

A TARTALOMBÓL:

- Arzén – újratöltve
- Bruckner-termi előadások
- Veszély és kockázat
- A gyógyszerkutatás műszeres módszerei
- Vegyészleletek



MAGYAR KÉMIKUSOK LAPJA

A MAGYAR KÉMIKUSOK EGYESÜLETE HAVONTA MEGJELENŐ FOLYÓIRATA • LXXI. ÉVFOLYAM • 2016. MÁRCIUS • ÁRA: 850 FT

Cserenkov-sugárzás

nka A lap megjelenését
a Nemzeti Kulturális Alap
támogatja
Nemzeti Kulturális Alap

A kiadvány
a Magyar Tudományos
Akadémia támogatásával
készült



Braun Tibor

ELTE Kémiai Intézet, MTA Könyvtár és Információs Központ | braun@mail.iif.hu

Cserenkov-sugárzás

Egy nukleáris kémiai eponíma viszontagságos keletkezése és sokat ígérő jövője

Előszó

Előző dolgozatainkban aránylag részletesen foglalkoztunk már *eponímmal* és az *eponímiával* a tudományban és a tudományos kutatásban. Talán nem felesleges ezekből néhány fontos jellemzést itt felidézni [1–4].

„Az *eponíma* kifejezés a görög *epi* (jelentése: -ről, -ről) és *onyma* (jelentése: név) szavakból származik. A tudomány területén számos híres elmélet, törvény, hatás, elv és így tovább *eponim*, vagyis azokról a kutatókról van elnevezve, akik javasolták vagy felfedezték azokat. Az *eponími*a az a szokás, hogy a kutató nevét odaillesztjük a felfedezéshez vagy annak egy részéhez, például kopernikuszi rendszer, Hook-törvény, Planck-állandó vagy Halley-üstökös. Az *eponími*a számos funkciót szolgál, ráirányítja a figyelmet a jelzett fejlődésre, követendő példaként nevezi meg a tudomány hőseit és motiválja a kutatást az elért eredmények jutalmazásával. Habár az *eponím*a a tudomány minden területén megtalálható, néhány tudományterület több *eponím*át hozott létre és őrzött meg, mint egy másik.”

Szabályként kimondható, hogy a nevet a tudományos felfedezéshez nem a tudománytörténész vagy a felfedező kapcsolja hozzá, hanem a gyakorló kutatók közössége. Hasonlóképpen *eponim* elnevezést ritkán adnak vagy hagynak jóvá, hacsak az elnevező (vagy a név elfogadója) térben és/vagy időben távol áll a megtisztelni kívánt kutatótól. Az *eponím*át nemcsak a tudományos érdemek vagy eredetiség alapján ítélik meg, hanem a kutatók közösségének fel kell ismernie, hogy az valódi érdemen alapszik, nem pedig személyes barátság, nemzeti hovatartozás vagy tudományos iskolák politikai nyomásának hatására jött létre. A fentiekhez halkan még hozzá kell tenni, hogy e dolgozat szerzője szerint az *eponíma* a legnagyobb elismerés, amit egy

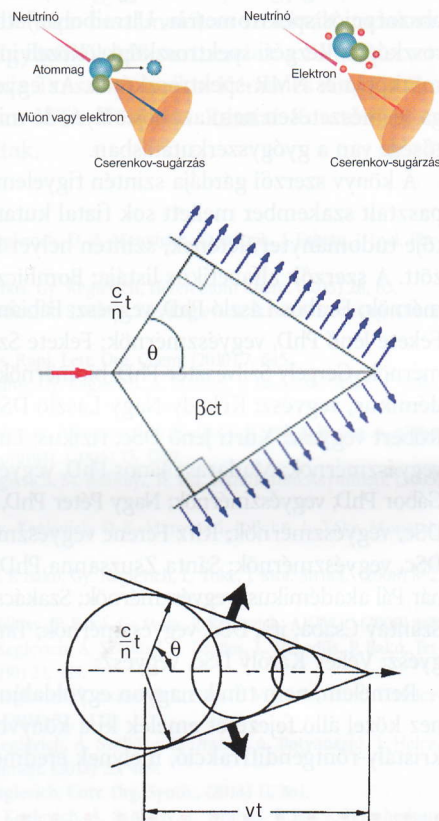
egyéni kutató megkaphat. Talán szentségtörésnek hangzik, de bizonyos tudásterületeken és témákban az *eponíma* jelentősebb minden bizottság, kormány, hatalom által világszerte adományozható díjnál, beleértve a Nobel- és az Abel-díjakat is.

Bevezetés

Mint e dolgozat címéből is kiderül, egy nukleáris kémiai, *eponím*aként is elismert felfedezésnek, a *Cserenkov-effektus*nak és felfedezőjének, *Pavel Alekszejevics Cserenkov*nak az útját szeretnénk körüljárni. Etimológiailag alkalmaztuk a név magyarosítását, mint ahogyan tették már a hazai szakirodalomban [5]. Az *eponím*át még *Cserenkov-sugárzásként* is használják, sőt magát az *eponím*át helytelenül *Vavilov–Cserenkov-effektusként* vagy *-sugárzásként* is említik [6]. Ezen *eponíma* lényegének és múltjának vázolásán túlmenően a *Cserenkov-sugárzás* jelenével, de főként a jövőjével is érdemesnek tartottuk foglalkozni, ugyanis az alapját képezi egy egyesült államokbeli, WATCHMAN néven jelenleg is folyó nagy kutatási projektnek, ami arra irányul, hogy titkolt és titkos helyen, nem igazán békés célokkal épített, illetve működtetett atomreaktorok helyét és működését azonosítsák. Nem szeretnénk itt e kérdés politikai aspektusaira is kitérni, ezért csak futólag hangsúlyozzuk a detektálási lehetőség világbiztonsági jelentőségét.

A Cserenkov-sugárzás múltja

A *Cserenkov-sugárzás* [5] elektromágneses sugárzás, amely akkor keletkezik, amikor töltött részecskék adott közegben gyorsabban haladnak, mint az elektromágneses hullámok fázissebessége ugyanabban a közegben. Például vízben a fény sebessége csak 225 000 000 m/s, míg vákuumban



1. ábra. A Cserenkov-sugárzás [26–28]

289 792 458 m/s. Amikor egy töltött részecske dielektromos (nemvezető) közegben mozog, töltése folytán rövid ideig polarizálja az útja mentén található atomokat, és ezáltal elektromágneses hullámokat hoz létre. A szomszédos atomok elektromágneses hullámai általában destruktívan interferálnak, azaz kioltják egymást, így makroszkópos sugárzás nem jelentkezik. Amennyiben azonban a töltött részecskék gyorsabban mozognak, mint a fénysebesség az adott közegben, a szomszédos atomok hullámai már nem tudják egymást kioltani – ilyenkor mindig kúp alakú hullámfront alakul ki. Ez tulajdonképpen a *Cserenkov-sugárzás*. A repülési út hosszán kibocsátott sugárzás úgynevezett Mach-kúpot ír le (1. ábra). A részecske útvonalát és



a sugárzásirány közötti θ szög a részecske v sebessége és a $c' = c/n$ fénysebesség közötti aránytól függ, n törésmutatójú közegben ($\beta = v/c$):

$$\cos \theta = \frac{c'}{v} = \frac{1}{n\beta}$$

Ezáltal a Cserenkov-sugárzás annak az ultrahangkúpnak az optikai analógja, amit repülőgépek vagy más tárgyak levegőben a hang sebességénél gyorsabban haladva hoznak létre. A Cserenkov-sugárzás során létrejött elektronok száma egy ω körfrekvenciájú és x útvonalhosszú z töltésű részecske esetén a Frank–Tamm-képlet alapján (α finomszerkezeti állandó):

$$\frac{\partial^2 N}{\partial \omega \partial x} = \frac{z^2 \alpha}{c} \sin^2 \Theta$$

A legkisebb energia, ami elektronok által vízben Cserenkov-sugárzás létrejöttéhez szükséges, 263 keV.

A Cserenkov-sugárzás kék színű, mert a helyükre visszazökkent és fényt kibocsátó elektronokat nagy energiájú (nagy sebességű) részecske zavarta meg. A nagy energiák itt rövid hullámosságokat, vagyis kék spektrumszínt jelentenek. Ezért látjuk kék színűnek a Cserenkov-sugárzást.

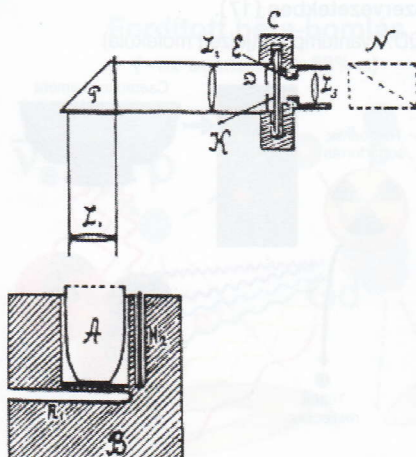
Mint csaknem minden felfedezésnek a tudományban, a Cserenkov-sugárzásnak is voltak előzményei. Így például elméletileg már előre látták a tizenhetedik század végén [7]. Mint az édesanyjáról, a kétszeres Nobel-díjas Marie Curie-ről lánya, Eve Curie által írt közismert életrajzból [8] kiderül, Marie és férje, Pierre a rádium felfedezésével jár, a 20. század elején végzett vizsgálatok közben is megfigyelték a kékes fényt, ami főleg rádiumsókat tartalmazó üvegedényeikből sugárzott a sötétben.¹ E megfigyelésen túlmenően ők nem vizsgálták részletesebben a vitathatatlanul Cserenkov-sugárzásnak mondható jelenséget, de évekre rá, 1928–29-ben Malet már alaposnak ítéltető méréseket is végzett annak a sugárzásnak a hullámhossz-meghatározásakor, ami különböző átlátszó tárgyakból emittálódott radioaktív sugárforrás közelében. Malet–Fabry-féle spektrométerrel és fotografikus módszert használva – rájött, hogy a spektrum folyamatos, és a 370 nm-ig terjedő mérési lehetőségeikig meg is mérte [9,10]. Azonban ennél tovább Malet sem jutott, így nem figyelte meg a sugárzás polarizálódását és

az emisszió sajátosan fontos aszimmetriáját sem. A Cserenkov-sugárzásról részletes beszámoló található Jelley monográfiájában [11].

Mielőtt rátérnénk Cserenkov kutatási tevékenységének részletesebb ismertetésére, dióhéjban érdemes életrajzi adatainál is röviden elidőzni. Pavel Alekszejevics Cserenkov Oroszországban született 1904-ben Novaja Csigla (jelenleg Voronyezsi terület) helységben. 1928-ban diplomázott a Voronyezsi Állami Egyetem fizikai és matematikai karán. 1930-ban nősült, felesége Marija Putyinceva, két gyermekük született (Alekszej, Jelena) [12]. Cserenkov 1933-ban Leingrádiban kezdte el kutatási tevékenységét a nemlineáris optika atyjaként nyilvántartott Sz. I. Vavilov akadémikus vezetése alatt, és folytatta azt Moszkvában, miután Vavilovot és csoportját az ott létesített Lebegyev Intézetbe helyezték át. Az intézetben folytatott kutatási tevékenysége alatt szülőföldjén, Voronyezsben édesapját, Alekszejt kulákként kivégezték és professzor apósát, A. M. Putyincevet politikailag megbízhatatlanként két évig munkatáborba zárták. Mindezek mellett bátyja, egy jelentős genetikus börtönben vesztette életét, miután Lisenko tanait tagadó véleményéért halálra ítélték. A sorsnak, vagy a véletlennek köszönhetően a fentiek ellenére Cserenkovot dolgozni hagyták végig a sztálini időkben (Sztálin 1953-ban hunyt el), és ez

2. ábra. A Cserenkov által tervezett és saját kezűleg kivitelezett fotométer [29].

A: a luminofor anyagot tartalmazó üvegedény; az üvegedény falvastagsága áteresztette az α - és β -részecskéket, valamint a γ -fotonokat; B: az üvegedényt tartó faalap; N_1 és N_2 : 103,6 mg rádiumot tartalmazó ólommedényt befogadó nyílások; N: a polarizációs mérésekhez használt Nicol-prizma; L_1 : kollimátor; P: prizma; L_2 , L_3 : teleszkópot képző lencsék; E: optikai szűrőket tartó keret; K: optikai ék; D: látómező



alatt bántódása nem esett. Cserenkov 1990. január 6-án Moszkvában hunyt el. A Vavilov által Cserenkovnak javasolt és általa elfogadott kutatási téma és kísérleti eljárás szerint különböző uranilsó-oldatokat kellett 10 mg-ot tartalmazó kénsavoldatos rádiumforrásból származó elektronokkal besugározni. Cserenkov első kísérletei szabad szemes mérések voltak sötét helyiségben, ahol a sugárzás felvillanását és intenzitását kioltásos (quenching) eljárással mérte. Ezek a nehéz és kényes mérések nagy türelmet és kísérleti ügyességet igényeltek. A mérés során előbb a kísérletezőnek 1–2 órát teljesen sötét helyiségben kellett eltöltenie, hogy szemét minél érzékenyebbé tegye a megfigyelt fényvillanások érzékelésére a saját tervezésű és kivitelezésű fotométeren (2. ábra). Cserenkov felfedezte, hogy a fénykibocsátás akkor is megtörtént, amikor az edény csak az uranilsó oldószerét, a kénsavat tartalmazta. Azt is megfigyelte és le is írta, hogy a sugárzás egy sor más oldószerben is megfigyelhető volt [13]. A vizsgálatok igazán áttörő eredményekhez akkor vezettek, amikor Cserenkov felfedezte (valószínűleg véletlenül), hogy a sugárzás kibocsátása aszimmetrikus és csak előrefelé, a Huygens-elvnek megfelelően történik a behatoló gamma-sugárzás irányához viszonyítva (1. ábra). A sugárzás aszimmetriája kizárta a Vavilov által javasolt magyarázatot, miszerint a megfigyelt sugárzás a gamma-besugárzás által és a folyadék által lelassított Compton-elektronokból származik, azaz az optikai sáv „Bremsstrahlung”-jából. Mint utólag kiderült, és mint fentebb már említettük, ez helytelen volt, és valószínűleg ezért később tévedésként Vavilov nevét is említették a Cserenkov-effektus felfedezése kapcsán [11].

Külön hangsúlyozni kell, hogy Vavilov rögtön felismerte tévedését, sőt azt is, hogy a jelenség nem lumineszcenciából származik, és a továbbiakban messzemenően támogatva Cserenkov kutatásait. Sőt felkérte a szintén optikai kutatásokat végző Ilja Frank és Igor Tamm kitűnő fizikusokat, hogy segítsenek Cserenkovnak a sugárzás elméleti magyarázatában. Az elmélet, aminek alapját a sugárzás aszimmetriája képezte, előbb meghozta Vavilovnak, Cserenkovnak, Franknak és Tammnak 1946-ban a Sztálin-díjat, majd 1958-ban Cserenkovnak, Franknak és Tammnak a fizikai Nobel-díjat [14] (3. ábra). Vavilov előzőleg 1943-ban, majd 1951-ben és 1953-ban is Sztálin-díjat kapott. Meg kell azonban jegyezni, hogy a Cserenkov-felfedezés elfogadása nem ment könnyen világviszony-

¹ Érdemes megjegyezni, hogy ez az 1937-ben franciául megjelent, de minden világnyelvre, így magyarra is lefordított, mindmáig számtalan kiadásban megjelent könyv az idők folyamán sok fiatalnak, így e sorok szerzőjének is ifjúkora alapvető olvasmányát képezte.



3. ábra. 1958 természettudományos Nobel-díjasai (balról jobbra): George Beadle (orvosi), Edward Tatum (orvosi), Igor Tamm (fizikai), Frederick Sanger (kémiai), Pavel Cserenkov (fizikai), Ilja Frank (fizikai), Joshua Lederberg (orvosi) (profiles.nlm.nih.gov)

latban, de még a Szovjetunióban sem, ahol Cserenkov kollégái eleinte szellemfény-kutatónak és a sötétszobás kutatást spiritizmusnak is nevezték. Megemlíthető még, hogy akadémiai tagként való megválasztása is szokatlanul későn, hat évvel Nobel-díja után, 60 éves korában, 1964-ben következett be, ami jelentős kontrasztban volt Vavilov akadémikussá választásával, már 1932-ben, 41 éves korában. Orosz nyelven a felfedezés publikálása már 1934-ben megtörtént [13]. Ez valószínűleg Vavilov állandó és önzetlen támogatásának is köszönhető volt. Érdekességként említhető azonban, hogy Cserenkov „Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light” című angol nyelvű kéziratát 1937 közepén a *Nature* folyóirat visszautasította. Azonban a cikket ugyanabban az évben közlésre elfogadta és meg is jelentette a *Physical Reviews* [15].

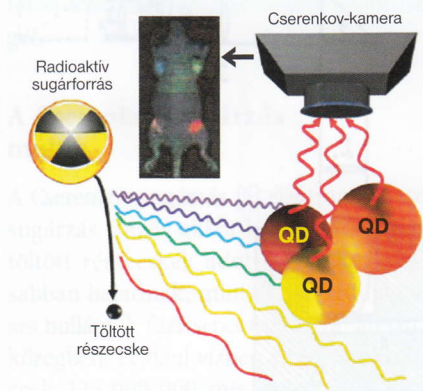
A Cserenkov-sugárzás jelene

Gondolunk itt a fentiekben leírt Cserenkov-sugárzás jelenlegi gyakorlati alkalmazására, amiről jelentős méretű szakirodalom áll rendelkezésre [például 6, 11], és aminél itt nem szeretnénk részletesebben elidőzni, de néhány példát azért megemlítenénk. Ahogy a címlap mutatja, a kék színű Cserenkov-sugárzás vízzel hűtött atomreaktorokban szabad szemmel is jól látható, de érzékeny detektorokkal pontosabban detektálható, és ezáltal meghatározható a reaktor fűtőelemeinek elhasználtsága, il-

letve kimerülése. Amikor egy nagy energiájú (TeV) gamma-foton vagy kozmikus sugárzás kölcsönhatásba lép a földi légkörrel, óriási sebességű elektron-pozitron párokat hozhat létre. Az ezekből a töltött részecskékből létrehozott Cserenkov-sugárzást használják a kozmikus vagy a gamma-sugárzás forrásának és intenzitásának meghatározására, de alkalmazzák a Cserenkov-sugárzást számos részecskefizikai méréshez is [6]. A Cserenkov-sugárzás egyik legérdekesebb és legújabb felhasználása a biomolekulák in vivo detektálása és meghatározása (4. ábra). Ugyanis például a foszfor-32 könnyen építhető be enzimatiszintetikus módszerrel biomolekulákba, így ezek útja és kölcsönhatása az élő szervezetben Cserenkov-detektorokkal [16] jól meghatározható és követhető [17, 18].

4. ábra. Cserenkov-sugárzás alkalmazása biomolekulák nyomkövetésére élő szervezetekben [17].

QD: kvantumpont (jelzett molekula)

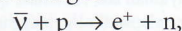


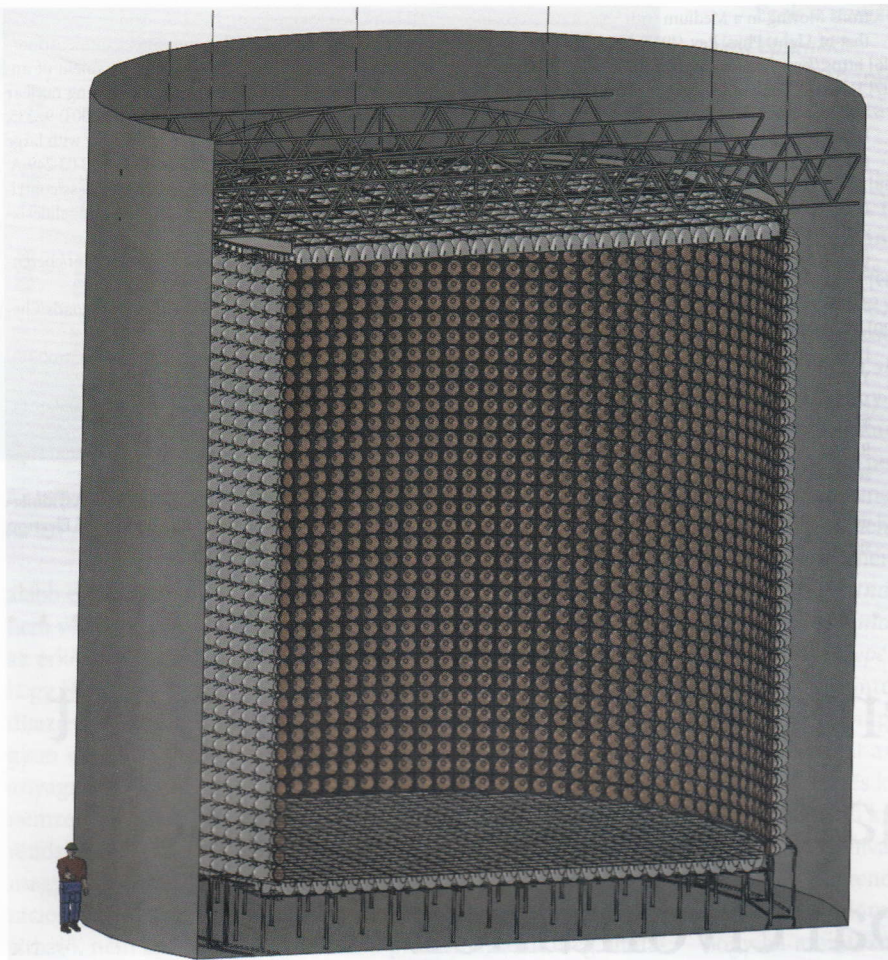
A Cserenkov-sugárzás jövője

A Cserenkov-sugárzás egyik legújabb és világbiztonsági szempontból legérdekesebb és legbiztatóbb alkalmazása az Egyesült Államokbeli US National Nuclear Security Administration [19] által indított és folyamatban lévő WATER CHERenkov Monitor of AntiNeutrinos (WATCHMAN) projektje [20].

Mint elnevezése is mutatja, a WATCHMAN Cserenkov-sugárzás alapján működő neutrínó-, pontosabban antineutrínó-detektorrendszer. A neutrínók és antineutrínók nagyon kis tömegű, töltés nélküli elemi részecskék, amelyek a töltéssel rendelkező elektronokkal, a müonokkal és a tau-részecskékkal együtt leptonoknak tekinthetők [21, 22]. A neutrínók gyakoribbak, mint minden más részecske, kivéve a fotonokat, de olyan gyengén kerülnek kölcsönhatásba más anyagokkal, hogy minden másodpercben hihetetlen nagy számban áramlanak át általában észrevétlenül a Föld minden négyzetcentiméterén. Bár nem tartozik közvetlenül jelen dolgozatunk témájához, feltétlenül megemlítenénk, hogy a 2015. évi fizikai Nobel-díjat *Takaaki Kajita* japán és *Arthur B. McDonald* kanadai kutatóknak ítelték a neutrínók oszcillációjának felfedezéséért, ami bizonyítja, hogy a neutrínóknak van tömegük. A neutrínók óriási mennyiségben képződnek csillagokban, például a Napban, szupernóvák robbanásakor az űrben és atomreaktorokban a Földön, de ezek, mint említettük, nagyon gyengén kerülnek kölcsönhatásba az anyag más formáival. Például egy fényév vastagságú (körülbelül 9 trillió kilométer) ólomdarab (fal) is átengedi az áthaladó neutrínók nagy részét. Ezek szerint nincs olyan védelem, árnyékolás, akadály, ami a neutrínók útját állná az űrből vagy az atomreaktorokból való kiszabadulásukkor. Amennyiben lehetséges lenne annak megállapítása, megmérése, hogy ezek a neutrínók honnan jönnek és hogy a kibocsátás forrása természeti vagy mesterséges, akkor lehetetlenné válna egy atomreaktor elrejtése vagy titokban való működtetése.

A WATCHMAN tervezői gadolíniumot tartalmazó hatalmas (több megatonnás) víztartályokkal (5. ábra) tervezik a neutrínók detektálását. Ugyanis gadolíniumsókat tartalmazó víztartályokat már régebben is javasolták nagyméretű neutrínó- és antineutrínó-detektorokként [23, 24]. A gadolíniumtartalom az antineutrínó-proton szóródás által keletkezett neutrínók detektálására szolgál:





5. ábra. Több kilotonna gadolíniumsót tartalmazó, vízzel töltött WATCHMAN neutrínó-detektortartály keresztmetszete [20]

itt $\bar{\nu}$ az antineutrínó, p a célproton, és e^+ és n a végső reakciótermékek, azaz a pozitron és a neutron. A tiszta vizet tartalmazó Cserenkov-detektorhoz hasonlóan a gadolínium-jelenlét a végső termékként jelentkező neutrínó detektálásának körülbelül hatszoros növekedését teszi lehetővé (6. ábra). Ezt a gadolíniummag két hasznos jellegzetessége hozza létre, a termikus neutronok befogását megkönnyítő nagy hatáskeresztmetszete (49 000 barn) és a befogás utáni gerjesztett gadolíniummagból származó aránylag nagy energiájú gamma-sugár-kibocsátás. Még 0,1% gadolíniumsó-tömegszázalékot tartalmazó víz is befogja a fordított béta-bomlásból származó neutrínók körülbelül 85 %-át. A befogás utáni ~ 8 MeV-os gamma-kaszád erős Cserenkov-impulzust hoz létre, ami a mindenütt jelen lévő sugárhátternél jelentősen erősebb. A neutronok által kilökött elektron által előidézett Cserenkov-sugárzás iránya a gadolíniumot tartalmazó nagy víztartályok falaiba szerelt érzékeny fotodetektorokkal határozható meg.

Azonban ez a módszer nem képes különbséget tenni a neutrínók és az antineutrínók között.

Mint fentebb említettük, erre való a gadolínium. Antineutrínók képesek néha úgy viselkedni, ahogyan a neutrínók nem, azaz egyesülnek egy neutronnal és egy pozitronnal. A pozitron azután nagy sebességgel halad, ami Cserenkov-impulzust hoz létre. A neutron eközben ütközget ide-oda, míg eltalál egy gadolíniumatomot. A nagy befogási keresztmetszetű, mondhatnánk neutronokra nagyétkű gadolíniummagok egy második fényvillanást generálnak. Az egymást gyorsan követő két villanás (6. ábra) jelzi, hogy a készülék egy antineutrínót fogott be. Ennek értelmében a kettős villanások az antineutrínók fluxusát mutatják, míg a visszalökődő villanások jelzik azt az irányt, ahonnan a fluxus érkezik. Meg kell azonban jegyezni, hogy a WATCHMAN projekt még a kutatási fázisban van, és a gyakorlati alkalmazása csak a 2016–2020 közötti időszakra várható.

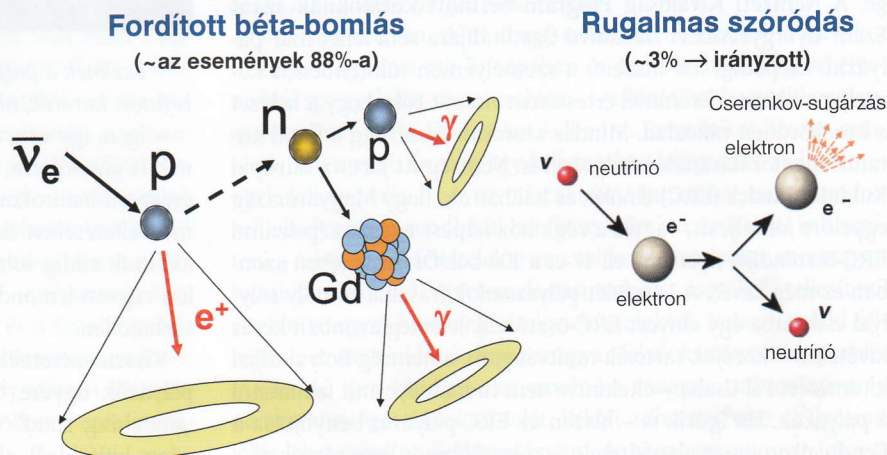
Utószó

Nagyon nehéz, sőt valószínűleg lehetetlen egészen pontosan megállapítani az időpontot, amikor Cserenkov felfedezése Cserenkov-effektusként, vagy Cserenkov-sugárzásként eponimává vált. Ez akkor történhetett, amikor első ízben 1938-ban [30] Collins és Reiling, majd 1943-ban Wyckoff és Henderson [31] megismételték és igazolták Cserenkov méréseit és nevét eponimaként használták. Ezek után a Cserenkov-sugárzás eponimaként általános használatúvá vált.

IRODALOM

- [1] Braun Tibor, Pálos Andrea, Eponimák és eponímia a természettudományban, Magyar Tudomány (1999), 11, 1350.
- [2] Braun Tibor, Pálos Andrea, Eponimikus ismeretek nyomai a kémiai tankönyvekben, Magy. Kém. Lapja (2000), 55, 106.

6. ábra. A WATCHMAN Gd-víz neutrínódetektor működési mechanizmusa [25]





- [3] T. Braun, Á. Klein, Shpol'skii fluorimetry: the anatomy of an eponym, *Trends Anal. Chem.* (1992) 11, 200.
- [4] T. Braun, A. Pálos, Textbook trails of eponymic knowledge in analytical chemistry, *Trends Anal. Chem.* (1989) 8, 158.
- [5] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Cserenkov-effektus>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation
- [7] https://books.google.hu/books/about/Oliver_Heaviside.html?id=e9wEntQmA0IC&redir_esc=y
- [8] Eve Curie, Madame Curie, William Heinemann Ltd., 1937. 177.
- [9] L. Malet, C.R. Acad. Sci. (Paris) (1926) 183, 274.
- [10] L. Malet, C. R. Acad. Sci. (Paris) (1928) 222.
- [11] J. V. Jelley, Cherenkov radiation and applications, Pergamon Press, 1958.
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Pavel_Chernkov
- [13] P. A. Cherenkov, Visible emission of clean liquids by action of gamma radiation, *Dokl. Akad. Nauk SSSR* (1934) 2, 451. (oros nyelven)
- [14] A.E.Chudakov, Obituaries, Pavel Alexeyevich Cherenkov, *Phys.Today* (1992) December, 106.
- [15] P. A. Cherenkov, Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light, *Phys. Rev.* (1937) 52, 378.
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_detector
- [17] H. Liu, X. Zhang, B. Xing, P. Han, S. S. Gambhir, Z. Cheng, Radiation-Luminescence-Excited Quantum Dots for in vivo Multiplexed Optical Imaging, *Small* (2010) 6, 1087.
- [18] C. M. Carpenter, C. Sun, G. Pratz, H. Liu, Z. Cheng, L. Xing, Radioluminescent nanophosphors enable multiplexed small-animal imaging, *Optics Express* (2012) 20, 11598.
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/National_Nuclear_Security_Administration
- [20] M. Askins, M. Bergevin, A. Bernstein, S. Dazeley, S. T. Dye, T. Handler, A. Hatzikoutelis, D. Hellfeld, P. Jaffke, Y. Kamyskov, B. J. Land, J. G. Learned, P. Marleau, C. Mauger, G. D. Orebi Gann, C. Roecker, S. D. Rountree, T. M. Shokair, M. B. Smy, R. Svoboda, M. Sweany, M. R. Vagins, K. A. van Bibber, R. B. Vogelaar, M. J. Wetstein, M. Yeh, The Physics and Nuclear Nonproliferation Goals of WATCHMAN: A Water Cherenkov Monitor for Antineutrinos, *arXiv:1502.01132v1 [physics.ins-det]* 2015. február 4.
- [21] <https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino>
- [22] <http://www.universetoday.com/51645/antineutrino/>
- [23] A. Bernstein, T. West, V. Gupta, An assessment of antineutrino detection as a tool for monitoring nuclear explosions, *Science and Global Security* (2001) 9, 235.
- [24] GADZOOKS! Anti-neutrino spectroscopy with large water Cherenkov detectors, *FERMILAB-PUB-03-249-A*
- [25] <http://indico.ipmu.jp/indico/getFile.py/access?contribId=61&sessionId=15&resId=0&materialId=slides&confId=34>
- [26] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/cherenkov-se.gif>
- [27] <http://t2k-experiment.org/wp-content/uploads/Cherenkov.png>
- [28] <http://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0910/skripte/cosmics02.pdf>
- [29] E. P. Cherenkova, The discovery of the Cherenkov radiation, *Nucl. Instr. Meth.* (2008) A595, 8.
- [30] G. B. Collins, V. G. Reiling, Čerenkov Radiation, *Phys. Rev.* (1938) 54, 499.
- [31] H. O. Wyckoff, J. E. Henderson, The Spatial Asymmetry of Cherenkov Radiation as a Function of Electron Energy, *Phys. Rev.* (1943) 64, 1.