

H. G. WELLS, JÖVÜNK! SZILÁRD LEÓ ÉS AZ ATOMENERGIA

Sükösd Csaba

c. egyetemi tanár; a fizikai tudományok kandidátusa,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézet
sukosd@reak.bme.hu

Az 1898. február 11-én, Budapesten született *Szilárd Leó* szerteágazó érdeklődésű ember és kutató volt. Élete során a fizika és a biológia nagyon sok területével foglalkozott; oly sokkal, hogy nem is lehet egyetlen tanulmány keretében összefoglalni. Ezért itt csak olyan tényekre és eseményekre emlékezünk, amelyek valamilyen módon kapcsolatba hozhatók az atomenergiával. Szilárd Leó életének főbb mozzanatait, valamint a fizika más területeire eső vagy informatikai és biológiai témájú, nagy jelentőségű felfedezéseit nem érintjük.

*Az Einstein-Szilárd-féle
magnetohidrodinamikus szivattyú*

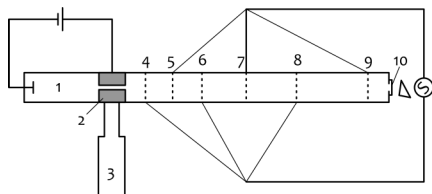
Az első, amit itt megemlítek, közös szabadalmuk Albert Einsteinnel, az Einstein-Szilárd-hűtőgép, illetve az ennek működését biztosító Einstein-Szilárd-szivattyú. 1925–26 telén Einstein mélyen megrendült egy újsághíren, amelyben arról számoltak be, hogy egy egész család halálát okozta a hűtőgépük kompresszorából éjjel kiszivárgott mérgező gáz. – Kell lennie egy biztonságosabb megoldásnak. – mondta Szilárdnak, akivel akkor már együtt dolgozott Berlinben. Abban az időben kezdtek a mechanikus, kompresszoros hűtőgépek leváltani a korábban háztartási hűtésre használatos jégládákat. Munkaközegként leggyak-

rabban a metil-klorid, ammónia vagy kén-dioxid valamelyikét használták. Ezek mind-egyike mérgező. A kompresszorok tengelyeinek tömítésénél, a forgó, mozgó alkatrészeknél azonban fennállt a szivárgás és így a mérgezés veszélye. A hűtőgépekben lévő gáz mennyisége elég volt ahhoz, hogy kiszabadulva egy egész család halálát okozza. Az említett tragédiát követően Einstein és Szilárd olyan hűtőgép-koncepción kezdtek el dolgozni, amely nem tartalmazott mozgó alkatrészeket. A hét esztendőn keresztül folyt közös munkában több mint negyvenöt szabadalom keletkezett, legalább hat országban. Bár a nem mérgező freon felfedezése és hűtőgépekben való használata végül szükségtelenné tette, hogy az Einstein-Szilárd-hűtőgép bármelyike kereskedelmi forgalomba kerüljön, ezek a szabadalmak Szilárdnak biztos anyagi bevételi forrást jelentettek, és az ezekből folyó megtakarításai segítették későbbi angliai kutatásait is. A mozgó alkatrészek nélküli Einstein-Szilárd-féle magnetohidrodinamikus szivattyút azért említjük itt meg, mivel atomenergetikai alkalmazása is lett (szabadalom: GB303065, 1930/05/26) (URL1). Jóval később, a folyékony fémmel hűtött gyorsreaktorokban a hűtőközeg keringetésére használják ennek a találmánynak az alapelvét. Az elv

roppant egyszerű, már középiskolában is megtanuljuk: árammal átjárt vezetőre mágneses mezőben erő hat. Itt a „vezető” maga a folyékony fém, amelyen áramot hajtunk keresztül. Külső mágneses mezőbe helyezve erő hat rá, s így a folyékony fém mozgásba lendül. Így lehet mozgó alkatrészek nélkül hajtani a zárt csőben lévő folyadékot. Einstein és Szilárd annak idején ezen az elven váltakozó mozgásra kényszerítették a csőben lévő, elektromosan vezető folyadékoszlopot (higanyt), és így egy zárt csőben mozgó „dugattyút” hoztak létre, amely a kompresszort helyettesítette. A gyorsreaktorok hűtésére használt folyékony fémet (például nátriumot) természetesen folyamatos, egyirányú áramlásra kell bírni, de ez ugyanezen az elven megvalósítható.

Részecskegyorsítók

Atommagfizikai kutatásokhoz – és így közvetve az atomenergetikához is – köthető Szilárd részecskegyorsítókkal kapcsolatos néhány fejlesztése. Az első ilyen szabadalmi kérvényt Németországban adta be 1928. december 17-én *Részecskék gyorsítása* címmel (1. ábra). Ebben a kérvényben különösen érdekes az alábbi részlet: „A csőben lévő váltakozó elektromos mező összetehető egy balról jobbra és egy jobbról balra haladó mező összegeként. A készülék úgy működik, hogy a felgyorsított ionok sebessége minden pont-



1. ábra • Szilárd vázlata a lineáris gyorsítóhoz, az 1928-as szabadalmi beadványból.
(Forrás: Telegdi, 2000)

ban megegyezik a balról jobbra haladó mező lokális sebességével.” Ez pedig éppen a mai gyorsítófizika haladóhullámú gyorsítási elve. Szilárdnak ezt a szabadalmi kérvényét elutasították, mivel a lineáris gyorsító koncepciója már két korábbi munkában is megjelent, és erről valószínűleg a szabadalmi ügyintézőnek is volt már tudomása: *Gustav Ising* (1925) svéd fizikus és *Rolf Wideröe* (1928), Németországban élő norvég fizikus – 1928 nyarán, Szilárd szabadalmi kérvénye előtt megjelent – munkájára utalva.

1929. január 17-én, mindössze három héttel a lineáris gyorsító szabadalmi kérvényének beadása után Szilárd újabb szabadalmi kérvényt adott be *Részecskeugárcső* címmel. A mindössze hétoldalas kérelemben egyszerre tett javaslatot két különböző típusú gyorsítóra is, amelyeket ma *ciklotronnak*, illetve *betatronnak* nevezünk. A ciklotronnál az elektromosan töltött részecskéket időben állandó homogén mágneses mező körpályára kényszeríti, és így újra és újra áthaladnak a gyorsító réseken, ahol váltakozó elektromos mező gyorsítja azokat. Szilárd a szabadalmi kérvényében leírja, hogy a körpálya körfrekvenciáját és a gyorsító elektromos mező frekvenciáját illeszteni kell egymáshoz – rezonanciába kell hozni azokat. Ez a rezonancia mindaddig fennmarad, amíg a részecskék nem lépnek be a relativisztikus tartományba, azaz amíg a mozgási energiájuk jóval kisebb marad, mint az m_0c^2 nyugalmi energiájuk. A betatronnál a mágneses mező időben változik, és így kettős szerepe van: nemcsak körpályán tartja a részecskéket, hanem az időbeli változása miatt örvényes elektromos mezőt is indukál, és így a körpálya mentén gyorsítani is tud. Bár Wideröe (1928) a betatron ötletével is megelőzte Szilárdot, azonban Szilárd volt az első, aki a nyaláb fókuszálására is gondolt.

Kimutatta, hogy a mágneses mező radiális csökkenése a nyaláb fókuszálásához vezet.

Szilárd gyorsítókkal kapcsolatos utolsó kérelme már egy brit szabadalmi beadvány volt 1934. február 21-én *Aszinkron és szinkron transzformátor részecskék számára* címmel. Itt a transzformátor szó nyilván a betatronnál is alkalmazott, időben változó mágneses mezővel való gyorsításra utalt. Szilárd két csoportra osztotta a gyorsítókat: szinkron gyorsítók azok, amelyeknél a körfrekvenciának és a gyorsító feszültség frekvenciájának összehangoltnak kell lenni, aszinkron gyorsítók pedig azok, ahol ez nem áll fenn. Az előbbire példa a ciklotron, az utóbbira a betatron. Ma a Szilárd-féle szinkron gyorsítókat rezonancia-gyorsítóknak szokás nevezni, bár Szilárd terminológiája tovább él a szinkrotron, a szinkrociklotron és a szinkrofazotron elnevezésekben. Ennek a szabadalmi beadványnak az a különlegessége, hogy Szilárd ebben leírja a frekvenciamoduláció és fázisstabilitás elvét, amelyek nélkülözhetetlenek a mai, nagy energiájú, relativisztikus gyorsítóknak. Ebben a dokumentumban Szilárd elektronok gyorsításáról beszél, nem említ protonokat. Az akkor elérhető energiák esetén még szükségtelen volt a gyorsított protonnyalábok relativisztikus változásainak figyelembevétele. Csak három évvel később, 1937-ben kezdték vizsgálni a relativisztikus effektusok hatását protonnyalábokra (Bethe – Rose, 1937; Rose, 1938).

Irány az atomenergia

H. G. Wells 1914-ben írta *Fölszabadult világ* (The World Set Free) című tudományos-fantasztikus művét, amelyben Rufus professzor a nagyközönségnek a következőképpen ismerteti a nemrég fölfedezett atomfizikai ismeretek következményeit: „Az atomok, amelyeket mindmáig tégláknak, megbízható,

élettelen építőköveknek vélték, valójában hatalmas mennyiségű energia tartályai. Ebben a lombikban mindössze fél liter uránoxid van, és csak egy font az ára. Hölgyeim és Uraim, ez a lombik annyi energiát rejt magában, amit csak 160 tonna szén elégetésével tudnánk nyerni. Ha ez az energia a parancsomra most hirtelen fölszabadulna, a robbanás hamuvá változtatna mindnyájunkat itt, ebben a teremben. Ha viszont ebből az energiából vilányt tudnánk csinálni, az egy héten át kivilágíthatná Edinburgh városát. De ma még senki sem tudja megmondani, miként készíthetnénk ezt az uránt, hogy gyorsabban szabadítsa ki az energiáját... Ha meg tudnánk tenni, kivilágíthatnánk városainkat, hajót hajthatnánk át az óceánon, elpusztíthatnánk egy ellenséges flottát. Hölgyeim és Uraim, ez a tűzgyújtáshoz mérhető fölfedezés lenne, az pedig az embert az állatok fölé emelte. Ma még úgy tekintünk a radioaktivitásra, mint az ősember nézett a tűzre, mielőtt azt saját hasznára gyűjteni megtanulta... Civilizációnk a barlanglakó ősember tűzcsiholó pálcájával indult. Ennek a civilizációnak a csúcán az energia hiánya vált legfőbb gondunkká. De most egy új kor hajnalához érkezünk, egy új civilizáció körvonalai rajzolódnak ki előttünk. Az energia – amelyből korábban sohasem volt elég – bőségben itt van körülöttünk, csak meg kell találnunk hozzá a kulcsot. De meg fogjuk találni!” (Wells, 1922)

Szilárdnak – saját bevallása szerint – ez a könyv volt az egyik kedvence. Egyes történetírók szerint ez a könyv már kamaszkorában a kezébe került, akkor, amikor a fiatalok világmegváltó terveket kovácsolnak; mások szerint pedig csak érett emberként, az 1930-as évek elején. Akárhogyan volt is, nagy hatást gyakorolt Szilárdra, és nem kis szerepe lehetett abban, hogy Szilárd érdeklődése a harmincas

években az atomokban rejlő energia emberiség javára történő felhasználása felé fordult. A harmincas évek eleje izgalmas és veszélyes fordulatokat hozott. A mikrorészecskék tudományában az 1932-es évet a „magfizika arany éveként” szokás emlegetni. Ebben az évben fedezte fel *James Chadwick* a neutront, *Carl David Anderson* a pozitront a kozmikus sugárzásban; ekkor indult el *Ernest Lawrence* ciklotronja Amerikában, és ekkor dolgozta ki *Enrico Fermi* a béta-bomlás elméletét.

Ebben az évben Szilárd még Berlinben dolgozott, és egyre növekvő aggodalommal figyelte a politika egén sűrűsödő sötét felhőket. Az 1933-as év rosszul indult, Hitler hatalomra került. Szilárd a tudomány módszerét nemcsak a fizikai jelenségekre, hanem a mindennapi eseményekre is alkalmazta, és a folyamatok pillanatnyi állásából következtetett a várható jövőre. 1933. március 31-én felszállt Berlinben a Londonba induló, majdnem üres vonatra. A következő napi vonat már a Németországból menekülő zsidókkal volt tele, ám ők már nem jutottak ki Németországból, mivel a nácik leszedték őket a vonatról. Az egy nappal korábban indult Szilárd még szerencsésen megérkezett Londonba.

1934. szeptember 12-én sétája közben egy újságosnál meglátta a *The Times* aznapi kiadását, amely nagy betűkkel hirdette, hogy a nagy tekintélyű fizikus, Lord Rutherford előadást tartott az atomfizikáról. Szilárdot elfutotta a méreg, amint azt olvasta, hogy Rutherford „a Holdban élők” tartotta azt, aki az atomok energiájának a gyakorlati felhasználásáról gondolkodik. Szilárd visszaemlékezése szerint éppen egy közlekedési lámpa zöldre váltását várta a Southampton Row és a Russell Square sarkán, amikor eszébe jutott a neutronos láncreakció ötlete. Rutherford tudta ugyan, hogy egyetlen atommag-átalakuláskor sokkal na-

gyobb energia szabadulhat fel, mint egyetlen szénatom elégetésekor, ám nem tudta elképzelni azt, hogy makroszkopikus mennyiségű atommag átalakulását valahogyan létre lehetne hozni. Addig csak elektromosan töltött részecskékkel, protonokkal és alfa-részecskékkel kísérleteztek, és ezekkel nagyon ritkán lehetett néhány atommagot átalakítani. Szilárd arra gondolt, hogy a nem sokkal korábban felfedezett neutron – elektromosan semleges lévén – könnyen behatolhat az atommagba, mivel az elektromos taszítás nem akadályozza. Másrésztől viszont az exponenciális függvény az, amely igen gyorsan nő, tehát ha valamilyen atommag-reakcióval exponenciális növekedést lehetne elérni, akkor hamarosan el lehetne érni a makroszkopikus mennyiséget. Ezért, ha találánk egy olyan neutronos reakciót, amelyben energia szabadul fel, és két újabb neutron is keletkezik, akkor ezzel a *láncreakciót* meg lehetne valósítani. Keresni kellene tehát egy olyan X elemet, amely a következő reakcióra képes: $X + n \rightarrow Y + 2n + \text{energia}$.

Teller Ede szerint Szilárd visszaemlékezésében biztosan van egy gyenge pont: Szilárd sosem állt meg egy pirosat mutató közlekedési lámpánál...

Az elkövetkező években Szilárd megpróbálta megtalálni azt az X anyagot, amely a láncreakció megvalósításának a kulcsa lehetett volna. Ehhez kísérleti lehetőségre és támogatásra lett volna szüksége. Először Rutherfordnál próbálkozott, de a lord – a kollegák szerint – üvöltve dobta ki a „Holdban élő” fizikust a Cavendish Laboratóriumból. Végül ismerősei segítségével a St. Bartholomew's Kórházban kapott lehetőséget kísérletezésre. Az $(n,2n)$ reakciókat próbálta vizsgálni.

A kezdeti eredmények biztatók voltak, így ezekben az években több szabadalmat is be-

adott a neutronokkal kiváltott reakciókkal kapcsolatban (URL₂). 1936-ban azonban ezek titkosítását kérte a Brit Admiraltástól, tekintettel az egyre fenyegetőbb nemzetközi helyzetre és a fasizmus terjedésére. Szilárd világosan látta, hogy ha a láncreakció megvalósítható, akkor az nemcsak békés célokra lesz használható, és ezért jobb azt titokban tartani. A Brit Admiraltáshoz titkosításra beadott szabadalmi leírásban már felbukkan a *kritikus tömeg* fogalma is, azé a tömege, amelynél az önfenntartó láncreakció megvalósul.

Hamarosan be kellett azonban látnia, hogy az akkor ismert (n,2n) reakciókkal nem működhet a láncreakció. A második neutron ugyanis kötött állapotban van az atommagban, tehát a kiszabadításához energia kell. Így ez a reakció nem termel energiát, hanem fogyasztja azt.

A nemzetközi helyzet romlása miatt már Londonban sem érezte magát biztonságban. „*Távozásom után egy évvel Hitler háborút indít Európában*” – mondta, és áttelepült az Egyesült Államokba 1938-ban.

A maghasadás és a neutronok

Az Egyesült Államokban majdnem feladja a láncreakció megvalósítására tett erőfeszítéseit, hiszen 1939 elején táviratban értesíti a Brit Admiraltást, hogy a láncreakció megvalósítására tett szabadalmi kérvényét visszavonja. Ám ekkor érkezik el a maghasadás felfedezésének híre Amerikába. *Niels Bohr*, a fizikusok „pápája” viszi át Európából egy amerikai konferenciára azt a hírt, hogy Berlinben *Otto Hahn* és *Friedrich Strassmann* felfedezték az uránmag hasadását. Szilárd azonnal átlátja, hogy az uránmag neutronban gazdagabb, mint a belőle származó töredékek, ezért elképzelhető, hogy a többlet neutronok kiszabadulnak, és így egyetlen neutron által létre-

hozott maghasadásban egynél több neutron keletkezik. Szinte azonnal megy egy másik távirat a Brit Admiraltáshoz: „*az előző táviratomat tekintsek tárgytalannak*”. *Walter Zinn*-nel közösen kísérletet terveznek, hogy megmérjék az urán hasadásakor felszabaduló neutronok számát. A kísérlet sikerül, az általuk kapott érték: hasadásonként átlagosan 2 neutron (a mai, pontosabb érték: 2,4 neutron hasadásonként).

1939. március 16-án cikket küldenek be a *Physical Review*-ba *Instantaneous Emission of Fast Neutrons in the Interaction of Slow Neutrons with Uranium* címmel (URL₃) (2. ábra). Szilárd azonban arra kéri a *Physical Review* szerkesztőit, hogy a cikket NE publikálják addig, amíg arra nem adnak engedélyt. Ezzel egy időben felszólítja az Európában maradt angol és francia fizikus kollégákat, hogy a nyilvánvaló katonai alkalmazási lehetőségekre tekintettel ne publikálják a maghasadással kapcsolatos kutatási eredményeiket. Az angolok megértették, a franciák – *Frédéric Joliot-Curie* csoportja – nem. Joliot-Curie és csoportja szintén megtalálták az urán hasadásakor kilépő neutronokat, és erről ugyan csak beküldtek egy cikket a *Physical Review*-

Instantaneous Emission of Fast Neutrons in the Interaction of Slow Neutrons with Uranium*

Recently it became known¹ that uranium can be split by neutrons into two elements of about equal atomic weight. In this fission of uranium the two elements produced have a large neutron excess; moreover they are probably produced in an excited nuclear state. One might therefore expect that these excited fragments instantaneously emit neutrons and that perhaps the number emitted is even larger than one per fission.

One might also expect a delayed emission of neutrons—as was first pointed out by Fermi—if some of the fragments go through one or more beta-transformations before they emit a neutron. Delayed emission of neutrons caused by the action of both slow and fast neutrons on uranium has recently been reported by Roberts, Meyer, and Wang,² who find a period of about 12.seconds.

2. ábra • A Szilárd–Zinn-cikk kezdete

ba, azonnali publikálást kérve. Ezt követően Szilárd és Zinn is hozzájárultak a cikkük közléséhez. A két cikk egymást követi a *Physical Review* 1939. április 15-i számában. Joliot-Curie cikkében még a *láncreakció* szó is szerepel.

Az Einstein–Szilárd-levél

Európában elindult a verseny az atombombáért. Amerikában azonban nem történik semmi ezen a téren, és ez nagyon aggasztó Szilárd számára. Úgy érzi, hogy mindenképpen fel kell hívni *Franklin Delano Roosevelt* elnök figyelmét arra a nagy veszélyre, amely a világot akkor fenyegetné, ha Hitler Németországának sikerülne elsőnek kifejlesztenie az atombombát. Ezért 1939 augusztusában barátjával, Teller Edével felkeresik Einsteint, és rábíráják, hogy írjon alá egy Szilárd által megfogalmazott levelet az elnöknek, amelyben felhívja a figyelmét erre a veszélyre (3., 4. ábra). Szilárd egy bankár barátjának adja oda a levelet, hogy személyesen nyújtsa át az elnöknek, és hívja fel Rooseveltt figyelmét a levél fontosságára egy elnöki vacsora alkalmával. A levél átadására októberben kerül sor. Akkor, amikor Németország már lerohanta Lengyel-



3. ábra • Einstein és Szilárd 1939 augusztusában levelet írnak Franklin D. Rooseveltnek. (Forrás: Marx, 1997)

országot, és elkezdődött a második világháború. Az elnök azonnal megértette a dolog jelentőségét, és intézkedett. Ezzel Amerika is belépett az atomfegyverért folyó versenybe.

A heterogén atomreaktor

Az elnök létrehozta az Uránbizottságot, amelynek többek között tagja lett Enrico Fermi,

Albert Einstein
Old Grove Rd.
Hassan Point
Peebles, Long Island
August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. How it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

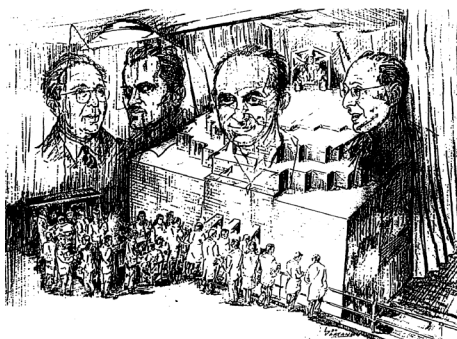
- a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;
- b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,
A. Einstein
(Albert Einstein)

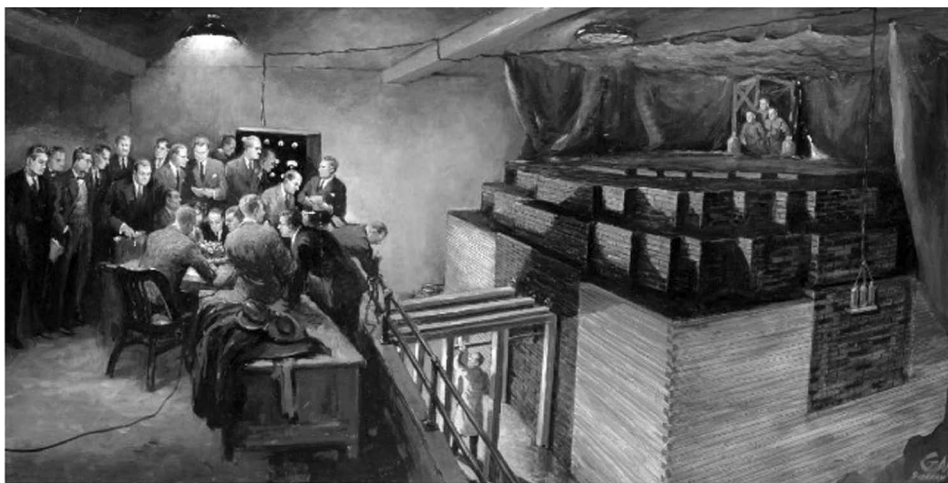
4. ábra • Einstein levele F. D. Roosevelthez. (Forrás: Marx, 1997)

Szilárd Leó és *Wigner Jenő* is. Az Uránbizottság még nem a bomba kifejlesztésével foglalkozott, hanem azt próbálták meg demonstrálni, hogy önfenntartó láncreakció egyáltalán létrehozható. Szilárd és Fermi tudták, hogy a lassú neutronoknak sokkal nagyobb a hatékonyságuk, ezért a maghasadáskor keletkező neutronokat le kell lassítani. A neutronok a vízben lévő protonokkal ütközve tudnak jól lelassulni, ezért először vízben oldott uránsóval kísérleteztek. Itt azonban az a probléma, hogy a természetes uránban nagy százalékban jelen lévő, maghasadásra nem képes ^{238}U izotóp a lelassuló neutronokat igen nagy valószínűséggel – rezonanciaszerűen – elnyeli, így mire megfelelő sebességre lelassulva elérnék a hasadásra képes – de csak kis százalékban jelen lévő – ^{235}U izotópot, a neutronok száma már annyira lecsökken, hogy a láncreakció nem tud megvalósulni. Ennek a problémának a megoldására Szilárd javasolta a heterogén atomreaktor ötletét, ahol az urán üzemanyag és a neutronok lassítására szolgáló közeg – a moderátor – helyileg el vannak



5. ábra • A chicagói atommáglya szénrajza. Balról jobbra: Szilárd, Compton, Fermi, Wigner. (Forrás: Marx, 1997)

választva egymástól. Ha az üzemanyag eléggé nagy felületű (például vékony pálcákból vagy kis darabokból áll), akkor a hasadáskor keletkező gyors neutronok nagy valószínűséggel kilépnek az üzemanyagból, és a moderátorban kezdenek bolyongani. Az ütközések következtében lelassulnak, és túljutnak a „veszélyes” rezonanciartományon, anélkül, hogy az ^{238}U atommagokkal találkoznának. Megfelelő elrendezés esetén nagy valószínű-



6. ábra • Gary Sheahan festménye (1957) a chicagói atommáglyáról a Chicago History Museumban. (Forrás: URL6)

séggel csak az után diffundálnak vissza az üzemanyagba, miután már elegendően lelassultak. Ilyen módon ki tudják kerülni a veszélyes rezonanciákat.

A chicagói atommáglya

1942. december 2. A chicagói Stagg Field stadion lelátója alatt egy Metallurgical Laboratory feliratú táblát viselő ajtó mögött lévő helyiségben furcsa építmény tornyosul. Fagerendás állványzat támaszt egy koromfekete, grafitféglákból összeállított, hatalmas, csonka gúla alakú tömböt (5., 6. ábra). A berendezés tetején néhány ember áll készenlétben vödörökkel, a mellette lévő galérián pedig izgatott tudósok csoportja figyel egy kattogó műszert és egy írószerkezetet, amelynek tolla papírhengerre rajzol vonalakat. A galéria alatti szinten álló férfi kadmiumlemezeket mozgat a grafitféglák közötti résekben, aszerint, hogy a galérián álló, kissé kopaszodó férfi – Enrico Fermi – milyen utasításokat ad neki. Szilárd Leó, aki szintén a galérián állók között van, ennek a napnak a reggelén a következő szavakat írta a naplójába: „*H. G. Wells, jövőnk!*”

A furcsa építmény a világ első atommáglyája, amelyet az önfenntartó láncreakció megvalósíthatóságának demonstrálására építettek. A kísérlet vezetője Enrico Fermi, amerikai részről pedig *Arthur Compton*. Szilárd Leó mellett egy másik magyar származású tudós is a galérián áll: *Wigner Jenő*. Az atommáglya belsejében 40 tonna uránoxid és 6 tonna fémurán van elosztva kis darabokban, többé-kevésbé egyenletesen, 380 tonna, szupertiszta grafitféglá között. A grafitmoderátor a neutronok lelassítására szolgál. Az építmény tetején áll az „öngyilkos csoport” bóros vízzel teli vödörökkel és a galéria korlátjához kikötött biztonsági rúddal. Készen arra, hogy ha az atommáglyában kialakuló láncreakció elsza-

badulna, akkor a bóros vizet beöntsék a reaktorba, elvágják a biztonsági rudat tartó köteleket, miáltal a reaktorba jutó bór és a bezuháló biztonsági rúd leállítja a láncreakciót. A láncreakció szabályozását egyébként a kadmiummal bevont lemezek ki-, illetve betolásával tervezték végezni.

A kísérlet délelőtt 9 óra 45 perckor kezdődött. A negyvenkilenc résztvevő csendben figyelte, ahogy Fermi utasítására lassan kijebb húzták a kadmiumlemezeket. A neutronszám-lálók egyre hangosabban ketyegtek, a neutronok szintje új és új telítési állapotra állt be, jelezvén, hogy egyensúly alakult ki, a láncreakció még nem önfenntartó. A feszültség fokozódott, de röviddel 12 óra előtt Fermi leállította a kísérletet, és ebédszünetet rendelt el. Az ebéd alatt szokatlan csend volt, mindenki a gondolataiba merült. Délután 2 órakor Fermi és csapata ismét a helyszínen volt, a kísérlet folytatódott. Végül, 3 óra 53 perckor a neutronszám emelkedése exponenciálisan növekvő jellegű lett. Semmi jele nem volt annak, hogy telítésbe menne. A történelem első mesterségesen létrehozott, önfenntartó láncreakciója megvalósult, az emberiség belépett az atomkorba. Fermi elrendelte a kadmiumlemezek betolását, a láncreakció rendben leállt. *Arthur Compton* a telefonhoz lépett, és felhívta *James B. Conant*et a Harvardon, aki a Nemzeti Védelmi Kutatási Bizottság (National Defense Research Committee) vezetője volt. A beszélgetés a következőképpen zajlott:

– *Az olasz kormányos szerencsésen megérkezett az Újvilágba.*

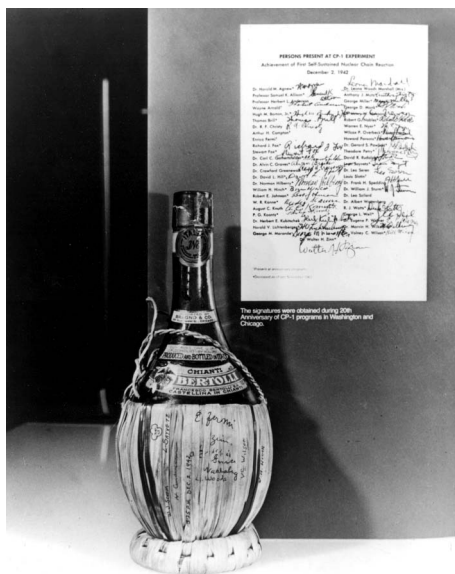
– *Milyenek a bennszülöttek?*

– *Barátságosak.*

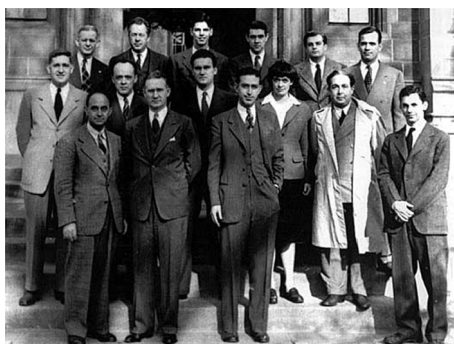
Az addigi nagy feszültség hirtelen oldódott, a résztvevők boldogan tapsoltak és gratuláltak Ferminek és egymásnak. Ekkor *Wigner Jenő*

egy üveg Chiantit húzott elő, és átnyújtotta Ferminek, aki csodálkozva kérdezte: *Honnan vetted? Most, amikor a háború miatt már semmilyen olasz árut nem lehet kapni?* Wigner mosolyogva felelt: *Nem most vettem, hanem régebben. Biztos voltam, hogy ez a nap el fog jönni.* (7., 8. ábra)

A sikeres kísérlet megadta a lökést az amerikai atombombaprogramnak. Elindult a Manhattan-terv, amelynek tudományos vezetésével *Robert Oppenheimert* bízták meg, katonai felügyelete pedig *Leslie Groves* tábornok feladata lett. Szilárd nem vehetett részt ebben, mivel magyarországi kommunista múltja miatt megbízhatatlannak tartották. Nem szakadt azonban el az atomenergiától, hanem 1943-tól reaktor-tanácsadó lett. 1944-ben Fermivel együtt szabadalmaztatta a neut-



7. ábra • A Wigner Jenő által Ferminek átadott Chianti, a résztvevők aláírásával. A jobb oldali inzertben levő aláírások a chicagói atommáglya 20. évfordulójára rendezett ünnepségen születtek. (Forrás: URL7)



8. ábra • A chicagói kutatócsoport néhány tagja. Jobbról a harmadik Szilárd (kabátban). Fermi az első sor bal szélén áll. (Forrás: URL8)

ronos reaktort, amely szabadalmat 1955-ben szimbolikus 1 dollárért vásárolta meg tőlük az Egyesült Államok (URL3).

A grafit sugárkárosodása

A chicagói kísérlet után az első reaktorok grafitmoderátorral épültek Hanfordban. Szilárd felismerte, hogy a maghasadáskor keletkező gyors neutronoknak kezdetben elegendően nagy az energiájuk ahhoz, hogy a grafitban lévő szénatomokkal ütközve azokat kiüssék a kristályrácsban elfoglalt helyükről. A grafitmoderátorban tehát nemcsak a neutronok lassulnak, hanem a grafit kristályrácsa is sérül, az anyag sugárkárosodást szenved. Felhívta a figyelmet arra, hogy a kilökött szénatomok miatt a sugárkárosodott kristály energiát tárol, és ez veszélyes lehet. Ezért a sugárkárosodott grafitot időnként fel kell melegíteni, hogy a hőmozgás segítségével a kilökött atomok visszatérjenek, és a hibahelyek száma lecsökkenjen. Természetesen ilyenkor a kristályban tárolt energia felszabadul, és az a kristályt tovább melegíti. Ha túl sokáig várnak a grafit hőkezelésével, akkor olyan sok energia is felhalmozódhat benne, hogy a következő hőkezelésnél felszabaduló energia miatt akár fel

is izzik a grafit, és meggyulladhat. Ez a folyamat, amelyre Szilárd már 1943-ban felhívta a figyelmet, okozta az angliai Windscale atomerőműben kialakult grafitűzet, az első komolyabb atomerőmű-balesetet (1957).

Szaporítóreaktor

Még egy atomenergiával kapcsolatos elnevezés fűződik Szilárdhoz: 1944-ben ő nevezte először *breeder*-nek – szaporítóreaktornak – az olyan reaktorokat, amelyek több hasadóanyagot állítanak elő nem hasadó anyagból (például tóriumból vagy ^{238}U -ból), mint amennyi hasadóanyagot elhasználnak. Az ilyen reaktoroknak nagy jelentősége lenne a nukleáris üzemanyagban lévő energia jobb hatásokkal történő kihasználásában. Ezek mégsem terjedtek el nagy számban. Egyrészt mert műszakilag és technológiailag nagyon bonyolult *high-tech* berendezések (például magas hőmérsékleten üzemelnek, folyékony fémekkel kell őket hűteni), másrészt pedig az atomfegyverek elterjedésének megakadályozása (non-prolifерáció) szempontjából különösen érzékenyek, hiszen nem hasadó anyagból állítanak elő hasadóanyagot.

Az emberiség lelkiismerete

1945. május 8-án Németország leteszi a fegyvert, Hitler halott. Megszűnt az a fenyegetés, amely Szilárdot arra készítette, hogy sürgesse az Egyesült Államok atomfegyver-programjának beindítását. Szilárd ismét akcióba lendül, ezúttal annak megakadályozására, hogy az atombombát emberek ellen vessék be. Petíciót készít, amelyet tudósokkal – többek között a Los Alamosban, a bombán dolgozó tudósokkal is – aláírat. Roosevelttel hirtelen halála miatt azonban ez a petíció nem éri el a célját. Az új elnök – *Harry Truman* – csak a beiktatása napján értesül a titokban folyó

atomfegyverprogramról. Nyilvánvaló, hogy a katonák tanácsaira hallgat, nem figyelne néhány tudós tiltakozási kísérletére még akkor sem, ha az eljutna hozzá. A petíció július 17-én kelt végső változatában Szilárd nem követelte egyértelműen a bomba betiltását, csak azt, hogy azután alkalmazzák, ha Japánban már közölték a megadás pontos feltételeit. Ekkor az elnök döntését „a morális felelősség fogja korlátozni” (9. ábra). Szilárd ezt a petíciót is közönséges borítékba zárta, lepecsételte, majd átadta Comptonnak. A kilenc lap valamelyikén megtalálható az ő és barátja, Wigner Jenő aláírása. Szilárd kísérőlevelében az áll, hogy a petíciót hatvanhét tudós írta alá, habár a Fehér Házba beérkezett lapokon végül is hetven aláírás szerepel – ezek most a Nemzeti Levéltárban vannak elhelyezve. A javított változatot Oak Ridge-ben még nyolcvanöten írták alá. Összesen tehát 155, a Manhattan-terven dolgozó tudós írta alá azt a petíciót, amely az atombomba japán városokra való ledobásának erkölcsi problémáját veti fel. Százötven tudós közül 127 a szavazólapokon csak bemutatott részesített volna előnyben.

Július 17-én, ugyanazon a napon, amikor Szilárd elküldte a petíciót, Oppenheimer beszámolt Groves tábornoknak Szilárd Los Alamos-i tudósok között végzett aláírásgyűjtéséről. Oak Ridge-ben Groves helyettese, *Kenneth Nichols* ezredes felhívta telefonon a Pentagonban a tábornokot, és megkérdezte: „Miért nem szabadulunk meg az oroszántól?” (Leo = oroszán). Groves azt válaszolta, hogy „Ezt jelenleg nem tudjuk megtenni.” Groves azt látta legjobbnak, hogy egy héten keresztül tárgyal Arthur Comptonnal arról, hogyan továbbítsák Szilárd petícióját, végül a csomag csak július 24-én jutott el Oak Ridge-be, Nichols-hoz (URL₄).

SECRET

July 17, 1945

A PETITION TO THE PRESIDENT OF THE UNITED STATES

Discoveries of which the people of the United States are not aware may affect the welfare of this nation in the near future. The liberation of atomic power which has been achieved places atomic bombs in the hands of the Army. It places in your hands, as Commander-in-Chief, the fateful decision whether or not to sanction the use of such bombs in the present phase of the war against Japan.

We, the undersigned scientists, have been working in the field of atomic power. Until recently we have had to fear that the United States might be attacked by atomic bombs during this war and that her only defense might lie in a counterattack by the same means. Today, with the defeat of Germany, this danger is averted and we feel impelled to say what follows:

The war has to be brought speedily to a successful conclusion and attacks by atomic bombs may very well be an effective method of warfare. We feel, however, that such attacks on Japan could not be justified, at least not unless the terms which will be imposed after the war on Japan were made public in detail and Japan were given an opportunity to surrender.

If such public announcement gave assurance to the Japanese that they could look forward to a life devoted to peaceful pursuits in their homeland and if Japan still refused to surrender our nation might then, in certain circumstances, find itself forced to resort to the use of atomic bombs. Such a step, however, ought not to be made at any time without seriously considering the moral responsibilities which are involved.

The development of atomic power will provide the nations with new means of destruction. The atomic bombs at our disposal represent only the first step in this direction, and there is almost no limit to the destructive power which will become available in the course of their future development. Thus a nation which sets the precedent of using these newly liberated forces of nature for purposes of destruction may have to bear the responsibility of opening the door to an era of devastation on an unimaginable scale.

If after this war a situation is allowed to develop in the world which permits rival powers to be in uncontrolled possession of these new means of destruction, the cities of the United States as well as the cities of other nations will be in continuous danger of sudden annihilation. All the resources of the United States, moral and material, may have to be mobilized to prevent the advent of such a world situation. Its prevention is at present the solemn responsibility of the United States--singled out by virtue of her lead in the field of atomic power.

The added material strength which this lead gives to the United States brings with it the obligation of restraint and if we were to violate this obligation our moral position would be weakened in the eyes of the world and in our own eyes. It would then be more difficult for us to live up to our responsibility of bringing the unloosed forces of destruction under control.

In view of the foregoing, we, the undersigned, respectfully petition: first, that you exercise your power as Commander-in-Chief, to rule that the United States shall not resort to the use of atomic bombs in this war unless the terms which will be imposed upon Japan have been made public in detail and Japan knowing these terms has refused to surrender; second, that in such an event the question whether or not to use atomic bombs be decided by you in the light of the considerations presented in this petition as well as all the other moral responsibilities which are involved.

R Shapp
 D. M. Sullivan
 E. P. Wigner
 George S. Monks
 Leo Szilard

J. J. Moore
 W. J. Zacharias
 Francis R. S. Honka
 John G. Simpson
 Walter Bartley
 John R. Howey

Frankly Foster

DECLASSIFIED
 AUTHORITY: NARS, Date

9. ábra • Szilárd Leó petíciója az atombomba emberek ellen történő bevetése ellen.
 (Forrás: Lanouette, 1997b)

JOHN F. KENNEDY
MASSACHUSETTS

COMMITTEES:
FOREIGN RELATIONS
LABOR AND PUBLIC WELFARE
JOINT ECONOMIC COMMITTEE

United States Senate

WASHINGTON, D.C.

May 27, 1960

Dr. Leo Szilard
Memorial Hospital
68th Street and York Avenue
New York, New York

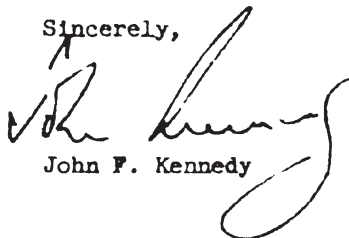
Dear Dr. Szilard:

Many thanks for sending me the interesting advance draft of your forthcoming article for Look, "Has the Time Come to Abrogate War?". The time has certainly come to abrogate war, but this will never happen without inventive ideas and a clear vision of the goal. Your article and your other writings in the Bulletin of Atomic Scientists are making important contributions in supplying new ideas and better vision.

May I also say how happy I was to hear of the Atoms for Peace Award just presented to you. This country owes many debts to you, not only for your scientific achievements but for the great responsibility and imagination you have brought to the problem of securing peace.

With every good wish, I am

Sincerely,



John F. Kennedy

JFK:glg

10. ábra • Kennedy elnök köszöntőlevele Szilárdnak az Atoms for Peace díj elnyerése után.
(Forrás: Marx, 1997)

Hidegháborús évek

A háború befejezése után Szilárd továbbra is az emberiség békéjéért, a hidegháború és a fegyverkezési hajszá ellen küzd. 1950-ben nyilvánosan ellenzi az új csodafegyver, a hidrogénbomba kifejlesztését, nyíltan konfrontálódik régi barátjával, Teller Edével is. Részt vesz a Pugwash békemozgalomban, szót emel a két nagyhatalom, az Egyesült Államok és a Szovjetunió közötti párbeszéd érdekében. Leveleket ír Sztálinnak és az amerikai elnöknek. A kubai válság idején az ő javaslatára hozzák létre a „forró drótot” a Kreml és a Fehér Ház között. 1959-ben az atomenergiával kapcsolatos tevékenységéért megkapja az „Atoms for Peace Award” kitüntetést (10. ábra). (Az első négy kitüntetett között három magyar volt: Hevesy György, Szilárd Leó és Wigner Jenő.)

Életének utolsó éveiben a biológia és a biofizika felé fordul, előbb a chicagói egyetemen lesz a biofizika professzora, majd saját laboratóriumot kap ugyanott, végül pedig a kaliforniai La Jolla-ban telepedik le, és a Salk Institute-ban dolgozik. Az öregedés biológiaiájáról, valamint a memória molekuláris alapjairól ír tudományos cikkeket. Ezek azonban már kívül esnek e cikk tematikáján.

Miután saját tervezésű sugárkezelésével teljesen kigyógyította magát az 1959-ben di-



11. ábra • Szilárd Leó sírja a Kerepesi temetőben. (a szerző felvétele)

agnosztizált hólyagrákjából, 1964. május 30-án szívroham következtében álmában éri a halál. Boncolása során megállapítják, hogy az általa megtervezett sugárkezelés sikere teljes volt, hólyagrákja maradéktalanul eltűnt (11. ábra).

Kulcsszavak: *Szilárd Leó, tudománytörténet, atomenergia, láncreakció, chicagói atommaghlya, atomfegyverek, ciklotron, betatron, fázisstabilitás*

IRODALOM

- Bethe, Hans A. – Rose, Morris E. (1937): The Maximum Energy Obtainable from the Cyclotron. *Physical Review*. 52, 1254. DOI: 10.1103/PhysRev.52.1254.2
- Ising, Gustaf (1925): Prinzip Einer Methode Zur Herstellung Von Kanalstrahlen Hoher Voltzahl. *Arkiv för matematik, astronomi och fysik*. 18, 45. • http://bancroft.berkeley.edu/Exhibits/physics/bigscience_02.html
- Rose, Morris E. (1938): Focusing and Maximum Energy of Ions in the Cyclotron. *Physical Review*. 53, 392. DOI: 10.1103/PhysRev.53.392

- Telegdi [Bálint] Valentin L. (2000): Szilard as Inventor: Accelerators and More. *Physics Today*. 53, 10, 25–28. DOI:10.1063/1.1325189
- Wideröe, Rolf (1928): Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen. *Archiv für Elektrotechnik*. 21, 387–406. • <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF01656341>
- URL1: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=GB&NR=303065>
- URL2: <http://www.directorypatent.com/GB/440023-a.html>

URL3: <http://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.55.799>

URL4: <http://www.google.com/patents/US2708656>

URL5: <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz9703/lanoue.html>

URL6: <http://www.agracadaquimica.com.br/imagens/artigos/drawing-two-of-chicago-pilei.jpg>

URL7: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/236x/6a/e4/1d/6ae41d1d1c79e067c5253c4c30bbb9c273.jpg>

URL8: http://www.atomicarchive.com/Photos/CP1/images/CP1_people.jpg

FORRÁSOK

Hargittai István (2006): *Az öt világformáló marslakó*. Vince, Budapest

Lanouette, William (1997a): *Szilárd Leó. Zseni árnyékban*. Magyar Világ, Budapest

Lanouette, William (1997b): Szilárd Leó: Fizikus és békecsináló. *Fizikai Szemle*. 3, 96.

Marx György (1997): *Szilárd Leó*. Akadémiai, Budapest

Marx György (2000): *A marslakók érkezése*. Akadémiai, Budapest

Leo Szilárd Centenary Volume. (Marx, George ed.) Eötvös Physical Society, Budapest 1998

Leo Szilárd Online (Gene Dannen) • <http://www.dannen.com/szilard.html>

Szilárd Leó – Wikipedia http://hu.wikipedia.org/wiki/Szilárd_Leó

Wells, Herbert George (1922): *A földszabadult világ* (ford. Havas Lajos) Népszava, Budapest

