

vésbé számíthat sikerre. És miután nem számíthat sikerre, nem fog támadni. Így megnyílik a lehetőség a békés együttműködésre. Ezt nem a nagy explóziók teszik lehetővé, hanem a pontos számítás.

– *Professzor úr, az Ön egyik nyilatkozata van előttem. Ön azt mondja, hogy a stratégiai védelmi kezdeményezés eddig elért kutatási eredményei felhasználhatók pl. az egész Föld védelmére a meteoritbecsapódások ellen. Ön azt mondta, egy szuperkomputer által irányított nagy nyílásszögű kamera képes megállapítani a közelgő meteorit pályáját. Értelmezhetem úgy, hogy a javasolt program az egész emberiség védelmét célozza ilyen helyzetben? Hiszen pár hete egy meteor zúgott el a Föld mellett, ami komoly károkat okozhatott volna, ha eltalálja a Földet?*

– Kérem, mi úgy számítjuk, ennek a meteornak volt egy 1:100 000-hez esélye, hogy minket megüssön. És ez esetben annyi energiát bocsátott volna ki, mint egy egész nukleáris háború. Ez nem történt meg 99 999 erősebb volt, mint az egy. Azon az estén, amikor tudtam, hogy másnap kórházba megyek, a bűvös kavicsokról beszéltem, és a meteorvédelemről. Majd miután kikerültem a kórházból, az első előadásom ugyancsak ezen emberiségvédelemről szólt. Első feladat a megfigyelés, hogy pontosan tudjuk, mikor jön valami a közelünkbe, ami veszélyes. Kérem, abban az évben, amikor megszülettem (1908-ban) a tunguz meteorit találta el Szibériát, pár fokkal délre az északi sarkkörtől. A talajnak ütődve szétrobbant. És ma tudjuk, hogy az az energia 12 millió tonna robbanóanyag felrobbanásának felelt

meg. Senkit sem ölt meg. Az erdőt sok mérföldnyi rádiuszban kidöntötte. Ha ez Európában vagy az Egyesült Államokban történt volna, ez lett volna ennek a századnak a tragikus eseménye. Erről, ennek a közeledéséről senki sem tudott. Nekünk apparátust, vagy apparátusokat kell létrehozni, amik ezeket a meteorokat jelzik. A költségeket a biztosítótársaságok fizethetnék, talán 30 millió dollárt évente. Ennyit vagy többet kellene fordítanunk a védekezésre, több okból is. Azért, hogy ami értékes, azt megőrizzük. De még inkább azért, hogy azt őrizzük meg, ami még értékesebb: az emberi életet. És a harmadik ok a legnagyobb: ez olyan cél, amelynél talán egyszerű lesz nemzetközi közreműködést létrehozni. És ha ebben együtt tudunk működni, akkor talán sok másban is.

– *Professzor úr, remélem, hogy az Ön szavai látnoki szavak, remélem valóban így fog történni. Hadd mondjam el, hogy a rádióhídnak, amit a születésnapja után pár nappal Önnel készítettünk, nagyon nagy sikere volt Magyarországon. Több folyóirat közölte a szövegét, több tízezer példányban keltek el a folyóiratok. Remélhetjük-e, hogy – ha Isten Önnek ilyen egészséget ad, akkor az Amerika Hangja segítségével újra kapcsolatba léphet Önnel a Magyar Rádió?*

– Mindig nagy öröm, ahányszor akarják, teljes szívemből.

– *Nagyon, nagyon köszönöm még egyszer.*

– Én is köszönöm. Legjobb kívánságaimat, legjobb reményeimmet küldöm valamennyiüknek ebben a nagy faluban, amiben együtt élünk.

HIDEGFÚZIÓ (ELŐZETES)

Gutai László

Purdue University

Marx György

Eötvös Loránd Tudományegyetem

*“Értienünk kell hozzá, hogy életünkben álmot,
álmainkból pedig valóságot csináljunk.”*
(Pierre Curie)

Magfúzió

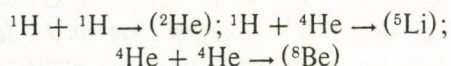
Az egy részecskére jutó kötési energia a vas táján ($Z = 26$) a legmélyebb. Ennél kisebb atommagok gyengébben kötöttek, mert bennük a részecskék jelentős hányada az atommag felületére szorul, így kevesebb szomszédal lépnek kötésbe. Ennél nagyobb atommagokban azért gyengébb a kötés, mert a sok proton miatt a Coulomb-taszítás energiája közel Z^2 -tel arányosan növekszik. Mindebből következik, hogy akár könnyű magok fúziója, akár nehéz magok hasadása nukleáris energia felszabadulásával jár. Az így nyerhető energia az azonos tömegű kémiai fűtőanyag égéshőjének sokezerszerese, akár milliószorosa is lehet.

Termodinamikai egyensúlyban levő univerzumban csak a legmélyebb kötésű vas-környéki atommagok lennének jelen. A mi Univerzumunkban jelen van kis mennyiségű nehéz elem (köztük urán és tórium), ezek egykori szupernóva hőmérsékletén keletkezett és a robbanás során hirtelen túlhűlt nemegyensúlyi maradványok. A nehéz elemek radioaktív bomlása szolgáltatja a Föld belső melegét (hévforrások és tűzhányók geotermikus energiáját); urán és plutónium hasadását alkalmazza az atombomba; urán hasításával működnek az atomerőművek.

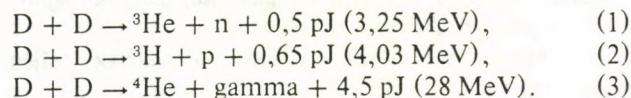
Az Univerzum anyagának 99%-át könnyű elemek (elsősorban hidrogén és hélium) alkotják. A korai forró univerzumban az intenzív hőmozgás nem engedte meg a magkötés kialakulását. A Nagy Bumm

okozta tágulás gyors adiabatikus lehűlést eredményezett, ami túlhűtve lényegében megőrizte az eredeti összetételt, a magfelépülés egyes izotópokat csak parányi mennyiségben hozott létre. Az Univerzumban a ^1H 73,5%, a ^4He 26,4%, a ^7Li 10^{-5} % gyakorisággal van jelen. A nehéz hidrogén (^2He , deutérium D) előfordulása 0,02%; a könnyű hélium (^3He) előfordulása 0,0001%; a könnyű lítium (^6Li) előfordulása 7,42% a gyakori izotóphoz képest. Könnyű atommagok fúziójával magyarázzuk a csillagok energiatermelését, ezt alkalmazza a hidrogénbomba is. Évtizedek óta folyik a kutatás kontrollált magfúzió létrehozása érdekében elektromos energia termelése céljából.

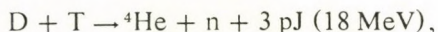
Mesterséges fúzióra a leggyakoribb izotópok nem alkalmasak, mert a



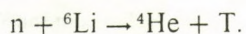
reakciók végtermékei stabilan nem léteznek. Legfontosabb fúziós energiahordozó a vízben előforduló nehéz hidrogén:



A zárt héjszerkezetű ^4He kialakulásakor különösen sok energia szabadul fel, de ez a folyamat kis arányban játszódik le, mert az elektromágneses sugárzás megszületése a magreakciókhoz képest kis valószínűségű folyamat. Energetikailag ideális fúziót biztosítana a ^3H (trícium, T) hidrogénizotóp:



de a T bomlékony, felezési ideje 12 év, ezért (pl. a hidrogénbombához) mesterségesen kell előállítani:



(A tríciumgyártás csak nagy neutronhozamú atomreaktorokba helyezett lítiumból lehetséges. Épp ez kínálja ma lehetőséget a nukleáris fegyvergyártás ellenőrzésére.)

A magfúzió akadálya a pozitív hidrogénatommagok közt fellépő elektromos taszítás. A taszító Coulomb-féle potenciális energia $V_0 = 0,14 \text{ pJ}$ (0,8 MeV) értékig emelkedik, és csak a magerők hatótávolságának megfelelő $1,4 \text{ fm}$ ($= 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$) távolságban vág le negatív értékre. Ilyen magas potenciálját legyőzéséhez $kT = V_0$ szerint egymilliárd fok hőmérséklet volna szükséges. Ezért stabil a Földön a nehéz hidrogén. A Nap centrális hőmérséklete ennek csupán századrésze, ezért ott is csak kvantummechanikai alagútjelenség révén mehet végbe a fúzió [1, 2]. Az 1920-as évek végén Gamow mutatta meg, hogy a $V(r)$ potenciálfalon egy nála alacsonyabb E energiával érkező részecske

$$G = \exp \left\{ - (4\pi/h) \int [2m(V(r) - E)]^{1/2} dr \right\}$$

valószínűséggel tud áthaladni. (Az integrál határai a potenciálfalba történő belépés és kilépés távolsága.) Ha egy R nagyságú térrészre bezárt atommag v sebességgel röpköd, másodpercenként $v/2R$ alkalommal ütközik a potenciálgátnak, így annak valószínűsége, hogy fúzió következzen be,

$$W = Gv/2R$$

másodpercenként. A fúzióval szemben mutatott átlagos élettartam

$$\tau = W^{-1}.$$

Ha a fenti képleteket pl. deutériummolekulára alkalmazzuk ($R = 0,074 \text{ nm} = 0,74 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ a molekulaátmérő), azt kapjuk, hogy a nehéz hidrogénmolekula élettartama spontán fúzióval szemben $\tau = 10^{70} \text{ s}$. (Az Univerzum életkora kb. 10^{10} év . A Galaxis összes deuteronjából egynél kevesebb fuzionál évente.) Ezt a $W = 10^{-70}/\text{s}$ fúziós valószínűséget $W = 10^{-23}/\text{s}$ körüli értékre kellene felfokozni, hogy 1 mól (4 g) deutériumban másodpercenként 1 fúzió bekövetkezzék. Az volna szükséges, hogy pl. a deutériummagok átlagtávolságát a normál molekulán belüli távolság $1/3$ részére csökkentsük, azaz a cseppfolyós hidrogént 27-szeres sűrűségűre nyomjuk össze, ami technikailag elérhetetlennek tűnik. Nagy intenzitású lézersugarakkal kísérlik meg megvalósítását.

Katalizált fúzió

A müon az elektronhoz hasonló, de annál 200-szor nagyobb tömegű részecske, amely a kozmikus sugárzás vagy gyorsítóknál felgyorsított részecskenyalábok ütközéseivel (pi-mezonból) keletkezik. A müont az atommag (az elektronhoz hasonlóan) elkapja, de mivel a Bohr-sugár képletében a tömeg a nevezőben szerepel, a müonatom 200-szor kisebb a hidrogénatomnál. Könnyen kialakul a (D^+ -müon- D^+) molekulaion is, ami 200-szor kisebb mérete miatt kb. 10^{-9} másodperc alatt fúziót szenved. (Mintegy 10^{80} -szoros növekedés az elektronhoz képest.) Erre a jelenségre Andrej Szaharov már 1948-ban felhívta a figyelmet, és azt Louis Alvarez 1957-ben meg is figyelte. Müonok gyakran érkeznek a kozmikus sugárzásban ($50 \text{ müon}/\text{m}^2/\text{s}$), de $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ felezési idővel bomlanak. Előállításuk energiáigénye gyorsítóval közel 200 pJ (1000 MeV). A müon a hidrogénfúzió katalizálása után felszabadul, ezt új deuteron foghatja be, ugyanaz a müon új katalizist hozhat létre. Végül vagy elbomlik a müon, vagy a keletkező nagyobb töltésű He (vagy más nagyobb rendszámú szennyezés) rabja lesz élete végéig. Pozitív energiámérleghez az volna szükséges, hogy egy müon rövid

élete folyamán legalább 500 fúziót katalizáljon. Az eddigi világrekord 170 fúzió/műon, ezt S. E. Jones (Brigham Young University, Utah, USA) [3] érte el. Kérdés: átléphető-e a kritikus 500 fúzió/műon? (A fő veszély a műonmolekula képződésének időigénye és a nagyobb rendszámú szennyezések preferált műonbefogása.) A kezdetben reménytelennek tűnő vállalkozás kilátásai Dubnában végzett kutatások révén javulni látszanak. Talán az energiamérleget is lehet majd javítani, ha a fúzióban keletkező neutronokat pl. uránhasításra hasznosítják (Jurij Petrov, Leningrád). De az út még ekkor is nagyon hosszúnak tűnik.

Hidegfúzió a természetben?

Hogy fúzió hidegen, természetes viszonyok közt végbemehet, arról sok folklór terjeng. A főleg hidrogénből álló Jupiter 50%-kal több hőt sugároz ki, mint amit a Napból kap, de nehéz a nagy nyomásból olyan sűrűsége következtetni, amely nagyságrendileg helyesen kiadná a szükséges fúziós energiatermelést. A Föld belsejében is nagy a nyomás. S. E. Jones és C. d. Van Siclen beszámolnak arról [4], hogy a Hawaii vulkánok gázaiban anomálishan magas $^3\text{He}/^4\text{He}$ arányt figyeltek meg, sőt 1972-ben tríciumot (^3H) is, noha annak mindössze 12 év a felezési ideje, nem tartózkodhatott évmilliókig a Föld mélyében, nemrég kellett keletkeznie magfúzióban. Állítólag lokális ^3He -dúsulás figyelhető meg gyémántmetszések, amikor azt lézerefénnyel hajtják végre, valamint akkor, amikor fémrudat vákuumban eltörnek. Kristálytöréskor fénylés, röntgensugárzás, talán neutronemisszió is észlelhető.

Fritz Paneth (akinek a nevét az idősebb magyar fizikusgeneráció is jól ismeri) olyan megfigyelést közölt [5], hogy hidrogént izzó palládiumcsövön átvezetve hélium képződött. A héliumot spektroszkópiailag azonosította. A közlemény 1926-ban (a neutron és a nehéz hidrogén felfedezése előtt!) jelent meg, Berlinből keltezve. Ezt a Cornell Egyetemmel való konzultáció után hibának minősítették, és 1927-ben visszavonták. [6]

Hidrogén oldódása fémekben

Az ipari forradalom kezdete óta rohamosan fokozódik a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó széndioxid-kibocsátás. A szén-dioxid molekulák fel fogják a talaj infravörös kisugárzását. Ez az üvegházhatás magyarázhatja a legutóbbi években tapasztalt kiterjedt hőmérséklet-növekedést. Tudósok és államfők egyre többen foglalkoznak azzal a kényszerű feladattal, hogy rövidesen korlátozni kell a szén-, olaj-, gáz eltüzelését az éghajlat stabilizálása érdekében. Elektromosságot termelő erőművek, városokat fűtő hőerőművek más típusú alternatívái ismereteseek, legnagyobb gondot az autók és repülők üzemanyagának

előállítását okozhat. Kézenfekvő lehetőség, hogy a nukleáris vagy vízi erőművek által termelt villamos energiát hasznosítva vízbontással hidrogént állítsanak elő. A hidrogén nagy fűtőértékű, égéstermékével (H_2O) a környezetet nem szennyező üzemanyag. A hidrogén tárolását járművekben legkényelmesebb úgy megoldani, hogy a hidrogént alkalmas fémekben nyeletik el.

Sok fém bizonyul jó hidrogénelnyelőnek, ilyen pl. a titán, a platina, a palládium és a ritkaföldfémek egy része. Most röviden a palládiummal érdemes foglalkoznunk. A palládium ezüsthöz hasonló nemesfém, hazai ára 500 Ft/g. Lapcentrált rácspan kristályosodik. Képzeljük el, hogy a terjedelmes Pd atomtörzsek úgy helyezkednek el, mint a közismert NaCl kristály Cl^- ionjai, míg a Na^+ ionok helye üres marad. A Pd vezetési elektronjai a fémekre jellemző delokalizált elektrontengert alkotják. (Így kristályosodik az ólom is.)

Ez a kristály úgy képes oldani a hidrogént, hogy az elhanyagolható helyigényű H^+ -ionok (protonok) a Na^+ -ionoknak megfelelő helyekre épülnek be, elektronjaik pedig a fém delokalizált vezetési elektronjaihoz csatlakoznak. Amíg a H/Pd atomarány alacsony, a H^+ -ionok eloszlása rendszertelen (alfafázis). A rácsállandó nem sokban különbözik a palládium-fém rácsállandójától (0,3 nm). A beépült proton kissé távolabb taszítja a szomszédos pozitív Pd-ionokat, így egy másik proton szívesen megy ebbe a Pd-ban fellelt tartományba: a protonok (miként a folyadék-molekulák) a palládiumban vonzzák egymást.

Ha a H/Pd atomarány megközelítheti a 100%-ot (bétafázis), akkor a H-ionok és Pd-ionok úgy helyezkednek el, mint a kősókristályban a Na^+ és Cl^- ionok (bétafázis). Az ilyen "ötvezet" rácsállandója nagyobb (0,4 nm). Az alfa- és bétafázis viselkedése különböző nyomáson és hőmérsékleten termodinamikailag követhető nyomon. Alacsony hőmérsékleten a hidrogén oldódását jelentős oldáshő (40 000 J/mol) felszabadulása kíséri. Magas hőmérsékleten a palládium leadja a hidrogént.

A palládium hidrogént könnyen csak 60% atomarányig vesz fel. Ennek oka, hogy a delokalizált vezetési elektronok széles sávja hamarabb betelik, további elektronok becsatlakozása csak gyorsan emelkedő energiákon lehetséges. A hidrogénben dúsuló palládium-fém vezetőképessége a tapasztalat szerint romlik.

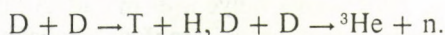
A Fleischmann – Pons-kísérlet

1989. március 23-án a világ egyik legtekintélyesebb elektrokémikusa, az angol Martin Fleischmann és tanítványa, az amerikai Stanley Pons [7] sajtóértekezleten bejelentette a hideg magfúzió laboratóriumi megvalósítását az Utah Egyetem Kémiai Tanszékén, Salt Lake Cityben.

Berendezésük meglepően egyszerű volt. Söröskancsó méretű Dewar-edénybe nehézvizet öntöttek. A víz vezetővé tételére benne lítium-hidroxidot oldottak. A vízbe 15 cm hosszú, néhány mm átmérőjű

tömör Pd-katód merült. Ezt csavar alakba hajlított Pt-drót-anód vette körül. Az elektródokra feszültséget kapcsolva 0,2–0,5 A erősségű áramot hoztak létre. A vízbontás során az oxigén az anódnál kibugyborékol. A deutériumionok a katódhoz vándoroltak és ott a Pd-fémbe oldódtak. Így a Pd-fém deutériumban telítődött: 120 órán át folytatott elektrolízissel 60%–100% D/Pd atomarányt értek el.

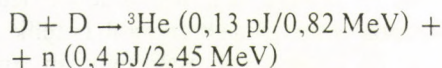
A bejelentés meglepő állítása a katódnál tapasztalt nagy hőfejlődés volt, ami alkalmanként a betáplált elektromos energia 8-szorosát is elérte. 26 watt/cm³ is előfordult. A teljes elektrolizálási időtartamra számítva a többletenergia 6 millió J/cm³ értékre nőtt. A szerzők ezt a deutérium palládium által katalizált fúziójaként értelmezték:



Magfizikai tapasztalat szerint (magasabb ütközési energiákon) a két reakcióág gyakorisága kb. egyenlőnek volt várható. Ha valóban magfúzió történt, akkor a reakciótermékeket ki kell tudni mutatni. A szerzők állítása szerint sikerült neutronokat közvetve észlelni. ($n + H \rightarrow D + \text{gamma}$ befogási reakció 0,35 pJ, azaz 2,2 MeV energiájú fotonjait észlelték NaI szcintillációval.) Gondot okoz azonban, hogy az észlelt neutronok száma milliárdadrésze volt annak, amit a magfúzióval magyarázott hőfejlődés alapján vártunk volna. Később célzások történtek a T és a ³He kimutatására is.

A Jones-kísérlet

1989. március 23-án (ugyanazon a napon) S. E. Jones a Brigham Young Egyetem fizikai és kémiai tanszékéről (Utah) egy dolgozatot küldött be [8] a Nature folyóiratba "a hideg nukleáris fúzió kondenzált anyagban történt megfigyeléséről". Ők is nehésvízbe helyezett Pd és Ti katóddal végeztek elektrolízist, ezen közben 0,4 pJ (2,45 MeV) energiájú neutronok keletkezését figyelték meg, ami a



reakció lefolyását bizonyítja. A jel/zaj viszont 5 volt. Ez a D-páronként 10⁻²³ fúzió/s reakciósebességnek felelt meg, sokszorta magasabb a D₂-molekulákra számított 10⁻⁷⁰ fúzió/s értéknél. Mint arra Jones rámutat, ez a talált érték nem összeférhetetlen a Jupiter- és Hawaii-legendáriumból kikövetkeztethető értékekkel. Viszont nagyságrendekkel kisebb annál a reakciógyakoriságnál, amit a Fleischmann–Pons-féle nagy hőfejlődés magyarázatához fel kellene tételeznünk.

Szakmai körökben a Fleischmann és Pons által bejelentett (gyakorlati alkalmazással kecsegtető) intenzív hőfejlődést "erős hidegfúzióként" emlegetik. A kevés neutron által jelzett, Jonesék által észlelt jelenséget "gyenge hidegfúzióként" mondják.

A reprodukálás nehézségei

Már maga az első két bejelentés keserű prioritási vitákat váltott ki Utah állam két egyeteme közt, amelyekre most nem kívánunk kitérni. De a kísérlet egyszerűsége és jelentősége oda vezetett, hogy pár napon – pár héten belül sokszáz, talán ezer laboratóriumban próbálták megismételni a kísérletet. A kísérletek közül egyesek észlelték az anomális hőfejlődést. A magfizikusok – a polcokról levett eszközökkel – a neutronok észlelésére fordították a figyelmüket. Néhány laboratórium bejelentette a neutronok észlelését. A többség nem észlelt elfogadható jel/zaj viszonyt.

A Magyar Távirati Iroda április 1-jén jelentette, hogy a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén Sztaricskai Tibor és Csikai Gyula észlelték a "gyenge hideg fúziót" kísérő, paraffinnal lelassított neutronokat. Ezt a hírt a New York Times és a Wall Street Journal is közölte. Jelenleg Magyarországon a KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékén, az ATOMKI-ban, a KFKI-ban, az ELTE-n az atomfizikai és kémiai tanszékek együttműködésében, a Budapesti Műszaki Egyetemen a Fizikai Intézet és a Tanreaktor együttműködésében, valamint az Izotóp Intézetben folynak hidegfúziós kísérletek; mind a Jones-féle "gyenge" fúzió kimutatását célozza nukleáris detektorokkal.

A többségükben negatív eredményű kísérletek mellett pozitív megfigyelésekről számolt be többek közt Varsó, Kiev, Berlin is, valamint az olaszországi Gran Sasso földalatti laboratóriuma, amelyik Európában a legalacsonyabb kozmikus sugárzási és neutronhátterrel rendelkezik.

Külön figyelmet érdemel az olasz Frascati Nemzeti Laboratóriumban elvégzett kísérlet, amelyet nem nehésvíz elektrolízisével hajtottak végre, hanem nehézhidrogén-gázba helyezett titánforgáccsal. A hőmérséklet vagy a nyomás változtatását kísérte neutron megjelenése.

A Financial Times június 4-én azt közölte, hogy Los Alamosban kimutatták a hideg fúzióból eredő tríciumot is.

Hazánkban KLTE, ELTE, KFKI szemináriumok után áprilisban az Eötvös Társulat Közgyűlésén, május elején az Akadémia közgyűlésén, május végén az Eötvös Társulatban egész napos ülészakon számoltak be a hidegfúziós kísérletekről. A kísérleti eredmények reprodukálásának nehézségei és ellentmondásai annak tulajdoníthatók, hogy a kísérletben sok paraméter szerepel. Mivel a keresett jelenség anyagszerkezeti-alagutazási-energetikai lefolyását még nem ismerjük, nem tudjuk, melyik paraméter, milyen értéke lényeges a fúzió eléréséhez. Csak két vonatkozásban jelezzük a nehézségeket.

A palládium drága, kevés van belőle (fő lelőhelyei a Szovjetunió és Dél-Afrika). Nehezen munkálható (1500 fokon olvad, ezt semleges atmoszférában vagy vákuumban kell olvasztani a szennyeződés elkerülésé-

re). Ezért különböző laboratóriumok nagyon eltérő méretű és alakú katódokat használtak. Abban sincs egyetértés, hogy a feltételezett fúzió a katód felületén vagy annak térfogatában zajlik le. Márpedig a két lehetőség nagyon eltérő stratégiát és gondolkodásmódot igényel.

A hidegfúzió előidézésében anyagszerkezeti változásoknak szerepe lehet (fázisátmenet, fázishatár mozgása, a fémkristály felületi és térfogati dúsulása nehézhidrogénben, a kristályszerkezet szétroncsolódása). Erre utal az a többek által tett megfigyelés, hogy a neutronok jelentkezése tranzienst jellemez: a kísérleti paraméterek megváltoztatását szereti követni, majd megszűnik. A jobb jel/zaj viszonyt keresve a kísérletezők is szeretik változtatni a kísérleti paramétereket (pl. az elektrolizáló feszültséget). Ilyen elektromos változásokra viszont az alacsony háttérű, nagy hatásfokú neutrondetektorok rendkívül érzékenyek. Külön gondot kell fordítani tehát arra, hogy az elektrolizáló feszültség ne módosítsa a neutrondetektorok alapját. Az olasz fizikusok Frascatiban éppen ezért szakítottak az elektrolízis-módszerrel, és tértek rá az áttekinthetőbb fém/gáz rendszer tanulmányozására [9].

A kísérletek mindaddig nem tesznek lehetővé egyértelmű következtetést, amíg nem tisztázódik: mely paraméterekre kell gondot fordítani a jelenség előidézéséhez.

Az értelmezés nehézségei

“Nem hiszek el egyetlen megfigyelést sem, amíg meg nem erősíti az elmélet” – mondta egykoron Eddington. Talán a megfelelő elmélet hiánya okozza, hogy a kísérletezőknek 2–3 hónap nem volt elegendő egybehangzó megítélés kialakítására.

Az “erős hidegfúzió” anomálishan nagy hőfejlődését csak igen kevesen vizsgálták és erősítették meg. Nehéz megmagyarázni, hogy miért nem keletkeznek neutronok a feltételezett fúziós folyamatok 50%-kában. Neutron nélküli fúzió volna a $D + D \rightarrow {}^4\text{He} +$ valami folyamat, amelyben a felszabaduló energiát a valaminek kell elvinnie. Kemény gammafotont nem észleltek. (Egyesek arra gondoltak, hogy a 4,5 pJ, azaz 28 MeV energiát talán a kristályrács veszi fel, mint a Mössbauer-effektusnál, és adja át további deuteronoknak, láncreakciószerűen elősegítve azok fúzióját. De itt olyan nagy energiáról van szó, hogy azt ép kristályrács Mössbauer szerint sem veheti fel.) A nukleáris reakciótermékek kis számából a többség arra következtet, hogy a hőfejlődés kémiai-anyagszerkezeti átalakulásának tulajdonítandó. A Nobel-díjas Linus Pauling egy-két évtizede maga is sokat foglalkozott hidrogén oldódásával fémekben. Szerinte a kísérlet folyamán emelkedő hőmérséklet- és koncentráció-értékek mellett elsőrendű fázisátalakulások mehetnek végbe oda-vissza, ezek átalakulási hőjét észlelik. Korábban csak

könnyűhidrogén oldódását tanulmányozták. Nem köztudott, hogy a nehézhidrogén mennyiben viselkedik másként. Nagyobb tömege miatt kisebb a kötött deuteron kvantummechanikai zéruspontenergiája. A protonnál (nehézhidrogénnél) érvényes a Pauli-kizárás, a deuteron (nehézhidrogén-mag) azonban egész spinű, így Bose-kondenzáció is felléphet. Mindez növelheti a PdD képződési hőjét a PdH-hez viszonyítva.

Ahhoz, hogy a $D + D$ fúzió valószínűsége elérje a Jones-féle kísérletekben észlelt gyakoriságot, elég volna a $D-D$ távolságot a D_2 kötéstáv 1/3-ára csökkenteni (0,025 nm). Hogy ezt az elektrolizáló nyomás a felületen vagy a kristályszerkezet a térfogatban miként tudná rákényszeríteni sok-sok deuteronra, nyitott kérdés.

Szóltunk a müonkatalizált fúzióról. A kozmikus sugárzás által keltett negatív müon a fémbe oda-megy, ahol pozitív ion vonzását érzi. A Pd-fémbe Pd-ionok vannak, amelyek magános 5 s elektronja a fém vezetési sávjába delokalizálódott. A Pd^+ -ion elektronszerkezete ezek szerint $1^2 2^8 3^{18} 4^{17}$. Ha a Pd-fémet 1:1 atomarányban nehézhidrogénnel telítjük, akkor feltételezhető [10], hogy a D^+ -ionok beépülnek a kristályrács hézagaiba, elektronjaik viszont kiegészítik a Pd^+ -ionok 4d héját $1^2 2^8 3^{18} 4^{18}$ szerint, így a Pd elveszíti pozitív töltését, semleges lesz. A beérkező negatív müon nem veszi észre a semleges Pd-atomokat, csak a töltött D^+ -ionokat; egyikre befogódva kisméretű D-müon atomot alkot. Ez azt jelenti, hogy töltés szempontjából a müont befogadó D^+ is eltűnik a kristályrácsból, mintegy hiány (vakancia) támad. A kristályrácsban a D^+ -ionok nagyon mozgékonyak. (10^{-11} s ideig maradnak csak egy helyen.) Ezért csakhamar egy újabb D^+ -ion lép az állvakancia helyére, így egy rácspontba két D^+ -ion kerül, meg ott van a müon is. Hármójukból egy szoros 10^{-12} m méretű $D^+ +$ müon + D^+ molekulaion képződik, ami igen gyorsan fúzióra vezet. Ezen érvelés szerint PdD-ben sokkal kedvezőbb a lehetőség müon-katalizált fúzióra, mint folyékony nehézhidrogénben [11]. Ahhoz, hogy a Jones-kísérlet neutronjait értelmezni tudjuk, azt kell feltételezni, hogy a PdD-ben egyetlen kozmikus sugárzás által keltett müon 700 fúziót katalizálni képes. (Ilyen eredmény nagy jelentőségű volna a katalizált fúzió energiatermelő hasznosítása tekintetében!) Sajnos, az idevágó kísérletek többszáz neutron csoportos keltését nem erősítették meg [12].

Említettük, hogy a fúzió valószínűsége igen kicsi. A katódra érkező deuteron bolyong, ütközik mindaddig, amíg el nem veszíti minden energiáját, akkor befogódik, megáll. El kellene érni, hogy ez a leállás minél később következzen be. A Pd ionok nagytömegűek, őket fogja a kristályrács, a velük való ütközés nem vesz fel sok energiát. A kristályráccsal történt ütközés csak rugalmas rezgések (fononok) keltésére fogyasztja a deuteron energiáját. Az energiavesztés fő oka általában a vezetési (szabad) elektronok-

kal való ütközés. Arnon Dart a haifai Műegyetemen már régóta izgatja a hidegfúzió lehetősége. Ha egy bizonyos D/Pd aránynál a vezetési sáv telítődne elektronokkal, azaz ha a kristály félvezetővé válna, akkor Arnon Dar szerint az elektontenger is befagyna. A bolygó deutron csak lassan "hűlné le". [13] Elég nagy térfogatban való bolyongás során a deutron egyik ütközése fúzióhoz vezethet. A reakciótermékek további deutronokat löknének meg, így a fúzió hidegben is láncreakciószerűen fenntarthatná magát. A gond az, hogy sem számítások, sem mérések nem erősítik meg élesen tiltott energiasáv felléptét. A bolygó deutron pedig a Pd-ionokkal ütközve a kristályrácsban rugalmas rezgéseket (fononokat) kelte is veszíthet energiát.

A pozitívnak ítélt kísérletek többsége egyetért abban, hogy a neutronok megjelenése tranzienst jelent, egy idő után megszűnik. Hogy a neutronképződés valaminek az elfogyása miatt szűnik meg, vagy a fúziót épp a változás idézi elő, azt kellene megérteni. Többben az elektrolízáló feszültség növelésével – csökkentésével, Frascati a gáznyomás vagy hőmérséklet növelésével – csökkentésével idézi elő a neutron-jelet. Ebből Jona-Lasinio és munkatársai arra következtetnek, hogy a fázishatár mozgása a kiváltó ok. Amikor az új feltételek közt termodinamikailag instabillá vált domén összezsugorodik, összeroskadva eltűnik, az eltűnés pontjában elsőrendű fázisátmenet során annyi átalakulási hő szabadulhat fel, amennyi elég lehet a fúzió előidézésére. Az ilyen doménösszeomlási-fúziós katasztrófák összetördelik a kristályszerkezetet. Ezzel magyarázzák azt a megfigyelést, hogy a jól működött (neutrontermlő) katód egy idő után megdöglik: annyi hibahelyet gyűjtött össze, hogy tiszta fázisok benne többé nem alakulhatnak ki, nem működik az elképzelt termodinamikai fázisösszeomlási katasztrófa.

Végekvetkeztetés

Ilyen még nincs. A kérdés 1989. júniusában nyitott. Mire jelen sorok az olvasó asztalára kerülnek, sok bizonytalanság megszűnhet. Ha hidegen létre lehet hozni fúziót, akkor akármekkora erőfeszítés

sem sok a cél eléréséhez. Ha mindez csak csalóka ábrándnak bizonyulna, akkor is szép, izgalmas tapasztalás volt mindnyájunknak, játékosnak és kibicnek egyaránt. Azt szoktuk mondani tanítványainknak: a kutatás fontosabb (szebb), mint az eredmény.

Ötödik erő? Meleg szupravezető? Hidegfúzió?... folytathatnánk a sort azokról a célokról, amelyeket a tudomány megálmodott. Mindig voltak holdkórosok. Egyeseknek igaza lett és új irányt szabtak a történelemnek. Szent-Györgyi Albert idézte, hogy kisgyerek korában a Francia Akadémia bebizonyította: levegőnél nehezebb járművel lehetetlen repülni. Ennek ellenére egyesek fából, fémből mégis építettek repülőgépeket. Mindnyájan saját korunk eszméinek foglyai vagyunk. Akik ezeknek ellenszögölnek, kockáztatják a tévedést, de a haladás zászlóvivői mégis közülük kerülnek ki. Akár siker az osztályrészük, akár sikertelenség, hálára vagyunk kötelezve irántuk. Galilei korában, Faraday korában, Szilárd Leó korában is a bizakodás és kételkedés dialektikája érlelte ki az eredményeket: mégis mozog a Föld, mégis közelhatás mozgatja a világot, mégis felszabadítható az atommag energiája.

IRODALOM

- [1] Marx György: Kvantummechanika 3. kiadás, 128. oldal. Marx György: Életrevaló atomok 128. oldal.
- [2] Nagy Károly: Kvantummechanika, 167. oldal.
- [3] S. E. Jones. Nature 321 (1986) 127.
- [4] C. D. Van Sicien—S. E. Jones: Journal of Physics G 12 (1986) 213.
- [5] F. Paneth—K. Peters: Naturwissenschaften 59 (1926) 2039.
- [6] F. Paneth—K. Peters: Naturwissenschaften 60 (1927) 138.
- [7] S. Pons—M. Fleischmann: Journal of Electroanalytical Chemistry 261 (1989) 301.
- [8] S. E. Jones et al., Nature 338 (1989) 737.
- [9] A. De Ninno, A. Frattolino, G. Lollabattista, L. Martinis, M. Marone, L. Mori, S. Podda, F. Scaramuzzi, nyomdában.
- [10] M. S. Daw—M. I. Baskes, Phys. Rev. B29 (1984) 6443.
- [11] M. W. Guinan—G. F. Chapline—R. W. Moir (Lawrence—Livermore Radiation Lab), Phys. Rev. Letters, nyomdában.
- [12] A. Galonski et al., Michigan State University preprint.
- [13] A. Dar, Physical Review Letters 32 (1974) 1299.
- [14] E. Fermi—E. Teller: Physical Review 72 (1937) 399.

AZ ŰRKUTATÁS HELYZETE MAGYARORSZÁGON

Szegő Károly
KFKI

Motto: "Astronavigare necesse est"

Bevezetés

Az antik ember számára a hajózás jelentette a nagy kihívást, számunkra az űrhajózás. Űrhajózás, űrkutatás: ikerfogalmak. Ritka a tudomány történetében, hogy egy tudományág kezdete szinte napra meghatározható. Az űrkutatás in-situ 1957. október 4-én kezdődött, amikor is a Szovjetunióból felbocsátották az első szputnyikot.

Az űrkutatás fiatal tudományág, de az elmúlt alig több mint 30 év alatt jelentősen módosította a világról kialakított képünket. Űreszközök segítségével bizonyították be a Naptól kiáramló töltött részecskék, az úgynevezett napszél létét; a Föld körüli sugárzási öveket: a Nap és a bolygók sajátos, napszél közvetítette kölcsönhatását stb. Új tartalmat kapott a bolygó-kutatás, de új horizont tárult fel a csillagászat előtt is, az űreszközök fedélzetéről végezhető, új spektrális