

NYOMELEMEK

1. rész. Elemek keletkezése

NEMECZ Ernő**

Pannon Egyetem, 8002 Veszprém, Pfiók 158

Az általunk érzékelhető anyagi világot kémiai elemek építik fel. A nyomelemek az összes elem egy csoportját alkotják azokat, melyek Földünkön kis mennyiségben –nyomokban– fordulnak elő. Miből állnak és honnan származnak ezek, a tudomány régi kérdései, melynek megválaszolására, Thales óta, beláthatatlanul sok erőfeszítés irányult az ember történelme során. Tegyük egy rövid kitérőt az emberi gondolkodás zezugos fejlődésének jellemzésére. A „kémia” elnevezés valószínűleg az óegyiptomi khem szóból származik, ami a Nilus által öntözött parti területek termékenységével összefüggő kifejezés volt. Az ide eljutott görögök a khemia-ra változtatott névvel magát egyiptomot jelölték. Majd az arabok érkezésével a kifejezés alkémiává alakult és általában fekete földet jelentett. Az arab közvetítéssel Európába jutott diszciplina szerteágazott a filozófia, asztrológia és számos más irányba, de különösen a XVI.sz.-tól kezdve főleg az anyagátalakítás problémája foglalkoztatta. Egyesek új anyagokat (mai fogalommal vegyületeket) állítottak elő, másokat misztikus energiák bevonásával („bölcsök köve”) az ismert fémek arannyá vagy ezüstté „transzmutálása” foglalkoztatta.

A XVIII sz.-tól Lavoisier nyomán a mérésre alapozott tudomány megvetette a mai kémia alapját. Számos elemet fedeztek fel, a lényeg azonban az felfogás volt, hogy a vegyületeket meghatározott arányban kapcsolódva tovább nem osztható és nem változtatható elemek (atomjai) hozzák létre. A lenézett transzmutációs felfogás addig maradt érvényben, míg 1896-ban Becquerel felfedezi a radioaktivitást vagyis, hogy maga természet mutat példát elemek átalakulására. Ezt követően a fizikusok vonták vizsgálódásuk körébe az anyag szerkezetének kutatását kimutatva, hogy az atom nem végső eleme az anyagnak, az atommag nagy energia felhasználásával maga is sokféle részecskére bontható ill. azokból felépíthető. Kuriózusképpen platinából, igaz nagyon rövid felezési idejű, arany izotópot is előállítottak.

Az elemek származását, tulajdonságaikat, szerkezetüket keletkezésük ma érvényes történetével együtt célszerű tárgyalni, hogy a sokféleséget az eredet körülményeiből tudjuk levezetni. Az elemek származása természetesen az Univerzum eredetével van részben szoros összefüggésben. E tekintetben a kozmológusok többsége az ősrobbanás (Big Bang) elmélet valamely változatának híve. A tágulásnak (inflációnak) is nevezett elmélet kidolgozó *Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker* voltak s az elmélet döntő igazolása volt *Edwin Hubble* által a távoli galaxisok spektrumaiban észlelt vörös eltolódási jelenség. E szerint a világegyetem alkotórészei (galaxisok stb.) egy kezdeti pontból kiindulva (1.ábra) a távolsággal növekvő sebességgel távolodnak és a spektrum vörös eltolódása

a Doppler effektus következménye. Ha ezt a folyamatot időben visszafelé gondoljuk el, végül adott pillanatban egyetlen pontba¹ érkezőnk, amely az egész világegyetemet magában foglalta (szingularitás). Az ősrobbanás kezdete, a számításoktól függően (Hubble-állandó, U/H arány, a legnagyobb csillagok tömege) 12-15 milliárd év közé tehető². A Planck időt (10^{-44} s) extrém gyors kiterjedés, *Alan Guth* (1979) által *kozmosz inflációnak* nevezett szakasz követi 10^{-33} -ig és ez alatt a világegyetem eredeti méretének 10^{48} -szorosára növekedett. A következő háromszázezer évet a kozmológusok tovább részletezik. Összefoglalóan felsorolva az eseményeket: az egyesített szupererők felbomlanak, a gravitáció elkülönül, gyenge, erős és elektromágneses erők lépnek föl, a szuperszimmetria felbomlik, a kvark/hadron átmenet, könnyű elemek (D, He, Li) 3000 K-en végbemenő szintézise (primordiális elemek), az anyag felülmúlja az antianyagot. Az univerzum a kezdeti nagy hőmérsékletéről kis hőmérsékletre hűl és a távolodási sebesség (a Hubble állandó) a jelenlegire mérséklődik (Mpc-ként 70 km s^{-1}). Fontos volt, hogy *Penzias és Wilson* 1964-ben felismerték és megmérték az univerzum minden irányából csekély ingadozással érkező háttér sugárzását. Értéke : 2,725 K hőmérsékletű fekete test 1,9 mm hullámhosszúságú sugárzása s minthogy eredete csaknem a kozmosz keletkezéséig (300 ezer év) megy vissza, ezért „maradványsugárzásnak” is hívják és az ősrobbanási elmélet megerősítésének tekintik. A Big Bang elmélet a foton/barion arányból jól jelezte a ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$ D és ${}^7\text{Li}$ közönséges hidrogénhez viszonyított arányát is. Ezek: ${}^4\text{He}/\text{H}=0,25$, ${}^3\text{H}/\text{H} = 10^{-3}$, ${}^3\text{He}/\text{H}=10^{-4}$ és ${}^7\text{Li}/\text{H}=10^{-9}$ ami jól egyezik a megfigyelésekkel.

Az Univerzum történetének mai, a részecske fizika eredményeivel összhangban levő elméletének adatait, az ún. *standard kozmológiai* elmélet szerinti folyamatok összességét a 2. ábra segítségével tanulmányozhatjuk.

Az első elemek megjelenése

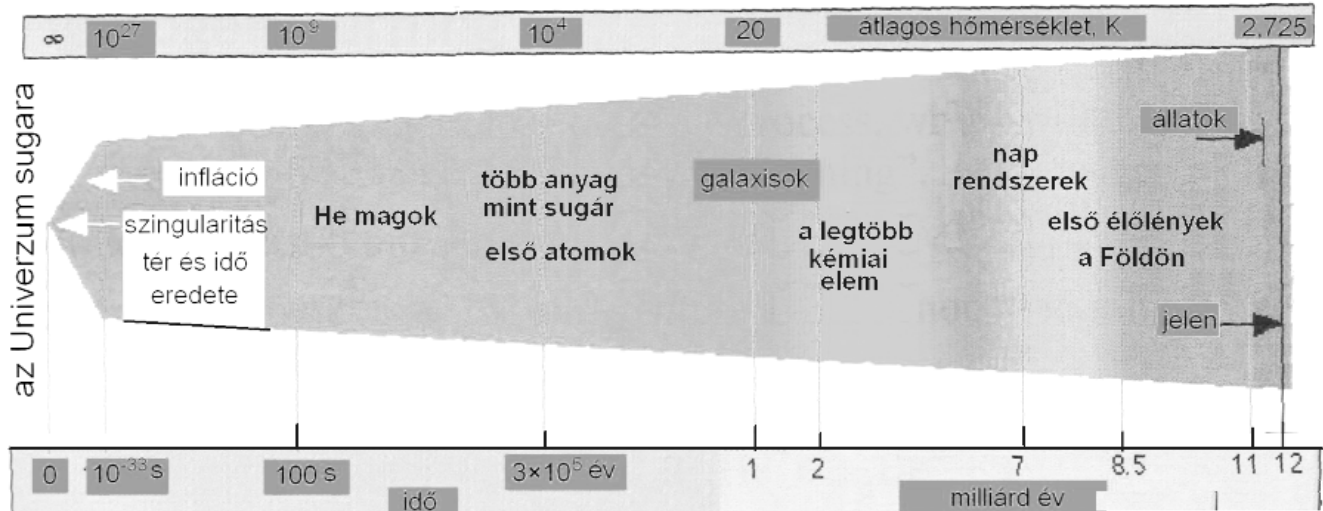
A megfigyelhető fényes Univerzum a spektroszkópiai vizsgálatok szerint ~ 98%-ban hidrogénből és héliumból áll, de a nehezebb elemek aránya tekintetében bizonyos különbség van az idősebb és a fiatalabb csillagok között. Felmerül a kérdés, hogy ez az ősi anyag, a hidrogén hogyan jött létre az ősrobbanás után. Kezdetben csak sugárzási energia létezett. Felteszik, hogy a sugár→anyag átalakulás³ során túlnyomóan neutronok jöttek létre, de ezek csak az atommagon belül stabilisak azon kívül, nem túl nagy nyomás estén, 10 min felezési idővel elbomlanak:



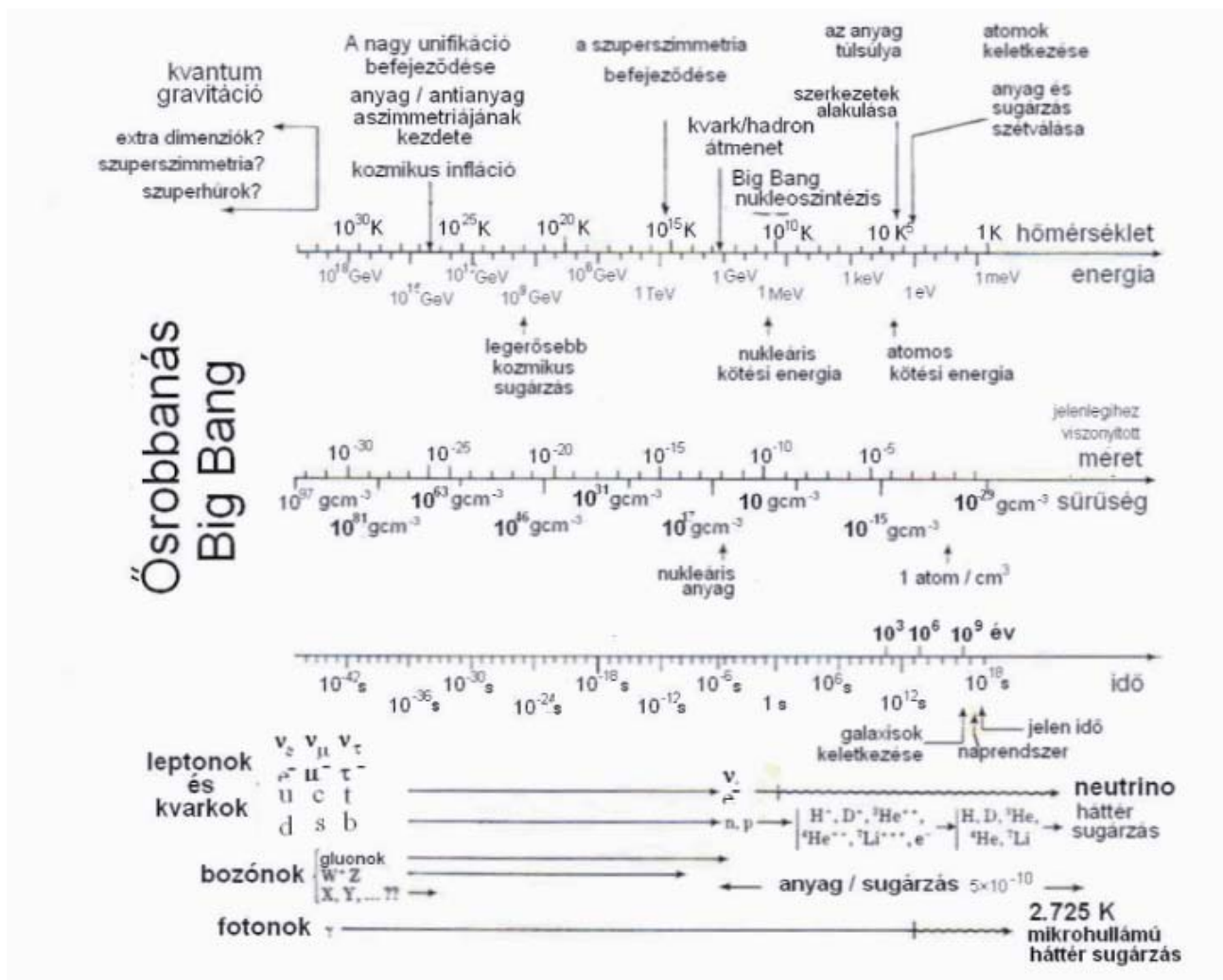
¹ A.Guth számításai szerint a kiindulási gömb átmérője 10 cm, Barrow szerint 3 mm lehetett.

² Gyakran $13,7 \pm 0,2$ milliárd évvel számolnak.

* Email: nemeceze@enternet.hu

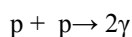


1. Ábra. Az Univerzum kezdetétől lejátszódott folyamatok és az elemek keletkezése.



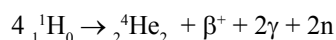
2. Ábra. Az Univerzum keletkezésének története a standard kozmológiai elmélet szerint.

Kezdetben a szimmetria elvnek megfelelően egyenlő számú proton és antiproton keletkezett, melyek kölcsönösen megsemmisítették egymást:



Kérdés hogyan vált uralkodóvá az Univerzumban az anyag, az antianyaggal szemben. Egyik elmélet szerint egy hipergyenge erő okozta az antianyag megsemmisülését. Ugyanez az elmélet a proton felezési idejére 10^{32} évet ad meg.

Amikor az Univerzum kora 300 ezer év és a tágulás következtében hőmérséklete 3000 K-re csökken, néhány könnyű elem, deutérium, hélium és lítium keletkezik (*primordiális* elemek) proton-proton (PP) fúziós reakció megindulásával:



A keletkezett He tömege kisebb mint a kiindulási 4 hidrogén összes tömege s így a folyamat erősen exoterm és az $E = mc^2$ egyenletnek megfelelően sok hőt fejleszt, amit „hidrogén égetésnek” neveznek.

A nehezebb elemek a H és a kialakult elemek egymással különféle kombinációban, nagy nyomáson és hőmérsékleten bekövetkező nukleáris reakciói nyomán keletkeztek. Ezek nem tetszőlegesen, hanem bizonyos megmaradási törvényeknek engedelmességgel mennek végbe. Pl. a reakció során a teljes elektromos töltésnek (elektron-egységben mérve), a nukleonok teljes számának változatlanok kell maradnia, valamint a magból a pozitron emisszió során neutrínó is mindig távozik. Az emittált fotonra ilyen szabály nem vonatkozik.

Az elemek szerkezeti felépítése, az izotópok

Amikor nyomelemről van szó különleges figyelmet kell fordítanunk az elemek izotópjaira is. A kémiai elemek egymástól a 10^{-13} cm sugarú atommagban levő pozitív töltésű *protonok* és ezt semlegesítő $\sim 10^{-8}$ cm távolságban elhelyezkedő *negatív* töltésű elektronok számában különböznek. Az atommaghoz ugyanakkor *neutronok* is tartoznak, de ezek semlegesek lévén a töltést nem befolyásolják. Ha a töltések nincsenek kiegyenlítve és a semleges állapothoz képest több, vagy kevesebb elektron van jelen, akkor ionokról van szó. A fizikusok, sok tovább felbontott komponens, szubatomi részecskét (leptonok, kvarkok, stb.) ismertek fel, de e finom szerkezetek tárgyalása a továbbiak szempontjából nem szükséges.

A legegyszerűbb, 1 protont tartalmazó hidrogén és a 116 protont tartalmazó névtelen mesterséges ununhexium elem között, mindegyikre jellemző protonszámmal (rendszámmal) rendelkező, egymástól különböző kémiai elem foglal helyet. A neutronok számában azonban ingadozás lehetséges s így ugyanazon protonszámú elemekben eltérő számú neutron fordulhat elő, amikor a rendszám (Z) nem, de az atomtömeg (A) megváltozik. Ugyanazon elemnek a neutronok száma szerinti különböző variációit az elem *izotópjainak* nevezzük, mert a periódusos tábla azonos helyén foglalnak helyet (Sody). A stabilis nuklidokban közelítőleg $N=Z$, de az izotópok jelentős része nem stabilis, hanem különböző felezési idejű radioaktív elem.

Földi körülmények között 85 stabilis és 10 radioaktív természetes elem fordul elő. Megemlítjük, hogy a 43. rendszámú *technécium* (^{99}Tc) atom erőművekben keletkező bomlás termék, a 61. rendszámú *prométium*

(Pm) laboratóriumi instabilis hasadási termék. Jelenleg 24 laboratóriumban előállított mesterséges transzurán instabilis elemet is ismerünk, de felezési idejük rövidege miatt a természetben nem fordulhatnak elő.

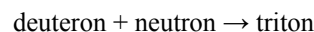
A 116 természetes és mesterséges elem csaknem mindegyike a bennük található neutronok száma szerint különböző számú izotópot alkot, amelyek gyakoriságuk szerint súlyozott átlaga adja valamely elem atomtömegét a ^{12}C -re vonatkoztatva.⁵ A természetben 300 stabilis és kb. 70 radioaktív izotóp fordul elő. Mintegy 1500 mesterséges nuklid van, úgyhogy az összes ismert izotóp száma csaknem a 2000-t éri el.

A hélium (He) keletkezése és szerkezete

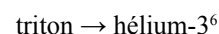
Az első nuklidok keletkezésekor a hőmérséklet még túl nagy ahhoz, hogy elektronok csatlakozhassanak az atommagokhoz, ezért egyelőre és sematikusan csak a magok (nuklidok) reakcióiról van szó:



majd



reakció indult be. De e szabad részecskék instabilisak lévén, a triton felbomlik:

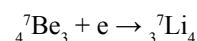
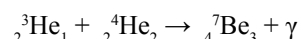
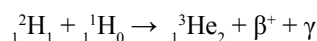
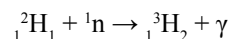
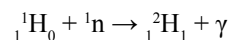


és az utóbbi:



szerint He-4 stabilis maggá alakul. Szerkezetét és minden izotóp esetében az index számok jelentését a 3. ábrán látjuk. Teljes jelölés esetében az elem jele mellett, balra fent: nukleonok száma, balra lent: protonok száma (rendszám), jobbra lent: neutronok száma. Pl. $^{235}_{92}\text{U}_{143}$ és $^{238}_{92}\text{U}_{146}$; vagy $^1_1\text{H}_0$, $^2_1\text{H}_1$, $^3_1\text{H}_2$.

Az ősrobbanást követő infláció következménye gyors hűlés volt s így az elektronok egy bizonyos hőmérsékleti szakaszban, töltés kiegyenlítéssel csatlakoztak a kialakult atommagokhoz. Létrejöttek az első elemek:



a $^1_1\text{H}_0$, $^2_1\text{H}_1$ (D, deutérium), $^3_1\text{H}_2$ (T, tritium), a ^3_2He , és $^4_2\text{He}_2$, ezek a H és He izotópjai. Az elemek képződése során a növekvő proton tartalom miatt növekszik a magok elektromágneses töltése, vagyis a további fúzió már csak egyre nagyobb hőmérséklet és nyomás (erő) esetén következhetett volna be, viszont az Univerzum ekkor

⁵ A ^{12}C atom magja 6 protonból és 6 neutronból áll, melyek szabad tömege 12,0961, tehát nem pontosan 12. A különbség („tömeg defektus”) egyenlő az atommag kötési energiájával, amely MeV nagyságrendű szemben az elektronokhoz kötődő kémiai kötőerők keV nagyságrendjével

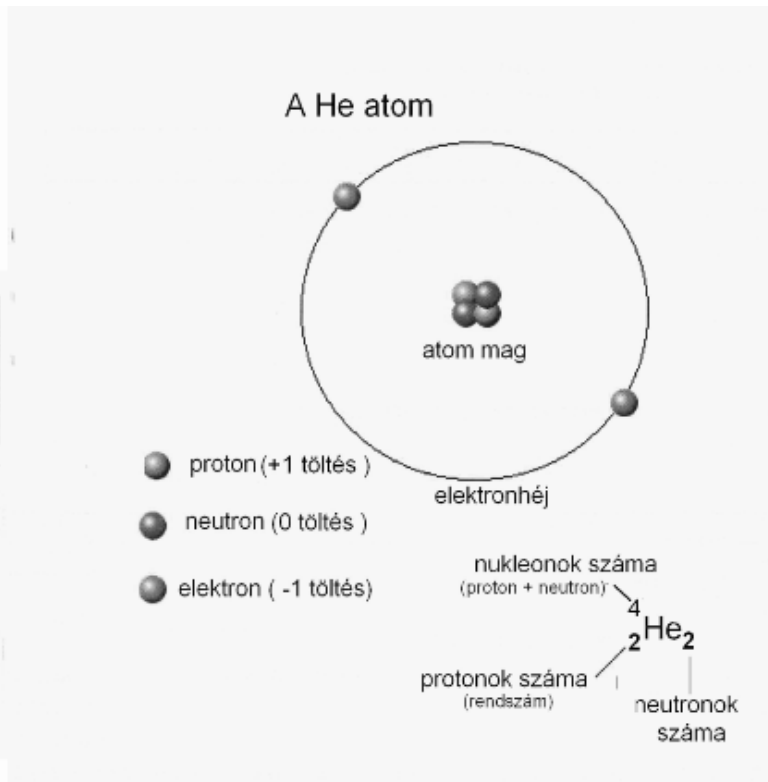
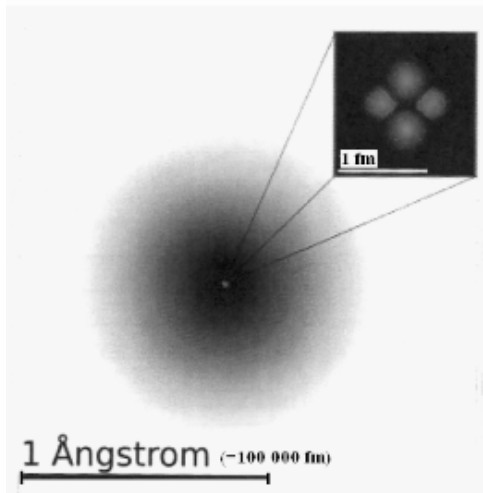
⁶ A IUPAC a ^3He mellett a He-3 jelölést is megengedi

³ Az átalakulás kapcsolatban van a fizikai finom szerkezeti állandó értékével ($\alpha=1/137,035999$), melytől csekély eltérés pozitív-negatív irányban vagy az anyag, vagy az elektromágneses sugárzás létezését zárná ki

⁴ v a neutrino jele

éppen ellenkezőleg, a gyors tágulás következtében erősen hűlőben volt. Ezért a még idevehető Li elem kivül továbbiak képződéséhez a feltételek az ősrobbanást követő

mintegy 300 ezer év után már nem voltak megfelelőek. Az elemek képződésének első szakasza a primordiális elemek képződésével lezárult.

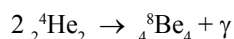


3. Ábra. ${}^4_2\text{He}$ mag (= α -részecske) és atom szerkezete.

Nehezebb elemek keletkezése

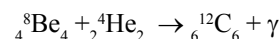
Láttuk, hogy a H, He és kevés Li az ősrobbanás utáni 3. percben keletkezett, míg a Be és B csillagközi térben kozmikus sugárzás és gázok ütközése során. Az összes többi előbbieknél nehezebb elem a csillagok belsejében nagy nyomás és hőmérséklet mellett jön létre. Ilyen szintézis a napok tömegétől, hőmérsékletétől és a bennük végbemenő folyamatoktól függően további szakaszokban játszódik le. A gravitációs potenciál kb. 1200 Jg^{-1} hőt fejlesztve a hőmérsékletet mintegy $15 \times 10^6 \text{ K}$ -re emeli. Ez a H számára már elegendő az elektrosztatikus tasztítás legyőzésére. Miután az elektronok már leszakadtak lényegében proton-proton (PP) reakcióval⁷ kezdődik az elemek képződése. A nukleosintézis következő szakasza a gravitációs összehúzóds miatti nagy hőmérsékleten ($>15 \times 10^6 \text{ K}$) a C, N, O képződésével a „CNO ciklusban” folytatódik a csillagok belsejében. A mi Napunkban és általában a csillagokban azonban jelenleg az energia 99%-át még a PP reakció szolgáltatja.

A hidrogén nagyobb részének elfogyása után a hélium a magban gyűlik össze, s ekkor a sűrűség 10^8 gcm^{-3} , a hőmérséklet pedig 10^8 K -t ér el. Ilyen körülmények között két hélium atom fúzió révén berilliummá alakul:

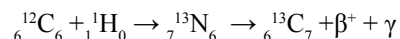


⁷ A PP reakció során két H deutériummá alakul s ez lassú folyamat, mivel a ${}_1^1\text{H}_0 + {}_1^1\text{H}_0 \rightarrow {}_1^2\text{H}_1 + e^+ + \nu_e + 0,32 \text{ MeV}$ reakció bekövetkezéséhez (10^9 év) a protonnak nagy energia abszorbeálására van szüksége ahhoz, hogy neutronná alakuljon.

Ez a Be ugyan nagyon rövid élettartamú (felezési idő = 10^{-16} s), de szerepe van a szén atom kialakulásában, mert ehhez 3 He egyidejű alkalmas találkozására volna szükség s mivel ez rendkívül valószínűtlen, ezért a folyamat főleg a Be-8 közbeiktatásával játszódik le. Ha a Be-8 még bomlatlan állapotban ütközik He maggal:



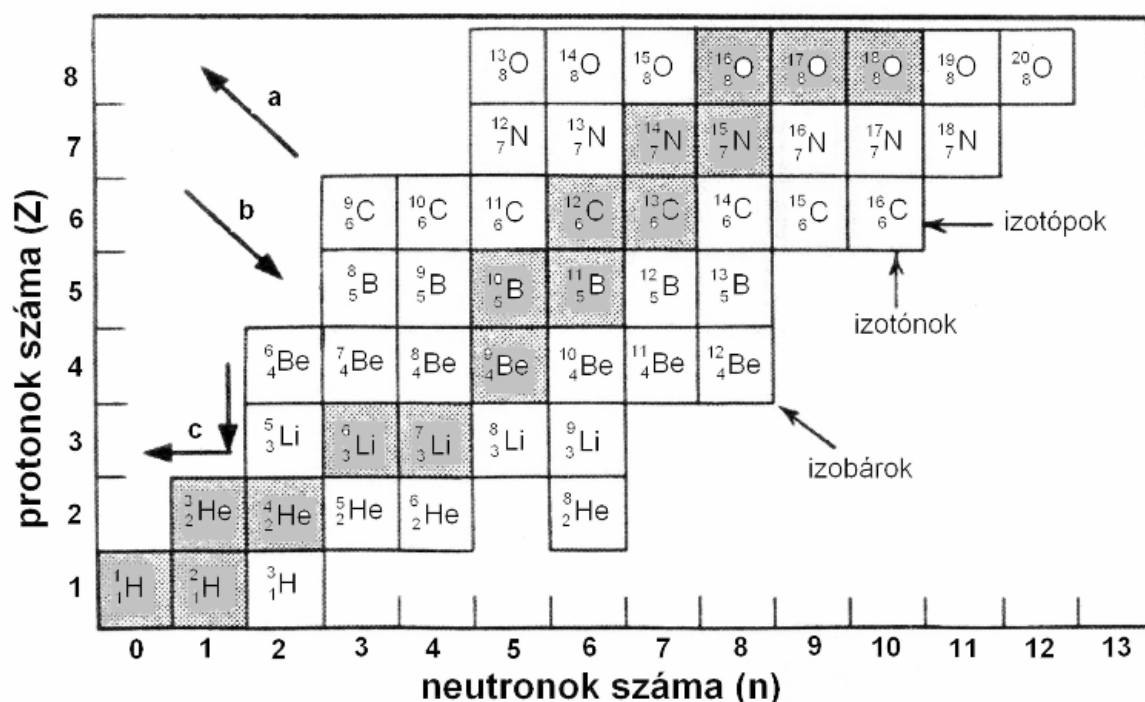
stabilis C mag keletkezik, utóbbi H-nal fúzionálva:



N és egy másik szén izotóp keletkezése mellett sugárzást bocsát ki. Itt megfigyelhetjük, hogy kétféle szénatom keletkezett, amelyek azonos protonszám ($Z=6$) mellett különböző számú neutron ($n = 6$ vagy 7) tartalmaznak s így természetesen eltérő tömegszámot (A) képviselnek. Az izotópok fontosságára tekintettel a különböző nuklidok egymáshoz viszonyított jellemzőit a 4.ábrán részletesebben tanulmányozhatjuk.

Csaknem minden elem esetében fennáll az a lehetőség, hogy azonos protonszám mellett a neutronok száma bizonyos határok között ingadozhat. Mivel az izotópokban az elektronok szerkezete azonos, az ettől függő kémiai sajátságok első megközelítésben nem különböznek egymástól. Ezért a kémikusok kezdetben kevés figyelmet szentelnek az elemek izotópjainak.

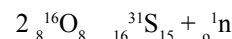
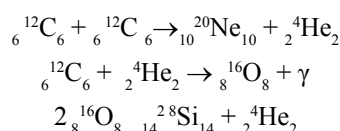
Mégis hamarosan kitűnt, hogy főleg geokémiai, biológiai szempontból és sok más gyakorlati szempontból rendkívüli



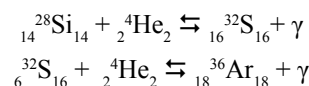
4.Ábra. A nuklidok egy részlete a periódusos rendszer elejéről. A srafozott sárga négyzetekben levő nuklidok stabilisak, az azon kívüliek instabilisak, radioaktívak. Az *izotóp* nuklidok azonos számú *protonnal*, az *izotónok* azonos számú *neutronnal* és az *izobárok* azonos számú *nukleonnal* rendelkeznek. A baloldali nyilak a különböző bomlási mechanizmusok során a protonok és neutronok számának eltolódását mutatja. **a:** β bomlás, **b:** pozitron bomlás, β^- befogás, **c:** α -bomlás.

jelentősége van az izotópok közötti tömeg különbségeknek a kinetikai és vibrációs effektusok szempontjából. Az atommagban a protonokat és neutronokat az erős (10^{-15} m távolságig ható) magerők tartják össze. A protonok erős tasztítóhatását viszont a közbeékelődő neutronok csökkentik és stabilizálják a magot. Ha túl sok vagy túl kevés a neutronok száma az izotóp instabilis (4.ábra). Kétségtelen azonban, hogy a rendszám növekedésével a kémiai különbségek (pl. diffúziós sebességtől függő reakciók) elmosódnak, mert a relatív tömeghányad, az atomtömeg növekedésével erősen csökken.

Az elemek további képződése a csillagokban (napokban) a csillag tömegének függvénye. A csillagok óriási kiterjedésű ködök gravitációs összehúzódása révén keletkeznek, s belsejükben az elemek képződéséhez szükséges rendkívüli, a gravitációs összeomlást ellensúlyozó hőmérsékletek jöhetnek létre. A mi Napunk és a hozzá mérhető csillagok fehér törpe, majd kihűlve, mint sötét sűrű tömeg fejezik be életüket. De az ennél nagyobb csillagok belsejében a folyamatok ettől eltérőek, mert a gravitációs erő elég nagy ahhoz, hogy megakadályozza az atomok nagy hőmérséklet miatti kitérését és az összehúzódás (kollapszus) tovább folytatódik. Az ennek következtében növekvő hőmérséklet, amely a 6×10^8 K-t is eléri, az elemek sorának képződését teszi lehetővé. Néhány példa:



Ehhez hasonló folyamatok sokfélesége játszódik le annak megfelelően, hogy a csillagok belső hőmérséklete, többnyire hélium befogás következtében állandóan növekszik és legyőzi az egyre több protont tartalmazó magok növekvő kölcsönös tasztító hatását, újabb és újabb magok képződésére adva lehetőséget. Ezek közül kiemelkednek a He-befogással, vagyis 4-gyel osztható tömegszámú elemek (C,O,N,Mg,Si). Ha a hőmérséklet 10^9 K-t ér el a Si leépülő (He magokra bomló) vagy He-t éppenséggel befogó versengő folyamatai alakulnak ki (Si égetés). Például egyensúlyi folyamatban:



Utóbbi esetben, Cl,Ca,Ti,Cr is keletkezik, szintén 4-gyel osztható atomtömeget képviselve. Ez a folyamat azonban csak a ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ képződéséig tart, mivel a vas magjában a nukleononkénti kötési energia a legnagyobb⁸ és további exoterm fúziós reakciók héliummal vagy más magokkal már nem jönnek létre.

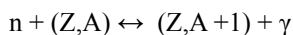
Ennek megfelelően a nagyobb csillagokban, a vas felé haladva, a magok képződése során egyre kevesebb hő szabadul fel és az elemek sűrűségük szerinti héjakban rendeződnek. Ez már a szupernóva kitérése előtti állapot. A

⁸ Az asztrofizikusok inkább a „vas csoport”-ról beszélnek mert a ${}^{62}\text{Ni}$ kötési energiája a vasénál is kissé nagyobb, de a ${}^{62}\text{Ni}$ nagy fotodezintegrációja miatt inkább a vasat, mint gyakoribb elemet jelölik meg a könnyebb elemek képződési határául.

vas a csillag magjában helyezkedik el és óriási gravitációs nyomás alá kerül s miután energia termelés már nincs, a külső részek 70000 km s^{-1} sebességgel zuhannak a csillag belsejébe.

A gyorsan zsugorodó mintegy 10 km átmérőjű mag hőmérséklete ennek következtében $8 \times 10^9 \text{ K}$ -ig növekedhet, sűrűsége pedig $10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ -t éri el, és ez lehetővé teszi, hogy az elektronok és protonok egy inverz folyamattal neutronná és neutrinná egyesüljenek. Ez az elektron befogási folyamat a gravitáció potenciális energiáját hővé alakítja, és hatására 1046 J hő termelődik néhány másodperc alatt. Ekkor következhet be a mag feletti öv szétrobbanása, amit a csillag *szupernóva robbanásának hívnak* (5. ábra). Ekkor rövid idő alatt óriási mennyiségű energia szabadul fel⁹, a csillag fényereje az egész galaxisét felülmúlhatja és ilyen viszonyok között, amikor az atommagok képződéséhez már energia bevonásra van szükség, megindul neutron befogással a vasnál nehezebb atommagok, (izotópok) kialakulása. Az előzőekben tárgyalt nukleoszintézisek során ugyanis melléktermékként sok és különféle energiával rendelkező neutron keletkezik és a már kialakult elemekkel ütközve nehezebb atommagok képződését indítják meg.

Attól függően, hogy a neutron-befogáshoz, és az ezt követő β -bomlás idejéhez (τ_β) képest mennyi időre (τ_n) van szükség, megkülönböztetjük a lassú (s) és gyors (r) n-befogású folyamatokat. Egy versengő folyamatról van szó, amelyben a τ_β kizárólag az elem fajtájától, a τ_n pedig szigorúan az adott neutron fluxustól függ. A lassú folyamatban a τ_n sokkal hosszabb, mint a τ_β . A neutron-befogással ellentétes folyamat a γ -sugárzás hatására bekövetkező neutron-vesztés. A szupernóvákban a nagyon erős γ -sugárzás hatására egyensúly állhat be:

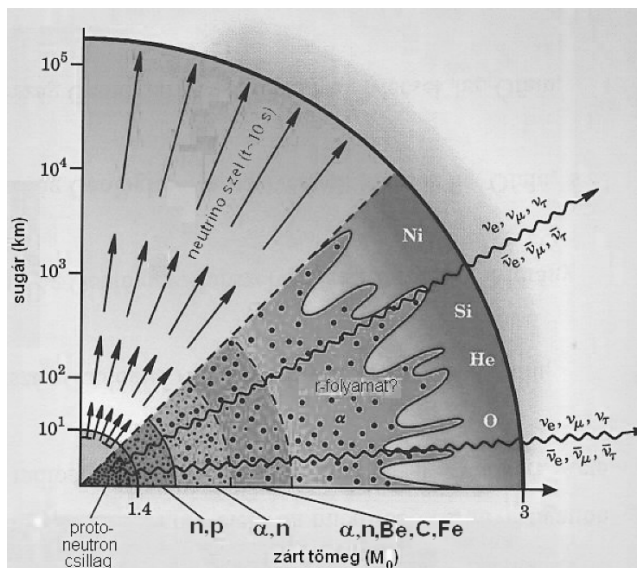


Ezért az intenzív neutron sugárzás megszűnésével a túl sok neutron tartalmazó izotópok β -bomlással (hasadással) visszatérnek a gyors folyamatok által létrehozott stabilis izotóp változatba.

Trace elements (Part I). Formation of elements

The study addresses the significance of trace elements. From the 90 stable elements of Earth, the abundance of 8 elements is 98.4%, the remaining 82 elements together make 1.6%. In the chemical analytics elements thinner than 100 ppm, while in geochemistry elements thinner than 1000 ppm are called trace elements, which are present in the crust of Earth in <0,1 and 1 billionth g/g%. Talking about trace elements, we have to extend our attention also to the elements with different neutron count, i.e. the isotopes. There are 300 stable and 70 radioactive isotopes in nature; together with the artificial ones, their number is close to 2000. This diversity can be best understood through the history of their production, which started together with the creation of the Universe and has still been in progress. The simplest elements, H and He were produced for 300 thousand years after the Big Bang, and 98% of the visible Universe comprises these two elements. The most frequent elements of Earth's composition – down to iron – were produced at

⁹ A SN1987A szupernóva robbanásakor (távolsága 160000 fényév) az első 10 s alatt százszor annyi energia szabadult fel, mint a mi Napunk teljes élettartama (10×10^9 év) alatt összesen



5.Ábra. Szupernóva robbanás elképzelt folyamata és az elemek keletkezése (r gyors folyamat lefolyásának helyszíne).

További folyamat neutron befogással:

^{60}Co (bomlás) \rightarrow ^{60}Ni (neutron befogás) ... ^{99}Tc ... ^{108}Ag ... ^{122}Sn ... ^{197}Au ... ^{209}Bi , mely utóbbi a legnehezebb stabilis elem. Az elemek 50-50%-ban keletkezhetnek egyik vagy másik folyamattal, de vannak, amelyek csak gyors folyamattal képződnek (pl. Au, Pt, Os). Ugyancsak szupernóva kitérés során képződik a Th, U és Pu is.

A szupernóva robbanása utáni maradék, ha a csillag mérete a mi Napunkéhoz hasonló, mintegy 15 km sugarú tömegeből áll. Ha $M_\odot > 4$, akkor a csillag minden anyaga neutronná préselődik össze. Ha pedig a Napnál 8-szor nagyobb a csillag, akkor szingularitás áll elő, vagyis (elméletileg) végtelen sűrűség és egy 3 km -es tömeget fekete lyuk vesz körül. Bár e folyamat kevésbé járul hozzá a nehéz elemek képzéséhez némely izotóp pl. ^{190}Pt , ^{168}Yb mai ismereteink szerint csakis p-befogással keletkezik, de a szomszédos elemekhez képest kis mennyiségben.

high temperature and pressure caused by the heat energy produced by the gravitational collapse of the stars. The process leading here is the nuclear fusion, when in the first step, a He atom is produced by the fusion of four H atoms (proton-proton reaction).

This is an exothermic process, and with the increase of the temperature and the fusion of more and more He atoms heavier nucleons are produced, the fusion of which in turn result in the production of various elements. This process terminates with the production of iron, which does not generate heat. Elements and their isotopes heavier than this – down to uranium – can only be produced by capturing neutrons at the exceptionally high temperature generated by supernovas. Since a significant amount of nuclear energy is accumulated in them, the instable nucleons split into two nuclids of smaller energy or the chain thereof. While the elements before the iron produce heat by fusion, elements between iron and uranium do the same by splitting. Since extraordinary temperatures (several billion K) are rare phenomena in the universe, elements produced under such conditions are also extremely rare. Despite to this fact, due to their origin and creation, Earth and

the inner planets have an unusual composition. From Earth's atmosphere created during the shrinking of the gaseous nebula, the solar wind removed significant part of the light elements, and as a result, the relative concentration of the elements with higher melting point increased. The compositional difference of the

crust of Earth serving as location for life was further increased by the fractioned crystallization of the surface of Earth's mantle. The sequence of the four most frequent elements in the sun are: H,He,O,Ne, in the entire Earth: Fe,O,Si,Mg, while in the crust of Earth: O,Si,Al,Fe. Naturally similar changes have also taken place in the rate of occurrence of the trace elements.