

FOGÁSZATI RÖNTGENFILMEK A FIZIKÁBAN – 3. rész

Természetes radioaktivitás: K-40, háttér és Rn-222

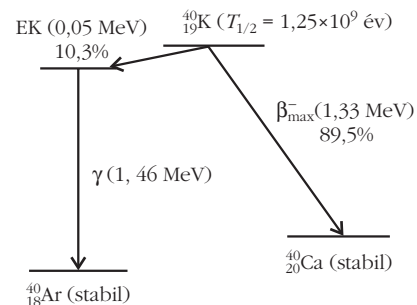
Fülöp László, Brázai Gergő

BMSZC Trefort Ágoston Két Tanítási Nyelvű Szakgimnáziuma

Kocsonya András

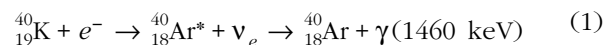
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Közismert, hogy a közvetlen környezetünkben előforduló, spontán sugárzó radioaktív anyagok között – a légkörben jelenlévő radon és bomlástermékei mellett – 40-es tömegszámú izotópjával kiemelt helyen szerepel a kálium [1, 2]. A sokféle vegyületben, talajban és az emberi szervezetben is megtalálható kálium 0,0117%-át képezi a természet kuriózumaként is emlegetett K-40 izotóp [3]. A milliárd éves felezési idejével, az alfa-bomló, nagy tömegszámú urán és tórium mellett, valóban különleges a mindhárom béta-bomlásra képes K-40 atommag. Tankönyveken túl, az oktatási vagy ismeretterjesztési céllal készült internetes oldalakon, az elektronbefogás [4], pozitron [5] vagy béta-részecskék emissziójára [6] vonatkozóan a K-40 a legjobb példa, és természetesen, megtalálható az izotóp részletes leírása is [7, 8]. A káliumvegyületek közül elsősorban a káliumklorid (KCl) – közismertebb nevén a kálisó – érdemel figyelmet, mint egyszerű, tantermi demonstrációs kísérletekhez (GM-csőhöz) ajánlott természetes sugárforrás [9]. Számunkra, a fogászati röntgenfilmjeinkkel elkezdett kísérletsorozatunkhoz is kiváló kísérleti anyag [10, 11]. Mivel ezidáig kizárólag csak mesterséges izotópokat helyeztünk a filmekre, ahol egytől egyig a gamma-sugárzás okozta feketedéseket vizsgáltuk, eleve izgalmasabb-

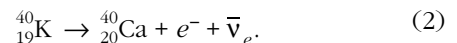


1. ábra. A K-40 egyszerűsített bomlási sémája.

nak ígérkezett a kálium kínálta vegyes, gamma- és béta-sugárzás (1. ábra) „filmestítése”. Az 1. ábrán nem tüntettük fel a 0,001% és a 0,2%-os valószínűségű átmeneteket, és a továbbiakban a jelen tanulmány tárgykörétől távol álló részletek nélkül vizsgáljuk a K-elektronhéjról történő elektronbefogással járó gamma-sugárzást



és a nagyobb valószínűségű klasszikus béta-bomlást



Mint minden béta-sugárzásnál, az atommagból származó elektronok spektruma nullától a végponti energiáig (jelen esetben 1,33 MeV-ig) folytonos, a nagyobb számú béták energiája a végponti érték harmada körül jelentkezik, az összenergiában osztozva az antineutrínó energiájával. A közvetlenül a filmekre helyezett káliumtartalmú anyagok okozta feketedések nagyobb részét a béta-részecskéktől, kevesebb hozzájárulással az 1. ábra (1) átmenet szerinti 1,46 MeV-es gamma-sugaraktól származnak. Kísérleteink igencsak időigényesek – hónapokig tartjuk a vegyületeket filmjeinken –, az eredmény viszont annál látványosabb, és mint szugesztív szemléltető eszközt, a táblavázla-

Az Energiatudományi Kutatóközpontból köszönettel tartozunk *Lakosi Lászlónak* a hasznos észrevételeiért. A kézirat gyors szerkesztését *Luczek Zsuzsának* köszönjük.



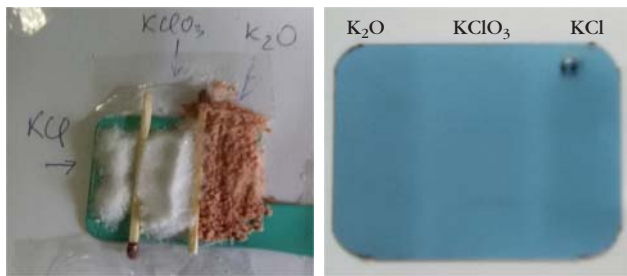
Fülöp László harmincöt éves pályafutásából huszonnégy évet a kispesti, egykori nevén a Trefort Ágoston Kéttannyelvű Szakgimnáziumában tanított. 2001-ben tehetségdíjazásért Ericsson-díjjal jutalmazták.



Brázai Gergő a BMSZC Trefort Ágoston Két Tanítási Nyelvű Szakgimnáziumának 10. osztályos tanulója. Atomfizikát önszorgalomból az interneten (*SchoolPhysics*) tanulmányozott, majd bekapcsolódott a röntgenfilmek feketedésmérésébe.



Kocsonya András fizikusként végzett az ELTE-n, majd ugyanott PhD fokozatot szerzett 2007-ben. Egyetemistaként kezdett a KFKI-ban a részecskegyorsítónál dolgozni, ahol 15 évet töltött el az ionsugaras analitika, röntgenemissziós spektroszkópia területén. Az elmúlt évtizedben elsősorban gamma-spektroszkópiával foglalkozik a sugárvédelem, környezetellenőrzés és a nukleáris anyagok biztosítéki felügyelete területén.



2. ábra. Káliumklorid (KCl), káliumklorát (KClO₃) és vöröskáli (K₂O műtrágya) a filmtasakon és feketedések a röntgenfilmen egy hónap alatt.

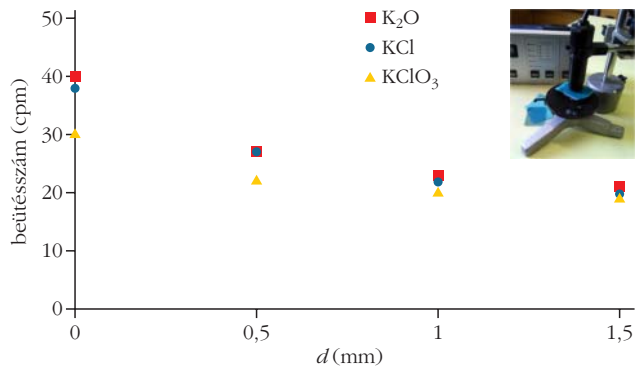
tok mellett bármikor felhasználhatjuk. Ugyancsak szemléltető eszközöknek szánjuk és/vagy szakköri kiegészítő segédanyagként kezeljük a félvezető detektorral fölvetett K-40, háttér és egy szűrt levegőminta gamma-spektrumait.

Dolgozatunk mondanivalóit két csokorba gyűjtöttük. Az első részben különböző káliumtartalmú vegyületek feketedéseit vizsgáljuk, és megpróbáljuk a gamma-sugarakat leválasztani a vegyes, gamma- és béta-sugárzástól. Érintőlegesen megemlítünk néhány tudománytörténeti érdekességet a kálium radioaktivitásával kapcsolatosan. A második részben egy szűrt levegőminta gamma-spektrumán keresztül mutatjuk be a radon bomlástermékeit. A kísérletet itt is kiegészítjük röntgenfilmes és GM-csőes méréssel, és mintegy kitekintésként, a gamma-spektrum elemzésével, föl hívjuk a figyelmet olyan látszólag eltérő jelenségek közötti kapcsolatra, mint a radioaktivitás és a karakterisztikus röntgensugárzás.

Kálium 40 és háttérsugárzás

Első kísérletünk a 2. ábrán látható. A filmre káliumklorid, káliumklorát és vöröskáli került. A vöröskáliat a szakzsargonban K₂O műtrágyának aposztrofálják és az egyszerűség kedvéért mi is így használjuk, megjegyezve, hogy a „műtrágya” tulajdonképpen egy természetes, bányászott termék (származási helye Fehéroroszország), és a képlet a káliumtartalomra (60% K₂O vagy 90% KCl) és nem a vegyi összetételre utal [12]. A 2. ábrán látható elrendezéshez hasonlóan, a KCl és KClO₃ mellett, sokféle variációban, különböző káliumtartalmú vegyületekkel (KMnO₄, KBr, KNO₃) is feketítettünk. Többszöri és amennyire csak lehetett pontos vizsgálatok tárgyát képezte – alább részletezendő okok miatt – a KCl és a K₂O feketedéseinek mérése külön-külön és egymás mellett a filmekben. Kíváncsiságból és a látvány kedvéért, káliumtartalmú gyógyszereket (Kálium-R, Panangin), továbbá 15%-os káliumtartalmú műtrágyát (N-P-K 15-15-15) is vizsgáltunk. Mindezekről a képeket föl tettük szertárunk Facebook-oldalának *Káliumshow* albumjába [13].

Jelen írásunkban olyan mérhető és összehasonlítható eredmények feldolgozásával foglalkozunk, mint a 2. ábrán látható feketedések mérése, az előző publikációban részletezett leírás alapján [11]. Ezzel párhu-



3. ábra. A káliumvegyületek GM-csővel mért beütésszámjai, különböző vastagságú plastiklemezekkel takarva.

zamosan, az eredményeket összevetjük a 3. ábrán látható GM-csőes mérés grafikonjáról vett néhány ponttal. Kis elméleti bevezetésként, a fajlagos aktivitásokra vonatkozó numerikus számításokkal kezdünk.

Az ismert módon kiszámítjuk 1 g KCl és KClO₃ aktivitását

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{M} N_A.$$

A megfelelő moláris tömegeket, felezési időt, az Avogadro-számot behelyettesítve és figyelembe véve a 0,0117%-os K-40 tartalmat a számított értékek arányai, valamint a 2. ábrán látható feketedések méréséből származó arányok az alábbiak:

$$\frac{A_{\text{KCl}}}{A_{\text{KClO}_3}} = \frac{15,24 \text{ Bq}}{9,16 \text{ Bq}} = 1,66, \quad (3)$$

$$\frac{S_{\text{KCl}}}{S_{\text{KClO}_3}} = \frac{0,13}{0,08} = 1,62.$$

A jónak mondható egyezés ellenére, további kérdéseket a K₂O-val kapcsolatos anomáliák vetettek fel. A vöröskáli és a kálisó feketedésének mértéke ugyanakkora (és nem csak ennél az egy mérésnél), holott pusztán a 90%-os KCl tartalomból eredő aktivitásból a K₂O-nak valamivel halványabbnak kellene lennie. Ráadásul, többszöri és különféle módon végzett GM-csőes mérésnél, mindig nagyobb aktivitás mutatkozik a K₂O-nál, mint a KCl-nál. Csak egy példa a 3. ábrán látható összeállítás eredménye. Itt egy kis tálkában azonos mennyiségű apróra tört káliumos vegyületeket töltöttünk, a GM-csővet 2 mm-re állítva a tálka fölé, mértük a percenkénti beütésszámokat. Utána négy darab, a 0,25 mm-es filmtasakból kivágott lágy plastikot, és két, szintén 0,25 mm-es keményebb műanyagot (előhívott filmet) kombinálva abszorbensként, 0,5 mm-es lépésekben letakarva a vegyületeket, megismételtük a méréseket. Mindegyik mérésnél 20 cpm átlagát tettük föl a grafikonra. Eredeti szándékunk szerinti célunk az volt, hogy a béta-részecskék elnyelésével kvalitatív módon képzeljük el egy folytonos spektrumot a kisebb, átlagos és a kevés nagyobb energiájú béta-részecskeszámmal. Ettől eltérő jellegű kvantitatív eredményeket a be-

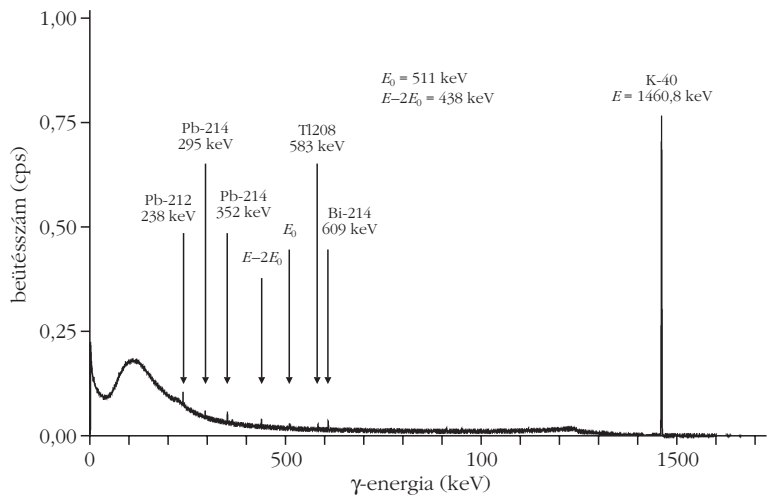
ütésszámok összehasonlításából kaphatunk. Kezdetben a sima ($d = 0$) felületekhez tartozó impulzusszámok arányai – a 18 cpm háttér levonása után – a káliumklorid és káliumklorát esetében kiváló egyezést adnak a (3) arányok számértékeivel

$$\frac{N_{\text{KCl}}}{N_{\text{KClO}_3}} = \frac{38-18}{30-18} = 1,66. \quad (4)$$

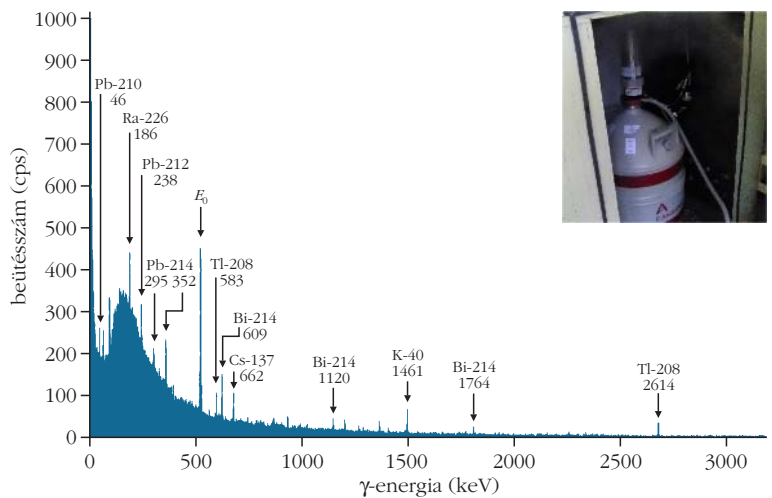
A K_2O -ra vonatkozó beütésszámok viszont mindig nagyobbak (egyszeri esetben éppen azonosak), a KCl-nál mértnél. Ezért, és a feketedéseknél tapasztaltak miatt a vöröskáli gamma-spektroszkópiai vizsgálatnak vetettük alá (4. ábra). A spektrumot Canberra BE2825 típusú HGe detektorral vettük fel. A háttér levonása után, a spektrumban a prominens káliumvonal mellett fölfedezhető, ha csak nyomaiban is, az urán–rádium és a tórium bomlási sorozatok [14] két-két reprezentánsa (Pb-214, Bi-214 és Pb-212, Tl-208), mint természetes szennyeződés. Mivel az úgynevezett műtrágya tulajdonképpen egy természetes kőzet, az eredmény nem hat a meglepetés erejével. Ha a Pb-, Bi-, Tl-izotópok béta-, valamint a gamma-sugárzás detektálása szempontjából „láthatatlan” Po-izotópok alfa-sugarait is figyelembe vesszük [15], úgy nyilvánvaló, hogy a vöröskáli aktivitása, ha kis mértékben is, de meghaladhatja a KCl-ét, amint az GM-csővel egyértelműen kimutatható.

A 4. ábra spektrumát érdemes a háttér-spektrummal (5. ábra) egyszerre vizsgálni, ahol a K-40 mint természetes háttérvonal jelentkezik. (A spektrumon az izotópok szimbólumai alá az energiákat írtuk keV-ben. A bomlásformák és a vele járó gamma-energiák felkutatásához a [15] megfelelő izotópokra vonatkozó részét, vagy ugyanígy a sokkal részletesebb [8] hivatkozást is használhatjuk.) A 6. ábrán az urán–rádium sorozat Ra-226 utáni részét szemléltetjük. Bejelöltük a bomlásformákat és a felezési időket, a gamma-sugárzás – ha van – energiája az 5. ábrán látható vonalaknál szerepelnek. Egy 1917-es kiadású könyv [16] alapján az izotópokhoz a történelmi elnevezésüket is kiírtuk, a korabeli ismereteknek megfelelően egy kérdőjellel a végén.

A Pb-210 46 keV-es gamma-sugárzása az első éles vonal a spektrumon. Mellette a 63 keV és a 93 keV-es általunk nem jelölt vonalak, a bomlási sor elejéről a Th-234-től származnak. A Bi-214-nek több gamma-kibocsátása is van (és egy a fenti sorban nem jelzett 0,03%-os alfa-elágazása), a részletes energiadiagram az átmenetekkel nyolc oldalra rúg a [8] megfelelő ré-



4. ábra. A K_2O műtrágya gamma-spektruma.

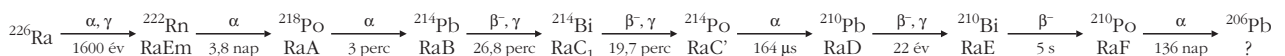


5. ábra. Háttérsugárzás gamma-spektruma a Canberra detektorral.

szében. Az 5. ábra spektrumán a Pb-214 és a Bi-214 legnagyobb valószínűségű vonalait nyilaztuk be. Bejelöltük még a Ra-226-ot, a 186 keV-es gamma-vonallal és a tórium-sorozatból a Pb-212-t és a Tl-208-at. Mindezekon kívül fontosnak tartjuk megemlíteni, hogy a spektrumban a természetes izotópok mellett megjelenik a 30 éves felezési idejű Cs-137 mesterséges izotóp a maga 662 keV-es vonalával. A Cs-137 1945, a kísérleti és egyéb atomrobbantások kezdetétől az egész Földön – mifelénk legfőképpen az 1986-os csernobili atomkatasztrófa maradványaként – előfordul. Megfelelően érzékeny detektorral a talaj legfelsőbb rétegeiben 20-30 cm mélyséig, valamint a légkörben is kimutatható [17, 18], de például egy mélyen a földből bányászott vöröskáli spektrumában a Bi-214 609 keV-es vonala mellett (4. ábra) nem jelentkezik a 662 keV-es Cs-vonal.

Az említett 1917-es kiadású könyvből, mint a radioaktív hőskor kiváló összefoglalójából, emeljünk ki

6. ábra. A rádium 226 bomlási sora.





7. ábra. Két film között egy használt film, rajtuk a K_2O és a filmekken megjelenő feketedések 104 nap után.

egy mondatot a káliumra vonatkozóan: „Már 1905-ben kimutatta Thomson J. J., hogy a kálium és rubidium igen gyenge sugárzó tehetséget mutatnak.” A szerző egy későbbi, 1925-ös kiadású, a nagyközönségnek szánt népszerűsítő könyvében [19] így folytatja: „Igaz, hogy a sugárzótehetségük csak nehezen észlelhető, igen gyenge, azonban a legkülönbözőbb helyekről beszerzett kálium vagy rubidium tartalmú anyagoknál is mindig ugyanakkora, tehát az aktivitás, nyilvánvalóan a káliumhoz és rubidiumhoz kötött jelenség és nem valamely hozzájuk keveredett szennyezés eredménye. A kálium is és a rubidium is igen lágy β -sugarakat lövelnek ki. ... Látható tehát, hogy a kálium és rubidium aktivitása egészen jól tanulmányozható jelenség, érdekes azonban, hogy bomlástermékeiket ezideig nem sikerült megtalálni és így még kérdéses, hogy sugárzásuk tényleg atombomlással járó radioaktív jelenség-e.”

A bevezető sorainkban írtak a K-40-ről az (1) és (2) átmenetekkel, jóval 1925 után született eredmények feldolgozásai. Az 1930-as évek elejéhez tartozik a Pauli neutrínóhipotézisére alapozott Fermi-elmélet a béta-bomlásról. A K-elektronhéjról történő befogás kísérleti bizonyossága (1937) Luis Alvarez nevéhez fűződik [4]. A kálium 40-es tömegszámú izotópjának azonosítása szintén a 30-as évek végéhez köthető. Ha az atommag elnyel egy elektront a K-héjról, úgy a kvantumosság arra tanított, hogy a K-héj üres elektronhelyét kötelező betölteni az L-héjről, ami karakterisztikus röntgensugárzást von maga után (K-40 esetében 3 keV-es $ArK\alpha_1$, vagy helyette Auger-elektronok távoznak az L-héjről [4, 8]). Ezen jelenségek részletes vizsgálata az 1940-es évek végéről, a pontosabb mérések és további bővebb adatok gyűjtése különféle izotópokra az 1960-as évektől eredeztethető, a rohamos tempóban fejlődő félvezető-technológiának köszönhetően. Ma már az izotópok azonosítására legfőképpen a gamma-spektroszkópia használatos [2]. Az 1910-es években a gamma-sugarakat még körülményesen detektálták, és csak sejtették a monoenergiás (vonalas) jellegüket, közeli rokonságot feltételezve a karakterisztikus röntgensugarak K és L vonalaival, Barkla (1911) és Moseley (1913) nyomán [16]. Az 1930-as évek elejétől ismert a pozitron létezése [5]. A spektrumokban megjelenő E_0 és a 4. ábrán megjelölt

$E - 2E_0$ energiák az 1,02 MeV-nél nagyobb energiájú gamma-fotonok elektron-positron párkeltésével és annihilációjával kapcsolatosak, de részletesebb elemzésekbe nem bocsátkozunk. A filmes kísérleteinkre való tekintettel inkább Thomson eredeti, 1905-ös cikkét (*On the Emission of Negative Corpuscles by the Alkali Metals* – megtalálható a [20]-ban jelzett internetes hivatkozásban) vizsgáljuk meg alaposabban. Tudván, hogy 1900-ban Becquerel, Thomson katódsugaras e/m módszerét alkalmazva mutatta ki, hogy a béta-részecskék tulajdonképpen elektronok [6], elsősorban Thomson mérési módszerére voltunk kíváncsiak. (Másodsorban, a cikk érdekes fejtegetéseket tartalmaz a még atommag nélkül elképzelt atomról.) Thomson használta ugyan Becquerel fényképező lemezeit, de csak kimutatandó, hogy a K-Na vegyület sugárzása nem fotoelektronos hatásból származik. (A halvány külső fény, amennyiben nem feketíti meg a lemezt 48 óra alatt, akkor fotoelektronokat sem indukálhat – érvelt Thomson.) A K-Na minta fölötti érzékeny elektroszkóp jelzi a sugárzást, és egy, a minta fölött keresztbe alkalmazott mágneses tér a sugárjelzést megszünteti.

A továbbiakban, a röntgenfilmek kínálta lehetőségekkel élve, kétféleképpen próbáljuk meg elkülöníteni tisztán a gamma-sugarakat a vegyes, béta- és gamma-sugárzástól. K_2O -val dolgozunk, mert aktivitása valamivel nagyobb a KCl-énál. A 3. ábra $d = 1,5$ mm, majdnem teljesen elnyelő rétegvastagságra irányítva figyelmünket, kialakítottuk a 7. ábrán látható filmszendvicset, ahol a két tasakos film közé egy már előhívott, használt filmet helyeztünk. Mivel a filmek egyik oldalának felén duplán szerepel a 0,25 mm-es borító, úgy számolhatunk, hogy az alsó film fölötti anyagok (két film + borítók + vékony levegőréteg) vastagsága körülbelül 2 mm. Ez nagyjából megfelel a 3. ábrán a K_2O fölötti GM-cső 2 mm-es ($d = 1,5$ mm plasztik + levegő) beállításának. A felső film egyik felére az eredeti formájában megtartott darabos, a másik felére apróra zúzott vöröskálit szórtunk, majd 104 napig a filmekben tartottuk. Előhívás után a felső film egyik részén megszámlálhatók az eredeti közetdarabok nyomai, a másik részén meg kiválóan mérhető az egyenletes feketedés. Az alsó filmen csak halványan, de látszik a gyenge feketedés. Összehasonlítva a felső és az alsó filmek S feketedéseinek arányát a GM-csőves mérés grafikonjáról a 0 és 1,5 mm-es távolságoknál látható N beütésszámok arányával, valami jelzésértékűnek mondható egyezést találunk:

$$\frac{N_0}{N_{1,5}} = \frac{40 - 18}{21 - 18} = 7,33; \quad \frac{S_F}{S_A} = \frac{0,41}{0,07} = 5,85.$$

Mindkét arány arra utal, hogy valamilyen részecskék hatolnak át a „filmszendvicsten”. Nem tévedhetünk nagyot, ha kijelentjük, hogy míg a felső filmen a béta-részecskék a gammákkal együtt okozzák a feketedést, addig az

alsó filmen már lényegében a nagyobb áthatoló képességű gamma-fotonok.

Egyik következő próbálkozásunkban mágneses térrel igyekeztünk leválasztani a γ -fotonokat a β -részecskéktől. Mágneses filmhasábot készítettünk a 8. ábrán látható módon. Extra erősnek mondott neodímium mágnespárt – egymással párhuzamosan, ellentétes pólusokkal – helyeztünk el egymástól 2,8 cm-re, ezek alkották hasábnk két áttellenes oldallapjának egy-egy darabját. A másik két párhuzamos oldallap a 1,5 cm-re levő két film. A mágnesek és a filmek közé az alaplapra 0,8 cm vastagságban, darabos K_2O műtrágyát szórtunk. A hasáb fedőlapja, 4 cm-re a káliumtól, szintén egy film, a közepére ragasztott ólomdarabbal. (Az ábrán szaggatott vonallal jeleztük a káliumot és a fatartót lefedő részeket.) A kis aktivitás miatt a rendszeret hosszú ideig tartjuk ebben a helyzetben. A 8. ábrán látható eredmény 154 nap után jelentkezik. Szemmel látható az oldallapok feketedése közötti különbség, és a fedőlapon halványan kivehető az ólomdarab kontúrja. A két oldallapfilmen vegyesen vannak jelen a béta- és a gamma-nyomok, de a mágneses tér hatására a kálium felszínéhez közeli részen több béta-nyommal az egyik, mint a szemközti filmen. A borító filmen, a 4 cm-es levegőrétegen és a film tasakján is átjutó gamma-fotonok okozzák a halvány elszíneződést. Észrevehető még, hogy a filmek alsó részének (a filmjelző pontok alatti területeknek) is eltérő a feketedése. Itt egyenletesen azonos feketedésre számítottunk, de valószínűleg az erős mágneses tér az anyagon belül is érezteti hatását. Megfigyelhető az is, hogy a filmek mellé helyezett K_2O darabkák öt hónap alatt sem feketítenek annyira, mint közvetlenül a filmre helyezett darabok három hónap alatt (7. ábra). További kísérleteket végzünk ez irányban, és különböző neodímiummágnesekkel is dolgozunk más variációkban, de eredményekről – időigényessége miatt – csupán Facebook-látvány szinten is, csak később tudunk beszámolni.

Radon 222

A radon az ötödik fölfedezett radioaktív elem volt az urán, tórium, rádium és a polónium után. Noha az irodalom hivatalosan, így az általunk használt *Négyjegyű függvénytáblázatok* is F. E. Dornt (1900) tartja felfedezőnek, a Wikipedia szerint E. Rutherford és munkatársa, R. B. Owens (1899) a tényleges felfedezők [1]. Rutherford és Owens az általuk emanációnak (később tóriumemanációnak) nevezett gázt, míg Dorn a rádiumemanációt mutatta ki. 1903-ban Debierne megtalálta az aktíniumemanációt. Kezdetben többféle elnevezés is használatban volt például toron, radon, aktinon (további részletek az [1]-ben), de ma már egy-

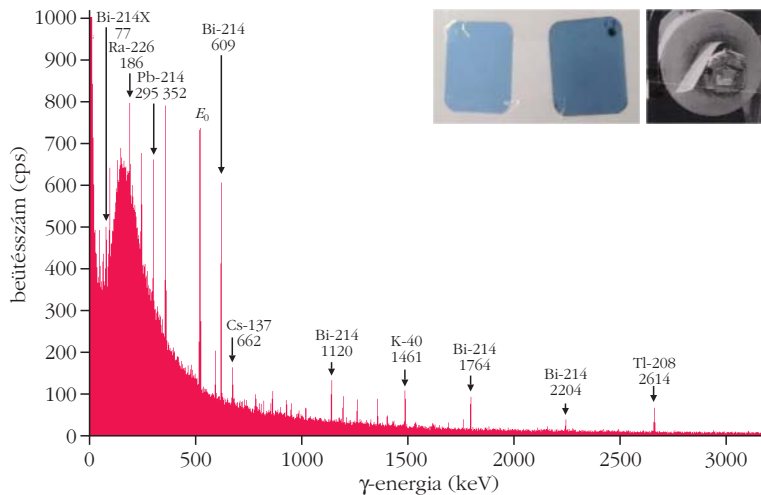


8. ábra. Mágneses filmhasáb és az öt hónap alatti feketedések a felső és az oldalsó filmekben. (Részletek a szövegben.)

segesen radonizotópokról (Rn-220, Rn-222 és Rn-219) beszélünk. Közülük a leghosszabb felezési idejű (3,8 nap) az Rn-222, és jelentőségének korai felismerését bizonyítandó, ismét következék egy idézet az 1917-es könyvből [16]: „Az adatokból nyilvánvaló, hogy a rádium földünkön mindenütt el van terjedve. Ezt mutatja egyébként, hogy megtaláljuk a közönséges talajban, gázalakú termékét, a rádium-emanációt, a talajvízben, a levegőben, és pedig aránylag nagyobb mennyiséget a levegőnek alsóbb rétegeiben, a barlangok és pincék és a talajon át szívatott levegőben.”

Alább, egy „a talajon át szívatott levegővel” kapcsolatos 2017-es kísérletünket ismertetjük.

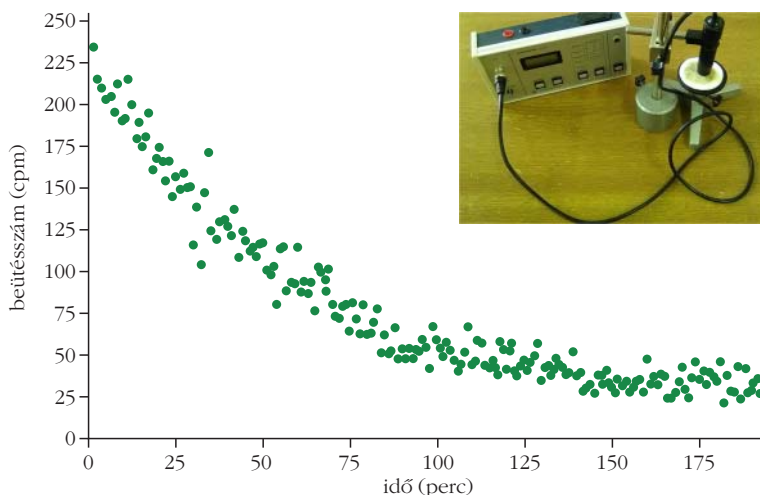
Az eredeti ötletet az iskolánk előtti tér nagyszabású rehabilitációs programja – szabadidős sportpályák, járdák, parkolók kialakítása – adta. A program kezdetén, az iskola falától kezdődően, közvetlenül a szertárunk ablakai alatt egy 60×80 m² földterületet bontottak föl. Munkagépekkel és kézi szerszámokkal mélyen és hosszú ideig ásták a talajt. (Az építkezés fél éves föld-kavics-járdalap fázisairól készült képek megtekinthetők Facebook-oldalunk *Háttér* albumjában [13]). Hogy ne csak a zaj és a por meglétével szerezzünk tudomást az építkezésről, a szertár ablaka melletti asztalra egy légszivattyút – aerodinamikai kísérleteknél használatos levegőpumpát fordított (szívó) üzemmódban alkalmazva – állítottunk be. Légszűrő betétként használt rongyok és porózus műanyagfilterek közé röntgenfilmet helyeztünk (9. ábra). Április közepétől június közepéig a mindenkori szokásos szellőztetéssel – napi átlagban négy órát (szombatokat és vasárnapokat is beleértve) – jártattuk a légszivattyút. Olvasmányaink alapján reméltük, hogy a feltételezhetően megnövekedett radonkoncentráció miatt a filmtokra és a szűrőkre rakódó aeroszolok befeketítik a filmet. Két hónap elteltével,



9. ábra. Két hónap után, a filmes levegőszűrőről leszedett rongyok egy műanyag tasakban fölkerültek a detektorra. A spektrum itt látható. A film feketedése is jól kivehető egy fátólfilm mellett.

mérés nélkül is látható az előhívott film és egy fátólfilm közötti lényeges különbség (9. ábra). Az építkezésből származó radon járulékat nem tudjuk megállapítani, de gamma-spektroszkópiai vizsgálatból kiderül, hogy valóban a radon szilárd bomlástermékeiről van szó. A film körüli szűrőanyagok egy műanyag zacskóba helyezve fölkerültek a detektorra. (Közben eltelt másfél óra, hiszen a Canberra detektorok nem a szakgimnáziumi alapfelszerelések szekrényéből kerülnek elő.) A detektor a mintával közel 24 órát mért folyamatosan (a 4. ábrán látható háttérrel 16 órás „üresjáratú” detektorral vettük fel). Az eredmény a 9. ábrán látható. A háttérhez viszonyított, általunk vastagabb nyilakkal jelzett Pb-214 és Bi-214 vonalakat érdemes arányaiban nézni a mellettük lévő vonalakkal. A radonnal és az aeroszolokhoz tapadó szilárd bomlástermékeivel sokszor találkozunk olvasmányainkban anélkül, hogy bármilyen szemléletes, kísérleti evidenciát is találnánk mellékelve. Úgy gondoljuk, hogy demonstrációs mérésünknel a spektrum, összehasonlítva a háttérrel, eléggé meggyőző,

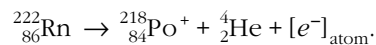
10. ábra. Húsz perc alatt gyűjtött levegőminta aktivitásának mérése GM-csővel. A folyamatosan mért percnkénti beütésszámokat ábrázoltuk az idő függvényében.



és szemléltető eszközként kiválóan felhasználható a röntgenfilmek mellett. Számunkra, mint lelkes röntgenkísérletezőkre – akik egy hatvan éves kislélesi csővel próbálkozunk a diffrakciós foltokban karakterisztikus röntgensugarat találni [11] – élményszámba megy, hogy a levegőből szűrte, holmi kacat rongydarabokon felfogott porszemcséken látjuk a Pb-214 77 keV-es karakterisztikus röntgenvonalát. Mivel lényegében minden radioaktív bomlásnál nemcsak az atommag alakul át, de a legbelsőbb K és L elektronhéjak is valamilyen formában átrendeződnek, a bomlás leányelemeihez kisebb-nagyobb valószínűségű karakterisztikus röntgenvonalak társulnak, mint a szóban forgó Pb-214-nél a spektrumon jelzett BiK α 1.

Befejezésül, hogy ez utóbbi kísérletnél se maradjon ki a GM-cső és a radon lényeges alfa-sugárzó leányeleméről, a Po-218-ról se feledkezzünk meg, egy rövid idő alatt elvégezhető standard demonstrációs mérést ismertetünk. Hangsúlyozzuk, hogy didaktikai-módszertani szempontok és nem precíziós radonaktivitás-koncentrációból mért dózisértékek pontos kimutatása – amelyekhez viszonyítva természetesen csak „látványos” de semmitmondó a „mérésünk” [21] – vezérelnek. Ennek ellenére, a szokásosnál valamivel igényesebb kivitelezésben, nyugodtabban előkészítve (tanítási szünetben, június végén), hosszabb ideig dolgoztunk. A légszivattyúra szűrőként arctisztító vattakorongot szereltünk és az egy héti szellőztetésen szertárban húsz percen át járattuk a szivattyút. Utána azonnal GM-cső alá raktuk a szűrőt, és folyamatosan mértük a percnkénti beütésszámokat. Az értékeket kétperces léptékben föltettük a 10. ábrán látható grafikonra. Főfigyelhetünk a radioaktivitás jellegzetességeire (aktivitás csökkenése, szórás), és az előző félvezető-detektoros mérésnél másfél óra kimaradás jelentőségét is érzékelhetjük. Elméletileg, többek között a

légköri radon bomlásával kapcsolatosan is, hangsúlyozni szokták a bomlás pillanatában keletkezett termékek (Po, Pb, Bi) – a legkülső elektronok gyenge, néhány eV-os kötési energiájával kapcsolatos – rövid ideig (körülbelül 1 másodpercig) tartó pozitív ion jellegét [22]. Főleg egyetemi jegyzetekben [23], mind az alfa-, mind a bétabomlásnál – a megszokott írásmódot kiegészítendő – szögletes zárójelben jelzik az atomhéjról távozó elektronokat. Mindezeket összekombinálva, az általunk kedvelt Rn-222-re vonatkozó bomlás írásmódja a következő:



Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a bomlástermékek könnyebben „ragadnak” nega-

tív töltésű léghő aeroszolokhoz. Mintegy bizonyításként, az iménti légszűrős kísérletet ismételtén elvégeztük ugyanígy előkészítve, ugyanennyi ideig szivattyúzva a levegőt, csak közben bekapcsoltuk a szivattyútól három méterre levő szikrainduktort. Egy-két perc után égett szagot éreztünk, de a szikrainduktort a légszivattyúval együtt húsz percig bekapcsolva hagytuk. Utána rögtön a GM-cső alá helyezve a filtert, a számláló az első percben lényegesen magasabb, 600 fölötti beütésszámot jelzett.

Bemutatott kísérleteink hasznos vagy haszontalan voltának az eldöntését az olvasóra bízunk.

Irodalom:

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Radon>
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Background_radiation
3. http://www.radioactivity.eu.com/Potassium_40.htm
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_capture
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission

6. https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay
7. <https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium-40>
8. www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/K-40_tables.pdf
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_potassium
10. Fülöp L., Takács K.: Fogászati röntgenfilmek a fizikában. *Fizikai Szemle* 67(2017) 400.
11. Fülöp L., Brázai G., Kocsonya A.: Fogászati röntgenfilmek a fizikában, 2. rész. *Fizikai Szemle* 69(2019) 90.
12. <https://duna-horizont.hu/kalium-mutragyak.html>
13. www.facebook.com/fulopfizika
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain
15. <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucleide...>
16. dr. Weszelszky Gy.: *A rádióaktivitás*. Kir. Magy. Természettudományi Társulat, Budapest (1917) 75–178.
17. <https://en.wikipedia.org/wiki/Caesium-137>
18. <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-cesium-137>
19. dr. Weszelszky Gy.: *A rádium és az atomelmélet*. Szent-István Társulat, Budapest (1925) 61.
20. https://en.wikipedia.org/wiki/j_j_thomson
21. <http://www.t-es-t.hu/minden/tudom/radon.htm>
22. <https://www.fe.infn.it/radioactivity/materials/...pdf>
23. Vértes A.: *Magkémia I. – egyetemi jegyzet*. Tankönyvkiadó, Budapest (1987) 78–85.

HÍREK – ESEMÉNYEK

NYIRATI LÁSZLÓ (1948–2019)

Egészen különleges egyéniség volt. Éppen ezért szinte lehetetlen bemutatni. Életrajzi adataival is csak azért érdemes kezdeni, mert ezek jelzik szakmai sokoldalúságát, és utalhatnak arra, hogy mennyire sok emberrel volt kapcsolata, milyen sok közösséghez tartozott.

Faddon (Tolna megye) született 1948. augusztus 15-én. Itt járt általános iskolába, majd a szomszédos Tolnán a Földvári Mihály Gimnáziumban tanult tovább, és 1966-ban érettségi vizsgát tett. Sikeres felvételi vizsgája alapján – előfelvéttként letöltött sorkatonai szolgálata után – az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karán kezdte meg tanulmányait matematika-fizika-ábrázoló geometria szakon. Középszintű tanári oklevelét 1972-ben kapta meg. 1973 és 1979 között – a Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Karának műszer- és irányítástechnikai szakán – villamosmérnöki oklevelet szerzett, majd 1985 és 1987 között a Kossuth Lajos Tudományegyetem Természettudományi karán szerzett számítástechnika szakos középiskolai tanári oklevelét.

Az 1972/73-as tanévben a 327. sz. Ipari Szakmunkásképző Intézetben (Székesfehérvár) állt munkába, majd 1973-tól 1995-ig az Ybl Miklós Szakközépiskolában tanított. Közben – óraadó tanárként – az újonnan induló székesfehérvári Tóparti Gimnáziumban segített létrehozni az iskolai géptermet, és évekig tanított is ott. 1992-ben – sikeres pályázata alapján – a megyei pedagógiai intézet szaktanácsadója lett; a matematika, fizika, technika és számítástechnika tantárgyak gon-

dozása lett a feladata a középiskolai intézményekben. 1995-ben lett a székesfehérvári Kodolányi János Főiskola adjunktusa, ahol tanszéki csoportvezetőként az informatikatanítás volt a fő feladata. Ugyanebben az évben – a pedagógiai intézetben történt átszervezés miatt – az egyes tantárgyak külön szaktanácsadókkhoz kerültek; ő a számítástechnika (informatika) tantárgy mellett döntött, ennek szaktanácsadója lett. Többszöri pályázata után és a pedagógiai intézet átnevezéseit követően, annak 2008. évi megszűnése után a feladatot ellátó jogutódszervezetek sem vonták vissza ezt a megbízást, a cím tehát örökössé vált. A főiskoláról ment nyugdíjba 2007 végén. Nyugdíjasként – mint óraadó – haláláig tanított a székesfehérvári Széchenyi István Műszaki Szakközépiskolában.

Felesége szintén matematika-fizika szakos tanár, lányuk orvos, fiuk mérnök lett.

Már pályája elején, az Ybl Szakközépiskolában elköteleződött a fizika mellett, ami a 80-as évek elején a számítástechnikával egészült ki. Személyes kapcsolatai révén még az iskola-számítógépes program 1983-as elindítása előtt szerzett az iskolájának egy ABC80 típusú mikroszámítógépet (házi számítógép – HC), így a megyében azonnal a program élvonalába került. Az elsők között írt szimulációs programot azokra a gépekre, amelyeket az iskoláknak ajánlottak; a program két fém közötti diffúziót szemléltette. Ezért aztán hamar rátalált a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat budapesti szervezeténél már működő házi számítógépes csoport, amely egyik fő céljának az iskolák szak-