

## A chicagói atommáglya

Már 1939-ben felmerült a gondolat, hogy a maghasadások során egyszerre több neutron is keletkezhet. Még ebben az évben egyszerre három helyen is kimutatták, hogy hasadásonként körülbelül 3 neutron keletkezik: Halban, Joliot és Kowalski Párizsban, Anderson, Fermi és Hanstein a Columbia Egyetemen, Szilárd és Zinn pedig a New York Egyetemen. Mivel ezek az eredmények a nukleáris energia felszabadításának és annak háborús felhasználási lehetőségére mutattak rá, a kísérletek pontos eredményeit titkosan kezelték. Nem tudjuk például, hogy a náci Németországban mikor születtek meg ezek az eredmények. A hasadásonként keletkező neutronok átlagos számát pontosan 1955-ben hozta nyilvánosságra az USA és a Szovjetunió egyszerre: az urán esetében hasadásonként átlagosan 2,47 darab neutron keletkezik.

1939-ben Einstein Szilárd Leó rábeszélésére egy - Szilárd Leó által fogalmazott - levelet küld Roosevelthez, amelyben felhívják az USA elnökének figyelmét az atombomba gyártásának lehetőségére, és hogy valószínűleg a németek már titokban dolgoznak ezen a nagy jelentőségű fegyveren. Elindul hát a nagy versenyfutás, amelyet a németek kezdeti előnyét legyűrve végül is az USA nyer meg: 1945-ben a Nevada sivatagban felrobbantják a világ első plutóniumos atombombáját. Az atombomba építésénél is fontosabb eredmény született már 1942. december 2-án: Fermi vezetésével a chicagói egyetem stadionjának lelátója alatt beindul az első *szabályozott* láncreakció.

### Chicago Pile-1: a chicagói atommáglya

A *korai* reaktortörténelem szorosan összefonódik a haditechnika történelmével. Sajnos azt kell mondanunk, ebben semmi különleges nincsen. Ne felejtjük: ahogy a világ első reaktorát a világ első atombombájának előállításához fejlesztették ki, a világ első számítógépén elvégzett első komoly feladat ugyanennek a bombának a számítása volt. Ezután a náci Németországban ugrásszerű fejlődést megért rakétatechnikát azért fejlesztették tovább még nagyobb ütemben, hogy ezeket a nukleáris tölteteket célba juttathassák. Napjainkban azonban nyilvánvaló mind a számítástechnika, mind a rakétatechnika pozitív szerepe a békés, civil társadalomban. Az atomreaktorok fejlődéstörténete is hasonló pályát írt le.

Amikor 1939-ben kimutatták, hogy a 235-ös uránium izotóp hasításakor 2-3 neutron keletkezik, a világ vezető tudósai felismerték a jelenség háborús jelentőségét is. Thomson az angol kormányt, Joos a németeket, Flerov Sztálint, Nishina a japán admiralitást értesítette. Az Egyesült Államokban Szilárd Leó rábeszélésére Einstein küldött - egy Szilárd Leó által fogalmazott - levelet az elnöknek, Rooseveltnek. A levélben felhívták az elnök figyelmét az atombomba lehetőségére, és hogy valószínűleg a németek már el is indították saját atombomba projektjüket. A levél hatására Roosevelt még 1939 végén létrehozta az Uránium Bizottságot. A bizottság 6000 (!) dollárt szavazott meg az atomenergia program elindítására. Ezután majd két évig semmit sem tettek, azon kívül, hogy a "megbízhatatlan" olaszokat és magyarokat - Fermi, Wignert, Tellert és Szilárdot - amerikai születésű tagokra cserélték a bizottságban.

Az Uránium Bizottság munkájának egy tragédia adott kezdő lökést: 1941. december 6-án a japán légierő Pearl Harbor kikötőjét rajtaütésszerűen megtámadta és elpusztította a csendes-óceáni flotta javát. Az USA hadba lépett. Az Egyesült Államok első számú ellensége azonban

mégis a német birodalom volt, ahogy ezt Jaltában 1943-ban ki is nyilatkoztatta Rooseveltnél. Ennek értelmében azonnal elindították az *"atombomba előállítására irányuló maximális erőfeszítést"*. A program fedőneve Manhattan Project volt. A Manhattan Project tudományos vezetője Compton, katonai vezetője a híres-hírhedt Groves tábornok volt. 1942 elején kezdődtek a kutatások a Metallurgiai Laboratórium fedőnevű intézetben. Az uránról, mint csőötvözetről szabadott csak beszélni. A kutatások több irányban folytak. Az első reaktor építésének célja plutóniumtermelő reaktor fejlesztése volt.

Az uránatomok (mind a 235, mind a 238-as tömegszámú) hasadáskor nagyenergiájú neutronokat bocsátanak ki. Az urániumot viszont a lassú neutronok hasítják jól, a gyorsakat hajlamosabbak befogni. Ezért a neutronokat praktikus lelassítani. Ehhez valamilyen kis tömegszámú elemet kell az urániumhoz keverni. A lassítás szempontjából a legjobb tulajdonságai a hidrogénnek vannak: átlagosan 13 ütközés során a neutron energiája kevesebb, mint milliomod részére csökken. A hidrogén azonban szereti a neutronokat "megenni": a hidrogénmag magányos protonjához "hozzátapadhat" a lassítandó neutron, és így deutériummag keletkezik. A neutront legkevésbé nyelő, de még elég kis tömegszámú elemek a hélium és az oxigén. Ezek azonban gáz halmazállapotúak, így a szükséges atommagsűrűség nem érhető el. Köztes megoldásként Fermi a szénen javasolta.

Így tehát az első atommáglya terve roppant egyszerű volt: uránium és szénpor keveréke. Szilárd Leó mutatott rá egy másik problémára: közepes energiákon az uránmagnak úgynevezett rezonanciái vannak. A rezonanciaenergián az uránmag neutronbefogási hatáskeresztmetszete óriási, vagyis nagy valószínűséggel elnyeli a rezonanciaenergiájú neutronokat. Tehát a szén által közepes energiáig lelassított neutronok jelentős része elvész egy homogén urán-szén keverékben. A későbbi számítások Szilárdot igazolták: szén és természetes urán *homogén* keverékét nem lehet kritikussá tenni. Szilárd javaslata a következő volt: az uránból vékony rudakat kell készíteni és azokat a moderátor-anyagba helyezni. A hasadásokkor keletkező gyors neutronok jó eséllyel ütközés nélkül kijuthatnak az uránrúdból a moderátor közegbe. Ott lelassulnak termikus sebességre (ekkor a neutronokat gáznak tekintve a neutrongáz hőmérséklete azonos a reaktor hőmérsékletével), majd az uránrúdba visszajutva nagy valószínűséggel újabb magokat hasítanak.

1942. december 2-ára Szilárd alapötlete alapján, Fermi vezetésével Zinn építette fel az *"atommáglyát"*. A helyszín a Chicagói Egyetem sportstadionjának lelátója alatti helyiség volt. A padozatra egy kis neutronforrást helyeztek. Erre egyre több grafitömböt helyeztek, amelyekbe kis uránium golyók voltak beágyazva. (1942-ben végre megkapták az 1939-ben megszavazott 6000 dollárt. Ebből vásárolták a grafitot.) Összesen 6 tonna uránt halmoztak fel 315 tonna grafitban. A máglya szabályozását automatikusan a reaktorba tolható, illetve onnan kihúzható, jó neutronnyelő kadmiumból készült rudak biztosították. Egy esetleges vészhelyzetben a reaktor leállítását két "rendszer" garantálta: a reaktor tetején készületben állt egy ember fejszével. A neutronok nemkívánatos exponenciális szaporodása esetén az ő feladata lett volna elvágni a tartalék kadmiumrudak tartókötelét, melyek a reaktorba zuhanva azonnal leállítják a láncreakciót. A mai reaktorok biztonsági leállító rendszerét az ő tiszteletére ma is **SCRAM**-nek hívják. A SCRAM az angol *"Safety Control Reserve Axed Man"* kifejezés rövidítése. (Kötetlenül magyarra fordítva: biztonsági baltás ember.)

Ezen kívül a máglya tetején állt egy - Wigner szavaival élve - *"öngyilkos-osztag"* is, kezükben a neutronokat szintén jól elnyelő bóros vízzel töltött vödrökkel. Szükség esetén ezt is a reaktorba öntötték volna.

1942. december 2-án 9.45-kor végre elkezdődött a döntő kísérlet. Fermi elrendelte a kadmiumrudak fokozatos kihúzását. Történelmi tény, hogy a kritikusságot már 11.30-kor elérhették volna, de Fermi néhány perccel a kritikusság elérése előtt ebédszünetet rendelt el.

Végül délután 15.30 kor az önfenntartó láncreakció megvalósult. Elkezdődött az atomkor! A reaktor körülbelül 200 W teljesítményen üzemelt még 30 percig, aztán Fermi kiadta az utasítást a reaktor leállítására. Compton az amerikai kormányt az alábbi szavakkal értesítette: "Az olasz kormányos most kötött ki az Új Világban. A bennszülöttek barátságosan fogadták."

## Az első hanfordi reaktorok

Az első hanfordi reaktorok: grafit moderátor, vízhűtés

1944. szeptember 26-án indult el az első nagyobb teljesítményű, plutónium termelésére alkalmas reaktor, a B pile Hanfordban. A B pile felépítése rokonságot mutat a chicagói atommáglyáéval, de itt már a hűtésről is gondoskodni kellett. A B pile-t a zónán keresztül 5 m<sup>3</sup>/sec térfogatárammal átfolyó víz hűtötte. A moderátor - a neutronokat lassító anyag - szerepét természetesen grafit játszotta. A grafit tömege 1200 tonna volt. A reaktorban 200 tonna fémurán hasadóanyag volt a töltet. A B pile 250 MW teljesítményen üzemelt és körülbelül egy hónap alatt 6 kg plutóniumot termelt.

Az első hanfordi plutóniumtermelő reaktor indításakor találkoztak a kutatók először a **xenonlengés** folyamatával. Ez első indítás után néhány órával - ekkor csak 100 MW teljesítményen üzemeltek - váratlanul magától leállt a reaktor. Másnap külső beavatkozás nélkül újraindult, majd néhány óra üzem után újra leállt. A váratlan viselkedés komoly fejtörést okozott a kutatóknak, de Wheeler kisvártatva megtalálta a magyarázatot. A hasadások során - közvetlen hasadási terméként - viszonylag nagy hozammal keletkezik a <sup>135</sup>I izotóp. Ez 6,7 óra felezési idővel béta-bomlást szenved és <sup>135</sup>Xe izotóppá alakul. A <sup>135</sup>Xe a leginkább neutronéhes anyag, amit ismerünk. Termikus neutronokra nézve befogási hatáskeresztmetszete kétmilliószorosa a mag méretének. Vagyis a lassú neutronok kétmilliószor akkorának látják a magot, mint amekkora annak valódi mérete. A <sup>135</sup>Xe 150-szer jobb neutronnyelő, mint az addigi "adu ász", a kadmium. Amikor tehát a reaktort beindítjuk, egyenletes ütemben <sup>135</sup>I izotópok keletkeznek. Mivel a <sup>135</sup>I több órás felezési idővel bomlik <sup>135</sup>Xe-ná, néhány óra alatt felhalmozódik a reaktorban. Ekkor azonban már gyors ütemben termelődik a <sup>135</sup>Xe is. Ekkor két eset lehetséges:

- Ha nem avatkozunk közbe, akkor a <sup>135</sup>Xe magok felhabzsolják a neutronok egy részét, aminek következtében leáll a reaktor. Néhány óra után azonban a <sup>135</sup>Xe magok jelentős része béta-bomlással magától elbomlik. Ekkor a reaktor újraindul.
- Ha külső beavatkozással megakadályozzuk a reaktor leállítását, akkor kintebb kell húznunk a szabályozó rudakat, hogy a reaktor a felhalmozódott <sup>135</sup>Xe magokkal együtt is kritikus maradjon. A <sup>135</sup>Xe magok neutront elnyelve megszűnnek nagy neutronnyelőnek - szaknyelven reaktorméregnek - lenni. Nyilván egy idő után egyensúlyi állapot áll be: ugyanannyi <sup>135</sup>Xe mag keletkezik, mint ahány kiég, illetve elbomlik.

A reaktor leállásakor szintén hasonló lengések következhetnek be. Minél kisebb teljesítményen üzemel egy reaktor, a lengés mértéke annál jelentősebb.

## Teller, a "reaktorellenző"

A negyvenes évek végén megalakult a Rektorbiztonsági Tanács Teller Ede elnökletével. Teller a következő biztonsági filozófiát követte: a nem nukleáris iparban bevett szokás, hogy az új technológiákat nagyon gyorsan alkalmazzák. A működés közben felmerülő problémákat aztán "menet közben" kivizsgálják, orvosolják. Teller szerint ez a gyakorlat a nukleáris iparban nem követhető, tekintettel arra, hogy nagyobb radioaktivitás kibocsátással járó baleset túl nagy kockázatot jelent. Ráadásul elriasztaná a közvéleményt és a döntéshozó szerveket a - békés célú! - nukleáris technika kibontakoztatásától.

A Rektorbiztonsági Tanács ennek értelmében már az engedélyezésre benyújtott reaktorterveknél megvizsgálta a lehetséges legsúlyosabb baleset következményeit, és több konstrukciót visszautasítottak még *azok megépülése előtt*. (Szakmai körökben Tellerék a "reaktorellenzők" gúnynévvel illették.) Sőt ennél is tovább mentek. Megvizsgálták a már működő hanfordi plutóniumtermelő reaktorokat, és súlyos biztonsági problémákat fedeztek fel. A grafit moderálású és vízhűtésű reaktorok üregtényezője pozitív - állapították meg Tellerék. Ez azt jelenti, hogy amennyiben elforr a hűtőközeg egy része, az növeli a rendszer reaktivitását - ami olyan, mintha kijebbn húztuk volna a szabályozó-rudakat. Vagyis ha egy véletlen ingadozás során túlhevül a reaktor egy része és elforr a víz, a reaktivitás automatikusan megnő, ami a reaktor továbbhevülését okozza. A két egymást erősítő folyamat akár a reaktor felrobbanását is eredményezheti.

A fent vázolt eredményekre hivatkozva, kemény küzdelemmel Tellerék elérték, hogy az '50-es évek elején az USA leállítsa hanfordi plutóniumtermelő reaktorait, és a továbbiakban sem engedélyezték több grafitmoderátoros, vízhűtéses reaktor építését. Nem méltatlanul tartják tehát Teller Edét a reaktorbiztonság atyjának. Sajnos Teller csoportjának számításai titkosítva voltak, így a szovjetek pontosan ilyen koncepciójú, nagy teljesítményű reaktorok fejlesztésébe kezdtek később. De erről majd a csernobili balesetről szóló fejezetben beszélünk részletesebben...

## Az oszthatatlan osztható!

### Avagy valóra válik az alkímisták álma

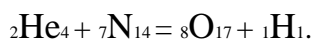
Mint azt az előző fejezetekben kifejtettük, a XIX. és a XX. század fordulója környékén meg sem fordult a tudósok fejében, hogy a radioaktív sugárzás az elemek átalakulásával lehet kapcsolatban. Ennek két alapvető oka volt:

- A kutatásokat ekkor főleg kémikusok végezték, akikben szinte dogmaként élt az elemek megváltozhatatlanságának elve. Ekkor még friss emlék volt az alkímisták történelmi kudarca. Valószínűleg nem véletlen, hogy a radioaktív sugárzással együtt járó elemátalakulást egy fizikus ismerni fel, annak ellenére, hogy a bomláskor megjelenő elem kimutatása kémikusi feladat. A történelem fintora, hogy majd 30 év múlva a maghasadás felfedezése - ami tipikusan fizikusi feladat - kémikusok nevéhez fog kapcsolódni, mivel a fizikusok nem tudják elképzelni, hogy -részecskénél nagyobb rész elhagyhatja a magot.
- A századforduló körüli években csak természetes radioaktív izotópokkal végeztek kísérleteket. A természetes radioaktív izotópok felezési ideje pedig igen nagy (az  $U_{238}$

esetében ez az érték 4,5 milliárd év), ezért nem tapasztalták az izotópok sugárzás során bekövetkező fogyását.

Rutherford és munkatársa, Owen tóriummal végzett kísérleteik során megfigyelték, hogy a kibocsátott sugárzás intenzitása jelentősen megváltozik, *ha a laboratórium ajtaját kinyitják*. Nem volt nehéz kitalálni, hogy a jelenség a levegő áramlásával van kapcsolatban. Rutherford megvizsgálta a preparátum fölött áramló levegő intenzitását, és azt találta, hogy annak radioaktivitása igen gyorsan eltűnik. Ma már tudjuk, hogy a radioaktív bomlás során keletkező, úgynevezett leányelem gyakran szintén radioaktív. És természetesen a leányelem felezési ideje már lehet tetszőlegesen kicsi. Rutherford 1903-ban megállapította, hogy a tórium leányeleme aktivitásának időfüggése exponenciális, vagyis a bomlások során az elem átalakul! Valóra válhat tehát az alkímisták álma! Csak még az aranytól is értékesebbek az elemek, melyeket így elő lehet állítani: a természetben eddig nem létező elemeket vagy izotópokat!

Rutherford a következő évtizedekben sem pihent. 1919-ben végrehajtotta az első mesterséges elemátalakítást. Természetes -sugárzást használt bombázó lövedéknek. Azt találta, hogy az -sugaraknak megfelelő hélium atommagok időnként kiütnek egy hidrogénmagot egy-egy nitrogénmagból. Blacket 1923-ban ködkamrában is megfigyelte a jelenséget és úgy találta, hogy ráadásul a hélium mag be is épül a nitrogénmagba, miközben egy protont kilök. Vagyis Rutherford a következő magátalakítást hozta létre:



Rutherford azt is megállapította, hogy a reakció során a kémiai reakciók során megszokottnál jóval több energia szabadul fel.

## Egy elképzelhetetlen dolog: a maghasadás

A neutron felfedezése után kutatók hada vizsgálta a neutronokkal létrehozható magátalakulásokat. A természetben a legnagyobb rendszámú elem az urán. Fermi várakozásai szerint, amennyiben az atommagba egy neutront lövünk be, akkor abban neutronfelesleg alakul ki. Ettől várhatóan -bomlással próbál megszabadulni. A -bomlás terméke pedig egyel nagyobb rendszámú elem. Fermi 1934-ben először állít elő transzurán - az uránnál nagyobb rendszámú, vagyis a természetben már nem létező - izotópot. Noddack egy cikkében élesen támadja Fermi, mivel szerinte nem járt el elég körültekintően a radioaktivitás okának kivizsgálásában: *"De éppolyan módon feltételezhető, hogy ha neutronokat használunk magátalakítás céljára, valami teljesen új típusú magreakció megy végbe, (...) elképzelhető, hogy az atommag széthasad több nagy töredékre, amelyek természetesen ismert elemek izotópjai lennének, de egyáltalán nem a besugárzott elem szomszédságában."* Itt merül fel először a maghasadás gondolata. Valószínűleg nem véletlen, hogy egy kémikus és nem egy fizikus agyából. Utóbbiak ugyanis elképzelhetetlennek tartották, hogy a magot -részecskénél nagyobb részecske elhagyhatja.

Fermihez hasonlóan Joliot-Curie és Savic' is létrehoz mesterséges maghasadást, de a jelenségre - a kísérleti evidencia ellenére - teljesen más magyarázatot adnak. Ők is uránt sugároztak neutronokkal, de szerintük ekkor a 89-es rendszámú aktínium keletkezik. A periódusos rendszerben az aktínium felett található az 57-es rendszámú lantán, vagyis ezek kémiailag hasonlóan viselkednek. Szétválasztásuk frakcionált kristályosítással történhet. (Kristályosításkor a lantán előbb kristályosodik kisebb atomsúlya miatt.) A radioaktivitás azonban a lantánt látszott követni. Végül kimutatták, hogy a radioaktivitás az aktíniumtól származott. Ma már tudjuk, hogy a radioaktivitás mégiscsak a lantántól származott. Így Joliot-Curie-ék egy hasadási terméket

fedeztek fel, de szinte szándékosan félreértelmezték a kísérletek eredményeit, annyira hihetetlenek voltak számukra a helyes következtetések.

Végül 1939-ben Hahn, Meitner és Strassman - megint csak kémikusok - publikálják eredményeiket: uránt neutronokkal besugározva maghasadás következik be. Ők is igen hasonló problémákkal küzdöttek, mint korábban Joliot-ék: A radioaktivitás a rádium, egy uránhoz közeli elem helyett a báriumot látszott követni. A rádium és a bárium szintén kémiaileg hasonlóak, de az utóbbi jóval kisebb tömegszámú az uránnál, így csak hasadás terméke lehet. Első cikkükben még ők is igen óvatosan fogalmaznak: *"Mint kémikusok azt kell, hogy mondjuk, hogy az új termék nem rádium, hanem inkább bárium. (...) Mindazonáltal, mint »magkémikusok«, akik a fizika területéhez közel dolgozunk, még nem tudjuk rászánni magunkat arra, hogy olyan drasztikus lépést tegyünk, amely szemben áll az összes eddigi magfizikában tett tapasztalatokkal. Talán lehetséges, hogy szokatlan körülmények sorozatának összejátszása mégiscsak hibás eredményeket adott."*

Bohr még 1935 során a finomított cseppmodell alapján megmutatja, hogy az urán két izotópja közül a 235-ös tömegszámú hasad.

## Einstein és a nukleáris energia

Az olvasót bizonyára régóta foglalkoztatja a gondolat, hogy miért nem említettük eddig még érintőlegesen sem Albert Einstein munkásságát. A válasz roppant egyszerű: ugyan korban már 27 évvel túlhaladtunk Einstein híres 1905-ös cikkén, az abban felismert összefüggéseknek a nukleáris energetika szempontjából csak 1932 körül lesz igazán jelentősége.

Einstein 1905-ös cikkében bebizonyítja az anyag és az energia azonosságát. Vagyis, hogy az anyag és az energia ugyanazon szubsztancia két megnyilvánulási formája. Közismert képletében ( $E=mc^2$ ) megadja a két megnyilvánulási forma közötti váltószámot is: a vákuumbeli fénysebesség négyzete. Érdekes adalék, hogy a cikk, amelynek megjelenéséhez sokan a XX. századi fizika nagy forradalmának kezdetét kötik, súlyos hibát tartalmaz az anyag-energia ekvivalencia elv levezetésében. Évtizedekkel később bizonyították be, hogy a kiinduló feltételek - rejtetten - tartalmazták a bizonyítandó állítást.

Gondoljunk bele az  $E=mc^2$  összefüggés jelentőségébe! Elképesztően gazdag energiaforrás látszott megnyílni az emberiség előtt. Az energiában addig legdúsabbnak ismert feketekőszénből 1 kg eltüzelésével körülbelül 100 l csapvizet forralhatunk fel. A Balaton összes vizének elforrálásához - júniusban - körülbelül 5 g tömegű anyagot kellene tökéletesen energiává alakítanunk. Az  $E=mc^2$  összefüggés azonban csak az anyag energiává alakításának elvi lehetőségére mutatott rá. A konkrét megvalósítást már a magfizikusok találták meg.