A feltételezések szerint mintegy 10–500 másodperccel az ősrobbanást követően a teljes világegyetem egy olyan gigantikus méretű **homogén fúziós reaktor**ként működött, amelyben a hidrogén mennyiségének jelentős része héliummá alakult át (~10⁹ K). Ezt megelőzően – a magas hőmérséklet miatt – héliumatommag nem keletkezhetett, mert az erős sugárzás miatt azonnal protonokra és neutronokra bomlott volna.

A kvarkok az elemi részecskék egy csoportját alkotják. Az atommagban található nukleonok (proton és neutron) három-három kvarkból épülnek fel.



Az Ősrobbanás-elmélet szemléltetése

(http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/8_Galaktikus_csillagaszat/gal_kozm4.html)

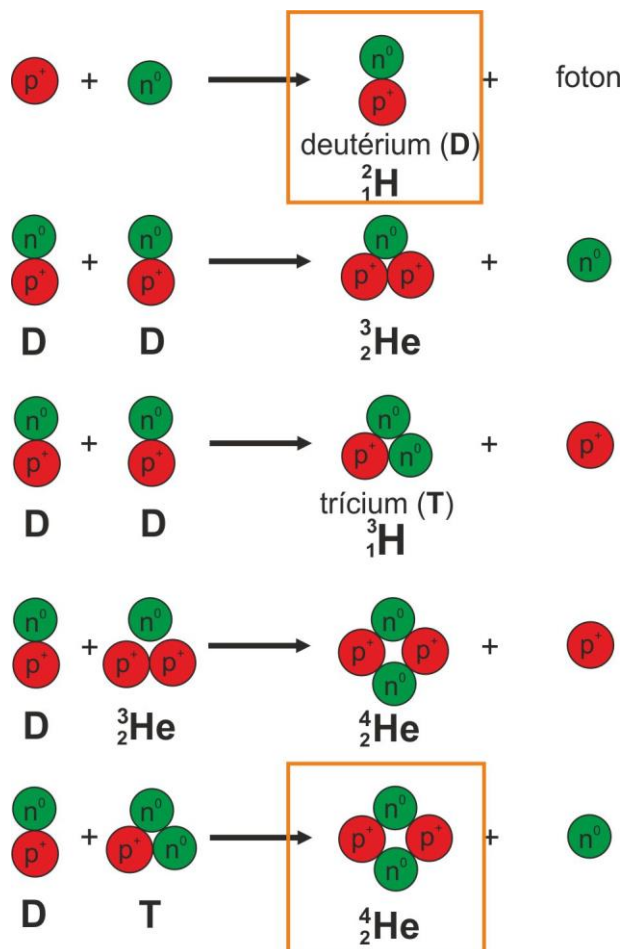
Az Ősrobbanást és az azt követő folyamatokat nagyon nehéz elképzelni. Ebben segíthetnek azok a szemléltető rajzok, amelyeket a világhálón böngészve találhatunk

(<https://www.csillagaszat.hu/tudastar/kozmozologia/02-az-osrobbanas-modell-es-bizonyitekai/>,
<http://universebefore.weebly.com/big-bang-theory.html>)

A világegyetem további kiterjedése azt eredményezte, hogy a részecskék sűrűsége lecsökkent arra a kritikus szintre, ami már nem tette lehetővé a további magfúziót. Az elméleti számítások szerint mintegy 8 percnyi időtartam alatt a világegyetem tömegének egynegyede (~25%) héliumatommaggá alakult, míg háromnegyede hidrogén formájában maradt jelen. Ezzel párhuzamosan ~10⁻³% mennyiségben deutérium- és ~10⁻⁶%-ban lítiummagok képződtek (0,001% D- és 0,000001% Li-atommag). **Az Ősrobbanás-elmélet a következő izotópok szintézisére nyújt egyértelmű magyarázatot (kozmológiai nukleoszintézis): H, D, T, ³He, ⁴He (⁷Li),** azaz az ismert elemek közül a hidrogén és a hélium kiemelkedő gyakoriságát bizonyítja a világegyetemben.

Az Ősrobbanás-elméletet **négy kísérleti tény** alapozta meg. Ezek közül az első és legfontosabb a hélium előfordulásának aránya a világegyetemben, ami mindenhol ~25%. A második megfigyelés szerint a deutérium még a csillagközi felhőkben is kimutatható az Ősrobbanás-elmélet alapján várt

állandó koncentrációban (0,001%), ami azt jelzi, hogy a deutérium egyetlen forrása ez az esemény volt (a magas hőmérséklet miatt nem keletkezik a csillagokban).



Az ősrobbanáshoz kapcsolódó fúziós reakciók (kozmológiai nukleoszintézis): a hélium (He) és a deutérium (D) világegyetemben megfigyelt közel állandó koncentrációját az Ősrobbanás-elmélet kísérleti bizonyítékainak tekintik

A harmadik kísérleti megfigyelés a világegyetem folyamatos tágulását jelzi: ez a **csillagok vöröseltolódása**. A távoli galaxisokról érkező fény annál inkább a látható spektrum vörös tartományai felé mozdul el, minél nagyobb a fényforrás távolsága (Hubble megfigyelése, 1929). Az időben visszafelé történő adatértelmezés alapján az ősrobbanás ~15 milliárd évvel ezelőtt játszódhatott le. Ez jó összhangban van egyéb becslések eredményével.

A negyedik kísérleti tény az **izotróp kozmikus háttérsugárzás** létezése. Ez a mindenhol megjelenő mikrohullámú sugárzás mintegy 2,7 K hőmérsékletű feketetest-sugárzásnak

felel meg. Az ősrobbanás elhaló maradványának tekintik, hőmérséklete a világegyetem tágulása miatt csökkent le (pl. [http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/8 Galaktikus csillagaszat/gal kozm3.html](http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/8_Galaktikus_csillagaszat/gal_kozm3.html)).

Az ősrobbanás-elmélet segítségével egyrészt a bemutatott kísérleti megfigyeléseket, másrészt a legkisebb rendszámú elemek keletkezését tudjuk megmagyarázni. Egyértelműen választ ad a hidrogén és a hélium szintézisére és gyakoriságára, továbbá az anomálishan kis koncentrációban előforduló könnyű elemek (pl. ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{11}\text{B}$) keletkezésére is lehetőséget biztosít. Ez utóbbiak azonban az ősrobbanást követően hamar elbomlottak, szintézisüket inkább hasadási (fragmentálódási) reakciókhoz kötik (lásd *x-folyamat*).

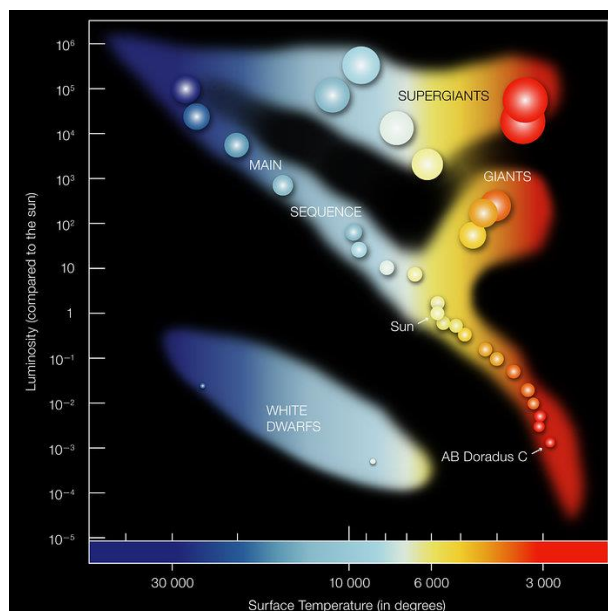
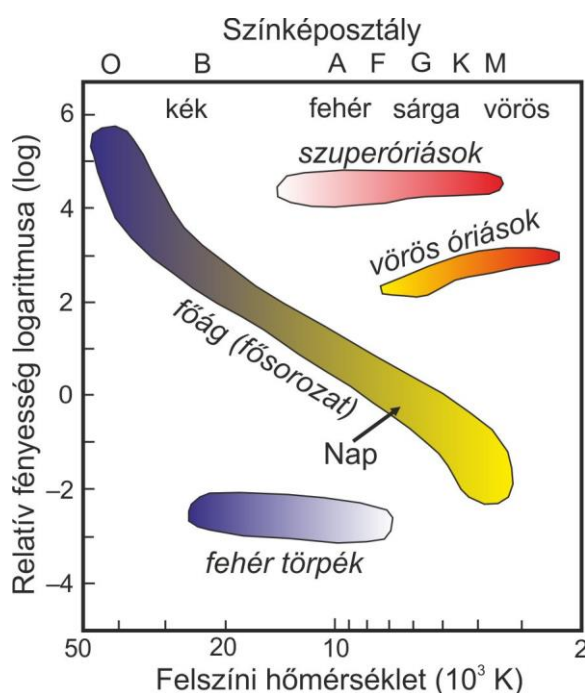
Elemszintézis a csillagokban

Az ősrobbanást követően mintegy 0,5 milliárd évvel a világegyetemet alkotó közel homogén és forró gázban a gravitáció miatt az anyag sűrűsége helyenként megnövekedett. Az így létrejött inhomogenitásokból protocsillagok, majd csillagok keletkeztek. A csillagok fejlődésének első lépése egy gravitációs összehúzódnási folyamat, amit a lehűlt H és He sűrűsödése vált ki. Ez hőenergiát termel, így folyamatosan emeli a hőmérsékletet a csillag magjában. Amikor ez eléri a $\sim 10^7$ K hőmérsékletet, a csillag magjában tartós nukleáris reakciók indulhatnak be (pl. hidrogénégés: a hidrogén héliummá alakulása, azaz magfúziós reakciója). **Az elemek szintézise, illetve a tapasztalt mennyiségi eloszlása több lépcsőben írható le olyan nukleáris reakciókkal, amelyek a csillagok különböző fejlődési stádiumában játszódtak, illetve játszódnak le.** A folyamatok megértéséhez ezért először meg kell ismernünk a csillagok legfontosabb jellemzőit.

A csillagokból hozzánk érkező fény színe függ a csillag felületi hőmérsékletétől, a fény spektroszkópiai vizsgálati eredményei a csillagok kémiai (elemi) összetételét is megadják. A színekép felhasználható továbbá a csillagok osztályozására. Egy csillag „fényessége” a csillagban lejátszódó exoterm magreakciók eredménye. Ez befolyásolja a felszíni hőmérsékletet: a nagy felszíni hőmérsékletű csillagok kék–fehér színűek, a hőmérséklet csökkenésével fokozatosan sárgának, illetve vörösnek látszódnak. A csillagok felszíne jóval alacsonyabb hőmérsékletű, mint a magjuk.

A csillagokat jellemző paraméterek között összefüggések léteznek. Kapcsolat van a csillagméret (sugár) és a fényesség (fényteljesítmény, azaz luminozitás), a sugár és a tömeg, valamint a felszíni hőmérséklet és fényesség (abszolút vagy relatív) között. Ha a felszíni hőmérséklet (és/vagy a

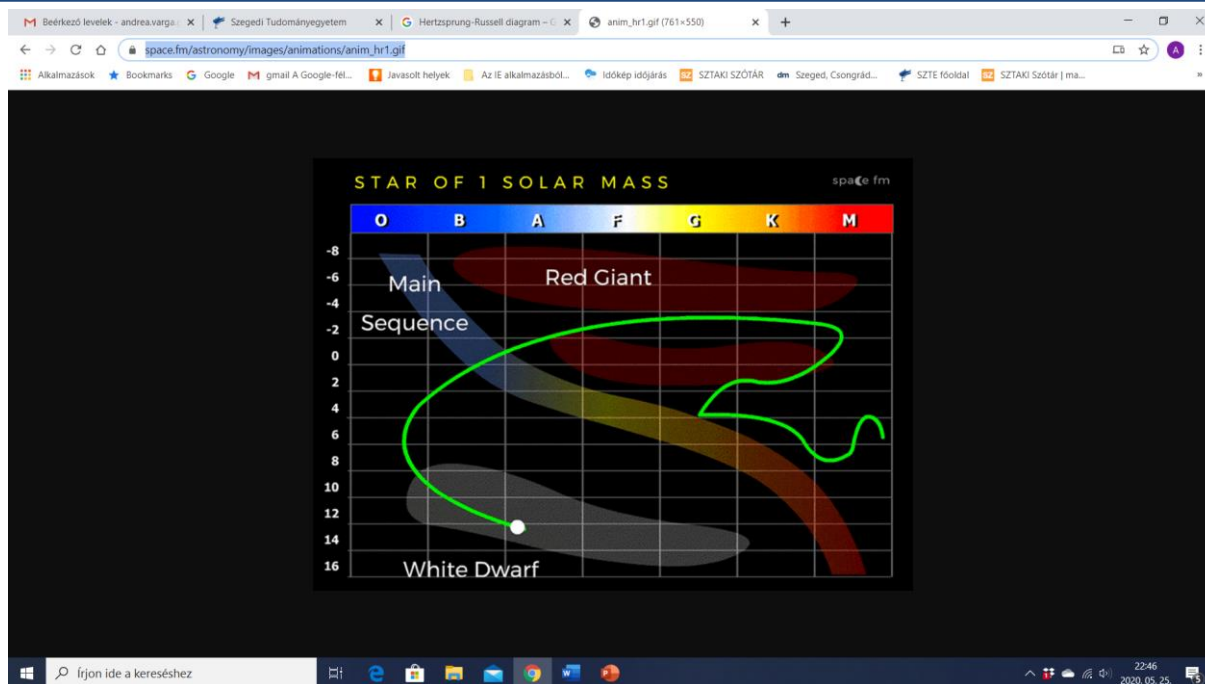
színképosztály) függvényében ábrázoljuk a csillagok fényességét, a csillagászat egyik legfontosabb állapotdiagramját, az úgynevezett **Hertzsprung–Russell-diagramot** (színfényesség-diagram, HR-diagram vagy HRD) kapjuk. A csillagok a HRD-n különböző ágak mentén helyezkednek el. A bal felső saroktól a jobb alsó felé húzódó ágot főágnak nevezzük (*main sequence*), a főágbeli csillagok a **fősorozati csillagok**. Az ismert csillagok több mint 90%-a ebben a széles sávban található (a Nap is itt helyezkedik el). A jobb felső térrészben található csoportosulást óriáságnak nevezzük, itt találhatóak az **óriáscsillagok** (kis hőmérséklet, nagy sugárzó felület), azaz a vörös óriások (*red giants*) és a szuperóriások (*supergiants*). A diagramon a bal alsó területen vannak a **fehér törpék** (*white dwarfs*), amelyekre nagyon magas felszíni hőmérséklet és kis sugárzó felület jellemző.



Csökkenő hőmérséklet!

Csökkenő hőmérséklet!

A Hertzsprung–Russell-diagram: a felszíni hőmérséklet (színképosztály) és a fényesség felhasználható a csillagok jellemzésére. A HR-diagram számos változata elérhető a világhálón (pl. <https://www.eso.org/public/images/eso0728c/> vagy <https://www.space.fm/astronomy/starsgalaxies/hrdiagram.html>)



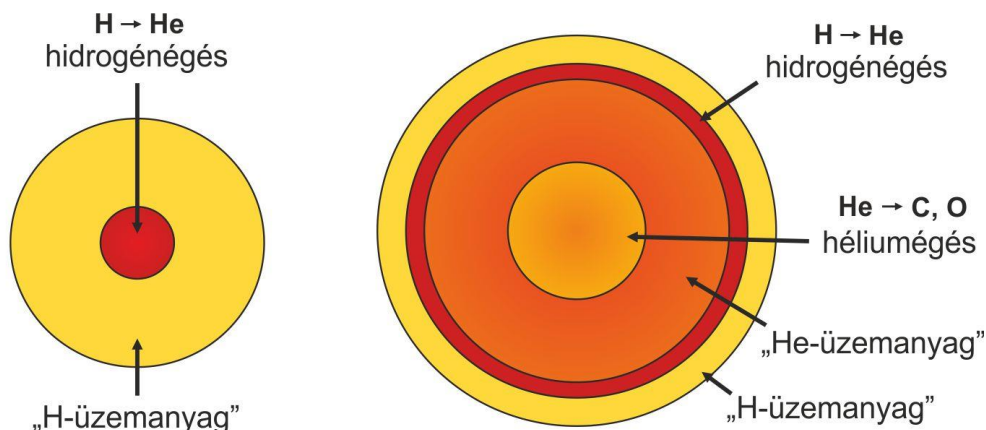
A Hertzsprung–Russell-diagram: ezt az oldalt felkeresve a csillagok fejlődését bemutató animációk érhetők el

(<https://www.space.fm/astronomy/starsgalaxies/hrdiagram.html#galleryanim-1>)

A csillagok bemutatott fejlődési állapotai (csillagtípusok) szoros kapcsolatban vannak a bennük lejátszódó termonukleáris reakciókkal, azaz az elemek szintézisével.

Amikor a csillagközi H és He atomokból a gravitációs összehúzódás eredményeként létrejön egy protocsillag, a magjában a hőmérséklet növekedni kezd, majd átlépve a szükséges hőmérsékleti küszöböt, megindul a **H-égés** ($H \rightarrow He$ fúziós reakció). A naphoz hasonló tömegű csillagok ekkor csatlakoznak a főághoz (lásd HRD ábrák), ahol élettartamuk közel 90%-át töltik, miközben a H-égés termeli az energiát.

Amikor egy főági csillagban a hidrogén mennyiségének mintegy 10%-a elfogyott, a fellépő gravitációs vonzás további összehúzódást eredményez, a hőmérséklet pedig tovább emelkedik: a sűrű központi magban megindul a **He-égés** folyamata. Ezzel párhuzamosan a hidrogén a csillag külső, ritka (kiterjedt) rétegében koncentrálnak – hatalmas burkot formálva –, ami azzal jár, hogy a csillag lekerül a főágról, vörös óriássá alakul. A héliumégés termékeként először szén (^{12}C), majd további nehezebb atomok magjai képződnek (^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg). A hélium felhasználása újabb összehúzódást és felmelegedést eredményez (lehetségessé válik a C-égés), valamint elsősorban szénből, oxigénből és neonból álló mag jön létre a csillag belsejében.



főszorozati csillagok (pl. Nap)

vörös óriások

Elemszintézis a csillagok belsejében: a magreakciók (pl. H-égés, He-égés) exoterm folyamatok, ezért került a nevükbe az „égés” kifejezés

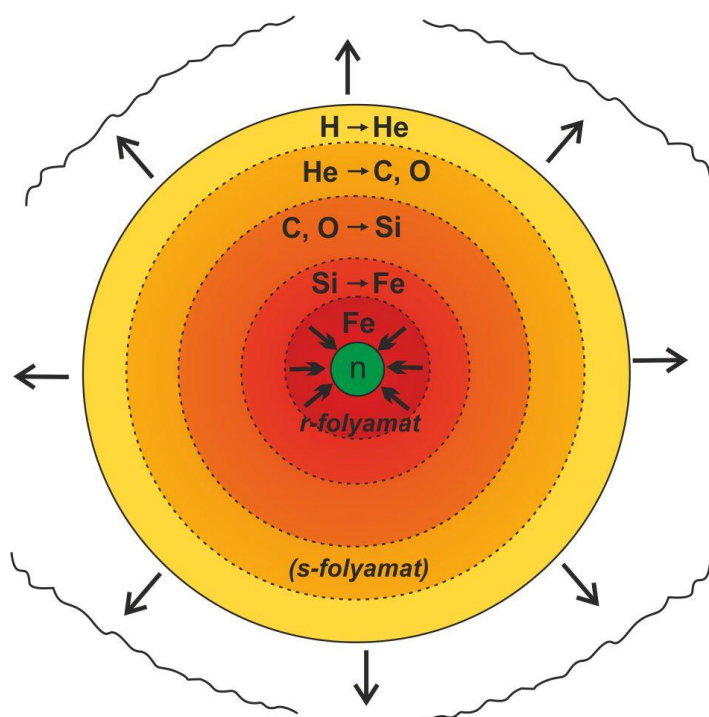
Folyamat	Üzemanyag	Termék(ek)	Hőmérséklet
Hidrogénégés (H-égés) $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H}$ $^2\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$	H	He	$60 \times 10^6 \text{ K}$
Héliumégés (He-égés) $^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^8\text{Be}$ $^8\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O}$	He	C, O	$200 \times 10^6 \text{ K}$
Szénégés (C-égés) $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$	C	O, Ne, Na, Mg	$800 \times 10^6 \text{ K}$
Neonégés (Ne-égés) $^{20}\text{Ne} + ^{4}\text{He} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$	Ne	O, Mg	$1500 \times 10^6 \text{ K}$
Oxigénégés (O-égés) $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{28}\text{Si}$	O	Mg-tól S-ig	$2000 \times 10^6 \text{ K}$
Szilíciumégés (Si-égés) $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	Si	Fe közeli elemek	$3000 \times 10^6 \text{ K}$

A csillagok vörös óriás fázist követő fejlődését a tömegük is befolyásolja. A Naphoz hasonló tömegű csillagoknál a He-égés után (ha a magban a He felhasználódott) a csillag eléri a fehér törpe állapotot. A nagyobb, öregebb vörös óriásokban viszont a szén- és oxigénégés termel energiát. A Napnál mintegy 2–3-szor nagyobb tömegű főszorozati csillagoknál a gravitációs összehúzódás neutron-csillagot hozhat létre, de akár szupernova-robbanást is okozhat. Ez a folyamat a Napnál jóval nagyobb tömegű főszorozati csillagok fejlődése során fekete lyuk vagy kék óriás képződését szintén eredményezheti.

Leegyszerűsítve a bemutatott fázisokat, a magreakciók következtében a csillagok magja összehúzódik és megnövekszik a hőmérséklete, míg külső része kiterjed és csökken a hőmérséklete. Nagy méretű csillagoknál olyan intenzív lehet a gravitációs összehúzódás, hogy a hirtelen hőmérséklet-növekedés szupernova-robbanást okoz, miközben hatalmas mennyiségű anyag szóródik szét a világűrben. A csillagok fejlődése és halála során – a keletkezett atommagok mellett – γ -sugárzás, α -részecskék, szabad neutronok és protonok is keletkeznek, amelyek egyéb folyamatokban vesznek részt, további elemek szintéziséhez járulva hozzá. A kapcsolódó események és magreakciók részletes bemutatása meghaladja a *Geokémia* kurzus kereteit, ezért ez az olvasólecke a leegyszerűsített folyamatok rövid bemutatásával zárul.

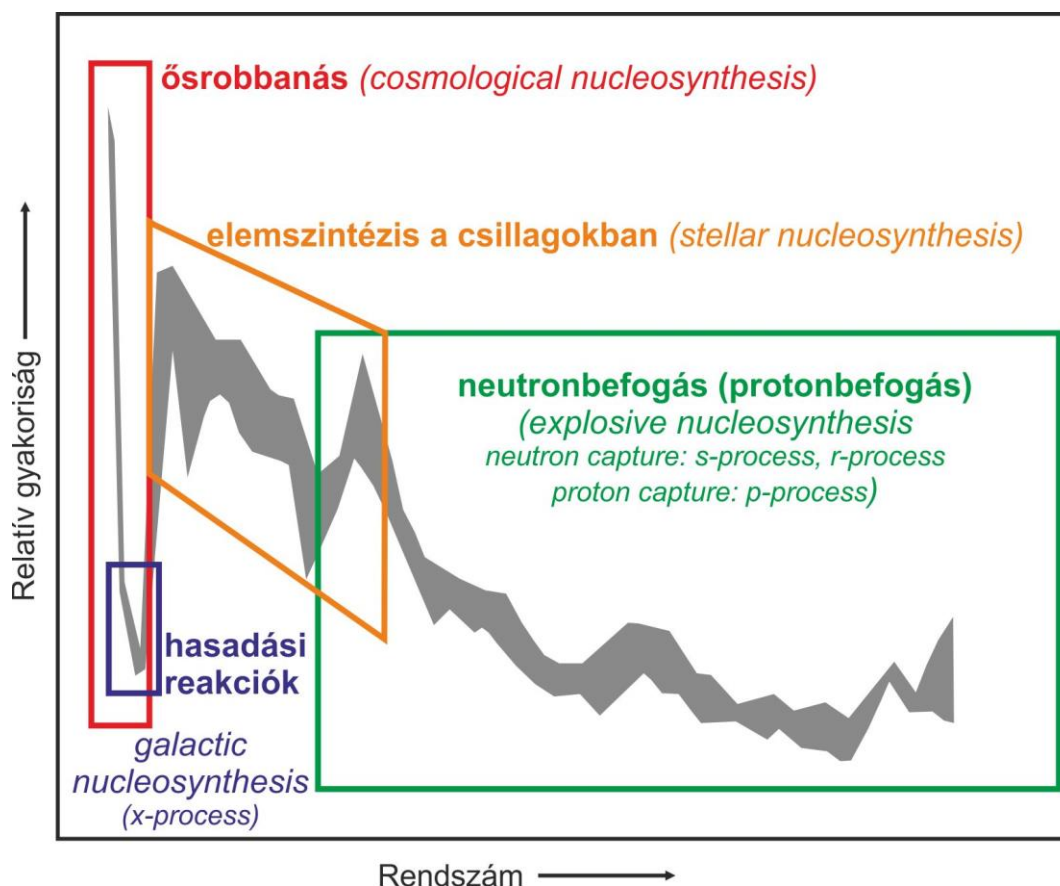
A fősorozati csillagokban az energiafelszabadulással járó (exoterm) magfúziós folyamatok a Fe nuklidjainak létrejötte után befejeződnek.

A vasnál nehezebb nuklidok keletkezéséhez szükséges energiát – külső forrásként – a gravitációs összeomlást kísérő robbanás biztosíthatja (pl. novákban vagy szupernovákban). Az ekkor felszabaduló energia és az ennek hatására kialakuló rövid, de intenzív neutronfluxus a vasnál nagyobb rendszámú, endoterm képződéshőjű elemek kialakulását is lehetővé teszi (**robbanásos nukleoszintézis**). A robbanást követően a keletkezett elemek a csillag köpenyével együtt a csillagközi térbe szóródnak szét. Új naprendszerek keletkezésekor mind a könnyű, mind a nehéz elemek így kerülnek bele az újonnan születő csillagok („napok”) és bolygók anyagába.



*Magfúziótól a csillag végső stádiumáig:
magyarázatok az elemek szintézisére*

A vasnál nagyobb rendszámú elemek atomjai döntően neutronbefogással jönnek létre, amely lehet lassú („slow”) vagy gyors („rapid”) folyamat. Lassú neutronbefogás (**s-folyamat**) a pulzáló vörös óriásokban mehet végbe. Ez – többek között – magyarázatot ad az $A = 90$, 138 és 208 tömegszámú magok körül megfigyelt lokális gyakorisági maximumokra (pl. ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{138}Ba , ^{140}Ce , ^{208}Pb , ^{209}Bi). Gyors neutronbefogás (**r-folyamat**) lejátszódására kedvező feltételek a szupernova-robbanáshoz kapcsolódva alakulhatnak ki. Az r-folyamattal magyarázhatók meg az $A = 80$, 130 és 194 tömegszámú magok körül megfigyelt lokális gyakorisági maximumok, valamint több könnyebb elem neutrongazdag izotópjának (pl. ^{36}S , ^{46}Ca , ^{47}Ti) keletkezése is.



Magyarázatok az elemek poligenetikus szintézisére a rendszám függvényében

A protongazdag nehézmagok gyakorisága kicsi, keletkezésük egyik lehetséges módja a **protonbefogás (p-folyamat)**. Ez a magreakció szintén kapcsolatban lehet a szupernova-robbanással, de kevésbé gyakori, mint a neutronbefogás. A p-folyamat az elemek kisebb

gyakoriságú, protongazdag – többségében páros tömegszámú – izotópjának a kialakulására ad magyarázatot (pl. ^{74}Se és ^{196}Hg).

Láttuk, hogy a Li, a Be és a B nem keletkezik a termonukleáris atommag-szintézis folyamatokban. Ezek az elemek valószínűleg a kozmikus sugárzás állandó bombázó hatására jönnek létre a természetes maghasadási (fragmentálódási) reakciókban (**x-folyamat**), illetve a csillagközi térben bekövetkező ütközések során a nehezebb atommagok fragmentációjával (**galaktikus nukleoszintézis**).

Önellenőrző kérdések (elemszintézis):

1. Mely elemek keletkezésére ad egyértelmű magyarázatot az ősrobbanás-elmélet?
2. Sorolja fel az ősrobbanás-elméletet bizonyító kísérleti tényeket!
3. Sorolja fel (példákkal) az elemszintézist megmagyarázó legfontosabb folyamatokat!
4. Milyen fejlődési állapotban lévő csillag magjában játszódik le a hidrogén-égés (fúziós folyamat)?
5. Növekvő felszíni hőmérséklet és csökkenő fényesség szerint sorolja fel az alapvető csillagtípusokat!
6. Mi a szerepe a szupernova-robbanásoknak az elemszintézisben?
7. Mi a szerepe a kozmikus sugárzásnak az elemszintézisben?
8. Hogyan magyarázható meg a vasnál nehezebb elemek keletkezése? Miért?
9. Hogyan befolyásolja az elemszintézis jellegét az atommag kötési energiája?
10. Hogyan csoportosíthatók a neutronbefogással járó magreakciók?

Hasznos oldalak csillagászati témában:

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet (Budapest): <https://konkoly.hu/index.shtml>

Szegedi Csillagvizsgáló: <http://astro.u-szeged.hu/>

További ajánlott és felhasznált irodalom:

Albarède, F. (2009): Geochemistry, An Introduction, Cambridge University Press, Cambridge, Second Edition

Fejes P., Hajdú É., Kókai M. (1989): Radiokémia, Tankönyvkiadó, Budapest

Greenwood, N. N., Earnshaw, A. (2004):

Az elemek kémiája I–III., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, Második, javított kiadás

White, W. M. (2013): Geochemistry, Wiley-Blackwell