

Hidrogéntől az aranyig

Hogyan keletkezett az Univerzum? Hogyan jöttek létre a periódusos rendszert benépesítő elemek? Számos könyv és híres tudós foglalkozik és foglalkozott vele a múlt évszázadban és napjainkban. Az elkövetkezendőkben mi is ezzel foglalkozunk.

A Világegyetem kialakulására és fejlődésére vonatkozóan napjainkban leginkább elfogadott az Ősrobbanás-elmélet. Ezen elmélet szerint az Univerzum összes anyaga egy igen kicsiny térrészben, „ősanyagban” volt összezsúfolódva, amelynek elképzelhetetlenül nagy volt a sűrűsége (Kb. 10^{96} g/cm^3), és hőmérséklete 10^{32} K . Ez az anyag nagyfokú instabilitása miatt felrobbant, és kezdetét vette Univerzumunk kialakulása. Az Ősrobbanás után az Univerzum tágulni kezdett, ezzel csökkent a hőmérséklet is. A múltban a távolságok és hullámhosszak kisebbek voltak, a hőmérséklet ennek megfelelően magasabb lehetett. Ennek a forró Univerzumnak a tágulása és gravitációval szemben végzett munka által okozott hűlése vezetett a mai állapotához. A magas hőmérséklet, valamint a hőmozgás miatt nemcsak a molekulák és az atomok kötése nem maradhatott fenn, hanem összetett atommag sem létezhetett. Szabad nukleonok száguldoztak és ütköztek egymással.

A lehülő nukleáris anyag neutronjai protonokká bomlanak el, mert a proton a legkönnyebb bariontöltést hordozó részecske. Az anyag szétsugárzásának másik korlátja az elektromos töltés megmaradása jelenti. A bariontöltést nem hordozó, de elektromosan töltött anyag elektronra bomlik, mert ezek a legkönnyebbek az elektromos töltés hordozói közül. A korai forró Univerzum lehülése után szükségszerűen proton, elektron és foton összetételű gáz maradt vissza. Ebből a három stabil részecskefajtából indult el az anyag fejlődéstörténete. A protonok számát az anyag teljes bariontöltése, a protonok és elektronok különbsége pedig az anyag teljes elektromos töltése határozza meg, két megmaradó mennyiség. A zérustól különböző elektromos töltésű anyagcsomókat szétszórta a Coulomb-taszítás. Csak olyan összetételű gázfelhők maradhattak tartósan együtt, amelyek elektromosan semlegesek. Amint ezek a felhők néhány ezer for alá hűltek a protonokból és elektronokból hidrogén atomok épültek fel. az anyag egy millió év alatt elérte legmélyebb energiájú állapotába, amely elektromos kölcsönhatással elérhető. Ma is hidrogén teszi ki az Univerzum anyagának legnagyobb részét.

Az anyag mélyebbenergiájú állapotai felé a gravitáció nyit utat. Megindult a lehült gázfelhők gravitációs összehúzódása. Hogy mekkora gázfelhő tud együtt maradni az a hőmérséklettől függ. Nagyon kis csomósódások tartósan nem maradhattak fenn, mert a

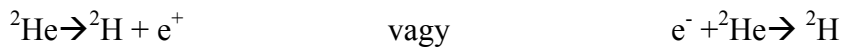
hőmozgás fölülkerekedett és széteszlatta volna. A tapasztalat az hogy az ekkor uralkodó viszonyok közt, a stabil gázgömbök tömege kb. 10^{40} kg körül lehetett. Egyes galaxisok perdületet örökölték a kezdeti örvénylő gázfelhőkből. Minél kisebbre csökkent a sugara, a perdület megmaradása szerint annál inkább gyorsult a forgás. Amikor a központi tömeg gravitációs térerőssége egyenlővé válik a perdület által kényszerített körmozgás centripetális gyorsulásával, leáll a befelé esés, a galaxis sugara már nem csökken tovább, hanem a gázfelhő forog.

Egyes sűrűsödő gázgömbök külső rétegei növekvő súllyal nehezednek a központi részre. Ott a gáz nyomása csak úgy képes hordozni a fokozódó gravitáció által növelt súlyt, hogy emelkedik a hőmérséklete. Ehhez a szükséges energiát a gravitációs erőnek befelé hulló rétegeken végzett munkája szolgáltatja, a gázgömb saját gravitációs helyzeti energiájának rovására. Innen táplálkozik a forrószódó gázgömb sugárzása is. A gázgömb izzani, világítani kezd. Ezt a csillagfényt a gravitációs energia csak néhány, egy-két millió évig lenne képes táplálni, a gravitációs erő túlságosan gyenge hozzá hogy tartós fénylést biztosítson. De amint a zsugorodó csillag belsejének hőmérséklete növekedik, a részecskék ütközése egyre hevesebbé válik. Ezen atomok egy kis hányadának sebessége – véletlen ingadozások folytán – lényegesen nagyobb hőmozgás átlagsebességénél. Egy-egy felgyorsult atommag –termikus ingadozás révén – akár olyan heves ütközést is produkál , ami ennél akár tízszer nagyobb energiájú. Még ez sem volna elég ahhoz hogy átlépje a Coulomb-taszítás gátját. De proton nem golyóbis hanem kvantumrészecske , amely nem mereven pattan vissza, hanem sima hullámként beszivárog a tiltott tartományba is, és kis amplitúdóval elérheti az elatlált mag vonzás tartományát.Ezt nevezzük alagútjelenségnek annál nagyobb eséllyel következik be, minél vékonyabb az áthatolandó fal, minél magasabb a beérkező atommag energiája. Ha a bejövő atommag mélyen hatol mélyen behatola másik mag Coulomb-taszításának övezetébe, hogy eléri annak nukleáris vonzástartományát, a magerő magához rántja a behatoló atommagot, munkavégzése mozgási energiát termel, majd ez az energia foton formájában kisugározódik. A létrejövő nukleáris kötés hidrogénből nehezebb atommag kialakulásához vezet.

A Nap

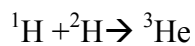
A Nap energia termelő folyamata nagyon hasonlít a hidrogén bombához azonban azt tapasztaljuk hogy a Nap folyamatosan egyenletes mennyiségű enegiát közöl. Ennek oka hogy a Nap fő alkotó eleme a könnyű hidrogén (^1H) és ha két proton ütközik a kvantum-alagúton át módnyilhatna arra hogy: $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{He}$ azonban a kvantum nyugtalanság miatt két proton

nem képes kötött rendszert kialakítani. Nagyon ritkán az instabil ${}^2\text{He}$ –nel bekövetkezik egy pozitív β bomlás: egy proton vagy elektront befogásával vagy pozitron kisugárzásával neutronná alakul:



A keletkezett deuteron már stabil atommag. De mivel a β bomlás gyenge kölcsönhatás egy protonnak évmillióig kell próbálkozni mire létrejön a deuteron, de Napban folyamatosan vannak ilyen szerencsés ütközések. Ennek a folyamat körülményes létrejöttének köszönhetjük hogy a Nap egyenletes használja fel üzemanyagát és egyenletesen adja le a hőt.

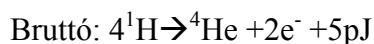
A deuteron már alkalmas további fúziós folyamatok beindításához, ezek a folyamatok már gyorsan követik egymást



folyamat másodpercek alatt végbe megy

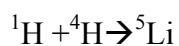


azonban már évmilliókba telik a megduplázódott töltés mennyiség miatt.



Ezek a hélium atommagok létrejötte jelentős mennyiségű kötési energiát szabadít fel. A Nap jelenlegi 15 millió fokos centrális hőmérséklete alkalmas arra hogy akár 10 milliárd évig sugározzon.

A Napon keletkezett ${}^4\text{He}$ - atommagnál megszakad a fúziós lánc, mert a hélium után az ún. Pauli-lyuk következik. Eszerint a



folyamat végállapota nem létezik. Ninc

folyamatra sem ${}^8\text{Be}$ instabilitása miatt. Az ilyen típusú csillagok ahol a magfúziós folyamatok hidrogéntől a héliumig tartanak fősorozatbeli s mód továbbá a

${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$ csillagoknak nevezzük, ezek az Univerzum legtartósabb és legegyszerűsebben fénylő égitestjei.

Amit még mindenképp meg kell említenünk, ha valami folytán Napunkban megszaladnának a fúziós folyamatok, akkor a gázok hőmérséklete megnövekszik és nyomása megnő, de a gravitációval szemben végzett tágulási munka folytán lehül, az erőmű teljesítménye csökken. Ha csökken akkor ellenkező folyamatok játszódnak le. Ennek köszönhető hogy Napunk megbízhatóan melegíti fel a Földet.

Vörös óriás

A csillagok öregedése a tömegétől függ, minél nagyobb a tömege annál nagyobb gravitációs vonzás, nagyobbá válik a külső rétegek súlya, ennek eredménye hogy a központi gázgömbre nagyobb nyomás hat, emiatt nagyobb lesz a központi hőmérséklet ez több ütközést eredményez, intenzívebb fúziót nagyobb energia felszabadulást jelent. A csillag így sokkal pazarlóban használja üzemanyagát rövidebb életű lesz. Amikor egy ilyen csillag felélte hidrogén tartalékainak nagy részét egyre ritkábbá válnak az ütközések, egyre kevesebb energia termelődik, de a csillagfelszíne továbbra is sugároz, ezért hogy ezt az energia igényt gravitációs kontrakcióval fedezi, ezért a központi gázgömbre egyre nagyobb nyomás nehezedik tehát ismét nőnie kell a hőmérsékletnek ami ha eléri a 100 millió K hőmérsékletet ${}^8\text{Be}$ (ami csupán 10^{-16} s marad meg) létrejötte után, már elég gyakoriak az ütközések ahogyan még egy ${}^4\text{He}$ ütközzön és ${}^{12}\text{C}$ jöjjön létre.



Ebben a nagyon kivételes folyamatban jön létre a szén. Ez a fúziós reakció, valamint a ${}^{12}\text{C}$ héjszerkezetéből adódó stabilitás magyarázza, hogy a ${}^{12}\text{C}$ az egyik leggyakoribb anyag az Univerzumban.

Ha kialakult a ${}^{12}\text{C}$, és a hőmozgás elegendő hogy $+6e$ töltésű C és $+2e$ töltésű α részecske legyőzhesse a Coulomb-taszítást és ${}^{16}\text{O}$ atommag jöhessen létre.

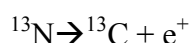
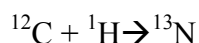


Az oxigén a héliumhoz hasonlóan teljesen lezárt héjakkal rendelkező atommag, mely nagy valószínűséggel alakul ki, viszont kevésbé szívesen épül tovább. A hidrogén és a hélium után az oxigén az Univerzum leggyakoribb eleme.

Egy további α részecske befogásával lehetséges ${}^{20}\text{Ne}$ atommag létrehozása azonban tovább nem haladhatunk, mert a $+10e$ töltésű atommagnál már olyan erős a Coulomb-taszítás hogy még kivételes esetben sem jöhet létre.



A vörös óriások 100 millió fokos központjában további magfúziós folyamatokra nincs lehetőség, legfeljebb páratlan rendszámú elemek jöhetnek létre proton befogással, például a nitrogén:





Gyöngébb kötése és kialakulásának komplikáltabb körülményeivel magyarázható hogy kevesebb nitrogén van mint szén és oxigén.

A forróbb He-égető csillagok centrumából kiáramló intenzív energia sugárzás nyomása tágabbra fújja a csillag légkörét, kb. 10-100 szorosára növeli a sugarát, felszínét 100-10000 szorosára növeli, ekkor a csillag felülete hűvösebb és nagyobb felület miatt fényesebb lesz. A csillag életének ezt a részét C és O termelő szakaszának (vörös óriás állapotnak) nevezzük.

Mivel az O atommagban lévő egy nukleonra jutó kötési energia alig kisebb mint a He atommagban, a He→O fúzióból sokkal kevesebb energia nyerhető, mint a H→He fúzióból. Emiatt, és a H→He fúziónál jelenlévő gát hiánya miatt a vörös óriás gyorsan felhasználja fúziós üzemanyagát, ezért ebben az állapotban mindössze néhány millió évet tartózkodik.

A He-tartalék kimerülése után ismét gravitációs összehúzódás következik, így a központi rész sűrűsége és hőmérséklete is növekszik. Ezen a ponton elágazik a csillagok életútja.

Fehér törpe

A kisebb tömegű csillagok esetén, a gravitációs kontrakció során elég nagy sűrűség elérésekor olyan állapot alakul ki, hogy a csillag elektronjai oly mértékben tömötten vannak pakolva, mint ahogy a nehéz atomok elektronhéjain. A csillag ilyenkor éppoly nehezen összenyomható, mint egy aranyatom, ezért nem képes tovább zsugorodni. Ha viszont leáll a gravitációs munkavégzés, a magban nem növekszik a hőmérséklet, nem nyílik lehetőség az újabb magfolyamatok beindulására.

Lecsökken a csillag energialeadása, ezért elhalványodik a csillag, hosszú időre konzerválódik. Ez a fehér törpe állapot. Az elhalványodás oka, hogy korlátozott a fénykibocsátásra vezető elektronátmenetek lehetősége, mélyebben nincs elérhető üres elektronállapot.

Neutroncsillag

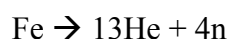
Nagyobb tömegű csillagoknál egészen másképp alakul a történet. Ezek központi hőmérséklete meghaladja a milliárd fokot, hiszen a magban lévő nyomásnak óriási tömeget kell ellensúlyoznia. Az élénk hőmozgás ezen a hőmérsékleten erősen gerjeszti az atomokat, ezért nem jöhet létre teljesen betöltött elektronhéjakkal jellemezhető elektronelrendeződés.

A csillag egy milliárd fokra és még forróbra hevül. Négy milliárd fokon már sokféle magfolyamat végbemehet. A He atommagok befogásával $^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{28}\text{Si}$ sorozat épül ki. Ezt követi a $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni}$ folyamat, amiből két β -bomlással ^{56}Fe képződik. Az anyag ekkor éri el legmélyebb energiaállapotát. A vas az Univerzum legstabilabb eleme. A vörös óriás tovább pazarolja energiáját, viszont az oxigén után nincs nukleáris tartaléka.

Az utolsó nukleáris energiatartalékok felélése után a csillag centrális része szinte a szabadesés sebességével atommag-sűrűségűre roskad össze. Ebben az extrém környezetben az elektron fordított β -bomlással beépül a protonba, azt neutronná alakítva át: $e_{\text{gyors}} + p^+ \rightarrow n$. Így csökken a gáz Pauli-nyomása. A neutronokból végül naptömegű óriási atommag alakul ki, amit a gravitáció néhány km átmérőjű gömb alakjában stabilizál. Ez a neutroncsillag. A csillag centrumának magsűrűsége történt hirtelen összeroskadásakor a középen kialakult szuper-atommagba csapódnak a behulló gázrétegek, annak felszínén lefékeződve hirtelen fölhevülnek, minek hatására lökeshullám indul kifelé, ami a világűrbe veti a csillag külső rétegeit. A kidobott gázfelhő szétterjed, az izzó felület felfűvódása hatalmas villanást produkál. Ezt észlelik a csillagászok szupernóva-robbanásként. A kidobott anyagban a vasig minden elem előfordul, sőt azon is túl. A neutroncsillagban kialakuló neutronok Fe-ba befogódva fölépítik a vasnál nehezebb atommagokat is.

A vasnál nehezebb atommagoknak, a magas protonszám miatt nagy az elektromos töltésük. Az elektromos taszítás akadályozza meg közvetlen ütközéssel történő fúziójukat.

A magas hőmérsékleten egymásnak ütköző atommagok neutronokat párologtatnak el, 10 milliárd fokon a vas disszociálni kezd:



A kipárologtolt neutronok befogódnak a megmaradt vas-atommagokba. Ezután a neutronfölösleget β -bomlás egyenlíti ki. Így elkezdődik a vason túli elemek kialakulása. A maganyag neutronbefogások és β -bomlások sorozatával lépked előre. Ezt nevezzük sétáló fúzióknak (angolul: slow process), röviden s-folyamatnak.

A túlsúly megrövidíti az élettartamot. A Tejútrendszer első csillagnemzedékének gyorsan megöregedő óriásai gyorsan végigfutottak a csillagélet állomásain és szupernóva-robbanással búcsúztak el az aktív nukleáris élettől. Ezután neutroncsillag-múmiává aszalódva bújtak vissza a sötétségbe. A szupernóvák által kivetett gázfelhők gazdagok voltak

nehézelemekben, fémekkel szennyezték be a csillagközi hidrogénfelhőket. Innen ered Napunk 0,026%-os vastartalma.

Ha az óriáscsillag forgott a tengelye körül, neutroncsillaggá összeroskadva pörgése fölgyorsul, hogy korábbi perdülete megmaradjon. A forgásideje rövidebb is lehet, mint egy másodperc. Ha van mágnesség, ami nem esik egybe a forgástengelyével, pörgő mágnesként elektromágneses indukcióval rádióhullám kibocsátására ösztönzi a környező ionizált gázfelhőt. Ezt mint nagyon rövid és éles rádiójelet fogják föl a földi rádiótávcsövek. Rádióimpulzusok bizonyítják, hogy a jeleket kibocsátó objektum átmérője mindössze néhány km (A kb. naptömegű neutroncsillag kiterjedés szempontjából akkora mint a Mátra). A pulzár által kibocsátott rádiósugárzás olyan intenzív, ami megközelíti egy csillag fényintenzitását. A néhány km átmérőjű atommagok létezése tehát tapasztalati tény.

Fekete lyuk

Az Univerzumban ritkák a $Z > 10$ rendszámú elemek, de közülük viszonylag nagyobb gyakorisággal kiválnak a ${}^4\text{He}$ -atommagok egymást követő befogása által fölépített elemek. A többi elem gyakorisága együtt 0,01%. A nikkelnél nehezebb elemek gyakorisága mindössze $10^{-5}\%$. Ezen felül mégis sokkal drágább az arany, a platina, a molibdén, mint például az ólom vagy a higany. Miért van ez?

Nem minden izotóp keletkezhetett közönséges csillagokban. A periódusos rendszer felépülése ${}^{56}\text{Fe}$ -ből indult ki. Ha a neutronabszorpció stabil atommaghoz vezetett, az kivárhatta újabb neutron befogását. De ha a neutronbefogással keletkezett atommag rövid felezési idejű volt, β -bomlott, mielőtt újabb neutront nyelhetett volna el.

Az Univerzumban kis számban előfordulnak olyan izotópok amik így nem jöhettek létre. Ezek csak akkor alakulhattak ki, ha a neutronbefogást egy-két másodpercen belül újabb követi, megelőzve a β -bomlást. De ehhez még a szupernóvákban sincs elég nagy neutronkoncentráció.

A csillagászok olyan csillagszerű objektumokat figyeltek meg, amelyek fényessége fölülmulta a galaxisokét (sokmilliárd csillag). A kvázi csillagnak tűnő objektumokat kvazároknak nevezték el. Egyik-másik kvazár körül sikerült megfigyelni a őt körülvevő galaxist. Ez adta a magyarázatot. A galaxist szülő felhő anyagának az a része, amelynek nem volt perdülete, egyetlen sokmillió naptömegű gázgolyóvá (hipercsillaggá) tudott sűrűsödni,

amely körül kialakult a perdületet hordozó galaxiskorong. Nagy tömegén a gravitáció hatalmas munkát végez, hőmérséklete milliófokokban mérhető. Ilyen hőmérsékleten az atommagok számottevő hányada szétforr.

A hipercsillag utolsó perceiben 10^{29} neutron/ m^3 neutronsűrűség is előfordulhat. Hatalmas neutronsűrűségben fürdenek az atommagok, melyben a neutronabszorpciók másodpercnél rövidebb idő alatt követik egymást. Ez rövidebb időköz, mint amai alatt a β -bomlás végbemehetne. Ilyen különleges körülmények között a nukleáris fejlődés elkanyarodik, és különösen neutrondús magok alakulnak ki. Ezt nevezzük r-folyamatnak (angolul: rapid process). Az így kialakult elemek közé tartozik többek között az arany, a higany és az irídium is. Az r-folyamatban sok olyan atommag képződhet, amelyeket lezárt neutronhéj jellemez. A hipercsillagokból szétszóródó anyagban később β -bomlások beállítják a tömegszámok leginkább megfelelő protonszámot.

A hipercsillag tündöklése minden mást fölülmúl, de csak rövid ideig, egy-két évtizeden át. Miután az óriás tündökölve eltékozolta energiáit, magába roskad, mivel a szörnyű súlyt nem képes elviselni sem az elektrongáz, sem a neutronokból összetett maganyag Pauli-nyomása. A gravitáció összeroppantja a hipercsillagot: egy ponttá esik össze. Ebben a pillanatban a hipercsillag eltűnik a szemünk elől. Ettől a pillanattól kezdve a fény többé nem képes kimászni a hipercsillag gravitációs vonzásából, hanem visszahull a hipercsillagra. Az objektum fekete lesz, az ilyen égitest nem érdemli meg többé a csillag nevet. A neve innentől kezdve fekete lyuk. Fekete lyukak létét csak gravitáló hatásuk, a befelé hulló ionizált gázokbezuhanás előtti sűrűsödése és forrósodása árulja el. Ilyen fekete lyuk van valószínűleg minden öreg galaxisnak a közepén. A kvazár egy hipercsillagnak első éveit jelző ragyogás a fiatal galaxis közepén. A kvazár élete csakhamar fekete lyukba torkollik. A mi galaxisunk közepén is keletkezése után nem sokkal kvazár ragyoghatott, amely nehéz fémeket szórt szét galaxisszerte, így Földünkre is jutott ezekből egy kevés.

Kozmikus sugárzás

A ^2H , ^3He , Li, Be, B atommagok nem lehetnek csillagtűz termékei, legfőljebb annak táplálói, mivel egy csillag belsejében ezek az anyagok elégnék vagy fuzionálnak. A könnyű atommagok csak termikus egyensúlytól távol képződhetnek. Ilyen helyzet lehetett a korai Forró Univerzum első perceiben.

Van azonban egy anyagforma, ahol különösen sok van ezekből a könnyű elemekből.

Ez a kozmikus sugárzás. Intenzív csillagászati események a világűrbe vetik az ionizált gázt, az elektronburokkal nem rendelkező töltött atommagokat. A Nap felületéről származó, rádióvévelt zavaró ionáramot nevezik napszélnek.

A világűrben kóborló pozitív töltésű atommagok „ütköznek” a mágneses nyomatékkal rendelkező csillagokkal. Az atommag és a csillag szóródik egymáson. Az ütközés során a kisebb energiájú nyer energiát. Ezáltal az atommagok mind nagyobb és nagyobb energiára tesznek szert. A mindenfelől Földünkre záporozó atommagokat fedezték fel mint kozmikus sugárzást. Benne a részecskék mozgási energiája sok-sok pikojoule értéket elérhet.

Ha egy ilyen nagyenergiájú kozmikus atommag csapódik a csillagközi gáz valamelyik atommagjába, a vehemens ütközés darabokra tördelheti azt. Ily módon egyes elszigetelt ütközésekben olyan kis kötési energiájú fragmentumok is létrejöhetnek, mint ^2H , ^3He , Li, Be, B. Ezért gyakrabban észlelik ezeket az atommagokat kozmikus sugárzásban.

Látható hogy a hidrogéntől az arany és egyéb más elemek kialakulásáig rendkívül hosszú és változatos út vezet. Sok a megválaszolatlan kérdés a csillagok végtelen világában, de talán a jövő tudománya megválaszolja számunkra.

Források:

- Marx György: *Atommagközelben*, Mozaik Oktatási Stúdió, Szeged, 1996
- I.S.Shklovskii: *Stars: Their Birth, Life and Death*, San Fransisco , 1978
- L.H.Aller: *The Abundance of the elements*
- R.J.Taylor: *The Origin of Chemical Elements*
- E.M.Burbidge, G.R.Burbidge, W.A.Fowler and F.Hoyle: *Synthesis of the elements in stars*
- L.H.Ahrens: *Origin and distribution of the Elements*, Pergamon Press, Oxford, 1979