

Cserenkov-sugárzás

Egy nukleáris kémiai eponima viszontagságos keletkezése és sokatigérő jövője

Előszó

Előző dolgozatainkban aránylag részletesen foglalkoztunk már *eponimákkal* 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: –ról, –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 *eponíma* az a szokás, miszerint a kutató nevét odaillesztjük a felfedezéshez, vagy annak egy részéhez, mint például Kopernikuszi rendszer, Hook-törvény, Planck állandó, vagy a Halley üstökös. Az *eponíma* 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 *eponimák* a tudomány minden területén megtalálhatók, néhány tudományterület több *eponimát* 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 nem áll a megtisztelni kívánt kutatótól. Az *eponímiát* nemcsak a tudományos érdek, 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 *eponima* a legnagyobb elismerés, amit egyébként egy egyéni kutató megkaphat. Talán szentségtörésnek hangzik, de bizonyos tudásterületeken és témákban az *eponima* jelentősebb minden bizottság, kormány, hatalom által világszerte adományozható díjnál, beleértve a Nobel- és az Ábel-díjakat is.

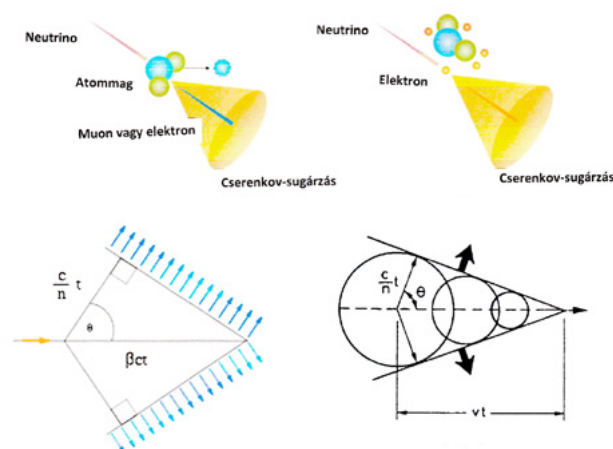
Bevezetés

Mint e dolgozat címéből is kiderül, egy nukleáris kémiai, eponimaként is elismert felfedezésnek, a *Cserenkov-effektusnak*, és felfedezőjének, *Pavel Alekszejevics Cserenkov*nak az útját szeretnénk körüljárni. Etimológiailag alkalmaztuk a név magyarosítását, mint ahogyan tették már a hazai szakirodalomban [5]. Az *eponimát* még *Cserenkov-sugárzásként* (*radiation*) is használják, sőt magát az

eponimát helytelenül *Vavilov-Cserenkov effektusként* vagy *-sugárzásként* is említik [6]. Ezen *eponima* 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

Maga a *Cserenkov-sugárzás* [5] egy elektromágneses sugárzás, ami akkor keletkezik, amikor töltött részecskék adott közegben gyorsabban haladnak, mint az elektromágneses hullámok fázissebessége ugyanabban a közegben. Például vízben a fény sebessége csak 225.000.00 m/szekundum, míg vákuumban 289.792.458 m/szekundum. Amikor egy töltött részecske dielektromos (nemvezető) közegben mozog, az töltése folytán rövid ideig polarizálja az útja mentén található atomokat és ezáltal elektromágneses hullámokat hoz létre. Általában szomszédos atomok elektromágneses hullámjai destruktívan interferálnak, azaz kioltják egymást, így makroszkópos sugárzás nem jelentkezik. Amennyiben azonban a töltött részecskék gyorsab-



1. ábra. A Cserenkov-sugárzás [26-28]

ban mozognak, mint a fénysebesség az adott közegben, a szomszédos atomok hullámai már nem tudják egymást kioltani, lévén, hogy ilyenkor mindig kúp alakú hullámfront alakul ki. Ez tulajdonképpen a *Cserenkov-sugárzás*. A repülési út hosszán kibocsátott sugárzás egy úgynevezett *Mach-kúpot* ír le (1. ábra). A részecske útvonala és a sugárzásirány közötti θ szög a részecske $v = \beta c$ sebessége és a $c' = c/n$ fénysebesség közötti aránytól függ η törésmutatójú közegben:

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

Ezáltal a *Cserenkov-sugárzás* annak az ultrahangkúpnek 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 (α finomszerkezet és c fénysebességnél) a *Frank-Tamm-képlet* alapján:

$$\frac{d^2N}{d\omega dx} = \frac{z^2\alpha}{c} \sin^2 \theta$$

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

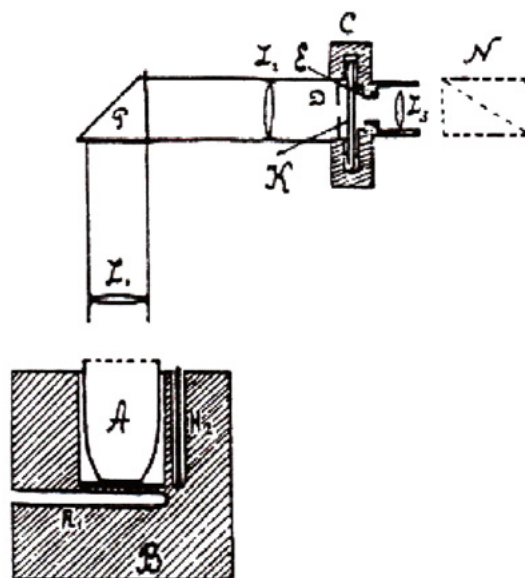
A *Cserenkov-sugárzás* kék színű, mert a helyükre visszazökkent és fényt kibocsátó elektronokat nagy energiájú (nagysebességű) részecske zavarta meg. Nagy energiák itt rövid hullámosságokat jelentenek, amik a kék spektrumszínt okozzák. Ezért látjuk kék színűnek a *Cserenkov-sugárzást*.

Mint csaknem minden felfedezésnek a tudományban, a *Cserenkov-sugárzásnak* is voltak előzményei. Így például elméletileg azt előre látták már 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 járó, a 20. század elején végzett vizsgálatok közben megfigyelték a kékes fényt, ami főleg sötétben rádium-sókat tartalmazó üvegedényeikből sugárzott¹. 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 meghatározásánál, ami különböző átlátszó tárgyakból emittálódott radioaktív sugárforrás közelében. *Malet*, *Fabry-féle* spektrométerrel és fotografikus módszert használva rájött, hogy a spektrum folyamatos és azt a 370 nm-ig terjedő mérés 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

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.

Leingrádban kezdte el kutatási tevékenységét a nem-lineáris 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 *Liszenko* 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 ezalatt 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 uranil-só oldatokat kellett 10 mg-ot tartalmazó kénsav-oldatos rádium-forrásból származó elektronokkal besugározni. *Cserenkov* első kísérletei szabadszemes mérések voltak sötét helységben, ahol a sugárzás felvillanását és intenzitását egy kioltásos (quenching) eljárással mérte. Ezek nehéz és kényes mérések voltak, amik nagy türelmet és kísérleti ügyességet igényeltek. A mérés során előbb a kísérletezőnek 1-2 órát teljesen sötét helységben 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 uránilsó 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-*



2. ábra. A *Cserenkov* által tervezett és sajátkezűleg kivitelezett fotométer [29]

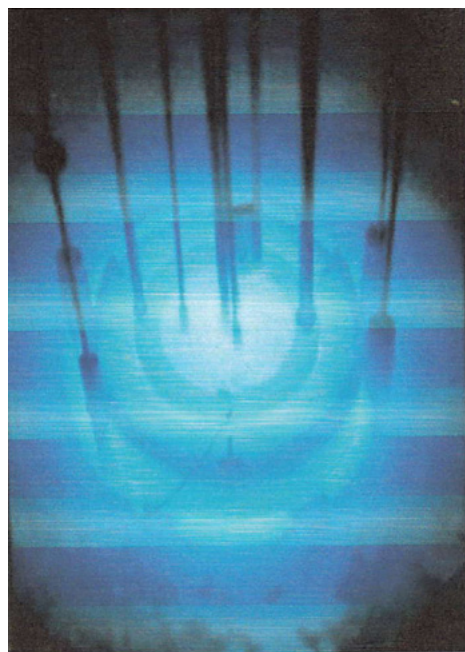
A: a luminofor anyagot tartalmazó üvegedény az üvegedény falvastagsága áteresztette az α - és β -részecskéket, valamint a α -fotonokat; **B:** az üvegedényt tartó faalap; **N1** és **N2:** 103.6 mg rádiumot tartalmazó ólomédényt befogadó nyílások; **N2:** polarizációs mérésekhez használt Nicol prizma; **L1:** kolimátor; **P:** prizma; **L2, L3:** teleszkópot képző lencsék; **E:** optikai szűrőket tartó keret; **K:** optikai ék; **D:** látómező

elvnék megfelelően történik a behatoló gammasugárzás 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 luminizenciából származik, és a továbbiakban messzemenően támogatta 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 sem világviszonylatban, 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 gya-



4. ábra. Vízhűtéses atomreaktor fűtőelemzónájában megfigyelhető kék színű Cserenkov-sugárzás

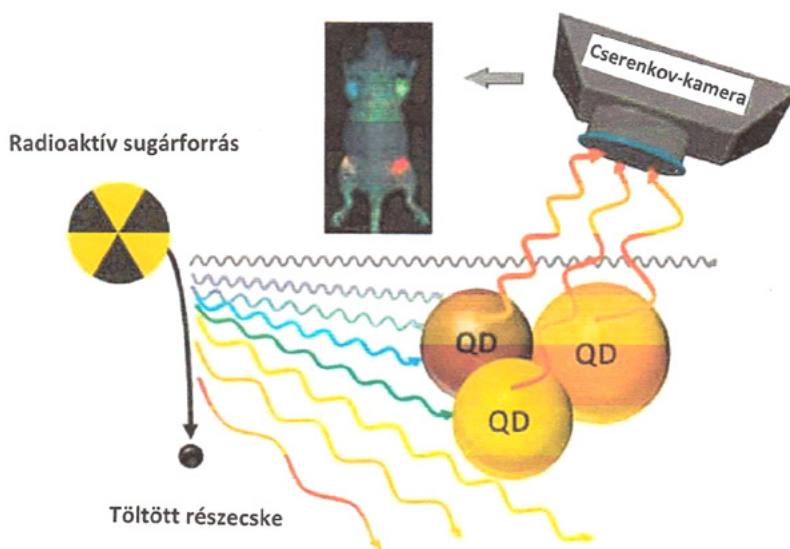


3. ábra. Cserenkov átveszi VI. Gusztáv Adolf svéd királytól az 1958-as fizikai Nobel-díjat [14]

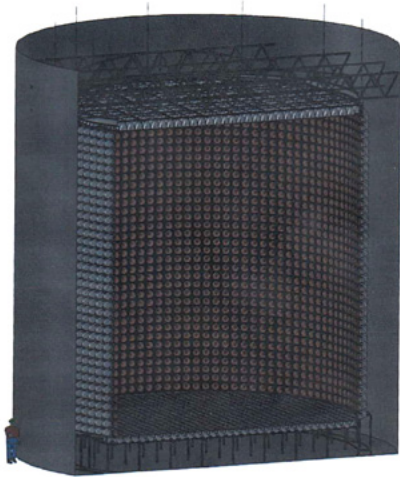
re. az ezekből a töltött részecskékből létrehozott Cserenkov-sugárzást használják a kozmikus, vagy gammasugárzás forrásának és intenzitásának meghatározására, de alkalmazzák a Cserenkov-sugárzást számos részecskefizikai méréshez is [6]. A Cserenkov-sugárzás egyik legérdekesebb és legújabb igénybevétele a a biomolekulák in vivo detektálása és meghatározása (4. ábra). Ugyanis például a foszfor -32 könnyen építhető be enzimatiszintetikus módszerrel biomolekulákba és ezáltal biosugaras útjuk és kölcsönhatásuk biomolekulákkal az élő szervezetben Cserenkov-detektorokkal [16] jól meghatározható és követhető [17, 18] (5. ábra).

A Cserenkov-sugárzás jövője

A Cserenkov-sugárzás egyik legújabb és világbiztonsági szempontból legérdekesebb és legbiztosabb alkalmazása az Egyesült Államokbeli US National Nuclear Security Administration [19] által indított és folyamatban lévő WATer Cserenkov Monitor of AntiNeutrinos



5. ábra. Cserenkov-sugárzás alkalmazása biomolekulák nyomkövetésére élő szervezetekben [16] QD: kvantum pont (jelzett molekula)



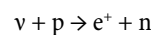
6. ábra. Több kilotonna gadolíniumsót tartalmazó vízzel töltött WATCHMAN neutrino detektortartály keresztmetszete [20]

(WATCHMAN) projektje [20].

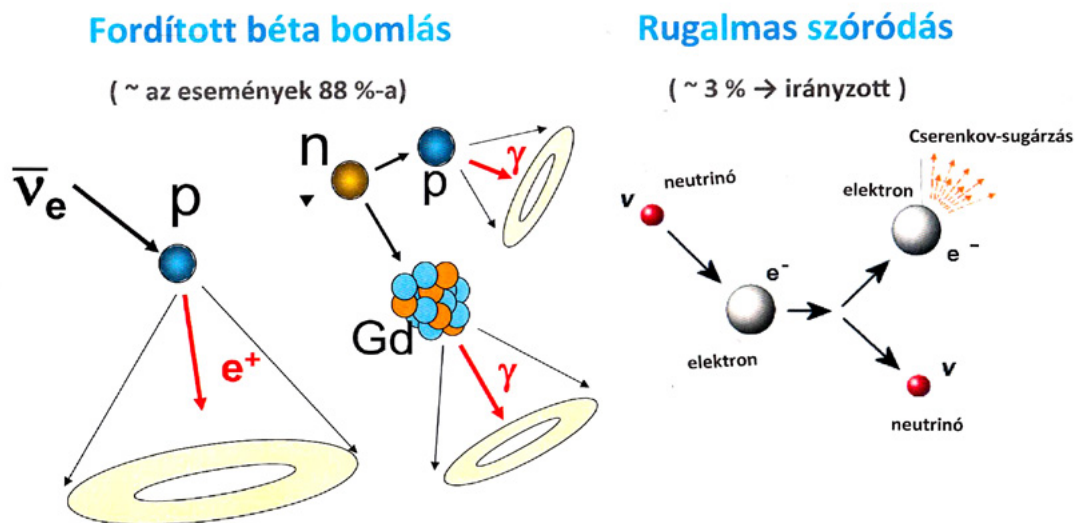
Mint elnevezése is mutatja, a WATCHMAN Cserenkov-sugárzás alapján működő neutrino, pontosabban antineutrino detektor-rendszer. Az általában a görög ν betűvel jelzett neutrínók és antianyag ekvivalensnek számító antineutrínók nagyon kis tömegű, töltés nélküli elemi részecskék, amik a töltéssel rendelkező elektronokkal, muonokkal és tamokkal együtt *leptonoknak* tekinthetők, azaz elektron antineutrínókként ($\bar{\nu}_e$), muon antineutrínókként ($\bar{\nu}_\mu$) és tau neutrínókként (ν_τ) fordulnak elő [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 megemlítendő, hogy a 2015. évi fizikai Nobel-díjat Takaaki Kajita japán és Arthur B. McDonald kanadai kutatóknak ítelték „for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass” (a neutrínók oszcillációjának felfedezéséért, ami bizonyítja, hogy a neutrínóknak

van tömegük). Neutrínók óriási mennyiségben képződnek csillagokban, mint például a napban, szupernovák 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 azon áthaladó neutrínók nagy részét. Ezek szerint nincs olyan védelem, árnyékolás, akadály, ami a neutrínók útját állná az űrből (nap, szupernova), 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 (6. ábra) tervezik a neutrínókat detektálni. Ugyanis gadolíniumsókat tartalmazó víztartályokat már régebben is javasolták nagyméretű neutrino és antineutrino detektorokként [23, 24]. A gadolínium-tartalom az antineutrino-proton szóródás által keletkezett neutrínók detektálására szolgál:



itt $\bar{\nu}$ az antineutrino, p a célproton és e^+ és n a végső reakciótermékek, azaz a pozitron és a neutron. A tiszta vizet tartalmazó Cserenkov-detektorhoz hasonlítva a gadolínium-jelenlét a végső termékként jelentkező neutrino detektálás körülbelül hatszoros növekedését teszi lehetővé (7 ábra). Ezt a gadolínium-mag két hasznos jellegzetessége hozza létre, a termikus neutronok befogását megkönnyítő nagy hatáskeresztmetszete (49000 barn) és a befogás utáni gerjesztett gadolínium-magból származó aránylag nagy energiájú gammasugár-kibocsátás. Még 0.1 % gadolíniumsósúlyszázalékot tartalmazó víz is befogja körülbelül 85 %-át a fordított béta-bomlásból származó neutrínóknak. A befogás utáni $\sim 8\text{MeV}$ -os gammakaszcad erős Cserenkov-impulzust, sugarat hoz létre, ami a mindenütt jelenlévő sugárháttérnél jelentősen magasabb. Ez az időben korrelált jel összeköti a neutron az azt néhány tized mikroszekundummal megelőző pozitron kibocsátott energiával. A neutronok által kilökött elektron által előidézett Cserenkov-sugárzás iránya a gadolíniumot tartalmazó nagy víztartályok falaiba szerelt érzékeny fotodetektorokkal határozható meg.



7. ábra. A WATCHMAN (WATER CHERENKOV MONITORING OF ANTI-NEUTRINOS) Ga-víz-tartály detektorok Cserenkov-sugárzás alapján működő neutrino detektor működési mechanizmusa [24]

Azonban ez a módszer nem képes különbséget tenni neutrínók és antineutrínók között. Ennek azért van jelentősége, mert a magreakció, ami az urán nemhasadó változatát az atombombákba való plutóniummá változtatja, antineutronokat állít elő. Ezzel ellentétben a fúzió, ami a nap és a csillagok energiáját hozza létre, neutrínókat termel. Ahhoz, hogy egy atomreaktor földrajzi helye a fentiek szerint meghatározható legyen, különbséget kell tenni neutrínók és 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-sugár villanást* hoz létre. A neutron eközben ütközget ide-oda, míg eltalál egy gadolínium atomot. A nagy befogási keresztmetszetű, mondhatnánk neutronokra nagytékű gadolínium-magok egy második fényvillanást generálnak. Az egymást gyorsan követő két villanás (7. ábra) jelzi, hogy a készülék egy antineutrínót fogott be. Ennek értelmében 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-effektus*, 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.

HIVATKOZÁSOK

- [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
- [3] T. Braun, A. 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, p. 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_Cherenkov
- [13] P. A. Cherenkov, *Visible emission of clean liquids by action of gamma radiation, Dokl. Akad. Nauk SSSR*, (1934), 2, 451 (orosz 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.Praty, 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.Kamyshkov, 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] 4 Feb. 2015
- [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 Cerenkov Radiation as a Function of Electron Energy, Phys. Rev.* (1943) 64, 1