

DIFFÚZIÓS KÖDKAMRA – MUTATNI A LÁTHATATLANT

II. RÉSZ

Gyórfi Tamás – Eötvös József Főiskola, Baja

Raics Péter – Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

Tanulmányunk előző részében ismertettük a PHYWE gyártmányú diffúziós ködkamra [1] működését, jellemzőit, a benne megfigyelhető különféle sugárzások nyomait, valamint az ezek kiértékelésére létrehozott képfeldolgozó programokat. Ebben az írásban a ködkamrával végzett kísérleteket mutatjuk be.

A diffúziós ködkamra 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 ködkamrában megfigyelt folyamatokról készített kép- és videonyomok, a kiértékelést segítő leírások, programok a tanórákon és szakköri foglalkozásokon egyaránt felhasználhatók.

Demonstrációs kísérletek diffúziós ködkamrával

A PHYWE gyártmányú diffúziós ködkamrát demonstrációra fejlesztették ki. Célunk az volt, hogy a látványos nyomkialakulások bemutatásán kívül méréseket is lehessen végezni vele [2].

Müonok azonosítása

A ködkamrában megjelenő müonok azonosítására két – 890 mm hosszú, 40 mm átmérőjű – GM-csőből összeállított teleszkópot alkalmaztunk, amelyet a kamra érzékeny rétegével párhuzamosan helyeztünk el. Mindkét detektorhoz erősítő csatlakozott, amelynek jeleit egy úgynevezett koincidenckiör bemenetére kapcsoltuk. Ez csak akkor ad jelet a kimenetén, ha az 1-es és a 2-es detektor ΔT időn belül jelez. Ez bekövetkezik, ha a müon mindkét detektoron áthalad és anyagukkal kölcsönhatásba kerül. A ködkamra fölött videokamerát helyeztünk el, a képeket folyamatosan rögzítettük és egy monitoron keresztül figyeltük a koincidenckiakkal (illetve hangjelzésükkel) egy időben megjelenő nyomokat (1. ábra). Ezek így a detektorok és a ködkamra által meghatározott vízszintes síkban érkező müonoktól származnak. A vízszintes irányban tapasztalható nagyon kevés eseményszám miatt nem minden esetben lehetett egyértelműen megállapítani, hogy a koincidenckiával egy időben megjelenő nyom a müontől származik-e. További nehézséget jelentett a

detektorok eltérő hatásfoka: ködkamra érzékeny térfogata ~ 2 liter, a GM-csővéké 0,4 liter. Az általunk használt kísérleti elrendezés az 1. ábrán látható.

Mágneses eltérítés a ködkamrában

A mágneses eltérítés vizsgálatára a szokásos szolenoidtekerccset – a ködkamra felépítése miatt – nem tudtuk alkalmazni. Ezért ritkaföldfém-mágneset használtunk, amelynek mérete: $1,2 \times 5,0 \times 0,45$ cm³, a mágneses indukció maximális értéke a felületen, középen $\sim 2,4$ kG. A mágnes kis felülete folytán az eltérítés mértéke korlátozott: amíg a térben halad a részecske, addig útja körpálya, majd ennek érintője mentén, egyenes pályán halad tovább.

A mágneses eltérítés az alábbi összefüggések segítségével számolható:

a) relativisztikus képlet (főként az elektronoknál):

$$E = m_0 c^2 \left(\sqrt{\left[\frac{e}{m_0 c} \right]^2 B^2 r^2 + 1} - 1 \right); \quad (1)$$

b) nem-relativisztikus esetben:

$$e v B = \frac{m_0 v^2}{r} \rightarrow E = \frac{e^2 B^2 r^2}{2 m_0}, \quad (2)$$

ahol m_0 az elektron nyugalmi tömege, c a fénysebesség, e az elemi töltés, v az elektron sebessége, B a mágneses indukció nagysága és r a körpálya sugara.

Magfizikai szempontból nem a monoenergetikus elektronok vizsgálata az érdekes, hanem a folytonos spektrumú béta-részecskéké. Ezeknél arra kell figyel-

1. ábra. Mérési összeállítás a müonok megfigyelésére.



A Szerzők tisztelettel ajánlják munkájukat Csikai Gyula professzornak abból az alkalomból, hogy az Európai Fizikai Társulat „EPS Történelmi Emlékhely – Debrecen: A neutrínókísérlet, Csikai Gyula és Szalay Sándor” emléktáblát avatott tudományos ülészak keretében 2013. október 25-én az MTA Atommagkutató Intézetben.

ni, hogy gamma-sugárzás ne kövesse a béta-bomlást, mert a keletkező elektronok zavarják a megfigyelést. Választásunk a két energiacsoporttal rendelkező $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ forrásra esett.

A ritkaföldfém-mágneset elhelyeztük a diffúziós ködkamra érzékeny térfogatában, majd a $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ forrásból kilépő elektronok mozgását vizsgáltuk. A kísérlet során a kis térre kiterjedő mágneses mező és a két folytonos spektrumú csoport miatt nehéz volt tisztán megfigyelni a béta-részecskék Lorentz-erő hatására történő „felcsavarodását”.

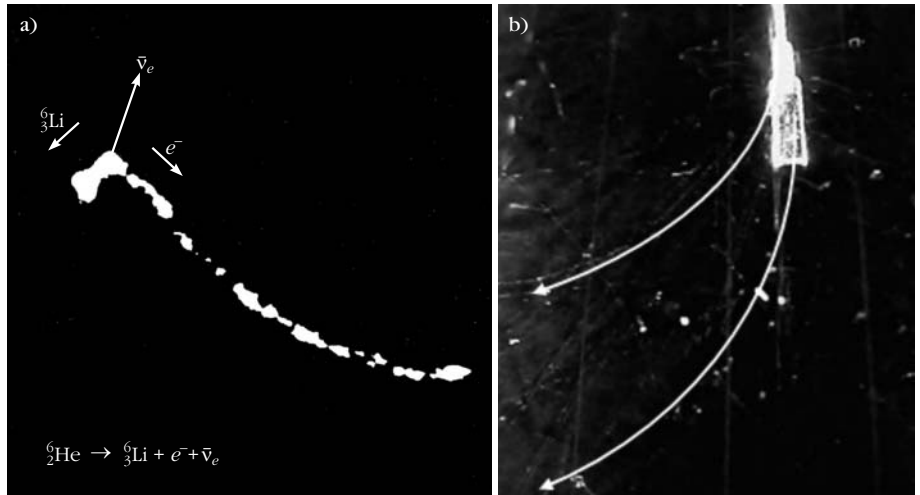
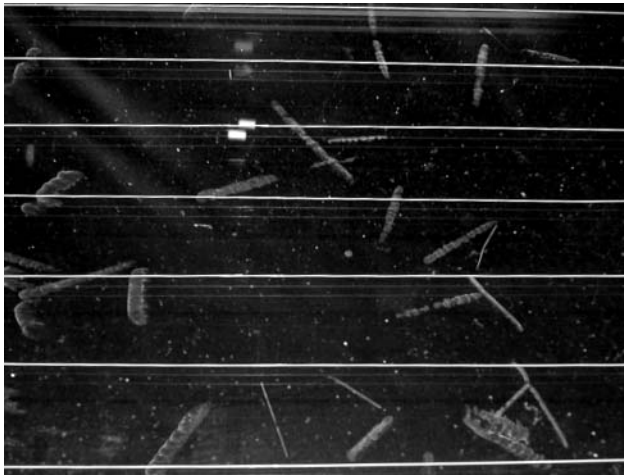
A *2.a ábra* a Csikai–Szalay klasszikus neutrínókísérletet idézi [3], a *2.b* pedig a diffúziós ködkamrában általunk felvett jelenséget mutatja. Itt a forrás felül helyezkedik el, előtte pedig a mágnes látható. A töltés előjelétől és a mező irányától függő eltérülés (nyíllal jelölve) a képen balra történt. Az effektus valóságát a mágneses tér irányának megváltoztatásával ellenőriztük.

A két csoport maximális energiájára vonatkozó eltérítési sugarakat a 2,4 kG indukciójú mágneses mezőben az (1) relativisztikus képlet szerint számítottuk ki, $E_{\text{max}} = 546$ keV esetén $R = 1,28$ cm, míg $E_{\text{max}} = 2,284$ MeV esetén $R = 3,82$ cm.

Radon (^{222}Rn) a ködkamrában

180 kBq aktivitású ^{226}Ra forrásból származó, nagy radonkoncentrációjú levegőt juttatva a ködkamrába jól megfigyelhetők az alfa-részecskék nyomai (*3. ábra*). Mindegyiknek azonos energiája van, ezért ugyanolyan hosszúságú nyomokat kellene létrehozniuk. Ám – a korábban említett geometriai okok miatt – rövidebb és hosszabb nyomok egyaránt megfigyelhetők.

3. ábra. Radongáz alfa-bomlásának nyomai.



2. ábra. Béta-részecskék mágneses eltérítése ködkamrában. a) A Csikai–Szalay-kísérlet képe a neutrínó közvetett kimutatásáról expanziós ködkamrában. b) Diffúziós ködkamrában eltérített béta-részecskék ^{90}Sr forrásból.

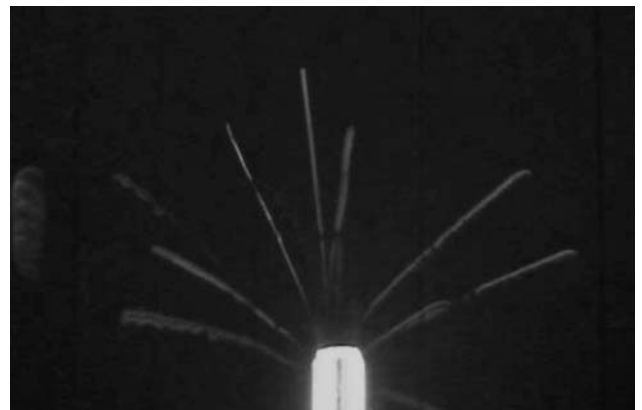
A ködkamrában néha jellegzetes V alakú nyomokat láthatunk (a természetes háttérsugárzásnál is), amelyek oka két, egymást holtidőn belül követő alfa-bomlás. Ezek származhatnak anya-leány kapcsolatú izotóptól, vagy két teljesen független bomlási eseménytől, amelyek véletlenül egymás közelében játszódnak le. A *3. ábra* mindkettőre mutat példát.

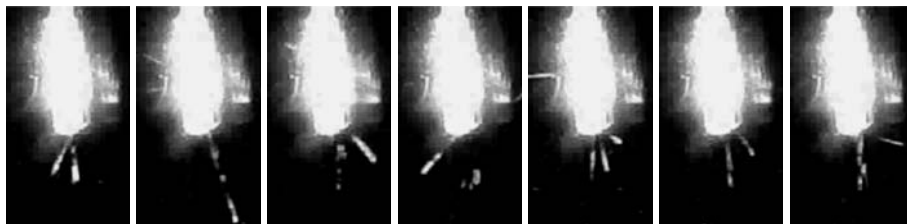
Egy helyiség levegőjének radontartalmát leányelemeinek összegyűjtésével lehet egyszerűen bemutatni. Porszívóval egy többrétegű szűrőpapíron ~1 órán keresztül szívtuk át levegőt. Az aeroszolok „fennakadtak” a papíron, a radon – leányelemeivel – megtapadt rajtuk. Az így készített, rövid felezési idejű forrást egy pálcán juttattuk be a diffúziós ködkamrába. Az alfa-részecskék pályája a *4. ábrán* figyelhető meg.

Magreakciók kimutatása

A Rutherford-féle rugalmas szórás kísérlet bizonyította be az atommag létét, amellyel egy teljesen új korszak kezdődött a természettudományban. Fontosnak tartottuk ennek bemutatását a diffúziós ködkamrával. A kísérletnél – az eltérülés kimutathatósága érdekében – az alfa-nyalábot kollimálni kellett. A ködkamrá-

4. ábra. Levegőből gyűjtött radon bomlásának nyomai.





5. ábra. Rutherford-szórás ezüst fólián diffúziós ködkamrában Th(B+C) kollimált alfa-részecskéivel.

(A forrás nagy intenzitására a ritka folyamat miatt volt szükség; az alfa-részecskék két energiacsoportja a hatótávolságokról felismerhető.) A keletkezett proton pályájának hosszúságát nehéz megállapítani, mert a kezdőpont a nagy háttér miatt nem jelölhető ki egyértelműen. Ezt a folyamatot figyelte meg *Rutherford* is 1919-ben, amikor az első mesterséges magátalakítást elvégezte. Nitrogént alfa-sugárzásnak vetett alá és a keletkező új atommagok pályáját szintén ködkamrafelvételek alapján azonosította.

A ködkamrában a neutronok közvetlenül nem láthatók, csak az általuk keltett töltött részecskék vagy gamma-sugárzás révén.

Kísérleteinkhez a nem monoenergetikus PuBe-forrást használtuk. A neutronok rugalmas szóródása megfigyelhető volt a kamra töltőgázának hidrogén atommagjain. A 7. ábrán a forrás a kép jobb oldalán helyezkedik el. A protonok iránya megállapítható a nyomvégek kiszélesedéséből.

Más neutronindukált folyamatok kimutatása azért nehéz, mert a PuBe-forrástól különböző folyamatok révén eredő részecskék jelentős háttérrel okoznak.

ban könnyebben kezelhető ezüstfóliát használtunk, amelyet a 2,5 cm hosszúságú kollimátorcső végéhez rögzítettünk. A geometria miatt a 90°-nál nagyobb szögek nem tanulmányozhatók, pedig az atommag létét a nagyszögű szórás bizonyítaná legjobban. A demonstrációban így is egyértelműen látható a jelentős eltérés, amely bizonyítja a szórási folyamat bekövetkezését (5. ábra).

Nagy aktivitású Th(B+C) forrást alkalmazva az alfa-részecskék kör alakú (koronaszerű) nyomkialakulást hoznak létre a diffúziós ködkamrában. Néha megfigyelhető egy hosszabb, vékonyabb nyom megjelenése, amely a $^{14}\text{N} + ^4_2\text{He} = ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{p}$ magreakcióból származó protontól ered a 6. ábrán látható módon (vonallal jelölve). A visszalökött ^{17}O nagyon rövid pályája a nagy alfa-háttér miatt nem vehető észre a felvételen.

6. ábra. A $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ magreakció Th(B+C) forrás alfa-részecskéivel létrehozva.

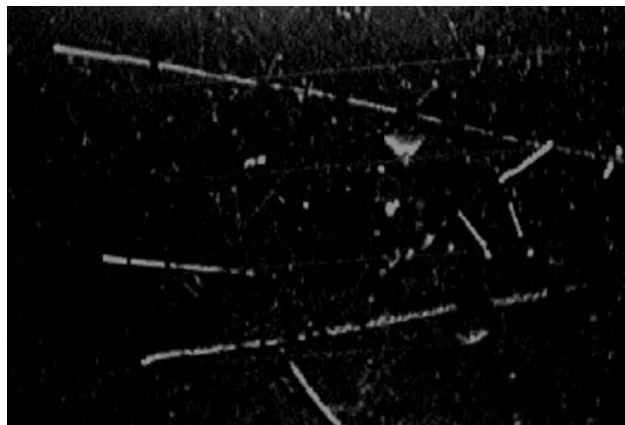


Töltött részecskék hatótávolsága

A hatótávolság mérése lehetővé teszi a részecskék energiájának meghatározását. A ködkamrás kísérletek egyik legfontosabb eredménye a különböző (háttér)sugárzások elkülönítése energiájuk és ionizáló képességük révén. Munkánk során a könnyebben tanulmányozható alfa-részecskékkal végeztünk méréseket.

Az 1. táblázat a különféleképpen számított és kiértékelt hatótávolságokat tünteti fel. A képfeldolgozó és

7. ábra. PuBe-forrás neutronjai által meglökött protonok hosszú, egyenes nyomai a ködkamrában.



Különböző módon meghatározott Th(B+C) felezési idők összehasonlítása

módszer	ködkamra		alfa-spektrometria	béta-számlálás	gamma-spektrometria					
	kép-feldolgozás	nyom-számlálás								
$T_{1/2}$ (h)	10,64	6,5–11,1	11,71	10,74	10,77	10,75	10,77	10,64	10,85	10,86
irodalmi adat (MeV)				6,0508	8,7849	összeg				

a *Lince*-program [4] segítségével meghatároztuk a Th(B+C) forrásból kilépő alfa-részecskék nyomairól készített felvételeken a részecskék pontos helyét és a nyomvonal hosszúságát. Az elméleti adatokat a *SRIM 2010* szabad felhasználású program [5] és az

$$R_{\alpha} = 0,315 \cdot E_{\alpha}^{3/2} \quad (3)$$

empirikus képlet alapján számítottuk ki [6].

A mért adatok relatív szórása a „kézi” *Lince*-program esetén körülbelül 5,5%, a saját (automatikus) feldolgozásánál pedig 12% körülinek adódott. Az utóbbival nyert hatótávolságok ugyanakkor közelebb vannak a számított értékekhez.

Felezési idő meghatározása

Két napon keresztül figyeltük és rögzítettük a Th(B+C) forrásból kilépő alfa-részecskék nyomait a diffúziós ködkamra fölött elhelyezett videokamera segítségével. Képfeldolgozó programunkkal megszámláltuk, hogy az adott képkockán hány részecskenyom látható, majd a kapott I számlálási sebességeket az idő függvényében ábrázoltuk az Excel-programban. Az adatokhoz exponenciális trendvonalat illesztettünk, amelynek egyenletéből a (4) összefüggés segítségével meghatároztuk a felezési időt (és az I_0 kezdetben mérhető intenzitást):

$$I = I_0 e^{-\lambda t} = I_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = I_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (4)$$

Ellenőrzésképpen a felvételen a részecskenyomokat szemmel is leszámoltuk. A kiértékelést az előbbieket szerint végeztük el.

A Th(B+C) forrást alkotó ^{212}Pb atommag felezési idejét alfa- és gamma-spektrometria, valamint béta-számlálás segítségével is meghatároztuk. Az eredményeket a 2. táblázatban hasonlítottuk össze. A ködkamrával mért értékek meglehetősen pontatlanok a kis statisztika, illetve a nagy szórás miatt. Mindenesetre az intenzitás időbeli csökkenés egyértelműen észlelhető.

Összefoglalás

A radioaktivitás törvényszerűségeit az atommagfizika kutatja, magyarázza és alkalmazza. A atommagfizika középiskolai oktatásában viszonylag kevés a kísérletezési lehetőség és a demonstrációs eszköz. Kísérletek

nélkül, főként az atommagfizikának, megmarad a félreérthető, kevésbé megfogható és ezért misztikus jellege. A PHYWE gyártmányú diffúziós ködkamra oktatásban történő alkalmazásával számos lehetőség nyílik a tanulók gondolkodásának fejlesztésére, a magfizika iránti érdeklődésük növelésére. Kiváló eszköz a kvantumfizikai rendszerekre jellemző tulajdonságok érzékeltetésére: statisztikus ingadozás (nyomszám, bomlások között eltelt idő, a nyomok helye), az állapotok véges élettartama, az alfa-részecskék jól meghatározott pályahosszából következően a diszkrét energiaállapotok létezése. Ugyanakkor a látvány is hatásos és élményszerű.

Az általános iskolában főként demonstrációs célokra lehet megvalósítani: anyagszerkezet, háttérsugárzás. A középiskolában nem csak a radioaktivitás témakörénél (például felezési idő) használható eredményesen. Az atommagfizikában a szórás folyamatok észlelése, új részecskék keletkezése, az elemátalakítás lehetősége nyújt élményt, például a $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ magreakcióban. A részecskék ütközésénél (például $n-p$ szórás) a klasszikus mechanikai ismeretek gyakoroltathatók. A kísérletek kiértékelésénél pedig a statisztikai ismeretek is előkerülnek. Az egyetemi fizikaoktatás során a felezési idő, a töltött részecskék fékeződése, a hatótávolság energiafüggése, az energia-, nyomhosszúság-eloszlás számítása lehet további érdekes feladat.

A diffúziós ködkamrával kapcsolatos információk és az atommagfizika egyes jelenségeinek megértéséhez szükséges elméleti alapok [6, 7] egy általunk készített honlapon [8] megtalálhatók. Itt közérthető nyelven minden érdeklődő számára elérhetők a leírások, animációk és a képekből, videofelvételekből álló adatbázisok. Útmutatók alapján lehetőség nyílik az egyes kísérletek adatainak egyéni vagy csoportos feldolgozására is. Egy internetes közvetítést nyújtó IP-kamerával a diffúziós ködkamrában kialakuló folyamatok valós idejű megfigyelése is lehetséges. Ez azért fontos, mert olyan forrásokat és egyéb megoldásokat lehet alkalmazni laboratóriumi körülmények között, amelyek nehézségük és a sugárvédelmi előírások miatt az iskolákban nem valósíthatók meg.

A németországi középiskolai fizikatanításnak része a diffúziós ködkamra. Demonstrációra és tanulói kísérletek elvégzésére egyaránt felhasználják [9]. Ez az eszköz valóban kiválóan alkalmas arra, hogy a magyarországi oktatás során is bemutassák, valamint elmélyültebb munkát igénylő feladatokat is végezzenek vele.

Irodalom

1. PHYWE series of publications: *Visualisation of radioactive particles / Diffusion cloud chamber*. (Laboratory Experiments Physics, PHYWE SYSTEME GMBH, Göttingen, Germany). <http://www.phywe.com>
2. Gyórfi T. *Atommagfizika az oktatásban. Környezeti radioaktivitás vizsgálata és szemléltetése*. Doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem, 2011. [http://w3.atomki.hu/PhD/these/Gy%
c3%b6rfi%20Tam%
c3%a1s](http://w3.atomki.hu/PhD/these/Gy%c3%b6rfi%20Tam%c3%a1s)
3. J. Csikai: Photographic evidence for the existence of the neutrino. *Il Nuovo Cimento* 5/4 (1957) 1011–1012.
4. S. L. dos Santos e Lucato: *Lince – Linear Intercept v. 2.4*. Department of Material Science, Darmstadt University of Technology, 1999. [http://www.mawi.tu-darmstadt.de/naw/nawstartseite/
service/software/sv_software.en.jsp](http://www.mawi.tu-darmstadt.de/naw/nawstartseite/service/software/sv_software.en.jsp)
5. J. Ziegler: *SRLM The Stopping and Range of Ions in Matter*. 2000. <http://www.srim.org/index.htm>
6. Fényes T.: *Atommagfizika*. 2. kiadás, Kossuth Egyetem Kiadó, 2009, Debrecen.
7. Raics P.: *Atommag- és részecskefizika*. DE Kísérleti Fizikai Tanszék, 2002, Debrecen. <http://kisfiz.phys.klte.hu/kisfiz/Raics>
8. <http://falcon.phys.klte.hu/~raics/TAVTANULAS>
9. [http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/radioaktivitaet-
einfuehrung/versuche\#Nebelkammer](http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/radioaktivitaet-einfuehrung/versuche\#Nebelkammer) – Schulversuch