

75 ÉVE LETT KRITIKUS A CHICAGÓI REAKTOR, 115 ÉVE SZÜLETETT WIGNER JENŐ

Horváth András – BME Nukleáris Technikai Intézet
Radnóti Katalin – ELTE TTK Fizikai Intézet

Írásunkban a láncreakció felfedezését írjuk le eredeti dokumentumokra támaszkodva, majd bemutatjuk a 75 éve Chicagóban megépített első atomreaktor történetét. Az évforduló egyben lehetőséget ad arra is, hogy megemlékezzünk az idén 115 éve született Wigner Jenőről.

A láncreakció lehetősége

James Chadwick (1891–1974) 1932-ben fedezte fel a neutront. Szilárd Leó (1898–1964) abban az időben emigránsként már Angliában tartózkodott.

A londoni Imperial Hotel halljában a kezébe került a *The Times* 1933. szeptember 12-i száma, amely Lord Rutherford (1871–1937) egy, a Brit Tudományos Szövetségben tartott előadásáról is beszámolt. A szalagcím *Az atommag feltörése* volt, és az újság idézte is Rutherford szavait: „...mindenki, aki az atomenergia ipari léptékű felszabadításáról beszél, az holdkóros.”

Szilárd így emlékezett vissza a történetekre: „Ez a kategorikus kijelentés elgondolkodtatott, miközben London utcáit jártam. Emlékszem, hogy a Southampton sorhoz érve megállított egy piros közlekedési lámpa. Várnom kellett, hogy az úttesten átmehessek. Abban a

Készült a *Nukleon* című internetes folyóiratban korábban megjelent írás [7] alapján. A folyóirat engedélyével közöljük.



Horváth András a fizika alapszakot fizikus szakirányon az ELTE-n, a fizikus mesterszakot nukleáris technika szakirányon a BME-n végezte. A BME Nukleáris Technikai Intézetében dolgozik. Kutatási tevékenysége a reaktorfizika, mind a reaktorfizikai számítások, mind a kísérleti megvalósítások terén. Tantermi és laboratóriumi gyakorlatot tart a témával kapcsolatban. 2011 óta társ-szervezője az MNT Nukleáris Szaktáborainak, 2012 januárja óta pedig a *Nukleon* folyóirat technikai szerkesztője.



Radnóti Katalin az ELTE-n végzett kémiafizika szakos tanárként. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnáziumban nyolc éven keresztül tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Intézetében főiskolai tanár. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana. Publikációs tevékenysége is e témához kapcsolódik, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. A *Nukleon*, a Magyar Nukleáris Társaság internetes folyóirata főszerkesztője.

pillanatban, amikor a lámpa zöldre váltott, hirtelen eszembe ötlött: ha találunk egy elemet, amelyet a neutron szétver, és eközben két neutron keletkezik, ilyen elemből elegendő mennyiséget összegyűjtve önmagát fenntartó láncreakció jöhetne létre.” [1, 109. o.]

Röviden ez a következőképpen írható:



Ezzel megszületett a *nukleáris láncreakció* alap gondolata. A láncreakció kifejezést Szilárd egyes kémiai folyamatokra alkalmazott szakkifejezésből kölcsönözte. („A történetben minden bizonyítással akadnak legendás elemek, hiszen sokak szerint Szilárd Leót a piros közlekedési lámpák nem voltak képesek megállítani.” [1])

Szilárd ezzel az ötletével felkereste Ernest Rutherfordot. Válasz helyett a teljesen felingerelt lord kidobta az irodájából. Napok múlva is csak azt hajtogatta, hogy ez az ötlet mekkora badarság.

Ezek után Szilárd meglátogatott néhány fizikust, hogy pénzt szerezzen a kísérletek megkezdéséhez olyan elem felkutatására, amely a neutronokat képes megkettőzni. Megkeresett több cégvezetőt is, köztük a General Electric vezetőjét és Polányi Mihály közvetítésével a budapesti Tungstram gyár igazgatóját, Aschner Lipótot is, de egyik esetben sem járt sikerrel. A sikertelenség egyik oka az lehetett, hogy Szilárd a tárgyalópartnereknek nem mondott el mindent, ugyanis attól tartott, hogy ha a nukleáris láncreakció lehetősége, és annak pusztításra való alkalmazhatósága nyilvánosságot kap, akkor az rossz kezekbe kerülhet.

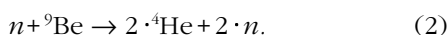
Rutherford lesújtó véleménye az atomenergia hasznosításáról.

<p>HOPE OF TRANSFORMING ANY ATOM</p> <p>What, Lord Rutherford asked in conclusion, were the prospects 20 or 30 years ahead?</p> <p>High voltages of the order of millions of volts would probably be unnecessary as a means of accelerating the bombarding particles. Transformations might be effected with 30,000 or 70,000 volts. Two methods of attack would be open: one by intensive streams of particles of relatively low voltages, the other by the use of higher voltages up to 5,000,000 volts, which ought to be sufficient to break down any atom on this earth, and he believed that we should be able to transform all the elements ultimately.</p> <p>We might in these processes obtain very much more energy than the proton supplied, but on the average we could not expect to obtain energy in this way. It was a very poor and inefficient way of producing energy, and anyone who looked for a source of power in the transformation of the atoms was talking moonshine. But the subject was scientifically interesting because it gave insight into the atoms.</p>	<p>RUTHERFORD COOLS ATOM ENERGY HOPE</p> <p>Sees 'Moonshine' in the Talk at Present of Releasing Power in Matter.</p> <p>NUCLEUS OFFERS PROBLEM</p> <p>Conversion of Energy Into Matter Is Reported at the Leicester Meeting.</p> <p>By WALDEMAR KAEMPFER. Special Cable to THE NEW YORK TIMES. LEICESTER, England, Sept. 11.—It was "atom-smashing day" at the meeting of the British Association for the Advancement of Science today. Lord Rutherford, Nobel Prize winner, who showed that the old infinitesimal, supposedly inextric-</p>
---	---

A sok hiábavaló próbálkozás után 1934. március 12-én szabadalmat jelentett be a neutronokkal kiváltott láncreakcióra. A szabadalmi leírásban a neutronokat megduplázni képes elem lehetőségeként Szilárd a berilliumot, a brómot és az uránt javasolta. A Brit Admirális a szabadalmat 440 023 szám alatt megadta, és Szilárd kérésére titkosította.

Szilárd szabadalmához 1934. június 28-án 630 726 szám alatt, majd 1936-ban 814 236-os számmal is nyújtott be kiegészítéseket, illetve pontosításokat. Megemlítette, hogy az önfenntartó láncreakció csak egy *kritikus tömeg* felett lehetséges, ugyanis az adott térfogatban keletkező neutronok számának felül kell múlnia a felületen át elszökő neutronok számát, ami csak egy minimális méret felett lehetséges.

1934-ben Szilárd a berilliumot tekintette a legreményteljesebb elemnek a láncreakció létrehozásához. Tudta, hogy a ^8Be instabil, rögtön két ^4He magra esik szét. A berilliumból egy neutron elnyelése után két neutron szabadul ki a következő reakció szerint:



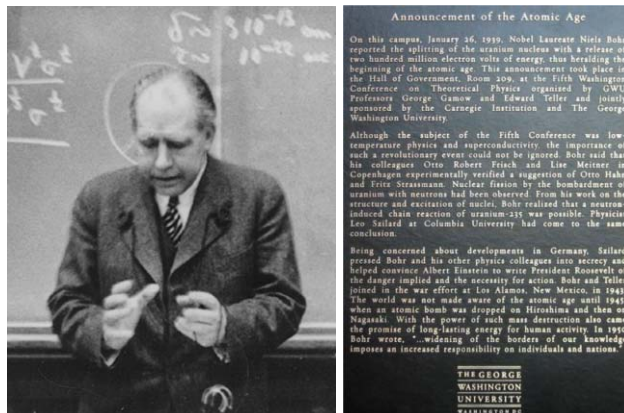
Akkor azonban már lehetett tudni, hogy ez a magreakció endoterm, tehát nem szabadíthat fel energiát. Ez azt is jelenti, hogy csak olyan neutronok tudják létrehozni, amelyek mozgási energiája egy küszöbértéknél nagyobb. Az, hogy a reakció endoterm azt is jelenti, hogy a reakció végtermékei összességében kisebb mozgási energiával rendelkeznek, mint a kezdeti állapot összes mozgási energiája. Ez az energia ráadásul meg is oszlik a végállapotban lévő négy atommag között, emiatt a keletkező neutronok mozgási energiája csak kisebb lehet, mint ami a reakció létrejöttéhez szükséges. Azaz, a reakcióból keletkező neutronok nem tudnak újabb ilyen reakciót létrehozni.

Szilárd néhányszor járt az Egyesült Államokban az 1930-as évek közepén és fontolóra vette, hogy elhagyja Európát, mivel a háború lehetősége egyre inkább körvonalazódott.

1938 szeptemberében a müncheni egyezmény idején egy előadásán vett részt az Egyesült Államokban, s látva Anglia politikai gyengeségét Németországgal szemben, eldöntötte: New Yorkba költözik. Amerikában elnyert egy pályázatot, hogy neutronduplázó magreakciókat keressen. Nem sikerült láncreakciót létrehoznia, így 1938. december 21-én a következő távirattal *visszavonta szabadalmát*: „Nem látszik szükségesnek, hogy szabadalmam érvényességét fönntartsák. Ezért szabadalmamat visszavonom. Szilárd Leó”

Amerika megismeri a maghasadást

A dán *Niels Bohr* (1885–1962) *Otto Frisch* (1904–1979) révén (aki nála dolgozott Koppenhágában) folyamatosan kapta a híreket a maghasadással kapcsolatos kísérletekről. Így arról is szinte első kézből értesült, amikor *Otto Habn* (1879–1968) és munkatársai Berlinben, 1938 végén felfedezték a maghasadást.



Bohr a maghasadást magyarázza, és az előadás emléktáblája: „Az atomkorszak bejelentése. 1939. január 26-án a Nobel-díjas Niels Bohr ezen a campuson számolt be az urán atommag hasításáról 200 millió elektronvolt energia kibocsátásával, ezzel beharangozta az atomkorszak kezdetét. Ez a bejelentés a Government Hallban történt, a 209. szobában, a George Washington University professzorai, George Gamow és Teller Ede által szervezett Ötödik Washingtoni Elméleti Fizikai Konferencián, melyet a Carnegie Intézet és a George Washington University együttesen támogatott.”

Bohr a Drottingholm gőzös fedélzetén 1939. január 7-én indult Amerikába és 16-án érkezett meg New Yorkba. Utazásának célja az volt, hogy néhány napig Princetonban tanítson és kísérletezzen, és később részt vegyen egy, az alacsony hőmérsékletek fizikájával foglalkozó elméleti fizikai konferencián Washingtonban. A konferenciát *George Gamow* (1904–1968) és *Teller Ede* (1908–2003) szervezte január 26. és 28. között.

A New York-i kikötőben *John Archibald Wheeler* (1911–2008) fogadta. Vámvizsgálatra várva Bohr elmondta neki, hogy az addig oszthatatlannak hitt atom kettéhasadt. Így Amerikában Wheeler értesült elsőként a maghasadás híreről. Később így jellemezte a kapott hír hatását: „Úgy éreztem magam, mint Ádám, aki felé az Úr kinyújtja ujját Michelangelo freskóján a Sixtus-kápolnában: az Úr átadta az üzenetet!”

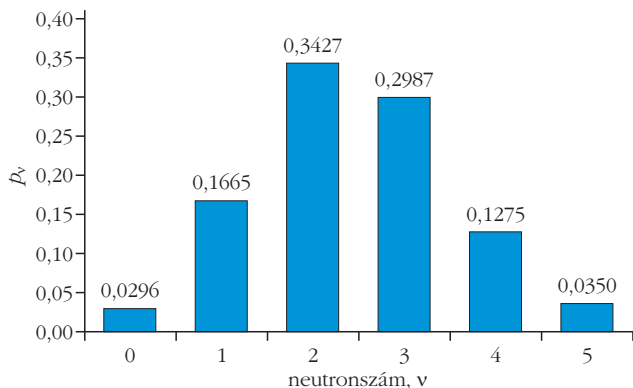
A washingtoni konferencia előzetes programját az elnöklő Gamow megváltoztatta, és Bohrnak adta meg a szót, ezzel a maghasadás került az érdeklődés középpontjába. A táblánál Bohr és *Enrico Fermi* (1901–1954) diszkutálták a jelenséget. Az előadás emlékét a George Washington Egyetem 209-es számú előadóterménél tábla őrzi.

A konferencia befejezésének napján több laboratórium hozzászólott a maghasadás kimutatásához és több újság címlapon számolt be az eseményekről.

A láncreakció megvalósítása

Amikor Szilárd Leó értesült a Bohr által Európából hozott hírekről, 1939. január 26-án a következő szöveggel táviratot küldött az Angol Admirális szabadalmi osztályára: „... kérem, tekintsek korábbi levelemet tárgyatlannak...”

Az Angol Admirális türelemmel és megértéssel kezelte Szilárd ellentmondásos lépéseit, és a 814 236 számú szabadalmát fenntartották.



Az ^{235}U hasadásában keletkező neutronok v számának valószínűségi eloszlásfüggvénye.

Ezek után Szilárd meglátogatta jó barátját, *Wigner Jenőt* (1902–1995), aki akkor épp kórházban feküdt. Wigner így emlékezett vissza a történetekre: „Hat hete kórházban feküdtem sárgasággal. Szilárd Leó eközben a lakásomban lakott. Majd minden nap meglátogatott a kórházban, hogy kedves magyar beszéddel felvidítson. Egyik nap az ágyamhoz lépett, és ezt mondta: Wigner, azt hiszem, hogy most meglesz a láncreakció. Arra gondolt, hogy a maghasadás lehetővé teszi a neutron-láncreakciót. Először ellentmondtam, de csakhamar beláttam, hogy igaza van.” [3, 122–123. o.]

Wigner Jenő 1902. november 17-én született Budapesten. 1925-ben vegyészmérnöki diplomát szerzett. Berlinben találkozott az atommagfizika másik magyar géniuszával, Szilárd Leóval, akihez azután egész életét végigkísérő, szoros barátság fűzte. Az 1963-as fizikai Nobel-díjat Wigner Jenő kapta – megosztva *Maria Goeppert Mayerrel* (1906–1972) és *Johannes Hans Daniel Jensennel* (1907–1973) – „az atommagok és az elemi részek elmélete terén, különösen pedig az alapvető szimmetriaelvek felfedezésével és alkalmazásával elért eredményeiért” indoklással.

A magfizika területén tett alapvető felfedezései a következők:

- A bariónszám megmaradása, miszerint a neutron átalakulhat protonná és viszont, de ezek nem eshetnek szét könnyebb részecskékre.

- A nukleonok közti rövid távú, erős kölcsönhatás az atommag belsejében, amely megmagyarázza, hogy miért nő meg jelentősen a kötési energia értéke, amikor a két részecskéből felépülő deutériumról a 4-es tömegszámú héliumra térünk át.

- A mágikus számok léte, amely azt jelenti, hogy bizonyos atommagok sokkal stabilabbak, mint a többi. Egyes proton-, illetve neutronszámok, mint 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ki vannak tüntetve, az ezeket tartalmazó magok stabilabbak, gyakoribbak [2–4].

Nem sokkal később Bohr és Wheeler közölték tanulmányukat a maghasadás elméleti leírásáról. Wigner erre így emlékezett: „Amikor elolvastam, örömmel láttam, hogy az uránatommag stabilitása tekintetében Szilárd és én több tekintetben messzebb jártunk, mint Bohr és Wheeler. Szilárd helyesen jósolta, hogy a maghasadás során neutronoknak is ki kell lépniük,

amiben Bohr és Wheeler kételkedett. Ők nem hitték, hogy nukleáris láncreakció megvalósítható, vagy ha esetleg mégis, akkor csakis igen alacsony hőmérsékleten.” [3, 124–125. o.]

1939. március 3-án Szilárd Leó Wigner Jenővel és *Walter Henry Zinn* (1906–2000) kanadai fizikussal New Yorkban a Columbia Egyetemen egy rádium-bezillium neutronforrásból származó neutronokat paraffinban lelassítottak.

A lassú neutronokkal uránt bombáztak, így bőven tudtak maghasadást előidézni. Az urán megszaportotta a neutronokat, hasadásonként legalább két neutron keletkezését figyelték meg:



A sikeres kísérletek után, március 9-én Szilárd felhívta Tellert, és a következőt mondta: „...megtaláltam a neutronokat!”

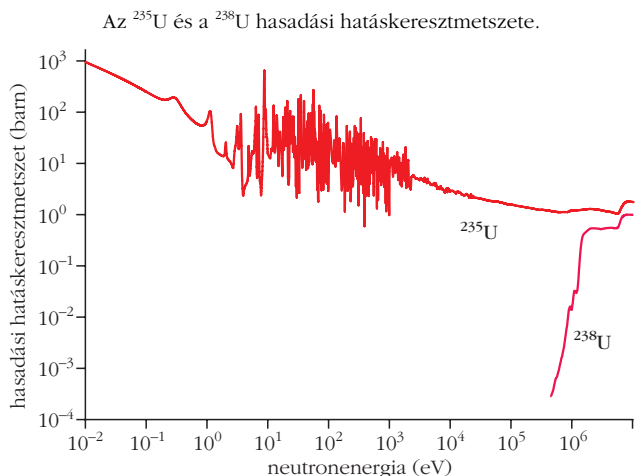
Szilárd éberségi okokból magyarul beszélt, mivel meg volt győződve róla, hogy lehallgatják.

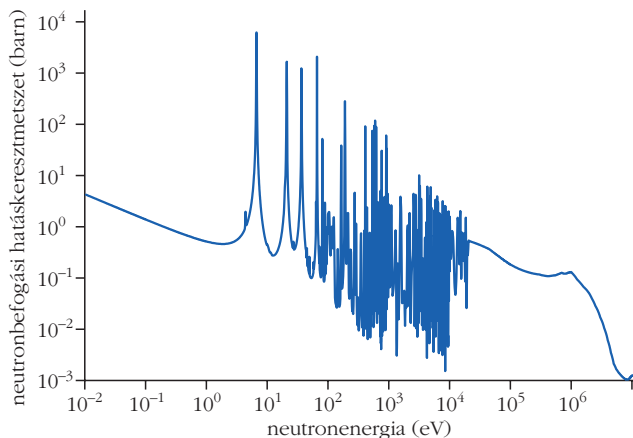
A (3) egyenletből látható, hogy az ^{235}U hasadásában nem pontosan két darab neutron keletkezik, hanem átlagosan 2,4. A hasadásban keletkező neutronok v száma 0 és 5 között változhat (ez az adat 1955-ig titkos volt!).

Ellenőrzésként Fermi és *Carl David Anderson* (1905–1991) ugyancsak vizsgálni kezdték az urán hasadását, de ők nem észleltek nagyszámú neutronkibocsátását. Ekkor Szilárd javaslatára ők is paraffinnal lassították a neutronokat, ettől megszaportak a maghasadások, megfigyelhetővé váltak a hasadásban keletkező gyors neutronok is. Ekkor már vitathatatlannak volt, hogy *lehetséges a láncreakció*.

A nukleáris reaktor ötlete

Bohr és Wheeler megállapították, hogy a természetes uránban a kis mennyiségben (0,71%) előforduló ^{235}U sokkal nagyobb valószínűséggel hasad, mint a 99,28%-ban található ^{238}U izotóp. A ^{238}U csak nagy energiájú neutronokra hasad, viszont a ^{235}U bármilyen





Az ^{238}U neutronbefogási hatáskeresztmetszetének rezonanciái.

energiájúakra. (Tanulmányuk 1939. szeptember 1-jén jelent meg, ezen a napon tört ki a II. világháború.)

Bonyodalmat okoz az is, hogy a neutronok a hasadásban átlagosan 2 MeV energiával keletkeznek. Ha a reaktor elegendő mennyiségben tartalmaz könnyű atommagokat, akkor a neutronok többsége termikus energiára lassul. Mivel a hatáskeresztmetszetek a termikus energiájú neutronokra a legnagyobbak, így az ilyen reaktorokban a láncreakciót a termikus neutronok tartják fenn. Ezért ezeket *termikus reaktoroknak*, a bennük lévő neutronlassító anyagokat pedig *moderátornak* nevezzük.

Figyelembe kell venni, hogy az átlagosan 2 MeV energiájú keletkező neutronok lassulás közben nemhasadó atommagokba befogódhatnak. Ebből a szempontból a legfontosabbak az ^{238}U rezonanciái. Ha a lassuló neutron energiája egy rezonanciaenergia közelébe esik, akkor nagy valószínűséggel befogódik, és egy ^{239}U mag keletkezik.

Fermi és Szilárd azon töprengtek, hogy miként lehet megvalósítani a neutron-láncreakciót. Szilárd arra gondolt, hogy a hasadásban keletkező gyors neutronokat az ^{238}U -ban való befogódásuk előtt az uránon kívül kell lassítani, majd a lassú neutronokat visszaengedni az uránba, hogy ott az ^{235}U -t elhasítsák.

Szilárd javaslata szerint az ilyen *atomreaktor* természetes urán hasadóanyaggal, és természetes víz moderátorral működhetne.

A *Physical Review* már 1939 júniusában publikálta ezt az elképzelést. A Csehországból kivándorolt *George Placzek* (1905–1955) a publikáció hatására kiszámította, hogy a vízben lévő hidrogén túl sok neutronot fog be a következő magreakció során:



Placzek moderátornak víz helyett héliumot ajánlott (a hélium magfizikai szempontból is teljesen zárt héjjal rendelkezik), de Szilárd ezt gáz halmazállapota és a nagyon kicsi sűrűsége miatt alkalmazhatatlannak találta, így ő *grafit moderátort* javasolt. Elképzelése szerint az uránt grafitba kell ágyazni úgy, hogy az urángolyók sugara olyan kicsi legyen, hogy belőlük ütközés nélkül lépjenek ki a neutronok. Grafitból viszont olyan sok

kell, hogy benne minden neutron lelassuljon, mielőtt újra uránt ér. Számításainak eredménye biztató volt, ezért az urán-grafit reaktor ötletével felkereste Fermi. Fermi azt válaszolta, hogy ő is gondolt a grafitra, mint moderátorra, de számításai szerint az nem működne. Fermi urán és grafitpor homogén keverékét tétélezte fel, amiben valóban nem működne a láncreakció, mivel az ^{238}U a lelassulás előtt befogná a gyors neutronokat. Tehát Fermi és Szilárd ötlete „csak” annyiban tért el egymástól, hogy Szilárd javaslata az *inhomogén urán-grafit reaktor* volt. Így 1939 júliusára ígéretesnek tűnt a reaktor megvalósíthatósága. Azt, hogy mekkora legyen a reaktor, egyikük sem tudta. Úgy gondolták, hogy grafitömböket grafitömbökre raknak, és közéjük urándarabokat tesznek mindaddig, amíg el nem érik a kritikus méretet.¹

Fermi és Szilárd közösen dolgozott tovább az inhomogén reaktor tervein, *Divergens láncreakció uránból és grafitból álló összetett rendszerben* címmel dolgozatot is írtak, de egyelőre nem jelentették meg. 1944. december 19-én szabadalmat kértek rá, amit csak 1955-ben, 2 708 656 szám alatt, Fermi halála után kaptak meg.

Az amerikai atomprogram beindul

Szilárd sürgette, hogy kísérletileg ki kell próbálni, vajon a grafitömbökből és urángolyókból elég sokat összehalmozva meg lehet-e valósítani az önfenntartó láncreakciót.

Ez közel sem volt olyan egyszerű, mint amilyennek tűnt. Az Egyesült Államokban nem lehetett nagy tételben uránhoz jutni, valamint a kapható grafit meg sem közelítette a kívánt tisztaságot. A reaktorhoz szuper-tiszta grafitra volt szükségük, amihez viszont rengeteg pénz kellett. Szilárd Leó tanulmányaiból emlékezett arra, hogy a grafit gyártásánál általában bórkarbid (B_4C) elektródokat használnak. Emiatt személyesen tárgyalt a gyárral, hangoztatta a rendkívüli tisztaság fontosságát, ugyanis a szennyező atommagok (*reaktortörmégek*, ez esetben a bór) neutronelnyelése elfojtáná a láncreakciót. Az első tájékoztató kísérleteket Fermiék már 1941 júliusában a Columbia Egyetemen elvégezték. Az eredmények ígéretesek voltak, a tiszta grafit nagyon kevés neutronot nyelt el. Anyaghiány miatt a kísérletek csak lassan folytak, de Fermi szeret-

¹ A német fizikusok is foglalkoztak atomreaktor építésével. (A német vezetés nem erőltette *atombomba* építését, mert az *Heisenberg* tanúsága szerint több évet vett volna igénybe, a vezetés pedig világháború megnyerésében bízott.) Az első gondolat itt is grafit neutronlassító volt, de az I. G. Farben kémiai gyár szennyezett grafitot szállított, azon pedig *Bothe* kiábrándítóan magas neutronelnyelést mért. Ezért nehézvízlassítóra tértek át. Nehézvíz előállítására norvégiai nehézvízgyárat használtak, amíg azt angol ejtőernyős kommandósok szét nem robbanták. Háborús viszonyok közepette lassan ment a reaktorépítés. Az utolsó reaktorelrendezést 1945 tavaszán Haigerlochban egy söröspincében állították össze, de abban még nem alakult ki láncreakció, amikor az amerikai csapatok megérkeztek. Utólag kitudt, hogy volt elég urán és volt elég nehézvíz. Ha a németeknek lett volna még egy-két hetük, rájöttek volna, hogy a nehézvízbe lógó uránfüzéreket közelebb helyezve egymáshoz beindulna a láncreakció [2].



Stagg Field nyugati szárnya, az első atommáglya otthona.

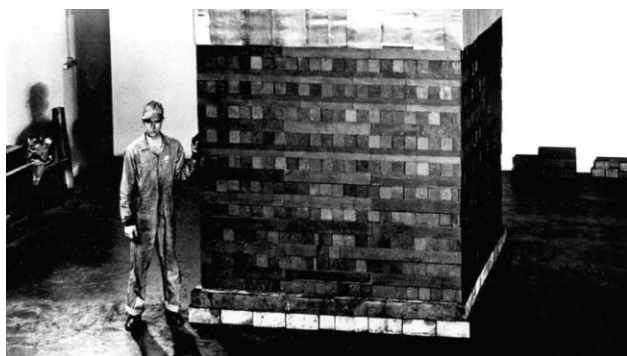
te volna valahogy meggyorsítani a munkát. Meg volt győződve róla, hogy egy kisebb máglya viselkedéséből sokkal több információhoz juthatna, és ez segítené nagyobb építését.

A folyamatosan érkező grafitból és uránból elkezdtek építeni a máglyát. Lassacskán nőtt a fekete fal, mígnem elérte a mennyezetet. Ez a méret közel sem volt olyan nagy, hogy benne önfenntartó láncreakció alakulhasson ki. Fermi szerette volna megtudni, mennyivel növelhető a máglya teljesítménye, ha a levegőt kiszívják belőle. Arra gondolt, ha az ételt a konzervdoboz megóvjá a levegőtől, akkor a máglyát is megóvhatja egy nagy „konzervdoboz”. A fémdobozt részletekben készítették, majd amint a máglyát körbevették vele, kiszívták belőle a levegőt. A neutronvesztésre tett hatás észrevehető volt, de nem jelentős, így Fermi arra gondolt, hogy metánt, nem abszorbeáló gázt kellene nyomni a grafit lyukacsiba, így fokozva a máglya teljesítményét.

Csakhogy a levegővel kevert metán felrobbanhat (sújtólég), és Fermi nem akart több kockázatot vállalni. Ráadásul balesetek is történtek. Zinn kinyitott egy tóriumporos dobozt, az fölrobbant a kezében, a kesztyűje pedig tüzet fogott. Zinn keze és arca súlyosan megégett, hetekig kórházban kellett feküdnie. Nyilvánvalóvá vált, hogy abban a laboratóriumban nem lehet a végső sikerig folytatni a kísérletet.

1941. december 8-án az osztály élére *Arthur Compton* (1892–1962), a Chicagói Egyetem Fizika tanszékének vezetőjét nevezték ki.

Gyűlnek a nagytisztaságú grafitéglák.



1942 januárjában Compton úgy döntött, hogy a reaktor tervének kivitelezése érdekében az egész társaságot a „veszélyes” atlanti partról Chicago városába, egy fedél alá kell telepíteni. A program itt a *Metallurgiai Laboratórium* fedőnév alatt működött.

Chicago

1942 tavaszán Compton Chicagóba hívta Fermi és Wignert. Később Teller is csatlakozott a csoporthoz, az ő feladata a reaktorban keletkező ^{14}C esetleges környezeti hatásának vizsgálata volt.

A legjobb hely, amit Compton a máglya építéséhez talált, a Chicagói Egyetem stadionjához tartozó Stagg Field nyugati szárnya alatt lévő fedett tenispálya volt. *Robert Maynard Hutchins* (1899–1977), a Chicagói Egyetem igazgatója kitiltotta az amerikai futballt az egyetem területéről, úgyhogy a Stagg Fieldet csak ritkán használták. A fedett pálya 9 méter széles, 20 méter hosszú és több mint 8 méter magas volt. Anderson felelt az anyagok odaszállításáért.

A szállítás üteme bár állandó, de nagyon lassú volt. Az urán beszerzése mindig akadályokba ütközött. Amíg az anyagokat várták, Anderson meglátogatta a Goodyear gyárat, hogy megrendeljen egy négyszögletű ballont. A Goodyear tisztviselői nem hallottak még négyszögletű ballonról, nem hitték, hogy le tudják gyártani. Anderson megadta a pontos részleteket, és a Goodyear vállalta, hogy készít egy gumirozott szövetből gyártott négyszögletű ballont. A szállítást csak jó néhány hónappal későbbre vállalták. Összehajtván hatalmas csomag volt, mikor azonban kiterítették, a padlótól a mennyezetig ért. Minderre azért volt szükség, mert New Yorkban látták, hogy beburkolt máglyával, amiből kiszivattyúzták a levegőt, jobb eredményeket lehetett elérni. Egy akkora máglyát, amekkorát építeni terveztek, lehetetlen lett volna lemezzel burkolni, viszont belerakhatják egy négyszögletes ballonba, amiből szükség esetén ki lehet szívni a levegőt. Úgy gondolták, hogy ezzel a megoldással csökkenteni lehet a máglya kritikus méretét.

A padozatra egy kis Ra-Be neutronforrást helyeztek. Erre grafitömböket helyeztek (mint máglyába a fahasábokat), amelyekbe kis urángolyók voltak beágyazva.

Fermi és Zinn is részt vett az építésben, fűrészelték és cipelték a grafitömböket. Szilárd Leó az ilyen munkát lealacsonyítónak érezte, amit jobb asszisztensekre és technikusokra bízni.

Fermi 25 különböző urán-grafit elrendezést próbált ki, mérték, hogy miként változik a neutronok száma a neutronforrástól távolodva. Ha egy-egy réteg a neutronok N számát k -ad részére csökkentette, akkor n réteg fölött a kezdeti N_0 számú neutronból

$$N_n = N_0 k^n \quad (5)$$

neutron maradt. Az volt a kérdés, hogy elérhető-e a $k \geq 1$ érték. A különböző elrendezéseknél mért ada-

tok alapján Wigner következtetett arra, hogy milyen lesz az a reaktor, amelyben a láncreakció már önmagát fenntartja. Végül egy felfelé keskenyedő hasábalak vált be, így a máglya nem érte el a mennyezetet. A tervezett utolsó rétegek sosem kerültek a helyükre, mert a máglya a számítottnál előbb érte el a kritikus méretet. Légüres térre sem volt szükség, így a gumibalont sosem zárták be.

A háromszáztizenöt tonna grafitban összesen hat tonna uránt és negyvenöt tonna urán-oxidot halmoztak fel.

A máglya szabályozását a reaktorba tolható, illetve onnan kihúzható, kadmiumból készült neutronnyelők rudak biztosították. (A ^{113}Cd kitűnő neutronnyelő, százszor nagyobb valószínűséggel fog be kis energiájú neutronot, mint például a szomszédos ^{113}In .) Mikor a máglyába újabb elemeket tettek, a kadmiumrudakat óvatosan kihúzták, és mérték, hogy a máglyába bevitt neutronforrás által termelt neutronokat milyen mértékben sokszorozza. Amíg a máglya szubkritikus volt ($k < 1$), a következőképpen okoskodtak: ha a neutronforrás időegység alatt S_0 neutront juttat a máglyába, akkor l neutron-élettartamnyi idő (1 ciklus) elteltével ennek k -szorososa marad a máglyában. Tehát kezdetben S_0 neutron, az 1. ciklus végén $S_0 \cdot k$ neutron, a 2. ciklus végén $S_0 \cdot k^2$ neutron, míg az i -edik ciklus végén $S_0 \cdot k^i$ neutron lesz a rendszerben.

Nagy számú ($i \rightarrow \infty$) neutronciklus elteltével a rendszerben lévő neutronok teljes S száma:

$$S = S_0 + S_0 \cdot k + S_0 \cdot k^2 + \dots + S_0 \cdot k^i + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} S_0 \cdot k^i. \quad (6)$$

Ezen végtelen mértani sor összege:

$$S = \frac{S_0}{1 - k}. \quad (7)$$

Ez a mértani sor csak akkor konvergens, amikor a máglya szubkritikus ($k < 1$). Minél kisebb a k , azaz a rendszer minél messzebb van a kritikusságtól, annál kevesebb időt kell várni, hogy a teljes forrásereiséget elértek lehessen tekinteni. Amikor átlépték a $k = 1$ értéket, a forrásereiség nem stabilizálódott, hanem exponenciális függvény szerint növekedni kezdett. Ez jelezte azt, hogy megvalósult az önfenntartó nukleáris láncreakció. Ezért az ilyen kísérletet *exponenciális kísérletnek* nevezzük. A teljes forrásereiséget a külső neutronforrás erősségével elosztva ($k < 1$ esetén) kapjuk a rendszer *erősítési tényezőjét*:



Az első atommáglya első indítása (fénykép nem készült az eseményről).

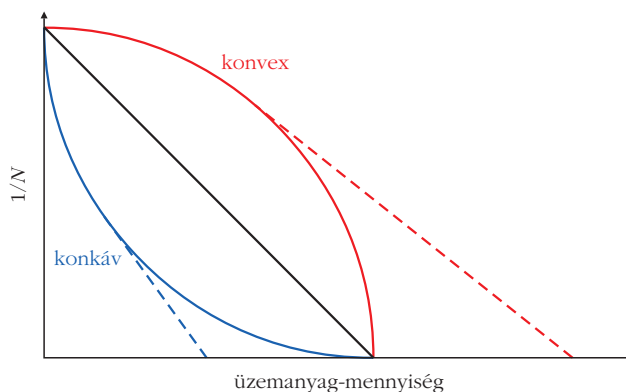
$$M = \frac{S}{S_0} = \frac{1}{1 - k}. \quad (8)$$

Subkritikus rendszerben k minden esetben 0 és 1 közé esik, ezért $M > 1$ adódik. Ha a neutrondetektor által időegység alatt mért neutronok N számának reciprokát a máglyában lévő urán tömegének függvényében ábrázoljuk, csökkenő görbét kapunk, amely a kritikus tömegnél metszi a vízszintes tengelyt.

Ideális esetben egyenest kell kapni, viszont k megváltozása erősen függ attól, hogy az adott hasadóanyagot melyik pozícióba helyezték. Ha a detektor a forráshoz és a zónához képest úgy van elhelyezve, hogy közvetlenül a forrás-neutronokat detektálja, nagy valószínűséggel konvex görbét kapunk. (A konvex görbe mentén haladni veszélyes dolog, mivel ez a kritikus tömeget felülbecsüli!) Ha a detektorok megfelelően vannak elhelyezve, akkor konkáv görbét kaphatunk. (Ez az eljárás a biztonság irányába mutat, mivel a konkáv görbe konzervatív becslést ad a kritikus tömegre.) Amíg a hasadóanyag tömege kisebb, mint a kritikus tömeg, a mért görbe extrapolációjával egyre jobb becslést kaphatunk a kritikus tömegre. Fermiék óta ezt az eljárást *kritikussági kísérletnek* nevezzük. (A reaktorok mellett a mai napig használják.)

A neutronok elszaporodásának megakadályozására tartalék rudak álltak rendelkezésre, amelyek egy kötő-

A kritikussági kísérlet grafikonja.





Az első atommáglyát beindító csoport 1946-ban a Chicagói Egyetemen. Elöl (balról jobbra): Enrico Fermi, Walter Zinn, Albert Wattenberg és Herbert L. Anderson. A középső sorban: Harold Agnew, William Sturm, Harold Lichtenberger, Leona Woods és Szilárd Leó. Hátul: Norman Hilberry, Samuel Allison, Thomas Brill, Robert Nobles, Warren Nyer és Marvin Wilkening. A jobb oldali képen a Ferminek adott chianti palackja.

len függtek a reaktor felett. A reaktor tetején három ember fejszével állt készenlétben (őket „öngyilkos osztag”-nak nevezték), hogy a neutronok túl gyors exponenciális szaporodása esetén elvágják a tartalék kadmiumrudak tartóköteleit, mire azok a reaktorba zuhanva azonnal leállítják a láncreakciót. (A mai reaktorok biztonsági leállító rendszerét az ő emlékükre ma is SCRAM-nek – Safety Control Rod Axe Man –, azaz fejszés embernek hívják.)

Az első grafitégla lerakásától a máglya elkészültéig mindössze hat hét telt el.

1942. december 2-án reggel mindnyájan felmászta a Stagg Field északi végén lévő balkonra, kivéve a máglya tetején álló három embert és egy fiatal fizikust, *George Leon Weil* (1907–1995). Az ő feladata volt, hogy utasításra kihúzza a kadmiumrudat a máglyából. Első lépésként a szabályozó rudakat – kivéve a Weil által kezeltet – húzták ki. Az önfenntartó láncreakció megakadályozásához az az egy rúd is elegendő volt.

A kísérlet kezdetén Weillel kihúzták a rúd egy részét, majd méréseket végeztek, hogy megbizonyosodjanak, a máglya működésbe lépett-e.² A rudat úgy állították be, hogy négy méter még a máglya belsejében maradjon. A számlálók kattogni kezdtek, az írószerkezet tolla felszaladt, majd megállt azon a ponton, ahol Fermi jelezte. Fermi további utasításokat adott, és ahányszor Weil egyre jobban kihúzta a rudat, a számláló kattogása egyre sűrűbb lett. Ezzel el is ment a délelőtt, majd Fermi ebédszünetet rendelt el. Ebéd után mindenki újra elfoglalta helyét, majd a kísérlet

² Ebben az időben már tudott volt – *Richard Brooke Roberts* (1910–1980) és munkatársai 1939-es felfedezése nyomán –, hogy a hasadásban azonnal (kevesebb, mint 10^{-14} másodperc után) emittáló neutronok mellett később is bocsátódnak ki neutronok. Igaz, hogy ezek gyakorisága csak 0,65%. Ezek a neutronok egyes hasadási termékek β -bomlása után keletkeznek, ezért megjelenésük felezési ideje akár több tíz másodperc is lehet. A késő neutronok teszik lehetővé, hogy az atomreaktorokat szabályozni tudjuk, mivel meghosszabbíthatják a neutrongenerációk effektív generációs idejét. Ez a jelenség biztosítja, hogy a máglya enyhén szuperkritikus állapotba kerülése esetén is legyen elegendő idő a hasadások leállítására. (Szerk. megj.)

ismét lassú léptekkel haladt tovább, egészen fél négyig. Fermi még egyszer odaszólt Weilnek, hogy húzzon még ki körülbelül 30 centimétert. Tudta, hogy ennek már meglesz a hatása, és valóban, a *láncreakció beindult*, ezzel a máglya 1942. december 2-án délután kritikussá vált. Wigner Jenő, akit az első nukleáris reaktormérnöknek is neveznek, így emlékezett vissza erre a napra [5]:

„Szerda reggel a stadion alatt lévő nagy, 10-szer 20 méteres teremben már 8:30-kor gyülekezni kezdtünk. A terem közepén egy nagy halom fekete grafit volt, rajta fa tartórudak látszottak. A máglya alaprajza négyzet alakú volt, fölfelé kissé keskenyedve. A máglya tetején egy „öngyilkos-osztag” is volt, készen arra, hogy szükség esetén neutronelnyelő bóros vizet öntsön a reaktorba. A kísérlet 9:45-kor indult. Fermi figyeltem. Ő elrendelte a kadmium kontrollrúd fokozatos kihúzását. 11:30-ra majdnem megvalósult az önfenntartó láncreakció, de ekkor Fermi ebédszünetet rendelt el. 14:00-kor újra összegyűltünk. Fermi logaritmussal a kezében számolt, mellette volt két közvetlen munkatársa, Herbert Anderson és Walter Zinn. Közélemben állt Arthur Compton, mi többiek – lehettünk negyvenen – távolabb helyezkedtünk el. Köztünk volt régi barátom, Szilárd Leó is. Számításai alapján 15:30-kor Fermi kiadta az utasítást, hogy a kadmiumrudat 25 centiméteres adagokban kezdjék kihúzni. A neutronszámláló egyre sűrűbben kattogott, a láncreakció már majdnem önfenntartó volt. Mire szinte az egész kadmiumrudat kihúzták, a számláló sűrűbben kattogott, mint bármikor annak előtte. Az önfenntartó láncreakció megvalósult! Az atommag energiáját felszabadítottuk és ellenőrzés alatt tartottuk. Mosoly jelent meg az arcokon, néhány taps is elhangzott. De főképp feszülten figyeltünk még 30 percen keresztül. A jelenet nem volt teátrális. Fermi olyan alacsony szinten működtette az atommáglyát, hogy senki nem volt veszélyeztetve. De működött a reaktor. 16:00 előtt pár perccel Fermi elrendelte a reaktor leállítását. A kadmiumrudat visszatolták, a láncreakció leállt. Tudtam, hogy a kísérlet sikerülni fog. Hiszen, ha megépítünk



Az első atommáglya szarkofágja.

egy kocsi és elé lovakat fogunk, ostorral a lovak közé suhintva elindulnak a lovak, és föltételezhetjük: a kocsi is meg fog indulni. Fermi megvalósította a reaktort és a lovak közé vágott. Nem csak ő lehetett képes megvalósítani a láncreakciót, de talán ő volt az, aki ezt ilyen gyorsan meg tudta csinálni.” [3, 141–145. o.]

Wigner Jenő átadott az olasz Ferminek egy palack chiantit. Minden jelenlevő ivott, köszöntők nélkül, csendben, papírpoharakból. Azután mindannyian aláírták a palackot borító szalmát. (Ez volt az egyetlen jegyzőkönyv, amit aznap készítettek.)

Később a társaság feloszlott, néhányan ott maradtak, hogy rendbe tegyék a mérőeszközök által szolgáltatott adatokat.

Arthur Compton felhívta a Nemzetvédelmi Kutató Bizottság kinevezett elnökét, *James Bryant Conantot* (1893–1978) és a következő beszélgetés zajlott le:

- *Az olasz hajós elérte az Újvilágot!*
- *És, hogy fogadták őt a bennszülöttek?*
- *Nagyon barátságosan.*

Még aznap délután egy fiatal fizikus, *Albert Watterberg* (1917–2007) észrevette az üres chiantis palackot, és úgy gondolta, hogy a rajta lévő aláírások miatt remek emlékek ígérkeznek. Mikor az atommáglya tíz éves évfordulójának ünneplésére készültek, a palack és Watterberg a Massachusetts állambeli Cambridgeben tartózkodott. Gyermeke születése miatt Watterberg

mégsem tudott részt venni az ünnepségen, így hajóra adta a palackot, és ezerdolláros biztosítást kötött rá.

Fermi és még néhány fizikus ajándékot kapott: egy láda Chiantit. Egy importáló cég így fejezte ki háláját az ingyen reklámért, amit a chiantinak szereztek.

Epilógus

Az első reaktort csak néhányszor tették kritikusá, és akkor is gyakorlatilag csak zérus teljesítményen járaták. Kis termikus teljesítménye (kezdetben 0,5 W, később 2 W) miatt hűtőközegre nem volt szükség. 1943 februárjában minden kísérletet beszüntettek, majd a reaktort elbontották és átszállították Red Gate Woods-ba az Argonne Nemzeti Laboratóriumba, Illinois államba. Ott újjáépítették az eredeti anyagokból, és körbevették sugárvédelmi falakkal, majd 1943 márciusában újra méréseket kezdtek végezni. Az átszállításra azért volt szükség, mert megítélésük szerint Chicagóban a közeli lakóházakat túl nagy sugárterhelésnek tette volna ki. Miután a kísérleteket befejezték, a nemzeti laboratórium területén egy nagy gödröt ástak, majd a reaktor részeit odahordták és eltemették. Később a talajmintavételek során azon a helyen magas ^{90}Sr tartalmat mértek [2].

Az első reaktor a hivatását betöltötte, ugyanis választ adott két alapvető kérdésre: egyrészt megmutatta, hogy a láncreakció makroszkopikus méretekben megvalósítható, másrészt bebizonyította, hogy a reaktorok szabályozhatók [6, 7].

Irodalom

1. Marx György: *Atommagközelben*. Mozaik Oktatási Stúdió, Szeged, 1996.
2. Marx György: *A marslakók érkezése*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2000.
3. Marx György: *Wigner Jenő*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002.
4. Ropolyi László, Szegedi Péter (szerk.): Wigner Jenő válogatott írásai. *Principia Philosophiae Naturalis sorozat*. Typotex, Budapest, 2005.
5. Alvin M. Weinberg: Wigner Jenő, az első nukleáris mérnök. *Fizikai Szemle 52/10–11* (2002) 313.
6. U. S. Department of Energy: *The First Reactor*. Washington, 1982.
7. Horváth András, Radnóti Katalin: A Becquerel-sugaraktól a chicao-i reaktorig III. *Nukleon V/5* (2012) http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_5\5_125_Horvath.pdf

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY



A FIZIKA BARÁTJA!

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Új adószámunk: 19815644-2-43