

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

Atommagfizika az oktatásban

Környezeti radioaktivitás vizsgálata és szemléltetése

Gyórfi Tamás

Témavezető: Dr. Raics Péter



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2011

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Bevezetés.....	3
Célok.....	5
Kísérleti módszerek	7
Eredmények.....	9
Az eredmények hasznosítása	13

Summary of the PhD thesis

Introduction	15
Aims.....	17
Methods.....	19
Results of my investigations.....	21
The utilization of the results	25

Irodalomjegyzék/ Reference.....

Publikációk/ Publications

Bevezetés

A radioaktivitás és az ennek kapcsán fellépő ionizáló sugárzások a természet részét képezik. Az élet kialakulását, az emberi egyedfejlődést végigkísérte a sugárzások jelenléte. Azt is mondhatjuk, hogy az ionizáló sugárzások az élet velejárói. Egyetlen érzékszervünkkel sem szerezhetünk közvetlen tapasztalatot róluk, viszont nagyon jól és pontosan mérhetők. A sugárzásokat érzékelő berendezéseknek számos típusa ismeretes. A ködkamra volt az első olyan eszköz, amellyel a részecskék pályáját vizuálisan ki lehetett mutatni.

A ködkamrák működésük alapján két csoportba oszthatók attól függően, hogy a túltelítettséget hirtelen térfogatnöveléssel (*expanziós* vagy *Wilson-féle ködkamra*) hozzák létre vagy a kamra terén belüli hőmérséklet-gradienssel (*diffúziós ködkamra*). Az expansziós ködkamrában létrejövő térbeli nyomkialakulást villanófény segítségével fényképezik le. A diffúziós ködkamra folyamatos észlelést tesz lehetővé.

A középiskolai atommagfizika oktatásban viszonylag kevés a kísérletezési lehetőség és a demonstrációs eszköz. Kísérletek nélkül a természettudományok, főként a fizika és benne az atommagfizika, megmarad félreérthető, kevésbé megfogható és ezért misztikus jellegűnek. A diffúziós ködkamra segítségével mindenki a saját szemével győződhet meg arról, hogy a sugárzások jelen vannak a környezetünkben. Azoknak a diákoknak, akik a radioaktivitásról tanultak, de ezzel kapcsolatban közvetlen tapasztalatokat sohasem szereztek, nagy élményt jelenthet olyan kísérletek bemutatása, amelyben meggyőződhetnek a radioaktív sugárzás jelenlétéről. A Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén üzemelő berendezés sokoldalúan szolgálja az oktatást és ismeretterjesztést.

A radontól származó sugárzás a lakosság természetes eredetű sugárterhelésének mintegy felét adja. Kimutatható a radon szerepe a tüdőrák-gyakoriság növekedésében, ezért vizsgálata megkülönböztetett figyelmet érdemel. Magyarországon az *atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról szóló 16/2000. (VI.8.) számú EüM rendelet 2. sz. melléklet I/2.2. pontja* a munkahelyekre éves átlagban az $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ -es radon koncentráció értéket, mint cselekvési szintet határozta meg, ami 0,4-es egyensúlyi faktor és 2000 óra/év munkaidő esetén $6,3 \text{ mSv/év}$ sugárterhelést jelent. Korábbi vizsgálatok igazolták, hogy a föld alatti üregekben, barlangokban, bányákban ennek az értéknek a többszöröse, gyakran több tízszerese is

előfordul éves átlagban. Így joggal vetődött fel a kérdés, hogy a barlangokhoz több tekintetben is hasonló földalatti borpincékben is előfordulhatnak-e a rendeletben megállapított cselekvési szintet meghaladó értékek. Ennek felmérésére az MTA Atommagkutató Intézet Radon Csoportjának segítségével (2004-től kezdődően) vizsgálatokat végeztem a Hajós-Baja borvidék egyes borpincéiben.

(A Hajós-Baja borvidéken több mint 1200 pince található, ez Európa legnagyobb összefüggő pincefaluja.)

Ipari balesetek, katonai célú fejlesztések szomorú következményeit a tudomány nem könnyen akadályozhatja meg. Ugyanakkor, az így létrejött helyzetből eredő hatások vizsgálata, békés célú, jövőbe mutató, az embereket szolgáló felhasználása már nemcsak lehetőség, hanem kötelesség is. Talajok feltöltődésének hagyományos meghatározását jól kiegészíti, esetenként ellenőrizheti, sokszor pedig felválthatja a ^{137}Cs nuklid mélységi eloszlásának mérése. Ezt a technikát hasadási termékek nem szerencsés körülmények közötti levegőbe jutása tette lehetővé (nukleáris robbantások, reaktorbaleset). Technológiai hibák miatt a környezetbe került rendkívül veszélyes anyagok (pl. vörös iszap) radioaktivitásának ellenőrzése hatásosan segíti a katasztrófa következményeinek szakszerű és gyors felszámolását.

Célok

Céлом a PHYWE gyártmányú diffúziós ködkamra oktatásban történő alkalmazásának bemutatása volt, valamint olyan oktatási segédanyagok létrehozása, amelyek érdekesen, közérthető nyelven, főként a középiskolás diákok számára nyújtanak segítséget a radioaktivitás, az atommagfizika jelenségeinek megértésében. Mindezek bemutatása során számos lehetőség nyílik a tanulók gondolkodásának fejlesztésére, a fizika iránti érdeklődésük növelésére. Az egyetemi oktatásban laboratóriumi gyakorlatként elmélyítheti a hallgatók atommag- és részecskefizikai tudását, élőbbé teheti a környezeti radioaktivitással kapcsolatos ismereteket és tapasztalatokat.

További célként szerepelt a Hajós-Baja borvidék egyes borpincéiben a levegő ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció és annak változásainak felmérése. A pincéket magába foglaló kőzetből vett mintákat gamma-spektrometriai módszerrel vizsgáltam. Azt kívántam megállapítani, hogy van-e korreláció a pincék levegőjének radon koncentrációja valamint a földminták urán és tórium tartalma között (NORM: *Naturally Occuring Radioactive Materials*, azaz Természetben megjelenő radioaktív anyagok).

A Nyéki-Holt-Duna a Gemenci Tájegység egyik fokozottan védett hullámtéri holtmedre. Magyarország déli részén, Pörboly mellett található. A mederterület feltöltődését geodéziai módszerekkel (Mátrai, 2010) határozták meg korábban. A kapott mérési eredmények összehasonlításához, pontosításához gamma-spektrometriai módszerrel meghatároztam a lerakódott üledék korát, amelyből a feltöltődési sebességre lehetett következtetni. A méréshez a jól detektálható ^{137}Cs izotópot ($T_{1/2}=30,07$ év) használtam. Ez a nuklid az 1950-es és 1960-as évek légköri atomrobbantásainak, valamint az 1986-ban bekövetkezett csernobili reaktorbalesetnek következtében került a légkörbe, majd jutott a talajba. Az izotóp jelenléte és az aktivitáskoncentráció görbék mélység szerinti eloszlása utal a lerakódott üledék korára. Ezekre a mintákra is meghatároztam a NORM aktivitáskoncentrációkat.

A 2010. október 4-én bekövetkezett vörösiszap-katasztrófa során átszakadt a MAL (Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Zrt). tulajdonában lévő Ajkai Timföldgyár Kolontár és Ajka között létesített, $300 \times 500 \text{ m}^2$ vörösiszap-tárolójának gátja. A kiömlő, körülbelül $600\,000$ – $700\,000 \text{ m}^3$ iszap elöntötte Kolontár, Devecser és Somlóvásárhely települések mélyebben fekvő részeit. Az erősen lúgos, maró hatású ipari

hulladék körülbelül 800 hektáron terült szét, felbecsülhetetlen gazdasági és ökológiai károkat okozva a térségben. Sajnálatos módon a baleset emberi életet is követelt.

A vörösiszap maró hatása és lehetséges radioaktív sugárzása ijedséget keltett az ott élő lakosságban. Az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóságtól 2010. október 15-én, fél liter folyékony vörösiszap mintát kaptunk, amelyet a Kolontár melletti Torna patak partján gyűjtöttek össze. Gamma-spektrometriai módszerrel, az országban az elsők között, meghatároztam a kiömlött vörösiszap radioaktivitását (TENORM: *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*, vagyis Technológiailag megnövelt koncentrációjú természetben megjelenő radioaktív anyagok).

Kísérleti módszerek

A háttérsugárzás és a radioaktív sugárzások kimutatására a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén található PHYWE gyártmányú diffúziós ködkamrát használtam. Az eszközt a Göttingeni Egyetemen fejlesztették ki demonstrációs célokra. Magyarországon a Paksi Atomerőmű Tájékoztató és Látogató Központja, a budapesti Csodák Palotája és a Miskolci Egyetem Fizika Tanszéke rendelkezik még ilyen nagyfelületű, $45 \times 45 \text{ cm}^2$ -es detektorral, amely képes folyamatosan megjeleníteni a különféle sugárzások nyomait. A háttérsugárzás és a mesterséges radioaktivitás eseményeinek rögzítésére videokamerát alkalmaztam.

A mérésekhez $Th(B+C)$, ^{235}U , ^{232}Th , ^{222}Rn , ^{241}Am alfa-, $^{90}Sr/Y$ béta- és $^{239}PuBe$ neutronforrást, valamint urán tartalmú kőzeteket használtam fel.

A hajósi borpincékben végzett vizsgálatok során ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció meghatározásához Radamon típusú maratottonyom-detektoros radonmonitorokat alkalmaztam. A Radamon egy 35 mm külső átmérőjű és 18 mm magasságú üreges plasztik henger, amely egy $1-2 \text{ cm}^2$ területű CR-39 típusú polimer nyomdetektort tartalmaz. A lemezeket a bristoli egyetemen gyártják (TASL). A detektor tartalmaz egy hidrofób szűrőpapírt a levegőben lévő szilárd aeroszolok és a radon bomlástermékek leválasztására, továbbá egy polietilén szűrőfóliát a toron (^{220}Rn) kiszűrésére. A kiértékelést a szokásos kémiai eljárás utáni mikroszkópos nyomszámlálással végeztük a megfelelő kalibrálást alkalmazva (Csige és Csegi, 2001). Az eredményeket radon-aktivitáskonzentrációként [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$] adtam meg. A Hajós-Baja borvidéken az integráló méréseket 2004 és 2006 között végeztem, évszakokhoz igazodóan, negyedéves besugárzási időket alkalmazva. Egy-egy pincében 2-3 detektort helyeztem el fejmagasságban, a földemtől 30 cm-re. A Radamonnal végzett mérések hibája 10-20% között volt.

A gyors időbeli változások és a légnyomástól való függés vizsgálatára egy kiválasztott pincében AlphaGUARD típusú ionizációs-kamrás radonmérőt használtam, amely a hőmérsékletet, a légnyomást és a relatív páratartalmat is rögzítette óránként. Az AlphaGUARD-dal végzett radonmérés hibája 2-5% között volt.

A gamma-spektrometriai mérésekhez a DE Kísérleti Fizikai Tanszékén egy CANBERRA gyártmányú, GC2018 típusú, hordozható, nagy tisztaságú germánium (HpGe) detektort használtam. Ennek érzékeny

térfogata $\sim 100 \text{ cm}^3$, relatív határfoka 20 % (Canberra 2002). Az analizált energiataromány 60 keV-2,7 MeV volt 8192 csatornában. A detektor energiafelbontása 1332 keV esetén 1,8 keV, a csúcs/Compton aránya pedig 50.

A vizsgált 0,15-0,5 kg tömegű mintákat a detektor belépő-ablakának közvetlen közelében helyeztem el úgy, hogy a tégelyek alja a kriosztát ablakát érintette. A detektort és a mintát zárt ólomvédelem vette körül árnyékolás céljából, melynek a kriosztáthoz közeli része Al-Fe-Cu-Cd lemezzel volt burkolva. A kiterjedt mintákra vonatkozó hatások meghatározása standard pontforrások (^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{241}Am) különböző geometriákban történő mérésével nyert diagramok felhasználásával történt, amit szimuláció egészített ki. A minták radon emanációjának mértékét és a szükséges korrekciókat külön kísérletek segítségével állapítottam meg.

A spektrumok felvételét, megjelenítését és feldolgozását egy asztali számítógép és a GENIE2K szoftver (Genie 2000) segítségével végeztem el. Alacsony aktivitású mintákról lévén szó, a mérési idő általában fél- és egy nap között változott. A relatív statisztikus hiba a minta tömegétől, származási helyétől és a nuklidoktól függően 1,2-54 % közötti volt, a szisztematikus hibát 8 %-ra becsültem.

A NORM és TENORM vizsgálatoknál a földminták urán, tórium és kálium tartalmát a száraz tömegre számított $[\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}]$ aktivitáskoncentrációk segítségével jellemeztem. A ^{238}U és a ^{232}Th magra vonatkozó értékeket az adott bomlási sorhoz tartozó leánymagok aktivitáskoncentrációinak átlagából, míg a ^{235}U esetében a ^{238}U és ^{235}U fajlagos aktivitásának viszonya segítségével határoztam meg. Ez utóbbival hibahatáron belül egyezett az a saját, ellenőrzésre alkalmas kísérleti eredmény, amelyet az ^{235}U és ^{226}Ra közeli vonalainak analízisével kaptam különlegesen jó energiafeloldású méréssel.

Eredmények:

Tudományos munkám során kapott eredményeket az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1. Meghatároztam a PHYWE gyártmányú diffúziós ködkamra működésének jellemzőit, a nyomkialakulás folyamatát. A háttér-sugárzásban és egyéb folyamatokban megfigyelhető részecskéket (alfa, proton, elektron, foton) hatótávolságuk, fékezőképességük illetve kölcsönhatásaik (nyomszerkezetük) alapján azonosítottam.

A diffúziós ködkamrával a következő kísérleteket végeztem: müonok észlelése, elektronok (β^- -részecskék) mágneses eltérítése, Rutherford-szórás Ag-fólián alfa-részecskékkel, $^{14}\text{N}(\alpha,p)^{17}\text{O}$ magreakció, neutron-proton szórás, valamint felezési idő meghatározása. A sugárzások nyomait videokamerák segítségével rögzítve a ma már elsősorban csak bemutatásra használt eszköz kvantitatív mérések végzésére vált (újra) alkalmassá [12].

A különféle nyomkialakulásokról készült képekből és videofelvételekből adatbázist hoztam létre, amely az oktatásban jól használható. A 2006-os debreceni „Radioaktivitás: a természet része” című kiállításon megtekinthető volt az általam készített felvételekből összeállított poszter. A Miskolci Egyetem Fizika Tanszékén is felhasználták a diffúziós ködkamráról készített felvételeimet [20].

A bajai Eötvös József Főiskolán is bemutatott „Radioaktivitás: a természet része” című kiállítás megszervezésében, lebonyolításában, és a kiállítás ismeretterjesztő honlapjának elkészítésében meghatározó szerepem volt [27].

2. Kifejlesztettem egy képfeldolgozó programot a diffúziós ködkamra segítségével megfigyelhető sugárzások videofelvételeinek, fényképeinek kiértékelésére. A program a tömörített „avi” illetve „bmp” formátumú állományokban a pixelek színe alapján megkeresi a részecskenyomokat, megállapítja azok kezdő- és végkoordinátáját, majd ezekből a hosszúságot kiszámolja. A részecskenyomot alkotó pixelek száma megadja az adott nyom területét, a terület és a hosszúság hányadosa pedig a szélességét [25].

A ködkamrában megjelenő nyomvonalak hosszúsága függ a részecskék energiájától és irányától. A nyomhosszúság mérésekből a részecskék energiája meghatározható. Energia-eloszlás, hatótávolság-

energia függés számolható az adatokból. A nyomok vastagságából (a ködfonal eltűnésének idejéből) a részecskék ionizációs képességére lehet következtetni.

Készítettem egy honlapot ahol a diákok elsajátíthatják a radioaktivitás megértéséhez szükséges elméleti alapokat, bővíthetik tudásukat. Egy internetes közvetítést nyújtó IP-kamerával a diffúziós ködkamrában kialakuló folyamatok valós idejű megfigyelése is lehetséges. Animációk, képekből-, videofelvételekből álló adatbázisok állnak rendelkezésre, és útmutatók alapján lehetőség nyílik az egyes kísérletek adatainak egyéni vagy csoportos feldolgozására is [26].

3. A Hajós-Baja borvidék 11 borpincéjében vizsgáltam a levegő ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció változásait két éven keresztül.

A pincékben a ^{222}Rn aktivitáskoncentráció széles határok, $0,1-4,0 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ között változott. Majdnem mindegyikben megfigyelhető szezonális változás, jellemzően téli maximummal és nyári minimummal. A ^{222}Rn aktivitáskoncentráció négy pincében meghaladta a munkahelyekre vonatkozó $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ cselekvési szintet. A Hajós-Baja borvidék borpincéiben a dolgozók havonta átlagosan csak 1 hetet töltenek. Ennek és a szellőzésnek is köszönhetően, az éves radon-sugárterhelésük alatta marad annak, amit folyamatos munkavégzés mellett a korlátot jelentő $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ -ben kapnának [7].

4. A megengedettnél nagyobb ^{222}Rn aktivitáskoncentráció okait vizsgálva, gamma-spektrometriai módszerrel megmértem a pincékből származó földminták NORM aktivitáskoncentrációját. A négy borpincében (és különösen az 5. számúban) mért kiugróan nagy ^{222}Rn aktivitáskoncentrációhoz nem tartozott a földmintákban magas NORM-aktivitás. Megállapítottam, hogy a többi pincebeli minta sem mutat értékelhető korrelációt a radontartalommal az adott geokémiai körülmények között [2].

A kapott eredményeket összehasonlítottam más területeken végzett mérések adataival és megállapítottam, hogy azok az itthon és a Föld más országaiban végzett mérések határai közé esnek (Fehér és Deme, 2010).

Az egyik borpince légterében megmértem a ^{222}Rn aktivitáskoncentráció időbeli változását egy AlphaGUARD típusú ionizációs kamrás radonmérő műszerrel, továbbá ugyanezzel a műszerrel vizsgáltam az atmoszférikus légnyomás változását is. Azt tapasztaltam,

hogy a ^{222}Rn aktivitáskonzentráció ellentétesen változik a légnyomással. A jelenség értelmezésére a közreműködésemmel modellszámításokat végeztünk, amelynek során feltételeztük, hogy pórúsgáz szivárog keresztül a pince befoglaló kőzetének falán az atmoszférikus légnyomás változásainak hatására. Modelleztem a gáz áramlását a kőzetben, valamint a pince légterében is. Figyelembe vettem a pince légterének a felszín felé való szellőzését is a pince bejáratán keresztül. A gázáramlás ismeretében modelleztem továbbá a ^{222}Rn gáznak a befoglaló kőzetben, illetve a pince légterében való transzportját. Eredményeimet összehasonlítottam a méréssel nyert adatokkal. Megállapítottam, hogy a modell jól értelmezi a mért ^{222}Rn aktivitáskonzentráció idősorokban megfigyelhető változásainak egy részét. A változásoknak azt a részét, amelyet ezzel a modellel nem tudtam értelmezni, más meteorológiai hatásoknak, például a külső és a belső hőmérséklet különbségből, a csapadék mennyiségtől, illetve a szél erősség változásaiból adódóknak tulajdonítottam [1].

A radon aktivitáskonzentrációjában a pincék hossza szerinti eloszlás számított értékei és maratottonyom-detektoros adataim jól egyeznek a megfelelő keveredést mutató diffúziós állandó feltételezésével.

5. Gamma-spektrometriai módszerrel meghatároztam a Nyéki-Holt-Duna ágba lerakódott üledék korát, amelyből a felhalmozódási sebességet kiszámoltam [4]. A méréshez a ^{137}Cs izotópot használtam. A mederterületről származó talajszelvény elemzéséből megállapítottam, hogy a „száraz” mintában a ^{137}Cs 35 cm körüli mélységben van most jelen, ez megfelel 58,3 cm-es mintavételi mélységnek. A vizsgált minta méretéből adódóan az 1950-es és 1960-as évek légköri atombombabombantásaiból származó ^{137}Cs -ot nem lehetett kimutatni. Ennek a valószínűsíthető mélysége 130 cm lehet (Braun et al., 2003).

A ^{137}Cs 1986-ban a csernobili baleset során szóródott a környezetbe, a mintavételezésre 2005-ben került sor. Lineáris modellt feltételezve, 19 év alatt az üledékképződés sebessége 3,1 cm/évnek adódik, feltéve, hogy közben a területet nem bolygatta senki és a víz sem mosta lejjebb. Ez jó egyezést mutat a geodéziai módszerrel ugyanott meghatározott 3,2 cm/év értékkel [4]. A radioaktív szelvényezési módszert feltöltődési sebesség meghatározására mások is használták (Dezső et al., 2009). Az általam végzett mérés eredményének

az említett független (Mátrai, 2010), nem-nukleáris módszerrel való jó egyezése viszont a módszer használhatóságának bizonyítását jelenti.

A vizsgált minta NORM aktivitáskoncentrációja a szokásos talajok értékeit mutatta.

6. Meghatároztam a vörösiszap-katasztrófából származó minta száraz tömegre vonatkozó TENORM aktivitáskoncentrációját gamma-spektrometriával. Értéke ^{232}Th és ^{238}U esetén 5-6-szor nagyobb mint a NORM-aktivitásoké. (Egy gyors, kvalitatív röntgen-fluoreszcenciás analízist is elvégeztem, amely az egyéb nehéz elemek jelentős feldúsulását mutatta.) ^{40}K -ra viszont csak egy átlagos 1,73-as arány adódott, ami ugyan növekedés, de a NORM mintáinknál a legnagyobb és legkisebb érték hányadosa is 1,75 volt.

Az ugyanezen baleset más területeiről származó mintákhoz (Somlai et al., 2010) képest az általam mért NORM-aktivitások kb. feleakkorák, de a vörös iszapra jellemző értékhatárok (Jobbágy et al., 2009) közé esnek. Ezek egy 4-5-szörös tartományt fognak át, ami az alapanyagok, technológiák, valamint mintavételezési helyek különbözőségéből adódik.

A vörös iszap radon-emanálóképessége mintegy kétszerese a sokkal szárazabb talajokénak. Ez a mintaszerkezetek (porozitás, szemcseméret, nedvességtartalom) különbözőségével magyarázható [2].

Az eredmények hasznosítása

A dolgozat a radioaktivitás és az atommagfizika jelenségeivel foglalkozik. Ez a témakör nagyon gazdag alkalmazási területekkel rendelkezik: környezetvédelem, ipari- és mezőgazdasági, valamint orvosi-biológiai felhasználás. A jelen téma célkitűzéseiből adódóan a bemutatott jelenségek, az elért eredmények, a kidolgozott módszerek alapvetően a közoktatás és az ismeretterjesztés, valamint a környezetvédelem területén hasznosíthatók.

A ködkamrának az oktatásban történő felhasználása során a diákok közvetlen élményt szerezhetnek a természetes és mesterséges radioaktivitás területéről, a részecskék tulajdonságairól, a kvantumvilág jellegzetességeiről, a folyamatok véletlenszerűségéről, a klasszikus és modern fizika egységéről. A kép- és videoanyagok, a kiértékelést segítő leírások, programok a tanórákon és szakköri foglalkozásokon, valamint az egyetemi oktatásban eredményesen használhatók.

A részecskenyomok kiértékelésére készített kép- és videofeldolgozó programok alkalmasak többek között a szilárdtest nyomdetektorok és fotoemulziós felvételek kiértékelése, meghatározott alakú és méretű alakzatok felismerésére, összeszámlálására.

A radioaktivitással kapcsolatos méréseim és eredményeim a környezetvédelem szempontjából jól hasznosíthatók: radon probléma, talajok aktivitása, folyómeder feltöltődési sebessége, ipari szennyeződések tulajdonságai.

Az általam végzett környezeti radioaktivitás mérések tervezése, kivitelezése, eredményeinek feldolgozása és elemzése a közoktatásban résztvevők számára megmutatja egy meglehetősen összetett tudomány kutatási módszertanát, interdiszciplináris vonásait, a különböző tudományos és műszaki területeken dolgozó szakemberek együttműködésének fontosságát.

A diffúziós ködkamra és a radioaktivitás mérésére alkalmas kísérleti eszközök meglehetősen drágák. Egy magyarországi középiskolának nincs lehetősége és nem is lehet célja, hogy ezeket az eszközöket megvásárolja. Ezért, véleményem szerint, olyan új körülményeket kell teremteni, hogy az ilyen különleges műszerek, modern eszközök és módszerek elérhető legyenek mindenki számára. Ennek több útja van:

- felsőoktatási intézmények, kutatóintézetek és ismeretterjesztő centrumok egyedi eszközeinek bemutatása és lehetőség szerinti

használata a laboratóriumok ajtajának szélesre tárásával (pl. Kutatók Éjszakája, Fizikus Napok);

- kísérletek, mérések interneten történő bemutatása, élő internetes közvetítések;
- vizuális anyagok, mozgatható eszközök kiállítása és interaktív felhasználása;
- oktatási anyagok, kiértékelő programok a közoktatás szolgálatában.

Nuclear Physics in Education

Introduction

Radioactivity and the appearing ionizing radiation is part of the environment. The evolution of life and ontogeny had been seen through the presence of radiation. We can thus tell in general that ionizing radiation is part of life. We are not able to gain first hand experience about it, however, it can be measured very well and accurately. Many devices exist which can detect radiation. The cloud chamber was the first tool which could visually show the track of the particles.

According to their operation cloud chambers can be divided into two groups. In the case of *expansion* or *Wilson-type cloud chambers* the over-saturation is generated by a sudden expansion. In *diffusion cloud chambers* it can be achieved with the temperature-gradient inside the chamber. The spatial formation of tracks evolving in the expansion cloud chamber is snapped with the help of flashlight. The diffusion cloud chamber enables continuous observation.

Teaching nuclear physics at secondary schools there is relatively little chance of experimentation and the number of demonstrational tools are also few. Without experiments the exact sciences, mainly physics and nuclear physics as part of it, remains as an easily misunderstood, hardly conceivable and therefore rather mysterious subject at schools. With the help of the diffusion cloud chamber everybody can see that radiation is present in the environment around us. For students who have learned about radioactivity, however, never gained direct experience about it, these experiments could help a lot to be confident with radioactive decay. The education and documentary purposes are well served by such an equipment used at the Institute of Experimental Physics of University of Debrecen.

The radiation originating from radon gives the population almost half of the radiation exposure of natural origin. The role of radon has been proved in the increase of lung cancer occurrence, and therefore its examination deserves particular attention. In Hungary the 1996 CXVI. law's executive degree about nuclear energy on workplaces sets the $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ radon concentration value as an action level. In case of a 0,4 equilibrium factor and 2000 hours/year working hours it means a 6,3 mSv/year radiation exposure. Previous studies have proved that underground places (caves, mines) exceed this value many times, with

often more than tenfold values occurring on average over a year. The question has arisen as to whether in wine cellars, similar to caves in many respects, the level of radon concentration exceeds the limit specified in the decree. To investigate this problem I carried out investigation in some of the Hajós-Baja wine cellars with the help of the Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences.

(Nowadays there are more than 1200 cellars in the “cellar-village” which is a few km from Hajós. It is the biggest contiguous “cellar-village” in Europe.)

Industrial accidents, the tragic consequences of military expansions can not be prevented by science. However, the examination of their effects and using them for peaceful purposes which is useful for the future and serves mankind is not only an opportunity but it is an obligation. Measuring the depth distribution of ^{137}Cs nuclide complements or in some cases controls and many times takes over the traditional determination of the sedimentation of soils. This technique was made possible when fission fragments got into the air through nuclear explosions or reactor accidents. Monitoring the radioactivity of dangerous materials carried into the environment through technological faults (for example red sludge) can effectively help the professional and the rapid elimination of the consequences of the catastrophe.

Aims

My aim was to demonstrate the application of PHYWE made diffusion cloud chamber in teaching. Beside this I want to create teaching materials which offer help for secondary school students in understanding the phenomena of radioactivity and nuclear physics in an interesting and clearer way. While doing this many opportunities are present to develop students' thinking and increase their interest towards physics. As a tool in the laboratory it may well be utilized to increase the students' knowledge on the nuclear and particle physics as well as to make the environmental radioactivity and the related items alive.

My further aim was surveying the ^{222}Rn activity concentration and its changes in the air in some Hajós-Baja wine cellars. The samples taken from the cellars' rock were examined with gamma-spectrometry. I attempted to determine if there were any correlation between the radon concentration of the cellars' air and the uranium and thorium content of the sample soils (NORM: *Naturally Occurring Radioactive Materials*).

The geodesic method (Mátrai, 2010) was applied to determine the filling up of the Nyéki-Holt-Duna watercourse (a backwater of the Danube at Nyék). It is a highly protected area within the backwater floodplain of the Gemenc countryside. There was a need to check the above results using an independent method based on the rate of silting up. A borehole sample from year 2005 was analyzed for depth distribution of ^{137}Cs activity. This isotope was released into the atmosphere during the 1950s and the 1960s as a result of atmospheric atomic blasts as well as via the Chernobyl reactor accident in 1986. It has fallen from the atmosphere into the soil. The age of the deposited sediment and the accumulation rate may be determined from the location of ^{137}Cs . Activity concentration of the NORM isotopes present in these samples was also determined.

On 4 October 2010 a $300 \times 500 \text{ m}^2$ dam of the redsludge container collapsed which was erected between Kolontár and Ajka. In this catastrophe about $600\,000\text{--}700\,000 \text{ m}^3$ of sludge was released onto the deeper parts of Kolontár, Devecser and Somlóvásárhely. The strongly alkaline and corrosive industrial debris spreaded on about 800 acre which caused inestimable economic and ecological damage in that area. The sorrowful accident claimed human lives as well.

The corrosive effect of the red sludge and also the possible radioactive radiation scared the population living in the area. On 15

October 2010 we have received half a liter of liquid red sludge sample collected from the banks of Torna which is a brook near Kolontár. We were among the first ones who determined the radioactivity of the flooding red sludge using gamma-spectrometry. (TENORM: *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*)

Methods

For the demonstration of background and artificial radioactive radiations I have used a PHYWE made diffusion cloud chamber at the Department of Experimental Physics in the University of Debrecen. This device was developed at the University of Göttingen for demonstrational purposes. In Hungary the Information and Visitor Centre of Paks Nuclear Power Plant, the Palace of Miracles (Budapest) and the Department of Physics at the University of Miskolc possesses such 45×45 cm² detector, which is able to visualize continually the tracks of different radiations. I applied a video camera to capture the events of the background radiation as well as the artificial radioactivity.

For the experiments I have used *Th(B+C)*, ²³⁵U, ²³²Th, ²²²Rn, ²⁴¹Am alpha-, ⁹⁰Sr/Y beta- and ²³⁹PuBe neutron sources and rocks with uranium content.

For determining the ²²²Rn activity concentration in the wine cellars I have applied Radamon type edged detector radon monitors with CR-39 polymer foil (TASL). Treatment and evaluation of the detectors were performed with the usual methods (Csige and Csegzi, 2001). The results are given as ²²²Rn activity concentration in Bq·m⁻³. The measurements were carried out between 2004 and 2006 using quarterly irradiation periods adjusted to the seasons. We have placed 2-3 detectors in the cellars at a distance of 30 cm from the ceiling. The uncertainty of the measurements performed with Radamon was estimated to be about 10-20%.

An ionization chamber type radon monitor AlphaGUARD was also applied. Besides radon concentration, it is capable to measure temperature, atmospheric pressure and relative humidity. The uncertainty of the radon measurement with AlphaGUARD was 2-5%.

We have performed the gamma-spectrometry with a Canberra GC2018 type portable, extra-pure germanium (HpGe) detector of sensitive volume ~100 cm³, 20% relative efficiency (Canberra 2002). NORM-TENORM spectra were analyzed for the 50 keV – 2,7 MeV interval in 8192 channels. The energy resolution of the detector for 1332 keV is 1,8 keV. The ratio of peak/Compton is 50. Data acquisition was performed by an Inspector2K complex digital signal processor system (DSP) of Canberra.

The samples with mass of 0,15-0,5 kg were placed close to the window of the detector cryostat. The Pb-shield applied was lined inside with Al-Fe-Cu-Cd cover. The determination of the efficiency for extended

samples was performed using standard “point sources” (^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{241}Am) in different geometries. It was completed with simulation. The degree of radon emanation of the samples and the necessary corrections were determined with the help of extra experiments.

The spectrum acquisition and analysis were performed by the Canberra software Genie 2000. Speaking about samples with low activity, the acquisition time ranged between 12 and 24 hours in general. The relative statistical uncertainty was between 1,2-54 % depending on the weight and provenance of the samples and on the nuclides. The systematical error was estimated to be 8%.

In the NORM and TENORM investigations the uranium, thorium and potassium content of the soil samples were characterized with the activity concentration calculated for dry mass [$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$]. The activity concentration of ^{238}U and ^{232}Th was determined from the averaged activities of daughter nuclei belonging to the given decay chain. A control measurement on the ^{235}U and ^{238}U ratio was performed by very high resolution gamma-spectrometry to resolve the closely spaced peaks of ^{235}U and ^{226}Ra .

Results of my investigations:

1. I determined the operational characteristics of the PHYWE made diffusion cloud chamber and the process of track formation. The particles (alpha, proton, electron, photon) were identified on the basis of their range, stopping power and interactions.

I performed experiments with the diffusion cloud chamber as follows: detection of muons, magnetic deflection of electrons (β^- -particles), alpha-induced reaction $^{14}\text{N}(\alpha,p)^{17}\text{O}$, Rutherford-scattering on Ag-foil by alpha-particles, neutron-proton elastic scattering, and determination of half-life. The tracks of the background and radioactive radiation were recorded with camcorders. Therefore the device used earlier mainly for presentation now is suitable (again) for performing quantitative experiments [12].

I prepared a database from pictures and videos which is very useful in education. The poster prepared from my own photos was displayed in Debrecen, 2006 in an exhibition called „*Radioactivity: part of nature*”. My pictures on the diffusion cloud chamber were used at the Department of Physics in Miskolc University [20].

I played an important role in organizing and arranging the exhibition, called „*Radioactivity: part of nature*” which was presented in the Eötvös József College of Baja. I also prepared an educational homepage about this exhibition [27].

2. I have developed an image processing program for the evaluation of the video recordings and pictures of radiations which can be observed with the help of the diffusion cloud chamber. The program finds the particle tracks in the compressed „avi” and „bmp” files on the basis of the colors of the pixels. It determines their beginning and end co-ordinates and calculates the length. The number of pixels constituting the particle path gives the surface area of the given track, while the ratio of the surface area to the length gives the width [25].

The length of the track appearing in the cloud chamber depends on the energy and direction of the particles. Measuring the track length the energy of the particles can be determined. Energy distribution and range-energy dependence can be calculated from the data. From the thickness of the tracks we can deduce the stopping power of the particles.

I prepared a homepage where students can improve their knowledge about radioactivity. An internet broadcast on the processes in the diffusion cloud chamber is also available. Animations, databases containing pictures and videorecordings are prepared, too, and it is possible to process data by the help of a guide [26].

3. I have measured the ^{222}Rn activity concentration of the air in 11 wine cellars in the Hajós-Baja wine region for two years.

The ^{222}Rn activity concentration in the cellars ranged between 0,1-4,0 kBq·m⁻³. In almost each of them a seasonal change can be observed with a characteristics of a maximum in winter and a minimum in summer. In four cellars the ^{222}Rn activity concentration exceeded the 1000 Bq·m⁻³ action level regarding workplaces. In the wine cellars of Hajós-Baja workers spend only a week every month in average. Thanks to this fact and the ventilation their yearly radon radiation exposure remains under 1000 Bq·m⁻³ [7].

4. I have measured the NORM activity concentration of the soil samples from the cellars with gamma-spectrometry to devise the reasons why some of them had radon concentration above the limits. The rather high ^{222}Rn activity concentration measured in four cellars (especially in 5) was not combined with high NORM-activity in the soil samples. I found that non of the cellar samples show any appreciable correlation with the radon content in the given geochemical circumstances [2].

The results were compared to the data of other measurements carried out at other locations. I found that they do not differ much from other results in different countries of the world (Fehér and Deme 2010).

The variations of atmospheric pressure and of ^{222}Rn activity concentration in the air of a wine cellar was measured with an AlphaGAURD type ionization chamber radon monitor. It was found that the ^{222}Rn activity concentration varies inversely with pressure. To explain this behavior we have performed model calculations, in which we have assumed that variations in the atmospheric pressure induced flow of gases through the walls of the embedding rocks. We have calculated the gas flow in the rock matrix as well in the room of the cellar. We have taken into account the ventilation of the room through the entrance. Knowing the flow pattern of the carrier gas, we have modeled the transport of ^{222}Rn both in the embedding rock and in the room of the cellar. We have compared the results of model calculations

with the measurements. It was found that the model is capable to reproduce the variations of ^{222}Rn activity concentration to some extent. Parts of the variation that could not have been associated to pressure induced variations are assumed to be induced by other weather parameters, such as indoor and outdoor temperature differences and precipitation [1].

Calculated radon concentration distributions along the cellars agree with the results achieved by the edged detector radon monitors if adequate mixing is supposed with the appropriate diffusion parameter.

5. I determined the age of the sediment deposited in the branch of Nyék-Holt-Duna with gamma-spectrometry to the accumulation rate. I have used the ^{137}Cs isotope for this measurement. Analyzing the soil profile from the area of the river bed I determined that ^{137}Cs is present in the „dry” sample in a depth of 35 cm which is in accordance with the 58,3 cm sampling depth. From the size of the sample the ^{137}Cs isotope could not be revealed originating from the atomic blast of the 1950s and 1960s. Its estimated depth may be 130 cm (Braun et al., 2003).

The nuclide ^{137}Cs spreaded into the atmosphere in 1986 after the Chernobyl accident. The sampling took place in 2005. Supposing a linear model during 19 years the speed of sedimentation is 3,1 cm/year presuming that the area remained undisturbed and it had not been washed off. This value is in good agreement with the value of 3,2 cm/year determined at the same place with the geodesic method. This radioactive profiling method was already used for determining the speed of sedimentation (Dezső et al., 2009). The results of my measurements correspond well with the independent, non-nuclear results, which proves the applicability of the method.

The NORM activity concentration of the examined sample shows the values of usual soils.

6. I determined the TENORM activity concentration of a sample originating from the redsludge catastrophe with gamma-spectrometry. The activity concentrations of ^{232}Th and ^{238}U are 5-6 times higher than the NORM ones while ^{40}K values differ with an average factor of 1,73 only. The latter result, however, is not too significant considering the ~1,75 range spread in our soil NORM data for potassium but the increase is obvious. Enrichment in heavy element concentration may clearly be observed in the present redsludge sample.

Compared to samples originating from other areas of the same accident my results on NORM-activities are about half of them (Somlai et al., 2010), however they fall between the limits typical of red sludge (Jobbágy et al., 2009). They comprehend a quadruple or quintuple range which derives from the diversity of the basic materials, technologies and the areas of the samplings.

The ability of radon-emanation of red sludge is about twice as much as of the drier soils. It can be explained with the differences of the sample structures (porosity, size of the small particles, moisture content) [2].

The utilization of the results

My thesis deals with the phenomena of radioactivity and nuclear physics. This topic has a rich area of application: environmental protection, industrial, agricultural and medical biology. The phenomena presented, the attained results and the developed methods can mainly be utilized in public education and the field of environmental protection.

While using cloud chambers in public education students are able to gain a direct experience from the area of natural and artificial radioactivity, about the characteristics of the particles, the features of the quantum world, the random nature of the processes and the unity of classic and modern physics. Pictures, videos, descriptions helping the evaluation and the programs can be really useful in lessons and in different studies including university education.

The image and video processing programs made for the evaluation of the tracks are suitable for solving similar tasks: evaluation of solid-state track detectors and evaluating photo emulsive records, recognizing and counting figures with determined shape and size.

My measurements and their results in connection with radioactivity can be utilized very well in environmental protection: radon problem, the activity of soils, the siltation velocity of river-bed, the characteristics of industrial pollution.

The planning and implementation of environmental radioactivity measurements, the process and analyses of the results presents for people in public education the research methodology of a complex science and its interdisciplinary characteristics. Last but not least the importance of collaboration of professionals working in different academic and technological areas is also evident.

The experimental tools capable to demonstrate particle tracks and measuring radioactivity are costly devices. Hungarian secondary schools are not able to buy them. My opinion is that these modern and special devices should be accessible for everyone. There are some possible ways:

- the presentation and possibly the usage of individual tools of higher education institutions, research centers by opening the doors of the laboratories (e. g. Researchers' Night, Physicists' Day);
- experiments, measurements broadcast on the internet;
- visual materials, presentation of mobile devices and their interactive use;
- teaching materials, evaluation programs in the service of public education.

Irodalomjegyzék/ Reference

- Braun M., Szalóki I., Posta J., Dezső Z. (2003) Üledék felhalmozódás sebességének becslése a Tisza hullámterében, MHT XXI. Vándorgyűlés, CD-kiadvány
- Canberra Edition Twelve Product Catalog, (2002)
- Csige I., Csegi S. (2001) The Radamon radon detector and an example of application. Radiation Measurements, Vol 34/1-6, 437-440
- Dezső Z., Szabó Sz., Bihari Á. (2009) Time evolution of sediment build up in the floodplain area of river Tisza, based on ^{137}Cs isotope data, Sapientia Hungarian University of Transylvania, Conference Publication, 433-438.
- Fehér I., Deme S. (2010) Sugárvédelem, ELTE Eötvös Kiadó Kft., 435.
- Genie 2000 Spectroscopy Software Operations Manual, Canberra Industries, (2004)
- Jobbágy J., Somlai J., Kovács J., Szeiler G., Kovács T. (2009) Dependence of radon emanation of red mud bauxite processing wastes on heat treatment. J. Haz. Mat. 172, 1258-1263.
- Mátrai I. (2010) Nyéki-Holt-Duna természetvédelmi rehabilitációjának ökológiai szempontú értékelése. Doktori (PhD) értekezés. Debreceni Egyetem
- Somlai J., Kovács T., Kovács J., Sas Z., Szeiler G. (2010) Ajka környéki vörösiszap mező radiológiai vonatkozása. Őszi Radiokémiai Napok, Keszthely, 2010. október 20-22.)
- Track Analysis Systems Ltd., H.H. Wills Physics Laboratory, Tyndall Avenue, Bristol BS8 1TL, UK
<http://www.tasl.co.uk/tastrak.htm>

Publikációk/ Publications

Az értekezés témakörében megjelent referált publikációk

- [1] GYÖRFI T. – CSIGE I. (2011) Effect of Atmospheric Pressure Variations on the ^{222}Rn Activity Concentration in the Air of a Wine Cellar. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Volume 288, Number 1, 229-232.
- [2] GYÖRFI T. – RAICS P. (2011) Investigation of Environmental Radioactivity of Wine Cellars, Watercourse and Industrial Waste. Applied Radiation and Isotopes (Accepted: 2011.02.11.)
- [3] GYÖRFI T. – CSIGE I. (2009) Az atmoszférikus légnyomás változásainak hatása egy borpince légtérben lévő ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációra. Sugárvédelmi online folyóirat 44-49. http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem/tartalom09_1.php (2009.06.03.)
- [4] GYÖRFI T. - RAICS P. (2009) Estimation of sediment accumulation rate with gamma-spectrometry. Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment, Volume 1., 69-77.

Az értekezés témakörében konferenciakötetben megjelent publikációk

- [5] GYÖRFI T. (2005) Ködkamra felhasználása a magfizika oktatásban. DOSZ Tavaszi Szél konferencia Debrecen. DOSZ Konferencia kiadványa 2005, 140-143.
- [6] GYÖRFI T. (2006) Környezeti radioaktivitás mérése a hajósi borpincékben. DOSZ Tavaszi Szél konferencia Kaposvár. DOSZ Konferencia kiadvány 2006, 264-267.
- [7] GYÖRFI T. – HUNYADI I. – CSIGE I. (2007) Radon a hajósi borpincékben. IV. Magyar Radon Fórum. Környezetvédelmi konferencia, Veszprém. Pannon Egyetem Konferencia kiadványa, 2007, 133-138.

- [8] GYÖRFI T. – HUNYADI I. – CSIGE I. (2007) Radon a hajósi borpincékben, poszterbemutató. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló.
ELFT Sugárvédelmi Szakcsoport Konferencia kiadványa, 2007, 31-32.
- [9] GYÖRFI T. (2009) Using Diffusion Cloud Chamber in the Teaching of Nuclear Physics. XXXIII. microCAD International Scientific Conference, Miskolc. Miskolci Egyetem Konferencia kiadványa, 2009, 31-36.
- [10] GYÖRFI T. – RAICS P. (2009) Üledék felhalmozódás sebességének becslése gamma-spektrometriai módszerrel. V. Kárpát-medencei Környezettudományi konferencia, Kolozsvár.
Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem Konferencia kiadványa, 2009.
- [11] GYÖRFI T. – CSIGE I. (2009) Az atmoszférikus légnyomás változásainak hatása egy borpince légterében lévő ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációra. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló. ELFT Sugárvédelmi Szakcsoport Konferencia kiadványa, 2009, 11, 17.
- [12] GYÖRFI T. (2009) A diffúziós ködkamra alkalmazási lehetőségei a középiskolai magfizika oktatásban. Fizikatanítás tartalmasan és érdekesen konferencia, Budapest, 2009.
ELTE online konferencia kiadványa,
<http://fiztan.extra.hu/konferencia/proc/> (2010.12.10.)
Előadáskivonatok, 2010, 387-392.
Természet Világa, 2010. októberi szám, recenzió, 477-478.

Az értekezés témakörében elhangzott előadások

- [13] GYŐRFI T. (2003) Radioaktivitás: a természet része. Magyar Tudomány Napja, Baja.
- [14] GYŐRFI T. (2005) Alfa-radioaktivitás mérése a hajósi borpincékben. Magyar Tudomány Napja, Baja.
- [15] GYŐRFI T. (2005) Ködkamra felhasználása a magfizika oktatásban. DOSZ Tavasz Szél konferencia, Debrecen.
- [16] GYŐRFI T. (2006) Környezeti radioaktivitás mérése a hajósi borpincékben. DOSZ Tavasz Szél konferencia, Kaposvár.
- [17] GYŐRFI T. – HUNYADI I. – CSIGE I. (2007) Radon a hajósi borpincékben. IV. Magyar Radon Fórum. Környezetvédelmi konferencia, Veszprém.
- [18] GYŐRFI T. – HUNYADI I. – CSIGE I. (2007) Radon a hajósi borpincékben, poszter-bemutató. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló.
- [19] GYŐRFI T. (2008) Üledék felhalmozódás sebességének becslése gamma-spektrometriai módszerrel. Magyar Tudomány Napja, Baja.
- [20] GYŐRFI T. (2009) Using Diffusion Cloud Chamber in the Teaching of Nuclear Physics. XXXIII. microCAD International Scientific Conference, Miskolc.
- [21] GYŐRFI T. – RAICS P. (2009) Üledék felhalmozódás sebességének becslése gamma-spektrometriai módszerrel. V. Kárpát-medencei Környezettudományi konferencia, Kolozsvár.
- [22] GYŐRFI T. – CSIGE I. (2009) Az atmoszférikus légnyomás változásainak hatása egy borpince légtérben lévő ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációra. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló.
- [23] GYŐRFI T. – CSIGE I. (2009) Az atmoszférikus légnyomás változásainak hatása egy borpince légtérben lévő ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációra. Magyar Tudomány Napja, Baja.

- [24] GYÖRFI T. (2009) A diffúziós ködkamra alkalmazási lehetőségei a középiskolai magfizika oktatásban. Fizikatanítás tartalmasan és érdekesen konferencia, Budapest.
- [25] GYÖRFI T. – GÁLAI A. (2010) Radioaktív sugárzások webkamera-felvételeinek képfeldolgozása. Magyar Tudomány Napja, Baja.

Egyéb szakmaspecifikus alkotások

- [26] Diffúziós ködkamrát bemutató honlap készítése.
<http://fizika.ttk.unideb.hu/kisfiz/tavtanulas> (2011.03.12.)
- [27] A Radioaktivitás: a természet része c. kiállítás ismeretterjesztő honlapjának elkészítése, http://www.ejf.hu/oktkut/rad_kiallitas (2005.12.10.)
- [28] Radioaktivitás: a természet része c. kiállításra poszter készítése (Debrecen, 2006.)

Gyórfi Tamás

Eötvös József Főiskola, Műszaki és Közgazdaságtudományi Kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Intézet
H-6500 Baja, Bajcsy-Zs. u. 14

gyorfi.tamas@ejf.hu