

Magyar Tudomány

A Magyar Tudományos Akadémia folyóirata. Alapítva: 1840

KEZDŐLAP ARCHÍVUM IMPRESSZUM KERESÉS

» A NEHÉZVÍZ

X

Sükösd Csaba

a fizikai tudomány kandidátusa, egyetemi docens, BME Nukleáris Technikai Intézet Nukleáris Technika Tanszék
sukosd(kukac)reak.bme.hu

A mindössze 80 éve felfedezett nehézvíz a tudományos és műszaki élet sok területén forradalmi változásokat okozott, és bármilyen kis hányadban fordul is elő a természetes vizekben, mégis nagyban hozzájárul világunk alakításához.

Felfedezése

A nehézvíz története szorosan összekapcsolódik a nehézhidrogén – deutérium – felfedezésével. A történet száz éve, 1911-ben kezdődött, amikor Ernest Rutherford munkatársa, Frederic Soddy bevezette az izotóp kifejezést azoknak az elemeknek a jelölésére, amelyeknek azonosak a kémiai sajátosságaik, de különböző a tömegszámuk. Akkoriban vetődött föl, hogy a víz – mint mindenütt könnyen hozzáférhető anyag – megfelelő lenne szabványosításra, ezért 1913-ban Arthur Lamb és Richard Lee olyan módszert dolgoztak ki, amellyel a víz sűrűségét nagy (200 ppb, 200 milliárdod rész) pontossággal meg tudták határozni (Lamb – Lee, 1913). A különböző helyekről származó vízminták sűrűsége azonban a mérési hibánál jóval nagyobb – akár 800 ppb –, szignifikáns eltérést is mutatott. A víz sűrűségét standardként használó koncepciót végül fel kellett adni. Ugyanakkor észrevétlenül elmentek a nehézvíz – és a nehézhidrogén – felfedezése mellett, mert nem keresték tovább a sűrűségeltérések igazi okát.

A következő években mind több elem izotópját fedezték fel tömegspektroszkópiai módszerekkel. Az atomi tömegegységnek az oxigén atomtömegének 1/16 részét választották. 1929-ben azonban William Giaque és Herrick Johnston felfedezte az oxigén ^{17}O és ^{18}O izotópját. 1931-ben Raymond T. Birge és Donald H. Menzel rámutattak, hogy az ^{17}O és ^{18}O jelenléte miatt a tömegspektroszkópiai és a kémiai módszerekkel történt hidrogéntömeg-méréseknek ellentmondásban kellene lenniük (Birge – Menzel, 1931). A kémiai méréseknél ugyanis a természetes oxigén tömegét vették 16 egységnek, míg a tömegspektroszkópiai méréseknél az ^{16}O izotópjét. Ugyanakkor a hidrogén kémiai módszerekkel meghatározott tömege $1,00777 \pm 0,00002$ volt, ami megdöbbentően közel esett Francis Aston tömegspektroszkópiai értékéhez ($1,00778 \pm 0,00015$). Ez a jó egyezés

Az eljárás azon alapul, hogy különböző hőmérsékleteken a fenti reakció egyensúlya különböző irányba tolódik el. Alacsony hőmérsékleten a kénhidrogénből megy át több deutérium a vízbe, a víz feldúsul deutériumban. Magas hőmérsékleten pedig éppen fordítva: a vízből megy át több deutérium a kénhidrogén gázba.

Az ipari megvalósításban kénhidrogén gázt keringetnek két különböző (30 °C, illetve 130 °C) hőmérsékletű térrész között. A kénhidrogén felveszi a deutériumatomokat a magasabb hőmérsékletű vízből, és leadja az alacsonyabb hőmérsékletűnek, tehát tulajdonképpen a deutérium „hordozója”. Megfelelő kaszkádkapcsolással elérhető, hogy néhány ilyen fokozattal a deutérium aránya jelentősen (15–20%) feldúsuljon. További – például atomreaktorbeli – alkalmazáshoz elegendő dúsítású nehézvizet ebből már vákuumos desztillációval, illetve elektrolízissel állítanak elő. A GS-eljárásban szereplő nagy mennyiségű kénhidrogéngáz komoly környezeti kockázatot jelent.

Nehézvízgyártás világszerte

Nagyobb mennyiségű előállításra a nukleáris láncreakció felfedezése és az atomfegyverkezési verseny kapcsán kezdődött el. 1934-ben a Norsk Hydro építette az első nehézvíz-előállító üzemet Vermorkban (Norvégia), egy vízerőmű villamos energiáját használva. Az üzem kezdeti kapacitása mindössze 20 liter volt évente, de a németek Norvégia megszállása (1940. április) után a kapacitást megemelték egy tonna/évre. 1942 végén a nehézvízüzem elleni brit támadás még meghiúsult, ám 1943. február 27-én a szövetségesek norvég partizánok segítségével sikeres támadást hajtottak végre, súlyos csapást mérve a német nehézvíz-utánpótlásra.

A kanadai Trailben 1943-ban helyeztek üzembe egy nehézvízgyárat, amely az amerikai Manhattan-programhoz szükséges nehézvizet állította elő a róla elnevezett eljárással. Kanada máig a világ egyik legnagyobb nehézvíz-előállítója, mivel a kanadai CANDU (Canada Deuterium Uranium)-atomreaktorok nehézvizet használnak moderátorként. Az 1979-ben üzembe

csak úgy magyarázható, ha az oxigén nehezebb izotópjainak a jelenlétét a hidrogén nehezebb izotópjainak jelenléte kompenzálja. Számításaik szerint a ^2H előfordulási gyakoriságának a könnyű, ^1H izotóphoz 1:4500 körül kell lennie ahhoz, hogy ez az egyetlen nehezebb izotóp kompenzálni tudja a nehezebb oxigénizotópok okozta eltérést.

Ugyanebben az évben Harold Urey már táblázatban foglalta össze az ismert és a „hiányzó” izotópokat. A táblázatbeli hézagok alapján következtetett a ^2H , ^3H és ^5He izotópok létezésére.

Urey és George Murphy keresni kezdték a ^2H vonalát a természetes hidrogén spektrumában. Az energiaszintekben az atommag-elektron rendszer redukált tömege szerepel. A kettő aránya:

$$\left(\frac{m_e m_p}{m_e + m_p} \right) \approx +m_e = \frac{m_e}{2m_p} = 1 + 2.74 \cdot 10^4 \quad (\text{I})$$

Itt m_e az elektron, m_p pedig a proton tömegét jelenti. Ez az eltérés mindössze 1,8 Å-öt jelent a hidrogén 6565 Å-ös Balmer-alfa vonalánál. A mért spektrumban azonban csak nagy jóindulattal lehetett volna látni a várt vonalat, ezért Urey és Murphy elhatározták, hogy folyékony hidrogén desztillációjával megpróbálják feldúsítani a nehezebb izotópot, azt remélve, hogy a könnyebb izotóp valamivel hamarabb elpárolog, és így a maradékban feldúsul a nehezebb izotóp. A szerencse sem szegődött melléjük, mert Ferdinand Brickwedde, aki a részükre a mintát előkészítette, „nagyon tiszta” hidrogént akart adni a kísérletekhez, és elektrolízissel előállított hidrogénből készítette a mintát – nem tudván, hogy az elektrolízis az egyik legjobb módszer a két hidrogénizotóp szétválasztására. Emiatt azonban a Brickwedde által készített minta deutériumban erősen „szegényített” volt. Ám amikor a „hibát” felfedezték, és rájöttek arra, hogy az elektrolízissel a két izotóp jól elkülöníthető egymástól, a deutérium spektrumvonala előbukkant (Urey et al., 1932), és hamarosan az izotóparányt is meghatározták: 1:6500, ami nagyon közel van a ma elfogadott értékhez. Nem sokkal később a felfedezett elektrolízis módszert használva előállították az első nehésvízmintákat

helyezett Bruce (Douglas Point, Ontario) Nehésvízgyár volt a világ legnagyobb ilyen létesítménye. A GS-eljárást használta, amellyel 700 tonna nehésvizet állított elő évente. Egy tonna nehésvíz előállításához 340 000 tonna tápvizet kellett elhasználni. A Bruce-nehésvízüzem telephelyén nyolc CANDU-reaktor működött, amelyek a nehésvíz előállításához szükséges ipari hőt és villamos energiát szolgáltatották. A csernobili baleset hatására a kilencvenes években lecsökkent az atomerőművek iránti kereslet, és lényegesen megjavították az atomerőművi nehésvíz visszanyerési technológiáját is. Ezek miatt világszerte nagyon lecsökkent a nehésvíz-igény, a Bruce-üzem termelése feleslegessé vált, így az üzemet 1997-ben leállították, és leszerelték.

Nhésvizet a világon még sokfelé állítanak elő, például Argentínában, Indiában, Iránban és Romániában is. Feltehetően az atomhatalmak mindegyike állít elő nehésvizet is.

Néhány alkalmazás

Izotópos nyomjelzés • Nem sokkal a felfedezése és előállítása után, 1934-ben Hevesy György már izotópos nyomjelző gyanánt használta a nehésvizet, a víz emberi testben való körforgásának vizsgálatára. A nehésvíz nyomjelzőként való alkalmazása azóta széles körben elterjedt. Mivel a hidrogén nagyon sok szerves molekula alkotóeleme, a deutériummal való nyomjelzés sok molekula metabolizmusának vizsgálatában fontos szerepet játszik. Ilyen alkalmazás a „kettősen nyomjelzett víz” (doubly labeled water) nevű eljárás, amelynek az a lényege, hogy a vizsgált szervezetnek beadott vízmintában nemcsak a könnyűhidrogént cserélik ki deutériumatomokra – részben vagy teljesen –, hanem az oxigénatomot is ^{18}O -ra. Ezt követően bizonyos idő elteltével vizsgálják a szervezetből kiürült vízben (vizelet, izzadság) a nyomjelző atomok arányát. A szervezet energiamérlegében nagy szerepe van az oxigén metabolizmusának. Mivel az oxigén a szervezetből vízhez kötve, illetve CO_2 formájában is távozik, az energiaháztartáshoz pedig csak a CO_2 formájában történő kibocsátásnak van köze, fontos lenne a két távozási út kvantitatív szétválasztása. Erre ad lehetőséget a kettősen nyomjelzett víz. A hidrogén

(Washburn – Urey, 1932; Lewis, 1933; Lewis – MacDonald, 1933).

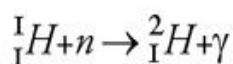
Történeti érdekesség: Urey-nak problémát okozott anyagi támogatást szereznie arra, hogy az Amerikai Fizikai Társaság 1931-es ülésére Tulane-ba utazzon és bemutassa tudományos eredményeit. Két év múlva pedig megkapta a kémiai Nobel-díjat.

A tudománytörténet fintora, hogy 1935-ban Aston hibát fedezett fel a hidrogén tömegére vonatkozó méréseiben (Aston, 1935). Az új tömegspektroszkópiai mérési eredmény – a mérési hibán belül – tökéletesen összhangban lett volna a kémiai eredményekkel, a deutérium nélkül is! A korábbi hibás mérési eredmény nélkül a nehézhidrogén-izotópok tovább maradtak volna rejtve. De Aston később „lépett vissza”: a deutériumot addigra már felfedezték.

A deutérium eredete és gyakorisága

Természetesen két deutériumatom is alkothat molekulát (D₂), ám ennél sokkal gyakoribb az, hogy egy deutériumatom egy könnyűhidrogénnel egyesül: HD. Egy olyan szobahőmérsékletű gázban, amelyben a deutériumatomok aránya 50%, a gázmolekulák kb. 50%-a HD, 25%-a H₂, és 25%-a D₂ formájában lenne jelen, mivel a kémiai kötés energiájában az izotópeffektus miatt meglévő kis különbség ezen a hőmérsékleten elhanyagolható, és így a „találati valószínűség” szabja meg a molekula összetételét.

A deutérium eredetének megmagyarázása régóta tudományos viták tárgya. A problémát az okozza, hogy azok a magfizikai reakciók, amelyek a deutérium létrejöttét megmagyaráznák, a deutérium szinte azonnali eltűnéséért is felelősek. Az egyik legnyilvánvalóbb ilyen reakció a proton és a neutron (n) egyesülése:



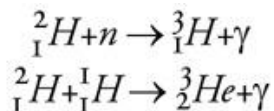
A proton és a neutron egyesülésekor felszabaduló 2,2 MeV kötésenergia gammasugárzás formájában szabadul fel. Ez a reakció nyilvánvalóan olyan környezetben mehet végbe, ahol protonok és neutronok is vannak. Az ősrobbanás modellje szerint az univerzum születésekor volt olyan rövid korszak, amelyben a nukleonok már összeálltak –

csak vízhez kötve távozik, ezért a kiürülés vizsgálatakor a távozó vízben a deutérium és az ¹⁸O arányából meghatározható az, hogy a bevitt (jelzett) oxigén hanyadrésze távozott CO₂ formájában.

Neutronszórás • Neutronszórásos kísérletekben a neutronok az atommagokon szóródnak, ezért a különböző izotópok – eltérő magfizikai tulajdonságaik miatt – különbözőképpen lépnek kölcsönhatásba a neutronokkal. Emiatt neutronszórásos kísérletekben – elsősorban biológiai minták vizsgálatánál – fontos szerepet kap a nehézvíz, illetve a hidrogénatomok deutériumatomokra való cserélése. Különösen érdekes, hogy míg a deuteron szórás hossza +0,6671×10⁻¹² cm, addig a protoné -0,3742×10⁻¹² cm. Azaz a két hidrogénizotóp szórás hossza ellenkező előjelű, ezért szórásuk nagyon különböző. Ez komplex biológiai mintákban lehetővé teszi a különböző komponensek szétválasztását a neutronszórás során. Ezt a technikát kontrasztváltogatásnak vagy kontrasztillesztésnek hívják. Az oldószerben változtatjuk a nehézvíz (deutérium) koncentrációját, ennek következtében az egyes biológiai komponensekben is lecserélődik a protonok egy része deuteronokra. Ezáltal elérhető, hogy egyes biológiai komponensektől eredő szórás egyezzen meg az oldószerből eredő szórással, azaz az illető komponens kontrasztja „eltűnik”. Például egy DNS-t, proteineket, lipideket tartalmazó biológiai mintánál a fehérjék kontrasztja 40–45%-os nehézvíz-koncentrációjú oldatban „tűnik el”. Ilyen oldószer alkalmazva csak a DNS és a lipidek lesznek „láthatók”.

Magmágneses rezonancia (NMR) • Az NMR a molekulaszervezet-vizsgálat egyik fontos eszköze. Alapja az, hogy az atommagok mágneses momentuma a külső mágneses térhez képest különböző irányokba „állhat be”, s ez a mágneses térrel való kölcsönhatás miatt különböző energiájú állapotokat jelent. A lehetséges állapotok számát az atommag impulzusmomentuma határozza meg, az egyes állapotok közötti energiakülönbséget pedig az atommag mágneses momentuma, kémiai környezete és az alkalmazott mágneses tér. Ezen állapotok között elektromágneses gerjesztéssel az energiakülönbségnek megfelelő – általában rádiófrekvenciás – térrel átmeneteket lehet létrehozni. Ezek segítségével nemcsak a

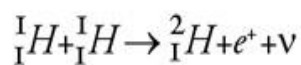
azaz voltak protonok és neutronok –, és így a protonok és neutronok egyesülése is beindulhatott. Ilyen környezetben azonban a deutérium szinte azonnal el is tűnik egy újabb neutronnal vagy protonnal egyesülve:



Sőt, a reakciólánc tovább folytatódik, míg végül a neutronok legnagyobb része ${}^4\text{He}$ formájában talál menedéket.

Richard Epstein és munkatársai (1976) szerint a deutérium léte és az Univerzumban megfigyelt koncentrációja az egyik döntő bizonyíték az Univerzum ősrobbanásban történt eredetére. A jelenleg megfigyelt koncentráció csak olyan körülmények között alakulhatott ki, amikor az anyagsűrűségben és a hőmérsékletben bekövetkezett gyors változások miatt a létrejött deutérium-atommagok egy részének már nem volt lehetősége a fenti reakciókkal tovább fuzionálni. Ilyen gyors változások a jelenlegi modelljeink szerint csak közvetlenül az ősrobbanás után uralkodtak. Akkor ugyanis az Univerzum gyors tágulása hirtelen annyira lehűtötte a forró anyagot, hogy a héliummá történő fúzió már nem mehetett végbe; az atommagba be nem fogódott neutronok pedig 614 másodperces felezési idővel protonná, elektronná és antineutrínóvá bomlottak. Az Univerzum első néhány percében zajlott le a könnyű elemek egy részének szintézise – köztük a deutériumé is. Ennek következtében már röviddel az ősrobbanás után kialakult az Univerzum kezdeti anyagösszetétele. A modellek szerint a deutérium végső koncentrációja az akkori folyamatok nagyon fontos mutatója, mert keletkezése és eltűnése függ a körülményektől (sűrűség, hőmérséklet stb.).

A csillagokban, így Napunkban sincsenek szabad neutronok, ezért ott csak a gyenge kölcsönhatás segítségével keletkezhet deutérium a fúziós folyamat kezdő lépésében:



Ám a Napban sem „él” sokáig a deutérium, hiszen elegendően magas a hőmérséklet a fúzióhoz,

molekulában lévő – NMR-jelet adó – atomok számáról, hanem azok kémiai környezetéről is információ nyerhető. A deuteron mind impulzusnyomatékában, mind mágneses momentumában különbözik a protontól (lásd táblázat), ezért az NMR szempontjából egészen másképpen viselkedik. Protonokra hangolt NMR-készülék számára a deuteronok láthatatlanok.

	impulzus-momentum	mágneses momentum
proton	$1/2 \hbar$	$1,410\,606\,633\,(58) \cdot 10^{-26} \text{ J/T}$
deutérium	$1 \hbar$	$0,432\,852\,123\,(67) \cdot 10^{-26} \text{ J/T}$

Biológiai molekulákban lévő protonok helyzete NMR-rel általában nehezen vizsgálható, mert az oldószerként használt vízben lévő protonok NMR jele elnyomja a molekula protonjainak a jelét. Ilyen esetekben az oldószer nehézvízre cserélése segít a vizsgálat elvégzésében, amelynek során az is nyomon követhető, hogy a molekulában lévő protonok milyen ütemben cserélődnek le az oldószerben lévő deuteronokra.

Neutrínódetektor • A legnagyobb mennyiségű nehézvizet az atomenergia-ipar használja (lásd a következő pontot). Különösen kiemelkedik Kanada, ahol a hazai felhasználásra és kereskedelmi forgalomra is gyártott CANDU-reaktorokban több tonna nehézvíz végzi a neutronok lassítását és a reaktor hűtését. Az 1986-os csernobili reaktorbaleset után az atomerőmű-építés világméretű lendülete megtorpant – a nyugati államokban szinte teljesen leállt –, és így a CANDU-reaktorokhoz már előállított és raktárakban felhalmozott rengeteg nehézvízre megszűnt az atomenergia-ipar igénye. A részecskefizikusok – kihasználva ezt az időszakot – a nehézvíz egy részecskefizikai tudományos kísérletben való felhasználásával álltak elő, amelyhez megszerezték a kanadaiak támogatását is.

A Napban – több részfolyamat során – négy proton ${}^4\text{He}$ atommaggá fuzionál. A standard napmodell szerint ez a folyamat szolgáltatja a Nap energiáját. E folyamatban neutrínók keletkeznek – a különböző részfolyamatokban különböző energiával, illetve energiaeloszlással. A neutrínók parányi, semleges részecskék, és csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. A három leptoncsaláddhoz egy-egy neutrínó is tartozik, külön

ezért szinte azonnal ^3He -maggá egyesül egy protonnal. A csillagok a fúzió során jobban „fogyasztják” a deuteronokat, mint termelik.

A jelenleg leginkább elfogadott álláspont szerint az Univerzumban megfigyelt deutériumkoncentráció az ősröbbanáskor alakult ki, azóta lényegében változatlan, kivéve a csillagok deutériumfogyasztása miatt bekövetkezett kis változást.

Külön figyelmet érdemel az a tény, hogy földi környezetben lényegesen más a deutérium aránya, mint az univerzumbeli átlag. A Földön minden deutériumatomra kb. 6400 könnyűhidrogén-atom jut. A deutérium „bedúsulásának” mechanizmusa a kis tömegű bolygókban – ilyen a Föld is – még ma sem teljesen tisztázott. A dúsulás egyik oka lehet az, hogy a kis tömegű égitestek gyenge gravitációja az égitest kialakulásakor nem tudta megtartani a könnyűhidrogén-molekulákat. A könnyű molekulák hőmozgásának sebessége meghaladta az első kozmikus sebességet, ezért legnagyobb részük megszökött az égitestről. A földi atmoszférában sem találunk hidrogént gáz halmazállapotban, a földi hidrogén vízmolekulákban vagy egyéb vegyületekben van kötve. Ez az oka annak is, hogy a Földön a hidrogén gyakorisága sok nagyságrenddel kisebb, mint az univerzumban. A kétszer akkora tömegű – s ezért lassúbb – D_2 molekuláknak (vagy a másfélszer akkora tömegű HD molekuláknak) azonban csak kisebb hányada szökött meg a Föld vonzásköréből, így a deutérium aránya a könnyűhidrogénéhez képest nőtt. Ez biztosan hozzájárult ahhoz, hogy a deutérium a Földön gyakoribb, mint általában az Univerzumban. Ám a kvantitatív modellek szerint egyedül ez a folyamat nem tudja megmagyarázni a megfigyelt dúsulást.

A nehézvíz biológiai hatása

A kémiai elemek nehezebb izotópjainak általában alig észrevehető hatásuk van az illető elem metabolizmusára, mivel az atomtömeg relatív megváltozása általában kicsi. A kémiai kötések energiájában a kvantummechanika szerint az atommag és az elektronok redukált tömege szerepel.

az elektronhoz, a müonhoz és a tau-mezonhoz. A Napban elektron-neutrínók keletkeznek.

A standard napmodell elég jó becslést ad arra vonatkozólag, hogy a Napból a Földre milyen fluxusú és energiaeloszlású elektron-neutrínóknak kellene érkezniük. Már az 1960-évektől kezdve komoly fejtörést okozott az, hogy a Nap-neutrínók észlelésére készült, s azóta is tökéletesített kísérletek jóval kevesebb neutrínót detektáltak, mint amennyit a standard napmodell jósolt.

A Nap-neutrínók rejtélyének egyik megoldását a neutrínó-oszcilláció hipotézise kínálta, amely szerint a háromféle neutrínó egymásba át tud alakulni. E modell szerint mire a Nap-neutrínók a Földet eléri, egy részük már átalakul müon- vagy tau-neutrínóvá, az elektron-neutrínók észlelésére érzékeny kísérletek pedig ezeket nem tudják detektálni.

A hipotézis igazolására a 90-es években újabb, más alapelveken működő neutrínódetektorok épültek. Ezek egyike volt a kanadai Sudbury Neutrino Observatory (SNO). 1984-ben Herb Chen vetette fel, hogy a nehézvíz alkalmas lehet a probléma tisztázására, mivel a nehézvízben – szemben a korábban alkalmazott anyagokkal – olyan reakciók is végbemehetnek, amelyek különbséget tesznek a különböző neutrínók között, lehetővé téve az oszcilláció közvetlen megfigyelését. A kísérlet céljára még 1984-ben kiválasztották az egyik legmélyebben fekvő bányát, a mintegy 2 km mélyen fekvő Creighton Mine-t (Sudbury, Kanada). Ilyen mélyre semmilyen kozmikus részecske nem tud már lehatolni, csak a neutrínók. A projekt 1990-ben kapta meg a hivatalos zöld jelzést.

A detektor 6 m sugarú, gömb alakú, átlátszó akriltartályában 1000 tonna (!) nehézvíz van (URL1). A tartály körüli üreget könnyűvízzel töltötték meg, amelynek a felhajtóereje nagyrészt tehermentesíti az akriltartály tartószerkezetét, valamint árnyékolja a kőzet radioaktív anyagaiból esetleg jövő sugárzást. A neutrínók érzékelése a gyenge kölcsönhatás segítségével történik. A nehézvízzel – egyedülálló módon – mérni lehet az elektron-neutrínók ν_e fluxusát és energiaeloszlását, valamint az összes neutrínó ν_x fluxusát.

A detektorban lezajló három reakció:

$$\bar{m} = \frac{m_N m_e}{m_N + m_e} = m_e \left(\frac{1}{1 + \frac{m_e}{m_N}} \right) \quad (2)$$

Itt m_e az elektron tömege, m_N pedig az atommagé. Ennek a relatív megváltozására kapjuk:

$$\frac{\Delta \bar{m}}{\bar{m}} \approx \left(\frac{m_e}{m_N} \right) \cdot \left(\frac{\Delta m}{m_N} \right) \quad (3)$$

Látható, hogy minél nagyobb egy atommag tömege (m_N), annál kisebb lesz az első zárójel értéke, és természetesen annál kisebb lesz a második zárójel értéke is (azonos Δm_N esetén). Emiatt használhatók a nehezebb elemek radioaktív izotópjai jó nyomjelzőkként. A nehézhidrogén (deutérium) esetében azonban a helyzet egészen más. Ez az egyetlen olyan elem, ahol az izotópeffektus lényeges szerepet kap, mivel itt a deutérium tömege kétszerese a könnyű izotópénak, azaz a

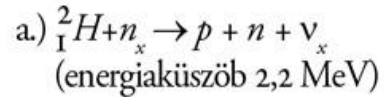
$$\frac{\Delta \bar{m}}{\bar{m}} \approx 1, \text{ és az } \left(\frac{m_e}{m_N} \right)$$

hányados is a lehető legnagyobb.

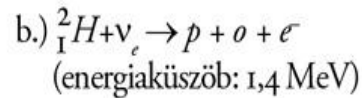
A biológiai rendszerek általában igen érzékenyek a víz – mint oldószer – egyes fizikai, fiziko-kémiai jellemzőire. Ezért a nehézhidrogén fenti izotópeffektusához hozzájárul még a biológiai rendszereknél a nehésvíz egyes oldószer-tulajdonságainak a megváltozása is.

Bizonyított tény, hogy a nehésvíz szignifikánsan meghosszabbítja az élőlények napi életritmusát – szinte lelassítja a biológiai órát. Ezt a hatást egyszemélyeknél éppúgy megfigyelték, mint növényeknél, rovaroknál, madaraknál és rágcsálókánál. Ma sem tisztázott azonban, hogy a hatást milyen mechanizmussal fejti ki (Pittendrigh et al., 1973).

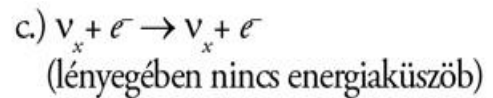
Egy másik igen fontos különbség, hogy a deuterizált hidrogénhidak valamivel erősebbek, mint a könnyűhidrogénnel alkotott kötések (Katz, 2008). A biológiai makromolekulák működésében, feltekeredésében, harmadlagos struktúrájuk kialakításában viszont a hidrogénhidaknak döntő szerepük van.



A deuteron szétbontása. Ezt mindhárom fajta neutrínó meg tudja tenni. A standard napmodell szerint az SNO-detektorban naponta 30 neutronnak kellene keletkeznie.



Mivel itt egy neutron protonná és elektronná alakul, ezt a reakciót csak az elektron-neutrínó tudja létrehozni. Ez is a nehésvízre jellemző reakció, amellyel mérhető az elektron-neutrínók fluxusa. A standard napmodell szerint az SNO-detektorban naponta 30 ilyen eseménynek kellene bekövetkeznie.



Ez tulajdonképpen rugalmas szóródás elektronon, amire mindhárom neutrínó képes, bár az elektron-neutrínó kölcsönhatásának valószínűsége kb. hatszor akkora, mint a másik két neutrínóé. A standard napmodell szerint az SNO-detektorban naponta mindössze három ilyen eseménynek kellene bekövetkeznie.

A detektor vizében a nagy sebességű elektronok Cserenkov-sugárzást bocsátanak ki, a detektor körül gömbszimmetrikusan elhelyezett tízezer fotoelektron-sokszorozó ezt a sugárzást észleli.

Az a.) reakcióban nem keletkezik nagy sebességű elektron, ott a keletkezett neutronokat kell észlelni. A nehésvízben – mivel jó moderátor – a neutronok lelassulnak, termalizálódnak. A termikus neutronok észlelésére két módszert is alkalmaztak.

– 2001 júniusában kb. két tonna szupertiszta konyhasót (NaCl) oldottak a nehésvízben. A termikus neutronok nagy hatáskeresztmetszettel befogódtak a klóratommagokba, gammasugárzást bocsátva ki. A nehésvízben terjedő gammasugarak elektronokat löktek meg Compton-effektussal, a meglökött gyors elektronok Cserenkov-sugárzását pedig a fotoelektron-

Az eukarióta szervezetek mitotikus sejtosztódásában jelentős szerepet játszó „húzófonalakat” (mitotikus osztódási orsókat) a nehézvíz jelenléte különösen megzavarja. A kizárólag nehézvízzel locsolt növények növekedése megszűnik. A magok nem csíráznak ki, mivel a nehézvíz megakadályozza az eukarióta sejtek osztódását. Prokarióta szervezeteknél – például baktériumoknál – a mitotikus problémák nem lépnek fel: növekedni és szaporodni képesek teljesen deuterizált környezetben is, miközben a fehérjéik és a DNS-ük hidrogénatomjait teljes egészében deutériumatomokra cserélik (Richet et al. 1977).

Bár egyértelműen bizonyított, hogy az eukarióta szervezetekre a nehézvíz nagy dózisa ártalmasak – akár halálosak is – lehetnek, ugyanakkor az öregedés biológiáját kutató moszkvai intézet kísérletek során úgy találta, hogy a nehézvíz kis dózisa akár 30%-kal is megnövelheti a gyümölcslegyek várható élettartamát (Shchepinov, 2007).

Állatkísérletek

Egerek, patkányok és kutyákon végzett kísérletek (Kushner et al. 1999) bizonyítják, hogy 25%-ot meghaladó mértékű deuterizáció gyakran visszafordíthatatlan sterilítást okoz. Emlősök elpusztulnak, ha a testben lévő víz fele nehézvízre cserélődik le (ez bekövetkezik, ha kb. egy hétig csak nehézvizet isznak). A deutériummal mérgezett emlősök csontvelő-elégtelenségben (vérzékenység, fertőzések), valamint bélrendszeri zavarokban (hasmenés, folyadékvesztés) halnak meg. A halál bekövetkezésének módja nagyon hasonló, mint a sejtmérgezésben (például kemoterápia) vagy akut sugárbetegségben elhunytak esetében (annak ellenére, hogy maga a deutérium nem bocsát ki radioaktív sugárzást, hiszen stabil). Ennek az az oka, hogy a deutérium általában meggátolja a sejtosztódást. A nehézvíz erősebb hatást fejt ki a rosszindulatú sejtekre, mint az egészségesekre, emiatt – elvileg – citosztatikumként is használható lenne, ám a terápiás használathoz szükséges dózisok túl nagyok, és ezért az egészséges sejtek pusztulása is túl erős.

Egyes sugárkezelési kísérletekben (bórbefogósos neutronterápia) is használnak

sokszorozókkal már mérni lehetett.

– 2003 szeptemberében kivonták a sót a nehézvízből, és 2004 elején 11 m hosszú láncokban ^3He töltésű proporcionális kamrákat „lógattak be”, összesen mintegy 800 m hosszúságban. Ezek igen jó hatásfokkal detektálják a termikus neutronokat. Ezzel a NaCl-os méréseket más – közvetlenebb – neutrontektálási módszerrel is megerősítették.

A NaCl-os első mérés után, 2001-ben adták ki az első tudományos közleményt arról, hogy sikerült igazolni a Nap-neutrínóknál is a neutrínó-oszcillációt (a légköri eredetű neutrínókra a japán Super-Kamiokande-detektor már valamivel korábban kimutatta ezt – Ahmad et al., 2001).

Atomenergetika • A nehézvíz nagy mennyiségben történő első felhasználója az atomenergetika volt. A maghasadás felfedezése csak néhány hónappal előzte meg a II. világháború kitörését. Ezért szinte azonnal nagy erővel indult meg az atomenergia makroszkopikus felszabadításáért folyó verseny. Hamarosan nyilvánvalóvá vált, hogy a rendelkezésre álló természetes urán nem alkalmas atomfegyver előállítására, mivel robbanásszerű önfenntartó láncreakcióra csak igen magas ^{235}U koncentráció mellett van esély. A két uránizotóp szétválasztása nem lehetetlen, de nagyon nehéz, sok energiát és időt igénylő folyamat, hiszen kémiai módszerek nem használhatók. Egy másik út, amely az atomreaktor megvalósításán keresztül vezetett, akkor egyszerűbbnek tűnt. Az atomreaktorban lévő neutronok egy része a ^{238}U -ba befogódva azt – két béta bomlás után – ^{239}Pu -má alakítja. A plutónium kémiaiilag könnyebben elválasztható az urántól, hiszen más a rendszáma, és magfizikai szempontból majdnem ugyanolyan jó bombakészítésre, mint a tiszta ^{235}U . (Később viszont kiderült, hogy bár a tiszta plutónium előállítása atomreaktorral valóban nem nagyon nehéz, de szerencsére plutóniumból sokkal nehezebb bombát készíteni).

Az akkor rendelkezésre álló természetes urán üzemanyaggal lényegében csak nehézvíz vagy szupertiszta grafit moderátorral lehetett önfenntartó láncreakcióra képes atomreaktort építeni. A németek – Walter Bothe kísérletei alapján – a grafitot nem is találták alkalmasnak, ezért a hitleri Németország atomprogramját

nehésvizet, ám itt a nehésvíz biológiai hatása nem közvetlen, hanem a terápiában használt neutronok hatékonyságát növeli azok lelassítása által (Kushner et al. 1999). A nehésvíz ugyanis az egyik legkiválóbb neutronlassító (moderátor) anyag (lásd később).

Hatása emberekre

Az emberi test víztartalma kb. 70 tömegszázalék, ezért nagy mennyiségű nehésvizet kellene bevinni a testben lévő víz felének-negyedének a lecseréléséhez. Emiatt nehésvízmérgezési baleset vagy akár szándékos mérgezés is gyakorlatilag elhanyagolható valószínűségű. A mérgezéshez sok napig kellene folyamatosan nehésvizet fogyasztani, normál (könnyű-) víz bevétele nélkül. Miután átlagosan minden 6400 hidrogénatomra jut egy deutérium, egy 50 kg-os emberben annyi deutériumatom van, mint kb. 5,5 g nehésvízben. Úgyhogy kb. ennyi tiszta nehésvíz bevétele kétszerezi meg a testben természetes körülmények között is található deutériumatomok számát. Egyes anyagcserezavarok vizsgálatánál néhány grammnyi nehésvizet itatnak betegekkel. E mennyiségnek még nincs mellékhatása. Ilyen szempontból a nehésvíz kevésbé veszélyes, mint az alkohol.

A nehésvíz előállítása

Az igen alacsony deutériumkoncentráció miatt a földi vizekben a nehésvíz csaknem kizárólag HDO-molekulák formájában van jelen. Átlagosan minden 3200. vízmolekula tartalmaz egy deutériumatomot is.

A nehésvíz bedúsítására négy fő módszert használnak. Ezek hatékonysága különbözőképpen függ a kiindulási anyag koncentrációjától, ezért általában kombinálják a módszereket.

Víz elektrolízise • Lúgos közegben (NaOH jelenlétében) a könnyűhidrogén-ionok valamivel hamarabb leválnak elektrolíziskor, mint a deutériumionok, ezért megfelelő paraméterek beállításával a könnyűvíz elbontható, és a nehésvíz ott marad. Természetes vizekből ilyen módon nehésvizet előállítani csak több fokozatban lehet. Energiaigényessége miatt ezt a módszert ma már inkább csak egyéb módszerekkel kombinálva, a dúsítás végső lépéseiben – amikor

kizárólag a nehésvízre alapozták.

A moderátor azáltal segíti a láncreakciót, hogy a neutronokat termikus energiára lassítja le, a lassú neutronok pedig sokkal nagyobb valószínűséggel – a sebességükkel fordított arányban álló hatáskeresztmetszettel – hoznak létre maghasadást. Azt, hogy egy anyag milyen „jó” moderátor, lényegében három paraméter szabja meg:

- A rugalmas neutronszórás hatáskeresztmetszete (Σ_{es});
- Az átlagos logaritmusos energiaveszteség (ζ), amely az egy ütközésben átlagosan átadott energiahányaddal arányos;
- A neutronelnyelés hatáskeresztmetszete (Σ_a).

Egy moderátoranyag annál jobb, minél nagyobb az első két paraméter, és minél kisebb a harmadik. A moderátor „jóságát” ezért legjobban a

$$\gamma = \frac{\zeta \cdot \Sigma_{es}}{\Sigma_a}$$

dimenzió nélküli szám fejezi ki. Az alábbi összehasonlítás néhány moderátoranyagra mutatja ezeket az értékeket.

anyag	γ
nehésvíz (D ₂ O)	7760
grafit (C)	234
könnyűvíz (H ₂ O)	149
berillium (⁹ Be)	146

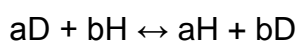
Látható, hogy a nehésvíz sokkal jobb moderátor bármely más anyagnál. Nehésvíz moderátorral több kísérleti atomreaktor működött, és működik jelenleg is a világon. Villamos energia termelésére szolgáló, nagy teljesítményű, nehésvízzel és természetes urán üzemanyaggal üzemelő atomreaktorokat Kanada fejlesztett ki. A típus neve: CANDU (CANada Deuterium Uranium). Közeliünkben Romániában (Cernavodă) üzemelnek ilyen atomerőművi blokkok.

A nehésvízzel moderált rendszerek plutónium-előállítás szempontjából is különösen kedvezőek. Az ún. konverziós faktor, amely azt mutatja, hogy a reaktorban egységnyi elhasznált hasadóanyaggal mennyi „új” hasadóanyagot (pl. plutóniumot) lehet előállítani, a nehésvizes

már csak kevés könnyűvizet kell eltávolítani – használják. Az első nehésvízgyártó üzem – a norvégiai Norsk Hydro – azonban így állított elő nehésvizet 1936-tól kezdve.

Folyékony hidrogén vagy víz desztillálása • Természetes vizekből vákuumdesztillációval közvetlenül is előállítható nehésvíz, ám ipari méretekben jobb hatásfokú termelés érhető el, ha először hidrogéngázt dúsítunk fel deutériumban. A frakcionált desztillációhoz felhasználható akár az, hogy a nehésvíz forráspontja magasabb (101,4 °C), mint a könnyűvize (100 °C), akár az, hogy a folyékony deutérium forráspontja magasabb (-249,7 °C), mint a folyékony hidrogéné (-252,5 °C). A cseppfolyós hidrogén desztillálása valamivel jobb hatásfokú, ott azonban a folyékony hidrogén kezelése jelent technológiai kihívást. Nagy mennyiségű nehésvíz előállításának utolsó lépcsői általában frakcionált desztillációval történnek. A természetes vízben található igen kis mennyiségű nehésvíz, valamint a víz magas forráshője a közvetlen frakcionált desztillációt nagyon energiaigényessé teszi, mivel a víz legnagyobb részét el kell forralni ahhoz, hogy a nehésvíz bedúsuljon. Ezért a szétválasztás kezdeti lépéseiben más – kevésbé energiaigényes – kémiai folyamatokat szoktak használni.

A következő két módszer izotópcserén alapul, ezért célszerű előbb egy általános ismertetés erről. Legyen aH és bH két különböző, hidrogéntartalmú vegyület (a „H” betű jelzi a hidrogént). Mindkét vegyületben a H-atomok valamekkora hányada nehézhidrogén (deutérium, D). Tekintsük a következő izotópcseré-folyamatot:



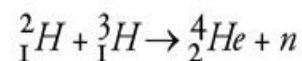
Erre vonatkozóan a „dúsítási paraméter”, azaz a két hidrogéntartalmú reagensben lévő deutériumatomok hányadainak aránya a következő:

$$f_{a \rightarrow b} = \frac{(D/H)_b}{(D/H)_a}$$

A termodinamikai egyensúly beállta után az egyensúlyi dúsítási paraméter azt fejezi ki, hogy a deutériumatomok mennyire vándoroltak át az „a” vegyületből a „b” vegyületbe. Nyilvánvaló, hogy ha

reaktoroknál sokkal magasabb, mint a könnyűvízzel moderált reaktoroknál. Ezért – megfelelő reaktorkonstrukció és üzemeltetési paraméterek mellett – a nehésvizes reaktorokat jó hatásfokkal lehet plutóniumtermelésre is használni. A nemzetközi közvélemény ezért kíséri megkülönböztetett figyelemmel és aggodalommal a politikailag instabil régiókban és országokban (Észak-Korea, Irán) épülő, illetve üzemelő, nehésvízzel működő kísérleti vagy energiatermelő reaktorokat.

Fúzió • A nehésvíz kapcsán nem maradhat említés nélkül a jövő egyik ígérete, a fúzió. A jelenlegi elképzelések szerint a jövő fúziós erőműveiben a



folyamat fogja termelni az energiát. A reakcióhoz szükséges tríciumot (a hidrogén 3-as tömegszámú izotópja) lítiumból neutronokkal lehet majd előállítani, de a deutériumot természetesen nehésvízből nyerik. A nehésvíz tehát a maghasadáson alapuló energiatermelés mellett a fúziós energiatermelésben is központi szerephez jut.

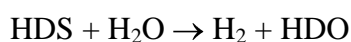
Kulcsszavak: *nehésvíz, eredete, felfedezése, biológiai hatása, alkalmazásai, deutérium kozmikus eredete, atomenergetika, SNO-neutrínódetektor*

IRODALOM

- Ahmad, Q. Rushdy et al (2001): Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by 8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory. *Physical Review Letters*. 87, 071301 DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.071301
- Aston, Francis W. (1935): Masses of some Light Atoms determined by a New Method. *Nature* 135, 3414, 541.
- Birge, Raymond Thayer – Menzel, Donald H. (1931): The Relative Abundance of the Oxygen Isotopes, and the Basis of the Atomic Weight System. *Physical Review*. 37, 1669–1671. DOI:10.1103/PhysRev.37.1669.2
- Epstein, Richard I. – Lattimer, J. M. – Schramm, D. N. (1976): The Origin of Deuterium. *Nature* 263, No. 5574, 198–202. • **WEBCÍM** >
- Katz, Joseph J. (2008): Chemical and Biological Studies with

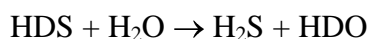
$f > 1$, akkor a „b” vegyület dúsul be deutériumban, $f < 1$ esetén pedig az „a” vegyület. Az egyensúlyi dúsítási paraméter általában függ a hőmérséklettől is (Richet et al., 1977). Ezek után tekintsük át a további két nehézvíz dúsítási módszert.

A Trail-módszer • hidrogéngáz és folyékony víz közötti – nikkelkatalizátorral elősegített – izotópcserén alapul. Nevét onnan kapta, hogy az eljárást először a Trailben (Brit Columbia, Kanada) épült nehézvízgyártó üzemben alkalmazták. Az izotópcsere-reakció:



Itt az egyensúlyi dúsítási paraméter akár a 3–4-es értéket is elérheti, azaz izotópegyensúlyban a víz fázis 3–4-szer olyan koncentrációban tartalmaz deutériumot, mint a gáz fázis. A Trail-módszert sok lépcsőben kell alkalmazni ahhoz, hogy megfelelően dúsított nehésvizet kapjunk. Az egyes lépcsőfokokat magas tornyokba építették. A Trail-eljárással dúsított nehésvizet még vagy frakcionált desztillációval, vagy elektrolízissel kell végleges tisztaságúra alakítani.

A GS-eljárás • 1940-es felfedezése Karl-Hermann Geib és Jerome S. Spevack nevéhez fűződik. Ezt gyakran Girdler-Sulfid (ugyancsak GS) eljárásnak is nevezik, mivel ezt az eljárást használta a Girdler cég, az első nehézvíz dúsító építetője az Egyesült Államokban. Ebben az eljárásban a két hidrogéntartalmú molekula a kénhidrogén (H_2S) és a víz (H_2O). Az izotópcsere-reakció:



- Deuterium. 39th Annual Priestly Lecture. Pennsylvania State University, Univ. Park, PA. 1–110.
- Kushner, D. J. – Baker, A. – Dunstall, T. G. (1999): Pharmacological Uses and Perspectives of Heavy Water and Deuterated Compounds. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*. 77 (2): 79–88. DOI: 10.1139/y99-005
- Lamb, Arthur Becket – Lee, Richard Edwin (1913): The Densities of Certain Dilute Aqueous Solutions by a New and Precise Method. *Journal of the American Chemical Society*. 35, 1666–1693. DOI: 10.1021/ja02200a003
- Lewis, Gilbert N. (1933): The Isotope of Hydrogen. *Journal of the American Chemical Society*. 55, 3, 1297–1298. DOI: 10.1021/ja01330a511 • [WEBCÍM >](#) • [WEBCÍM >](#)
- Lewis, Gilbert N. – MacDonald, Ronald T. (1933): Concentration of H_2 Isotope. *The Journal of Chemical Physics*. 1, 341. doi:10.1063/1.1749300
- Pittendrigh, Colin S. – Caldarola, P. C. – Cosbey, E. S. (1973): A Differential Effect of Heavy Water on Temperature-dependent and Temperature-Compensated Aspects of Circadian System of *Drosophila pseudoobscura*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 70, 7, 2037–2041. • [WEBCÍM >](#)
- Richet, Pascal – Bottinga, Y. – Javoy, M. (1977): A review of hydrogen, carbon, nitrogen oxygen, sulphur, and chlorine stable isotope fractionation among gaseous molecules. *Annual Reviews Earth and Planetary Sciences*. 5, 65–110. DOI: 10.1146/annurev.ea.05.050177.000433
- Shchepinov, Mikhail S. (2007): Reactive Oxygen Species, Isotope Effect, Essential Nutrients, and Enhanced Longevity. *Rejuvenation Research* 10, 1, 47–60. doi:10.1089/rej.2006.0506
- Urey, Harold C. – Brickwedde, F. G. – Murphy, G. M. (1932): A Hydrogen Isotope of Mass 2. *Physical Review* 39, 164–165. • [WEBCÍM >](#)
- Washburn, Edward W. – Urey, Harold C. (1932): Concentration of the H_2 Isotope of Hydrogen by the Fractional Electrolysis of Water*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 18, 7, 490–496. • [WEBCÍM >](#)

[URL1](#)

