

A WIGNER JENŐ SZAKKOLLÉGIUM KÍSÉRLETI KÖR MUNKACSOPORTJA BEMUTATJA: DIFFÚZIÓS KÖDKAMRA

Palotai Veronika, Sánta Botond
BME Fizika Tanszék

A kedves Olvasónak korábban már bemutattuk [1] a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Karának szakkollégiumán, a Wigner Jenő Szakkollégiumon belül működő munkacsoportot, a Kísérleti Kört. A szervezethez csatlakozó hallgatóknak a tanév során, továbbá nyáron is számos lehetősége van fizikai ismereteik, illetve elektronika- és programozástudásuk, valamint előadókészségük fejlesztésére. E tevékenységek során olyan eszközök születnek, mint a cikksorozat előző részében bemutatott vízirakéta, illetve elektronikus dobókocka.



Palotai Veronika a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Kara harmadéves Fizika BSc szakos, alkalmazott fizika szakirányos hallgatója. 2016 szeptembere óta cikkíró és tördelő a *Pikkász* című kari lapnál, illetve 2017 februárja óta a kari Wigner Jenő Szakkollégium tagja, ahol 2018 áprilisában az Oktatási és Kapcsolatok Munkacsoport vezetőjének választották. A Szakkollégium Kísérleti Kör nevű öntevékeny körének tagja.

A diffúziósködkamra-projekt

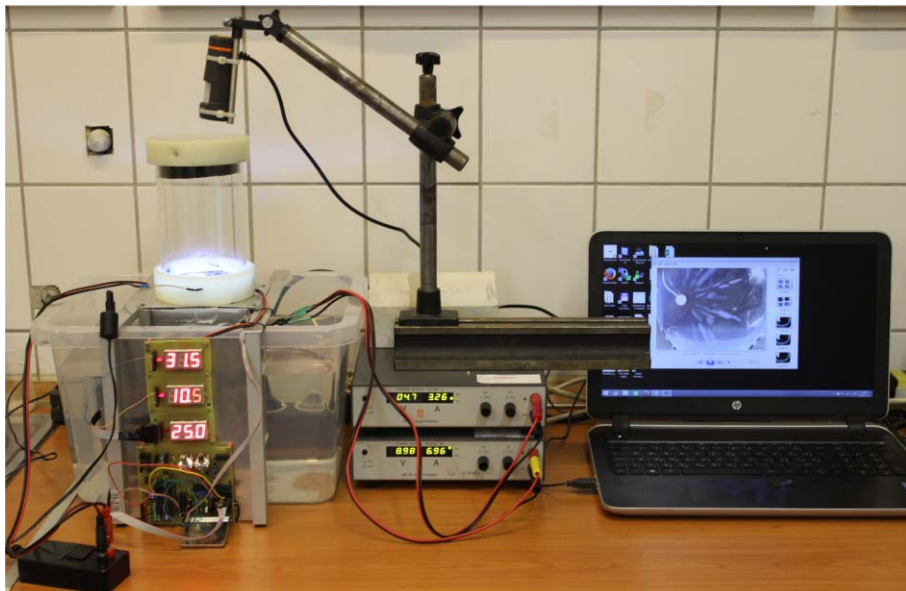
A Karon belül nagy hangsúlyt fektetnek a fizika népszerűsítésére, amelyből a Kísérleti Kör is rendszeresen kiveszi részét, így az általunk készített eszközök gyakran válnak demonstrációs kísérletek főszereplőivé. Olyan is előfordult már, hogy egy-egy eszközt kifejezetten demonstrációs céllal építettünk. Így volt ez a diffúziós ködkamrával is, amelynek első verzióit – minden részegységgel és vezérléssel együtt – a Kísérleti Kör tagjai tervezték, illetve építették. Az előadá-



Sánta Botond fizikus 2016-ban végzett a BME-n, jelenleg itt a Fizika Tanszék doktorandusza, az atomi méretű memóriákat vizsgálja. *Egy demonstrációs kísérlet, amelyben az áram egyetlen atomon keresztül folyik* címmel már jelent meg írása folyóiratunkban. A kutatás mellett közéleti tevékenységet is folytat: a Wigner Jenő Szakkollégium Kísérleti Körének korábbi vezetője (és egyik alapítója), számos demonstrációs kísérleti bemutató és laborlátogatás megszervezése és megtartása fűződik nevéhez.

sainkhoz használt, végleges formája pedig néhány évvel ezelőtt egy TDK-dolgozat keretein belül épült meg [2].

A fizika oktatásában és népszerűsítésében alapvető szerepet játszanak a demonstrációs kísérletek, azonban a legtöbb látványos kísérlet a klasszikus fizika témaköréhez kapcsolódik. Ezért készült el két olyan kísérleti eszköz kifejezetten demonstrációs céllal, amelyek a 20. századi modern fizika két fontos kísérletét mutatják be. A diffúziós ködkamra melletti másik eszköz a pásztázó alagútmikroszkóp volt [2]. A kettő közül az előbbit megépítése óta a legtöbb fizikát népszerűsítő rendezvényen, illetve valamennyi egyetemi és kari nyílt napon bemutattuk; mondhatni repertoárunk oszlopos részévé vált (1. ábra).



1. ábra. A teljes demonstrációs mérési összeállítás, balra a diffúziós ködkamra kamrarésze látható [2].

A kamrában kialakuló ködfonalak mérete, alakja karakterisztikus az adott részecskére nézve. A ködfonalak vastagsága elsősorban az adott részecske ionizációs képességétől, hossza pedig a részecske kinetikus energiájától függ.

Történeti áttekintés, elméleti háttér

A radioaktív sugárzások jelenléte környezetünkben döntően természetes eredetű. Fő forrásuk a Naptól és világegyéből származó kozmikus sugárzások, illetve a Föld belsejéből származó radioaktív nehéz elemek. A radioaktivitás érzékszerveinkkel közvetlenül nem érzékelhető, ugyanakkor kimutatása és mérése fontos feladat.

A ködkamra egy olyan különleges nukleáris detektortípus, amely az ionizáló sugárzásokat közvetlenül láthatóvá teszi. Az eredeti Wilson-féle kamrában – egy dugattyúval történő gyors expanzió segítségével – vizgőzt hoztak túlhűtött állapotba [3]. Az eszköz megalkotóját – *C. T. R. Wilson* skót fizikust – 1927-ben *Arthur Comptonnal* megosztva fizikai Nobel-díjban részesítették.

A ködkamrában túlhűtött gőzréteget hozunk létre expanzióval vagy hűtéssel; ez a detektor érzékeny térfogata. A túlhűtött állapot metastabil, perturbáció hatására fázisátalakulás jön létre. Amikor e túlhűtött rétegen egy ionizáló részecske halad át, akkor trajektóriája mentén ionizálja a gőzrészecskéket, aminek hatására apró folyadékcseppek – kondenzációs magvak – képződnek. A magvak környezetében lévő gőz kondenzációja tovább növeli a csepp méretét, így szabad szemmel látható méretű csepp képződik (2. ábra). Ezen cseppekből épülnek fel a ködfonalak.

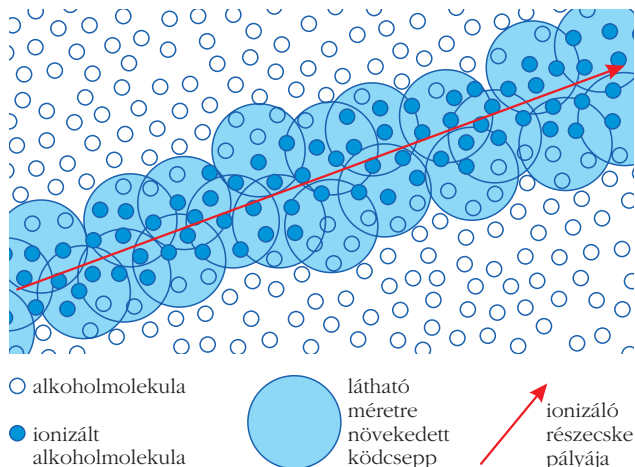
Amíg a Wilson-féle kamrában csak pillanatfelvételeket lehetett készíteni az expanzió miatt, addig a diffúziós ködkamrában a kamra tetejéből folyamatosan a hűtött oldal felé áramló, majd ott kondenzálódó alkohol miatt folyamatos üzemű működtetés is lehetővé válik.

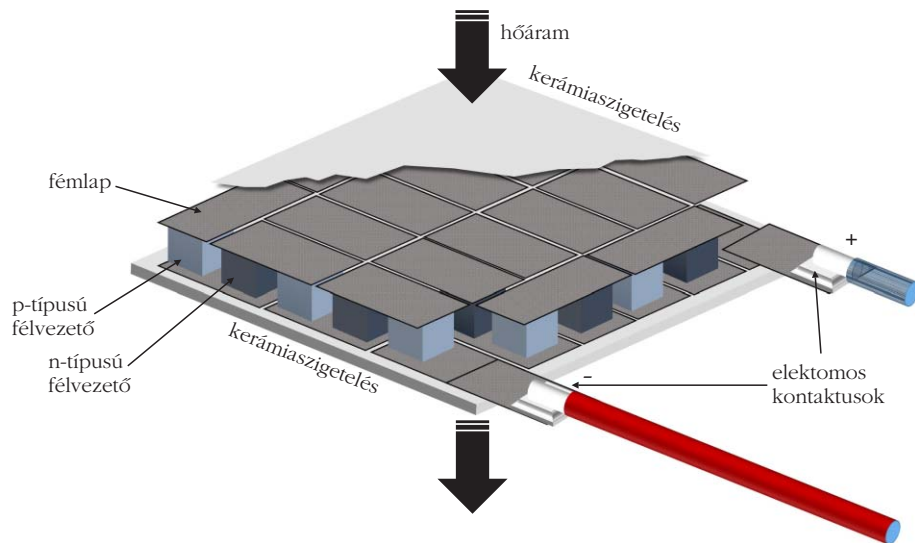
A ködkamra hűtése

Ködkamrát viszonylag egyszerűen lehet építeni, ha rendelkezésre áll szárazjég vagy folyékony nitrogén. Akár házilag is könnyen összeállítható ködkamrát ír le a CERN által tartott workshop [5]. Nagy hátránya a szárazjéggel és folyékony nitrogénnel működtetett ködkamráknak, hogy időnként utántöltést igényelnek, illetve hosszabb működtetés esetén meg kell oldani a hűtőközeg tárolását is, nem beszélve azok szállításáról és beszerzéséről.

Gyári ködkamrák esetében, mint a PHYWE PJ45 típusú ködkamra kompresszoros hűtést alkalmaznak.

2. ábra. A ködfonalképződés folyamata [4].





3. ábra. A Peltier-elem felépítése [7].

Ezek nagy előnye, hogy – általában nagy hűtött felülettel – gyakorlatilag folyamatos, utántöltés nélküli működtetést tesznek lehetővé [6]. Hátrányuk, hogy nagyok és zajosak, valamint az áruk is meglehetősen magas. Folyamatos üzemű ködkamra hűtésére alternatív megoldás lehet félvezető Peltier-elemek használata. Az itt bemutatott ködkamra hűtése is Peltier-elemekkel lett megvalósítva.

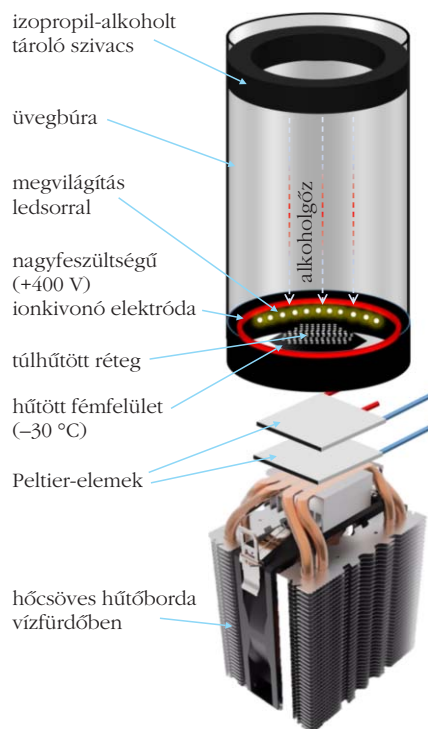
A Peltier-elem

A Peltier-elem egy olyan félvezető eszköz, amely elektronikus hőszivattyúként működik. Tipikusan hordozható hűtőtaszáknál, processzorhűtőknél, lézerek hűtésénél alkalmazzák. Előnyei a széleskörű vezérelhetőség, a zajmentesség, a hőáramlás irányának változtathatósága, illetve a mozgó alkatrészek hiánya. Hátrányai közé tartozik, hogy drága, törékeny és a kompresszoros hűtéssel szemben kis teljesítmény valamint felület jellemzi. Felépítése több, egymással sorba kapcsolt félvezető pn-átmenettel történik, amelyeket vékony kerámialapok (tipikusan Al_2O_3) közé rögzítenek (3. ábra).

A ködkamra felépítése

A Peltier-elemek alsó oldalára egy SCNJ-3100 típusú passzív hűtőborda csatlakozik, amely nyolc darab hőcső segítségével

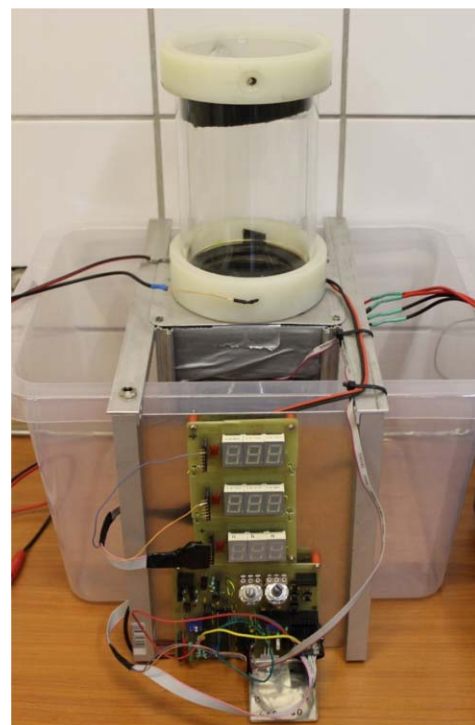
4. ábra. Egy diffúziós ködkamra sematikus felépítése (balra) és a kész kamra (jobbra).



vel vezeti el a meleg oldalon keletkező hőáramot (4. ábra). Ez a hűtőborda egy hideg vízzel teli edényben helyezkedik el, amely nagy hőkapacitása révén lassan melegszik, és kvázi állandó, alacsony hőmérsékletet biztosít a bordának és így a Peltier-elemek meleg oldalának. Egy 10 literes, 18 °C-os csapvízzel történő feltöltéssel a kamra akár másfél órás működésre is képes.

A ködkamra tervezésénél a hőmérséklet mérése kritikus rész volt. Fontos, hogy közvetlenül a hőszivattyúk hideg és meleg oldalán mérjük a hőmérsékleteket, amely geometriai okokból nem könnyen kivitelezhető. A megoldást végül a két Peltier-elem közé helyezett nyáklemez – amelyen a hőmérőáramkör is ki lett alakítva – jelentette.

A jó hővezetés érdekében alumínium alapú nyáklemez alkalmaztunk, így a mért értékek jó közelítéssel a Peltier-elemek hideg és meleg oldalán kialakuló hőmérsékleteket adják. A felületi egyenetlenségekből adódó rossz hőkontaktus kiküszöbölésére vékony hővezetőpaszta-réteg került a nyáklemezek és a Peltier-elemek közé. A hűtött oldalt is – vagyis a fémlapot, ami felett a túlhűtött gőzréteg jön létre – a legfelső ilyen hőmérő áramkör alumíniumlemeze biztosítja.



A Peltier-elemek pontjain mért hőmérsékletek monitorozására egy, a BME TTK Wigner Jenő Szakkollégium Kísérleti Kör munkacsoportja által tervezett és megépített mikrokontroller alapú fejlesztőpanelt szolgált.

A digitális hőmérők által mért hőmérsékletek kiolvasása mellett ez az áramkör felelt a saját fejlesztésű hétszegmentes kijelző működtetéséért is. Utóbbi három darab azonos, három és fél digitális kijelzőből áll, amelyekkel a ködkamra hűtéskor nyomon követhető az egyes hőmérsékletek változása. Ez az interfész egyúttal monitorozási célt is szolgál, hiszen ha túlságosan felmelegedne a hűtővíz, akkor ez a kijelzőről könnyen leolvasható, és szükség esetén a felmelegedett víz könnyen lecserélhető.

A ködfonalak megfelelő megvilágítása szintén nagyon kritikus volt. Ideálisnak tekinthető egy keskeny résen át világító, nagy fényerejű, homogén eloszlású fényforrás, amely csakis a néhány mm-es túlhűtött réteget világítja meg, egyenletesen [8]. Ez a gyakorlatban egy nagy fényerejű SMD (Surface Mounted Device – felületszerelt alkatrész) LED-sor segítségével valósult meg, amely a szilikonos védőrétegnek köszönhetően vízálló kivitelű is. Ez igen előnyös tulajdonság, hiszen a kamrában az alkoholgőz kondenzációja miatt elektromos rövidzár is kialakulhatna. A fényforrás mindenféle tükröződését meg kell előzni, ezért a LED-sor fölé egy fekete műanyaggyűrű került, amely így kitakarja a megfigyelő felé érkező direkt megvilágítást. A LED-sor, mivel igen sok fénykibocsátó diódát tartalmaz, amelyek különböző szögben világítják meg az érzékeny térfogatot, kiváló megvilágítást biztosít.

A ködkamrában lévő zavaró ionok és szennyeződések megakadályozhatják a ködfonalképződést, ezért egy külső elektromos tér alkalmazása – amely ezen szennyeződések kivonja a hűtött térfogattól – szükséges [8]. A külső elektromos teret egy 1 kV-os nagyfeszültségű tápegység biztosította. A feszültségforrás földje a hűtőbordára, a pozitív elektróda pedig az üvegbúra belső részén kialakított elektródára került.

Az izopropil-alkohol a kamra tetején található szivacsrétegből párolog a hideg oldal felé. Mivel kamrarész hermetikusan zártnak tekinthető, ezért az alkoholvészteség minimális. Egy csupán 10 ml-es alkoholfeltöltéssel a ködkamra órákig üzemeltethető. Ugyanakkor egy külön célra kialakított üvegcsap – amely az üveghenger felső oldalán helyezkedik el – segítségével lehetőség van az alkohol utántöltésére.

A ködkamra vezérlése egy C# nyelven megírt programmal történik. A program a mikrokontrollerrel UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter – univerzális aszinkron adóvevő) protokollon keresztül kommunikál. A mikrokontroller a digitális hőmérők lekérdezésén kívül még visszaméri a Peltier-elemeket meghajtó tápegységek által kiadott feszültség- és áramértékeket is. Így PC alapú adatgyűjtésre is lehetőség nyílik.

Kísérletek a diffúziós ködkamrával

Részecskék által keltett ködfonalak jellemzői

Ebben a részben összefoglaljuk, hogy mely részecskék kimutatása lehetséges a diffúziós ködkamrában és mi jellemző ezen részecskék által keltett ködfonalakra.

α -sugárzás

A ködkamrában legjobban az α -részecskék figyelhetők meg. Nagy kinetikus energiájuknak köszönhetően egyenes vonalban terjednek. Ionizáló képességük – a Bragg-görbének megfelelően – sebességük csökkenésével megnő [9]. Mivel ködkamrában kialakuló ködfonalak szélességét alapvetően a részecskék ionizáló képessége határozza meg, ezért az α -részecskék által keltett ködfonalak vége kiszélesedik. Az α -részecskék által levegőben a lefékeződésig megtett úthossz kinetikus energiájukkal, vagyis a keltett ködfonalak hosszával arányos. Egy ökölszabály szerint egy 1 MeV-es α -részecske ≈ 1 cm-es úthosszal rendelkezik [3]. Így a ködkamrával a megjelenő részecskék kinetikus energiája is megbecsülhető.

β -sugárzás

A ködkamrában a β -részecskék is jól megfigyelhetők. Trajektóriájuk alakja elsősorban kinetikus energiájuktól függ. Nagyenergiás β -részecskék (10 keV – 1 MeV) kvázi egyenes, kisenergiásak (<1 keV) szabálytalan pályát írnak le. A szabálytalan pályát az atomokon történő rugalmas ütközések okozzák [3]. A β -ködfonalak jóval keskenyebbek az α -részecskék által keltettekénél, mivel ionizációs képességük kisebb.

γ -sugárzás

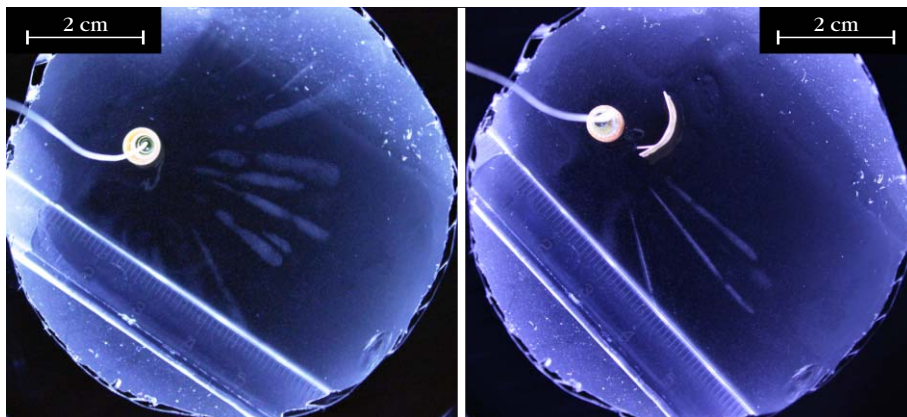
Ezen részecsketípus megfigyelhetősége a ködkamrában csekély, ugyanis α -, β - és γ -sugárzások közül a γ -foton rendelkezik a legkisebb ionizáló képességgel. Anyaggal történő kölcsönhatásai során (párkeltés, Compton-szórás, fotoeffektus) keletkező β^+ -részecskék keltenek közvetlenül ködfonalakat a kamrában [3]. A jelenség úgy is megfigyelhető, ha a sugárforrást a ködkamrán kívülre, de közvetlenül mellé helyezzük el. Ugyanis, az α -, illetve a β -sugárzás nem képesek áthatolni a mm vastag üvegbúrán, a γ -sugárzás viszont igen. Így például nagyon jól megfigyelhető az uránérc kiemelkedően magas γ -aktivitása.

A ködkamrában alkalmazott sugárforrások

A radioaktív demonstrációs kísérletek elengedhetetlen kellékei a sugárforrások. Természetesen megfelelő körültekintést igényel a források kiválasztása, figyelembe véve a hatályos jogi szabályozást is. A diffúziós ködkamra építése idején az alábbi, nem engedélyköteles sugárforrások léteztek:

Uránüveg gyöngy

Különlegessége, hogy az urántartalma miatt UV fényben zölden fluoreszkál. Ezt a tulajdonságát min-



5. ábra. Balra a ^{210}Pb -izotóp keltette ködfonalak, jobbra pedig a sugárzás kis térszögben, részlemezrel való árnyékolása látható.

den bemutató alkalmával demonstrálom is. Ennek oka, hogy az üvegmátrixban néhány térfogat-százaléknyi szennyező urán található. A mintában alapvetően a természetben a leggyakoribb ^{238}U izotóp található. Ez az izotóp bomlása során 4,27 MeV-es α -részecskét bocsát ki, felezési ideje pedig $4,468 \cdot 10^9$ év [10]. Az α -részecske csak akkor tud kilépni a mintából, ha a forrás az üveg felszínén helyezkedik el. Mindezekből adódik, hogy a minta aktivitása igen csekély, de ködkamrában egyértelműen kimutatható.

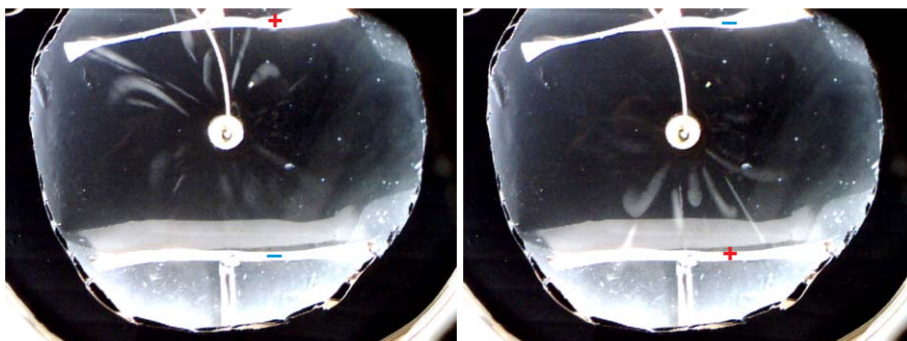
Gázbarisnya

Korábban kemping gázlámpásoknál alkalmazták, növelve a gázláng fényerejét. A sugárforrás beszerezhetősége elég nehézkesé vált, mivel kereskedelmi forgalomban manapság már nem kapható. Radioaktivitását a benne lévő tórium-dioxidnak köszönheti. A természetben csak egyfajta tóriumizotóp lelhető fel, amely az egyik természetes bomlási sor eleje. A ^{232}Th 100%-ban α -bomló (4,08 MeV), $14,05 \cdot 10^9$ év felezési idővel [10].

Tóriumos hegesztőpálca

Ma is kereskedelmi forgalomban kapható hegesztéshez használt pálcátípus. Ennél a fajta pálcánál a volfrámból álló elektródák 2-3% tórium-dioxid stabilizátort tartalmaznak. A tóriumadalék javítja a hegesztési tulajdonságokat. A gázbarisnyánál leírtak vonatkoznak rá.

6. ábra. A ^{210}Pb -forrásból származó részecskék eltérülése elektromos térben. Jól megfigyelhetők a pozitív elektródát megközelítő, majd onnan visszakanyarodó a részecskék.



NK-2 jelzésű gyári ködkamra-sugárforrás [8]

A volt NDK területén készült ködkamrához egy komolyabb aktivitású sugárforrást is mellékeltek. A leírás szerint a forrás ^{210}Pb -izotóp, amelynek aktivitása 1973-ban $0,2 \mu\text{Ci}$ volt, ami 7,4 kBq-nek felel meg. Mivel a felezési ideje 22,2 év, ezért a mai aktivitása ennél lényegesen kisebb, mindössze ≈ 1 kBq. Gyakorlatilag mind a három alap (α , β^- , γ) sugárzásfajta kibocsátja. Ezen preparátum kifejezetten ködkamrához

készült, ami kialakításán is látszik. Hengeres hordozóra vékony rétegben nagy aktivitású ^{210}Pb izotópot vittek fel, tehát a minta radiálisan, egy keskeny sávban sugároz. Így a kibocsátott részecskék nagy része a túlhűtött rétegben nyelődik el. A vékony rétegű kialakításnak köszönhetően kiküszöbölésre került az önárnyékolás, mely az α -sugárforrások készítésének legnagyobb kihívása.

Sugárzások abszorpciója

A cél az α - és β -részecskék közegben történő elnyelődésének bemutatása volt. Ehhez elsőként vékony aranyfüstfólia került a sugárforrás elé, ami a várakozások szerint az alfa-sugárzást elnyeli, de kellően vékony fólia esetén a béta-sugárzást áttereszti.

Sajnos a fólia mögött egyáltalán nem látszottak ködfonalak, így a szelektív elnyelést nem sikerült demonstrálni. Ezután egy egyszerűbben kezelhető, vastagabb rézfólia következett, amely adott térszögben láthatóan minden sugárzást elnyelt (5. ábra).

Sugárzások eltérítése elektromos térrel

A kísérlethez a ködkamra hűtött felülete fölé vékony rézlapokból álló elektródapár került, és egy Delta ES 300-0.45-ös nagyfeszültségű tápegység szolgáltatott 250 V-os feszültséget a két elektróda közé. Az elektromos tér polaritása megfordítható, illetve a teljes elektromos tér is megszüntethető, ezzel teremtve lehetőséget a kontrollkísérletre.

Könnyen belátható, hogy az alkalmazott geometria mellett jelentős eltérést csak akkor kapunk, ha a részecske kinetikus energiája összemérhető a qU energiával, ahol q a részecskék töltése, U pedig az

elektródákra kapcsolt feszültség (6. ábra). A ^{210}Pb -forrás által kibocsátott sugárzások kinetikus energiáját ismerve egyértelmű, hogy csak akkor várunk eltérést, ha a nagyenergiás részecskék kinetikus energiája már párszáz elektronvolt nagyságúra csökken.

Az egyes részecsketípusok elsősorban vastagságuk és alakjuk szerint különböztethetők meg. Megfigyelhető, hogy adott irányú elektromos tér jelenlétében az azonos vastagságú részecskepályák merre térülnek el. A kísérletben kiválóan látszódott, hogy a vastagabb és kiszélesedő végű pályát létrehozó α -részecskék a pozitív elektródát megközelítve visszakanyarodnak a negatív elektróda felé, miközben elveszítik kinetikus energiájukat. Ellentétes irányú elektromos térrel adott részecskére az ábrának megfelelően ellenkező irányú eltérést tapasztaltam. Az elektromos tér megszüntetésével az addig tapasztalt eltérés teljesen megszűnt. Kijelenthető tehát, hogy a diffúziós ködkamrában jól demonstrálható a radioaktív bomlásból származó részecskék elektromos térrel való eltérítése és így elektromos töltésének előjele.

Jövőbeli tervek

A cikk elején már említettük, hogy a diffúziós ködkamrát a vízirakétával és egy sor másik eszközzel együtt az érdeklődők számára már számtalanszor bemutatunk a különféle egyetemi, kari, illetve tudományt

népszerűsítő eseményeken. Ezt a jövőben is hasonlóan tervezzük, így akinek felkeltette az érdeklődését ez az eszköz, és szeretne közelebből is megismerkedni vele, a legjobb helyen jár az imént említett rendezvényeken.

Továbbá, ha valaki a ködkamra megépítésére vállalkozik, és elakadna, akkor felmerült kérdéseire a santa.botond.cwzb3f@gmail.com e-mail-címen szívesen válaszolunk.

Irodalom

1. Palotai Veronika: A BME Kísérleti Köre bemutatja: Vízirakéta. *Fizikai Szemle* 68 (2018) 431–435.
2. Sánta Botond: *Megmutatni a nebezen láthatót: Két Nobel-díjas kísérlet demonstrációs célú megvalósítása*. TDK dolgozat (2015), <http://tdk.bme.hu/TTK/DownloadPaper/Nobeldijas-kiserletek-demonstracios-celu>
3. Kiss Dezső, Horváth Ákos, Kiss Ádám: *Kísérleti atomfizika*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest (1998) 232–238. és 262–263.
4. Györfi Tamás, Raics Péter: Diffúziós ködkamra – mutatni a láthatatlant – I. rész. *Fizikai Szemle* 64 (2014) 22–26.
5. CERN cloud chamber workshop <https://teachers.web.cern.ch/teachers/document/cloud-final.pdf>
6. PHYWE, PJ45 diffusion cloud chamber manual
7. http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2007.web.dir/sedona_price/phys_212_webproj_peltier.html
8. Feinwerktechnik: Bedienungsanleitung NK 2 Nebelkammer. Liepzig (1974) <http://wignerjenoszakkollegium.hu/kiskor/sites/default/files/uploads/u5/NK-2%20kamrale%C3%ADr%C3%A1s.PDF>
9. K. N. Muhin: *Kísérleti magfizika*. Tankönyvkiadó, Budapest (1985) 232–234.
10. International Atomic Energy Agency (IAEA): NuDat 2, online nuclear database. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2>