

fizikai szemle



2019/3

Versenyfelhívás

12. Bródy Imre Országos Fizika Kísérletverseny



2019. május 23. (csütörtök)

**Nyíregyházi Arany János Gimnázium, Általános Iskola és Kollégium,
valamint a Nyíregyházi Egyetem szervezésében**

4400 Nyíregyháza, Ungvár sétány 22.

Kategóriák:

- I.** 7. évfolyamos tanulók részére: **dinamométer (erőmérő) készítése**
- II.** 7–11. évfolyamos tanulók részére: **áramerősség-mérő műszer készítése**
- III.** 7–8. és 9–11. évfolyamos tanulók részére, külön szekcióban: **„Kedvenc fizikakísérletem”**
- IV.** elsősorban 7–9. évfolyamos tanulók részére: **vízrakéta készítése**
- V.** 8–12. évfolyamos tanulók részére: **hajítógép építése**

A **részletek** megtekinthetők Nyíregyházi Arany János Gimnázium, Általános Iskola és Kollégium http://nyharany.hu/wp/?page_id=106 Bródy Fizika Kísérletverseny oldalán.

Értékelési szempontok:

- az eszköz működőképessége;
- az eszköz, kísérlet, mérés bemutatásának színvonala, a magyarázat érthetősége, szakmai korrektsége, a szaknyelv használata;
- a zsűri kérdéseire adott válaszok korrektsége, érthetősége;
- az eszköz megépítésének ötletessége, a kivitelezés minősége, a ráfordított munka mennyisége.

Nevezés:

Határidő: 2019. május 3.

Részletes felhívás és **nevezési lap**: <http://nyharany.hu/uj/brody/2019/kiserletverseny2019.pdf>

Nevezések beküldése: elektronikusan a brodyfizika@gmail.com címre

További felvilágosítás: Kiss Lászlóné (mobil: 0630/6272864) szervező

Kiss Lászlóné

Arany János Gimnázium

Beszeda Imre

Nyíregyházi Egyetem





BEVEZETŐ HELYETT

Alább idézzük, *Molnár Andrea* 75. oldalon kezdődő írásából kiemelve, *Eötvös Loránd* 1890-ben, a Magyar Tudományos Akadémia 50. közgyűlésének elnöki megnyitójában elhangzott gondolatait a „tisztán tudományos törekvések” és a „közvetlenül hasznot hajtó kérdések” viszonyáról.

„Irodalom és tudomány, mindketten eszményi törekvéseknek, a szép és igaz szeretetnek gyermekei. Az akadémiák feladata őrködni, hogy az egyik mint a másik a mindennapi élet szükségletének színvonalán fölül emelkedjék; az irodalom ne legyen csupán hírlapirodalom, közönséges regénytár és iskolakönyvek gyűjteménye; a tudomány ne csupán a közvetlenül hasznot hajtó kérdésekkel foglalkozzék. Pedig tudomány nélkül nincs gyakorlat. Ma a gyakorlat emberét is tudósok iskoláiban képezzük és pedig azért, mert a tisztán tudományos törekvéseknek meg nem becsülése nemcsak az emberiség legmagasztosabb eszményeit rontaná le, hanem meddővé tenné magát a gyakorlatot is. Épen a természettudományok a legszembetűnőbb példákkal bizonyítják ezt; még az úgynevezett hasznos felfedezéseket is rendszeren nem azok hozták létre, kik olyanokat kerestek, hanem úgy létesültek azok, mint az elvont igazságot önzetlenül kereső tudósok által elért tudományos eredmények kifolyásai.”

Lehet, hogy az Eötvös-centenárium április 8-i nagy rendezvényének védnökei közül nem mindenki látja ezt így.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:
Lendvai János

Szerkesztőbizottság:
Bencze Gyula, Biró László Péter, Czitrovszky Aladár, Füstöss László, Gyürky György, Hebling János, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Koppa Pál, Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:
szerkesztok@fizikaiszemle.hu
A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:
<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:
A világon először 2018 szeptemberében, Németországban állt menetrendi forgalomba hidrogénnel üzemelő vonat. A Coradia iLint® motorvonat egy feltöltéssel 800 km út megtételére képes (fotó: Alstom).

- Lendvai János:** Bevezető helyett 73
- Molnár Andrea:** Eötvös Loránd, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke 75
Eötvös Loránd 16 éven keresztül volt az Akadémia elnöke. Az írás akadémikusi és elnöki tevékenységét mutatja be.
- Kurgyis Bálint:** Relativisztikus hidrodinamika a nehézion-ütközésekben 80
A kísérleti eredmények alapján a kvark-gluon plazma viszkozitása kisebb, mint bármilyen más ismert folyadéké, így ez a lehető legkövetkezőbb folyadék, amivel eddig a természetben találkoztunk.
- Révész Ádám, Gajdics Marcell:** Hidrogén szilárd fázisú tárolása 84
A szilárd fázisú tárolás – például fém-hidridekben, vagy egyéb nanostrukturált anyagokban való megkötés – nagy előnye, hogy a térfogategységre vonatkoztatott hidrogénsűrűség, az összes ismert módszer közül ezen rendszerek esetében a legnagyobb.

A FIZIKA TANÍTÁSA

- Fülöp László, Brázai Gergő:** Fogászati röntgenfilmek a fizikában – 2. rész 90
Fogászati röntgenfilmek alkalmazásával megismertethetjük a tanulókkal a dozimetria és a röntgendiffrakció alapjelenségeit.
- Palotai Veronika, Sánta Botond:** A Wigner Jenő Szakkollégium Kísérleti 97
Kör munkacsoportja bemutatja: diffúziós ködkamra
Az ionizáló sugárzásokat közvetlenül láthatóvá tevő kísérleti eszközt kifejezetten demonstrációs céllal építették meg a szakkollégiumi hallgatók.
- Szabó Róbert:** A Kalocsai Érseki Főgimnázium röntgenlaboratóriuma 102
és első világháborús szerepvállalása
A modern felszereltségű fizikaszertár eredetileg demonstrációs célokra szánt röntgenlaboratóriuma az intézetben működő hadikórház kezelőorvosainak laboratóriuma lett.
- Radnóti Katalin:** Miért és hogyan lettem fizikatanár? 107
Beszélgetés Papp Katalinnal
A fizika tanításának szakmódszertana iránt elkötelezett két egyetemi oktató beszélgetése.

www.fizikaiszemle.hu/mellekletek

Bartos-Elekes István: Fedezzük fel az elektromágneses indukciót!
A fizika egyik alapvető törvényének újrafelfedezése hat, egyre bonyolultabb kísérletsorozatban. Közben Ravel Boleroja szól.

J. Lendvai: Instead of introduction
A. Molnár: Roland Eötvös, president of the Hungarian Academy of Sciences
B. Kurgyis: Relativistic hydrodynamics in heavy ion collisions
Á. Révész, M. Gajdics: Solid-state hydrogen storage

TEACHING PHYSICS

L. Fülöp, G. Brázai: Dental X-ray films in physics – Part 2.
V. Palotai, B. Sánta: The Experimental Circle of Budapest Technical University presents: Diffusion vapor chamber
R. Szabó: X-ray laboratory of the Kalocsa Archbishop's Main Gymnasium and its engagement during World War I.
K. Radnóti: Why and how did I become a physics teacher? Interview with Katalin Papp

www.fizikaiszemle.hu/mellekletek

I. Bartos-Elekes: Discover the electro-magnetic induction (with Ravel's Bolero)



EÖTVÖS LORÁND, A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA ELNÖKE

Molnár Andrea
MTA Könyvtár és Információs Központ

Eötvös Loránd, bár manapság elsősorban tudós fizikusként ismert, élete során számos közéleti szerepet vállalt a tudomány szolgálatában. Ezek közül a leg-hosszabb ideig ellátott feladata a Magyar Tudományos Akadémia elnöki tisztsége volt, amelyet 16 éven keresztül, 1889 májusától 1905 októberéig viselt. Az alábbi írásban – a tudományos életpályáját érintő bevezető után – Eötvös Loránd akadémikusként és az Akadémia elnökeként végzett tevékenységét mutatom be.

Az író, publicista és politikus *Eötvös József* és a fizikus Eötvös Loránd, apa és fia, az Akadémia történetének első nyolcvan évében odaadó munkával voltak jelen. Eötvös József mindössze 22 évesen lett a Tudós Társaság levelező tagja, majd 1866-tól haláláig elnöke. Eötvös Loránd látószögében tehát édesapja révén már születésétől fogva jelen volt az Akadémia, amely iránti elkötelezettségét, érdekében tett fáradhatatlan kötelességteljesítését édesapja példájából merítette. Apja mellett családjának más tagjain keresztül is ismerhette az intézményt. *Trefort Ágoston*, keresztapja és nagybátyja szintén az Akadémia tagja, majd elnöke volt. Anyai nagybátyját, *Rosty Pál* földrajztudóst és fotográfust 1861-ben választották az Akadémia levelező tagjává (1–3. kép).

Eötvös Loránd érdeklődése hamar a tudományok felé fordult, ahogy arról 17 évesen apjához írt levele is tanúskodik: „Az ambíció s a kötelességérzet, mely nemcsak egy privilegizált nemzet, hanem az egész emberiség irányában köt le, velem született, e két indulatot kielégíteni, és pedig kielégíteni úgy, hogy a mellett egyéni függetlenségemet megtartsam, életcélom; s legalább eddig úgy találtam, hogy annak leginkább akkor felelhetek meg, ha a tudományos pályára lépek.” (Eötvös Loránd levele édesapjához, 1866. március 28.) Apjának engedve, a pesti egyetemen elvégezte a jogi képzést, mellette azonban a természettudományi előadásokat is látogatta. 1867-től Heidelbergben folytatta természettudományi stúdiumait, ahol 1870 júliusában megszerezte a bölcsészeti doktorátust természetanból mint fő tárgyból, matematikából és kémiából mint melléktárgyakból.



Molnár Andrea egyetemi tanulmányait a szegedi József Attila Tudományegyetemen végezte magyar, történelem és latin szakon. 1999-től 2016-ig a Magyar Tudományos Akadémia Titkársága Kutatóintézeti Főosztályán dolgozott, 2016-tól az MTA Könyvtár és Információs Központ tudományos titkára. Kutatási területe a magyarországi latin irodalom a 18. században, valamint a Magyar Tudományos Akadémia története.



1. kép. Eötvös Józsefről az 1860-as években készített fénykép részlete, megjelent a *Vasárnapi Újság* 1904. március 27-i számában.

2. kép. Paczka Ferenc (1856–1925) Trefort Ágostonról készített festménye (részlet), a Magyar Nemzeti Múzeum tulajdona.





3. kép. Rosty Pál földrajztudós Székely Bertalan (1835–1910) 1862-ben készült festményének részletén, a Magyar Nemzeti Múzeum tulajdona.

1870 nyarán hazatért, és bekapcsolódott a Természettudományi Társulat munkájába. Édesapja 1871. február 2-án elhunyt, így már nem érhetette meg fia első szereplését az Akadémián. Az akadémiai testület 1871. májusban engedélyezte Eötvös Lorándnak, hogy vendégként előadást tartson. Tanulmányát *A rezgési elméletekből következő távolbani hatás törvényéről* címmel a III. Matematikai és Természettudományi Osztály július 19-i ülésén olvasta fel.

Egyetemi karrierje is szerencsésen alakult: napirenden volt a pesti egyetem természettudományi képzésének bővítése, így 1871-ben sikerrel pályázta meg a magántanári állást. Egy évre rá, mindössze 23 évesen az uralkodó külön engedélyével az elméleti természettani tanszék nyilvános rendes tanárává nevezték ki.

Huszonnégy éves, amikor 1873. május 21-én, az Akadémia 33. nagygyűlésén levelező taggá választották 30 jóváhagyó és 4 nemleges, tehát a szükséges kétharmadnál jóval több szavazattal (4. kép). Az alapszabály szerint egy éven belül meg kellett volna tartania székfoglaló előadását (a megválasztott levelező tag addig nem kapta meg oklevelét, amíg előadásával széket nem foglalt), de erre csak közel 7 év elteltével, 1880. január 19-én került sor *Adatok az elektrosztatika elméletéhez* címmel a láncolatos elektromos sűrítőkről (5. kép). Az akadémiai ülésekre megválasztása óta rendszeresen eljár, minden évben felolvasta újabb kutatási eredményeit, csak a székfoglalójára nem szánta el magát. A felolvasást megelőző köszönetmondásában a késedelem okaként említi az édesapja miatti meg nem érdemelt kivételezettségének tudatát és a következőket:

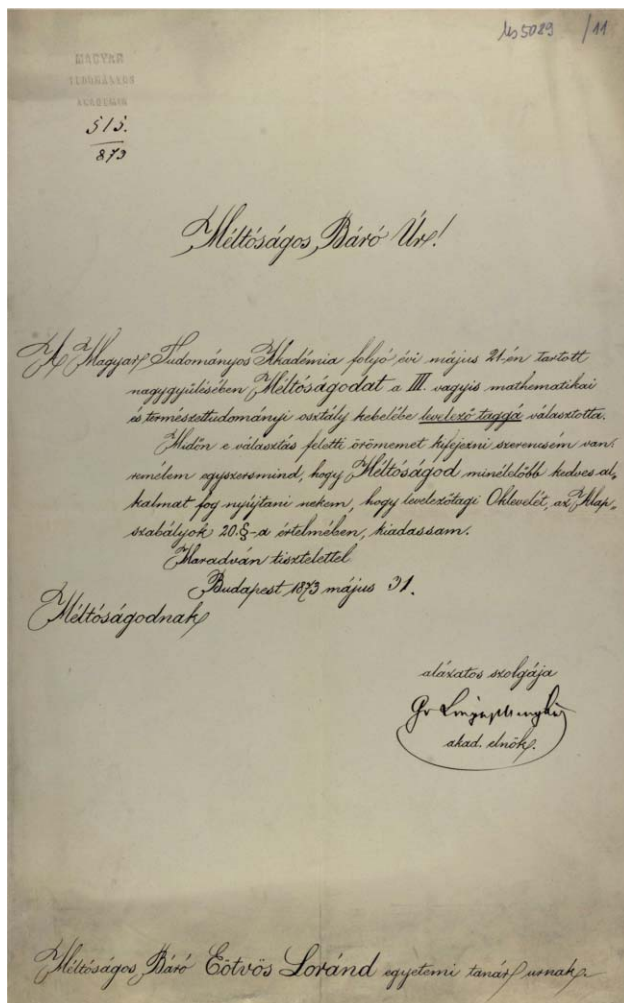
„Érdemetlenségem érzete soká visszatartott abban, hogy e tudományos testületben széket foglaljak; mert

ámbar megválasztásom óta többször voltam szerencsés e helyen értekezhetni, székfoglalóul valami készszel, egy kikerekített egésszel kívántam volna föllépni. De az idő múlt, s az idővel én is idősebb lettem, napról-napra meggyőződve arról, hogy a tudományban készek soha sem leszünk.”

A III. Matematikai és Természettudományi Osztály már a következő évben (1881) a szokásos kétharmados többségű titkos szavazással rendes taggá jelölte, de sem ekkor, sem 1882-ben nem kapott elegendő szavazatot. A testület végül 1883. évi nagygyűlésen választotta rendes tagnak. Ezúttal kevesebbet várt a székfoglalóval, 1885. január 19-én tartotta meg *A folyadékok felületi feszültségének összefüggéséről a kritikus hőmérséklettel* címmel.

1888. augusztus 22-én elhunyt az MTA elnöke, Trefort Ágoston. A következő elnök személyének kijelölésénél bizonytalanság lépett fel: a másodelnök csak az október 29-i összes ülés végén bocsátotta szavazásra az elegyes ülés összehívásának kérdését. A testület a májusi nagygyűlésre halasztotta az elnökválasztást. Lehetséges elnökként merült fel a konzervatív *Széchényi Antal*, *Kállay Béni*, valamint *Andrássy Gyula*, de a jelölésre valamennyien elutasító választ adtak.

4. kép. Értesítés akadémiai levelező tagságáról, 1873.





5. kép. Oklevél akadémiai levelező tagságról, 1880.

Ezt követően esett a választás a fiatal Eötvös Lorándra, aki ekkorra már Európa-szerte neves fizikusnak számított.

Az 1889. május 3-i nagygyűlésen négy elnökjelöltre voksoltak a testület tagjai: a 48 szavazatból Eötvös 27-et, Zichy Antal 18-at, Széchenyi Béla 2-t, Hollán Ernő 1-et kapott. Ezzel az MTA 6. elnökeként Eötvös Loránd lépett hivatalba. Elődeitől eltérően ő elsősorban tudós volt, ráadásul természettudós. Személye átmenetet jelentett a 20. századba tartó új szemléletű, fiatal tudósok és az Akadémia korábbi nagy generációja között.

Még ugyanebben az évben Szily Kálmán lett a főtiszt, aki szintén fizikus volt (később a nyelvészet területén is kiváló érdemeket szerzett). Az Eötvös-Szily-vezetésben, amely 16 évig állt fenn, a közvélemény is a tudományos szakszerűség előtérbe kerülését látta. Eötvös, aki egész életében mély tisztelettel és szeretettel viseltetett az alapítók generációja iránt, első elnöki beszédében világossá tette álláspontját a reformot követelők számára:

„Az akadémia nem olyan intézet, melyet reformkísérleteknek volna szabad alávetni; céljának, irányelveinek nem évtizedeken, de évszázadokon keresztül változatlanoknak kell maradniuk. Nem olyan, mint a hajó, mely ismeretlen tengeren kalandos felfedező útra indul: inkább olyan, mint a világító torony, mely a tévedező hajósnak a biztos kikötő helyét mutatja. A magyar tudományos akadémia a tudomány világtengerén a magyar kikötőt jelzi; a torony őre vigyázzon, hogy fénye mindig egy helyen, de mindig ragyogóan világítson, hogy megláthassa azt jó és rossz időben minden, de különösen a magyar hajós.”

Milyen volt az az Akadémia, amelynek vezetésére Eötvös Loránd megbízást kapott?

Az a tekintély, amely a Tudós Társaságot alapítása időszakában övezte, már a reformkorban jelentősen csökkent, maga Széchenyi István is felpanaszolta ezt az 1840-es években. A kiegyezést követően Eötvös József, Arany János és munkatársaik tekintélyüket

latba vetve jelentősen átalakították az intézmény működési elveit, új alapszabályt dolgoztak ki, amely egyébként az uralkodó jóváhagyásához volt kötve, könnyen változtatni nem lehetett rajta. Újrafogalmazták az intézmény feladatát is. Az alapítást követő évtizedekben az irodalmi irány a szorosan tudományos csaknem egészen háttérbe szorította, mert a fő cél nemzeti nyelvünk művelése volt s általa egy nemzeti irodalom megalapítása. 1867 után Eötvös József már a tudomány és az irodalom egyenrangúságát hangoztatta, és kiemelte: „Akadémiánknak részt kell vennie a nagy munkában, mely Európa-szerte a tudományok körében a népek szellemi felszabadulásáért folyik”.

Az 1880-as években megújultak az Akadémiát ért támadások, amelyek elsősorban a tudósok magába zárkózását, tevékenységük

haszontalanságát rótták fel. Maga Eötvös Loránd is tisztában volt a népszerűtlenséggel, a közérdeklődés hiányával, s beszédeiben igyekezett elmagyarázni nézeteit az Akadémia szerepéről és a tudomány feladatáról. 1890-ben, az 50. közgyűlés elnöki megnyitójából csak néhány gondolatot idézek:

„Irodalom és tudomány, mindketten eszményi törekvéseknek, a szép és igaz szeretetének gyermekei. Az akadémiai feladata öröködni, hogy az egyik mint a másik a mindennapi élet szükségletének színvonalán fölül emelkedjék; az irodalom ne legyen csupán hírlapirodalom, közönséges regénytár és iskolakönyvek gyűjteménye; a tudomány ne csupán a közvetlenül hasznos kérdésekkel foglalkozzék. Pedig tudomány nélkül nincs gyakorlat. Ma a gyakorlat emberét is tudósok iskoláiban képezzük és pedig azért, mert a tisztán tudományos törekvéseknek meg nem becsülése nemcsak az emberiség legmagasztosabb eszményeit rontaná le, hanem meddővé tenné magát a gyakorlatot is. Épen a természettudományok a legszembetűnőbb példákkal bizonyítják ezt; még az úgynevezett hasznos felfedezéseket is rendszeren nem azok hozták létre, kik olyanokat kerestek, hanem úgy létesültek azok, mint az elvont igazságot önzetlenül kereső tudósok által elért tudományos eredmények kifolyásai.”

Az Akadémia vezetői természetesen jól tudták, hogy az intézmény működésén javítani kell, a színvonaltalanság és az érdektelenség volt a két legfőbb ellenség. Az ülések látogatottsága gyakran nem volt megfelelő, ezért az ügyrendben elrendelték, hogy az osztályülésekre valamennyi rendes tagnak kötelessége eljárni. 1890-től általánossá vált, hogy az üléseken megjelent akadémikusok névsorát közzétették az *Akadémiái Értesítőben* az ülésekről szóló beszámolóik élén. (Sokat ez sem segített.) E listákból az azért egyértelműen látszik, hogy az Akadémia vezetése példát mutatott az intézményben folyó munka iránti érdeklődésben: Eötvös, Szily saját osztályülésük rendszeres látogatása mellett gyakran a többi osztály ülésén is részt vettek.

Eötvös elnöksége idején az Akadémián egy évben 40-50 ülésre került sor. A szabályok értelmében a kéthónapos szünet kivételével az osztályok havonta osztályülést tartottak (ez a gyakorlatban 8-9 ülést jelentett egy évben), az Akadémia tagjai itt olvasták fel a tudományos dolgozataikat. A III. osztály némileg eltérően működött, mint a másik kettő: azok az akadémikusok, akik egyetemen tanítottak, meghívhatták tanítványaikat, hogy felolvassanak, s annak érdekében, hogy minél több eredményt ismertethessenek, a tanulmányok rövidített változatát mutatták be. Elvileg szintén havonta ült össze az úgynevezett összes ülés, a tiszteleti és rendes tagok részvételével, amelyen a tudományos pályázatok eredményeit tárgyalták meg, illetve egyéb tudományos munkával összefüggő kérdéseket. A 24 tagú Igazgató Tanács ebben az időszakban már csak az Akadémia anyagi ügyeivel foglalkozott, évente kétszer ült össze. A nagygyűlést és közgyűlést májusban tartották.

Az Akadémiának eredetileg 6 osztálya volt, ám a kiegészítés utáni alapszabály-módosításkor csak három létesítésére volt lehetőség. Eötvös hivatali ideje alatt, 1891-ben sikerült elérni, hogy minden osztály két alosztállyal működhessen, s az akadémikusok számát is ezek alapján határozták meg. Ez a struktúra jobban illeszkedett a gyorsan fejlődő tudományterületekhez, különösen a természettudományok esetében (1. táblázat). Az osztályokhoz egyre bővülő bizottsági rendszer jött létre.

A tudományos utánpótlás biztosítása szintén jelentős problémának mutatkozott. Bár az Akadémiának a szabályok szerint 240 tagja lehetett volna (a külső tagokat nem számítva), Eötvös elnöksége alatt sohasem sikerült a maximális létszámmal működni. Jól ismert, hogy a tudományos utánpótlás kérdését az egyetem oldaláról is élénken figyelemmel kísérte, erről tanúskodik az 1887-ben Trefort Ágostonnak írt nyílt levele az egyetemi oktatásról és az 1895-ben a párizsi École Normale Supérieure mintájára megalapított Eötvös Collegium.

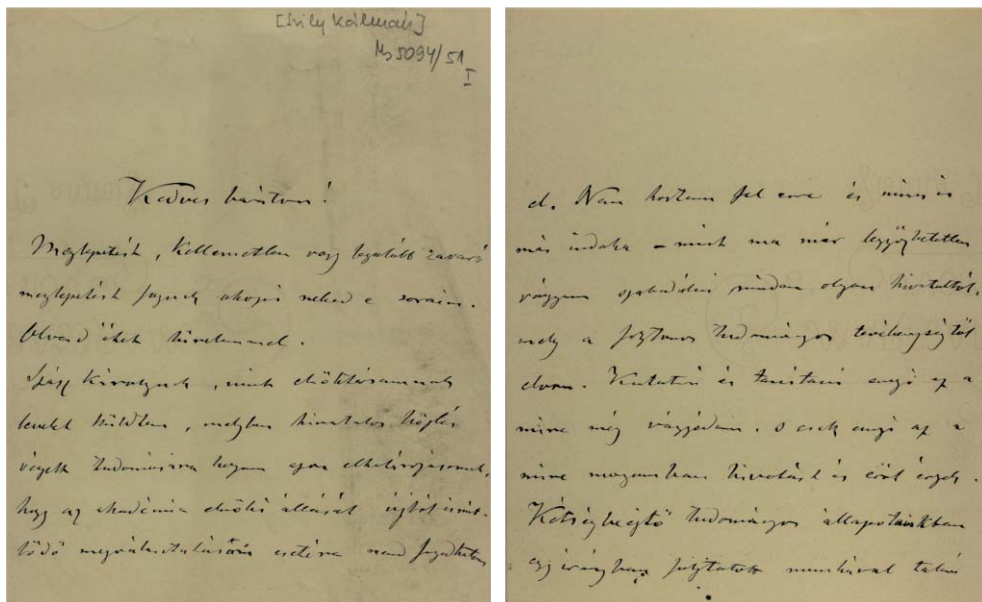
1890-től fogva jóval átláthatóbb és ismertebb lett az Akadémia működése a nyilvánosság számára, mint korábban. 1889 őszén az összes ülés arról döntött, hogy *Akadémiai Értesítő*t havonta kiadják és megnövelik az oldalszámot, hogy teljes terjedelmében megjelentessék benne a felolvasott tanulmányokat, az arra érdemes pályázatok értékelését. Szily Kálmán minden évben közzétette főtitkári beszámolóját az Akadémiai szakmai munkájáról, valamint a Magyar Földhitelintézet hivatalos kimutatását az MTA vagyonáról. Évente megjelent az akadémiai kiadványokat általánýdíjjal

1. táblázat

Az Akadémia tagjainak száma osztályonként			
osztály alosztályokkal	tiszteleti tag	rendes tag	levelező tag
I. Nyelv- és széptudományi osztály	6	–	–
a) Nyelvtudományi alosztály	–	6	18
b) Széptudományi osztály	–	6	18
II. Filozófiai, társadalmi és történelmi tudományok osztálya	9	–	–
a) Filozófiai és társadalmi tudományok alosztálya	–	12	30
b) Történelmi tudományok alosztálya	–	12	30
III. Matematikai és természeti tudományok osztálya	9	–	–
a) Matematikai és fizikai tudományok alosztálya	–	12	30
b) Természettudományok alosztálya	–	12	30
összesen	24	60	156

megvásároló intézményeinek egyre bővülő listája, amelyen jelentős számban szerepeltek középiskolák és könyvtárak is.

Mint közismert, az Akadémiai magánszemélyek adakozásából jött létre, és ez a mindenkor kormányoktól való teljes függetlensége 1948-ig fennállt, büszke is volt arra, hogy nem állami, hanem nemzeti intézmény. Az alapítványok biztosította függetlenség imponáló, ám az Akadémia szinte állandó anyagi problémákkal küzdött, legértékesebb vagyona és egyben legnagyobb kiadási tétele palotája volt, komolyabb összegeket nem tudott kutatásokra fordítani. Az 1890-es években jelentősen növekedett az amúgy számos kisebb adomány mennyisége, amelyeket meghatározott célra adtak, az ezekhez szükséges pályázatokat rendre kiírták. Tetemes munkát jelentett a beérkezett pályaművek elbírálása. Mindennapos dolog volt, ha egy pályázatra nem érkezett pályamű, vagy a kapott írás nem volt megfelelő színvonalú, ezért a díjat nem adták ki. Az akadémiai nagydíjat sem lehetett minden évben odaítélni megfelelő eredmény hiányában. 1906-ban első elnöki beszédében *Berzeviczy Albert* kitért a problémára: „Itt szeretnék leszámolni az Akadémia gazdagságának legendájával. Az Akadémia hat millió koronára tehető vagyonának jelentős részét alkotják: palotánk, melyet mi, mint a nemzet lelkesedésének adományát, nagy becsben tartunk, de mely anyagi szempontból tagadhatatlanul terheket is hárít az Akadémiára, továbbá oly alapítványok, melyeket kénytelenek vagyunk megszabott és nem mindig célszerűnek bizonyult rendeltetésekre fordítani. [...] A személyi kiadások apasztására az Akadémia legtöbbet tett azzal, hogy rendes tagjai lemondtak a részükre majdnem minden külföldi hasonló intézet példája nyomán kijárt tiszteletdíjról; ilyenképen most évenként közel 230,000 koronát vagyunk képesek tulajdonképpen tudományos és irodalmi célokra fordítani, a mely összeghez 87,000 koronát az állam ad. Nem összehasonlításokat tenni [...] utalhatok azonban talán arra, hogy a kis



6. kép. Eötvös Loránd lemondó levele Szily Kálmánnak (részlet), 1895.

Románia akadémiaja 10 millió franknyi jövedelmező alap fölött rendelkezik, úgy hogy, bár csak csekély állami segélyben részesül, a miénknél sokkal gazdagabbnak mondható.”

Az anyagi és szakmai problémák orvoslásaként Eötvös Loránd közbenjárására *Semsey Andor*, maga is akadémikus és a korszak egyik legnagyobb mecénása, 1890-ben különböző tudományágakban tíz tudományos, kifejezetten a magyarországi viszonyokra és Magyarországra vonatkozó pályakérdést tűzött ki egyenként 10 000 forintnyi jutalomdíjjal és 1500 forintnyi másoddíjjal. A témákban kézikönyveket vártak és a munkák elkészítésére eleinte öt évet határoztak meg. A pályázat végül 1908-ig fennállt, de sajnos nem hozta meg a várt sikert. Egyedül *Magyarország mineralógiája* készült el a vártaknak megfelelően, az archeológiai, irodalomtörténet és a közgazdasági viszonyokról szóló munkákra a másodjutalmat ítéltek oda.

Számos kutatási munka indult el Eötvös Loránd elnökségének idejében, elkészült *Szinnyei József* nagy bibliográfiai vállalkozásai, továbbá 14 kötetes óriási munkája, a *Magyar írók élete és munkái*. Megindultak a *Magyar Nyelv Nagyszótárának*, a Zsigmond-kori oklevéltárnak munkálatai, elkészült a *Magyarországi Latinság Szótára*. Hivatali ideje alatt – külön adományokból – befejeződött a Díszterem díszítése, *Lotz Károly* elkészítette a terem keleti falának freskóját, Széchenyi István születésének 100. évfordulója alkalmából elkészült a palota Akadémia utcai falán lévő dombormű. Berendezték a Goethe-szobát és a Széchenyi-szobát, 1895-ben kapta meg az Akadémia *Ráth György* 1711 előtti Hungarica-gyűjteményét. A Millennium ünnepségsorozatában a Magyar Tudományos Akadémia is részt vett számos, elsősorban a magyar történelem kezdeti évszázadaira vonatkozó munka elkészítésével. Az 1896. évi közgyűlést személyes jelenlétével tisztelte meg az uralkodó.

A természettudományok hazai fejlődésében az MTA nem tudott vezető szerepre szert tenni. E terület gyors fejlődésének az akadémiai osztály- és bizottsági struktúra inkább csak gátjává vált.

Eötvös Loránd szívügye volt, hogy a Magyarországon végzett tudományos tevékenység nemzetközi szinten is megmértesse magát, számos tudományos társaság kapcsolódott be a társaságok nemzetközi életébe. Sikernek számított, hogy az Akadémiák Nemzetközi Szövetségének Párizsban 1901 áprilisában tartott első ülésére, ahova 10 akadémia volt hivatalos, a Magyar Tudományos Akadémiát is meghívták.

Eötvös akadémiai elnöki időszakából kiemelkedik a Bolyai-jutalom létrehozása 1903-ban, amelyre a nagy matematikus születésének centenáriuma adta az alkalmat, s amelyet az elnök a kolozsvári Bolyai-emlékünnepeken jelentett be. A szabályzat szerint 5 évente adták ki a jutalmat, először 1905-ben *Henri Poincaré* francia matematikusnak. A díj jelentős volt, 10 000 korona, és bár a Nobel-díjjal természetesen nem vetekedhetett, mégis igen nagy jelentőségre tett szert a nemzetközi tudományos életben.

Eötvös Lorándot egymást követő hat alkalommal választotta meg elnökének az Akadémia. A Kéziratárban fennmaradt egy levele, amely azt tanúsítja, már 1895-ben szándékában állt, hogy teljesen visszavonuljon kutatni és tanítani. A levélben meglepő őszinteséggel szól a magyar tudományos életről (6. kép). Kritikáját közgyűlési beszédében is kifejezésre juttatta. Apjához hasonlóan, az 1880-as évek közepétől aktív politikai és más közéleti szerepet vállalt: 1885-ben Ferenc József főrendházi taggá nevezi ki, ettől fogva kötelességei sorába tartozik az országgyűlés felsőházi ülésein való részvétel is, 1891/92-ben egy évre rector magnificusszá választják, s az első Wekerle-kormányban 1894 júniusától 1895. január közepéig (a kormány bukásáig) kultuszminiszter. Visszavonulási tervének valódi okát nem tudjuk, lehetséges, hogy szándékában a közéleti csalódások is közrejátszottak.

Tíz évvel később, 1905. október 5-én kelt levelében azután valóban lemondott, az Akadémia elnökei közül elsőként. Indokul ebben is az aktívabb tudományos munkát hozta fel. Bár bizottságot küldtek hozzá, hogy rávegyék szándéka megmásítására, lemondását véglegesnek szánta. Haláláig az Igazgató Tanács tagjaként és tudósként tovább szolgálta az Akadémiát.

RELATIVISZTIKUS HIDRODINAMIKA A NEHÉZION-ÜTKÖZÉSEKBEN

Kurgyis Bálint
ELTE, fizikus hallgató

Bevezetés a nehézion-fizikába

A körülöttünk lévő látható világot a hétköznapi atomos anyag alkotja. Ha ezen anyag felépítését vizsgáljuk, megtalálhatjuk az atommagot és a körülötte lévő elektronokat. Az atommagot vizsgálva pedig felfedezhetjük annak belső szerkezetét, a protonokat és neutronokat. Közöséges körülmények között ennél tovább nem jutunk, azonban kellően nagy energiájú részecskékkel bombázva a protonok és neutronok belső szerkezetéről is képet kaphatunk. Így eljutunk az erősen kölcsönható kvarkokhoz és gluonokhoz, amelyeket hétköznapi körülmények között szabadon nem tudunk megfigyelni, csak az általuk alkotott részecskék, azaz hadronok formájában találkozunk velük. Kellően nagy hőmérséklet és sűrűség mellett viszont a hadronok képesek felbomlani, és így a kvarkok és gluonok forró egyvelegét kapjuk. Ilyen körülmények uralkodtak az Univerzumban közvetlenül az Ősrobbanás után – kevesebb, mint egymilliomod másodperccel. E nagyon rövid időszakban egész világunkat az erősen kölcsönható részecskék ősleve, a kvark-gluon plazma töltötte be. Ezen igen érdekes időszak vizsgálatát laboratóriumban kísérhetjük meg véghezvinni, „csupán” arra van szükségünk, hogy megfelelően reprodukáljuk az Ősrobbanás utáni Univerzumot. Ehhez „mini-ősrobbanásokat” hozunk létre, olyan módon, hogy elektronjaitól megfosztott, nehéz atommagokat gyorsítunk fel közel fénysebességre, majd e nehézion-nyalábokat összeütköztetjük. A nagyenergiás nehézion-fizika egyik legfontosabb eredménye az ütközésekben létrejövő kvark-gluon plazma felfedezése volt [1].

A maganyag ezen különleges, megolvadt halmazállapotát azóta is folyamatosan nagy erővel kutatják. Az egyik fontos kísérleti eredmény az volt, hogy kimérték, a nehézion-ütközésekben létrejövő közeg folyadékhoz hasonlóan viselkedik. Ezek után megmérhetjük e folyadék folyékonyságát, azaz viszkozitásának nagyságát. A kísérleti eredmények alapján a kvark-gluon plazma viszkozitása kisebb, mint bármilyen

más ismert folyadéké, így ez a lehető legtökéletesebb folyadék, amivel eddig a természetben találkoztunk. Ezen eredmények tükrében kézenfekvőnek tűnik a nehézion-ütközések időfejlődésének leírására a hidrodinamikát, mint effektív modellt alkalmazni, de hatáskörét szükséges tisztázni. A nehézion-ütközések időbeli lefolyását az 1. ábra illusztrálja. Az atommagok összeütközését gyorsan követve termalizálódik a közeg, és e pillanattól érvényes a hidrodinamikai időfejlődés mindaddig, amíg a közeg le nem hűl annyira, hogy a kvarkok és gluonok hadronokká álljanak össze, ez a folyamat a „kifagyás” vagy a hadronizáció. Ezután a létrejövő részecskéket tudjuk detektálni az ütközési pontok köré telepített hatalmas detektorrendszerekkel [1].

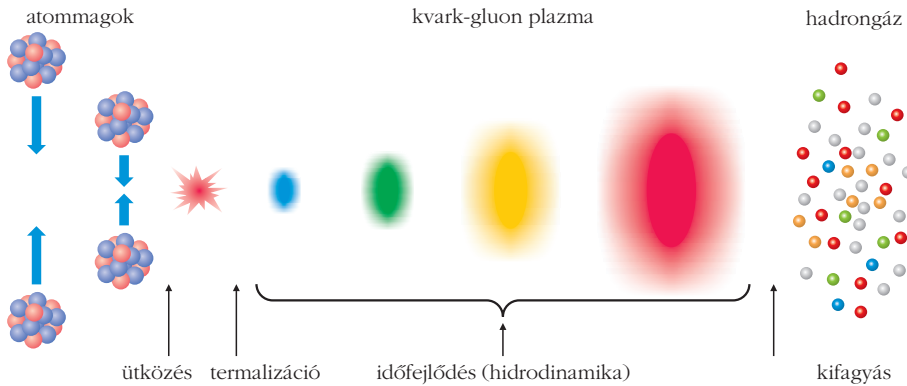
Relativisztikus hidrodinamika

A nehézion-ütközések leírásához a relativisztikus hidrodinamika egyenleteit kell megoldanunk. Ezek nehézsége miatt a legtöbb megoldás a rendszert modellező numerikus szimuláció. Azonban az időfejlődés mélyebb megértése miatt az analitikus megoldások is nagyon fontosak. Az analitikus megoldások keresésekor általában azzal a közelítéssel élhetünk, hogy tökéletes folyadékkal van dolgunk, azaz elhanyagoljuk az egyébként is nagyon kicsi viszkozitás hatását. Történetileg az első ismert megoldások *Lev Davidovich Landau* (1908–1968) és *Isaak Markovich Khalatnikov* (1919–), valamint *Rudolph C. Hwa* (1931–) és *James Bjorken* (1934–) nevéhez fűződnek. Ezek egy tér- és egy idődimenziót leíró megoldások voltak. Léteznek azonban három térdimenziót leíró megoldások is. Ezek közül az első realiztikus geometriájú, a nehézion-fizikában is fontos megoldás a relativisztikus Hubble-folyás volt [2], ami a kozmológiai Hubble-táguláshoz hasonló sebességprofillal rendelkező hidrodinamikai megoldás. A Hubble-folyás a nehézion-fizikában mért fotonok és hadronok eloszlásait is jól leírja [3], illetve többpólusú geometriájú általánosítása is létezik. Ebben a táguló rendszerben azonban nincsen gyorsulás és nyomásgradiens, amely a nehézion-ütközésekben egyes várakozások szerint jelen van. Így érdemes a Hubble-folyás olyan általánosítását keresni, ahol a rendszerben a nyomásgradiens és a gyorsulás hatását is tudjuk vizsgálni.

Ehhez a fizika egyik legszéleskörűbben alkalmazott módszerét, a perturbációs számítást alkalmaztuk. A perturbációs számítás során minden esetben egy ismert, már leírt rendszerből indulunk ki, majd a rendszerbe bevezetett kis zavar, azaz a perturbáció hatását és viselkedé-



Kurgyis Bálint 2016-ban kezdte meg egyetemi tanulmányait az ELTE TTK Fizika szakán. Nem sokkal ez után kezdett nehézion-fizikai témájú kutatást végezni *Csanád Máté* témavezetésével. 2017-ben ennek eredményeképp született a relativisztikus hidrodinamika témájú TDK dolgozata. Emellett az ELTE természettudományos szakkollégiuma, a Bolyai Kollégium és a PHENIX-Magyarország kutatócsoport tagja.



1. ábra. A nehézion-ütközések időbeli lefolyása.

használtunk, ahol a nyomás és az energiasűrűség között konstans együtthatós, lineáris kapcsolat van.

A fenti összefüggésekből általános esetben a perturbált egyenleteket kaphatjuk meg, majd egy konkrét, már ismert megoldást kiválasztva és behelyettesítve az adott rendszer perturbációjára vonatkozó egyenleteket kaphatjuk, ezek megoldásával megtalálhatjuk a keresett perturbációkat.

sét vizsgáljuk. A módszer nagy előnye, hogy egy egyszerű rendszerből kiindulva a bonyolultabb rendszer viselkedését is megérthetjük. Ilyen módon például álló folyadék esetén könnyedén megkaphatjuk a folyadékban terjedő nyomás és sűrűség hullámokat, mint az eredeti megoldáson terjedő perturbációkat. A perturbációszámítás rendje azt határozza meg, hogy a perturbációban milyen magas rendű tagtól kezdve tekintjük elhanyagolhatóan kicsinek a mennyiségeket. Ennek megfelelően elsőrendű perturbációszámítás esetén a perturbációban másod-, vagy magasabb rendű tagokat elhanyagolhatóan kicsinek tekinthetjük. Mi a relativisztikus Hubble-folyáson, mint alapmegoldáson terjedő elsőrendű perturbációkat vizsgáltuk.

A hidrodinamika nem tartalmaz belső skálát, vele ugyanúgy le lehet írni az Univerzum tágulását, mint a nehézion-ütközésekben keletkező kvark-gluon plazma folyását. Az elmélet kiindulópontja az a feltételezés, hogy a rendszerben az energia és az impulzus megmarad. Ha tökéletes folyadékot szeretnénk modellezni, akkor azzal a további feltételezéssel élhetünk, hogy a rendszerben nincsen viszkozitás és hővezetés. A hidrodinamika egyenletei a közeg nyomása, energiasűrűsége és sebessége között teremtenek kapcsolatot. Ha ezen egyenleteket csak önmagukban próbáljuk meg megoldani, hamar kiderül, hogy a rendszer még alulhatározott: a közeget jellemző mennyiségek közötti további összefüggésekre van szükségünk.

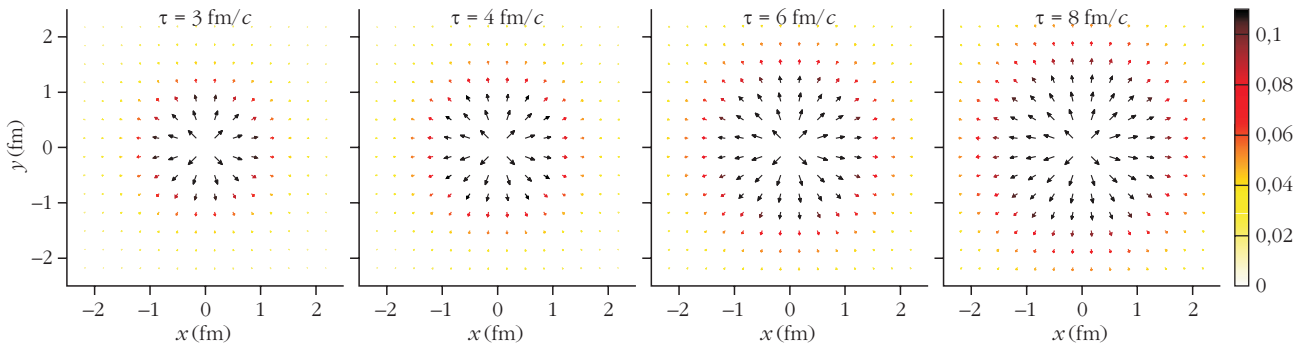
Az egyik ilyen lehetséges további összefüggés a közegebeli részecskék számának megmaradása lehet. Ekkor a részecskeszám-sűrűség és a részecskeáram között tudunk relációt felírni; az ilyen típusú megmaradási törvények gyakran előkerülnek a fizikában és a kontinuitási egyenlet nevet viselik. További egyenleteket kaphatunk termodinamikai összefüggésekből, ilyen lehet például a nyomást és az energiasűrűséget összekötő állapotegyenlet. Ez az egyenlet az, amely az adott anyagra vonatkozó mikroszkopikus információkat hordozza, ennek megfelelően a nehézion-ütközések hidrodinamikai modellezéséhez olyan állapotegyenletet kell használni, amely az erősen kölcsönható maganyagra jellemző. Erre az állapotegyenletre különböző numerikus számolások léteznek, azonban az általunk vizsgált esetben egy egyszerű, a nehézion-ütközésekre közelítőleg érvényes állapotegyenletet

A Hubble-folyás és annak perturbációi

A nehézion-ütközések leírására a már korábban is használt relativisztikus Hubble-folyást választottuk alapmegoldásnak, ami egy gyorsulásmentes és saját-időben önhasonló tágulást ír le. A hagyományos idő-koordináta helyett bevezettük a sajátidőt, amely a folyadék minden pontjában az adott ponttal együttmozgó rendszerben eltelt időt méri. A perturbációk vizsgálatával ezen a táguló kvark-gluon plazmacseppben terjedő hullámokat tudjuk vizsgálni, amelyek révén a perturbált rendszerben már fellép gyorsulás. Ez hozzásegít minket ahhoz, hogy a gyorsulás hatását vizsgáljuk egy, a Hubble-folyáshoz közeli rendszerben. A megoldás természetesen csak perturbáció, így az a várakozásunk, hogy az ilyen módon bevezetett gyorsulás hatása kicsi lesz. A talált megoldások egy megoldásosztályt alkotnak, néhány szabad paraméterrel és függvénnyel. A perturbáció hatásának valós vizsgálatához egy konkrét esetet kell kiválasztanunk közülük.

Egy konkrét megoldás vizsgálata

Vizsgálódásunk tárgya a megoldás egy egyszerű, gömbszimmetrikus esete. A különböző mezőket vizsgálva általánosan azt találjuk, hogy a sajátidő-fejlődés során kicsi radiális távolságok és nagy sajátidőértékek esetén a perturbatív megoldás igen nagy járulékot ad az eredeti megoldáshoz, amely valamilyen szinten eltér az eredeti várakozásainktól. Azonban nagyon fontos, hogy ezen mezőket nem tudjuk közvetlenül megfigyelni, kísérletileg csupán a hidrodinamikai megoldásból származtatott mérhető mennyiségeken keresztül tudjuk vizsgálni az időfejlődést. A továbbiakban olyan modellparamétereket használtunk, amelyeket az eredeti Hubble-folyásból számolt mérhető mennyiségek kísérleti adatokra való illesztésével kaphatunk meg [3]. A perturbatív megoldásosztálynak ezen felül kettő paramétere van, a δ perturbációs paraméter (ez szabályozza a perturbáció „kicsinységét”) és a c dimenziótlan paraméter, amely integrációs állandóként került a rendszerbe. A négysebesség-



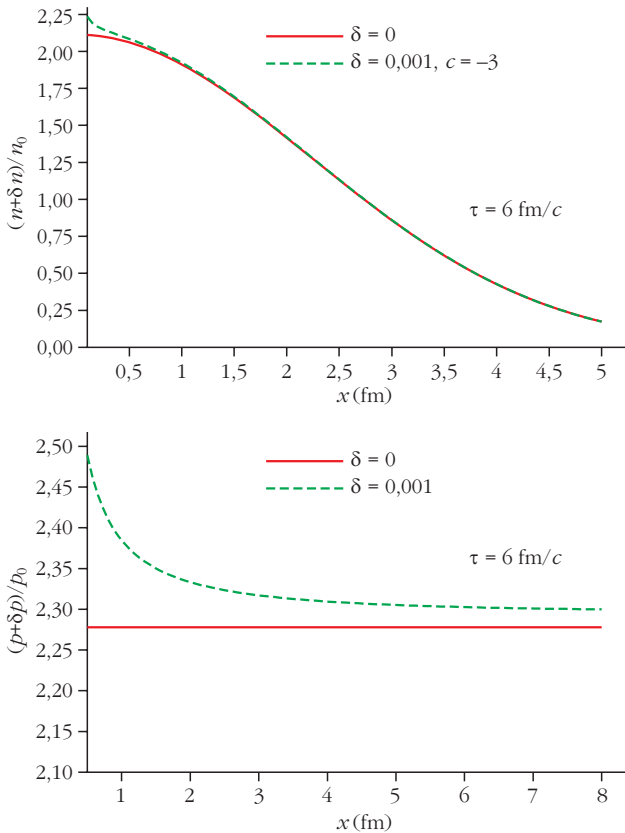
2. ábra. A négyessebesség-mező perturbációjának sajátidő-fejlődése. A perturbáció az időben láthatóan egyre növekszik.

mező perturbációjának sajátidő-fejlődését a 2. ábra illusztrálja. Látható, hogy a megoldás gömbszimmetrikus, illetve a perturbáció növekszik az idő előrehaladtával. A 3. ábrán pedig láthatjuk az eredeti, illetve a perturbált mezőket a nyomás és a részecskeszám-sűrűségek esetén. Ebben az esetben jól látható, hogy a perturbációk kis radiális távolságokon nagymértékben megváltoztatják a megoldást.

Mérhető mennyiségek

A megoldásból kiszámolhatjuk a kísérletileg is meghatározható mérhető mennyiségeket. Ebben az esetben ezt a számolást is analitikusan, közelítőleg végezzük el.

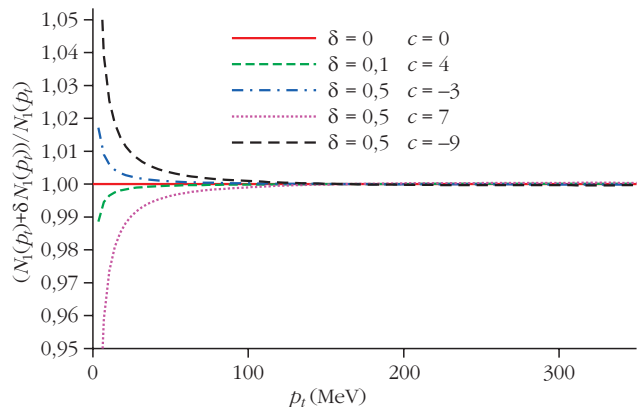
3. ábra. Fölül az eredeti és a perturbált részecskeszám-sűrűség, alul pedig az eredeti nyomásmező és a perturbált mező rögzített sajátidőnél. Látható, hogy a perturbációk kis radiális távolságokon igen nagy járulékokat adnak az eredeti megoldáshoz.

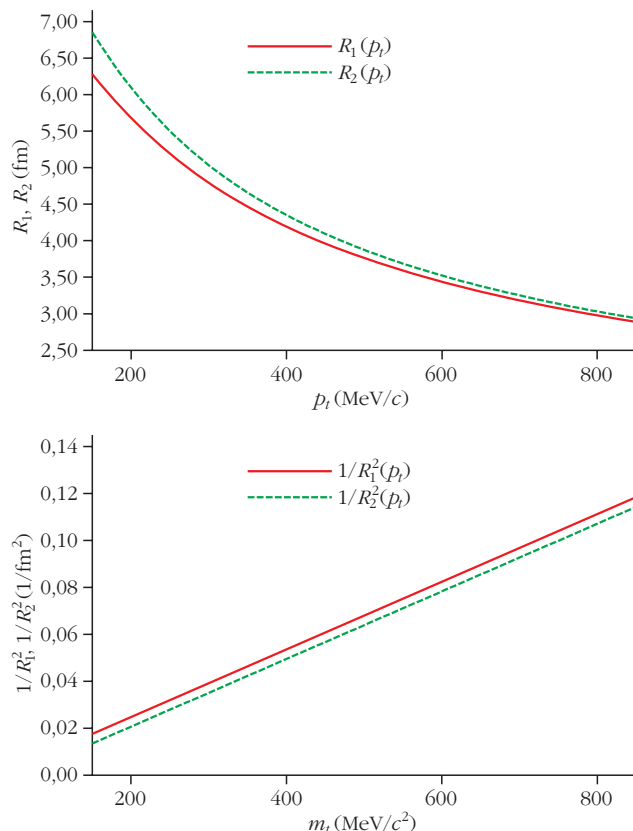


zük el. Ehhez a relativisztikus, termalizált közegre jellemző eloszlásnak (Jüttner-eloszlás) megfelelő forrásfüggvényt írhatunk fel, illetve feltesszük azt, hogy a kifagyás sajátidőben pillanatszerűen történik. A perturbációkat a hidrodinamikai egyenletekhez hasonló módon vesszük figyelembe. Az általános alakot behelyettesítve csak az elsőrendű tagokat tartjuk meg. Ez után az $N(p)$ egyrészecske impulzuseloszlást olyan módon kaphatjuk meg, hogy a forrásfüggvényt kiintegráljuk a téridő-koordinátákra. Az integrál elvégzéséhez Gauss-féle nyeregponthoz közelítést alkalmazhatunk, amelynek segítségével olyan szorzatalakú integrálokat tudunk kiszámolni, amelyek egyik tagja egy éles csúccsal rendelkező, míg a másik egy lassan változó függvény. Ezután a kapott impulzuseloszlást összehasonlíthatjuk az eredeti megoldásból számolt impulzuseloszlással. A 4. ábrán az eredeti és a perturbált eloszlások arányát láthatjuk különböző perturbációra jellemző paraméterek, valamint a korábban is használt, illesztésből származó modellparaméterek mellett. Ebben az esetben a perturbáció valóban csak kis járulékokat ad az eredeti megoldásból számolt, megfigyelhető mennyiséghez képest.

A forrás méretét, azaz a nehézion-ütközésben létrejövő kvark-gluon plazmacsepp geometriai méretét jellemzi az úgynevezett HBT-sugár. Ez a mennyiség Robert Hanbury Brown (1916–2002) és Richard. Q. Twiss (1920–2005) után lett elnevezve, akik a róluk elnevezett HBT-effektust a rádiócsillagászatban fedezték fel, ahol intenzitáskorrelációkat vizsgáltak. Ké-

4. ábra. A perturbált és az eredeti egyrészecskeimpulzus-eloszlás aránya különböző modellparaméterek mellett.





5. ábra. Fölül a hidrodinamikai megoldásból származó HBT-sugarak az impulzus függvényében. Alul pedig a sugarak transzverz tömeggel való skálázása.

sőbb optikai távcsövek segítségével meg tudták határozni egy távoli, pontszerűnek látszó csillag (a Szíriusz) látszólagos méretét. Nagyjából ugyanekkor egy ezzel analóg módszert alkalmaztak a nagyenergiás fizikában is. Ez ma már gyakran használt módszer a nehézion-ütközések során létrejövő kvark-gluon plazma geometriájának feltérképezésére. A hidrodinami-

kai megoldásból is kaphatunk egy HBT-sugarat, amit – a korábbi esethez hasonlóan – összehasonlíthatunk az eredeti megoldásból származó sugárral, ezt mutatja az 5. ábra felső része. Alsó felén pedig a HBT-sugarak transzverz tömeggel való skálázását láthatjuk, amelyhez hasonló skálázást tapasztalunk a kísérleti adatokban részecskétől, centralitástól és ütközési energiától függetlenül. A transzverz tömeg egy részecskefizikában használatos kinematikai változó, amelyet az adott részecske tömegéből és a nyaláb-irányra merőleges síkban (transzverz irányban) mért impulzusából kaphatunk meg.

Összefoglalás

A fent tárgyalt perturbatív megoldásozttal segítségével, relativisztikus Hubble-folyás esetén vizsgálni tudjuk a gyorsulás és a nyomásgradiens szerepét a nehézion-ütközésekben. A talált megoldásozttal igen általános, ebből itt csak egy konkrét eset került bemutatásra, amiben láthattuk, hogy a kísérletileg is mérhető mennyiségek esetén a perturbációk csak kis járulékot adnak az eredeti megoldáshoz. Fontos továbbá, hogy a Hubble-folyásra alkalmazott módszer egy általánosabb megoldáskeresési módszer, amelyet a későbbiekben más hidrodinamikai megoldásozttalok perturbációinak keresésére is alkalmazhatunk.

Irodalom

1. Csanád Máté: A PHENIX detektorral az ősrobbanás nyomában. *Természet Világa* 2013. I. különszám 76
2. T. Csörgő, L. P. Csernai, Y. Hama, T. Kodama: Simple solutions of relativistic hydrodynamics for systems with ellipsoidal symmetry. *Heavy Ion Phys.* A21 (2004) 73–84, arXiv:0306004
3. M. Csanád, M. Vargyas: Observables from a solution of 1+3 dimensional relativistic hydrodynamics. *Eur. Phys. J. A* 44 (2010) 473, arXiv:0909.4842



SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY A FIZIKA BARÁTJA!

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-43

Társulatunk működési biztonsága az intézményes szponzorálás fokozódó bizonytalansága miatt egyre nagyobb mértékben függ tagjaink anyagi támogatásától. **Egyik legfőbb szponzorunk – támogatási rendszerének teljes revíziója miatt – már 2018-ban sem hagyta jóvá Társulatunk támogatását, és sajnos a jövő sem biztató. Hisszük, hogy minden tagunk már rendezte éves tagdíját. Sokan szerény mértékben túl is fizetik annak összegét. Bizonyára lesznek még, akik néhány ezer forint többletet is felajánlanak ügyünknek.**

Az önkéntes adományokat az 10200830-32310274-00000000 számlaszámon fogadjuk.

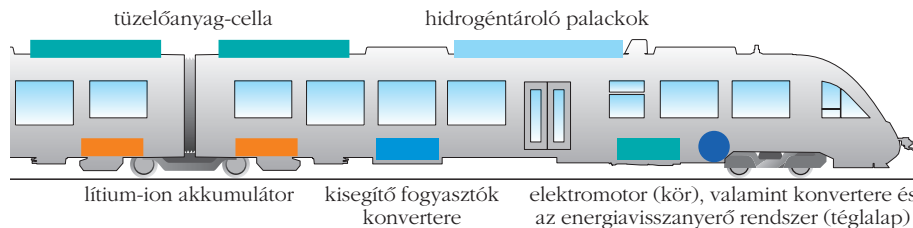
HIDROGÉN SZILÁRD FÁZISÚ TÁROLÁSA

Révész Ádám, Gajdics Marcell

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

Napjaink egyik legégetőbb problémája Földünk egyre nagyobb mértékű energiafelhasználása. Becslések szerint 2050-re az emberiség energiaigénye a 2000-es évhez képest megháromszorozódik, ezért az alternatív energiaforrások feltárása egyre égetőbbé és elengedhetlenné válik [1]. Noha az energiaforrások között ma már mind nagyobb hányadban vannak jelen a megújuló források, a világ energiatermelésének jelentős többségét a nem megújuló energiahordozók fedezik. A fosszilis energiaforrások közeljövőben várható, gyorsuló ütemben történő kiapadása következtében a jelenlegi formában egészen biztosan nem fogjuk tudni kielégíteni a növekvő szükségleteket [2]. Ezen okok miatt új, alternatív és környezetbarát technológiákra lesz szükség az energiagazdálkodás területén. Az egyik alapvető megoldandó probléma az üvegházhatást kiváltó CO_2 -kibocsátás drasztikus csökkentése.

Az utóbbi két évtizedben nagy érdeklődés övezi a hidrogén energiaszektorba való beépítését, ami alapjául szolgálhat egy hidrogénalapú energiagazdaságnak. Az ehhez kapcsolódó kutatások jelentős része a hidrogén másodlagos energiahordozóként való felhasználásának lehetőségeire fókuszál, ami rövid távon enyhítheti, hosszú távon pedig megoldást nyújt-



1. ábra. A Coradia iLint® hidrogénüzemelésű motorvonat sematikus rajza [4].

hat felvetett problémákra [3]. A hidrogén a fosszilis energiahordozókkal szemben több előnyös tulajdonsággal is rendelkezik, a Világegyetem leggyakoribb eleme, bár a Földön csak kötött állapotban, főleg szénhidrogének formájában van jelen. Elégetésekor káros égéstermék nem keletkezik, a felszabaduló energiasűrűség a nagy elektron/nukleon hányados miatt igen nagy, a hidrogén által tárolt, tömegegységre eső kémiai energia (142 MJ/kg) körülbelül háromszorosa a konvencionális üzemanyagokénak [2]. A koncepció szerint a különböző alternatív energiaforrások (napenergia, geotermikus, szél, biomassa stb.) segítségével előállított hidrogént lehet felhasználni a tüzelőanyag-cellákban, amelyekben egy elektrokémiai reakció során a hidrogén által tárolt kémiai energiát elektromos energiává alakítjuk át [3]. Mivel a felszabaduló hidrogén mind térben, mind időben távol eshet a felhasználási helytől, ezért azt mindenképp tárolni szükséges.

A hidrogén tárolása

A legkézenfekvőbb módszer a nagynyomású palackokban való gázhalmazállapotú (komprimált) tárolás. Habár egyszerűsége miatt széles körben használják, nem elégíti ki a hidrogéntároló rendszerekkel szembeni követelményeket. Nagy hátránya a magas nyomásigény ($\sim 200\text{--}500 \text{ atm}$), valamint a térfogategységre eső alacsony kapacitás. Lehetőség van a hidrogén folyékony halmazállapotban való tárolására is. A hidrogén cseppfolyósítása ma már világszerte rutineljárásnak számít, de ennek hatásfoka egyelőre kicsi, hiszen a tárolt energia egy jelentős hányadát az alkalmazott alacsony hőmérséklet fenntartására kell fordítani [3]. Ilyen módon – a hosszú távú gazdasági igényeket figyelembe véve – valószínűleg ez a megoldás sem kielégítő, napjainkban ugyanakkor ezt a két módszert már ipari szinten is alkalmazzák, jelenleg több kontinensen is üzemelnek úgynevezett „zero emission” járművek (1. ábra). A mai hidrogénhajtású gépkocsi- és motorvonat-prototípusok (lásd a címlapot [4]) esetén – a legújabb fejlesztéseknek köszönhetően – már a 700 bar nyomást is kibíró, könnyű, szén-szálas kompozitból készülnek a tárolópalackok.

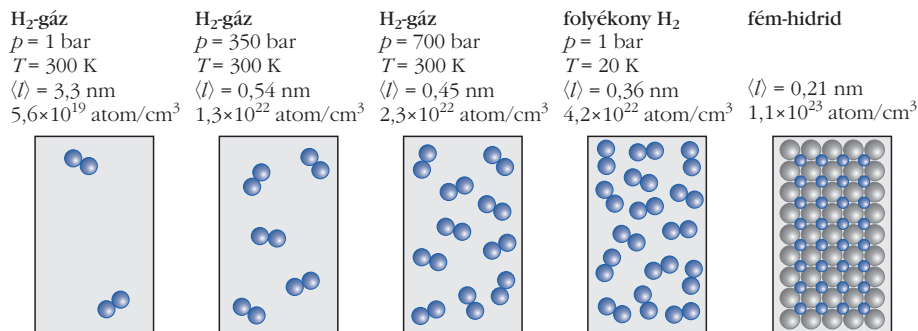
A kutatás az ELTE Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program (1783-3/2018/FEKUTSRAT) keretében valósult meg az Emberi Erőforrások Minisztériuma támogatásával.



Révész Ádám fizikus PhD-fokozatát 2000-ben szerezte meg az ELTE-n. Disszertációjában golyósörölt porok mikroszerkezetének és termikus tulajdonágainak kapcsolatát vizsgálta. EU-posztdoktori ösztöndíj keretében Barcelonában tömbi amorf anyagokkal foglalkozott. HAESF ösztöndíjasként a marylandi egyetemen dolgozott. Az MTA kétszeres Bolyai-ösztöndíjasa. Jelenleg az ELTE Anyagfizikai Tanszékének habilitált docense, ahol elsősorban nemgyensúlyi anyagok hidrogéntárolásával foglalkozik.



Gajdics Marcell fizikus 2015-ben mesterfokozatot szerzett az ELTE-n. Jelenleg az ELTE Fizika Doktori Iskola doktorandusza. Érdeklődési területe a fém-hidridek hidrogéntárolási tulajdonságai, valamint ezek mikroszerkezettel való kapcsolatának kísérleti vizsgálata.



2. ábra. A hidrogénmolekulák, illetve -atomok közötti átlagos távolság és atomsűrűség különböző tárolási módszerek esetén [5].

Mindezzel párhuzamosan intenzív kutatások irányulnak új, szilárd fázisú hidrogéntároló rendszerek kifejlesztésére. Szilárd fázisú tárolás alatt – többek között – fém-hidridek formájában, vagy egyéb nanostrukturált anyagokon való megkötés értendő. A kötött formában való tárolás nagy előnye, hogy a térfogategységre vonatkoztatott hidrogénsűrűség, az összes módszer közül ezen rendszerek esetében a legnagyobb, lásd a 2. ábrát.

Azt, hogy a hidrogéntároló rendszernek milyen tulajdonságokkal, paraméterekkel kell rendelkeznie, alapvetően a felhasználás során felmerülő követelmények, valamint gyakorlati szempontok határozzák meg. Az egyik legfontosabb paraméter a rendszer hidrogéntároló kapacitása, azaz a tárolt hidrogén mennyisége térfogat-, illetve tömegegységre vonatkoztatva. Alkalmazások szempontjából mindkét mennyiség fontos lehet, azonban szilárd fázisú hidrogéntárolás esetén az utóbbinak nagyobb szerepe van. Emellett meg kell különböztetni a hidrogéntároló rendszer egészére, valamint a hidrogéntároló anyagra vonatkoztatott kapacitást. Habár előbbi mennyiség gyakorlati alkalmazások szempontjából lényeges, anyagkutatásban – legtöbb esetben – mégis az utóbbi mérőszám használatos. Az 1. táblázat néhány szilárd fázisú anyag elméleti hidrogéntároló kapacitását mutatja, összehasonlítva a másik két halmazállapotban elérhető értékkel.

A hidrogénfelvétel, illetve -leadás sebessége – összefoglaló néven a kinetika – szintén alapvető tulajdonsága a hidrogéntároló rendszereknek. Különböző

mobil alkalmazások, illetve járművek esetén különösen fontos, hogy az imént említett reakciók megfelelő sebességgel és jól kontrollált módon játszódjanak le, hiszen az ilyen alkalmazásoknál az aktuális energiaigény hirtelen változhat. A kinetikát számos tényező, mind az anyag tulajdonságai, mind környezeti paraméterek befolyásolják.

Ilyen paraméter a hőmérséklet és a nyomás, amelyek nem csak a kinetikára, hanem a kapacitásra is hatással vannak. Számos esetben a hőmérséklet emelkedésének hatására a hidrogénfelvétel (adszorpció vagy abszorpció), illetve hidrogénleadás (deszorpció) kinetikájában jelentős javulás tapasztalható [7], míg a felvett hidrogén mennyisége nagymértékben nő [8]. A hidrogén-abszorpció/deszorpció folyamatát befolyásolja az alkalmazott nyomás is, hiszen ezen reakciók adott nyomásviszonyok mellett játszódhatnak le. Általánosságban elmondható, hogy a nyomás növelésével, illetve csökkentésével a hidrogénfelvétel, illetve -leadás folyamata gyorsabban megy végbe. Érdemes azonban megjegyezni, hogy túl nagy hőmérséklet, illetve nyomás alkalmazása gyakorlati szempontokat figyelembe véve kerülendő.

A hidrogéntároló rendszerek fontos paramétere még a reverzibilis felvételi-leadási ciklusok száma, amelyek során az egyéb paraméterek (kapacitás és kinetika) nem romlanak jelentősen. Egy hétköznapi alkalmazás esetén a megkövetelt élettartam akár az 1000 ciklust is elérheti. A paraméterek romlásának okai között felsorolhatjuk a szennyezések és oxidáció hatását, az abszorpció/deszorpció során – például magas hőmérséklet hatására – bekövetkező szerkezeti változásokat [9], az átalakulások során lejátszódó irreverzibilis kémiai változásokat, valamint a nem teljesen végbemenő abszorpció/deszorpció folyamatokat [10].

Emellett említést kell tenni a biztonság és költség kérdésköréről is. Biztonsági szempontból alapvetően két tényezőt kell megvizsgálni, egyrészt azt, hogy az adott anyag mennyire tűzveszélyes, például baleset, vagy meghibásodás esetén milyen károkat okozhat, másrészt azt, hogy a hidrogéntároló rendszer mennyire mérgező. A költségek szempontjából a hidrogéntároló anyag ára mellett figyelembe kell venni a szükséges anyagmegmunkálási eljárások, valamint a teljes működéséhez szükséges egyéb alkatrészek árát is.

Fiziszorpció, kemiszorpció

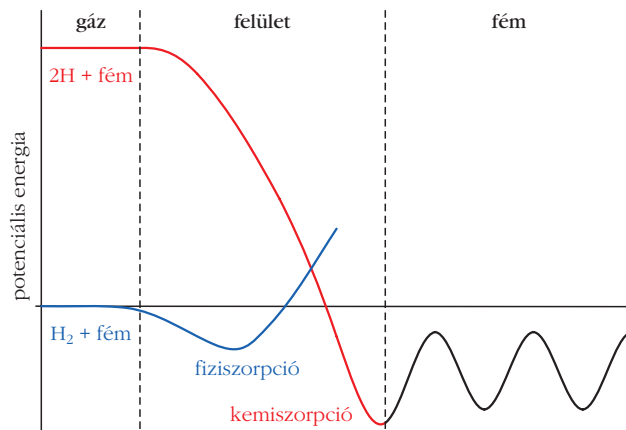
Szilárd fázisú hidrogén tárolása során a hidrogénmegkötés alapvetően kétféle mechanizmus szerint valósulhat meg. Az egyik ilyen mechanizmus a fiziszorpció, amely a hidrogénmolekulák és a szilárd

1. táblázat		
Gáz, illetve folyékony tárolás összehasonlítása néhány szilárd fázisú hidrogéntároló anyaggal [2, 6].		
anyag	hidrogénatom/cm ³ ($\times 10^{22}$)	hidrogén tömeg%-os aránya
H ₂ -gáz, 20 MPa	0,99	100
folyékony H ₂ , 20 K	4,2	100
MgH ₂	6,5	7,6
Mg ₂ NiH ₄	5,9	3,6
NaAlH ₄	4,8	7,5
TiFeH ₂	6,0	1,89

anyag felületi atomjai vagy molekulái között kialakuló van der Waals-kölcsönhatáson alapul (adszorpció). Mivel a van der Waals-kölcsönhatás viszonylag gyenge kötést eredményez a hidrogén és az adszorbeáló anyag között (tipikusan 1–10 kJ/mol kötési energia), ezért a legtöbb ilyen anyag szobahőmérsékleten meglehetősen alacsony hidrogéntároló kapacitással rendelkezik és csak kriogén hőmérsékletek közelében (77 K), valamint nagy nyomások (~10 MPa) mellett ér el elfogadható értéket [11]. A fiziszorpció jellegéből fakadóan, azaz hogy a hidrogén az adszorbeáló anyag felületéhez kötődik, a nagy fajlagos felülettel rendelkező anyagok tűnnek ideális választásnak. Ilyen anyagok lehetnek a különböző szén nanoszerkezetek, például a grafén, szén-nanocső, szén-nanoszál, fullerének, de akár a megfelelő pórusmérettel rendelkező aktivált szén is [12]. A felsoroltak mellett viszonylag ígéretesnek tűnnek az úgynevezett fémorganikus térhálók, amelyek olyan porózus kristályos szerkezetek, ahol a fémionokat organikus kapcsok kötik össze [13].

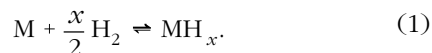
Sík felületen – a gyenge kölcsönhatásnak köszönhetően – a hidrogén általában csak monoréteg kialakítására képes [12]. Görbült felületeket használva azonban a sík felülethez képest nagyobb vonzó potenciál is kialakulhat. Szén-nanocsövek, illetve porózus anyagok (például: aktív szén) esetén – amennyiben a nanocső átmérője, illetve pórus mérete kellően kicsi – a szemközti falak által keltett potenciáltérrek átfednek. Ekkor a hidrogén akár több réteg vastagságban is kötődhet az adszorbenshez, amely végső soron a kapacitás növekedéséhez vezet. Így például szén-nanocsövek használatával, alacsony hőmérsékleten jelentősen több hidrogén tárolható, mint egy grafénsíkon [14].

A hidrogén azonban nem csak felületen való megkötés útján léphet kapcsolatba szilárd anyagokkal, bizonyos anyagsaládokkal a van der Waals-kötésnél erősebbeket is képes kialakítani. A fiziszorpció mellett a hidrogén megkötésének másik gyakran előforduló mechanizmusa a kemiszorpció. A két folyamat között alapvető különbség, hogy míg az előbbi esetén



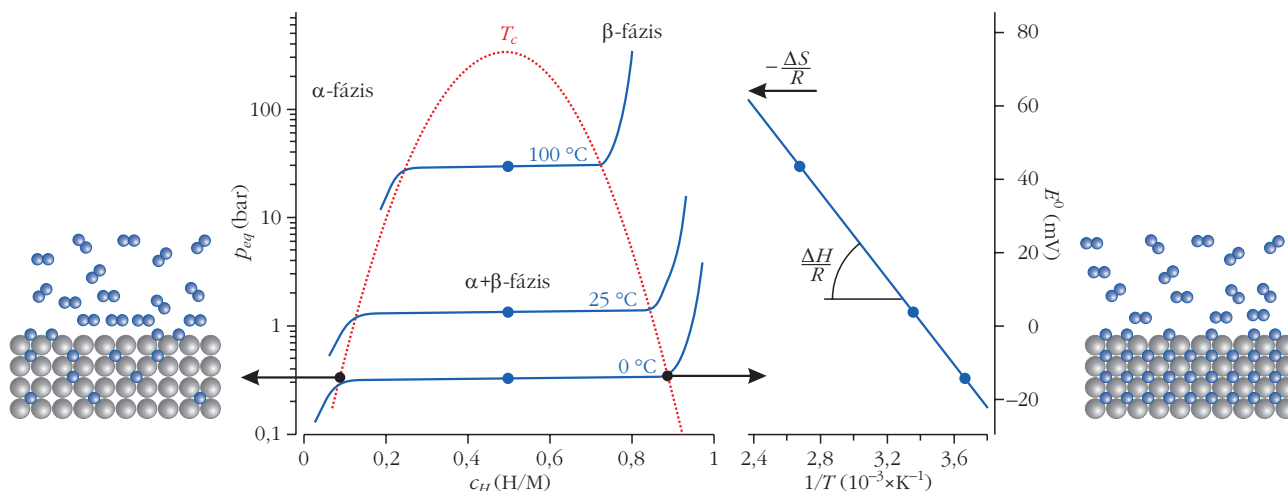
3. ábra. Hidrogén-fém határfelület egydimenziós potenciálgörbéje [15] alapján.

az adszorbens kötési energiái nem bomlanak fel és a hidrogén molekuláris állapotban van jelen a szilárd anyag felületén, addig az utóbbinál a megkötés atomosan történik az anyag térfogatában és új kémiai kötések alakulnak ki a szilárd anyag atomjai, illetve a hidrogénatomok között. Ezt a folyamatot abszorpciónak hívjuk. Az ilyen rendszer legegyszerűbb leírása, amikor egy fém (M) lép reakcióba a hidrogénnel és fémhidrid (MH_x) képződik [13]:



E reakció végbemeneteléhez az eredetileg molekuláris formában létező hidrogénnek disszociálnia kell. Amikor a hidrogénmolekula megközelíti a fém felszínét először egy gyenge kötés alakul ki a fém és a hidrogénmolekula között, ami módosítja az eredeti H-H kötést. Ezt követően a hidrogénatomok és a fém atomjai közötti kölcsönös elektronmegosztás eredményeként a hidrogénkötés felbomlik és a fém-hidrogén kötés stabilizálódik [15]. A fém felületétől távol a hidrogén molekuláris állapotban stabil, majd közeledve a felülethez a fiziszorpció útján kialakult kötött állapot lesz energetikailag kedvező. A felszínhez közel egy adott pont után ugyanakkor már a disszociált

4. ábra. Tipikus nyomás-összetétel izoterma és a hozzá tartozó Van't Hoff-egyenes fém-hidrogén rendszerben [15].



állapot lesz előnyösebb, azonban a hidrogénnek ehhez egy aktivációs energiagátat kell átugrania. Ezen energiagát nagysága a felületet alkotó anyagtól függ. A kemisorpciót követően a disszociált hidrogénatomok a fémátrixra jellemző periodikus potenciáalteret érzékelnek (3. ábra).

Az (1) reakció termodinamikai leírására a nyomás-összetétel izoterma szolgál (4. ábra), ahol a nyomást a c_H hidrogénkoncentráció (H/M, vagyis hidrogénatom/fématom egységek) függvényében ábrázoljuk. A hidrogénfelvétel kezdeti szakaszában a fémátrixban még alacsony a hidrogénkoncentráció ($c_H < 0,1$), ekkor a hidrogén oldott állapotban van jelen az anyagban, ez az α -fázisnak nevezett szilárd oldat. A nyomás növelésével egyre több hidrogénatom oldható fel a átrixban, egészen addig, amíg a hidrogénkoncentráció egy adott értéket elér. Ekkor elkezdődik a hidridfázis (β -fázis) nukleációja, amelyet egy vízszintes, vagy közel vízszintes plató jellemez az izotermán. A hidridfázis kialakulása után a nyomás ismét növekszik a koncentrációval, ebben a tartományban a hidrogénatomok rácsközi helyekre való beépülése dominál. A plató által jellemzett szakaszban az α - és β -fázisok együttesen vannak jelen a rendszerben. A platóhoz tartozó nyomás azt mutatja meg, hogy adott hőmérsékleten milyen nyomás mellett tart egyensúlyt a hidrid a gáz halmazállapotú hidrogénnel. Ennél az egyensúlyinál nagyobb nyomás alkalmazásával hidrogénfelvétel érhető el, ha pedig a külső nyomás kisebb, akkor a hidridfázis instabil és hidrogénleadás játszódik le. A plató hosszából az anyag reverzibilis kapacitása állapítható meg.

A plató által jellemzett p_{eq} egyensúlyi nyomás hőmérsékletfüggő, a kapcsolatot a Van't Hoff-egyenlet írja le [15]:

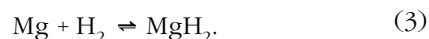
$$\ln \left(\frac{p_{eq}}{p_{eq}^0} \right) = \frac{\Delta H}{R} \frac{1}{T} - \frac{\Delta S}{R}. \quad (2)$$

A fenti összefüggésben az egyensúlyi nyomás mellett megjelenik egy p_{eq}^0 referencianyomás is, amely tipikusan a standard légköri nyomás, valamint a T hőmérséklet, az R univerzális gázállandó, továbbá két termodinamikai mennyiség: az (1) egyenlet által leírt átalakuláshoz tartozó ΔH entalpia-, illetve ΔS entrópiaváltozás. Az utóbbi két mennyiség meghatározható a különböző hőmérsékleteken mért $\ln(p_{eq}/p_{eq}^0) \cdot 1/T$ függvényében való ábrázolásával kapott Van't Hoff-egyenest meredeksége, illetve tengelymetszete segítségével (4. ábra). Mivel az entrópiaváltozás többnyire a hidrogén disszociációjához, illetve az azt követő oldódásához köthető, ezért a legtöbb fém-hidrogén rendszerre ez a mennyiség a hidrogén standard entrópiájával becsülhető, azaz $\Delta S \approx -130 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2$ [15]. A ΔH mennyiség a fém-hidrogén kötések, illetve azok erősségét jellemzi, ebből adódóan ez anyaganként jelentősen eltérő lehet. A gyakorlati alkalmazásokkal szemben állított követelmények alapján megbecsülhető egy ideális entalpiatartomány, hidrogéntárolás szempontjából az ezen tartományba eső ΔH -val

rendelkező anyagok lehetnek megfelelőek. A gyakorlatban is használt protonáteresztő membrános tüzelőanyag-cella elvárt működési tartománya szobahőmérséklet és $\sim 100^\circ \text{C}$ közötti, valamint $p_{eq} = 0,3\text{--}1 \text{ MPa}$, így az ideális entalpiatartomány körülbelül $\Delta H = -30$ és $-45 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ H}_2$ közé esik [13, 16].

A magnézium

Napjainkban számos kutatás irányul különböző szilárd fázisú hidrogéntároló anyagok kifejlesztésére. A fémek jelentős része képes reakcióba lépni a hidrogénnel, azonban különböző okok miatt csak kevés anyag alkalmas hidrogéntárolásra. Ezek közül az egyik legkiemelkedőbb a magnézium, amely 7,6 tömegszázalék hidrogént képes megkötni [17], ami magasabb, mint bármely más fém-hidrogén rendszer értéke. A magnézium hexagonális kristályszerkezettel rendelkezik, ami a hidrogénabszorpció során – az alábbi reakció szerint – tetragonális szerkezetű (5. ábra) magnézium-hidriddé ($\beta\text{-MgH}_2$) alakul át:

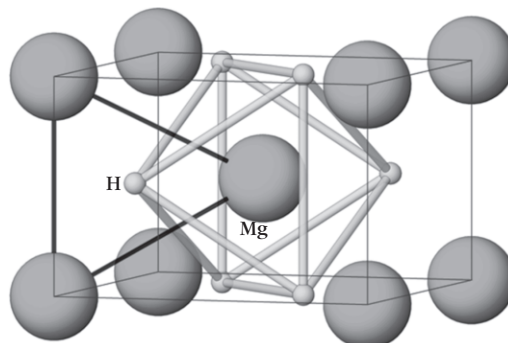


Nagy nyomás (néhány GPa) hatására a $\beta\text{-MgH}_2$ metastabil, ortorombos szerkezetű $\gamma\text{-MgH}_2$ fázissá alakul át.

A hidrogénkapacitásán túl a magnézium talán egyik legfontosabb előnyös tulajdonsága alacsony ára, valamint széles körű elérhetősége. Emellett – a többi hidrogéntároláshoz használt fémhez képest – kis sűrűségű, ami mobil alkalmazások szempontjából fontos. Hidrogéntárolás szempontjából – ezen tulajdonságok együttese miatt – ma talán a magnézium kecsegtet a legjobb reményekkel.

A fentebb említett pozitív tulajdonságok ellenére az elemi magnézium önmagában nem ideális hidrogéntároló anyag. Ennek oka, hogy előnyei mellé néhány hátrányos tulajdonság is társul. A (3) kémiai reakciót termodinamikai oldalról megközelítve elmondható, hogy a MgH_2 hidridfázis kialakulásához szükséges entalpia $\Delta H = -75 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ H}_2$, a folyamat során bekövetkező entrópiaváltozás pedig $\Delta S = -130 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2$ [16]. A magas ΔH -érték azt jelzi, hogy a MgH_2 meglehetősen stabil, az optimálisnál számottevően magasabb

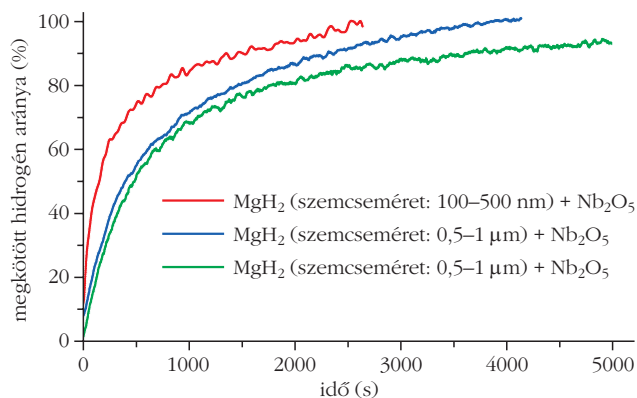
5. ábra. MgH_2 tetragonális kristályszerkezete.



képződési entalpiával rendelkeznek. Ez az alkalmazhatóság szempontjából nyilvánvalóan hátrányos, hiszen a MgH_2 képződéséhez tartozó entalpiát, illetve entrópiát összevetve a (2) Van't Hoff-egyenlettel, a hidrogéndeszorpcióhoz szükséges hőmérséklet 0,1 MPa nyomás mellett is meghaladja a 300 °C-ot. A termodinamikai akadály mellett az abszorpció és deszorpció folyamatok alacsony sebessége jelenti a legnagyobb problémát magnézium-alapú rendszerekben. A lassú kinetika több okból ered, egyrészt a hidrogén disszociációja a felületen meglehetősen lassú, továbbá a magnézium rendkívül reakcióképes az oxigén felé, felületén általában vékony (3–4 nm vastag) oxidréteg van jelen. Ez az oxidréteg jelentős gátat képvisel, számottevően lassítja a reakció sebességét [18]. A felületi MgO -rétegen történő hidrogén disszociációhoz közel kétszer nagyobb aktivációs energia társul, mint a tiszta Mg -felülethez, ami azt eredményezi, hogy a hidrogénmolekulák disszociációja nem, vagy csak nagyon lassú ütemben zajlik le a hibamentes oxidréteg jelenlétében.

A fenti problémák áthidalása céljából alapvetően két különböző módszer merült fel. Az egyik megoldás során a hidrogénmolekulák felületi disszociációs képességét növelhetjük úgy, hogy a szilárd fázisú rendszerhez fémoxid-, illetve átmenetifém-katalizátorokat adalékolunk. Megkötéskor a katalizátorok a H-H kötést (deszorpció során az abszorbeáló anyag és a hidrogén atomok közötti kötést) erőteljesen gyengítik. A katalizátorrészecskék nemcsak hátráltatják a szemcsék felületén kialakuló oxidréteg kialakulását, hanem a szemcsehatárok mentén növelik a disszociált hidrogénatomok diffúzióját, ezáltal javítva az abszorpció/deszorpció sebességét. Jelenleg számos intézet végez alapkutatásokat a kapacitás további növelése mellett a gyors kinetikára, az alacsony abszorpció/deszorpció hőmérsékletre, a tartósságra és a hosszú élettartamra vonatkozóan. Az elmúlt évtizedben R. Bormann (GKSS Forschungszentrum, Hamburg) csoportjának Nb_2O_5 -, V_2O_5 -, TiO_2 -katalizátorok segítségével jelentősen sikerült javítani a hidrogén leadás/felvétel kinetikáját [19].

Az igazi anyagkutatói áttörést azonban a nano- vagy ultrafinom-szemcsés anyagok robbanásszerű elterjedése jelenti, köszönhetően annak, hogy durvaszemcsés társaikhoz képest ezen rendszerek jelentősen eltérő tulajdonságokkal rendelkezhetnek. Nanokristályos anyagokban a 10–100 nm átmérőjű kristallitokat elválasztó szemcsehatárok térfogati hányada drasztikusan megnő a polikristályos anyagokéhoz képest, az azokat felépítő atomok gyengébben kötődnek a szemcséhez, mint a klaszter belsejében levő társaik. A nanokristályos rendszerekre jellemző nagy fajlagos felület a hidrogéndeszorpció entalpiájának csökkenését eredményezi [16]. A szemcseméret csökkentésével jelentősen javul a kinetika is, hiszen szemcsehatárok mentén a hidrogéndiffúzió aktivációs energiája kisebb, mint a (majdnem) tökéletes kristályrácsban. Ezek a szemcsehatárok végeredményben a hidrogénszorpció során az anyagtranszport legfontosabb csatornáiként szolgálnak [17, 18]. A nagyobb



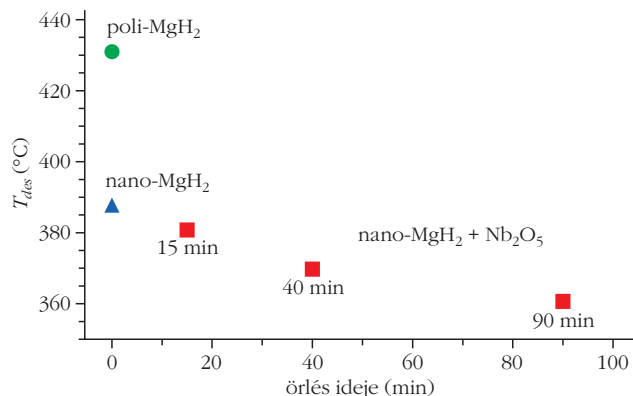
6. ábra. MgH_2 H-abszorpció görbéi ($T = 300$ °C, $p = 8,5$ atm) katalizátor jelenlétében, különböző részecskemérettel [21].

fajlagos felület egyben azt is jelenti, hogy több olyan, a kemisorpció szempontjából aktív hely áll rendelkezésre, ahol a (3) reakció végbemehet.

A nagyképlékeny deformáció hatása a H-tárolásra

Nanoszerkezetű hidrogéntároló anyagok előállításának egyik legelterjedtebben használt módszere a nagyenergiás golyós őrlés (HEBM), itt a kezdetben mikronos átmérőjű porszemcsék az edzett acél vagy wolframkarbid golyókkal való ütközéseik során nagymértékű képlékeny deformációt szenvednek el. A folyamat alatt egyrészt a porszemcsék is felaprózódnak, másrészt nagyszögű szemcsehatárok által elválasztott nanométeres kristallitok alakulnak ki bennük. Az ilyen képlékeny deformációs technikákkal előállított anyagokat a szemcsefinomodáson túl a rácshibák (diszlokációk, ikerhatárok) nagy sűrűsége is jellemzi. A különböző rácshibák mentén – a szemcsehatárokhoz hasonlóan – a diffúzió aktivációs energiája kisebb, mint a hibamentes rácsban, azaz a diszlokációk tovább gyorsíthatják a hidrogénatomok diffúzióját. Az ilyen, HEBM módszerrel előállított nanokristályos MgH_2 porokban mind az abszorpció, mind a deszorpció jelentősen gyorsabban játszódik le, mint a referenciaként használt őrletlen minta esetén [20]. A 6. ábrán jól látható, hogy Nb_2O_5 katalizátor hozzáadásával a megkötött hidrogén mennyisége időben gyorsabban nő, mint a tisztán nanokristályos Mg esetében, mi több, ha a porszemcsék mérete a 100–500 nm-es tartományig csökken, a kinetika tovább javul [21]. Ezzel párhuzamosan a hidrogén leadás/felvétel T_{des} hőmérséklete is előnyösen módosul, ha a kristallitok méretét a nanométeres tartományig csökkentjük (7. ábra). Jól látható, hogy a hagyományos polikristályos MgH_2 deszorpció hőmérséklete több mint 40 °C-kal csökkent a golyós őrlés során kialakuló nanoszerkezet hatására, ami fémoxid-katalizátor hozzáadásával tovább javítható [22].

A hidrogéntárolás szempontjából az elmúlt években került az érdeklődés homlokterébe a tömbi minták előállítására is alkalmas extrém deformációs tech-



7. ábra. Poli- és nanokristályos MgH₂, valamint különböző ideig őrlött MgH₂ + 2 mol% Nb₂O₅ deszorpciós hőmérséklete [22].

nika, az úgynevezett nagy nyomású csavarás (HPT). A HPT során a korong alakú minta két üllő közé kerül, adott, néhány GPa nagyságú függőleges irányú terhelés mellett az alsó üllő forog, míg a felső üllő áll [23]. Az érintkező felületeken fellépő tapadási súrlódás következtében a korong alsó és felső síkja az üllőkkel együtt mozog, így az anyag a csavarás során hatalmas nyírási deformációt szenved el, mikroszerkezetében jelentős változások mennek végbe [24]. Ha magnéziumporhoz nikkelt adalékotunk, akkor a HEBM és HPT módszerek együttes alkalmazása során szilárd fázisú reakció révén nanokristályos intermetallikus Mg₂Ni fázis jön létre [25, 26], amely a kisebb hidrogéntároló kapacitása ellenére alacsonyabb deszorpciós hőmérséklettel és hasonló kinetikával rendelkezik, mint a tiszta nanokristályos magnézium [27]. A HPT-folyamat során keletkezett hatalmas mennyiségű rácshiba révén a megkötött hidrogén mennyisége eléri az elméletileg meghatározott maximális értéket [24].

Mit hozhat a jövő?

Az Európai Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Platform jövőképe szerint 2025 és 2050 között a hidrogén piaci részesedése erőteljesen növekedni fog, amely speciális infrastruktúra kialakítását kívánja meg a hidrogén előállítása, tárolása és szállítása számára [28]. A folyékony és a gáz halmazállapotú hidrogént főként csővezetéseken szállítják, amelyek jelenlegi hossza Európában még alig haladja meg az 1500 km-t. A kialakítandó nagy kiterjedésű csővezeték-hálózatokba csatlakoznak majd a megújuló energiaforrásokon alapuló decentralizált hidrogéntermelő egységek, a nagyobb helyhez kötött felhasználók, töltő központok és üzemanyagtöltő állomások, valamint a háztartási, ke-

reskedelmi és ipari végfelhasználók [3]. A vezetékek és a hidrogéntároló tartályok anyagaival kapcsolatos, a gazdaságosság és biztonság szempontjából legfőbb követelményeket teljesíteni fogják. A hidrogén szilárd anyagokban történő tárolására az eddigi alapkutatósokra épülve gazdaságos és technikailag kiforrott eljárások jönnek létre. Az új anyagok előállítására, forgalmazására és újrahasznosítására új, speciális iparág fog születni.

Irodalom

1. International Energy Agency: *Key World Energy Statistics 2017*.
2. I. P. Jain, C. Lal, A. Jain, *Int. J. of Hydrogen Energy* 35 (2010) 5133–5144.
3. Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Nemzeti Technológiai Platform (HTC Platform): *A HTC Platform kutatási stratégiájának megvalósítási terve a bázai hidrogéngazdaság megalapozására*. 2010.
4. <https://www.alstom.com/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>; <https://www.youtube.com/watch?v=O3bUE9uHkqM>
5. R. von Helmolt, U. Eberle, *J. Power Sources* 165 (2007) 833–843.
6. N. Z. A. K. Khafidz, Z. Yaakob, K. L. Lim, S. N. Timmiati, *Int. J. Hydrogen Energy* 41 (2016) 13131–13151.
7. C. Lu, J. Zou, X. Shi, X. Zeng, W. Ding, *Int. J. Hydrogen Energy* 42 (2017) 2239–2247.
8. C. Pohlmann, B. Kieback, L. Röntsch, *Int. J. Hydrogen Energy* 39 (2014) 8331–8339.
9. R. R. Shahi, A. Bhatnagar, S. K. Pandey, V. Dixit, O. N. Srivastava, *Int. J. Hydrogen Energy* 39 (2014) 14255–14261.
10. A. Grill, J. Horky, A. Panigrahi, G. Krexner, M. Zehetbauer, *Int. J. Hydrogen Energy* 40 (2015) 17144–17152.
11. J. Ren, N. M. Musyoka, H. W. Langmi, M. Mathe, S. Liao, *Int. J. Hydrogen Energy*, 42 (2017) 289–311.
12. R. Ströbel, J. Garcke, P. T. Moseley, L. Jörissen, G. Wolf, *J. Power Sources*, 159 (2006) 781–801.
13. J. Yang, A. Sudik, C. Wolverton, D. J. Siegel, *Chemical Society Reviews* 39 (2010) 656–675.
14. L. Schlappbach, A. Züttel, *Nature* 414 (2001) 353–358.
15. A. Züttel, *Materials Today* 6 (2003) 24–33.
16. K-F. Aguey-Zinsou, J-R. Ares-Fernández, *Energy and Environmental Science* 3 (2010) 497–676.
17. I. P. Jain, P. Jain, A. Jain, *J. Alloys Compounds* 503 (2010) 303–339.
18. M. Krystian, M. J. Zehetbauer, H. Kropik, B. Mingler, G. Krexner, *J. Alloys Compounds* 509S (2011) S449–S455.
19. W. Oelerich, T. Klassen, R. Bormann, *J. Alloys Compounds* 315 (2001) 237–242.
20. Á. Révész, D. Fátay, T. Spassov, *J. Alloys Compounds* 434–435 (2007) 725–728.
21. Á. Révész, D. Fátay, D. Zander, T. Spassov, *J. Metastable and Nanocrystalline Materials* 24–25 (2005) 447–450.
22. D. Fátay, Á. Révész, T. Spassov, *J. Alloys Compounds* 399 (2005) 237–241.
23. R. Z. Valiev, R. K. Ishlamgaliev, I. V. Alexandrov, *Progress Mater. Sci.* 45 (2000) 103–189.
24. A. Révész, Zs. Kánya, T. Verebelyi, P. J. Szabó, A. P. Zhilyaev, T. Spassov, *J. Alloys Compounds* 504 (2010) 83–88.
25. Á. Révész, M. Gajdics, T. Spassov, *Int. J. Hydrogen Energy* 38 (2013) 8342–8349.
26. M. Gajdics, M. Calizzi, L. Pasquini, E. Schafler, Á. Révész, *Int. J. Hydrogen Energy* 41 (2016) 9803–9809.
27. Á. Révész, M. Gajdics, *Mater. Science Forum* 885 (2017) 67–73.
28. http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/documents/hfpv_ip06_final_20apr2007.pdf

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacím: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtájtár, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteltelpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 900.- Ft (duplaszáma 1800.- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588-0540** (online)

FOGÁSZATI RÖNTGENFILMEK A FIZIKÁBAN – 2. rész

Fülöp László, Brázai Gergő

BMSZC Trefort Ágoston Két Tanítási Nyelvű Szakgimnáziuma

Kocsonya András

MTA Energiatudományi Kutatóintézet

Dozimetria és sugárvédelem

Előző publikációnkban [1], ahol a kisülési röntgencsőről és az önelőhívós fogászati röntgenfilmek lehetséges alkalmazásáról írtunk, megemlítettük a sugárzás-árnyékolás alapvető óvintézkedését (ön-ólom ötvözetet rejtő táskát) és a sugárzási tér ellenőrzésére használt GM-csőves mérést. Mindaddig, amíg a csövet az asztallapon vízszintes helyzetben használjuk, jól irányított, kifele mutató antikatóddal, ezek az intézkedések szükségesek és elégségesek ahhoz, hogy egy személy (rendszerint a tanár) biztonságosan végezze a kísérleteket. Amikor a csövet már több különböző függőleges helyzetbe és magasságba tesszük a további vizsgálatokhoz, szinte kötelező a fokozott elővigyázatosság az árnyékolásnál, a sugárszintet pedig rendszeresen ellenőrizni kell. A röntgenfilmek praktikus és egyben legegyszerűbb alkalmazása, ha doziméterként használjuk őket (1. ábra). Ragasszunk egy filmet

az ön-ólom táskája tetejére, közvetlenül a cső mögötti sugárzás érzékelésére, és egy „személyi dozimétert” a táskája mögé. Az árnyékolást, elővigyázatosságból egy másik, kemény plexilemezekkel teli táskával egészítettük ki, és az előlő táskája mögött, 20 cm-rel magasabbra helyeztük. Magától értetődő, hogy a működő cső közelében – a védőernyők mögött – csak a tanár tartózkodik.

A filmek kiértékelése 20-30 perc effektív csőhasználat után, szertáron belül, vagy akár demonstrációs célból tanórákon is történhet. Így a tankönyvekben is megemlített dozimetriai alapfogalmakhoz és mértékegységekhez kapcsolódva, egyszerű gyakorlatként is fölfogható a filmek feketedésének mérése és a hozzá rendelhető dozimetriai számérték. A 2. ábra a régi (1972) Elektrovária-panelünket mutatja az alkalmazáshoz szükséges részével, ahol egy fotodióda található a fölé csíptetett, vagy az átlátszó cellul szalaggal ráragasztott filmmel. A diódához egy klasszikus ampermérő, vagy az ábrán látható digitális (1 μ A pontosságu) műszer kapcsolódik. A diódát a ráhelyezett filmmel egy, a mérés során rögzített helyzetű 40 W-os lámpával világítjuk meg. Első lépésben egy fehér, nem besugárzott filmmel („fátyol”) olvassuk le az áramerősséget (I_0), majd ugyanúgy a különböző filmek következnek (I). A feketedés (S) mértékét a dozimetriában használatos képlettel számoljuk [2]:

$$S = \ln \frac{I_0}{I}. \quad (1)$$

A mért feketedéshez konkrét dózisértéket is rendelhetünk, ha felhasználjuk az Am-241 sugárforrásunk [1] okozta feketedést, de ehhez először meg kell határoznunk az Am-241 aktivitását. Legegyszerűbb, ha megmértenénk az Energiatudományi Kutatóintézetben, de elveink szerint izotópot az iskolánkból nem viszünk

Az Energiatudományi Kutatóintézet munkatársai közül Lakosi László együttműködő segítő-készségét köszönjük. Köszönet illeti Horváth Zsolt Endrét, mert hozzáférést biztosított a diffraktométerhez, számos értékes megjegyzéssel és egy Laue-diagramokat kiértékelő számítógépes programmal nagyban segítette munkánkat. Iskolánk tanulóinak közül Patkó Bence, Skribek Dániel és Mészáros Ákos a grafikák és fényképek elkészítésében voltak segítségünkre. Szertárunk Facebook-oldalát Egerer Tamás szerkeszti.



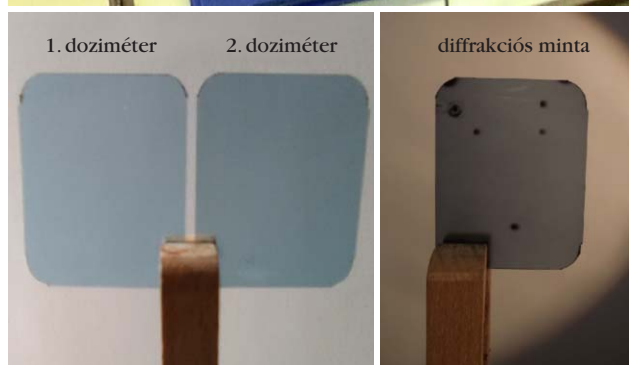
Fülöp László harmincnégy éves pályafutásából huszonegy évet a kispesti, egykori nevén a Trefort Ágoston Kéttannyelvű Szakközépiskolában tanított. 2001-ben tehetséggyondozásért Ericsson-díjjal jutalmazták.



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



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.



1. ábra. A függőleges állású röntgencső a doziméterekkel felszerelt védőernyővel, a cső alatt a házilag rögzített diffrakciós eszközünk (föül). A két előhívott, feketedést egyáltalán nem mutató doziméter és a diffrakciós mérés eredménye (alul).

ki és nem hozunk be. Ezért a sugárforrásunk okozta feketedést kalibráltuk a Kutatóintézetben különböző, ismert aktivitású izotóppal (Cs-137, Co-60, Eu-152, Na-22) besugárzott filmjeink feketedéséhez. Így ráadásul az iskolánkban magunk végezhetjük el kiértékelést.

Két különböző izotóppal besugárzott film (például Am-241 és Cs-137) feketedésének összehasonlítására a következő közelítő formulát használjuk:

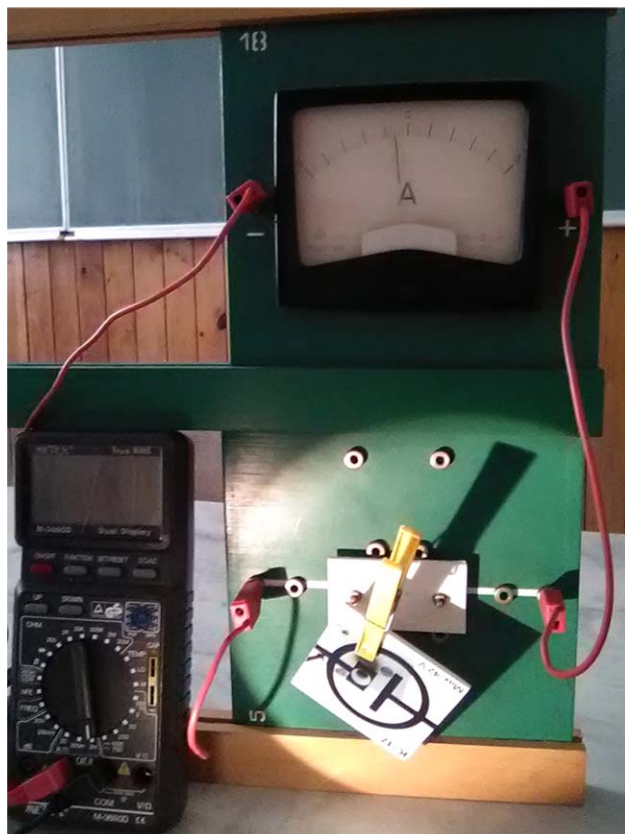
$$\frac{S_1}{S_2} \approx \frac{\gamma_1 A_1 t_1}{\gamma_2 A_2 t_2} \quad (2)$$

Itt $\gamma_{1,2}$ a gamma-sugárforrások dózisállandói [3–5], $A_{1,2}$ az aktivitásuk és $t_{1,2}$ a besugárzási idejük. A fenti képlet a pontszerű gamma-sugárforrásokra érvényes

$$D = \gamma \frac{A t}{r^2} \quad (3)$$

dózisképletből [2, 6] származtatható feltéve, hogy a dózis arányos a feketedéssel, és közvetlenül a filmekre helyezett források esetén – amennyiben az arányokat nézzük – megszabadulhatunk a szigorú pontszerűség követelményétől, azaz a forrástól való r távolság lényegtelen. A (2) összefüggés pontossága csak közelítő, de összehasonlító mérésekhez és nagyságrendbeli becslésekhez a megbízhatóságát rögtön teszteljük. Ezután – az ismert aktivitású izotópot (Cs-137, $A = 200$ kBq) használva – (2) alapján meghatározzuk szertárunk Am-241 forrásának aktivitását. (A Cs-137 és az alábbi vizsgálatokhoz használt Co, Eu, Na hitelesítő sugárforrások béta-bomló izotópok, de a minták kivitelezése olyan, hogy a béta-részecske elnyelődik és csak a kísérő gamma-fotonok feketíthetik a filmeket, hasonlóan az alfa-bomló Am-241 gamma-fotonjaihoz [1].) Végül $r = 1$ cm-es távolságról egy filmet bizonyos ideig ($t = 7$ nap) sugárzunk be. A γ dózisállandók adottak a táblázatokban [3], és a (3) egyenlet alapján számított dózishoz rendeljük az (1) képlet szerinti feketedést. Az így kapott dózis-feketedés értékpárost a továbbiakban szertárunk összehasonlító dozimetriai etalonjának tekintjük.

2. ábra. A feketedésmérő fotodióda az ampermérővel.



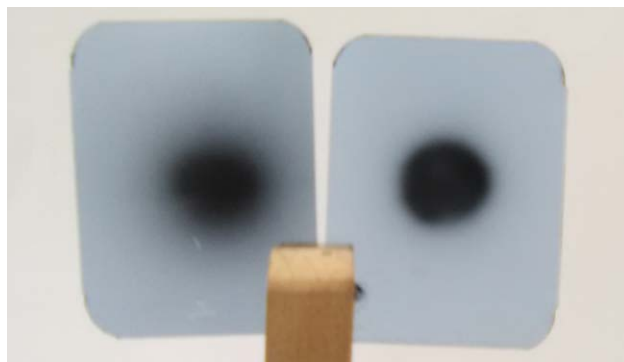
A (2) összefüggés pontosságát az alábbi mérésekkel és számításokkal vizsgáljuk. Először az általunk használt Am-241 forrást vesszük és különböző ideig ($t_1 = 240$ h, $t_2 = 44$ h) tartjuk a két filmen. A mért feketedések aránya $S_1/S_2 = 5,5$, míg a besugárzási időből számított érték $t_1/t_2 = 5,45$. Másodszor, különböző (Co-60, Eu-152) izotópok következnek $\gamma_{Co}/\gamma_{Eu} = 1,85$ [3], azonos aktivitás és besugárzási idő mellett. (A besugárzott filmek és a jelen cikkünkkel kapcsolatos további fényképek szertárunk Facebook-oldalán tekinthetők meg [7].) A mért feketedések aránya ($S_{Co}/S_{Eu} = 1,66$) nagyságrendileg megegyezik a dózis-állandók arányával. Harmadszor különböző izotópokat (Co-60, Na-22) használunk, közel azonos aktivitással és dózisállandóval ($A_{Co} = 400$ kBq, $A_{Na} = 370$ kBq, $\gamma_{Co}/\gamma_{Eu} = 1,03$), $t_{Co} = 76$ h és $t_{Na} = 70$ h besugárzási idővel. A (2) képletből számolva $S_{Co}/S_{Na} = 1,2$, míg a mért feketedések arányából $S_{Co}/S_{Na} = 1,33$. A variációk sorát lehetne még folytatni, de végeredményben úgy ítéljük meg, hogy az Am-241 mintánk aktivitásának nagyságrendjét a (2) összefüggés alapján megbecsülhetjük, ha összehasonlítunk egy tíz napig Am-mal besugárzott filmet az ismert aktivitású Cs okozta egynapos feketedéssel (3. ábra). A mérésekből ($S_{Am}/S_{Cs} = 1,3$) és a számításokból ($\gamma_{Cs}/\gamma_{Am} = 1,2$ [3]) az alábbi érték adódik:

$$A_{Am} \approx \frac{S_{Am}}{S_{Cs}} \frac{\gamma_{Cs}}{\gamma_{Am}} \frac{t_{Cs}}{t_{Am}} A_{Cs} = 31 \text{ kBq.} \quad (4)$$

A továbbiakban megmérjük az Am-241 okozta feketedést, ha a filmtől $r = 1$ cm távolságra (tekintsük ez esetben pontszerűnek a forrást) tartjuk hét napig, egy 1,5 cm átmérőjű üres durálhenger tetejére helyezve. A feketedés (4. ábra) és a (3) képlettel számított dózis értékei:

$$S = 0,15, \text{ valamint } D = 4,4 \text{ mSv.} \quad (5)$$

Mivel elsősorban a röntgensövünk körüli dózis érdekel, rögtön össze is hasonlítjuk egy, közvetlenül a röntgenső alatti filmen megjelenő feketedéssel (4. ábra). A film 2,5 cm-re van egy 0,25 mm vastag durállemez alatt az iménti henger tetejére helyezve. A besugárzási idő fél perc, a mért feketedés $S = 0,84$. Az (5) etalonunk szerinti dózis $D = 24,6$ mSv, ami jelentős a kijelölt kis körterületen, ha arra gondolunk, hogy egy sugárveszélyes munkahelyen, az éves megengedett dózis 50 mSv. Jogosak és szükségesek a csővel kapcsolatos elővigyázatosságok, de szerencsére a doziméterként használt filmjeink megnyugtató eredményt mutatnak. A cső 20 perces üzemeltetése után az 1. ábrán a 2-vel jelzett film $S = 0,2$ feketedést mutat, míg a mögötte lévő 1-gyel jelzett gyakorlatilag „fátyol” maradt, tehát az ón-ólom ötvözetet tartalmazó védőernyő elnyeli a sugárzást. Utólag, a magasabbra helyezett, plexilemezeket tartalmazó pótbiztosító ernyő tetejére is helyeztünk filmet, de fél óra effektív csőhasználat után ez sem mutatott semmi feketedést, vagyis első ernyőnk jól árnyékolja a csövet. Végezetül, ha már film és dozimetria, egy apró megjegyzés a



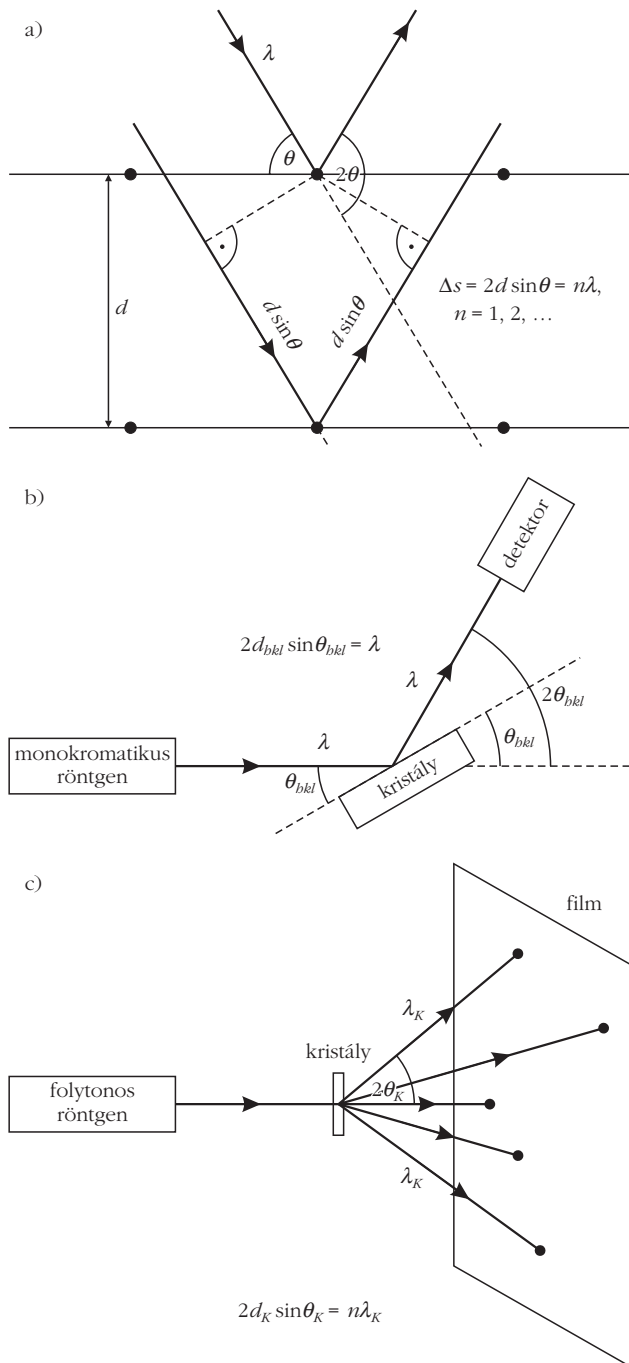
3. ábra. Besugárzott filmek: Cs-137, egy napos besugárzás után (balra) és Am-241, tíz napnyi besugárzást követően (jobbra).

hivatalos fogorvosi dózisértékesítőkről [8, 9] a 4. ábrán látható film kapcsán. A filmen egyúttal tanulmányozhatjuk a fent leírt kiértékelő módszerünk alkalmazhatóságának technikai és elvi korlátait is.

A film kijelölt területén csak úgy sikerült átvilágítanunk, hogy lámpánkat teljesen a fatáblára rögzített filmre helyeztük. Ez esetben az áramerősség éppen a minimális, azaz $I = 0,001$ mA. A lámpa ugyanilyen a helyzetében, a fátýolfilmre átvilágítva a fotodióda árama $I_0 = 0,238$ mA. (Film nélkül lámpánk 0,265 mA maximális áramot indukál diódánkban.) Így a feketedés mértéke $S = 5,47$. Dózist már nem is számolunk

4. ábra. Fent besugárzott filmek: röntgenső, fél perc és jobbra Am-241, hét nap. Lent korszerű röntgengéppel készített fogászati röntgenfilm fél másodperces besugárzási idővel.





5. ábra. Az általános diffrakciós feltétel (a) és a Bragg-reflexió (b), valamint a Laue-transzmisszió (c) elvi vázlatai.

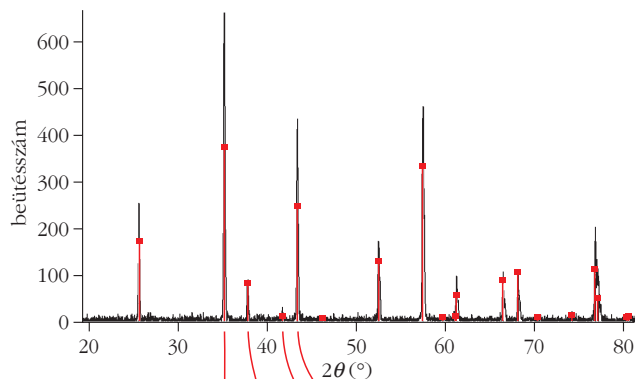
az etalonunkkal, feltételezhetően ilyen extrém esetekben már érvényét veszti a linearitás. Azt viszont megjegyezzük, hogy a hivatalosan kiadott mikrosievert dózisnagyságrendeket [8], amelyeket előszeretettel hasonlítanak a természetes háttérsugárzásból eredő dózishoz (3,1 mSv/év), csak úgy tudjuk értelmezni, ha a dózist éves szintre vetítjük. Vannak, akik a per évet hozzátesszik az információkhoz [9] és megjegyzik, hogy az egész testre vonatkoztatott dózistról van szó. Így valóban elfogadható a 0,02–0,7 mSv dózistartomány [9]. Más különben, ha csak a háttérsugárzáshoz hasonlítjuk a számértéket, bármelyik laikus

páciens felteheti a kérdést, hogy egy fél másodperces fogászati röntgenfelvételhez miért szükséges fölvenni egy nehéz ólomkötenyt?

Röntgendiffrakció

Max von Laue eredeti ötlete és számításai szerint (1912) a kristályok a legtermészetesebb diffrakciós rácsok, a röntgensugarak hullámhosszához tartományába eső rácsállandóval. Az első sikeres kísérletek egyidejűleg bizonyították a kristályok szabályos atomi síkokban tömörülő szimmetrikus rendszerét és a röntgensugarak elektromágneses jellegét. A kristályok hálózati síkjain visszaverődő röntgensugarak interferenciájáról a Laue-egyenletekkel egyenértékű, de szemléletesebb feltételt dolgozott ki a két Bragg, apa és fia (1913). Eszerint a röntgensugarak a hullámoptika törvényeit követve visszaverődésnél maximális erősítést adnak, amennyiben útkülönbségük a hullámhossz egész számú többszöröse (5.a ábra) [10, 11,]. A Bragg-egyenletet formálisan más és más alakokban használják, attól is függően, hogy monokromatikus (5.b ábra) vagy folytonos (5.c ábra) röntgenjelenségre vonatkoztatják. Az utóbbi lehet az általunk végzett kísérletek (1. ábra) és számításaink vázlata.

Röntgensövényünk a korabeliek tökéletes hasonmása. (Izzókatódos csöveket csak 1914 után kezdtek gyártani és tökéletesíteni.) A katód-anódra (az antikatód összekötve az anóddal) néhány tízezer voltot kapcsolva, a gázkisülésből származó elektronok az antikatódba ütközve lefékeződnek és egy folytonos „fehér” röntgensugárzást adnak. Ha elég nagy energiával rendelkeznek, a fém atomjának K-héjáról kiütnek egy elektront, aminek helye az L-héjról töltődik be, és az energiakülönbségnek megfelelő karakterisztikus vonal ($K\alpha$) jelenik meg a spektrumban. Ha az M-héjról ugrik elektron a K-héjra, $K\beta$ vonalról beszélünk. Előfordulhat, hogy a fékeződő elektronok az L-héjról löknek ki elektront, ennek helye az M vagy N héjról töltődhet be ($L\alpha$, $L\beta$ vonalak). Tehát olyan folytonos spektrumú fékezési röntgensugarakkal kísérletezünk, amelyekben valamilyen karakterisztikus vonalak fordulhatnak elő. A létrehozott diffrakciós képekből próbálunk következtetéseket levonni a spektrumról, némileg hasonlóan a monokromatikus lézerrel és a diffrakciós ráccsal végzett tanórai mérésekhez, ám a feladat a röntgennel sokkal bonyolultabb. A Bragg-egyenletben (5.a ábra) gyakorlatilag minden szereplő egy változó paraméter. Ha rögzítjük a hullámhosszat, azaz monokromatikus röntgennel van dolgunk (5.b ábra), még akkor is marad két bonyolult változó, amit a reflexiók síkai és a nekik megfelelő szögek hkl indexelése jeleznek (az $n = 1, 2, 3, \dots$ beépítve a d rácsállandóba). Ezeknek egyszerre kell teljesíteniük a diffrakciós feltételt. Konkretizálva, a sematikus ábrának megfelelő valóság a 6. ábrán látható. (Az ábrán látható D8 DISCOVER diffraktométer az Energiatudományi Kutatóintézet tulajdona.) A digitális feldolgozást a korund (Al_2O_3) minta diffraktogramja jelzi. A monokromatikus röntgen ($Cu K\alpha$; $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$)



6. ábra. Balra modern röntgendiffrakciós készülék, mellette a minta diffraktogramja, az alatt röntgenfilmünkön a kijelölt négy maximumnak megfelelő vonal.

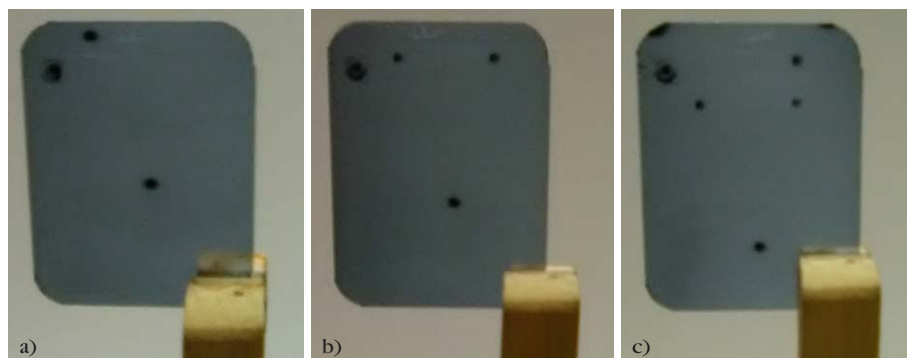
visszaverődését a detektor körbefordulva követi és a diffrakciós feltétel bekövetkeztét a számítógép képernyőjén egy csúcs formájában jelzi. Ha a csúcsokat más-képpen akarjuk láthatóvá és kézzelfoghatóvá tenni, egy filmet a detektor előtti résrendszer elé ragasztunk és a diffraktométer álló helyzetében, tizenöt perc után a 6. ábrán látható vonalak jelennek meg. Ezeket egyenként, csak néhány fokos szögelfordulással érzékeli a detektor. A film látványos érdekessége a balról második vonal szakadása, ami valami rácshibára utal, de térjünk vissza a folytonos röntgenhez és a szertárunkon belüli kísérleteinkhez. Kristályunk NaCl, közönséges konyhasó az 1. ábrán látható eszközön és elrendezésben az alábbiak szerint.

Egy viszonylag könnyen megmunkálható vasabroncsot (zárpántot) választunk, ami szélességben takarja a filmet a primer sugártól és a cső alá helyezhető. A pánt közepébe, vékony szög-gel kis bemélyedést ütünk, és a végét egy tűvel átlukasztjuk. A rés átmérője körülbelül 0,5 mm. A bemélyedést kávédarálóval aprított – de nem teljesen porított – konyhasóval töltjük fel. A röntgencsővet függőleges helyzetbe állítjuk úgy, hogy a rés fölött az antikatód tárcsája párhuzamos legyen az abronccsal.

Így a besózott résen áthaladó direkt sugarak merőlegesen a vaspánt alatti filmre. Az abroncs tartószerkezetét úgy alakítottuk ki, hogy a filmeket kétperces besugárzások után anélkül lehessen cserélni, hogy közben a sómintát vagy a csövet elmozdítanánk. Azonos besugárzási geometriával, egymás után 0,5 centiméterenként beljebb helyezve a filmeket, a 7. ábrán látható három filmen a legelső direkt sugár nyoma fölött megjelennek a diffrakciós foltok. A 7.c ábra már szinte olyan, mintha egy teljes Laue-diagramból vágtunk volna ki egy darabkát, amit fölnagyítva, a 8. ábrán látható geometriával és jelölésekkel fogunk kiértékelni.

Először az alapfokú egyetemi laborgyakorlatok irodalmából keressünk egy a diffrakciós képünkhöz hasonló Laue-diagramot. Egykristály NaCl röntgen-

7. ábra. A 0,5 cm-enként egyre beljebb helyezett filmekben megjelenő diffrakciós foltok.



diffrakciót, részletesen kidolgozott méréssel a [12] referencia tartalmaz. A kép egy darabja hasonlatos a mienkkel, de rögtön szembetűnő eltérés a középső direkt sugártól származó nagyobb sötét folt, ami általában az egykristály Laue-diagramokra jellemző. Nálunk a direkt sugár nyoma ($K = 0$ a 8. ábrán) a többi folthoz hasonló méretű. A [12] referenciában a legnagyobb és legintenzívebb maximumok a (-442) , (442) Miller-indexű síkokhoz tartoznak és a megfelelő hullámhossz az anód (molibdén) $K\beta$ karakterisztikus vonala ($\lambda = 0,63 \text{ \AA}$). Arra gyanakodhatunk, hogy a hasonló foltokban találunk mi is valami jellegzetes hullámhosszt, ezért a 8. ábrán látható számításoknak megfelelő teóriát röviden, az általános kristálytani részletek mellőzésével ismertetjük. Csak a kősóra (NaCl), azaz a lapcentrált köbös rácsra vonatkozó ismeretek összefoglalójára szorítkozunk [13, 14], fölhívva az olvasó figyelmét a [13] referenciában látható (200) , (220) , (222) Miller-indexű síkok színes és mozgatható megjelenítésére.

Induljunk ki a Bragg-egyenletből

$$n\lambda = 2d \sin\theta, \text{ ahol } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

Az egymást közvetlenül követő rácssíkok közötti távolság

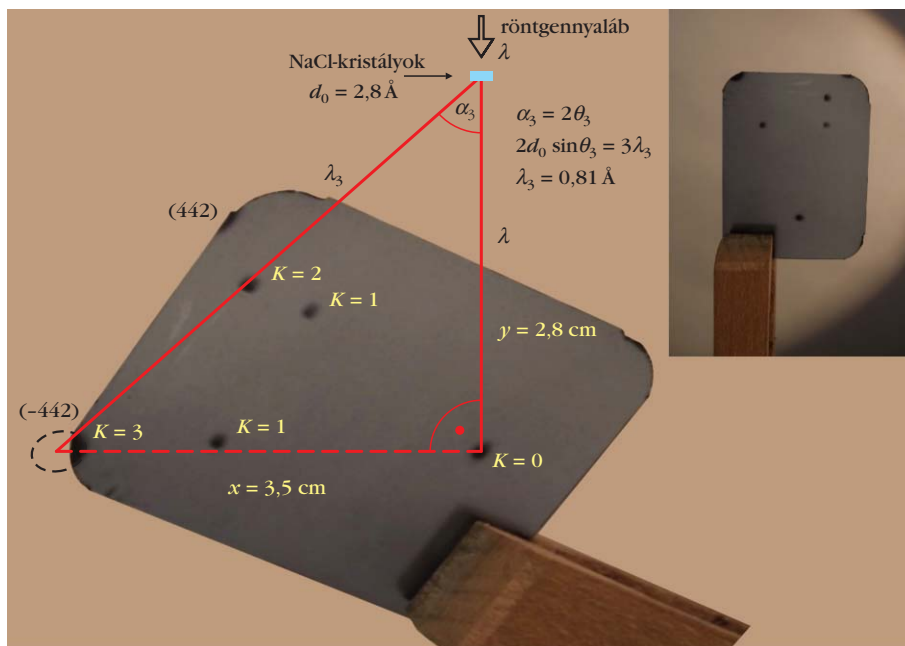
$$d = \frac{\frac{a_0}{2}}{\sqrt{\left(\frac{b}{m}\right)^2 + \left(\frac{k}{m}\right)^2 + \left(\frac{l}{m}\right)^2}}, \quad (7)$$

ahol $a_0 = 2d_0 = 5,64 \text{ \AA}$ a rácsparaméter és m a (hkl) számhármás legnagyobb közös osztója. NaCl esetében $m = 2n$. A megjelenő halvány páratlan indexű foltok, vagy a Debye–Scherrer-módszernél halvány körívek a Na- és Cl-ionok különböző intenzitású visszaverődéséből adódnak. A (6) feltétel így alakul [12, 14]:

$$\lambda = \frac{2 a_0 \sin \theta}{\sqrt{b^2 + k^2 + l^2}}. \quad (8)$$

A továbbiakban a

$$d_{bkl} = \frac{a_0}{\sqrt{b^2 + k^2 + l^2}}$$



8. *áb*ra. Az eredeti filmről kitesültük a zavaró filmjelző-szipesztartó helyét és szaggatott körrel kiemeltük a legnagyobb és legintenzívebb maximumot. A nagy képen a besugárzás geometriája. A *(hkl)* indexelés a [12] irodalmi hivatkozás alapján történt.

jelölést is használhatnánk, de a (8) egyenletet inkább a számunkra tetszetősebb alakúra írjuk át:

$$2 d_0 \sin \theta = \frac{\sqrt{b^2 + k^2 + l^2}}{2} \lambda, \quad (9)$$

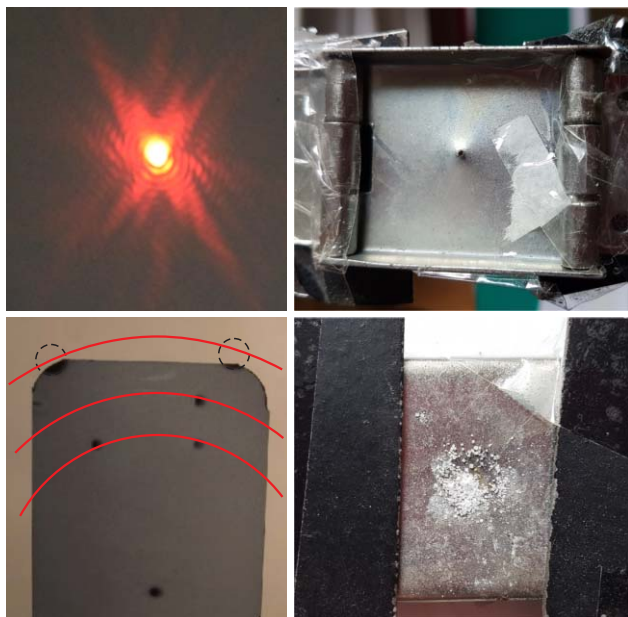
vagy nyilvánvaló jelöléssel

$$a_0 \sin \theta_K = K \lambda_K. \quad (10)$$

A fenti egyenlet formailag hasonlít a kettős résen, diffrakciós rácson és kis átmérőjű nyíláson lézerrel létrehozott diffrakciós képek kiértékeléséhez, csak a (10) egyenletben minden diffrakciós szöghöz más-más hullámhossz tartozik. A további számítások a K ismeretén múlnak, azaz a (hkl) Miller-indexek helyes megválasztásán.

A 8. ábra (–442) indexeinek megfelelően $K = 3$ és a számított hullámhossz $\lambda = 0,81$ Å, ami nem egy jellegzetes érték [15]. Első megközelítésünk eredménye tehát úgy néz ki, hogy a $K = 3$ foltok a folytonos spektrum nagyobb intenzitású részéből származhatnak. Mivel a folytonos spektrum és vele együtt a Laue-diagramok előállítására legalkalmasabb fém a nagy rendszámú volfrám [16], antikatódunk anyagára vonatkozó kérdésre megvan az első lehetséges válasz. Érdemes, vagy talán kötelező megvizsgálni a többi lehetőséget (foltokat) is, egészen a kiindulópontra visszatérve.

Először is a diffrakciós kép aligha származhat egy darab kristálytól. Porkristály [14, 17] kép még annyira sem lehet, de az már elképzelhető, hogy több kristálydarab szerencsés helyzete alakította a képet. Négy kisebb kristálydarab diffrakciós képe átmenetet képez a Laue-diagramok és a Debye–Scherrer-körök között [18], azaz a Laue-foltok koncentrikus körökre helyez-



9. ábra. Fent a He-Ne lézer diffrakciós képe az üres nyílson át, lent a besózott nyílás röntgendiffrakciós foltjai koncentrikus körívbe rendezve.

hetők. Ebben a koncepcióban a létrejött kép a 9. ábrának megfelelő lehet. A porkristály Debye–Scherrer-körök Miller-indexelését és intenzitását követve [14, 17] – függetlenül attól, hogy ott monokromatikus röntgent használnak – a következő indexelést tekintjük célszerűnek. $K = 0$, $\theta = 0$ mintha csak üres nyílás (levegő) lenne, majd kristályra:

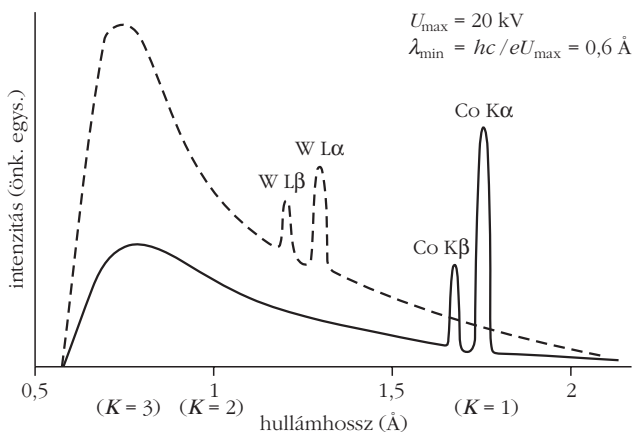
$$(200) \rightarrow K = 1,$$

$$(400) = 2(200) \rightarrow K = 2,$$

$$(600) = 3(200) \rightarrow K = 3.$$

A $K = 1$ -hez tartozó foltok Miller-indexei (-200) , (200) , $(0-20)$, (020) , $(00-2)$, (002) lehetnek.

Hasonlóan végezhető el a $K = 2$, (400) indexelés, és a már kiszámolt (-442) , (442) d szempontjából ugyanaz, mint a (600) , azaz $d = d_0/3$ ($K = 3$). A $K = 1$ helyű maximumok már egy korábbi diffrakciós próbafelvételen is megjelentek (10.a ábra). Ekkor csak tűhegynyi rést hagytunk az abroncson, de a kis méretű foltok nem tetszettek, ezért kicsit nagyobbítottunk a résen, vaslemezekkel letakartuk a csuklókat és fél centit emeltünk az abroncs magasságán. A háromszögek hasonlósági aránya egyenlő a magasságok arányával ($y/y' = 1,2$), azaz a diffrakciós szög nem változott. A (200) síkok a pordiffrakciós méréseknél messze a legintenzívebb körívet [17], vagy digitális kiértékelésnél a legnagyobb csúcsot [19] hozzák, ezért elképzelhető, hogy a $K = 1$ foltoknak is kitüntetett jelentősége lehet. Érdeklenség, amint csak egymagában

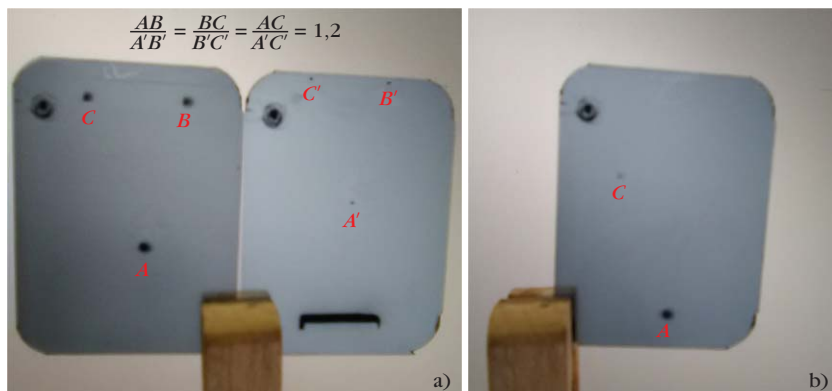


11. ábra. Röntgensövényünk részben számított és részben elméleti lehetséges spektrumai.

(7.a ábra), majd szimmetrikus párjával (amelyiknek már rá kellett volna férnie az előző filmre) jelenik meg (7.b ábra). Utána a többiekkel egyetemben (7.c ábra), és az utolsó felvételen (10.b ábra), amikor azt vártuk volna, hogy azon foltok is rákerülnek a filmre, amelyek az előzőnél az asztallapra estek – az egészből csak a legelső folt marad, ez is nagyon halványan. (Oka az lehet, hogy a sószemcsék a besugárzás során rázódnak. A szikrainduktor közel van a csőhöz és működés közben az asztallappal együtt kicsit rezgésbe hozza a kristályszerkezetet, amelyekből néhány rövid időre, egy-egy diffrakciós kép erejéig szerencsésen összerázódik, majd szétrázódnak és oda a kép.) A 8. ábra jelölései alapján $x = 2,1\text{cm}$, $\theta = 18,43^\circ$ és a (9) egyenletből $\lambda = 1,78 \text{ Å}$ ($E = 6,94 \text{ keV}$) adódik, ami igen közeli érték a kobalt $K\alpha$ ($E = 6,93 \text{ keV}$) vonalához [15]. (Ettől függetlenül még lehet, hogy máshonnan, például a volfrám folytonos spektrumából származik.) Előbb-utóbb a cső spektrumának félvezető detektoros vizsgálatával ezt tisztázni fogjuk, de addig is – számításaink és elképzeléseink alapján – röntgenünk lehetséges spektrumvonalait a 11. ábrán szemléltetjük. A 20 keV maximális csőfeszültséget a $K = 3$ -hoz igazítottuk, feltételezve, hogy a filmen (asztallapon) utánuk már nagyobb és intenzívebb foltok aligha lehetnek.

A röntgensőről azt sikerült kideríteni, hogy valamikor 1951–1966 között gyártotta a Magyar Adócső-

10. ábra. A $K = 0$ és $K = 1$ helyű maximumok különböző besugárzási geometriával (a) és az utolsó felvételen megmaradt maximumhelyek (b).



gyár. A csőre nyomtatott embléma (VATEG BUDA-PEST felirattal) a gyár emblémája, és elsősorban az exportálandó termékekre nyomtatták a könnyebb olvashatóság kedvéért [20]. A gyár története az elődjével (Vatea) együtt, külön kis hazai technika- és kultúrtörténet [20, 21]. A rádiócsöveken kívül számos egyéb eszközt, például fotocellákat [21], vagy izzókatódos diagnosztikai röntgensöveket is [20] gyártottak. Sajnos, az oktatási intézményeknek szánt taneszközökről semmilyen információt vagy nyomtatott tanszerismertetőt sem találtunk. Iskolánk eredetileg nem rendelkezett röntgensövekkel. 2009-ben „örököltünk” két csövet a megszüntetésre ítélt Kelenföldi Műszaki Szakközépiskolától és a Kolos Richárd Műszaki Szakközépiskolától. Valószínűleg az 1970-es években itt készülhetett az a 30×40 cm-es fényképező lemezen látható, a cső antikatódjától származó kerek röntgenfolt, amit a cső mellett nagy megbecsüléssel őrzünk szertárunk muzeális vitrinjében [7].

Irodalom

1. Fülöp L., Takács K.: Fogászati röntgenfilmek a fizikában. *Fizikai Szemle* 67 (2017) 400.
2. <http://pavogy.web.elte.hu/Kornyez/FDO/Szeged/4/32.html>
3. <http://www.iem-inc.com/information/tools/gamma-ray-dose-constants>

4. <http://www.researchcompliance.uc.edu/Libraries/Isotopes/Cs-137>
5. <http://www.researchcompliance.uc.edu/Libraries/Isotopes/Am-241>
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_exposure
7. www.facebook.com/fulopfizika
8. <http://hps.org/hpspublications/articles/dentaldoses.html>
9. <http://aribex.com/portable-x-ray-machine/nomad-x-ray/nomad-safety>
10. Budó Á., Mátrai T.: *Kísérleti fizika, III. kötet*. Tankönyvkiadó, Budapest (1980, második kiadás) 254–259.
11. Cullity, B. D.: *Elements of X-ray diffraction*. Addison–Wesley (1956) 84–96.
12. X-ray structural analysis: Bragg reflection and Laue diagrams http://physics.wooster.edu/JrIS/Files/Ramic_Web_Article.PDF
13. Röntgendiffrakció analitika <http://www.tankönyvtár.hu/hu/tartalom/tamop425/0033>
14. X-ray Diffraction (Debye–Scherrer Method) http://physics.usask.ca/~bzulkosk/modphyslab/phys381manual/xray_diffraction_2004
15. X-ray Emission Lines <https://www.med.harvard.edu/jpnm/physics/refs/xrayemis.html>
16. Nuffield, E. W.: *X-ray diffraction methods*. Wiley, New York (1966) 138.
17. Powder X-ray Diffraction Identification of an Unknown Crystalline Compound <https://www.monash.edu/rlo/assignment-samples...>
18. <http://www.mdpi.com/2073-4441/2/3/333/htm>
19. <http://slideplayer.com/slide/4616826/15/images/24/X-rays...>
20. Pécs L.: A Magyar Adócsőgyár története. *A Rádiótechnika Évkönyve* (2001) 4–9.
21. <http://www.elektroncso.hu/cikkek.php>

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

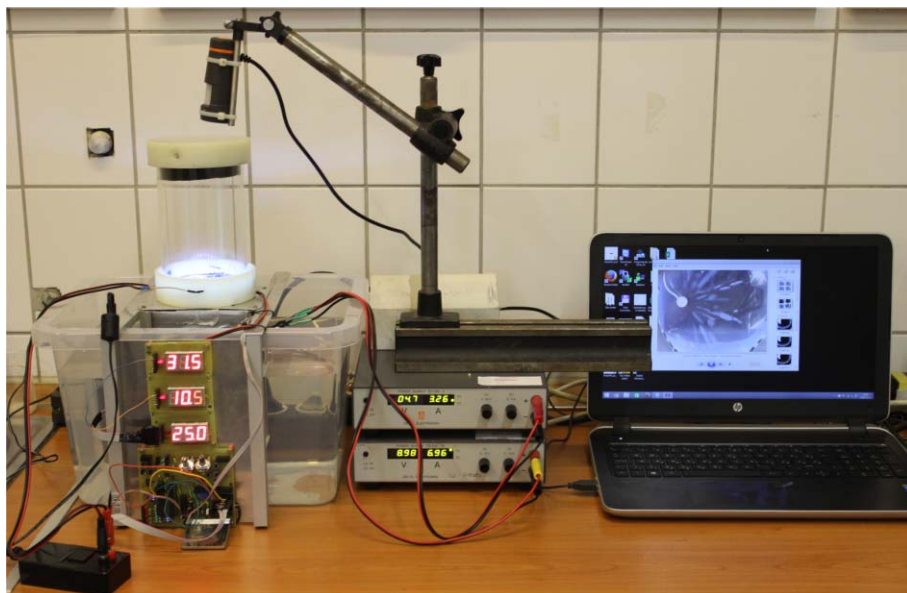
A Karon belül nagy hangsúlyt fektetnek a fizika népszerűsítésére, amelyből a Kísérleti Kör is rendszeresen kiveszi részét, így az általunk készített eszközök gyakran válnak demonstrációs kísérletek főszereplőivé. Olyan is előfordult már, hogy egy-egy eszközt kifejezetten demonstrációs céllal építettünk. 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 Napból és világűrbeli 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.

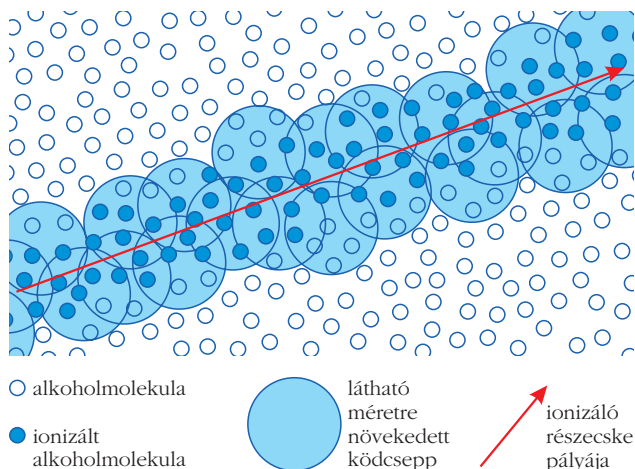
Amíg a Wilson-féle kamrában csak pillanatfelvételeket lehetett készíteni az expanzió miatt, addig a diffúziós ködkamrában a kamra tetejéből folyamatosan a hűtött oldal felé áramló, majd ott kondenzálódó alkohol miatt folyamatos üzemű működtetés is lehetővé válik.

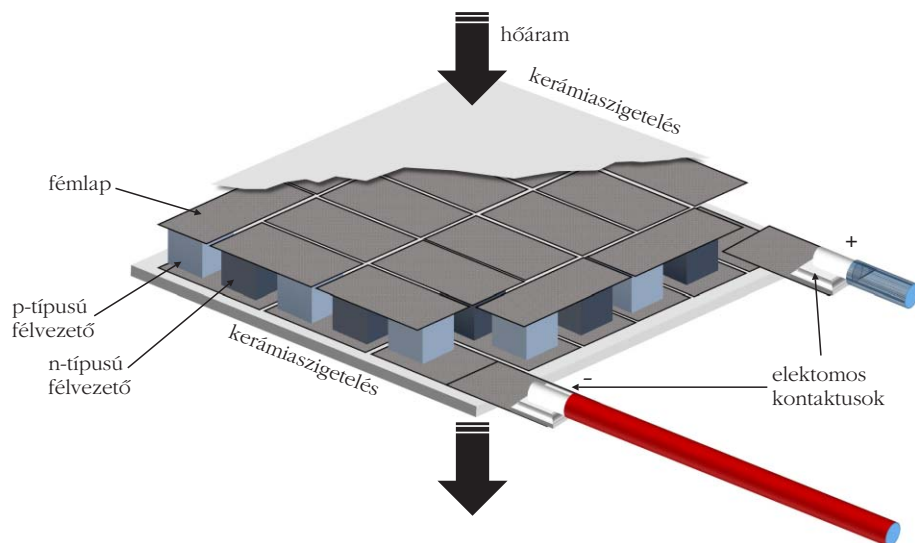
A ködkamra hűtése

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.

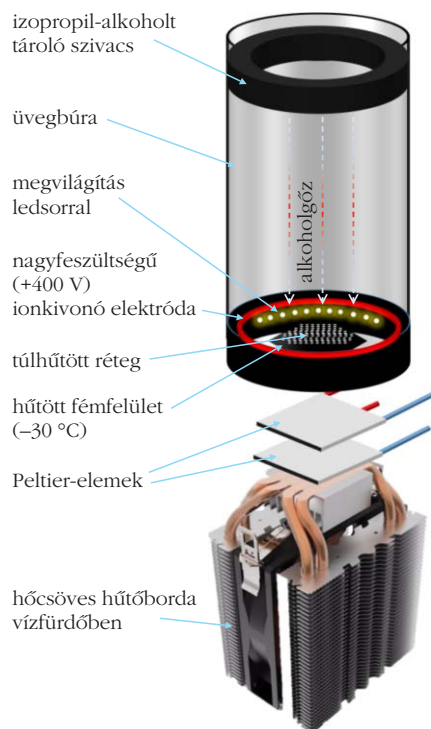
A Peltier-elem

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

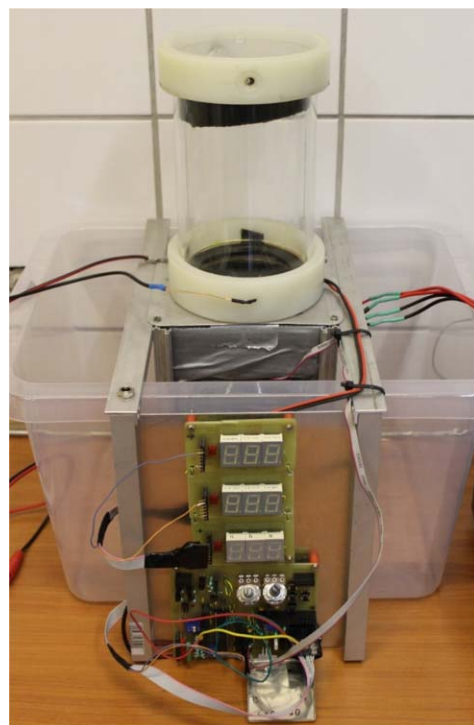
4. ábra. Egy diffúziós ködkamra sematikus felépítése (balra) és a kész kamra (jobbra).



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 fejlesztőpanel szolgált.

A digitális hőmérők által mért hőmérsékletek kiolvasása mellett ez az áramkör felelt a saját fejlesztésű hétszegmenses kijelző működtetéséért is. Utóbbi három darab azonos, három és fél digitális kijelzőből áll, amelyekkel a ködkamra hűtésekor 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 szögből 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 szennyeződéseket kivonja a hűtött térfogatból – 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 alkoholvesztés 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

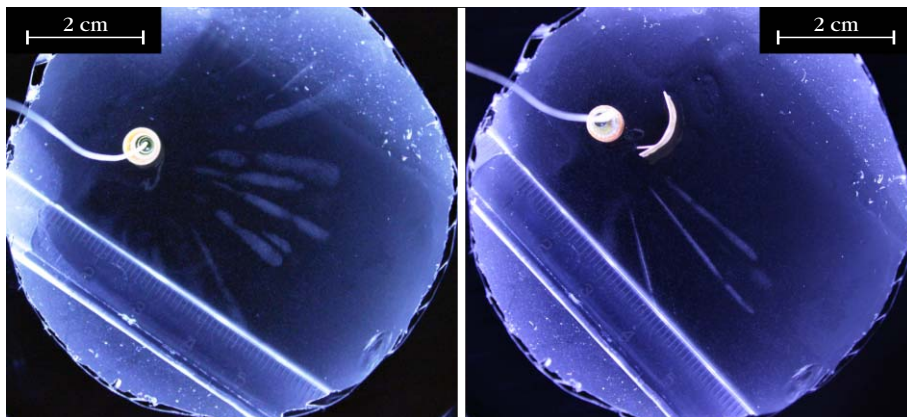
Ezen részecsketípus megfigyelhetősége a ködkamrában csekély, ugyanis α -, β - és γ -sugárzások közül a γ -foton rendelkezik a legkisebb ionizáló képességgel. Anyaggal történő kölcsönhatásai során (párkeltés, Compton-szórás, fotoeffektus) keletkező $\beta^\pm$ -részecskék keltene közvetlenül ködfonalakat 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 demonstrálok 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.

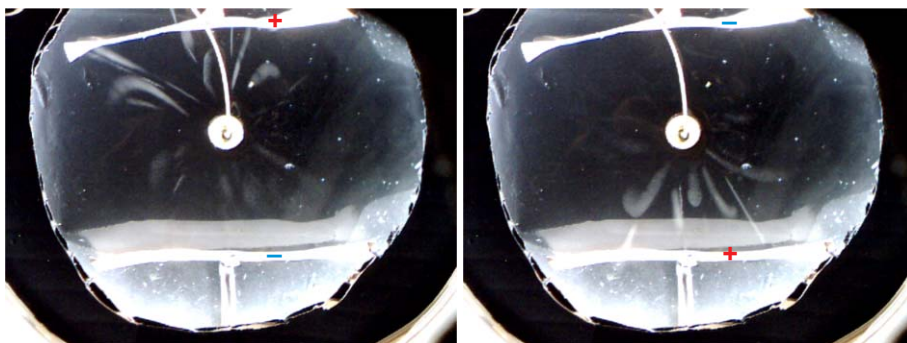
Gázbarisnya

Korábban kemping gázlámpásoknál alkalmazták, növelve a gázláng fényerejét. A sugárforrás beszerezhetősége elég nehezkesé 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 eltérítése 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) sugárzástípusát 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 aranyfűstfólia került a sugárforrás elé, ami a várakozások szerint az alfa-sugárzást elnyeli, de kellően vékony fólia esetén a béta-sugárzást átterjeszti.

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 részecske 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 elvesztik 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 bemutattuk 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](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>

A KALOCSAI ÉRSEKI FŐGIMNÁZIUM RÖNTGENLABORATÓRIUMA ÉS ELSŐ VILÁGHÁBORÚS SZEREPVÁLLALÁSA

Szabó Róbert
ELTE TTK V. éves hallgató

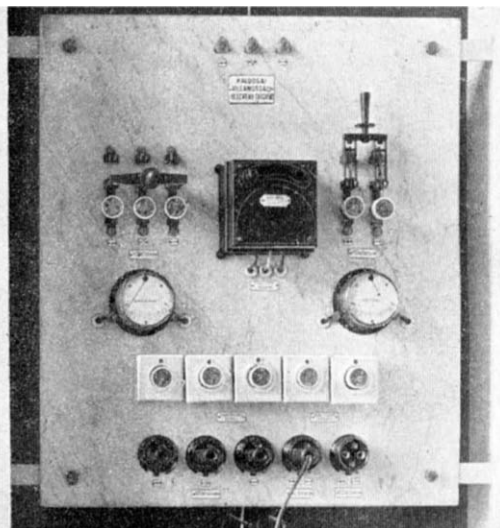
Középiskolai fizikatanárként munkánk jelentős részét a fizikaszertárban vagy fizikaboratóriumban töltjük a tanórai kísérletekre való felkészülés céljából. Eközben lépten-nyomon olyan, esetenként nagyon régóta nem használt eszközökbe, berendezésekbe botlunk, amelyeket nemhogy használni nem tudunk, de rendeltetésük céljával sem vagyunk tisztában.

A szertár 20., sőt 19. századi felszerelésének megismerése azonban két ok miatt is fontos. Egyrészt rendelkezésre állhat olyan eszköz, amely napjaink egy-egy új, drágán beszerezhető darabját is pótolhatja; másrészt alkalmazásukkal testközelben tudunk beszélni azokról a témákról, amelyek jelenünkben más, önálló tudományág (például orvostudomány) részeivé váltak, így az iskolában már demonstrációs célokból sem tanítjuk őket.

Ilyen kutatás tárgyát képezheti egy 20. század első évtizedeiből származó röntgenlaboratórium, amelynek első tömeges alkalmazása az első világháborúban (Nagy Háború) történt.

Célok, motivációk

Az első világháború befejezésének (1918) századik évfordulója apropóján szükséges lehet nem csupán a had- és társadalom-, hanem a kapcsolódó tudománytörténeti témák feltárása is. Ennek egyik lehetőségét nyújtja, ha egy középiskola háborús áldozatvállalását és fizikaszertárának ebben jelentkező szerepét vizsgáljuk meg. Ez adja írásom legfőbb motivációját amellet, hogy volt középiskolám, a *Kalocsai Szent István Gim-*



1. ábra. A Főgimnázium 1906-ban átadott új épületének korszerű fizika-előadója és a benne található villamos kapcsolótábla [3].

názium történetének feldolgozására esett a választásom. Kutatásom ezáltal nemcsak hiánypótló, de korábbi tanulmányaimhoz is szorosan kapcsolódik.

Ezen írásom célja, hogy megvizsgáljam az iskola fizikaszertárának első világháborúban kifejtett tevékenységét, jelentőségét. Első lépésként górcső alá veszem a gimnázium egykori szertárában található röntgenfelszerelést, majd elemzem annak legfontosabb részeit. Arra törekszem, hogy a több mint száz éves eszközök és műszerek működését a korabeli szakirodalom¹ alapján magyarázzam meg. Munkámban ezen kívül még helytörténeti forrásokat – amelyek szétszórtnak tartalmaznak hosszabb-rövidebb írásokat az iskolai röntgenlaboratórium felépítéséről és a Nagy Háborúban betöltött, elismerésre méltó szerepéről – is felhasználok.

A Főgimnázium röntgenlaboratóriuma

A *Kalocsai Érseki Főgimnázium* a 20. század kezdetére, modern felszereltsége és a jezsuita rend, valamint a katolikus egyház támogatása révén országos hírnév-

Köszönetemet fejezem ki *Horváth Gábornak* témavezetői és lektori tevékenységéért. Ugyancsak köszönet illeti a Kalocsai Szent István Gimnázium könyvtáros tanárát, *Torgyik Tamást*, akitől sok forrásanyagot, illetve támogatást kaptam iskolatörténeti kutatásaimhoz. Hálas vagyok emellett *Tél Tamásnak* a témával kapcsolatos módszertani ötleteiért.



Szabó Róbert az Eötvös Loránd Tudományegyetem ötödéves fizika-történelem tanárszakos hallgatója. Középiskoláját a Kalocsai Szent István Gimnáziumban végezte. Egyetemistaként főként olyan témákban kutat, amelyekkel a fizika és történelem összekapcsolására törekszik, az elkészített tananyagokkal pedig a tanárok munkáját segíti. Tavalyi kutatásában a régi középiskolájában zajló fizika tanításának történetével foglalkozott, különös tekintettel az intézmény röntgenlaboratóriumára.

vel rendelkezett. Tanulói ugyanis nemcsak Kalocsáról és Pest-Pilis-Solt-Kiskun megyéből, hanem a Magyar Királyság számos távoli városából (Pozsony, Brassó stb.) is érkeztek.

Annak ellenére, hogy a gimnázium előtérbe helyezte a klasszikus műveltség és nyelvek tanítását, teret nyitott a természettudományok magas fokú művelésének is; ásvány-, állat- és növénytára, valamint fizikaszertára egyedülálló volt. Erről számos ékes példa is tanúskodik, például az, hogy 1906-ra, tíz évvel *Wilhelm Conrad Röntgen* német fizikus felfedezése (1895) után, az iskola egy teljesen önálló röntgenlaboratóriumot volt képes felszerelni. A modern berendezések (Wehnelt-féle elektrolitikus szagató, röntgenlámpák stb.) ugyanis olyan szintű előrelelépést jelentettek, ami az iskola „korral haladni tudását mutatták” [1].

Ez idő tájt a Főgimnáziumban még nem sejthették, hogy az eredetileg demonstrációs célokra szánt röntgenlaboratórium később rendkívül hasznos lesz az első világháborúban. A háború kitörése (1914. július 28.) azonban azt eredményezte, hogy a fizikaszertár az iskolában működő hadikórház kezelőorvosainak laboratóriuma lett [1].

A következőkben e röntgenlaboratórium részeit és azok működési elvét mutatom be.

A röntgenlaboratórium felépítése

A laboratórium első eleme a *villamos kapcsolótábla* (1. ábra), ami az áram forrásaként szolgált. Mivel a kapcsolótáblába a városi középponti telep áramát vezették be, így célja annak szabályozása és elosztása

¹ Cikkem alapvető szakirodalma Zemlén Győző: *Az elektromosság és gyakorlati alkalmazásai* című könyv második kiadása (1927). Ugyanis, annak ellenére, hogy a szerző az első világháború olasz frontján életét vesztette (1916), Zemlén nagysikerű művét *Pogány Béla* és *Selmeci Pöschl Imre*, nyugalmazott egyetemi tanárok később átdolgozták, így került sor a második kiadásra 1927-ben.

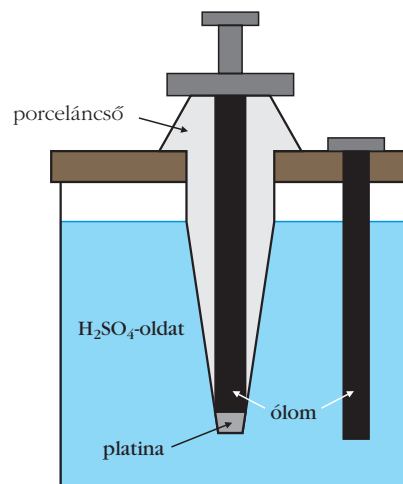
volt. A kapcsolótábla – ami egy falra helyezett márványlap – felületén helyezkedtek el a kapcsolók, az áram- és feszültségmérők, illetve a különféle biztosító berendezések. Az elektromos vezetékeket, valamint a feszültség szabályozására alkalmas ellenállásokat azonban elrejtette a tábla, amit két fontos tényező is indokolt. Az elrejtés egyrészt esztétikai okokból volt szükséges, másrészt azért, hogy a tanulók ne férhessenek hozzá a vezetékekhez, ezáltal kerülve el az esetleges sérülést [2].

Ezután, a kapcsolótábla által szolgáltatott áram² előbb a *Wehnelt-féle elektrolitikus áramszaggyatőba* (2. ábra), majd az általa működtetett Ruhmkorff-féle szikrainduktorba jutott.

A Wehnelt-féle elektrolitikus áramszaggyatő egy olyan elektrolitos cella, amelynek üveghengerben lévő folyadékját körülbelül 30%-os kénsav (H_2SO_4) alkotta. Az elektrolitikus cellába egy vastag porceláncső nyúlt be, amelynek egyik elektródja egy vastagabb ólomrúd, másik elektródja pedig egy apró platinaacscs volt [2]. Működésének lényege, hogy az apró platinaelektród környezetében, az áram hőhatása következtében a folyadék elpárolgott, s gőzbuborék képződött. E gőzbuborék hirtelen megszakította az áramot, megszűnésével (felszállásával) az áram azonban újra megindult, hiszen a drót ismét érintkezni tudott a kénsavval. Mivel a buborékképződés igen sűrűn, másodpercenként akár több százszor is bekövetkezett, a megszakítások száma rendkívül nagy volt [2, 4].

A felszerelés következő elemét a *Ruhmkorff-féle szikrainduktor* (3. ábra) képezte, amely a transzformátor elve alapján működött. Az induktor lényegében két, lágyvasmagra csévelt tekercsből állt, amelyből a belső (primer) tekercsben az áramot a Wehnelt-féle szaggyatőval rendkívül gyorsan zárták és nyitották. E váltakozó áram hatására változó mágneses fluxus jött létre a primer tekercsben, ami feszültséget indukált a külső (szekunder) tekercsben. A primer tekercs viszonylag alacsony, a szekunder tekercs pedig magas menetszámmal rendelkezett [4], így a külső tekercsben könnyedén lehetett rendkívül nagy, akár 10–100 kV-os váltófeszültséget előállítani.

Az elrendezés egyik utolsó elemének tekinthető az *ion-lámpa* (röntgenlámpa), amelyből a gimnázium négy darabbal is rendelkezett. A 150 mm gömbátmérőjű, Wehnelt-szaggyatőhoz és Ruhmkorff-féle szikrainduktorhoz ajánlott iskolai röntgensövet három csőnyúlvánnyal látták el: az egyik nyúlványba a katódot (negatív töltésű elektróda) forrasztották, ennek végét gömbsüveg alakú alumíniumlemez alkotta; a másik az



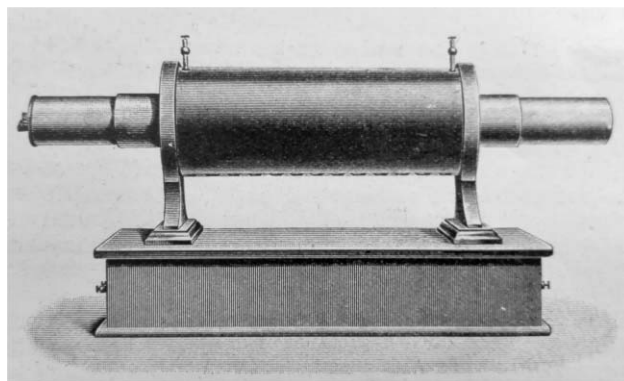
2. ábra. A Wehnelt-féle elektrolitikus áramszaggyatő felépítése.

anód (pozitív töltésű elektróda) volt, amit egy egyszerű alumíniumrudacska helyettesített. A harmadik elektród a platinából készült antikatód, a röntgensugarak forrása volt. Az anódot és antikatódot kívülről elektromosan vezető drót kötötte össze, így a két elektród azonos potenciálon volt [2].

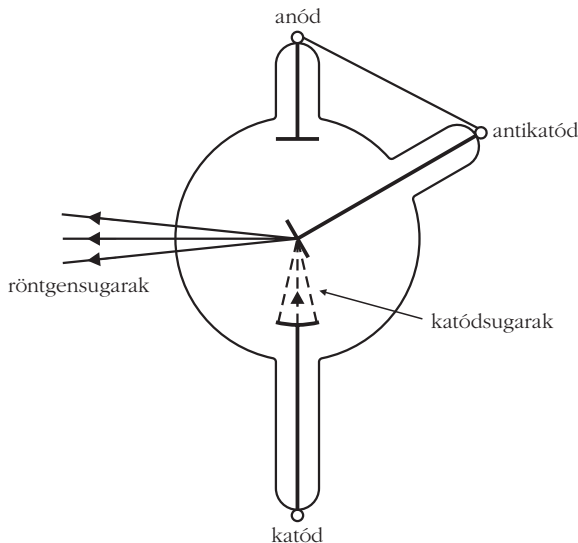
Végül, mivel az ion-lámpa közvetlen kapcsolódik a röntgenképek elkészítéséhez, a felszerelés elemei között említhető még meg a *röntgenernyő*. Ha a röntgenezni kívánt tárgyat a röntgenscő és egy röntgensugárzásra érzékeny, például bárium-platina-cianidral bevont fekete papírlap (ernyő) közé tesszük, akkor a tárgy képét nyerjük, mégpedig úgy, hogy a röntgensugár egy része elnyelődik a tárgyban, és ekkor a fluoreszkáló anyaggal bevont ernyőn csak a tárgyon áthatolt sugarak rajzolnak képet. Ezt elnyelésképnek nevezzük. (Fluoreszkáló anyagnak olyat érdemes választani, amelynek hullámhosszára szemünk viszonylag érzékeny. A sugárzás hatására világoszöldben világító bárium-platina-cianid erre kiválóan alkalmas [6].)

A röntgenképek minősége függ az átvilágítandó anyag szerkezetétől. Ennek megismeréséhez a sugárzás keletkezésének körülményeit is szükséges áttekintünk.

3. ábra. Az elektrolitikus szaggyatő működtetéséhez alkalmazott Ruhmkorff-féle szikrainduktor (oldalnézeti képe), amellyel a Főgimnázium is rendelkezett [5].



² A váltakozó áramú generátor működésének alapelve, hogy homogén mágneses térben egy zárt drótkeretet (lapos tekercset) forgatunk, minek következtében abban váltakozó áram keletkezik. A váltakozó áramú gépek jelentőségét viszont csak a 19. század végén ismerték fel, így a már korábban is működő kalocsai városi villamostelep még egyenáramú generátorokkal dolgozott, 220 V-os egyenáramot szolgáltatva az iskolának. Az egyenáramot ugyanakkor úgy állították elő, hogy a váltakozó áramú gép áramát áramfordító (kommutátor) segítségével „egyenirányították” [4].



4. ábra. A röntgensugárzás keletkezésének folyamata: a katódból kilépő elektronok az antikatódba ütköznek, ami a röntgensugarak kiindulópontja lesz, a [8] alapján.

A röntgensugárzás keletkezése

A katódból³ kiinduló elektronok mozgási energiájukra akkor tesznek szert, amikor a katódból kilépve a katód és az anód közötti U_{gy} gyorsítófeszültség hatására felgyorsulnak, az m_e tömegű és v sebességű elektron az elektromos mező ugyanis eU_{gy} munkát végez:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = e U_{gy}. \quad (1)$$

Röntgensugárzás akkor keletkezik, ha ezen elektronok a ferdén elhelyezett antikatódba ütköznek és lefékeződnek (fékezési sugárzás) [7]. Ez lesz a röntgensugarak kiindulópontja, amelyből a kilépő röntgensugárzás maximális intenzitása a töltés gyorsulásának irányára merőlegesen, hengerszimmetrikusan történik (4. ábra) [9].

Az elektronok mozgási energiája tehát az antikátodon alakul át a röntgensugárzás ε elektromágneses energiájává:

$$e U_{gy} = \varepsilon. \quad (2)$$

A fékeződő elektronok az elektromos mezőnek azonban csak adagokban (kvantumokban) képesek átadni ezt az energiát [7]. Ennek oka az, hogy az elektronok, miközben az antikatód anyagának atomjaival ütköznek, lelassulnak. Az ütközések során egyrészt meglöki az atomokat, aminek hatására az anyag felmelegedik, másrészt egy röntgenfoton is keletkezhet a folyamatban [9]. Az ütközések statisztikus folyamatok, ezért az energiavesztés egy-egy ütközésben külön-

böző mértékű lehet. (Igen kis valószínűséggel olyan eset is előfordulhat, hogy az elektron energiája teljes egészében egyetlen foton létrehozására fordítódik.) Ennek megfelelően, különböző frekvenciájú (hullámhosszú) fotonok keletkeznek, vagyis folytonos röntgenszínkép alakul ki. Ekkor, létezik egy maximális $hf_{határ}$ fotonenergia, ami felvilágosítást ad az f frekvencia lehetséges értékéről az

$$e U_{gy} = hf_{határ} \quad (3)$$

összefüggés szerint [8]. Ugyanakkor az f frekvencia a

$$\lambda = \frac{c}{f_{határ}} \quad (4)$$

értelmében megadja a röntgenfoton hullámhosszát, egyúttal meghatározza a röntgensugarak keménységét (áthatolóképességét) is, ugyanis a röntgensugarak áthatolóképessége a frekvencia növekedtével együtt (nem arányosan) nő. Az U_{gy} gyorsítófeszültséggel arányosan növekszik a frekvencia maximum értéke, tehát magasabb gyorsítófeszültséggel nagyobb áthatolóképességű, kemény sugarak állíthatók elő (az alacsonyabb energiájú, lágy sugarak áthatolóképessége természetesen kisebb).

A képkészítés folyamatát a sugarak keménységén kívül anyagminőségi tényezők is jelentősen befolyásolják, így a következőkben arról ejtünk néhány szót.

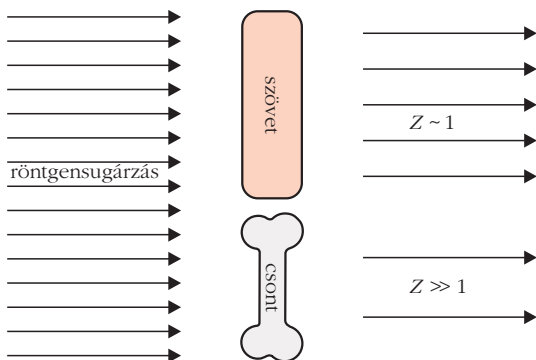
A röntgenkép készítése anyagminőségi szempontból

A röntgenlámpák fala általában üvegből készült, a röntgenkép készítésekor ismerni kellett a lámpa pontos típusát, anyagszerkezetét is. A röntgenfény abszorpciója (elnyelődése) ugyanis az abszorbeáló atomok Z rendszámának negyedik hatványával nő, vagyis annál hatékonyabb volt a lámpa működése, minél alacsonyabb rendszámú elemekből állt az üveg. Ezért diagnosztikai célokra – a normál üveghez használt Na ($Z = 11$), Ca ($Z = 20$), Si ($Z = 14$) helyett – inkább lítiumüveget alkalmaztak, ahol az alkotó elemeket a Li ($Z = 3$), Be ($Z = 4$) és B ($Z = 5$) adta. (Utóbbiak a sugárzás mindössze 10–15%-át nyelték el, míg a normál üveg a sugárzás akár 60%-át is.)

Az előzőből az is következik, hogy minél nagyobb egy elem rendszáma vagy sűrűsége, annál hatékonyabban nyeli el a röntgensugárzást. Ezért a különböző vastagságú és sűrűségű szervekből, szövetekből álló emberi testet állítva röntgensugárzás útjába, a keletkező röntgenképen az egyes testrészek kiválóan felismerhetők lesznek (5. ábra).

Az emberi testről készült képen a csontok jól megkülönböztethetők, hiszen anyaguk – CaCO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – egyik fő alkotórésze a Ca ($Z = 20$), amely a lágy szöveteket alkotó többi elemhez – H ($Z = 1$), C ($Z = 6$), N ($Z = 7$), O ($Z = 8$) – képest viszonylag magas rendszámú. Ehhez hasonlóan, a csonttól könnyen

³ Abból a célból, hogy mindig a katód legyen az elektronok forrása, a lámpán két irányban is áthaladni képes áramot a cső „egyenirányította”. Ennek köszönhetően a Wehnelt-féle elektrolikus szaggató alkalmazásával előállított, szaggatott (nem szinuszos) szekunder feszültség egyenfeszültségként jelent meg az ion-lámpán [4].



5. ábra. Az emberi testet alkotó szövetek és csontok jól elválaszthatók az őket alkotó elemek Z rendszámának különbözősége miatt.

elválasztható az első világháborúban használt, ólomtartalmú ($Z = 82$) lövedék (6. ábra) is.

Az ion-lámpák antikatódja szintén anyagszerkezeti megfontolásokból készült platinából ($Z = 78$) [2]. A cső adott elrendezése miatt az antikatód nagy rendszámú és vastag platinaanyaga ugyanis egyrészt elnyelte a hengerszimmetrikusan kibocsátott sugárzás felé irányuló részét, és emiatt a kilépő sugárzás többé-kevésbé oldalra „irányított”, aszimmetrikus lett. Másrészt, a magas rendszámú platina jobban fékezte a becsapódó elektronokat, mint egy kisebb rendszámú fém, és így a röntgensugárzás kibocsátásának határfoka megnőtt. Az elnyelt energia miatt arra is szükség volt, hogy az antikatódot vízzel hűtsék (7. ábra), hiszen a lefékeződő elektronok energiájának csak csekély hányada alakult át röntgensugárzássá, a nagyobb rész maradékhő formájában melegítette az antikatódot [9].

Ugyancsak a röntgensugárzás elnyelődésének tulajdonságával magyarázható, hogy diagnosztikai célokra olyan lámpát érdemes használni, amelynek spektrumát lágy és közepes keménységű sugarak alkotják. Ebben az energiatartományban ugyanis a különböző anyagok elnyelése nagyobb mértékben tér el egymástól, jelentősen javítva a röntgenképek kontrasztját-minőségét [2]. A nagy áthatolóképességű sugárzás kevésbé hat kölcsön az anyaggal, következésképp az elnyelési árnyékok is nagyon halványak; a kép túl „világos” és kontrasztzegény lesz. Ezzel szemben a kis áthatolóképességű lágy röntgensugarak nem hatolnak át a testen; a kép újfent információzegény, „fekete” lesz.

A létrehozott képek élességét, azaz felbontását ezen túl egy másik tényező is befolyásolja. A keletkező elnyelési kép felbontása annál jobb, minél kisebb kiterjedésű (akár pontszerű) az öt létrehozó fényforrás. Az alumíniumból készült katód formája ezért homorú, hiszen így a felületéről merőlegesen elrepülő elektronnyaláb koncentráltan esett az antikatódra [9].

Következtetések

A Kalocsai Érseki Főgimnázium röntgenlaboratóriumának megismerésével lehetőségünk nyílt egy olyan, napjainkban már nem használt demonstrációs berendezés felkutatására, amely mára elveszítette régi jelen-



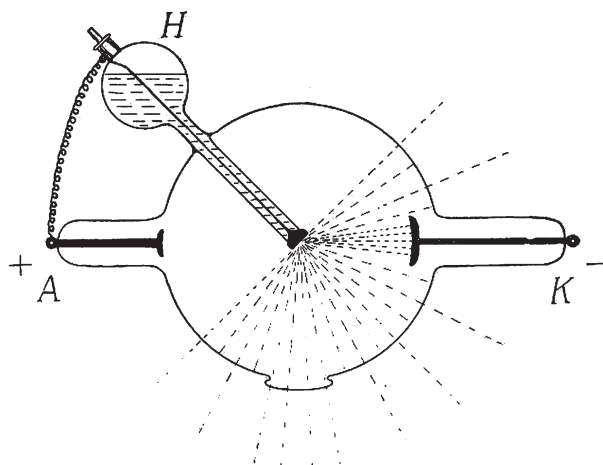
6. ábra. Felvétel egy, az iskolában röntgenezett katona bordáiról, amelyek között egy hegyes orosz lövedék látható [10].

tőségét. Ugyanakkor, a szükséges eszközök beszerzésével lehetővé válna, hogy írásom alapján a laboratóriumot újra megépítsük, sőt oktatási célra használjuk.

Ehhez, mint láttuk, egyrészt a röntgenlámpa alkalmazásának elengedhetetlen feltétele a Wehnelt-féle elektrolitikus szaggató, valamint az általa működtetett Rumhkorff-féle szikrainduktor. Másrészt, a lámpák felépítését, anyagszerkezeti tulajdonságait megismerve megértettük, hogy a röntgensugárzás diagnosztikai alkalmazása azon a felismerésen alapul, hogy az emberi test szövetei különböző mértékben nyelik el a sugárzást. Ezáltal, megállapítható, hogy az elnyelő-, illetve áthatolóképességben való tudományos jártasság alapvetően járult hozzá a laboratórium sikeres, első világháborús alkalmazásához.

A fizikaszertár sebesültek gyógyítására, ápolására alkalmazott röntgenlaboratóriuma akár több száz katona életét is megmenthette. Ezáltal kijelenthető, hogy a gimnázium fizikatanára, *Roznovszky János* és a kalocsai Vöröskereszt kórházának főorvosa, *Schönwald József* kiemelkedő szolgálatot tett a haza javára, hiszen a röntgenezett katonák száma már az első há-

7. ábra. A Főgimnázium röntgenlámpájával analóg – korabeli – sematikus rajz az anód (A), a vízzel hűthető (H) antikatód és a katód (K) jelölésével [11].



borús tanévben (1914–1915) elérte a 350 főt [12]. Figyelembe véve, hogy az eszközök eredetileg csak oktatási, demonstrációs céllal készültek, ez mindenképpen nagy eredménynek tekinthető.

A gimnázium fizikaszertára rendkívül modern és felszerelt volta könnyen kielégítette tehát a Nagy Háború támasztotta igényeket. Az sem okozott számára különösebb problémát, hogy épületében hadikórházat kellett berendezni.

Kitekintés

Írásommal példát kívántam mutatni arra is, hogy miként lehet a fizikát és történelmet interdiszciplináris tudománnyá gyúrni. Hiszen e téma feldolgozásával lehetővé vált, hogy a röntgenlaboratórium működését és a röntgenfelvételek készítésének elvét történelmi kontextusban ismerjük meg, s ezt felhasználva tanítsuk meg a középiskolában. További előny, hogy tudománytörténettel kapcsolatos kutatási témák kidolgozásával a természettudományok felé kevésbé orientálódó diákok figyelmét is leköthetjük, és hasonlóan izgalmas témák felkutatására sarkallhatjuk őket.

Irodalom

1. *A Kalocsai Jézus-Társasági Érseki Szent István Gimnázium Értesítője az 1935–1936. tanévben.* Árpád Részvénytársaság Könyvnyomdája, Kalocsa (1936) 9.
2. Zemplén Győző: *Az elektromosság és gyakorlati alkalmazásai.* Kir. Magy. Természettudományi Társulat, Budapest (1927) 108–625.
3. *A Jézus-Társasági Kalocsai Érseki Főgimnázium Értesítője az 1905–1906. iskolai évről.* Jurcsó Antal Könyvnyomdája, Kalocsa, 1906.
4. Budó Ágoston: *Kísérleti fizika (Elektromosságtan és mágnesség-tan), II. kötet.* Tankönyvkiadó, Budapest (1979) 281–295.
5. Zemplén Győző: *Az elektromosság és gyakorlati alkalmazásai.* Kir. Magy. Természettudományi Társulat, Budapest (1927) 108.
6. Zemplén Győző: *Az elektromosság és gyakorlati alkalmazásai.* Kir. Magy. Természettudományi Társulat, Budapest (1910) 661–664.
7. Erostyák János, Kürti Jenő, Raics Péter, Sükösd Csaba: *Fizika III. Fénytan. Relativitáselmélet. Atombéj-, atommag- és részecskefizika.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (2006) 272.
8. Budó Ágoston, Mátrai Tibor: *Kísérleti fizika (Optika és atomfizika), III. kötet.* Tankönyvkiadó, Budapest (1985) 254.
9. Tarján Imre: *Fizika orvosok és biológusok számára.* Medicina Könyvkiadó, Budapest (1971) 340–342.
10. *Stefáneum. A Kalocsai Jézus-Társasági Nevelőintézet lapja.* XVIII. szám. Jurcsó Antal Könyvnyomdája, Kalocsa (1915).
11. Zemplén Győző: *Az elektromosság és gyakorlati alkalmazásai.* Kir. Magy. Természettudományi Társulat, Budapest (1927) 609.
12. *Stefáneum. A Kalocsai Jézus-Társasági Nevelőintézet lapja.* XIX. szám. Jurcsó Antal Könyvnyomdája, Kalocsa (1915) 7–21.

MIÉRT ÉS HOGYAN LETTEM FIZIKATANÁR?

Papp Katalinnal a szegedi Magyar Science on Stage Fesztiválon Radnóti Katalin beszélgetett

Egyetemistaként olyan szerencsés voltam, hogy a kémia-fizika szakos évfolyamunknak az elméleti fizikát *Marx György* tanította. Ő fontosnak tartotta, hogy minél szélesebb körű ismereteink legyenek a hazai egyetemi életről, ezért kétszer is kirándulást szervezett számunkra. Egyik alkalommal Debrecenbe, 1980-ban pedig Szegedre. Ekkor ismerkedtem meg *Papp Katalinnal*, amely egész pályafutásom meghatározó élményévé vált.

Ezekben az években – az akkori 1978-as tanterv alapján – kezdték el bevezetni a hosszú, több éves fejlesztőmunka eredményeként létrejött, napjaink fizikaoktatásában is alapvető jelentőségű tankönyveket. Papp Kati, ahogy Őt sokan ma is hívják, mint fiatal szakmódszertannal foglalkozó egyetemi oktató, e szemléletben való fizikatanítási lehetőségeket kutatta és tanította hallgatói számára. Fontos volt számára, hogy az akkor még új szemléletet ne csak az ország különböző tájain megrendezett szemináriumokon és előadásokon ismerje meg, hanem saját gyakorlatán keresztül is. Ezért – az egyetemi előadásai mellett – az egyetem gyakorlóiskolája néhány osztályában óradóként is tanított. A kirándulás során egy mechanikaóráját látogathattam meg.

Az óra mintaszerű volt. E látogatáson érelődött meg teljesen számomra, hogy tanítani szeretnék, és köteleztem el magamat a fizika oktatása mellett.

Kati munkája *peldaértékű* sokunk számára, szakmódszertanos oktatóként-kutatóként kiemelkedő munkásságot tudhat magáénak. Sok-sok szakdolgozó munkáját irányította, több jelöltje komoly tanári kiténtetést kapott, doktori fokozatot szerzett szintén a tanárnő irányítása alatt, mind a Fizika, mind a Neveléstudományi Doktori Iskolában. Hosszú évtizedek óta fáradhatatlanul ontja ötleteit a fizika minél jobb oktatásához. Temérdek kiváló publikációt készített ennek érdekében, amelyek társszerzői általában korábbi tanítványai. Több, a *Fizikai Szemlében* megjelent cikkért kapott díját (1991., 2001., 2004.). Széleskörű közéleti tevékenysége is – amelyet több kiténtetéssel ismertek el – elsősorban az Eötvös Loránd Fizikai Társulathoz kapcsolódik. Férje fizikaprofesszor a Szegedi és a Soproni Egyetemen. Két gyermekük és négy unokájuk van.

Kati jelenleg az SZTE–MTA Természettudomány Tanítása Kutatócsoport meghatározó tagja, amelyben közösen dolgozhatunk. Mindig örömmel tölt el, ha bárhol találkozhatunk, vagy más közös munkánk is



A kiállításon szerepelő egyik – hétköznapi eszközök felhasználásával – gyerekekkel elkészíthető kísérleti eszköz a *szívószálmérleg*. Ez egy vastagabb, közepén tüvel átszúrt, alátámasztott szívószálból, fém kiskanalakból (a mérleg serpenyője) készült mérleg. Súlyként akár rizsszemek is szolgálhatnak. A másik serpenyőbe néhány, például 10 csepp vizet lehet tenni, majd egy mécsessel alágyújtani, így meghatározhatjuk az elforralt víz tömegét. E kísérletben a gyerekek érzékelik, hogy a vízgőznek is van tömege, bár gáz halmazállapotú és – mivel szintelen – nem is látjuk!

adódik. Az alábbi beszélgetés a Szegeden a Szent-Györgyi Albert Agórában megrendezett Magyar Science on Stage (SonS) Fesztiválon készült.

- *Szerinted milyen a jó fizikatanár?*
- Szeresse a gyerekeket és a szakmáját. Sugározzon róla, hogy szereti, amit csinál. Tudjon innovatív témát adni tehetséges tanítványainak, tudja, hogy rajta kívül kihez fordulhatnak.
- *Milyen tantárgy a fizika? Mik a jellegzetességei?*
- Meg kell mutatni a fizika alkalmazásait. Továbbá megismertetni a diákokkal a természet leírásához alapvető definíciókat, törvényeket, és ezeket a fizikában miként lehet kvantitatív módon kezelni – ez utóbbiak a számításhoz feladatokban jelennek meg. Sajnos a fizikaversenyeken szinte csak ez utóbbi számít, diákjaink gondolkodásmódja háttérbe szorul. Fontos, hogy a fizika tapasztalati tantárgy legyen, sok kísérlet jelenjen meg az oktatásában.

- *Mikor döntötted el, hogy fizikatanár szeretnél lenni? Mikor érezted rá e szakma szépségére?*

- Pályaválasztásomban a tanárság volt a döntő. Annak idején Kiskunhalason a szomszéd gyerekeket leültettem a terasz lépcsőjére és tanítottam őket, naplót vezettem róluk, vagyis a „tanárkodás” már gyerekként is érdekes volt számomra. Az általános iskolában nagyon jó tanárim voltak. A legjobban a kémia- és a testnevelő tanárt szerettem. Ezért mentem a Petrik Lajos Vegyipari Technikumba. A kémia és a tanárság megerősödött bennem, és szerettem volna kémia-testnevelés szakra menni. De ilyen szakpár nem volt, így maradt a kémia-fizika szak Szegeden, az akkori József Attila Tudományegyetemen, szakdolgozatomat is kémiaiából írtam. A fizikát az egyetemen szerettem meg, és végül ott is maradtam, mert akkor Szegeden más álláslehetőséget nem találtam. Szerencsém volt, mivel sokféle dologgal foglalkozhattam. Számolási, laboratóriumi gyakorlatot vezettem, előadásokhoz demonstráltam. Szerencsére a Petrikben a kémia tanulása során nagyon jó kísérleti alapot kaptam, amelyet egész életemben hasznosítani tudtam. Évfolyamtársaim még ma is emlegetik, hogy az első évben mindig azt nézték, hogy én mit és hogyan csináltam. Meg kell mondom, a kémia-fizika szak meglehetősen nehéz volt, hiszen nekünk e két nagy tudományterület mellett kemény matematikai alapoásra is szükségünk volt, mintha valójában három

szakunk lett volna. Az elmélet mellett természetesen sok laboratóriumi gyakorlatunk volt mindkét szakon. A kísérletezést mindig szerettem. A Kísérleti Fizika Tan-széken lézer-anyag kölcsönhatással foglalkoztam, amelyhez szükség volt a kísérletek megfelelő összeállítására és a kémiatudásomra is. Majd a szakmódszertan oktatását kaptam feladatként, ekkor találkoztam Marx György professzor úrral, amely teljes mértékben megváltoztatta addigi munkámat és további pályámat, azóta is a fizika szakmódszertana a fő területem. Professzor úr művésze volt az oktatásnak, elképesztően sokat tanultam Tőle. Ő hozta el Szegedre például a PTK 72-es számológépeket, amelyekkel mozgásegyenleteket lehetett numerikusan megoldani, ez akkor abszolút kuriózum volt. Persze az ábrázolást már külön papíron kellett elkészíteni. Ekkor ezzel az eszközzel olimpiai felkészítő szakköri foglalkozásokat tartottam.

- *Van-e kedvenc témaköröd?*

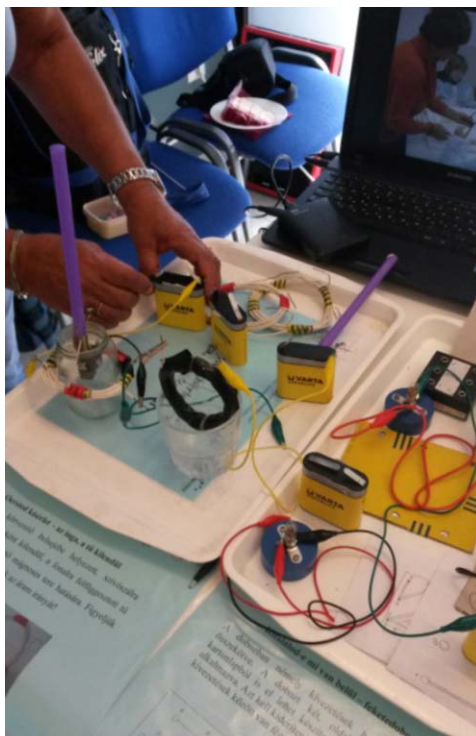
- Az egyetemen, a szakmódszertani kurzusok mellett, két szakmai tantárgyból tartottam előadást, ez a hőtán és a magfizika volt. Ez utóbbit azért vállaltam, mert előtte voltam Marx professzor úr szervezésében a CERN-ben egy tanári tanulmányúton, ahol nagyon sokat tanultam e témakörből. De valójában a komplex jelenségeket szeretem, amelyekben együtt van a kémia, a fizika és a biológia.

- *Tanításod során volt olyan élményed, amit soha nem fogsz elfelejteni?*

- Legszebb élményem, hogy 70. születésnapom alkalmából tanítványaim meglepetésrendezvényt szerveztek. Erre nagyon sok tanítványom jött el az ország

Kati 70. születésnapját megtisztelte a 98 éves Dombi Tanár Úr is (fotó: Moróné Tapody Éva).





Kati és a fesztiválon bemutatott Oersted-kísérlet.

– Előnyöm biztosan nem származott belőle, bár tanárként talán azért is éreztem jól magam, mert a hallgatóknak mintha jó lett volna, hogy a sok férfi kollégám mellett egy női oktatójuk is akadt. A munkatársak esetében női miveltem nem jelentett problémát, viszont a szakmódszertanos szakmát kevésbé ismerik el a tudományos pályán, ezzel napjainkban is sokat küzdünk. A címzetes egyetemi tanári címet a Neveléstudományi Intézet kezdeményezésére kaptam meg.

– *Mi foglalkoztat napjainkban?*

– Mindig a tanárszak segítségén munkálkodtam, bármilyen funkcióban, tanszéken, illetve dékánhelyettesként. Majd 2010-ben nyugdíjba mentem. Ekkor bejelentkeztem, szinte az utcáról, az akkori Százszorszép Gyermekházba – az Agóra elődjébe –

– hogy természettudományos kísérletezős szakkört szerveznék kisiskolások számára. Pont adódott egy pályázat, amelynek egyik „rubrikája” éppen erről szólt. Szerencsénkre az egyetem több laboratóriumában éppen selejteztek, onnan tudtunk eszközöket kapni, illetve sokszor hétköznapi tárgyakkal – amelyekből kísérleti eszközöket építünk – dolgozunk a gyerekekkel. Sajnálom viszont, hogy a hallgatókkal korábbi évek során kifejlesztett eszközöket nem tudtam áthozni. Az elmúlt évtizedekben ezek közül nagyon sokat mutattunk be a Fizikatanári Ankétokon is.



Az utóbbi években Kati érdeklődése középpontjába a – természettudományok megszerettetésében oly fontos – kisgyerekekkel való foglalkozás került. Tanítványával, *Flach Fannival* a SonS 2018. évi válogató versenyére *Első csók a tudománnyal* című, a természettudományos gyermekkísérletek iskolán kívüli környezetben témával neveztek. E versenyen dőlt el, hogy kik, mely kiállítások mehetnek a 2019-ben Portugáliában megrendezésre kerülő nemzetközi fesztiválra. A válogatót 2018. október 5. és 7. között a szegedi Agórában tartották.

Katiék bekerültek a *Portugáliába utazók közé*. Szívvel gratulálok. Köszönöm a beszélgetést.

Irodalom

<http://titan.physx.u-szeged.hu/modszertan/munkatarsak/DrPappKatalin.html>
<https://www.youtube.com/watch?v=4SDbcNhEd1s>
<http://titan.physx.u-szeged.hu/modszertan/index.htm>
<http://www.agoraszeged.hu/kozossegek/jatsszunk-tudomanyt-szakkor>
http://www.delmagyar.hu/szeged_hirek/papp_katalin_tuzzel-vassal_tanitja_a_fizikat/2272934/

minden tájáról, és legalább 40 kísérletet mutattak be, hiszen tudták, mennyire szeretem azokat. A közös emlékeinkről készített album is nagy örömet jelent.

Egész életemben a hallgatókkal való foglalkozást élveztem a legjobban, ezt tartom tanári pályám csúcának. Nem csupán a tanórák megtartását szerettem, hanem az egyéni foglalkozásokat, mint diákkori munkák, szakdolgozatok. Közös munkáink során sokat tanultam hallgatóimtól. Ez pályám legszebb része.

– *Sikerült elérned a pályád elején kitűzött célokat? Mit igen? Mit nem?*

– Sokkal többet értem el, mint amire valaha is számítottam. Nem gondoltam, hogy pályám ennyi örömet és sikert hoz számomra. Boldog vagyok, mert több tanítványt tudtam eljuttatni a doktori fokozatig. Tőlük is sokat tanultam, és továbbra is kapcsolatban vagyok velük.

– *Nőként hogyan érezted magad a pályán?*

Kati és Fanni a leghétköznapiabb eszközökkel varázsolják el, teszik a fizika barátjává a kisiskolásokat.



GIREP–ICPE–EPEC–MPTL CONFERENCE 2019

Celebration of Eötvös Year 2019

Budapest, 1–5 July, 2019



You are invited to join **GIREP–ICPE–EPEC–MPTL CONFERENCE 2019** in Budapest (Hungary) and contribute with physics education experiences

FONTOS HÍREK

Az „early bird” regisztráció határideje 2019. április 15., addig még csökkentett részvételi díjjal lehet jelentkezni.

Az absztraktok beadási határideje 2019. február 15. volt, összesen 336-ot nyújtottak be a világ minden tájáról Japántól Brazíliáig és Norvégiától Malajziáig; ezek bírálata 2019. március 31-vel zárul.

Azon magyar fizikatanárok, akiknek van/lesz elfogadott posztere és/vagy szóbeli előadása, az ELFT 30 euró + ÁFA kedvezményes részvételi díját fizetve vehetnek részt a konferencián, mert az Eötvös-évre tekintettel az EMMI jelentősen támogatja a rendezvényt.

Kísérjék figyelemmel a konferencia weblapját, ahol az információk folyamatosan frissülnek!

