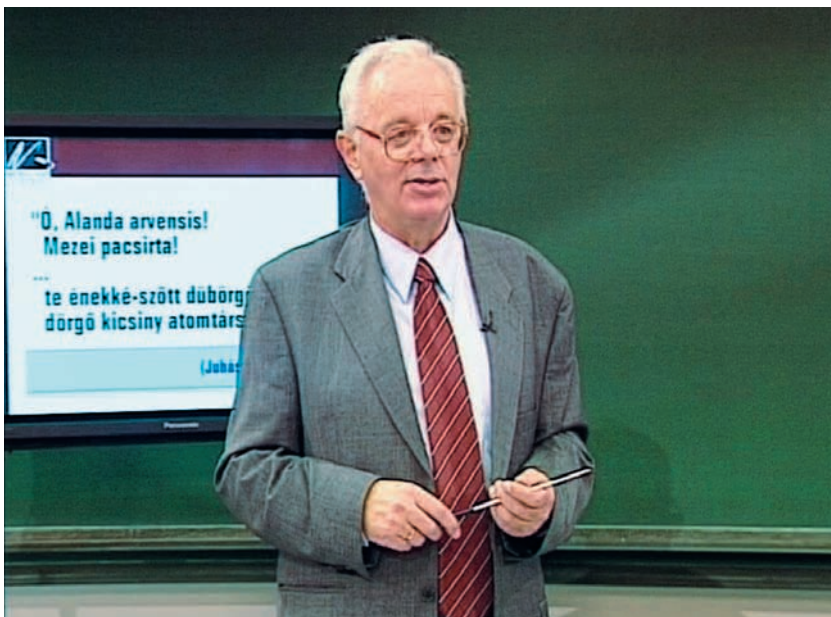


JÉKI LÁSZLÓ

Sugárözönben élünk



*Jéki László
fizikus
az MTA KFKI RMKI tudományos
főmunkatársa*

1942-ben született. 1965-ben végzett az ELTE Természettudományi Karának fizikus szakán. 1975-től a fizikai tudományok kandidátusa.

Pályáját az MTA Központi Fizikai Kutatóintézetében (KFKI) kezdte, kísérleti magfizikával foglalkozott. 1975–1980 között a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet tudományos igazgatóhelyettese, 1980–1986 között a Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetségének (MTESZ) főtítkárhelyettese. 1986-tól ismét a KFKI RMKI főmunkatársa.

Főbb kutatási területe: tudománytörténet, tudományos ismeretterjesztés. Harminc év alatt több mint 1800 tudományos ismeretterjesztő munkája jelent meg napilapokban, folyóiratokban, illetve rádió- és tévé-műsorokban.

A radioaktivitással kapcsolatos ismereteink még csak száz éve gyűlnek, ezért hajlamosak vagyunk azt gondolni, hogy a radioaktivitás valami modern találmány, emberi csinálmány. Gondolatainkban a radioaktivitás szó mellé joggal társul az atom szó. Sokakban viszont irracionális félelem él mindennel kapcsolatban, ami „atom”, legyen az atomerőmű vagy orvosi vizsgálat. Az előadásban megmutatjuk, hogy a radioaktivitás a természet része, radioaktivitás nélkül nem lenne lakható a Föld. Mi, emberek, a többi élőlényhez hasonlóan mindig együtt éltünk a sugárzásokkal. Az utóbbi száz évben pedig rengeteg fontos és hasznos alkalmazást dolgoztunk ki, ezek mára nélkülözhetetlenekké váltak. Ugyanakkor sajnos megszülettek a pusztítás eszközei is.

A radioaktív sugárzások forrásai: az atomok

A radioaktivitás keresztanyja Marie Curie-Skłodowska volt. A Lengyelországból Párizsba áttelepült kémikus a 19. század legutolsó éveiben az uránium A. H. Becquerel által felfedezett sugárzását tanulmányozta, majd azt



Curie-Skłodowska, Marie
(1867–1934)

Radioaktivitás:

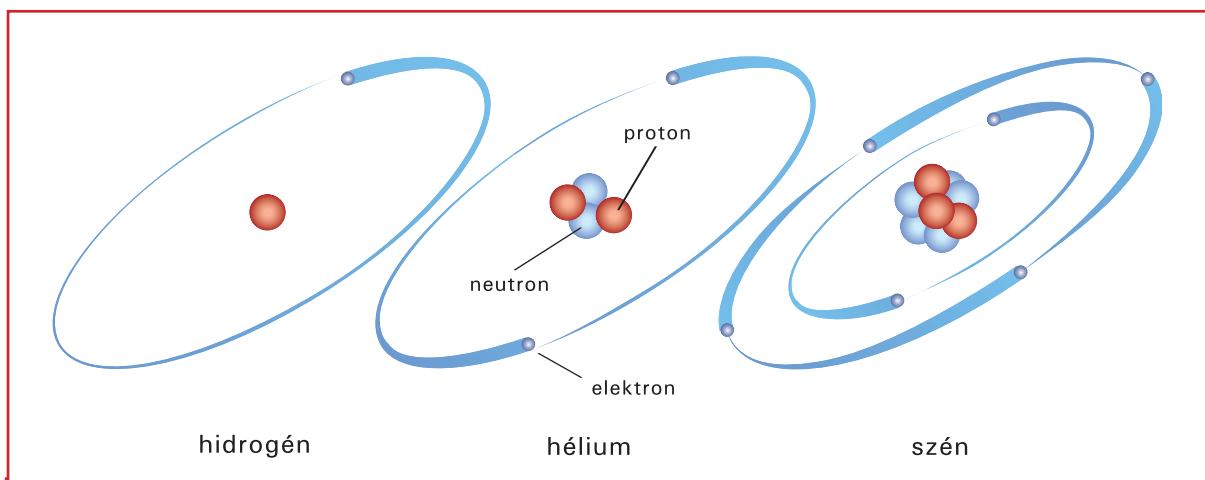
egy-
es atommagoknak az a tulajdonsága, hogy sugárzás (pontosabban egy-két „ionizáló sugárreszecske”) kibocsátása mellett elbomlanak, más atommaggá alakulnak. Egy adott kémiai elem (kálium, vas stb.) atommagjai általában stabil, illetve radioaktív változatban is léteznek a Földön.

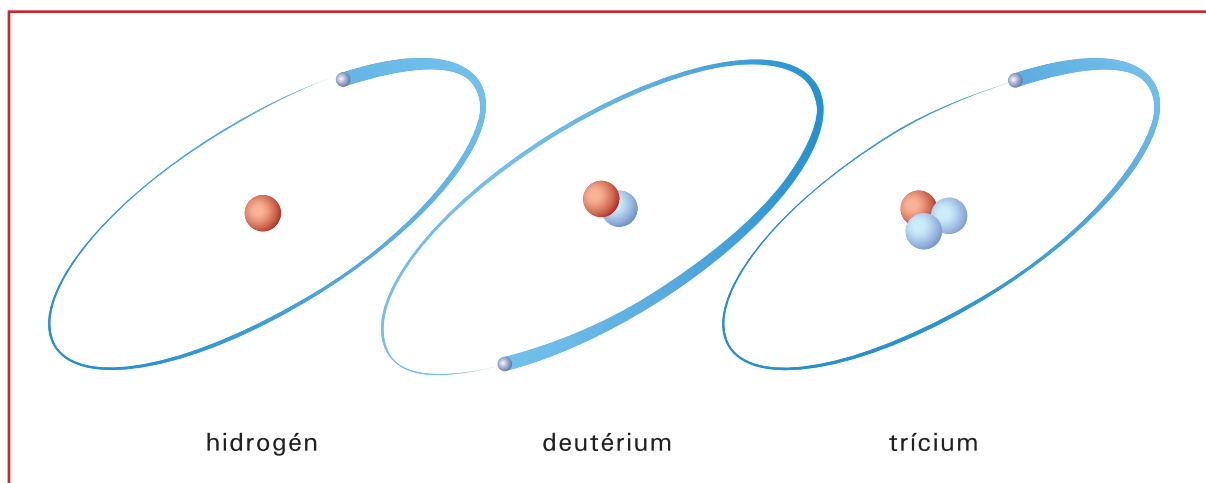
találta, hogy egy másik nehéz elem, a tórium vegyületei is az uránhoz hasonlóan spontán sugárzást bocsátanak ki. A sugárzás tehát nem az urán egyedi tulajdonsága, hanem általános jelenség, ezért külön nevet érdemel. Így született meg a **radioaktivitás** elnevezés. Maga a szó a latin „sugár” és „tevékenység” összetételéből ered, sugárzóképeséget jelent.

A továbbiak megértéséhez röviden felidézzük az atomokról tanultakat. Az atomok egy központi, nehéz magból és egy laza héjból, **elektronfelhőből** állnak. Az atommag mindössze kétféle alkotórészből épül fel, pozitív töltésű **protonokból** és töltés nélküli, semleges **neutronokból**. Az egyes elemek a protonok számában különböznek egymástól. Adott számú proton mellett különböző számú neutron lehet, például a szén hat protonja mellett az atommagban lehet hat vagy hét neutron, mindkét atom szén és mindkettő stabil. Ha hétnél több vagy hatnál kevesebb neutron van a szén atommag hat protonja mellett, akkor is szenet kapunk, de ezek az atommagok már nem stabilak, hanem elbomlanak. Bomlásuk átalakulás: valamilyen sugárzás kibocsátásával egy vagy több lépésben stabil elemmé alakulnak át. Egy adott elem különböző neutronsámú változatait nevezzük izotópoknak. Az **izotópok** egy része stabil, a többi pedig instabil, vagyis radioaktív, addig bomlik, míg stabilá nem tud alakulni.

A hagyományos, elsőnek megismert radioaktív sugárzásokat a görög ábécé első betűivel nevezték el. A pozitív töltésű **alfa-sugárzás** valójában héliumatommag, két proton és két neutron együttese. Útja mentén igen erősen **ionizál**, ezért áthatolóképessége igen kicsi, még egy papírlapon vagy bőrünkön sem képes áthatolni. A **béta-sugárzás** negatív elektronokból (vagy az elektronok pozitív antirészecskéiből, pozitronokból) áll. Az alfa-sugárzásnál kevésbé ionizálóképese, áthatolóképessége nagyobb. A **gamma-sugárzás** áthatolóképessége a legnagyobb, nagy energiájú elektromágneses sugárzás. Ma radioaktív sugárzásnak nevezzük azokat az atommagfolyamatokat is, melyek során más részecskék, például protonok vagy neutronok lépnek ki. A **röntgensugárzás** a gamma-sugárzásnál lágyabb elektromágneses sugárzás, hatásai hasonlóak. A röntgensugárzás azonban nem atommagfolyamatokban, hanem az elektronhéj átrendeződése során keletkezik, ezért nem sorolják a mag-sugárzások közé.

A kémiai elemek felépítése





A sugárzások „titokzatosságát” növeli, hogy egyetlen érzékszervünkkel sem szerezhethünk közvetlen benyomást róluk. A sugárzásokat nem lehet látni, nem lehet hallani, nem lehet érezni, szagolni, ízlelni, tapintani, viszont szerencsére úgy lépnek kölcsönhatásba a különböző anyagokkal, hogy ezt megfelelően konstruált műszerekkel nyomon lehet követni. A mérések többnyire azon alapulnak, hogy az anyagba bejutott radioaktív sugárzás útja mentén ionizál, vagyis megfosztja elektronjaitól, tehát elektromosan töltötté teszi az atomokat, molekulákat. Műszereinkkel meg tudjuk mérni a részecskék darabszámát, vagyis a sugárzás mennyiségét, és mérhető a részecskék energiája is. A kibocsátott sugárzás fajtája, annak energiája jellemző az adott izotópra, ezért az ismeretlen eredetű sugárzás elemzéséből vissza lehet következtetni a kibocsátó izotópra. Ezen alapulnak az anyagok összetételét felderítő analitikai módszerek.

A sugárzást kibocsátó izotóp még egy fontos számszerű jellemzővel rendelkezik, ez a **felezési idő**. Ez az az idő, amely alatt egy adott anyagmennyiség fele elbomlik. A felezési idő befolyásolhatatlan, megváltoztathatatlan anyagi jellemző, értéke igen széles határok között változhat.

Látogatás forró tájakon, a Nap és a Föld belsejében

Az elemek a csillagokban keletkeznek. Napunk és a többi csillag nagyrészt a legkönnyebb elemből, hidrogénből áll. A Nap rendkívüli hőmérséklet- és nyomásviszonyai között a hidrogénatommagok összeolvadnak egymással, héliumatommag jön létre. A folyamat energiafelszabadulással jár, ebből az energiából születik az a fény is, amely nélkül nem lenne élet a Földön. A héliumatommagok is reakcióba lépnek egymással, és egymást követő magreakciókban, egymást követő átalakulások során, milliárd évek alatt megszületik valamennyi könnyű elem, a vassal bezárólag. A vasnál nehezebbek születése más módon megy végbe. A megöregedett

Hidrogén-izotópok

Elektron:

a protonnál és a neutronnál mintegy kétezerszer könnyebb, negatív villamos töltésű részecske. Normál állapotban az atommagban nincs elektron, csak a béta-bomlás folyamatában keletkezik, de azonnal „ki is száguld” a magból (sok ilyen „kiszáguldó” elektron nyalábja a béta-sugárzás).

Proton:

stabil elemi részecske, az atommag egyik alkotórésze. Elektromos töltése + $1,602\ 19\times 10^{-19}$ coulomb (másképpen: 0,000000000000000000001602 coulomb), és nyugalmi tömege $1,672\ 65\times 10^{-24}$ g („hétköznapi” írásmóddal: 0,00000000000000000000000001672 gramm). Ha valaki gyakran nézné e számokat, meg kell mondanunk, hogy értékük nagyobb pontossággal ismert, mint a hatóanyag mennyisége egy átlagos gyógyszer-tablettában!

**Neutron:**

a protonnal közel megegyező (durván egy ezrelékkel nagyobb) tömegű, villamos töltéssel nem rendelkező részecske, az atommagnak a proton mellett másik alkotórésze.

Izotópok:

egy adott kémiai elem (ez egyértelműen meghatározza a protonok számát), amely csak az atommagban lévő neutronok számában (és ezáltal tömegében) különbözik. Egy elem természetes előfordulásban általában izotópjainak keverékéből áll.

Alfa-sugárzás:

igen rövid hatótávolságú (levegőben néhány centiméterig eljutó), erősen ionizáló sugárzás. Tulajdonképp nagy sebességgel repülő héliumatommagok áramma.

Ion:

ha az alapállapotban elektromosan semleges atomok elektronjaikból egyet vagy többet elveszítene (illetve többlet-elektront „csípnék fel”), pozitív (illetve negatív) ion áll elő. Az ehhez vezető (pl. ütközési) folyamat az ionizáció.

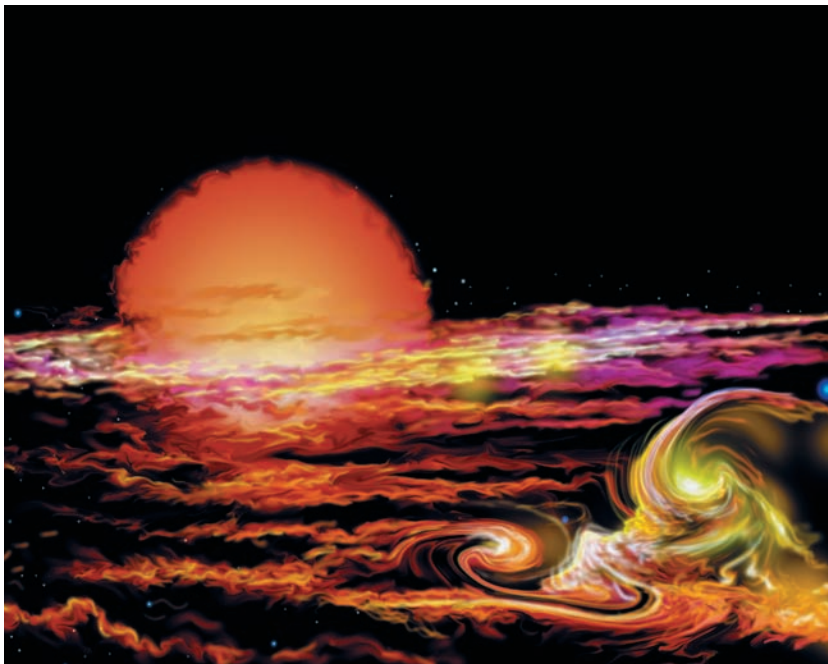
Béta-sugárzás:

elég rövid (de az alfa-sugárzásénál nagyobb) hatótávolságú sugárzás, nagy sebességgel repülő elektronokból áll. A magok béta-bomlásának eredménye.

nagy tömegű csillagok a másodperc tört része alatt egyszer csak összeomlanak, a protonok nagy része neutronná alakul át, és a korábban kialakult elemek befogják ezeket a neutronokat. Egymást követő lépésekben létrejönnek a nehéz elemek. Az összeroppant csillag végül anyagának nagy részét szétszórja, ez a szupernóva-robbanás. Az elemeket létrehozó magfizikai folyamatokban stabil és sugárzó izotópok egyaránt keletkeznek. A csillagközi térben tehát megjelenik valamennyi elem az összes izotópjával.

A kavargó anyagból, a csillagközi gáz- és porfelhőből valamikor 4,6 milliárd évvel ezelőtt alakult ki a Naprendszer, ekkor született a Föld. Nagyon durva leegyszerűsítéssel a nagyjából gömb alakú Föld egy túlnyomóan folyékony vasból álló sűrű belső magból, egy oxigént és ként tartalmazó külső magból és szilárd halmazállapotú héjból épül fel. Ennek a szilárd héjnak a felszínén élünk. A Föld középpontja felé haladva gyorsan emelkedik a hőmérséklet, általában 33 méterenként 1 °C-ot, belül a hőmérséklet elérheti a 6000 °C-ot. Magyarországon – a Pannon-medence kivétel – gyorsabban, már 20 méterenként emelkedik a hőmérséklet 1 °C-ot. A belső hő forrása a radioaktivitás, a Föld magjában ugyanis többféle igen hosszú felezési idejű izotóp, elsősorban urán, tórium és kálium is található. Ezek bomlásából származik az a hőenergia, amely olvadt állapotban tartja a belső magot és ez a hőenergia tör időnként vulkánkitörés formájában a felszínre. Ez a geotermikus energia jelenik meg a hőforrásokban is, a gyógyfürdők kellemesen meleg vize a radioaktivitásnak köszönhető. A Pannon-medence alatt az átlagosnál vékonyabb a kéreg, ezért dúskálunk mi a hőforrásokban.

A Föld olvadt belsejének, a benne áramló vasnak köszönhetjük, hogy a Föld maga egy óriási mágnes. Úgy viselkedik, mintha egy hatalmas rúd-mágnes rejtőzne a belsejében. Ez a mágneses tér pajzsként véd minket a



Az ősi gázfelhő (rajzolt ábra)



A Föld belseje

Napból és az Univerzum távolabbi tájairól, más csillagokból érkező sugárzások ellen. A mágneses tér eltéríti a töltött részecskéket, megváltoztatja a pályájukat. A mágneses pajzs nem véd meg az összes sugárzástól, de nagy részétől igen.

Sugárzások a magasból

Sugárözönben, részecskék áramában élünk. A Napból a benne zajló különböző fizikai folyamatok eredményeképp állandóan protonok, elektronok, alfa-részecskék, nehezebb atommagok, gamma-sugarak lépnek ki, ez a részecskeáram a napszél. A többi csillagból, kívülről is bejut némi sugárzás a Naprendszerbe.

A Nap működése nem egyenletes, nemcsak állandó békés sugárzásra képes, gyors változások is zajlanak a mélyben és a felszínen. A Nap viharai, a koronából való anyagkilövellések, a napszél gyors áramlásai ún. űrviharokat keltenek. Az űrviharok jelentős károkat okozhatnak: károsítják az űreszközöket, megzavarják a földi villamos távvezetéseket, távközlési hálózatokat, a műholdak és a Föld közötti kapcsolattartást. Az utóbbi években a műholdak által gyűjtött adatok alapján már rendszeres, napi űridőjárás-előrejelzéseket adnak ki, így a műholdas szolgáltatók felkészülhetnek a viharokra: átmenetileg kikapcsolják a műholdakat vagy elforgatják őket, hogy a kényesebb részek „háttal” legyenek a napszélnek.

Gamma-sugárzás:

elektromágneses sugárzás, mint a fény vagy a hősugárzás is, de azoknál sokkal „keményebb”, rövidebb hullámhosszú. Míg a látható fény vagy a röntgensugárzás az atom elektronhéjában lejátszódó folyamatok eredménye, a gamma-sugárzás az atommagban bekövetkező, ezért nagyobb energiájú folyamatokból származik. A gamma-sugár kibocsátása egy nuklid gerjesztett állapotból alacsonyabb energiaállapotba kerülésének eredménye. A gamma-bomlás tehát minőségi magátalakulással nem jár. (Nem keletkezik másfajta nuklid. Az alfa-bomlás vagy a béta-bomlás eredményeként keletkezett atommag a kiindulási magtól különböző lesz.)

Röntgensugárzás:

olyan áthatoló elektromágneses sugárzás, amely nehéz atomok elektronhéjának belső rétegeiben zajló folyamatokból származik és sokkal rövidebb hullámhosszú (azaz nagyobb energiájú), mint a látható fény, amely az elektronhéj legkülső rétegeiben lezajló folyamatok terméke.

**Felezési idő:**

az az idő, amely alatt egy radioaktív izotóp mennyisége és így aktivitása is felére csökken a radioaktív bomlási folyamat következtében. Ez egy meghatározott radioaktív izotópra (adott nuklidfajta) természetes állandó, például a rádium esetében 1620 év. A különböző radioaktív izotópok felezési ideje a másodperc igen kis tört részétől milliárd évekig terjedhet.

Sugárterhelés:

amikor az ionizáló sugárzás kölcsönhatásba lép az emberi testtel, akkor átadja energiáját a szöveteknek. A szervezetet ért sugárzás dózisát nevezzük sugárterhelésnek, melynek mértékegysége a gray (Gy).

Dózis:

az elszennvedett sugárzás-mennyiség mértéke.

Effektív dózis:

a sugárzás mennyiségének olyan egysége, amely a fizikai sugármennyiségen túl annak biológiai veszélyességét is figyelembe veszi. Egysége a mSv (millisievert). Használatos még ennek milliomodrészze, a nSv (nanosievert) is.

Természetes háttérsugárzás:

a természetben mindenütt jelen lévő, emberi tevékenységtől független ionizáló sugárzás.

Az óriási űrállomással nem lehet ilyen manővereket végezni: a **sugárterhelés** a hosszú idejű űrutazások egyik legkomolyabb kockázati tényezője békés időben, napviharok nélkül is. Alacsony Föld körüli pályán keringő űreszközök belsejében a sugárzási szint eléri a földfelszíni érték 50–100-szorosát, napkitörések idején pedig ennél is sokkal nagyobb lehet. Különösen nagy a kockázat, ha az űrhajós az állomás védelmet nyújtó falain kívül dolgozik. Az űrhajós egészségének védelméhez, további – űrhajón kívüli – foglalkoztatása kockázatának a megítéléséhez pontosan tudni kell, hogy mennyi sugárzás érte. Erre szolgál a KFKI Atomenergia Kutatóintézetben megalkotott Pille doziméter.

A Pille nagy újdonsága azonnali kiértékelhetősége volt már az első bevetésénél 1980-ban, Farkas Bertalan űrrepülése során. Ma is a könnyű kezelhetőség és az azonnali eredmény a műszer sikerének és népszerűségének titka. A műszer sikeresen használta 1984-ben az amerikai űrrepülőgép fedélzetén Sally Ride, az első amerikai űrhajósnő. A Pillét tartósan használták több szovjet űrállomáson, köztük a Miren. 1987 júniusában, az űrkutatás történetében először, a Pillével mérték meg azt a **dózist**, amit egy űrhajós űrsétája alatt kapott. A folyamatosan továbbfejlesztett műszer példányai ma a Nemzetközi Űrállomás fontos eszközei. A Pille első űrváltozatát Fehér István, Csőke Antal, Deme Sándor, Szabó Béla, Szabó Péter Pál és Vágvölgyi Jenő dolgozta ki, a későbbi változatok megalkotása, a folyamatos modernizálás Apáthy István, Bodnár László, Csőke Antal, Deme Sándor és Fehér István nevéhez fűződik.

Az űrhajósok világából lejjebb ereszkedve nézzük meg, mi történik a sugárzásokkal a légkörben. A részecskék kölcsönhatásba kerülnek a légkörrel, a légkör atomjaival, emiatt számuk egyre csökken a felszín felé közeledve. A felszínen bennünket érő sugárterhelés függ a felettünk levő légkör vastagsától: minél feljebb járunk, annál nagyobb. Mértéke kb. 1800 méterenként duplázódik meg. A sugárterhelés magas hegyeken tehát nagyobb, mint a tenger szintjén, és a nagy magasságban való repülés során is megnő. A növekedés természetesen kicsi, egyetlen, 10 km magasságban tett transzkontinentális repülőút alig több mint egy ezrelékkel növeli meg a **természetes háttérsugárzás** évi adagját.

A Napból érkező részecskesugárzás intenzitása széles határok közt változhat. Erőssége függ a földrajzi helytől is, a mágneses tér szerkezete miatt a sarkoknál jóval több részecske jut be a légkörbe. Ennek köszönhetjük a sarki fény, nálunk északi fény néven ismert csodálatos jelenséget.

Sugárzások a mélyből és bensőnkől

A Föld magját fűtő hosszú felezési idejű urán-, tórium- és káliumizotópok nemcsak a mélyben, hanem a földkéregben is előfordulnak. Az urán bomlási sorában gáz-halmazállapotú radonizotóp is keletkezik, ez a mélyből a felszínre áramlik. Az építőanyagok is tartalmaznak több-kevesebb

Forrás	Külső	Belső
Kozmikus sugárzás	380	
Légköri szén-14		12
Kálium-40	130	170
Urán-238–rádium–radon	140	1208
Ólom-210		50
Tórium-232	190	80
Összesen	840	1520

1. táblázat. A természetes eredetű sugárterhelés forrásai (éves dózis mikrosievertben)

uránt. A radonnak köszönhető sugárdózis annál nagyobb, minél többet tartózkodunk nem vagy rosszul szellőztetett földszinti helyiségekben. A védekezés egyszerű: alaposan és rendszeresen szellőztetni kell. Természetes eredetű sugárterhelésünk kb. kétharmada a belélegzett **radioaktív anyagok**, elsősorban a radon számlájára írható. Hazánk lakosságának természetes sugárterhelése mintegy 20 százalékkal nagyobb a világátlagnál, mert a trópusokon élőkhöz képest viszonylag sok időt töltünk épületekben.

A talajban levő természetes radioaktív anyagok bekerülnek a táplálékláncba, az elfogyasztott növényi és állati eredetű élelmiszerek révén szervezetünkbe. A belélegzett és az elfogyasztott sugárzó izotópoknak köszönhetően válunk mindannyian sugárzóvá, radioaktívvá. Szervezetünkben óránként közel 16 millió sugárzó atom bomlik el!

A természetes forrásokból eredő terhelés összetevői: kozmikus sugárzás 0,3 mSv, földkéregből külső 0,5 mSv, földkéregből belső 1,6 mSv, azaz összesen 2,4 mSv sugárzás évente (mSv – millisievert; a Sv a sugárzási dózisegységet, az élő szervezetet érő sugárzás mértékegysége az SI-rendszerben).

A természetes forrásokból eredő sugárterheléshez adódnak hozzá a mesterséges források járuléka. A mesterséges források között vannak olyanok, amelyek korábbi műveletek, események következményei, ezekkel a továbbiakban is kényszerűen együtt kell élnünk a sugárzó izotópok lebomlásáig. Közülük a legnagyobb hatást ma is a korábbi felszíni és légköri atomfegyver-kísérletek gyakorolják, a fegyverkísérletek során elsősorban szén-14, cézium-137, stroncium-90 és cirkónium-95 izotópok szóródtak szét. Ebbe a kategóriába tartoznak az atomipari balesetek tartós járuléka is.

1986. április 26-án hajnalban gőzrobbanás, majd gázrobbanás történt Ukrajnában, a csernobili atomerőműben. Az atomenergia-ipar máig legnagyobb balesetéhez több műszaki és emberi hiba, hiányosság együttese vezetett el. A csernobili balesetben a szabadba került és szétszóródott radioaktivitás kb. huszadrésze annak a mennyiségnek, ami a légköri atomfegyver-kísérletek betiltásáig a nagyhatalmak fegyverkísérletei során került a levegőbe. A csernobili baleset Magyarországon két-három havi természetes eredetű sugárzásnak megfelelő többletterhelést okozott.

Radioaktív anyagok:

a bomlásképes atommagokat tartalmazó, ezért folyamatosan sugárzást kibocsátó anyagok. Ezek lehetnek természetes vagy mesterségesen előállított radioaktív anyagok. Fogyásukat és így intenzitásuk csökkenését a felezési idő jellemzi.



A Curie házaspár Nobel-díja



Fermi, Enrico (1901–1938)

Modern alkímisták: átalakítjuk az elemeket

Frédéric Joliot és Irène Joliot-Curie 1934-ben alfa-sugarakkal bombáztott alumínium-atommagokat, és a reakció eredményeként radioaktív foszfor-atommagot kaptak. (A foszfor pozitronkibocsátással stabil szilíciummá alakul át.) Felfedezték a mesterséges radioaktivitást, a sugárzó, bomló atomok létrehozásának lehetőségét. Minden elemnek előállítható több sugárzó izotópja. Ezek az emberkéz alkotta izotópok a természetben is létrejöttek, de rövid felezési idejük miatt már régen elbomlottak. A Curie házaspár alfa-, proton-, deutron- és neutron-besugárással sokféle radioaktív izotópot állított elő.

Újabb nagy előrelépést jelentett Enrico Fermi felismerése: az atommagok legszívesebben kisenergiájú, **lassú neutron**okat fognak be. Sorra besugározták neutronokkal a különböző elemek atommagjait, ezek a kísérletek vezettek el az atom**maghasadás** felfedezéséig. Megnyílt az út az atomreaktor és az atombomba létrehozása felé, de ez már egy másik történet.

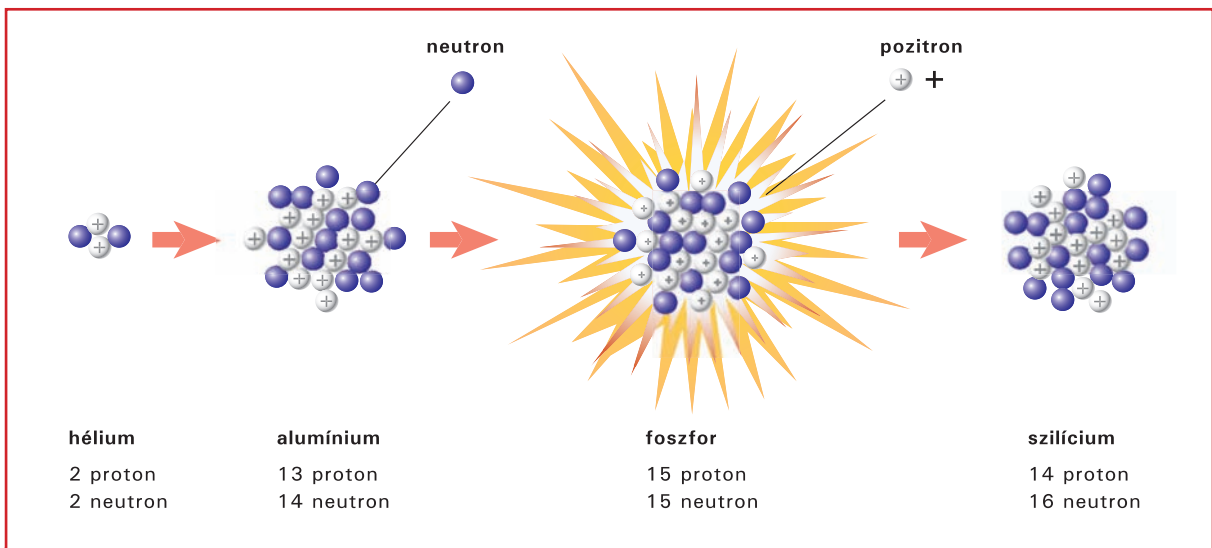
Hevesy György dolgozta ki a radioaktív izotópok nyomjelzőként való alkalmazásának technikáját. A vizsgálandó nem radioaktív elemhez kis mennyiségű radioaktív elemet kevert. A sugárzó és a nem sugárzó izotóp kémiaiilag azonos módon viselkedik, azonos módon vándorol, tehát a sugárzás mérésével nyomon követhetők a változások. Első kísérleteiben természetes radioaktív ólomizotóppal dolgozott. A mesterséges radioaktivitás felfedezését követően nagymértékben kibővültek a nyomjelzéses módszer lehetőségei. Hevesy 1923-ban növényekben, 1934-től állatokban lejátszódó biológiai folyamatokat vizsgált. Többek között az élőlények vízfelvételét, a foszfor- és a vasanyagcserét tanulmányozta.

A Curie házaspár 1935-ben kémiai, Enrico Fermi 1938-ban fizikai, Hevesy György 1943-ban kémiai Nobel-díjat kapott.

Maghasadás:

a nehéz mag szétválása két olyan részre, amelyeknek közel azonos a tömege. E folyamat általában neutronsugárással, gamma-sugárással, ritkábban töltött magtöredék kibocsátásával jár együtt. A maghasadást rendszerint a magba behatoló neutron idézi elő, de nagyon kis valószínűséggel spontán módon is bekövetkezhet.

Mesterséges radioaktivitás



A mesterséges radioaktivitás felfedezése még egy fontos módszer kidolgozását tette lehetővé. Az aktivációs analízis segítségével az anyagok elemi összetétele határozható meg. A vizsgálandó mintát neutron-, gamma- vagy töltött részecske (proton, alfa-részecske stb.) nyalábbal besugározzák. A besugárzás hatására radioaktív izotópok keletkeznek. A kilépő sugárzások jellegéből, energiájából és intenzitásából következtetnek a mintát felépítő elemek fajtájára és mennyiségére. A módszer csak kis mintát igényel és nagyon érzékeny, vagyis nagyon kis anyagmennyiség kimutatását is lehetővé teszi. Kiterjedten alkalmazzák a környezetvédelmi analitikában, nagy tisztaságú anyagok (fémek, félvezetők) összetételének elemzésére, biológiai nyomelemek kimutatására és a kriminalisztikában.



Hevesy György (1885–1966)

Egészségünk védelmében

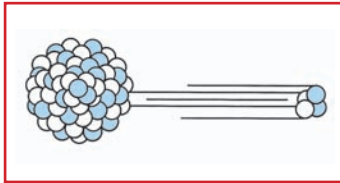
1935-ben Hevesy György foszfor-32 izotóppal követte nyomon a csontképződést patkányokban. Ez volt a nyomjelzéstechnika első orvosi alkalmazása. Ma a világon egyetlen napon közel százezer alkalommal használják orvosi vizsgálatoknál a radioaktív technécium-99 izotópot.

A hatórás felezési idejű technéciumizotópot megfelelő, a vizsgálni kívánt szervek anyagcseréjében szerepet játszó vegyületekhez kötve juttatják a szervezetbe. A felszívódás után megméri a testből kilépő sugárzás pontos eloszlását. A módszert elsősorban különböző daganatok, szívbetegségek kimutatására, a csontrendszer vizsgálatára használják. A technécium csak radioaktív állapotban létezik, görög eredetű neve mesterségest jelent. Pajzsmirigyvizsgálatokhoz jódt-131 izotópot használnak. A pozitron-emissziós tomográfia (PET) diagnosztika egészen rövid, 2–110 perc felezési idejű radioaktív oxigén-, nitrogén-, szén- és fluorizotópokkal dolgozik. Ezeket kisenergiájú részecskegyorsítóban, ciklotronban állítják elő, és rögtön fel is használják, elsősorban az agy vizsgálatára.

A sugárzásokat terápiás célokra is kiterjedten alkalmazzák. A sugárzások élettani hatását igen hamar felismerték. Az 1920-as években már világszerte használták az erős gamma-sugárzást kibocsátó rádiumot a rákos daganatok elpusztítására. A sugárzás behatol a sejtekbe, ott leadja energiájának egy részét, ezzel ionizálja a sejt atomjait, molekuláit. Számos fizikai-kémiai változás indul meg, a sugárzás felbontja a molekulák hidrogénkötéseit. A besugárzás a sejtműködés irányításában kulcsszerepet játszó, a genetikai információkat a sejtosztódásnál továbbvivő DNS-ből információkat távolít el vagy változtat meg szakaszokat, ezzel meggátolja a sejt osztódását, szaporodását. Az ideális sugárkezelésnél a sugárzás a megcélzott daganatszövetben adja le minden energiáját, azt elpusztítja, a környező egészséges szövetekben viszont nem ad le energiát, azokat nem károsítja. A röntgen- és gamma-sugárnyaláb a testben megtett útja során folyamatosan kölcsönhatásba kerül a szövetekkel, az energialeadás ezért nem korlátozható egy szűk területre. Egyre többször alkalmaznak olyan megoldásokat is, melyeknél a sugárzó izotópot közvetlenül a daganatba juttatják be.

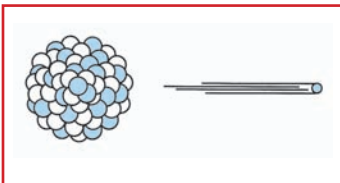
Lassú neutron – gyors neutron:

a hasadási folyamatban gyors neutronok keletkeznek. Ahhoz, hogy jobb hatásfokkal tudjanak új hasadásokat létrehozni, le kell őket lassítani. Ezt a lassítást a moderátorban való ütközések segítségével valósítjuk meg. (A paksi reaktorokban a moderátor közönséges víz.) Ne keverjük össze a neutronlassítás és a neutronelnyelés feladatát! Az utóbbit végzi a bór – bóracél, illetve bóroldat formájában. A moderátor pedig nem arra kell, mint azt talán etimológiai asszociációk alapján szeretik írni, mondani (vö. „moderáld magad!”), hogy megfékezze a láncreakciót! Drámaian hangzik, de nem igaz! A moderátor azért kell, mert egyáltalán csak a lelassult neutronok tudják fenntartani a láncreakciót.

 α -sugárzás

A daganatok elpusztítására a nagy sebességre felgyorsított parányi elemi részecskék is bevetethetők. A protonok vagy a náluk nehezebb részecskék ugyanazon az úthosszon sokkal több energiát adnak át a szöveteknek, mint a gamma-sugarak vagy a könnyű elektronok. A nagyobb energialeadás nagyobb kárt okoz, biztosabb a pusztító hatás. A felgyorsított részecskékből álló sugárnyaláb behatolási mélysége jól szabályozható, az energialeadás pontszerű, az energiaátadás döntő hányada a megállás helyén következik be. Ezért a nehéz részecskékkel való besugárzással lehet legjobban megközelíteni a célul kitűzött ideális esetet: úgy pusztuljon el valamennyi daganatsejt, hogy a közelükben levő egészséges sejtek ne károsodjanak. Egyes nagy fizikai kutatóközpontokban pion-nyalábokkal, nehézionokkal, gyorsított atommagokkal végeznek klinikai kísérleteket. Legígéretesebbnek a szénionokkal való besugárzás ígérkezik.

Táplálékunk védelmében

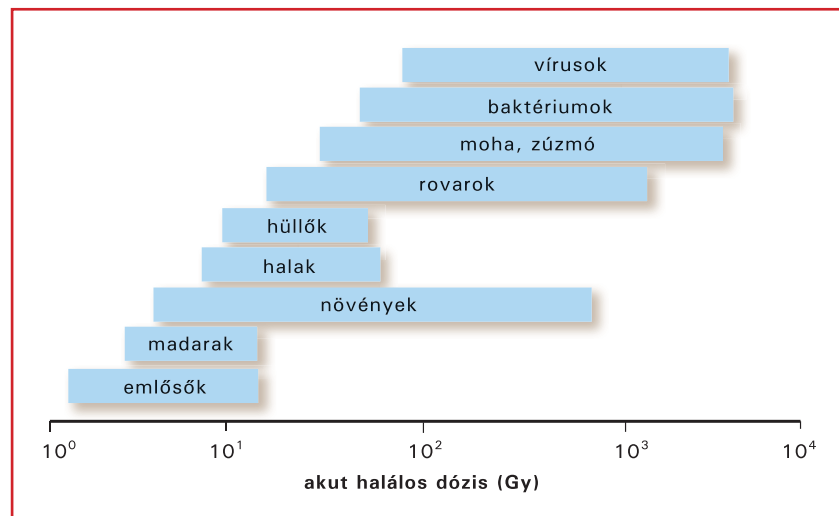
 β -sugárzás

A fejlődő világban óriási társadalmi probléma az egyre nagyobb lélekszámú lakosság elegendő mennyiségű és jó minőségű étellemmel való ellátása, a fejlett országok lakosságát pedig egyre inkább foglalkoztatja az élelmiszerek biztonsága. A komplex problémák megoldás érdekében a radioaktív sugárzásokat is bevetik.

Az élelmiszeriparban a besugárzás már évtizedek óta alkalmazott és bevált technológia. Elsősorban gamma-sugarakkal sugároznak be különböző élelmiszereket minőségjavítási céllal. Az ENSZ szakosított szervezetei, az atomenergia (IAEA), az egészségügyi (WHO) és az élelmezési (FAO) világ-szervezet támogatja e módszerek elterjesztését. Sok-sok tapasztalat és ellenőrző vizsgálat birtokában biztosan állítható, hogy az élelmiszerek besugárzása semmilyen veszélyt sem jelent a fogyasztóra.

Kezdetben a romlandó élelmiszerek tartósítása, a termésveszteségek csökkentése volt a cél. Ezért először halak, a tenger gyümölcsei, zöldségek és gyümölcsök besugárzásával kísérleteztek. Besugárzással késleltethető a

Élőlények sugárérzékenysége



mangó, a papaja, a spárga és a gomba érése. Az őszele kellő adaggal besugárzott burgonya és hagyma csírázás nélkül áll el tavaszig.

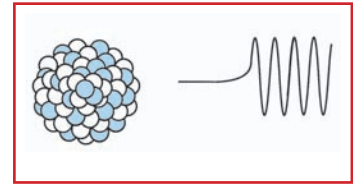
Besugárzással jelentősen növelhető az élelmiszerek biztonsága. A baromfi-hús besugárzása megöli a szalmonella-, coli- és más baktériumokat. Hasonló céllal sugározzák be világsszerte a fűszereket és egyéb adalékanyagokat is. A jól bevált megoldás természetesen más közegekre is alkalmazható, például orvosi eszközök vagy csomagolóanyagok baktériummentesítésére. Élelmiszerek besugárzásának kutatásával Magyarországon is foglalkoznak évtizedek óta, már két évtizede sikeresen működik egy besugárzó üzem is.

A sugárzásokat sikeresen vetik be az emberben vagy állatokban betegségeket okozó rovarok ellen is. A sterilizálást intenzív röntgen- vagy gamma-besugárzással végzik. A megoldás elvileg egyszerű: sterilizált hímeket bocsátanak ki olyan nagy számban, hogy jóval többen legyenek, mint a szaporodni képes helyi hímek. A steril hímekkel párosodott nőstények nem tudnak életképes utódokat a világra hozni, így a steril hímek kibocsátását kellő ideig fenntartva az állomány fokozatosan kihal.

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség már az 1960-as évek elején sikeresen alkalmazta a sterilizáltrovar-technikát a Karib-szigeteken és Floridában egy, a szarvasmarha-állományban nagy károkat okozó húslégyfaj felszámolására. Sikeres volt a mediterrán gyümölcslégy elleni akció is: az első kísérletekre Capri szigetén került sor szintén a hatvanas években. Az újvilági húslégyek 1988-ban jelentek meg Líbiában, megjelenésük a kontinens nagy részének szarvasmarha- és tevéállományát veszélyeztette. Nemzetközi szervezetek és több ország összefogásával egy év alatt sikerült a kártevőt kipusztítani. Két alapvető feladatot kellett megoldani: a legyek nagyüzemi szaporítását és a megfelelő sterilizálást. A program során hetente negyvenmillió sterilizált hím legyet bocsátottak szabadon.

Hasonló programot indítottak Zanzibár egyik szigetén a cecelegyek ellen. A cecelegyek Afrikában az emberek között az álomkórt, a háziállatoknál pedig a nagana nevű hasonló betegséget viszik át. A cecelegyek teljes kipusztítása kontinensnyi méretekben egyelőre nem oldható meg.

A különböző élőlények nagyon eltérő mértékben tűrik a sugárzásokat. A legkisebb adag az emlősök elpusztításához kell, a baktériumok, vírusok nagy része számára még ennek a százszorosa sem halálos.



γ-sugárzás



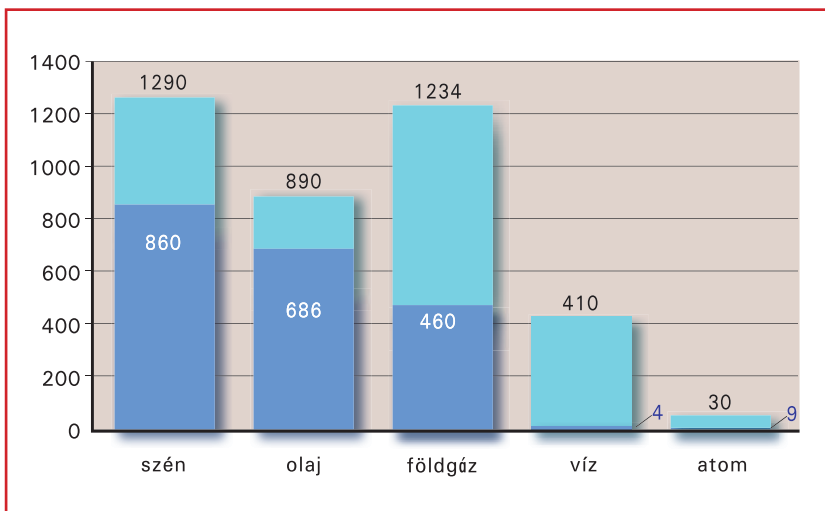
A savas eső még a kőszobrokat sem kíméli

Környezetvédelem, nyomozás, művészettörténet és úrkutatás

A sugárzás a környezet védelmében

A szén elégetésekor nagy mennyiségben keletkezik kén-dioxid és nitrogén-oxidok. Az atmoszférában a lebegő részecskékből kénsav és salétomsav lesz, a következmények jól ismertek: savas eső és erdőpusztulás, a légzőszervi megbetegedések szaporodása. Vannak ismert és bevált technológiák a kén-

Különböző energiaforrásokkal járó szén-dioxid-kibocsátás



Füstölő kémények...

dioxid, illetve a nitrogén-oxidok kiszűrésére, de eddig nem volt olyan módszer, amely együtt és egyetlen lépésben vonta volna ki a kétféle gázt. Az új módszer az elektronsugaras száraz tisztítás. Mielőtt a füst kilépne a kéményből, bevezetik egy tartályba, ahol elektronsugárzásnak teszik ki, az alacsony energiájú elektronnyalábot részecskegyorsító szolgáltatja. A besugárzás hatására a kén-dioxid és a nitrogén-oxidok kémiai átalakuláson mennek át. A folyamatban nem keletkeznek radioaktív anyagok, nincs visszamaradó sugárzás, alkalmas adalékanyag hozzáadásával még műtrágya is gyártható.

A fosszilis tüzelőanyagokat, kőszén, kőolajat, földgázt égető erőművek sok szén-dioxidot bocsátanak a levegőbe. Az immár száz éve növekvő szén-dioxid-kibocsátásnak biztosan szerepe van a globális felmelegedésben. E felismerés következtében ma már nemzetközi egyezmény szabályozza a szén-dioxid-kibocsátás csökkentését. A csökkentés egyik igen hatékony módja, ha a fosszilis tüzelőanyagú erőművek helyett atomerőműveket működtetünk.

Az atomenergetika, az urán-ciklus ma kétségtelenül leggyengébb pontja a hosszú felezési idejű izotópok biztonságos eltemetése. Laboratóriumi kísérletek biztató megoldást ígérnek: az atommagok hasadása során keletkezett hosszú felezési idejű izotópokat újra besugározzák és ennek hatására azok stabil vagy rövid felezési idejű izotópokká alakulnak át. A besugárzás-hoz nagy intenzitású neutronforrások szükségeltetnek.

A sugárzás felhasználása az anyagok elemzésében

Térképet készíthetünk bármilyen elem vagy izotóp eloszlásáról. Lehet ez az izotóp radioaktív, mint a cézium-137, ilyenkor közvetlenül mérhetjük a sugárzás mennyiségét, vagy stabil izotóp, mint a kadmium, amelyet először aktiválni kell. A neutronaktivációs módszer igen alkalmas környezet-szennyezés (pl. arzén, kadmium, higany, ólom) felderítésére vagy talajok mikroelem-tartalmának feltérképezésére. Konténerek, tartályok megbon-tása nélkül felderíthető a belső tartalom, fény derülhet veszélyes és tiltott

anyagok, például kábítószer, robbanóanyagok elrejtésére. A keresett anyagok eltérő arányban tartalmaznak szenet, oxigént, hidrogént, nitrogént, tehát ezek mérésével az anyag azonosítható.

Sugárzás és kormeghatározás

A holland Han van Meegeren a 20. század közepén olyan tökéletesen hamisította a híres 17. századi németalföldi festő, Jan Vermeer képeit, hogy még beismerő vallomása után sem tartották a képeket hamisítványnak. Csak a fehér festék ólomizotópjainak, a különböző sugárzó izotópok arányának gondos mérésével vált egyértelművé, hogy a festmények a zseniális hamisító alkotásai.

A légkörben a kozmikus sugárzás hatására állandóan keletkeznek radioaktív szén-14 atomok, ezek az életfolyamatok során a stabil szénizotópokkal együtt minden szervezetbe bejutnak. Az élő szervezetekben, növényekben, állatokban, emberekben állandó a sugárzó és a stabil szén aránya. Az életjelenségek megszűntével az elbomló, béta-sugárzással nitrogénné alakuló szén-14 mennyisége egyre csökken. A felezési idő (5730 év) ismeretében a szénizotópok arányának mérésével pontosan meghatározható a szerves anyagok, például csont, bőr, textil, fagerenda kora. A szén-14 kormeghatározás kidolgozóját, W. F. Libbyt 1960-ban kémiai Nobel-díjjal ismerték el.

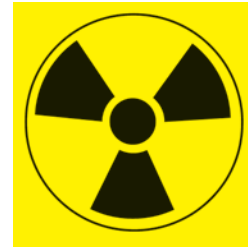
A sugárzás az űrkutatásban

Az űrkutatásban vannak olyan feladatok, melyeknél az eszközök energiaszállítása csak nukleáris energiaforrásokkal oldható meg. E feladatok közé tartozik az olyan térségek felkeresése, ahol nincs vagy nagyon gyenge a napfény (a Hold éjszaka, a Vénusz felhői alatt, a távoli nagybolygók, a Jupiter, a Szaturnusz és többi környezetében). Akkor is csak a nukleáris energia, a radioaktív izotópok bomlása ad megoldást, ha túl magas a hőmérséklet, például a Nap közelében.

A kockázatok mérlegelése

Az élővilág a természetes sugárzásban fejlődött. Korábban ez a sugárzás a mainál nagyobb volt. A Föld néhány területén (pl. a brazil tengerparton, India Kerala államában, Iránban és másutt) a háttérsugárzás ma 5–50-szer nagyobb az átlagosnál. Ezeken a területeken is élnek emberek, egészségi állapotukban semmiféle eltérés nem mutatható ki.

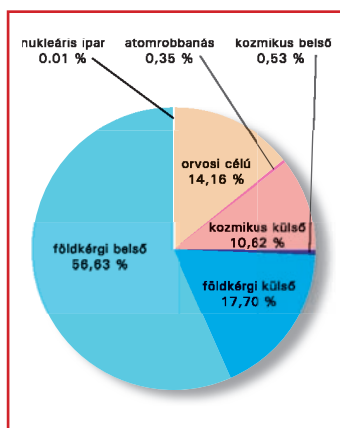
Mekkora tehát az a dózis, amittől már óvakodnunk kell? A sugárzások biológiai hatását ismerve bármilyen kis dózisnak van kockázata, hiszen a szövetek, sejtek a sugárzás hatására károsodnak. Ugyanakkor elhárító, javító mechanizmusok is működnek a szervezetben. Keveset tudunk még a kis dózi-



A radioaktivitás nemzetközi jelölése



A torinói lepel vizsgálata, 1988 (szén-14 kormeghatározás)



A sugárterhelés forrásai

sok hatásairól. Egy új keletű felismerés szerint a kis dózisok akár jótékony hatást is gyakorolhatnak, erősíthetik a helyreállító folyamatokat, stimulálhatják az immunrendszert.

Az önként vállalt sugárterhelés döntően az orvosi alkalmazásokból származik, a mesterséges eredetű sugárterhelésnek ez a meghatározó forrása. (Az orvosi sugárterhelés nagy hányada a röntgenátvilágításokból ered.) A többi mesterséges forrás, tehát a korábbi atomfegyver-kísérletek és a mai atomipar járuléka emellett elhanyagolható. Az orvosi célú sugárterhelésből származó esetleges egészségkárosodás viszont eltörpül az idejében történt diagnosztizálásból és terápiából származó haszon mellett. Az orvosi alkalmazások a természetes forrásokból eredő évi 2,4 mSv mellé átlagosan további 0,4 mSv terhelést jelentenek.

Ha már a kockázatoknál és a sugárzás orvosi alkalmazásánál tartunk, fontos, hogy eloszlassunk egy félreértést: **sugárfertőzés** nem létezik, a sugárzás nem fertőző, mindenki egyénileg viseli el a hatásokat.

Érdekes a radioaktivitás kockázatait más, hétköznapi kockázatokkal is összevetni. Kiszámították, hogy különböző tényezők mennyivel rövidítik meg egy átlagos ember életét. A nőtlenség 3500 nappal, 30% súlyfelesleg 1300 nappal, a szegénység 700 nappal, a cukorbetegség 95 nappal, az orvosi röntgensugárzás 6 nappal, a diétás italok 2 nappal. Egy amerikai atomenergia-ellenes csoport szerint az atomreaktor-balesetek járuléka is 2 nap, szakértői elemzés szerint ennek csak a századrésze, fél óra.

2. táblázat. Kockázatok. A várható élettartam-csökkenés

Ok	Napok
Nőtlenség	3500
Dohányzás (férfi)	2250
Hajadonnak lenni	1600
30% súlyfelesleg	1300
Rák	980
Gépjárműbalesetek	207
Gyalogosbalesetek	37
Természetes sugárzás	8
Reaktorbalesetek – UCS (atomenergia-ellenes csoport)	2
Reaktorbalesetek – Rasmussen	0,02

Sugárfertőzés:

a média által kitalált, teljesen értelmetlen kifejezés. A sugárzás hatásainál a fertőzés semmiféle közvetlen szerepet nem játszik. Ehelyett – a tényhelyzetnek megfelelően – írhatjuk: „sugárszennyeződés vagy (radioaktív) sugárzás érte” vagy „nagy sugárdózist kapott” vagy „el-szennyeződött radioaktív anyaggal”.

(A Kislexikon szócikkait a Magyar Atomforum Egyesület hozzájárulásával közöljük.)

Mindezekből két tanulság adódik. Egészségünk megőrzése és helyreállítása érdekében plusz sugárterhelést vállalunk el. Az atomipar és a sugárzások megannyi alkalmazása nem növeli meg számottevően a bennünket érő sugárzás mennyiségét, viszont néhány területen mással nem pótolható előnyökkel jár. Nem szabad tehát elleneznünk az atomtechnika további terjedését.

Ajánlott irodalom

Apáthy István: A Pille története. Űrtevékenység Magyarországon. Bp.: Magyar Űrkutatási Iroda, 2002.

Atomkor (tematikus összeállítás). *Környezetvédelem*, 2001/1.

Élet a sugárözönben (tematikus összeállítás). *Magyar Tudomány*, 2002/8.

Energia – környezet – gazdaság (tematikus összeállítás). *Magyar Tudomány*, 2001/1.

Fehér István: Öt napos Budapest – Kijev – Budapest kamionos út személyi sugárterhelése. *Fizikai Szemle*, 1999/1.

Hevesy György munkássága, izotópalkalmazás az orvostudományban, aktivációs analízis. *Fizikai Szemle*, 2001/5–6.

Kanyár Béla: A tápláléklánc szennyeződése radioaktív anyaggal. *Fizikai Szemle*, 1999/6.

Kockázat és biztonság (tematikus összeállítás). *Magyar Tudomány*, 1999/1.

Köteles György – Tóth Eszter: Gondolatok az ionizáló sugárzás kis dózisainak hatásairól. *Fizikai Szemle*, 1999/11.

Honlapok:

ENSZ Nemzetközi Atomenergia Ügynökség:

www.iaea.org/worldatom

MTA KFKI: www.kfki.hu

Paksi Atomerőmű Rt.: www.npp.hu;

Magyar Atomforum Egyesület: www.atomforum.hu

MTA-ban 2001-ben tartott Csernobil-konferencia anyaga: www.reak.bme.hu/csernobil

