

## A természetes radioaktív sugárzás

A radioaktív sugárzás felfedezése több egymást követő véletlen esemény és egy tévedés következménye volt. 1895-ben Röntgen katódsugárcsővel végzett kísérleteket. A katódsugárcsővet egyik kísérlete során fekete papírba burkolta. Az asztalra egy ettől független kísérlethez odakészített fluoreszkáló só minden kisüléskor élénken világított, annak ellenére, hogy sem látható fény, sem maga a katódsugár nem érte. Röntgen figyelme azonnal az új jelenség felé fordult. Rendkívüli gyorsasággal megállapította az újonnan felfedezett és általa X-sugárzásnak elnevezett sugárzás minden gyakorlati szempontból fontos tulajdonságát: nem látható fény, nagy, az anyag sűrűségétől függő áthatolóképességgel rendelkezik és a filmlemezen feketedést okoz.

Első megfigyelését 1895. november 8-án rögzítette és 1896. december végén Angliában már röntgensugarak segítségével illesztették össze egy eltört kar csontjait! A felfedezés érdekességéhez tartozik, hogy a röntgensugarak hatásait már jóval korábban mások is észlelték. A katódsugárcső közelében elhelyezett filmlemezek befátyolosodtak. "Máshova kell elhelyezni a lemezeket!" - adta ki az utasítást laboránsának számos kutató. A röntgensugárzás nem radioaktív sugárzás; a katódsugárcsőben felgyorsított önálló elektronok anyagban történő lassulása során a röntgensugárzás viszi el az elektron mozgási energiáját (fékezési sugárzás).

A röntgensugárzás felfedezése tehát egy véletlennek köszönhető. A radioaktív sugárzás észlelése viszont határozottan egy tévedés, majd egy azt követő véletlen esemény következménye. Becquerel atyai örökségként fluoreszkáló sók tulajdonságait vizsgálta. Véleménye szerint a fluoreszcens fény és a röntgensugár kibocsátása azonos okra vezethető vissza. Igen vastagon fekete papírba csomagolt fényképezőlemezre uránsó fluoreszkáló anyagot helyezett és erős napsugárzásnak tette ki. A film a várt feketedést mutatta.

Becquerel publikálta eredményeit és hibás következtetése, miszerint a feketedést a fluoreszcens fény okozza, széles körben elterjedt. 1896 tavaszán folytatta vizsgálatait. Egy alkalommal az idő beborult és így Becquerel a fent vázolt mérési összeállítást jól elsötétített szekrényébe helyezte. Napok múlva kíváncsiságból előhívta a lemezt és megdöbbenve tapasztalta, hogy az teljesen el van feketedve. Így kiderült, hogy a fluoreszcens fény és a röntgensugárzás kibocsátása között feltételezett kapcsolat nem érvényes. További kísérleteit már szisztematikusan végezte és megállapította, hogy a jelenség az urániummal van kapcsolatban és a sugárzás a levegőt éppúgy ionizálja, mint a röntgensugárzás.

Becquerel a további vizsgálatokat asszisztensére, Marie Curie-re bízta. A Curie házaspár hősies kitartással dolgozva további radioaktív elemeket fedezett fel: a polóniumot és a rádiumot 1898-ban. Jellemző a korra, hogy Curie-ék nem tudták, hogy a sugárzás energiája honnan származik; el sem tudták képzelni, hogy az elem a radioaktív sugárzás során átalakulhat. A termodinamika II. főtételének megsértését is inkább elképzelhetőnek tartották: *"A második csoporthoz tartozó hipotézisek szerint a radioaktív anyagok tulajdonképpen energiaátalakítók. Ez az energia származhat Carnot elvét (ez a termodinamika II. főtétele) megsértve a körülvevő közeg melegétől, amely ezáltal lehűl."* (1902.)

Rutherford 1898-ban megállapítja, hogy az urán radioaktivitása nem homogén; van egy roppant erősen ionizáló összetevője, amely azonban már egy papírlapon sem halad át, és egy nagyobb áthatoló képességű összetevője, amely azonban az ionizációnak csak kis hányadát okozza. A sugárzásokat - és -sugárzásnak kereszteli el. Később a -sugárzásról Becquerel megmutatta, hogy részecske természetű és a részecskék azonosak az elektronnal. Az -sugárzás azonosításához azonban sokat kellett várni: Rutherford 1909-ben bizonyította be,

hogy az  $\alpha$ -részek azonosak a kétszeresen ionizált héliummal. 1900-ban Villard felfedezi a legáthatóképebb sugárzást, a  $\gamma$ -sugárzást. Rövid idő múlva bebizonyosodik, hogy nagy energiájú elektromágneses sugárzásról, vagyis a röntgensugárzással és a fényvel rokon sugárzásról van szó.

## Hasadási reaktorok a Föld felszínén

Nem kell feltétlenül az égboltot böngészni, ha ősi, több milliárd éves reaktorokat akarunk találni. A tudomány történetében az egyik legmeggrázóbb felfedezést 1972-ben egy francia mérnök tette. Bouzigue mérnök a provence-i Pierrelatte-ben található, atomerőművek számára üzemanyagot gyártó gyár analitikusa. Rutinszerű mérései során vett észre egy furcsa anomáliát.

### Az oklói reaktorok felfedezése

Az uránnak két természetes izotópja található meg Földünkön, a 235-ös és a 238-as tömegszámú. A naprendszer és a Föld keletkezésekor adott  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  izotóparányú urán került bolygónk anyagába. Ez az arány az idők folyamán jelentősen megváltozott, mivel a két izotóp különböző felezési idővel bomlik. A  $^{235}\text{U}$  izotóp felezési ideje 700 millió, míg 238-as tömegszámú "testvéréé" 4,5 milliárd év, vagyis az előbbi, a  $^{235}\text{U}$  izotóp gyorsabban fogy, mint a  $^{238}\text{U}$ . Az izotópok felezési ideje nyilvánvalóan a világ minden részén, minden kőzetben ugyanakkora, így ugyan az izotóparány az évmilliárdok során megváltozott, de a világon mindenhol ugyanolyan mértékben. Ezt 1972-ig több száz mérés igazolta, a világon található uránércben az urán 235-ös és 238-as tömegszámú izotópjainak arányát mindig 0,7202%-nak találták, 0,00004 % pontossággal.

1972-ben a pierrelatte-i gyárban a gaboni Oklóból származó uránércből készítettek nukleáris üzemanyagot. Bouzigue rutinméréseket végzett, melyek során megállapította, hogy a feldolgozandó uránércben az izotópok aránya valamivel kisebb az addig tapasztaltnál: 0,717%. Különböző lehetőségeket vizsgáltak meg, ami a mért anomáliát megmagyarázhatja. Először is megállapították, hogy a bányába nem került használt nukleáris fűtőanyag. Ehhez túlságosan kicsi volt az érc sugárzása. Voltak olyan elméletek, amelyek földönkívüli űrhajó Földre zuhanásával, vagy egy ősi földi, nukleáris energiát is felhasználó civilizáció létevel próbálták magyarázni a jelenséget. A valóság azonban felülmúlta még ezeket a romantikus elméleteket is. Oklóban a kutatók egy ősi természetes atomreaktor maradványait találták meg!



Az 1972-ben lezajlott vizsgálatok során 6 természetes reaktor maradványait találták meg az oklói bányában és környékén. A mai napig összesen 17 természetes reaktor maradványait kutatták fel. Közülük 9-et teljesen kibányásztak. Az *OKLO 15* reaktor maradványai azonban érintetlenek, és a bányából egy furaton eljutva hozzá meg is tekinthető. A képen jól látható sárga foltok mutatják, hogy hol nagy az urán-oxid koncentrációja (kb. 70%) a homokkő hordozókőzetben.

## Természetes reaktorok működésének feltételei

Már 1956-ban egy japán fizikus, Paul Kuroda rámutatott a természetes reaktorok létének lehetőségére. Állítása nem keltett különösebb visszhangot a világon, még a tudományos életben sem. Munkája során kidolgozta a természetes reaktorok működésének feltételeit is.

Kuroda megbecsülte a történelmi kort, amíg természetes reaktorok létrejöhetnek. Az urán két izotópjá közül a 235-ös hasad könnyen. Mivel napjainkban a természetes uránban a 235-ös tömegszámú izotóp csak 0,7 %-ban van jelen, már nem lehetséges természetes reaktor. Ugyanis a 238-as izotópok és az ércben található egyéb szennyeződések "zabálják" a láncreakció fenntartásához szükséges neutronokat. Ráadásul a hasadásokkor keletkező gyors neutronokat a jobb hasítóképeség érdekében le kell lassítani. A lassítóanyag lehet víz, grafit, vagy nehézvíz. Az utóbbi vegyületben a hidrogén atomok helyett úgynevezett deutérium található. Az uránhoz keverendő lassítóanyag további neutronokat "eszik". Mivel a felsorolt anyagok közül a víz "eszi" leginkább a neutronokat, egyedül grafittal és nehézvízzel lehet természetes uránból reaktort építeni. Ezek az anyagok viszont nincsenek jelen a természetben. Más volt a helyzet azonban 2 milliárd éve! Ekkor a természetes urán  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  izotóparánya még 3% volt. 3 %-os uránnal pedig lehet víz lassítóanyaggal is reaktort építeni. (Ilyenek például a paksi atomerőmű reaktorai is.)

Munkájában Kuroda megállapította az uránatomok szükséges koncentrációját az érc hordozóközegében. Számításai szerint kb. 70%-os uránkoncentráció szükséges a kőzetben.

Kuroda meghatározta a reaktor kritikus méretét is, ami alatt a láncreakció nem indulhat be. Ekkor ugyanis az úgynevezett aktív zónából túlságosan sok neutron szökhet meg.

Végül rámutatott arra is, hogy az ércnek porózusnak kell lennie, hogy a pórusokba a víz beszívárogasson, hogy elvégezze a neutronok szükséges lassítását.

## Az oklói reaktorok kialakulása

A gambiai uránérc urántartalma valószínűleg vulkáni tevékenység folyamán került a föld felszínére. A vulkáni kőzetből azután a felszíni vizekbe oldódott. Körülbelül 1,7 milliárd éve már elegendő oxigén volt az atmoszférában ahhoz, hogy az urán eloxidálódjon. Az urán-oxid azonban vízben nem oldódó anyag, így nagy koncentrációjú rétegekben lerakódott.

## Az oklói reaktorok működése

Az oklói reaktorok tökéletesen kielégítették a Kuroda által megállapított követelményeket: A 17 reaktor nagy tömegű és nagy uránkoncentrációjú aktív zónái porózus hordozóanyagba, főleg homokkőbe ágyazódtak. A neutronnyelő anyagok koncentrációja a kőzetben elhanyagolható volt, a  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  arány 3% körül mozgott. A porózus homokkőben pedig jelen volt a neutronok lassítását (moderálás), illetve az aktív zónába történő visszaveretését (reflektálás) végző víz. A kőzetben jelenlévő víz kapcsolatban állt a felszíni vizekkel, illetve a talajvízzel.

Végre 1,7 milliárd éve a reaktorok kritikussá váltak. A láncreakciót a spontán hasadások, illetve a kozmikus sugárzás indíthatta be. A láncreakció korántsem volt egyenletes. Ahogy a hasadások száma egyre nőtt, egyre több hő szabadult fel, ami a víz felmelegedéséhez, esetleg elforrásához vezetett. A felmelegedés és a forrás csökkentette a kőzetben levő víz mennyiségét, így a reaktorok elvesztették kritikusságukat, ami a hasadások számának csökkentéséhez vezetett. Az ezt követő lehűlés során ismét víz szivároghatott a kőzetbe, újra felfuttatva a láncreakciót. Ez a pulzáló láncreakció a reaktorokban körülbelül 1 millió évig tartott. A reaktorokban uralkodó neutronfluxus  $10^9$ - $10^{21}$  / $\text{cm}^2\cdot\text{s}$  (ekkor egy  $1\text{ cm}^2$ -es felületdarabkán másodpercenként  $10^9$ - $10^{21}$  db. neutron halad át 1 másodperc alatt) volt. A ma működő energetikai reaktorokban ez az érték  $10^{13}$ - $10^{14}$  / $\text{cm}^2\cdot\text{s}$  körüli.

Amikor a természetes reaktorok működése, valamint a természetes radioaktív bomlás hatására az  $^{235}\text{U}$  izotóp koncentrációja a kritikus érték alá csökkent, az oklói természetes reaktorok végleg leálltak. Egykori működésüket mára csak a  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  arány lecsökkenése mutatja.

## Az ég fúziós reaktorai: a csillagok

Ha éjszaka, tiszta időben az égre tekintünk, néhány ezret láthatunk galaxisunk tízmilliárd csillaga közül. A csillagok a legősibb, ma is működő ismert nukleáris reaktorok. Fényük a bennük lezajló magfúziós folyamatok során felszabaduló energia egyik formája. Az éjszakai égbolt csillagainál jóval közelebb található naprendszerünk legősibb fúziós reaktora: maga a Nap, amely 10 milliárd éve működik. A földi életet nemző napsugárzás szintén termonukleáris reakciók közvetett, vagy közvetlen terméke.

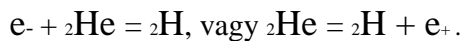
Ha kis rendszámú elemek keverékét több millió fokra felhevítjük, bizonyos ütközések **atommag-fúzióra**, az egyes atommagok egyesülésére vezethetnek. Ennek során óriási energia szabadul fel, ami természetesen tovább melegíti a keveréket, tovább növelve ezzel a fúzió valószínűségét. Ezt a gyorsuló, hatalmas energia-felszabadulással járó folyamatot hívjuk fúziós, vagy termonukleáris láncreakciónak. A termonukleáris láncreakció során nagyon rövid idő alatt az egész anyagmennyiség fuzionálhat. Ez történik például a hidrogénbombában. Tapasztalataink szerint azonban a nap és milliárd csillag-testvére már évmilliárdok óta körülbelül egyenletes

ütemben sugározza fényét. Vizsgáljuk meg, hogyan termelik a csillagok fényüket és mi szabályozza őket ilyen egyenletes tevékenységre.

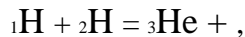
Az univerzum és így nyilván a csillagok messze leggyakoribb eleme a hidrogén. A hidrogén-atom magja egyetlen protonból áll. Tehát a fúzió kiinduló lépése két  ${}^1_1\text{H}$  kell, hogy legyen. Igen ám, de a



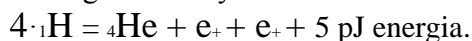
reakció végterméke, a két proton alkotta atommag nem stabil. Az alatt a roppant rövid idő alatt, amíg együtt vannak, nagyon kicsi valószínűséggel bekövetkezhet egy pozitív  $\beta$ -bomlás: az egyik proton elektron befogásával, vagy egy pozitron - az elektron antirészecskéje - kisugárzásával neutronná alakul át:



A keletkezett deuteron stabil mag, amely már alkalmas üzemanyag a további fúzióhoz. Másodpercek alatt lezajlanak a további folyamatok:



Összegezve a folyamatokat:



Az elmúlt 10 milliárd év során tehát a hélium nagy kötési energiája fedezte a  $10^{30}$  kg tömegű Nap  $4 \cdot 10^{26}$  watt teljesítményét. A Nap teljesítményének egyenletességéért pedig az instabil  ${}^2_1\text{H}$  pozitív  $\beta$ -bomlása, mint "nukleáris szelep" a felelős. Egy átlagos protonnak évmilliárdokig kell "próbálkoznia", hogy sikeresen lejátsszódjon a fent vázolt folyamat első lépése.

A Nap energiatermelésének folyamatát Gamow és Teller elmélete alapján Bethe és Salpeter dolgozta ki az 1930-as és 1940-es években.