fizikai szemle

2021/4

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Mathematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Mathematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

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

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:
Már minimális mechanikai védelem is jelentősen csökkenti a fertőzés veszélyét, Füri Péter írásához (forrás: https://www.youtube.com/watch?v=UEM5gE-AcXM&t=3s).

TARTALOM

KVANTUMMECHANIKA: A LÁTHATATLAN FORRADALOM – 1. RÉSZ

Polónyi János
Strasbourg Egyetem, Strasbourg Franciaország

Jelenlegi ismereteink alapján – a kvantummechanikát, pontosabban az annak természetes általánosítását, a relativisztikus kvantumtérelméletet leszámítva – minden fizikai elmélet alkalmazhatósági tartománya behatárolt. Ugyanakkor a kvantummechanika megalkotásával a fizika elvesztette legfontosabb alapelvét, amelyet a newtoni mechanikából örökölt: a determinizmust. Ezzel az objektív realitás és az alkalmazott matematikai fogalmak közti kapcsolat is odaveszett, bizonytalanná vált az egyenletekben előforduló mennyiségek és a megfigyelt jelenségek közti összefüggés. Eközben a mindennapi életünk alapját jelentő világkép semmit sem változott, sőt, az anyagtudományok soha nem látott biztonsággal és pontossággal haladnak előre a maguk útján. Minderről pedig csak keveset hallhatunk a szakemberek szűk körén kívül. E helyzet kialakulásáról és tanulságairól lesz szó a következőkben.

Egyetemista koromban sok időt töltöttem a fizikatanszékek könyvtárában. Már a második évben kialakult a kép, hogy a számomra izgalmas, provokatív kérdéseket leginkább a kvantummechanikában találom meg. Viszont túl azon, hogy érdekesek voltak, egy mondatot sem értettem a lényegből. Türelmetlenül vártam a harmadik évet az akkor esedékes kvantummechanika-előadásokkal. Elérkezett, és kiábrándító volt. Felismertem, hogy ami engem érdekelt, arról szó sincs benne, és amiről szó volt, azzal nem tudtam mit kezdeni. Ezután ugyan rátaláltam a részecskefizika egy kérdésére, amelyben valamennyire elmélyültem, azonban a kvantummechanikához fűződő viszonyom hűvös maradt.

Ez egészen addig volt így, amíg egy jó évtized múlva el nem kezdtem tanítani a kvantummechanikát. Egy előadásra készülve hasított belém a felismerés, hogy ez a furcsa, ködös formalizmus a gondolataimról is szól, azok kialakulásáról az agyamban. Emellett rájöttem, hogy nincsen még egy olyan téma az egyetemi oktatásban, ahol a tanulmányok felénél arra kell kérni a hallgatókat, hogy építsék fel újra a világképüket, mert amit eddig tanultak, az a továbbiakban félrevezető. Akkor elkezdtem lassan, tapogatódzva felderíteni, hogy tulajdonképpen miről is szól a kvantummechanika. Örömmel vettem észre, hogy a múlt század elején egy igazi, mély forradalom indult el a tudományos gondolkodásban a kvantumjelenségek körül, amelyet sajnos a későbbi generációk anélkül próbáltak kanonizálni, hogy azok jelentőségét kellő mértékben felismerték volna. Az anyag egyik formájából a másikba való átalakításának gyakorlati haszna elfedte, hogy az előrehaladás itt nem segít az alapkérdések megértésében. Némi szomorúsággal kell bevallanom, hogy nekem sem sikerült megértenem a kvantummechanikát, és ebben csupán mérsékelt elégtételt ad, hogy kollégáimnak sem. Azonban kezdem érteni, hogy miért nem értem, és hogy miért olyan fontos ez a kérdéskör.

Szintek

Kezdjük azzal a kérdéssel, hogy világunkat milyen stratégiával próbáljuk megérteni? A mindennapokban – mondhatni – ebben elég sikeresek vagyunk, hiszen a világ zavarba ejtő gazdagsága ellenére meglehetős biztonsággal éljük életünket. Hogy ezt a sikert megértsük, ugorjunk vissza körülbelül 1,8 millió évvel az időben, és kísérjünk útján egy Homo habilist, amikor megpillant egy különleges alakú kavicsot. Egy pillanatra megáll, megjelenik képzeletében előző napi próbálkozása az alig sült hús felvágására és észreveszi, hogy az előtte fekvő kővel ez könnyebb lehet. Ekkor életének két szintjét kötötte össze, a főzést és a természetben való keresgélést. Felismert egy közös elemet, a kő alakját. Az antropológusok szerint ez a képessége emelte ki környezetéből, majd indította kalandos útjára, amelyen azóta mi is haladunk. Megjelent a reprezentáció képessége, amellyel egy fogalmat, személyt vagy tárgyat más környezetben is el tudunk képzelni. Idővel ezt az emberi kreativitásunkba beépítve megtanultuk a saját hasznunkra fordítani.

A világunk egy hagymához hasonló: rétegekből áll, amelyek segítenek benne eligazodni. Vegyük például az élő szervezetet, amelynek elképesztően összetett, gazdag felépítését fehérjék, sejtek, szövetek, szervek, az idegrendszer adják, és ezen szinteket követve próbáljuk megérteni. Belső világunk is szintekre oszlik, gondoljunk például érzéseinkre, amelyek egyedüllétünkben, családtagjaink, barátaink körében, a munkahelyen, vagy éppen a világot járva merülnek fel. Méreteket tekintve is találunk szinteket, például

Készült a Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Gimnáziumban 2020. március 2-án tartott előadás alapján.

A szerző köszönettel tartozik *Kondákor Márknak* és *Simonovits Andrásnak* a kézirat elolvasásáért és gördülékenyebbé tételéért. Külön hála illeti a *Fizikai Szemle* bírálóit, *Csanád Mátét* és *Takács Gábort* rendkívül hasznos és elgondolkodtató megjegyzéseikért.

Polónyi János 1978-ban fizikus diplomát, majd 1979-ben PhD fokozatot kapott az ELTE-n. Ezután a KFKI-ban kezdett dolgozni, majd a darmstadti GSI-ben és a University of Illinois-n volt post. doc. Ezt követően az MIT-n, később az ELTE-n és végül Strasbourgban egyetemi tanár. Érdeklődési területe a kvantummechanika, a kvantumtérelmélet és a renormalizációs csoport.

az emberi kapcsolatok típusai erősen függnek a résztvevők számától. Más kapcsolatok alakulnak ki a partnerek között, a családban, a barátok között, a faluban, a városban, az országban vagy a kontinensen.

Időbeli szintekre jó példa a történelem korszakokra bontása, hiszen az emberek élete jelentősen eltért az ókorban, a középkorban vagy pedig az újkorban. A fizikához közelebb lépve a Föld felszíni hőmérsékletének változásában szintén egy időbeli szintstruktúra jelenik meg. Az utóbbi fél évszázad alatt az átlaghőmérséklet megközelítően lineárisan emelkedik. Azonban ez már drámaibb módon jelenik meg történelmi léptékekben, ha észrevesszük, hogy az utolsó kétezer év hőmérsékletét tekintve rendszertelen fluktuációk után az utolsó ötven év egy riasztóan meredek felmelegedést mutat. Nehéz másra gyanakodni, mint az általunk okozott üvegházhatás következményére. A paleoklimatikus viszonyok újabban megint másról szólnak, 50-70 ezer évente megjelenő hőmérsékletcsúcsokról, amelyek jégkorszakokat választanak el egymástól, az utóbbi pár ezer év alatt pedig épp egy ilyen csúcshoz érkeztünk. Ez a struktúra a Föld belsejében vagy a Naprendszerben zajló folyamatokról ad hírt.

Az, hogy az itt bemutatott példák között milyen párhuzam húzható, amelyeket ez a különleges szerkezet sugall, óvatosan kell bánnunk, hiszen különböző tudományterületekről beszélünk – azonban a felismerés zavarba ejtő. A fizikán belül a természet különböző szintjeit módszeresen lehet tanulmányozni, a következőkben ez lesz a központi témánk. Azt a kérdést pedig, hogy ez a réteges szerkezet valóban a világunké, vagy csak a mi mentális képességeinkből fakad, sajnos nyitva kell hagynunk, és ehhez csupán egy rövid megjegyzés erejéig térünk vissza az írás legvégén.

A valóság egy szintjét úgy lehetne definiálni, mint adott alkotóelemek halmazát, amelyeknek adott viszonyuk van egymáshoz. Ez a viszony kifejezhet jelentést, szerepet vagy kölcsönhatást. A méretekben megnyilvánuló szintek lesznek kísérőink a fizika világában. Ezelőtt azonban még egy tanács: ha valami kicsi, attól még nem elhanyagolható! Vegyünk példának egy kíváncsi marslakót, aki távcsövét Földünkre irányítja. Először felhőket, tengereket lát, amelyek a légkör fizikáját tükrözik. Jobb felbontással meglepve vesz tudomást a sok apró mozgó pontról, sürgő-forgó emberekről. Így már a humán szférát is látja, teljes aktivitásában. De képzeljük el, hogy olyan távcsöve van, amellyel még a gondolatainkat is olvashatja. Ekkor egy további világ nyílik meg számára, amely még meg sem valósult az eddigi felbontás alapján. Az apróbb jelenségek együtt fontosabbá válhatnak, mint nagyobb társaik.

Csak az utolsó évtizedekben tudatosult a fizikai törvényszerűségek egy érdekes vonása: a skálától, a skálaparaméterektől való függés. A dimenziós mennyiségeket hívjuk skálaparamétereknek. Ezek dimenziója hívja fel arra a figyelmet, hogy a kérdéses mennyiség csupán egy másik fizikai mennyiséggel összehasonlítva értelmezhető. A megfigyelt mennyiségek skálafüggése alapjaiban felforgatja, ugyanakkor – véleményem szerint – egyben érthetőbbé is teszi a fizikát. Ezen a ponton kezdjük a kvantummechanika felfoghatatlanságának megértését.

Fizikai állandók és törvények

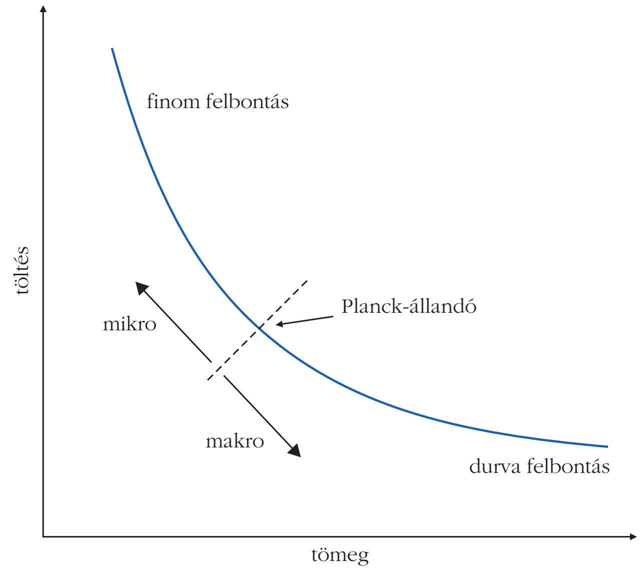
Megfigyeléseinket az ehhez használt berendezés skálaparaméterei, például méret, tömeg, megfigyelési idő jellemzi és amennyiben ezeket megváltoztatjuk, akkor a tapasztalt jelenség is megváltozik. Megváltozik a mért mennyiség numerikus értéke, illetve az általa kielégített törvényszerűségek is mások lesznek. Más szóval nincsenek sem univerzális, minden skálán érvényesülő fizikai törvények, sem pedig fizikai állandók. Itt persze a mérésekkel meghatározott „állandókról” van szó, nem pedig a különböző mértékegységek közti, általunk definiált, szorzófaktorokról.

Amiket állandóknak hittünk, azok valójában a megfigyelési skálán lassan változó mennyiségek. A Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal (BIPM) feladata abban áll, hogy gondosan rögzítse azokat a körülményeket és skálaparamétereket, amelyek között egy adott fizikai mennyiség a hagyományosan elfogadott értékét veszi fel. Tekintsünk példaként egy labdát, amelyet súrlódó folyadékban v sebességgel mozgatunk. Mekkora a labda tömege? Nincs egyértelmű válasz! Egy lehetséges definíció a teljes rendszer

$$E(v) = \frac{M(v)}{2} v^2 + E_0$$

energiájának méréséből olvasható ki, mint az $M(v)$ paraméter. Mivel a súrlódó folyadék egy része a mozgó labdához tapad, nem világos, hogy hol végződik a labda, illetve hol kezdődik a folyadék. Az energia nem egyszerűen négyzetesen függ a sebességtől, így az értelmezett tömeg bonyolultabban függ a mozgás sebességétől. A labda tömege azért skálafüggő, mert a labda nincs egyedül az Univerzumban, kölcsönhat környezetével. A környezet lehet akár levegő is, hiszen ekkor csupán a skálafüggés mondható gyengébbnek. Egy másik példa a fénysebesség, amely köztudottan eltér a vákuumban mért értéktől, ha a fény anyagon halad át. Bármely más fizikai vagy mérnöki „állandó” esetére is található hasonló érvelés. Az „állandók” skálafüggését a renormalizációs csoportok módszerével lehet módszeresen feltérképezni.

Ha a mért mennyiség értéke függ a megfigyelés skálájától, akkor az általa kielégített törvények is skálafüggővé válnak. Az általános fizikai törvények hiányát az kvantum-elektrodinamika esetével lehet egyszerűen megvilágítani egy olyan képzeletbeli világban, ahol csak elektronok léteznek, amelyek elektromágneses kölcsönhatásban állnak egymással. A térelméletek dinamikáját a mechanikai rendszerekhez hasonlóan a Lagrange-függvénnyel definiáljuk. E világ elektrodinamikájának Lagrange-függvénye két szabad paramétert tartalmaz, az elektron m tömegét és e töl-



1. ábra. A kvantum-elektrodinamika renormalizált trajektóriája.

tését, tehát két mérés eredményét kell felhasználnunk, hogy az elméletet rögzítsük. Egy váratlan problémával kerülünk szembe ezen a ponton, amely nevezetesen az, hogy eddig nem sikerült a kvantummechanika sokrészecskerendszerre való általánosítását, a kvantumtérelméletet, tetszőleges pontossággal lokalizálható, azaz folytonos négydimenziós téridőben megvalósítani. Mivel az ilyen korlátozással megalkotott kvantumtérelmélet állításait minden eddigi mikroszkopikus megfigyelés alátámasztja, kénytelenek vagyunk a téridőnk klasszikus fizikából ismert szokásos folytonosságát feladni. Ugyanakkor a téridő kis távolságon megfigyelhető deformációjának vagy diszkrét mivoltának eddig semmi jelét nem találjuk a legjobb felbontású kísérletekben sem, azaz feltételeznünk kell, hogy csak egy bizonyos felbontásig alkalmazhatók a hiányos ismereteinken alapuló téridőkontinuumra épülő elméletek. Azt a minimális ℓ távolságot, ameddig elméleteink érvényesek, levágásnak nevezik, mert attól a távolságtól már nem alkalmazzuk a szokványos, folytonosságon alapuló leírási módot. Ugyan eddig semmilyen felső határt nem találtunk ℓ értékére a megfigyelések során, de a létezését még a $\ell \to 0$ határeset elvégése után is látjuk az úgynevezett anomáliajelenségekben, mint például egy semleges pion két fotonra bomlása esetén.

Tehát ott tartunk, hogy a két kiválasztott mérés eredményére vonatkozó egyenleteink ℓ-től is függenek. Az elméletet rögzítő úgynevezett renormalizációs feltételek a

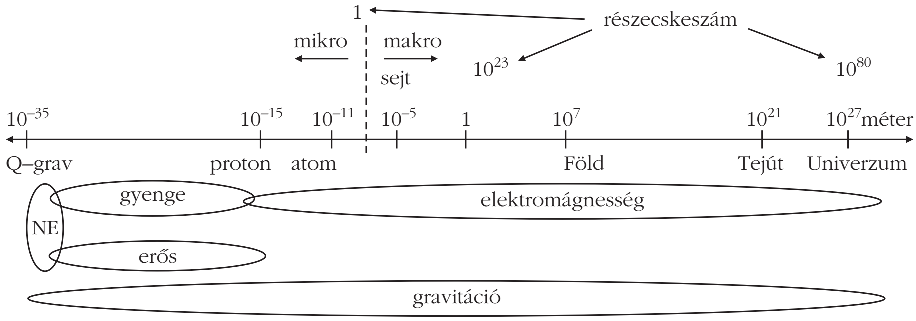
$$P_1 = F_1(e, m, \ell),$$

$$P_2 = F_2(e, m, \ell)$$

alakban írhatók fel, amely egyenletek bal oldalán a mért fizikai mennyiség áll, jobb oldalán pedig az annak megfelelő kvantum-elektrodinamikai képlet. Az egyenleteknek az adott fizikai eredmények, P_1 és P_2, alapján talált megoldása a szabad paraméterekre, m-re és e-re, ℓ-függő eredményre vezet. Ilyen módon a kvantumelektrodinamikát az *1. ábrán* felvázolt $(m(\ell), e(\ell))$ görbe, a renormalizált trajektória jellemzi a tömeg–töltés síkban. Ez a görbe olyan elméletekhez tartozik, amelyek ugyan más minimális távolsággal definiálódnak, ennek ellenére a Lagrange-függvény paramétereinek alkalmas megválasztásával a renormalizált trajektórián lévő elméletek ugyanazt a fizikát írják le különböző felbontással. Az $m(\ell)$ és $e(\ell)$ függvények az ℓ felbontású megfigyelésekben megjelenő elektrontömeget és elektrontöltést jelentik.

Ha egy elmélet működik egy felbontásnál, akkor annál durvább hosszúságskálán is alkalmazható, tehát a renormalizált trajektória folytatódik a hosszú távolságú határesetben. Persze előfordulnak komplikációk, hiszen például az erős kölcsönhatás esetében más szabadságfokokat találunk a protonon belül és kívül, de ez „csak” technikai bonyodalmakhoz vezet. Azonban nincsen garancia arra, hogy renormalizációs feltételek a Lagrange-függvény paramétereire tetszőlegesen kicsiny minimális hosszra is megoldhatók. Azokat az elméleteket, amelyekre létezik megoldás tetszőlegesen kicsiny ℓ-re, renormalizálható elméleteknek hívjuk. Ezen négydimenziós téridőben értelmezett elméletek struktúrája akármilyen rövid távolságokon is alkalmazható, a hiányos ismereteinkből fakadó komplikációkat a szőnyeg alá söpörhetjük a $\ell \to 0$ szokásos határámenet alkalmazásával. Ezért a részecskefizika történetének nagy részében ilyen elméletek megalkotása volt a fő cél. Azonban a gyenge és az elektromágneses kölcsönhatás tartalmaz zérus spinű Higgs-bozont és ábeli mértékbozont, ezért nem renormalizálhatók. Ez valójában jó hír, ugyanis ez a biztosíték arra, hogy előbb-utóbb új fizikát találunk, amikor sikerül jobb felbontással követni a részecskefizikai folyamatokat. Egy paradigmaváltozásnak vagyunk tanúi, amennyiben a renormalizálható elméletek helyett, amelyek tetszőlegesen kis távolságokon is matematikailag jól definiáltak maradnak, olyan nyitott elméletek felé fordul az érdeklődés, amelyek csak a már mérésekkel alátámasztott skálatartományban alkalmazandók. Ugyan a renormalizálható elméletek bármilyen távolságon matematikailag jól definiált mennyiségeket adnak, a megfigyelések számára még elérhetetlen skálájú eredmények félrevezetők lehetnek. A renormalizálhatóság csupán egy matematikai egyszerűség, az elmélet törvényszerűségeiben nem jelenik meg a fizikai jelenségek jellemző skálájától teljesen idegen levágási skála és ezáltal az elmélet esetleg teljesen félrevezető módon, ami a fizikai jelenségek teljességét illeti, tetszőlegesen rövid távolságokra kiterjeszthető.

Visszatérve a kvantum-elektrodinamikára, a fizikai jelenségeket a felbontás függvényében végigpásztázva még egy meglepő jelenséggel találkozunk. Ugyan elég durva felbontásnál megtaláljuk a jól ismert makroszkopikus elektromágnesesség törvényszerűségeit, azonban jobb felbontásnál egy furcsa korrekciót találunk, amelyet egy, az elektromágnesességtől idegen, dimenzióval rendelkező paraméter jellemez, a Planck-állandó. Ráadásul, amikor a makroszkopikus hosszúságskálánál egyre rövidebb távolságokban uralkodó törvényeket térképezzük fel, akkor ez az állandó egyre fontosabbá válik. Miközben kisebb távolságokra fókuszálunk, a Planck-állandó egyre jobban felülírja a klasszikus fizikát, egy új világot nyitva a mikroszkopikus skálán. Ez a kvantummechanika világa. Úgy is fogalmazhatunk, hogy a Planck-állandó egy transzcendencia-paraméter, amely a mikro- és a makrovilágot köti össze. (Transzcendencia az egyik szintről a másikra való pillantást jelent, a Homo habilist ennek felismerése különböztette meg a környezetétől.)



2. ábra. A fizika világa a felbontás függvényében.

A mi Univerzumunk nem csak az elektromágneses kölcsönhatásból áll. A fizikai jelenségek rendkívüli összetettséget mutatnak a felbontás függvényében, ahogy azt a *2. ábrán* jelezzük. A legnagyobb távolság, amely számunkra elérhető, az Univerzum általunk belátható része. Ez egy körülbelül 10^{27} m sugarú gömb, amelynek felülete fénysebességgel távolodik tőlünk az Univerzum tágulása következtében. A legkisebb távolság, amelyen optimista becslések alapján még esetleg az általunk ismert fizikai törvények alkalmazhatók lehetnek, a Planck-sugár, 10^{-35} m. Az elemi részecskék ennél jobb felbontású megfigyelésekor fekete lyukaknak tűnnek, romba döntve fizikai elképzeléseinket. A kvantumelmélet és az általános relativitáselmélet ennyire éles ellentmondása alapján gondoljuk úgy, hogy a kvantumtérelméletben bevezetett minimális hossz nem lehet a Planck-sugárnál kisebb. A két skála között meghúzódó mintegy 62 nagyságrend tartalmazza az általunk megismerhető fizikát. Jelenleg csak a 10^{-17} m-nél nagyobb jelenségeket tudjuk megfigyelni és a 10^{-30}–10^{-17} m tartományban csupán az eddig megismert törvények extrapolációját használhatjuk. Véges idő alatt végrehajtott megfigyelésekkel nyilvánvalóan egyetlen elméletről sem tudjuk eldönteni, hogy igaz-e és ebben a kérdésben csupán a józan ész számára kellően meggyőző érveket hozhatunk fel. A kérdés azonban élesebben vetődik fel a mindenség elméletével kapcsolatban: reménykedhetünk egyáltalán egy mindent magába foglaló, végső mikroszkopikus elmélet létezésében, amelyből az összes kölcsönhatás levezethető?

A fizika négy alapvető kölcsönhatásának erőssége távolságfüggő. Az elemi részecskék világából ismert gyenge kölcsönhatás 10^{-17} m-nél, az erős kölcsönhatás, amely a magfizikát is felöleli 10^{-15} m-nél rövidebb távolságokra fejti ki hatását. Az elektromágneses kölcsönhatás 10^{-17} m-nél hosszabb távolságokon jelenik meg, és teleszkópjaink szerint az általunk elérhető Univerzumot teljesen átfogja. A gravitációs kölcsönhatás jelen van minden távolságon, azonban csak a fizikai skálatartomány két végében jelenik meg domináns erőként. A három nem gravitációs kölcsönhatás átalakulása azért esik a 10^{-15}–10^{-17} m intervallumba, mert az erős kölcsönhatás gyorsan tűnik el a proton átmérőjénél, 10^{-15} m-nél nagyobb távolságokon. Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás egyesítése a Higgs-bozon tömege alapján pedig 10^{-17} m körül történik.

A határvonal, amely a fizikát két teljesen különböző részre osztja fel, megközelítőleg 10^{-10} m-nél húzódik meg, annál hosszabb, illetve rövidebb távolságokon a klasszikus (makro), illetve a kvantum (mikro) fizika törvényei uralkodnak. Hogy mi történik ezen a mikro-makro átmeneten, az számomra a fizika legizgalmasabb, legprovokatívabb fejezete. Kezdjük például azzal a kérdéssel, hogy miért éppen annál a távolságnál történik meg az átmenet? Kiderül, hogy nincsen általános szabály, az adott körülményektől függően ez más és más távolságskálán történik. Anynyit azért már tudunk, hogy ez az átmenet általában ott található, ahol felbonthatóvá válik az elemi részecskék világa.

Az elemi részecskék megjelenése a kvantumfizika egyik legmeglepőbb jelensége. Miért válnak a klasszikus fizika folytonosan változó mennyiségei diszkrétté, amikor nagy felbontással mérjük őket? A kvantummechanika matematikai struktúrájából, nevezetesen a téridő-szimmetriák irreducibilis reprezentációiból fakad az, hogy a mikroszkopikus világban minden folyamat, gerjesztés elemi csomagokban, kvantumokban történik. A megfigyelések felbontásának növelésével akkor jelennek meg a kvantumjelenségek a maguk teljességében, amikor az elemi gerjesztéseket egyenként sikerül észlelni. Ugyan van egy pár, ennek a szabálynak ellentmondó, látványos makroszkopikus kvantumjelenség, mint például a Gibbs-entrópia paradoxon megoldása, a Bose–Einstein-kondenzáció, a szupravezetés, a szuperfolyékonyság és a kvantumos Hall-effektus, azonban ezek rendkívül ritkák és megérthető, hogy megjelenési formájuk makroszkopikus.

Tehát a követett elemi gerjesztések száma egy körül van a klasszikus-kvantum átmenet skálájánál. Bennünk, mondjuk 60 kg vízben hozzávetőlegesen 10^{27} darab vízmolekula található. A belátható Univerzum óvatos becslések szerint 10^{80} elemi részecskéből áll. Ez utóbbi szám nagy, de végessége elgondolkodtató: a téridő diszkrétsége miatt nincs szükségünk ennél nagyobb számra a matematikában, amennyiben azt csak a fizikai világunk leírására használjuk. A határátmenet fogalma, a matematika egyik gyöngyszeme, hasznos egyszerűsítés annak érdekében, hogy a megfigyelési skálától távol eső minimális hosszt kiküszöböljük elméleteinkből, amelyek valójában diszkrét matematikára alapulnak. Azonban megfigyeléseink – amelyeket véges pontossággal, véges idő alatt hajtunk végre – nem igénylik feltétlenül a határátmenet vagy a folytonosság fogalmát.

A mi otthonunk, a bennünket alkotó molekulák és egy ember mérete között meghúzódó 10^{-10}–10^{0} m skálaintervallum. Mondandónk szempontjából ennek kulcsfontossága van. Ugyanis azok a fogalmak, amelyekkel a fizikai valóságot próbáljuk megérteni, kisgyerekkorunkban alakulnak ki [1]. Agyunk egy rendkívül hatékony problémamegoldó szerv, amely az érzékeink által közvetített jelenségeket próbálja érthető rendszerbe szervezni. Gyerekként makroszkopikus játékokkal játszva kialakuló fogalmaink a makroszkopikus világ 10^{-3}–10^{3} m tartományában fellelhető jelenségeinek felelnek meg.

Miután felnőttünk, agyunk elveszti kezdeti plaszticitását és már nem vagyunk képesek radikálisan új fogalmakat alkotni. Így „hideg zuhanyként" éri a fizikushallgatókat a kvantummechanika-előadás, amelyben egy számukra váratlan, felfoghatatlan világ nyílik meg. Ez a világ érthetetlen marad, később is csupán elfogadhatóbbá válik, amikor már ők maguk tartják a következő generáció kvantummechanika-előadásait. Ebben a világban csupán a matematika formális és univerzális módszereivel tájékozódhatunk úgy-ahogy, intuitív segítség nélkül.

A mikro-makro konfliktus még ennél is élesebben jelenik meg gondolatainkban. Utóbbiakat ugyanis az arisztotelészi logika jellemzi, amelyet a Boole-algebra és a megszokott halmazelmélet matematikai logikájára alapozva formalizálhatunk. A halmazelmélet pedig az a matematikai rendszer, amely tulajdonságokkal felruházott objektumokról szól. Ilyen objektumok a makroszkopikus fizikában jelennek csak meg, ahol a tulajdonságok objektívek és a megfigyelőtől függetlenül léteznek. Gondolataink, tudatállapotunk saját neuronjaink tüzelésének időben kódolt eredménye. Egy neuron tüzelésének időpontja kémiai folyamatok eredményeképpen alakul ki. A kémia pedig már a kvantummechanika világához tartozik. Tehát agyunk elemi eseményei mikroszkopikus szintről fakadnak, és a központi idegrendszer, mint „detektor" által lesznek makroszkopikus szintre felnagyítva. A kvantummechanika logikája viszont egy lineáris tér altereire alapul, adott tulajdonságú objektumok helyett. Ezen alterek tulajdonságai egy fontos ponton különböznek a Boole-algebrától, a logikai disztributivitás sérül, amelynek következtében a kvantum- és a klasszikus matematikai logika különbözik.

Egy kisgyerek agya tulajdonképpen ezt a folyamatot sajátítja el, és teszi magáévá a klasszikus logikát. Így mire a gyerek felnő és találkozik a kvantummechanika sajátos logikai rendszerével, nehezére esik azt elsajátítania, miközben a fejében továbbra is eme természetes logika alapján történnek meg azon folyamatok, amelyek következményeképpen megszületik az emberi gondolat. Így egy erről mit sem tudó gyereknek azt mondhatnánk: „a világod valóban a Te világod, a távolság e legkapzsibb és legmegtévesztőbb besurranó tolvaj még nem csente el tőled" [2]. A kvantummechanika forradalma láthatatlan, érzékeinken túl történik és csak a távoli csatazaj hangjaira figyelünk fel.

Hozzá kell tennem, hogy a kvantumlogika használata és a klasszikus logikához való viszonya még nyitott és ellentmondásos kérdéskör. Nem arról van szó, hogy az egyik „igaz" a másik pedig „hamis". Nehéz, talán nem is ajánlatos kisgyerekkorunk óta sikeresen használt gondolatmeneteinket teljesen feladni csak azért, hogy más összefüggésben másként próbáljunk meg gondolkodni, hiszen azok fizikai és mentális integritásunkat őrzik. Azonban a két logikai struktúra különbsége nagy kihívás marad számunkra, különös tekintettel a később említendő kontextualitással kapcsolatban.

Zárt és nyitott elméletek

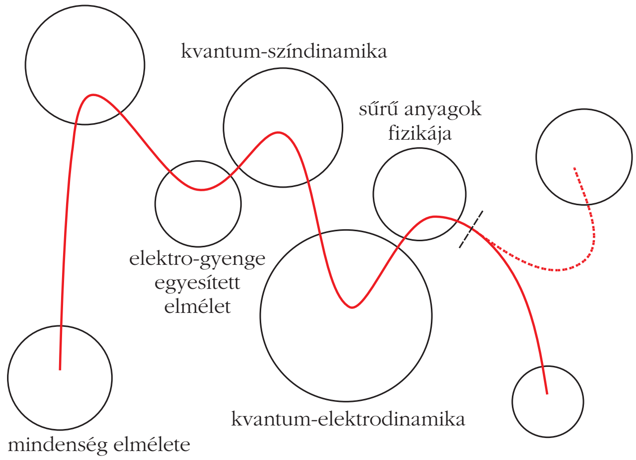
Zárt elméletekben gondolkodunk, amikor az egyetemi tanulmányok elején próbáljuk elképzelni a fizika alaptörvényeit. Ezek az elméletek az elemi kölcsönhatások szintjén kezelik az összes általuk leírt elemi részecskét, röviden szabadságfokot. Fontos tulajdonságuk, hogy lokálisak, vagyis egyenleteik ugyanabban a téridőpontban vett mennyiségeket kötnek össze, a téridő diszkrétségéből adódó különbségeket elhanyagolva. A lokalitás azért döntő fontosságú, mert a nemlokális elméletek megoldása általában messze túl van analitikai és numerikus lehetőségeinken.

Mivel mindig csak a Világmindenség egy részét tudjuk megfigyelni, ezek a zárt elméletek nem nagyon hasznosak. Amire szükségünk van, az egy nyitott elmélet, amit úgy kaphatunk meg, hogy a nem megfigyelt szabadságfokokat – a mozgásegyenletük felhasználásával – kiküszöböljük egy teljesebb zárt elméletből. Így a megfigyelt rendszerre kapunk egy elméletet a környezet figyelembe vételével. Az ilyen elméletek nagy hátránya, hogy nem lokálisak. Ez annak következménye, hogy egy dinamikai szabadságfok kiküszöbölése elkerülhetetlenül nemlokális jelenségeket vezet be. Gondoljunk például két kölcsönható részecskére: az egyiket kiküszöbölve a másikra kapott nyitott elmélet azért nemlokális, mert a megfigyelt részecske mozgásállapotának, azaz koordinátájának és impulzusának megváltoztatása minden későbbi időpontban módosítja a másik részecske mozgásállapotát, ami pedig még további, még későbbi időpontokban visszahat a megfigyelt részecskére. Ennek ellenére ilyen nyílt elméletek közelítő megoldásaival próbálkozunk a megfigyelt jelenségek leírásában.

Képzeljünk el egy olyan paraméterteret, amelynek tengelyeit a fizikusok és a mérnökök által használt mennyiségek és állandók alkotják. Ez egy meglehetősen magas dimenziójú tér. Tekintsük ebben a Világmindenség renormalizált trajektóriáját. Ez egy olyan görbe, amely pontjainak vetülete a koordinátatengelyekre a fizikai és mérnöki állandók értékét szolgáltatja a megfigyelés felbontása függvényében. E trajektória egy síkvetületét mutatja a *3. ábra,* ahol az egyszerűség kedvéért feltételeztük, hogy van egy mindenség elmélete [3]. Ne felejtsük azonban el, hogy ezen elmélet létezését nyilvánvalóan lehetetlen kísérletileg alátámasztani.

Nagyon jó felbontással a feltételezett mindenség elmélete körén belül vagyunk, itt figyelhetők meg a Világmindenség elemi alkotórészei, amennyiben léteznek, és mind a négy elemi kölcsönhatás egyesített formában jelentkezik. A felbontás durvításával egy sor nyílt elmélet közelébe érünk, azonban ezek eltaszítják a trajektóriát a felbontás további durvítása során. Az eddig megfigyelt jelenségek extrapolációja alapján, amikor a mindenség elméletének közeléből egyre jobban távolodunk, először a gravitáció válik le a három másik kölcsönhatásról. Ez azt jelenti, hogy a gravitációs kölcsönhatás erőssége és formája különbözik a többitől. Egy-két nagyságrenddel rosszabb felbontásnál az erős kölcsönhatás válik le a nagy egyesítés elmélete alapján. Ezután az extrapoláció által megjelentetett nagyenergiás sivatagon átkelve, amely az extrapoláció következtében semmi új, eddig nem ismert jelenséget nem tartalmaz, elérünk a jelenlegi legjobb felbontású kísérleti eredmények alapján megismert elektrogyenge egyesített elméletig, ahol 10^{-17} m körül szétválik a gyenge, valamint az elektromágneses kölcsönhatás is. Megközelítően ennél a felbontásnál érünk be a kvantum-színdinamika elméletébe is, amely az erős kölcsönhatást írja le. Az elektrogyenge egyesített elmélet felbontása alatt egy másik elmélet is megnyílik, a kvantum-elektrodinamika. A felbontás további durvításával jutunk el 10^{-11} m környékén az atom és a sűrű anyagok fizikájához. E tartományban több tucat nyitott elmélet ismeretes kvantumkémiából és szilárdtest-fizikából. Ezután kelünk át a mikro-makro átmeneten, elérve a makroszkopikus fizika tartományát. Azon belül már más-más renormalizált trajektóriát találunk különböző mérésekben, amelyek a megfigyelt rendszer környezetét megszabhatják.

Ebben a nyílt elméletrendszer-sorozatban mindegyik elmélet a fizika egy szintjét jelenti, ahol adott szabadságfokok adott módon hatnak kölcsön. Minden egyes nyitott elmélet megalapozása egy kísérleti és elméleti siker, valamint ezek sorozatát – véleményem szerint – teljesen reménytelen vállalkozás lenne egy elmélettel, a mindenség elméletével helyettesíteni. Ezt egy múlt századi polémiával lehetne a legegyszerűbben bemutatni. A nagyenergiás fizikusok büszkélkedtek azzal, hogy ők kísérleteikben az Univerzum alapvető paramétereit próbálják kimérni, amíg a szilárdtest-fizikusok a nem jól ismert, közelítő elméleteket használják. Erre az a válasz érkezett, hogy egy-egy nagyenergiás mérésen mérnökök és fizikusok százai, esetleg ezrei dolgoznak éveken át. Ez a körülmény viszont pont azt jelzi, hogy a mérés nem lényeges a megfigyelt jelenségek szempontjából. Más szóval a kezdeti feltétel, amely rendkívül rövid skálához tartozik – és amely a nagyenergiájú fizika művelőinek figyelmét felkelti – nem sok segítséget nyújt az annál sokkal nagyobb távolságon lezajló jelenségek megértésében. Egy kísérleti tudománynak nem lehet célja a mindenség elméletének megkeresése, mivel annak használata messze túlmutat kísérleti és analitikus lehetőségeinken. Azt viszont reális célul tűzhetjük ki, hogy minél több nyílt elméletet azonosítsunk, és a „szomszédos” elméletek egymáshoz való viszonyát megértsük.



3. ábra. A mindenség elméletének renormalizált trajektóriája. A szaggatott vonal választja el a mikro és a makro szintet, az utóbbit módosítani tudjuk laboratóriumi körülmények között, ezért a trajektória különböző irányokban fut különböző környezetben végrehajtott megfigyelések során.

A szaggatott vonallal jelzett határ két lényegesen eltérő fizikai világot választ el. Mikroszkopikus szinten a létezés alapvető tulajdonságainak meglepő tulajdonságaival találkozunk, ezek közül a virtuális valóságok megjelenését, illetve az egység fontosságát mutatjuk be a következő fejezetekben.

Virtuális valóság

Az egyik leglényegesebb változás, amelyet a makroszkopikus világból a mikroszkopikusba érkezéskor találunk: az egyértelmű valóság hiánya. A makroszkopikus szint valóságát a tőlünk függetlenül létező, megfigyelhető jelenségek, tulajdonságok alkotják. *Albert Einstein* és *Abraham Pais* egy hosszú beszélgetés után, késő este sétáltak haza Princetonban. Einstein felnézett a Holdra, és elgondolkodva kérdezte beszélgetőpartnerétől: „Tényleg nem létezik a Hold mikor nem nézünk rá?” Tudniillik, arról folyt a beszélgetésük, hogy ha a Hold egy elemi részecske lenne, akkor a helye nem létezne, mielőtt azt megmérjük. Az azóta eltelt nyolcvan év alatt lassan, sok-sok kitérővel alakult ki fokozatosan az elképzelésünk arról, hogyan jelenik meg egy egyértelmű, objektív valóság a megfigyelés felbontásának durvításával.

Határozatlansági elv

Werner Heisenberg egy gondolatkísérlettel magyarázta egy részecske koordinátája és impulzusa közti határozatlansági relációt, hogy minél pontosabban mértük meg az egyiket, annál nagyobb hibával ismerhetjük meg a másikat. A kísérlet abból állt, hogy a részecskéről szóródó foton alapján következtethetünk a részecske helyére, a szórás közben azonban részecske impulzusa megváltozik, a mérés (részlegesen) lerombolja megfigyelés előtti állapotot. A határozatlansági reláció fontossága messze túlmutat ezen az egyszerű gondolatkísérleten, mivel ez azt jelzi, hogy mikroszkopikus szinten nem nyerhető ki az összes információ a fizikai rendszerekből, mert minden a megfigyelés kontrollálhatatlan módon zavaró. Ez az agnoszticizmus álláspontja, a világ sohasem ismerhető meg teljesen.

Hogyan definiálható egy elemi pontrészecske állapota, ha az nem kinyerhető információt is tartalmaz? Makroszinten a koordináta és az impulzus ismerete is szükséges a mozgás(állapot) meghatározásához, mert a Newton-egyenlet második időderiváltat tartalmaz. A kvantummechanika mozgásegyenlete, a Schrödinger-egyenlet ezzel szemben csak elsőrendű időderiváltat „igényel”, így megoldásának jellemzésére csak egy szabadon választott adat szükséges, amely lehet – mondjuk – vagy a koordináta, vagy az impulzus, sőt, lehet mindkettő részleges ismerete.

Ahhoz, hogy a határozatlansági elv által megkövetelt bizonytalanság megmaradjon, a mikroszint még ennél is bizonytalanabb kontúrokkal rendelkezik, még ezt az egyetlen adatot sem definiálja a makroszkopikus fizikában megszokott módon. A mikroszkopikus állapot csupán több egymással versengő virtuális lehetőség együtteseként képzelhető el. Tekintsünk úgy egy részecske állapotára, mint lehetséges helyeinek együttesére, amelyben minden virtuális valósághoz egy esély tartozik,

$$\psi = \begin{pmatrix} \textit{állapot} = \boldsymbol{x}_1, & \textit{esélye} = \psi(\boldsymbol{x}_1) \\ \textit{állapot} = \boldsymbol{x}_2, & \textit{esélye} = \psi(\boldsymbol{x}_2) \\ & \vdots \end{pmatrix}.$$

Kvantummechanikában az esélyt egy komplex szám, a valószínűségi amplitúdó fejezi ki, amelynek abszolútérték-négyzete a kérdéses lehetőségnek, mint egyértelmű valóság megjelenésének valószínűségét adja. A mozgásállapot valójában a mozgás időfejlődésének ismeretéhez szükséges információ együttese, és feltehetően azért találunk komplex számot ezen a ponton, mert egy valós számmal nem lehetne az idő irányultságát kódolni. Egy komplex számban el lehet bújtatni az idő irányát azzal, hogy megfordítását komplex konjugációval ábrázoljuk. A klasszikus mechanikában ez a probléma nem jelenik meg, hiszen ott a koordináta és az impulzus egyidejűleg ismert.

Egy telefonkönyv egy-egy sorában egy név és egy szám található. A kvantumállapot is egy telefonkönyv, csupán soraiban a virtuális valóságok és hozzájuk tartozó valószínűségi amplitúdó állnak. A részecske megtalálásának a valószínűségsűrűségét egy sorban, mondjuk az $\boldsymbol{x}$ pontban, a $\psi(\boldsymbol{x})$ hullámfüggvény alapján a

$$p(\boldsymbol{x}) = |\psi(\boldsymbol{x})|^2$$

kifejezés adja meg. Az állapotok matematikai reprezentációja komplex vektorokkal történik:

$$\psi \to \big(\psi(\boldsymbol{x}_1),\ \psi(\boldsymbol{x}_2),\ \ldots\big).$$

Ezek egy olyan lineáris tér elemeit alkotják, amelynek bázisvektorait a különböző virtuális valósághoz tartozó állapotok adják,

$$\psi = \psi(\boldsymbol{x}_1)\, e_1 + \psi(\boldsymbol{x}_2)\, e_2 + \ldots .$$

Egy mikroállapot telefonkönyvszerű leírásában fellépő állapotok azért úgymond virtuálisak, mert ezek egymással versengenek a makroszint jól ismert egyértelmű valóságának kialakításában. Mielőtt megmérnénk egy fizikai mennyiség értékét ebben a mikroállapotban, a mennyiség értéke nem ismert. Ha nem ismerünk valamilyen mennyiséget, akkor nyilvánvalóan hiányzik valamilyen információ, és statisztikus módszerekkel kell meghatároznunk az ismeretlen mennyiség valószínűségi eloszlását.

A determinisztikus klasszikus fizikában, ahol a világ teljesen megismerhető, a hiányzó információ megvan, csak mi nem ismerjük korlátolt képességeink, lehetőségeink miatt. Az általunk nem ismert információ egy részének megszerzése után újraszámolt valószínűségeloszlás fluktuációja csökken. Az indeterminisztikus kvantummechanika valószínűsége is hiányzó információra utal, ez az információ azonban egyszerűen nem létezik, mivel nem lehet kinyerni a teljes információt a mikroszinten lévő rendszerekből. A mérés során részleges információt nyerünk, de mindig marad kinyeretlen információ, és így nem lehet képességeink, módszereink javításával teljesen kiküszöbölni a fizikai mennyiségek statisztikus leírását. A mérés a Természet csapdába ejtése, ahol nincs választása: a keresett fizikai mennyiségre meg kell alkotnia egy értéket, ami nem létezett a mérés előtt. A már létező és a még nem létező információ különbségére jó példa a később tárgyalandó, úgynevezett késleltetett válasz kísérlet.

Mihelyst a létezés kérdése bekeveredik gondolatainkba, filozófiai problémákkal kerülünk szembe. Most is így történik, a kvantummechanika matematikai struktúrájának és jelenségeinek interpretációja nehéz filozófiai kérdések, problémák elé állítanak. Ezek fellazítása vagy megoldása szerintem csak „kívülről”, döntő fontosságú, új kísérletek, megfigyelések eredményeképpen történhet. Az objektív realitás a klasszikus fizika szintjén kétséget kizáró módon létezik, mikroszkopikus szinten azonban elvész minden arra utaló jelzés. Ennek megfelelően a kvantummechanika különböző interpretációi abban különböznek, hogy hol húzzák meg a választóvonalat az objektív realitás és elképzeléseink között, és hogyan kezelik a matematikai formalizmus és az Univerzum viszonyát a számunkra ismeretlen virtuális oldalon. E rövid szövegben el szeretném kerülni a különböző interpretációk által adott képek ismertetését és a sokszor nagyon komplikált összehasonlítását. A továbbiakban ezért az objektíven nem eldönthető, interpretatív vagy filozófiai kérdésekben csupán a saját véleményemet említem. Az pedig a kvantumtérelmélettel való foglalatosságaimon alapszik és nem pontosan egyezik meg egyik mára már többé-kevésbé kialakult és megmerevedett interpretációval sem. Ez a különbség onnan ered, hogy úgy vélem, a kvantumtérelmélet a jelenleg ismert interpretációk egyes nyílt kérdéseit helyre tudja tenni, meg tudja oldani.

A virtuális és az „igazi”, egyértelmű valóság különbözősége a mérési folyamat kvantummechanikai leírásában tűnik fel drámai módon. Tegyük fel, hogy egy szobában lévő részecske koordinátáját akarjuk megmérni. A részecske állapotát egy $\psi(\boldsymbol{x})$ hullámfüggvény írja le, amely megadja annak a virtuális valóság valószínűségi amplitúdóját, hogy a részecske az $\boldsymbol{x}$ pontban található. A mérés folyamata három lépésre bontható.

1. A részecske kölcsönhat a mérőberendezéssel. A mérőberendezés úgy van kiképezve, hogy a kölcsönhatás következtében a részecske különböző elhelyezkedése a makroszkopikus mérőberendezést makroszkopikusan különböző állapotba hozza. E lépés végére a részecske helyére vonatkozó információ a mérőberendezés állapotára másolódott át, és mindkét résztvevő, a részecske és a berendezésünk állapotát korrelált, úgynevezett összefonódott virtuális állapotok sokasága jellemzi.

2. A mérőberendezés makroszkopikus méretéből kifolyólag a részecske-mérőberendezés kölcsönhatás olyan erőssé válik, hogy az feltöri a virtuális állapotok sokaságát és átalakítja őket lehetséges makroszkopikus állapotokká.

3. A mérés utolsó állomásán a több lehetséges makroszkopikus állapotból kiválasztódik a végeredmény, az „igazi” valóság, amely a részecske-mérőberendezés kettős rendszer végállapotának felel meg.

A virtuális állapotsereg feltörését dekoherenciának hívjuk, az a disszipatív erőkhöz hasonlóan jelenik meg, és elég könnyen nyomon követhető. Az „igazi” valóság kiválasztása azonban a mikroszint legmélyebb, legjobban védett rejtélye. Ugyanis a gyerekkorunk óta megrögződött meggyőződéssel ellentétben még abban sem lehetünk egészen biztosak, hogy a valóság tényleg létezik. Ha nem létezik, akkor milyen mentális erőfeszítések nyomán jutottunk arra a meggyőződésre, van? Ha pedig engedünk abbéli meggyőződésünknek, hogy az bizony csak azért is létezik, akkor annak a dekoherencia által feltört virtuális lehetőségek halmazából való kiválasztása okoz bonyodalmakat. Mert a valóság kiválasztása, ha tényleg megtörténik, nem determinisztikus, jelenlegi matematikai módszereinkkel nem követhető. Úgy vélem, hogy a makroszkopikus mérőberendezés kvantum-térelméleti leírása egy teljesen szokványos fizikai lépésekből álló választási mechanizmushoz vezet. Azonban ahhoz, hogy annak végeredményét kiszámoljuk, olyan mikroszkopikus kezdeti értékekre van szükség, amelyek makroszkopikus megfigyelésekkel nem érhetők el. Ezzel bezárul a klasszikus fizika csapdája.

Irodalom

1. Jean Piaget: *Az értelem pszichológiája*. Gondolat Könyvkiadó, Budapest (1978).
2. Douglas Harding: *Fej nélkül*. Kvintesszencia Kiadó (2018).
3. J. Alexandre, V. Branchina, J. Polonyi: Global Renormalization Group. *Phys. Rev. D 58* (1998) 16002.

KÖHÖGÉSKOR KIBOCSÁTOTT, KÓROKOZÓ TARTALMÚ CSEPPEK LÉGZŐRENDSZERI KIÜLEPEDÉSELOSZLÁSA

– az új típusú koronavírus (SARS-CoV-2) aeroszol formában történő terjedése

Füri Péter
Energiatudományi Kutatóközpont

A COVID-19 járvány világszerte felhívta a figyelmet a kórokozók aeroszol formában való terjedésére. A néhány mikrométernél kisebb átmérőjű, vírustartalmú cseppek igen hosszú ideig a levegőben maradhatnak, ezért a távolságtartás mellett minden esetben szükséges a maszkok viselése. A köhögéskor kibocsátott cseppek és azokból párolgás során keletkező cseppmagok légzőrendszeri kiülepedéseloszlását Sztochasztikus Tüdőmodellel vizsgálva kijelenthető, hogy a kiülepedett vírussűrűség mind a cseppek, mind a cseppmagok esetén nagyságrendekkel nagyobb a felső légutakban, mint a tüdő acináris régiójában. Ez alátámasztja azt a hipotézist, amely szerint a légzőrendszer e része kulcsszerepet játszik a vírus terjedésében, illetve megmutatja, hogy a kórokozó gyérítésével ebben a régióban csökkenthető az acináris légutakba jutó vírusszám, így a tüdőgyulladás kialakulásának valószínűsége is.

Bevezetés

A cseppfertőzés, mint a kórokozók terjedésének egyik lehetséges módja

A levegőben általában nagyszámú aeroszol-részecske található. Ezek között lehetnek kórokozó-tartalmú cseppek is.

A cseppfertőzés a betegségek terjedésének azon módja, amikor a kórokozók (vírusok, baktériumok) beszéd, köhögés vagy tüsszentés után a levegőben szétporlasztott nyál vagy nyákcseppekben jutnak el a kibocsátó személytől a befogadóig. Cseppfertőzéssel terjed például az influenza, az új típusú koronavírus és a tuberkulózis is.

A koronavírusok széles körben elterjedtek az emlősök és a madarak között. Jellemzően légúti, emésztőrendszeri, máj- és neurológiai betegségeket okoznak.

2019-ben a kínai Wuhanban megjelent egy addig ismeretlen koronavírus okozta tüdőgyulladás. E betegséget – utalva a kórokozóra és a dátumra – Coronavirus Disease 2019-nek vagy röviden csak COVID-19-nek nevezték el. A COVID-19 kórokozója a *Severe Acute Respiratory Sindrome Coronavirus–2* (SARS-CoV-2), amely világszerte felhívta a figyelmet a kórokozók aeroszol formában történő terjedésére.

A World Health Organization ajánlása szerint a fertőzés elleni védekezés fő eszközei a maszkviselés, a távolságtartás, illetve a megfelelő higiénia. Jelen tanulmány megmutatja, hogy legtöbb esetben miért nem nyújt kielégítő biztonságot az 1,5 m-es távolságtartás, illetve hogy miért szükséges olyan helyiségekben, ahol többen tartózkodnak egy légtérben, vagy éppen a tömegközlekedési eszközökön a szájat és az orrot eltakaró maszkok használata.

Numerikus modellezés segítségével megvizsgáltuk továbbá, hogy amennyiben nem tudjuk elkerülni a vírustartalmú cseppek belélegzését, azok mekkora valószínűséggel és a légutak mely részén fognak kiülepedni.

A humán légzőrendszer felépítése

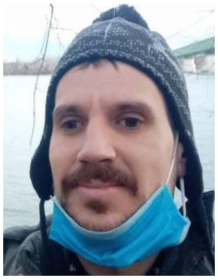
A Severe Acute Respiratory Sindrome Coronavirus–2 biológiai hatásának és a kiülepedéseloszlások megértéséhez szükséges a légzőrendszer rövid ismertetése. A humán légutak két fő része a felső légutak (extrathorakális régió) és a tüdő. A tüdő továbbá bronchiális és acináris régiókra osztható fel.

A felső légutak, mivel számos a szervezetbe került részecskét kiszűrnek a légáramból fontos szerepet töltenek be a tüdő védelmében. Míg a bronchiális légutak csak a tüdő mélyebb részeibe vezetik a levegőt, az acináris légutak felszínén már megtalálhatók a légzőhólyagok (alveolusok), amelyekben a gázcsere történik.

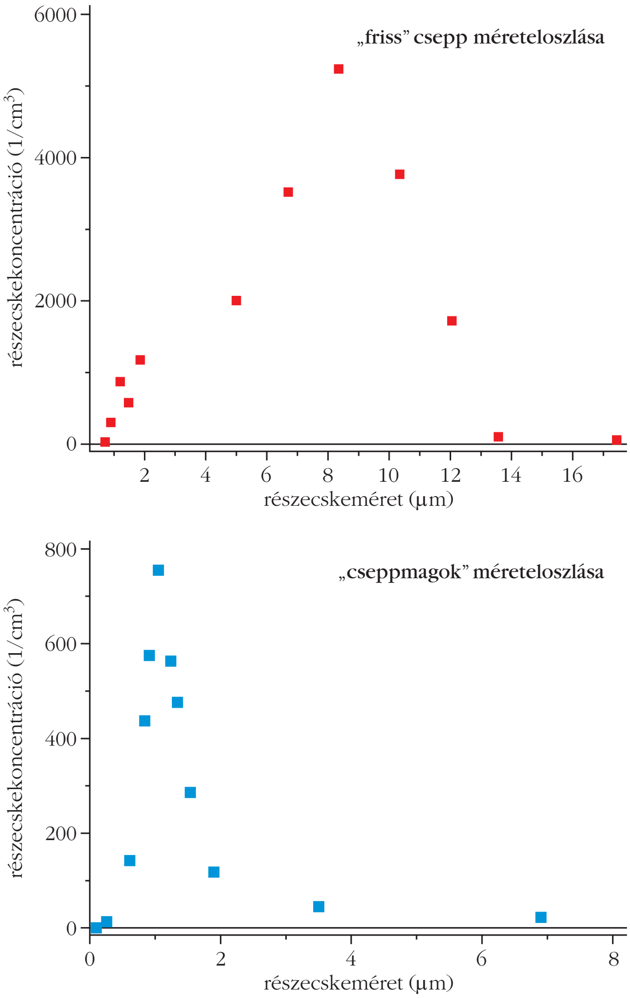
A kórokozó-tartalmú cseppek keletkezése

Mikor köhögünk, tüsszentünk, de még beszéd közben is nagyszámú részecske hagyja el a légutakat, amelyeket az angol „respiratory droplet” kifejezés tükörfordításaként magyarul talán légzési cseppeknek nevezhetünk. Ezek legtöbbször a nyálból, vagy a légutakat fedő nyákból származnak.

A nyálmirigyek termelte színtelen, viszkózus, változó kémhatású folyadék fontos szerepet játszik a szájban található nyálkahártya nedvesen tartásában és a táplálék előemésztésében. Ez védi továbbá a szájüreget és a fogakat a kórokozóktól.



Füri Péter az Energiatudomámyi Kutatóközpontban dolgozik numerikus modellezőként. Fő feladata eleinte a Sztochasztikus Tüdőmodell fejlesztése és alkalmazása volt. Emellett 2020 óta sugárvédelmi témájú Monte-Carlo-szimulációkat is végez MCNP szoftver segítségével.



1. ábra. A köhögéskor kibocsátott „friss” cseppek és cseppmagok szám szerinti méreteloszlása Yang és társai mérése alapján [1].

A légutak felszínét nyákréteg fedi, amelyet a nyálkahártyák hámjában található egysejtű mirigyek, a kehelysejtek és más mirigyek termelnek. A légutakat fedő nyákréteg a kórokozók elleni védekezés mellett kulcsfontosságú a tüdő tisztulásának szempontjából is, hiszen nagyszámú belélegzett aeroszol-részecske ragad bele, amelyek azután kiürülnek a légutakból.

Bár mind a nyál, mind a nyák fő összetevője a víz, tartalmaznak nem párolgó összetevőket is. Ez azt jelenti, hogy még a kórokozót nem tartalmazó kilélegzett cseppek sem fognak teljesen elpárologni. Azt az állapotot, amikor már a víz nagy része távozott, angolul „droplet-nuclei”-nek nevezik, amelyet magyarul talán cseppmagnak hívhatunk. Ebben a vírusok vagy más kórokozók akár jelentős koncentrációban is jelen lehetnek.

A köhögéskor, tüsszentéskor kibocsátott cseppek mérete igen széles határok között mozoghat. A régebbi mérések igen nagynak határozták meg ezek méretét. A modernebb technikával végzett mérések, mint például *Shinhao Yang* és társai (2020) [1] által végzett vizsgálatok már sokkal kisebb cseppeket is mérni tudtak.

A légzőrendszerből éppen kibocsátott „friss” cseppek méreteloszlásának maximuma – Yang és társai mérése alapján – körülbelül 8-9 µm-nél található (*1. ábra*). A cseppmagok túlnyomó többsége ezzel szemben kisebb 2 µm-es átmérőnél.

A SARS-CoV-2 vírus aeroszol formában való terjedésének valószínűségét meghatározó változók

A kórokozók cseppfertőzéssel történő terjedésének valószínűségét elsősorban az határozza meg, hogy a légzési cseppeknek és a cseppmagoknak van-e ideje kiülepedni valamilyen felületre, vagy a levegőben lebegve belélegezhetők maradnak. A néhány száz nm-es átmérőjűnél nagyobb cseppek esetén a diffúzió hatása már nem jelentős, így a gravitációs ülepedés a fő mechanizmus, ami eltávolíthatja őket a levegőből. Az ehhez szükséges idő számos paramétertől függ, mint például a légáramlási viszonyok az adott helyen, vagy a csepp alakja. A beltérre jellemző viszonylag kis légsebességek mellett azonban kulcsfontosságú a csepp mérete, illetve az út hossza, amit a padló vagy egyéb felület eléréséig meg kell tennie.

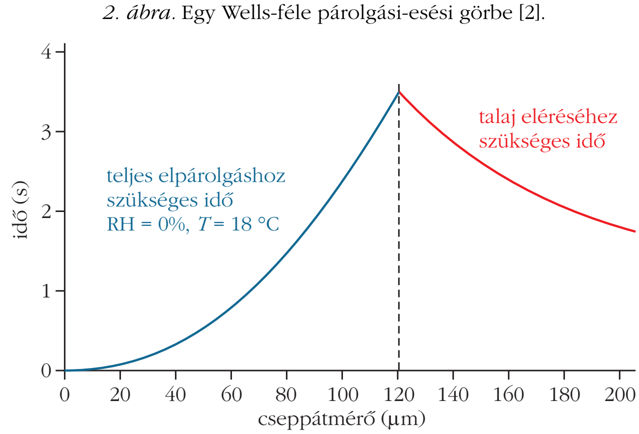
A légzési cseppek és cseppmagok viselkedése a levegőben

A levegőben lévő cseppek legtöbb esetben egy időben párolognak és esnek. A 0% nem párolgó anyagot tartalmazó cseppek 0% relatív légnedvességen és 2 m magasról ejtve igen gyorsan párolognak (*2. ábra*) [2], tehát csupán a legnagyobb cseppek érhetik el a talajt. 50%-os relatív páratartalom esetén a párolgás lassabb, ez a határ tehát a kisebb részecskék felé tolódik el.

Azonban fontos megemlíteni, hogy a valóságban a nem párolgó összetevők miatt a cseppek mérete egy idő után már nem csökken tovább. Igen gyakran tehát előbb alakul ki a cseppmag, mint az eső csepp elérné a padlót.

A cseppmagok átmérője, mint azt Yang és társai [1] mérése megmutatta, jellemzően fél és néhány mikrométer közötti. Ezek a kis átmérőjű részecskék igen sokáig a levegőben maradhatnak. Egy 1 µm átmérőjű, nem párolgó cseppnek például körülbelül 5 óráig tart 2 m magasról ejtve a talaj elérése. Egy 5 µm átmérőjű részecske esetén ez már csak 11 perc, míg egy 20 mikronos részecske esetén csupán 43 másodperc [3].

2. ábra. Egy Wells-féle párolgási-esési görbe [2].



A legfeljebb néhány mikrométer átmérőjű cseppmagok tehát elegendően hosszú ideig maradhatnak a levegőben, hogy például a fűtés által okozott légmozgással messzire eljussanak.

Legtöbb esetben nem nyújt kielégítő védettséget az 1,5 m-es távolságtartás. A cseppfertőzés megakadályozásához mindenképpen minimalizálni kell a levegőben lebegő, apró cseppek számát is. Erre a legegyszerűbb módszer már a forrásnál megfogni a kibocsátott cseppeket, ami például maszkviseléssel történhet. Javasolt továbbá a gyakori és alapos szellőztetés is. Ez nem csak a kórokozókat távolítja el a szobák, irodák légteréből, hanem csökkenti a radon és leányelemeinek aktivitáskoncentrációját is a levegőben. Ezáltal nagymértékben csökkenthető a természetes eredetű ionizáló sugárzásnak való kitettségünk is.

A SARS-CoV-2 fertőzési mechanizmusa

A legtöbb kórokozónak meg van a maga célterülete, ahol sokszorozódni tud, illetve ahol a nem kívánt biológiai hatását kifejtheti. Az új típusú koronavírus esetén az acináris légutakban kiváltott tüdőgyulladás tekinthető a legsúlyosabb, bizonyos esetekben akár életveszélyes biológiai hatásnak.

A SARS-CoV-2 a sejtbe jutáshoz az ACE2 receptorokat használja. Ezek az acináris régió mellett a felső légutakban is megtalálhatók. Az új típusú koronavírus esetén tehát a vírus nem csupán az acináris régióban sokasodhat, hanem elképzelhető egy másik, a felső légutakon át vezető útvonal is.

Az első, közvetlen útvonal esetén a vírustartalmú cseppek belégzéskor az acináris légutakba, azaz a vírus célterületére kerülnek. Fontos azonban tudni, hogy a tüdő e részének felszíne óriási, körülbelül 148 m^2. A felső légutak ezzel szemben mindössze $6,5 \cdot 10^{-3}$ m^2 felületűek [4]. Amennyiben a vírusok sejtbe jutásához és ottani sokszorozódásához nem elegendő egy vírus, hanem bizonyos adott felületre vagy akár egy gazdasejtre eső vírussűrűség kell, akkor sokkal kisebb a fertőzés valószínűsége az acináris, mint a felső légutakban.

A második, a felső légutakon át vezető útvonal esetén a vírus először az orrban, szájban, garatban és gégében ülepszik ki és telepedik meg. Itt sokasodik és azután valamilyen módon, például a légutak felszínéről belégzéskor leszakadó cseppekben az acináris régióba jut. Ez utóbbi útvonalat igazolja a tény, hogy az e betegségre jellemző korai tünetek a torokfájás, az ízlelés és szaglásvesztés.

A vírus aeroszol formában való terjedésének valószínűségét meghatározó változók közül alapvető a vírus koncentrációja a környezeti levegőben lévő cseppekben.

Ez, az irodalmi adatok alapján igen széles határok között mozog. Az átlag 10^5–10^6 RNS-másolat/ml, de egyes alanyoknál akár 10^{11} másolat is lehet egy ml térfogatban [5]. Szemléltetésképp közöljük az egy cseppre eső RNS-másolatok számát egy darab 1, 5, 10, 20, 50 és 100 μm-es átmérőjű cseppre 10^5/ml vagy 10^{11}/ml RNS-koncentrációra (*1. táblázat*). Az eredmények jól mutatják, hogy a kisebb, 10^5 másolat/ml-es másolatkoncentráció esetén igen kicsi a valószínűsége, hogy akár egyetlen vírust is belélegezzünk, hiszen ekkor még egy 100 μm-es átmérőjű cseppben is csupán 0,05 másolat van. Azzal is számolni kell azonban, hogy köhögéskor nagyszámú csepp hagyja el a légzőrendszert, így egy légvétellel több cseppet is belélegezhetünk.

1. táblázat

A légzési cseppek SARS-CoV-2 vírus RNS-másolatainak száma egy cseppre vetítve 10^5/ml vagy 10^{11}/ml másolatkoncentráció esetén.

cseppátmérő (μm)	10^5 másolat/ml	10^{11} másolat/ml
1	$5,233 \cdot 10^{-8}$	0,052333
5	$6,542 \cdot 10^{-6}$	6,54165
10	$5,233 \cdot 10^{-5}$	52,3332
20	$4,187 \cdot 10^{-4}$	418,6656
50	$6,542 \cdot 10^{-3}$	6541,65
100	$5,233 \cdot 10^{-2}$	52333,2

A nagyobb 10^{11} másolat/ml-es koncentrációval számolva azonban már egyetlen 10 μm-es átmérőjű csepp is 52 másolatot tartalmaz.

Azt, hogy melyik fertőzési útvonal játszhat fontosabb szerepet a SARS-CoV-2 vírus esetén alapvetően attól függ, hogy a hordozó csepp milyen valószínűséggel és a légutak mely részén ülepszik ki. Ennek meghatározására a Sztochasztikus Tüdőmodellel kiszámítottuk a belélegzett cseppek és cseppmagok légzőrendszeri kiülepedéseloszlását.

Módszerek

A Sztochasztikus Tüdőmodell

A belélegzett részecskék légzőrendszeri kiülepedéseloszlásának jellemzésére szolgál a Sztochasztikus Tüdőmodell, amelynek kezdeti verzióját *Koblinger László* és *Werner Hoffman* 1985 és 1992 között dolgozta ki [6]. A modellt létrehozatala óta a (mai nevén) Energiatudományi Kutatóközpontban, illetve a Salzburgi Egyetemen is állandóan fejlesztik.

A Sztochasztikus Tüdőmodell egyedülállónak nevezhető az irodalomban elérhető numerikus tüdőmodellek között, hiszen – ellentétben a legtöbb egyéb

2. táblázat

A légzőrendszeri kiülepedéseloszlás meghatározásához elvégzett szimulációknál használt légzési paraméterek.

belégzés hossza	kilégzés hossza	légzési térfogat	maradványkapacitás*
2,5 s	2,5 s	750 cm^3	3300 cm^3

* angol elnevezése: Functional Residual Capacity (FRC)

légzőrendszeri modellel – a légutak geometriájának egyénen belüli és egyének közötti változékonyságát is képes leírni.

Az elvégzett szimulációkhoz a légzési paramétereket az ICRP 66-os kiadványból vettük [4], az értékek a *2. táblázatban* láthatók. A légzési mód (orr vagy szájlégzés) belélegzett cseppek kiülepedéseloszlására gyakorolt hatásának szemléltetésére a fenti légzési paraméterekkel orr és szájlégzésre is végeztünk számításokat.

Eredmények

A belélegzett cseppek légzőrendszeri kiülepedéseloszlása

A belélegzett friss cseppek és cseppmagok regionális légzőrendszeri kiülepedéseloszlásának meghatározásához a Sztochasztikus Tüdőmodellel számításokat végeztünk 0,2–30 μm-es átmérőkre, maszkot nem viselő egészséges, szájon vagy orron át lélegző, ülő felnőtt férfira.

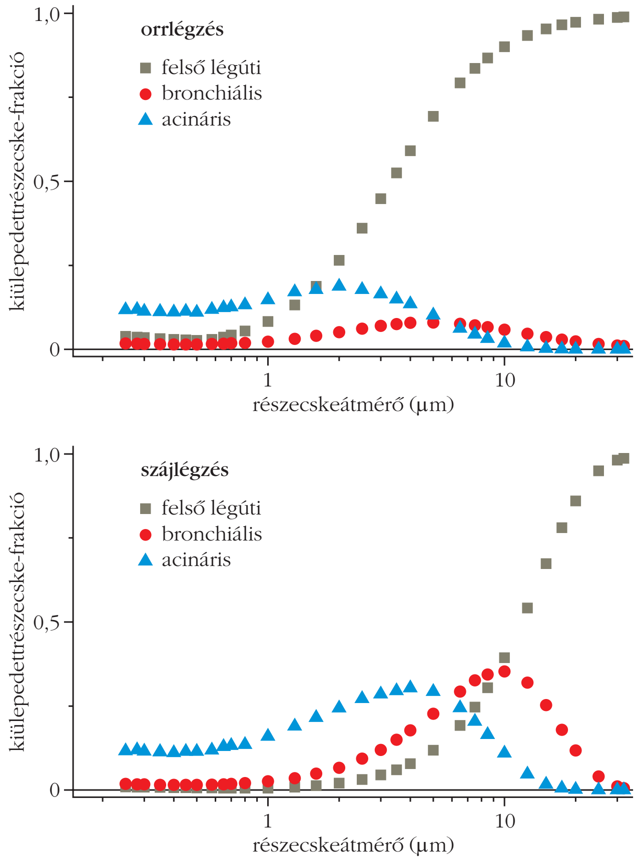
A felső légutakban, a tüdő bronchiális és acináris részében kiülepedettrészecske-frakció nagyságának részecskemérettől való függését a *3. ábra* mutatja.

Az 1 μm-nél kisebb átmérőjű cseppek kiülepedési valószínűsége kicsi mind a felső légutakban, mind a tüdő bronchiális régiójában is, tehát e cseppek jelentős része elérheti az acináris légutakat. Mindemellett fontos megjegyezni, hogy e részecskék 60–80%-a kilégzésre kerül. Orrlégzéskor, körülbelül 1 μm-es átmérő fölött a felső légúti kiülepedés meredeken nőni kezd, ami szájlégzés esetén csak 4-5 μm átmérőjűnél nagyobb cseppeknél figyelhető meg. A részecskeméret növekedésével eleinte még a bronchiális és az acináris kiülepedés is fokozódik, de orrlégzés esetén körülbelül 3-4 μm felett, szájlégzés esetén pedig 10 μm felett a felső légutak már olyan sok részecskét kiszűrnek a beszívott levegőből, hogy a tüdőig csak kevés tud eljutni.

A „friss” cseppek mérete jellemzően 6 μm-nél nagyobb. Míg orrlégzés esetén a legtöbb ilyen nagy csepp a felső légutakban fog kiülepedni, szájlégzés esetén nagyszámú „friss” csepp tud kiülepedni az acináris régióban is.

A kisebb méretű cseppmagok esetén mind az orr mind a száj „rossz szűrő”, azaz a felső légutak mindkét esetben csupán kevés ilyen részecskét tudnak megfogni. A bronchiális régióban szintén alacsony ezen részecskék kiülepedési valószínűsége. Így legnagyobb valószínűséggel az acináris légutakban fognak a belélegzett cseppmagok kiülepedni (*4. ábra*).

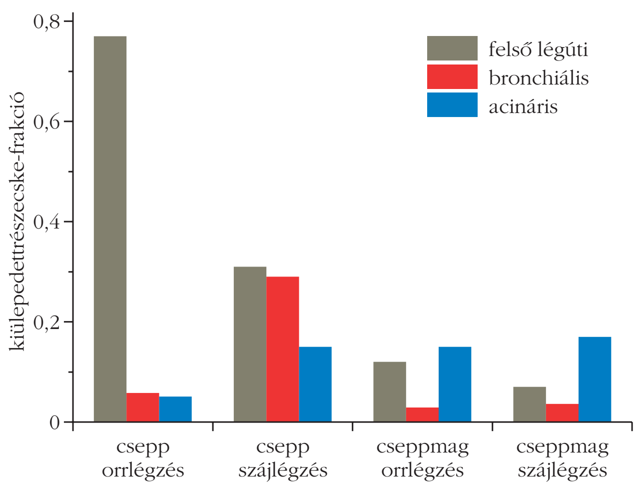
A biológiai hatás szempontjából a kiülepedettrészecske-frakció nagyságánál – a legtöbb esetben – fontosabb az egységnyi felületre eső kiülepedettrészecske-frakció azaz a kiülepedéssűrűség. A kiülepedéssűrűség, mint az *5. ábrán* látható, nagyságrendekkel nagyobb a felső légutakban, mint az acináris régióban mind a friss cseppek, mind a cseppmagok esetén. Ez azt jelenti, hogy bár a cseppmagok többsége lejut az acináris légutakba, ott akkora felületen oszlanak el, hogy amennyiben nem a vírusszám, hanem az adott felületre eső vírussűrűség fontos, az acináris régióban még ezeket a részecskéket vizsgálva is kevésbé valószínű a fertőzés.

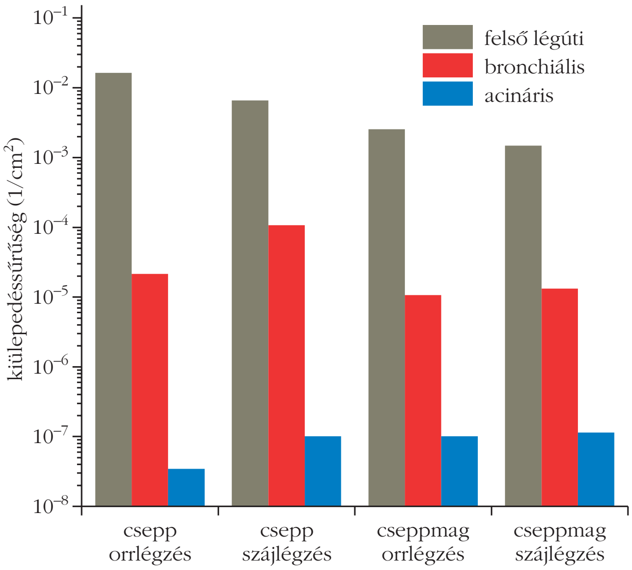


3. ábra. A felső légutakban, a tüdő bronchiális és acináris részében kiülepedettrészecske-frakció nagyságának részecskemérettől való függése orr- és szájlégzésre, ülő férfi esetén.

Ezen eredmények alátámasztják azt a hipotézist, amely szerint a SARS-CoV-2 vírus fertőzése során kulcsszerepet játszanak a felső légutak. A légzőrendszer e régióján át vezető útvonal esetén a vírus – ah-

4. ábra. A friss cseppek és a cseppmagok kiülepedéseloszlása a felső, bronchiális és acináris légutakban, ülő férfi esetén.





5. ábra. A friss cseppek és a cseppmagok kiülepedéssűrűsége a felső, a bronchiális és az acináris légutakban. Fontos észrevenni, hogy a skála logaritmikus.

hoz, hogy tüdőgyulladást okozhasson – először el kell szaporodjon a felső légutakban, majd onnan nagy víruskoncentrációval jellemezhető cseppekben le kell jutnia az acináris régióba. Ez szerencsére lehetőséget kínál a fertőzés kezelésére is. Amennyiben a vírust valamilyen módon gyéríteni tudjuk a felső légutakban, valószínűleg csökkenthető a súlyos tüdőgyulladás kialakulásának valószínűsége is.

Összefoglalás

A kórokozók a nyákból vagy nyálból álló cseppekben való terjedése számos betegség esetén lehetséges. Ilyen a COVID-19 világjárvány SARS-CoV-2 elnevezésű kórokozója is.

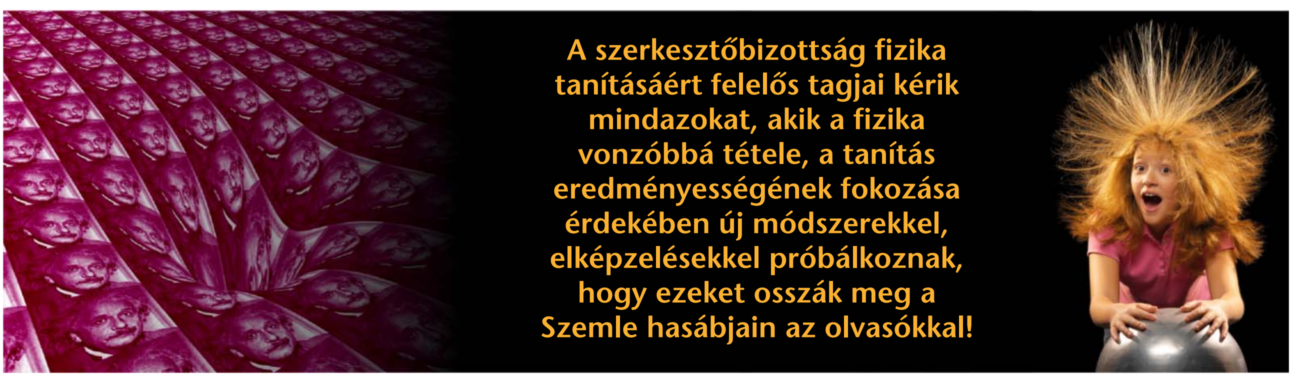
Köhögéskor, tüsszentéskor vagy akár beszéd közben kibocsátott cseppekben utazó kórokozók esetén a belégzés és így a betegség kialakulásának valószínűségét alapvetően az befolyásolja, hogy a cseppek és a bennük utazó vírusok meddig maradhatnak fertőzőképes állapotban a levegőben. 2 m magasról ejtve az 50 μm átmérőnél nagyobb cseppek viszonylag rövid idő alatt elérik a talajt, de egy 1 μm-es csepp akár órákig is a levegőben maradhat. Továbbá fontos kiemelni, hogy a légzőrendszerből kibocsátott cseppek gyorsan párolognak. A legnagyobb cseppek kivételével tehát általában előbb párolog el a víztartalom és alakul ki a cseppmag, mint hogy elérjék a talajt. A kisméretű cseppmagok azután jelentős távolságot is megtehetnek, például a fűtés okozta légáramlással. Olyan helyeken, ahol többen tartózkodnak egy légtérben, ezért feltétlenül szükséges az orrot és száját fedő maszk viselése.

Az új típusú koronavírus esetén az acináris légutak gyulladása okozhat súlyos, akár életveszélyes állapotot is. A Sztochasztikus Tüdőmodellel végzett kiülepedéseloszlás-számításaink igazolják, hogy a cseppmagok legnagyobb része az acináris régióba kerül, ám a másik, közvetett útvonal fontosságát jelzi, hogy a kiülepedéssűrűségek mind a friss cseppekre mind a cseppmagokra nagyságrendekkel nagyobbak a felső légutakban, mint az acináris régióban. Az orrban-szájban-garatban-gégében elszaporodott vírusok azután egy későbbi belégzés során nagy víruskoncentrációjú cseppekben az acináris régióba kerülhetnek.

E tanulmány legfontosabb üzenete az, hogy a fertőzésveszély csökkentésének érdekében minden olyan helyen, ahol több ember megfordul vagy együtt van, a távolságtartás mellett az orrot és szájat eltakaró maszk használata, illetve a gyakori és alapos szellőztetés is szükséges. Javasolt továbbá a vírusszám gyérítése a felső légutakban, amely történhet az arra alkalmas szerek (például orrspray, szájvizek) rendeltetésszerű használatával.

Irodalom

1. S. Yang, G. W. M. Lee, C-M. Chen, C-C. Wu, K-P. Yu: The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects. *J. Aerosol Med. 20/4* (2007) 484–494.
2. H. C. J. Yu: *An empirical drag coefficient model for simulating the dispersion and deposition of bioaerosol particles in ventilated environments.* Doktori értekezés.
3. R. Netz: Mechanisms of Airborne Infection via Evaporating and Sedimenting Droplets Produced by Speaking. *J. Phys. Chem. B 124* (2020) 7093–7101.
4. ICRP Publication 66: Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. *Annals of the ICRP 24* (1994) Pergamon Press, Oxford, UK.
5. Y. Pan, D. Zhang, P. Yang, L. L. M. Poon, Q. Wang: Viral load of SARS-CoV-2 in clinical samples. *Lancet. Infect. Dis. 20* (2020) 411–412.
6. L. Koblinger, W. Hofmann: Monte Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. Part I: Simulation of particle transport in a stochastic lung structure. *J. Aerosol Sci. 21* (1990) 661–674.



REZONANCIAKÍSÉRLET myDAQ ESZKÖZZEL

– a számítógéppel segített fizikatanítás lehetőségei a középiskolai tehetséggondozásban

Fábián Erik – ELTE, fizika–történelem tanárszakos hallgató
Kékesi Attila – ELTE, biológia–fizika tanárszakos hallgató
Rajkai Tamás – ELTE, matematika–fizika tanárszakos hallgató

Tanárszakos hallgatókként fontosnak tartjuk, hogy a tanulók a fizikai jelenségekkel ne csak a tankönyvek lapjain, videókban vagy szimulációkban találkozzanak, hanem a valóságban is végezzenek kísérleteket és méréseket, ugyanis – véleményünk szerint – ez segíti legjobban a megértést. Sok jelenség van, amelyek vizsgálata az iskolában hagyományosan megtalálható eszközökkel nem lehetséges, nehézkes vagy pontatlan. E problémára jelenthet egy megoldást a számítógéppel támogatott fizikatanítás, olyan eszközökkel kiegészítve, mint például a myDAQ, amely segítségével bonyolultabb és pontosabb mérések is lehetővé válnak, miközben az eszköz grafikus programozási felülete (LabView) nem teszi szükségessé a programozási nyelvek elsajátítását. A következőkben bemutatott kísérletet az ELFT–NI 2019/20-as myDAQ pályázatára készítettük. Célunk az volt, hogy bemutassuk egy ilyen eszköz létjogosultságát a középiskolai fizikaoktatásban, példánkban elsősorban a tehetséggondozás területén.

A pályamunkánk alapjául szolgáló kísérletet az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye (International Young Physicists' Tournament, IYPT) magyar versenyéhez kapcsolódva készítettük el. Pályázatunk során az egyik kiadott problémafeladatot (*Éneklő ferrit*) adaptáltuk myDAQ eszközre, illetve LabView környezetbe. A feladat szövege a következő: „Helyezz egy ferritrudat egy jelgenerátor által táplált tekercsbe. Bizonyos frekvenciákon a rúd hangot ad. Vizsgáld meg a jelenséget!" [2].

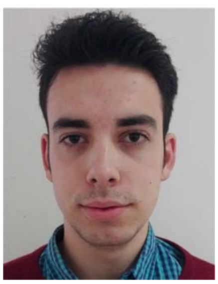
Elméleti háttér

Bizonyos anyagoknál – amilyen a ferrit is – megfigyelhető a magnetostrikció jelensége, azaz a belőle készült test változó mágneses tér hatására rugalmas alakváltozást szenved, amelynek oka a mágneses domének átrendeződése. A mágneses mező periodikus változtatásával az anyagban rezgést gerjesztünk, amely természetesen a levegőt is megrezgeti, ezt pedig hang formájában érzékelhetjük. A magnetostrikció jelenségének gyakorlati alkalmazása például az ultrahangkeltés.

Kísérletünkben a rezgetés során a rúdban állóhullám alakul ki. A ferritrúdnak – mint általában a rezgő

A cikk a 2019–2020 évi ELFT–NI myDAQ pályázata „Újak" kategóriájában második díjat elért pályamű [1] folyóiratunknak átdolgozott változata.

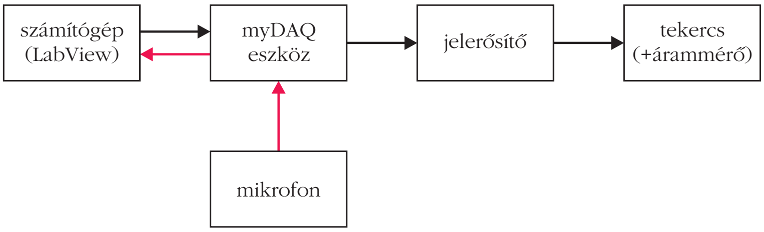
A szerzők köszönik az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak és az NI Hungary Kft.-nek, hogy a pályázat elkészítéséhez biztosították az NI myDAQ eszközt és az NI LabView programot. Köszönetüket fejezik ki az ELTE TTK Fizikai Intézet Anyagfizikai Tanszékének, különösen *Jenei Péternek* és *Ispánovity Péternek,* hogy támogatták a pályázat elkészítését, és lehetővé tették a mérés elvégzését a demonstrációs laboratóriumban a szükséges extra eszközök biztosításával és szakmai támogatásukkal.



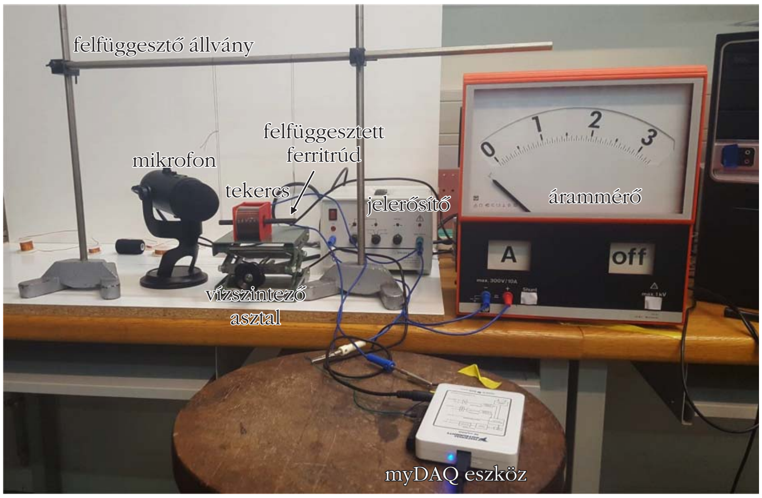
Fábián Erik a szolnoki Verseghy Ferenc Gimnáziumban végezte középiskolai tanulmányait. Jelenleg az Eötvös Loránd Tudományegyetem negyedéves fizika–történelem osztatlan tanárszakos hallgatója. Leendő tanárként keresi azokat a módszereket, amivel majd megszerettetheti a fizikát diákjaival, közelebb hozhatja hozzájuk e tudományterület szépségeit.

Kékesi Attila jelenleg az Eötvös Loránd Tudományegyetem negyedéves biológia–fizika tanárszakos hallgatója. Középiskolai tanulmányait a veszprémi Lovassy László Gimnáziumban végezte. Különösen érdeklik a szakjaihoz kapcsolódó interdiszciplináris témák és ezek oktatási lehetőségei. Szívesen próbál ki olyan új módszereket, amelyek által a fizika tanítása hatékonyabbá és érdekesebbé tehető.

Rajkai Tamás az Eötvös Loránd Tudományegyetem negyedéves matematika–fizika tanárszakos hallgatója. Középiskolai tanulmányait a budapesti Szerb Antal Gimnáziumban végezte. Szívesen foglalkozik fizikával, különösen érdeklődik a fizika középiskolai tanításának lehetőségei iránt. Örömmel tervez és épít olyan fizikaórán használható kísérleti eszközöket, amelyekkel színesebbé és érdekesebbé tehető a tananyag.



1. ábra. A mérési összeállítás elvi vázlata.



2. ábra. A mérési összeállítás áttekintő fényképe.

rendszereknek – van sajátfrekvenciája (ezt hallhatjuk, amikor egy fémtárggyal megpendítjük), amely frekvencián gerjesztve fellép a rezonancia jelensége, azaz a rezgés amplitúdója kiugróan megnő, és a hang is sokkal erősebbé válik.

Mérésünk célja az volt, hogy megállapítsuk, a rúd mely gerjesztési frekvenciák esetén mutatja a rezonancia jelenségét, és milyen frekvenciával rezeg ezen esetekben. Ezt úgy vizsgáltuk, hogy egy adott tartományon belül változtatva a gerjesztési frekvenciát mikrofon segítségével detektáltuk a kiadott hangot és néztük annak erősségét.

3. ábra. A vizsgálandó ferritrúd a vízszintező asztalon fekvő tekercs belsejében közelről, mellette a hangot érzékelő mikrofon.

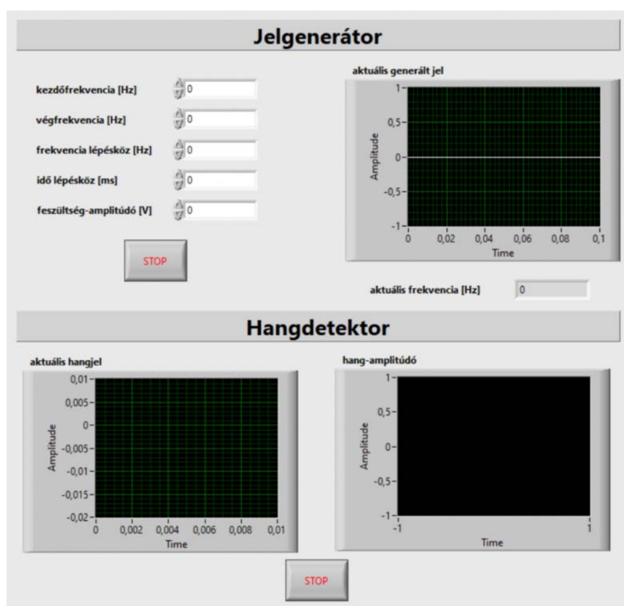
A mérési összeállítás

A mérés elvi vázlata az *1. ábrán,* a tényleges mérési összeállítás a *2.* és *3. ábrán* látható [3]. A mérés során a myDAQ eszközzel generáltuk a megfelelő frekvenciájú váltakozó feszültséget. A feszültségjel paramétereit (különös tekintettel a frekvenciájára) a LabView programon keresztül vezéreltük. Jelerősítőt használtunk, hogy megfelelő nagyságú áramot hozzunk létre a tekercsben. A keltett hangot mikrofonon keresztül szintén a myDAQ eszközzel detektáltuk.

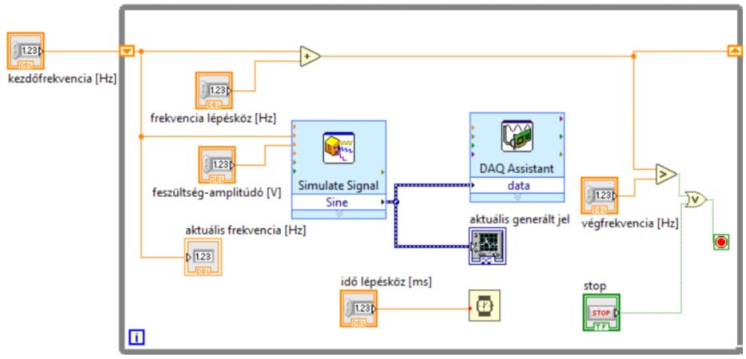
A mérés vezérlése

A mérést vezérlő programot (virtual instrument, VI) az NI LabView programban készítettük el. A mérés számítógépes vezérlőfelülete két részből áll: a jelgenerátorból és a hangdetektorból. A vezérlő felület a *4. ábrán* látható. A jelgenerátor funkciója, hogy a myDAQ eszköz analóg kimenetén fokozatosan növekvő frekvenciával szinuszos feszültségjelet adjon ki (a határok, a lépésközök és az amplitúdó beállítható). A jelgenerátor blokkdiagramja a *5. ábrán* látható. A hangdetektor vezérlő felületén egyrészt megjelenik az aktuális hangjel a bal oldali grafikonon, valamint kijelzésre kerül a detektált hang amplitúdója az idő függvényében a jobb oldali grafikonon. Az amplitúdót a LabView programba beépített jelfeldolgozó eszköz felhasználásával állapítjuk meg. Az említett két kijelző valójában inkább csak tájékozódási célt szolgál, a jel érdemi feldolgozása a mérés elvégzése után történik. Ehhez a hangdetektor virtuális eszköze szövegfájlok-

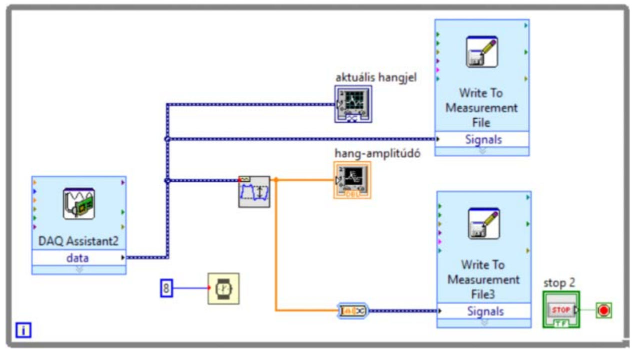
4. ábra. A mérést vezérlő virtuális eszköz vezérlő felülete.



ba menti a hangjelet (feszültség-idő függvény értéke a mintavételezett pontokban), valamint az amplitúdó-idő függvény meghatározott értékeit. A hangdetektor blokkdiagramja az *6. ábrán* látható.



5. ábra. A jelgenerátor blokkdiagramja.



6. ábra. A hangdetektor blokkdiagramja.

A mérés és a kiértékelés menete

A mérés kezdetekor – a rúd megpendítéskor hallatott hangja alapján – megbecsültük a rezonanciafrekvenciáját, amely körülbelül 2000–3000 Hz közé adódott. Ezután először az 1 Hz és 6000 Hz közötti tartományt pásztáztuk végig 1 Hz és 100 ms lépésközzel. A kísérletnél hallottuk, valamint az amplitúdóadatokon is látszott, hogy a csúcs 2350 Hz körül volt, ezért ennek környezetét részletesebben is megvizsgáltuk (2300–2400 Hz között, 0,1 Hz és 10 ms lépésköz). Mivel a kimeneti adatok eredetileg az idő függvényében mutatják a mért értékeket, ezeket át kellett számolnunk, hogy a frekvencia függvényében tudjuk megadni őket. Ezt az alábbi összefüggés alapján tudtuk megtenni:

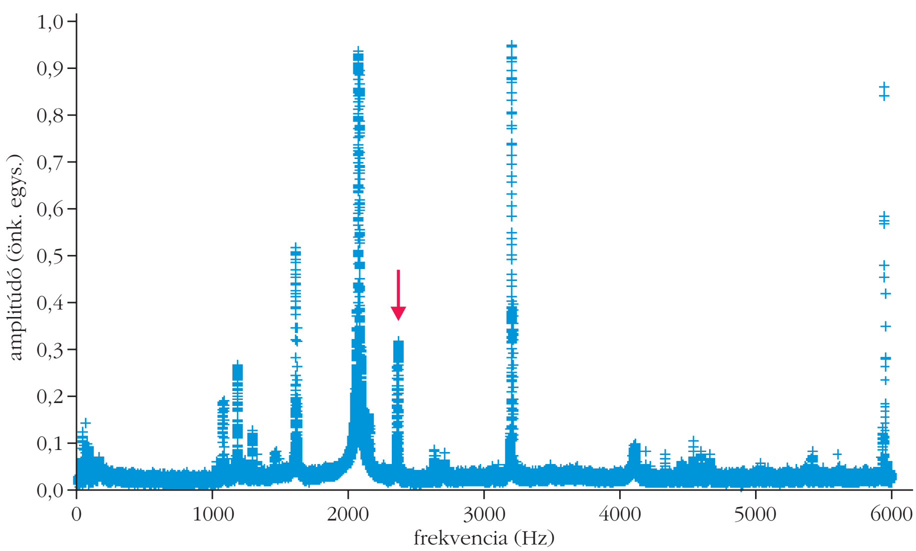
$$\nu(t) = \nu_0 + \frac{\Delta\nu}{\Delta t}\, t,$$

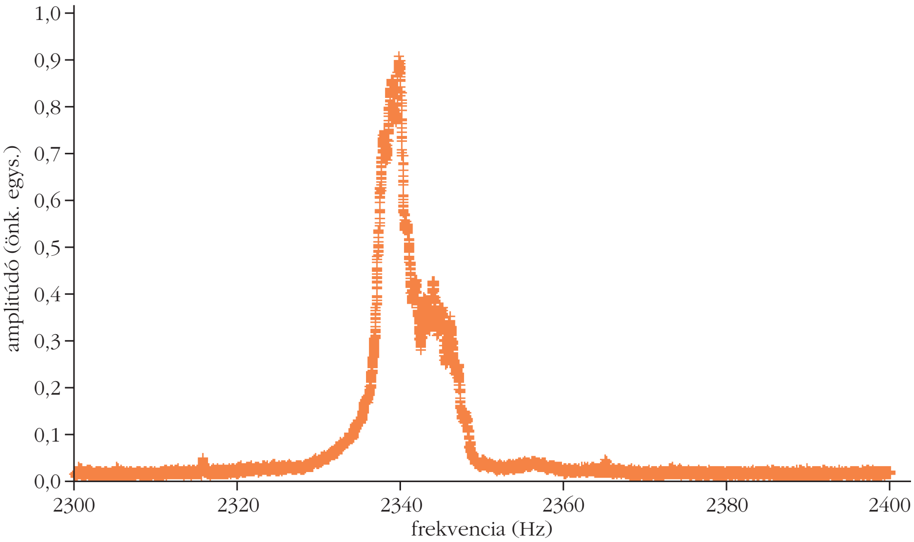
ahol ν a frekvencia, ν_0 a kezdeti frekvencia, $\Delta\nu$ a frekvencialépés nagysága, Δt a frekvencialépés idejének hossza, t pedig az eltelt idő, a frekvenciák Hz-ben, az idők s-ben mérve.

Az amplitúdót a frekvencia függvényében ábrázolva a csúcs helyzete 1 Hz lépésköznél néhány Hz, 0,1 Hz lépésköznél körülbelül 1 Hz pontossággal állapítható meg. A kapott grafikonok az *7.* és az *8. ábrán* láthatók. (Az ábrák Gnuplotban készültek, de középiskolában Excelben is hasonlókat lehet készíteni, ami a diákok számára lehetővé teszi a csúcs helyének egyszerű meghatározását is.) A *7. ábrán* látható négy legnagyobb csúcs, valamint néhány kisebb csúcs nem a rúd gerjesztéséből származott, azokat más alkatrész gerjedése, illetve háttérzörej okozta, így azokkal a továbbiakban nem foglalkoztunk. A mérések alapján a rúd rezonanciafrekvenciája 2343 Hz-nek adódott, itt érzékeltük a legnagyobb intenzitású (amplitúdójú) hangot.

A 2343 Hz rezonanciafrekvenciánál azt várjuk, hogy a rúd közelítőleg ezen a frekvencián fog rezegni, tehát a hang (legerősebb) frekvenciája is ennyi lesz. Ezt Audacity programmal állapítottuk meg. Állandó frekvenciájú gerjesztést alkalmaztunk a meghatározott rezonanciafrekvencián, ezzel párhuzamosan Audacity programmal rögzítettünk egy rövid felvételt, aminek egy viszonylag tiszta szakaszán felvettük a frekvenciaeloszlást (*Elemzés → Spektrum ábrázolása…*). Az eredmény a *9. ábrán* látható. A csúcs 2344 Hz-nél mérhető, ami hibahatáron belül valóban megegyezik a gerjesztési frekvenciával. A kísérlet során érdekes volt megfigyelni, hogy a rúd sajátrezgése a rezonanciafrekvencia 1/2, 1/4, 1/6, 1/8 részének megfelelő nagyságú frekvenciával is gerjeszthető, egyre kisebb mértékben.

7. ábra. Az amplitúdó – gerjesztési frekvencia függvény 0–6000 Hz tartományban. A legerősebb rezonancia a 2350 Hz környéki csúcsnál következett be (lásd a nyilat). A csúcsok magassága kevéssé informatív, mivel a kísérlet során az áramerősség sem volt teljesen állandó (fokozatosan csökkent) és háttérzajok is zavarták a mérést.





8. ábra. Az amplitúdó – gerjesztési frekvencia függvény 2300–2400 Hz tartományban, a rezonanciacsúcs körül (0,1 Hz, illetve 10 ms lépésköz).

Továbbfejlesztési lehetőségek

A kísérlet kidolgozásánál arra törekedtünk, hogy a technikai háttér ne szorítsa háttérbe a fizikai tartalmat. Éppen ezért több fejlesztési út maradt nyitva a méréssel kapcsolatban, amely az érdeklődő diákok számára további lehetőségeket nyújthat. Ilyen lehet a mérés minél teljesebb automatizálása a VI-n belül, a segédberendezések (például jelerősítő) helyettesítése az eszköz segítségével, vagy a mérés elvének adaptálása hasonló jellegű fizikai problémákra (például impedancia alakulása összetett áramkörben különböző körfrekvenciák esetén).

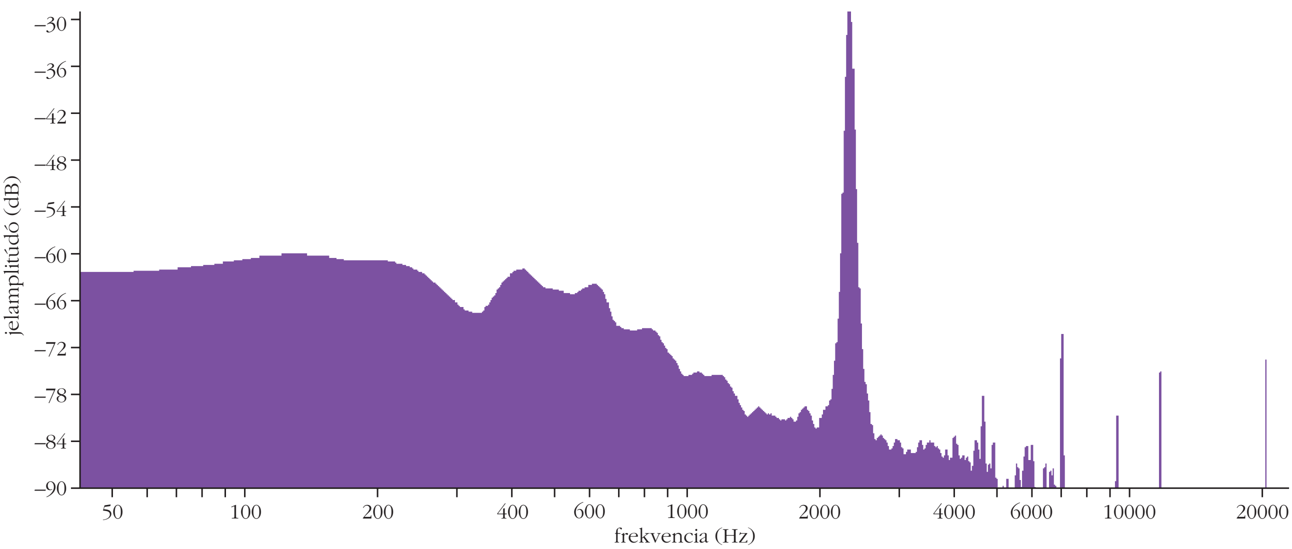
Összegzés

Összefoglalásként elmondhatjuk, hogy a kísérlet fizikai szempontból sikeres volt: sikerült előidézni és megvizsgálni a megfelelő frekvenciával váltakozó mágneses tér hatására kialakuló rezonanciát a ferritrúdban. Szakmódszertani szempontból is eredményesnek gondoljuk a projektet: sikerült kidolgoznunk egy olyan kísérletet-mérést, amely fakultációs csoportban vagy szakkörön tanulói mérésként alkalmazható, alapórán pedig tanári kísérletként bemutatható. Azt gondoljuk, hogy némi időráfordítással a középiskolás tanuló is könnyedén megbarátkozhat az eszközzel és a programmal. Úgy igyekeztünk integrálni az eszközt a kísérleti összeállításba, hogy ne pusztán egy amúgy is elérhető laboreszközt helyettesítsünk vele, hanem általa valóban funkcionális többletet vigyünk a mérési összeállításba.

Irodalom

1. http://sukjaro.eu/ELFT-NI-palyazat/2019-20/PMunkak/index.html
2. 2020. évi IYPT feladatok (nem hivatalos magyar fordítás), http://hypt.elte.hu/wp-content/uploads/2019/10/IYPT-probl%C3%A9m%C3%A1k-2020.pdf (letöltve: 2020.01.25.)
3. A felhasznált fényképek saját készítésűek, illetve a LabView és az Audacity programban készült képernyőképek.

9. ábra. A mikrofonnal vett hang frekvenciaeloszlása rezonanciafrekvenciával (2343 Hz) történt gerjesztéskor. A csúcs 2344 Hz-nél mérhető.



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-postacíme: elft@elft.hu
Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtitkár, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.
Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt 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: 1000.- Ft (duplaszámé 2000.- Ft) + postaköltség.
HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588–0540** (online)

A LENDÜLET ÉS A PERDÜLET ÖSSZEFÜGGÉSE A LORENTZ-TRANSZFORMÁCIÓVAL

Kuczmann Imre
Nádasi Ferenc Gimnázium, Budapest

A kvantummechanikában a lendület valamely irányú összetevőjét a hullám adott irányban vett térfüggése határozza meg. Az x összetevő például a $\partial\psi/\partial x$ deriválttól függ. Forgó mozgás esetén, polárkoordináták használata mellett a perdület z tengelyre eső összetevőjét a $\partial\psi/\partial\varphi$ derivált, vagyis a hullám φ polárszög mentén megfigyelhető viselkedése határozza meg [1]. A lendület és perdület szempontjából tehát a hullám térbeli „formája” a mérvadó. Az alábbiakban azzal foglalkozunk, hogy ez a forma a Lorentz-transzformáció esetén – áttérve egy másik vonatkoztatási rendszerre – miként változik.

Ha a hullám különböző pontjai között valamely vonatkoztatási rendszerben nincs fáziskülönbség, akkor azt hihetnénk, hogy egy másik, az előzőhöz képest mozgó vonatkoztatási rendszerben sincs. Ez esetben egy állóhullám egy másik vonatkoztatási rendszerben is állóhullám lenne, legfeljebb a relatív sebességnek megfelelően tolódna. Csakhogy a relativitáselmélet transzformációs képletei egyszerre transzformálják a tér és az idő koordinátáit, ez pedig az egyidejűség relativitásának megjelenéséhez vezet. Ha a rezgések valamely vonatkoztatási rendszerben mindenütt azonos fázisban is zajlanak, egy hozzá képest mozgó vonatkoztatási rendszerben ez nem lesz így.

Az egyidejűség relativitásának következményeivel a haladó és a forgó mozgás esetén is számolhatunk. Egy állóhullámból a megszokott Lorentz-transzformációval valódi haladó hullámot kapunk, de a forgó mozgáshoz is konstruálhatunk olyan transzformációs képleteket, amelyek a hullám ilyen jellegű átalakulását eredményezik. A transzformációk követésével közelebb kerülhetünk a de Broglie-hullám értelmezéséhez, forgó mozgás esetén pedig a perdület adagos jellegének mechanizmusát is megfigyelhetjük.

Transzformáció egyenesvonalú egyenletes mozgás esetén

Tekintsük át, hogyan transzformálják a megszokott

$$x' = \frac{x - v\,t}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} \quad \text{és} \quad t' = \frac{t - \dfrac{v\,x}{c^2}}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} \tag{1}$$

Lorentz-transzformációs képletek (x a helykoordináta, t az idő az eredeti, K vonatkoztatási rendszerben, x' és t' a K-hoz képest v sebességgel mozgó K' rendszerben, c a fénysebesség) a

$$\Psi = A\sin(\omega t) \tag{2}$$

függvényt, amely valamilyen mennyiség harmonikus változását fejezi a K vonatkoztatási rendszerben. A függvényt az egész teret kitöltő konstans amplitúdójú (végtelen hullámhosszúságú) állóhullám megadásának is tekinthetjük. Valójában az érdekelhetne bennünket, hogy egy összetettebb, Compton-hullámhosszal jellemezhető hullámtér hogyan transzformálódik, de (2) transzformációjával is fontos információt kapunk a de Broglie-hullámokról.

A K' rendszerben akkor látjuk a rezgések térfüggését tisztán, ha egy adott t' pillanatban készítünk felvételt, vagyis a K' rendszerben egyidejű eseményeket vizsgálunk. Belátható, ha a (1)-ben a t koordinátát növeljük, akkor ugyanannál a t' koordinátánál, rezgések esetén pedig ugyanannál a fázisnál akkor maradunk, ha a

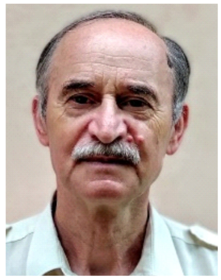
$$\frac{v\,x}{c^2}$$

tagban is egy megnövelt x koordinátát veszünk. Ha a K rendszerben T periódusidővel növelt $t+T$ időpontra térünk át, akkor K'-ben az azonos fázis megtartásához egy olyan $x+\Delta x$ koordinátájú helyre kell áttérnünk, ahol teljesül a

$$T = v\frac{\Delta x}{c^2}, \quad \text{azaz a} \quad \Delta x = T\frac{c^2}{v} \tag{3}$$

feltétel. A K' rendszerben a szomszédos, azonos fázisú helyek egymástól való távolságát keressük, ez jelent λ' hullámhosszat.

A transzformációs képletekkel azt vizsgáljuk, hogy az (x, t) adatokkal és az $(x+\Delta x, t+T)$ adatokkal adott eseménypár hogyan jelenik meg a K' rendszerben. Tekintettel (3)-ra, (1) alapján ezek az események a K' rendszer



Kuczmann Imre 1982-ben Pozsonyban diplomázott matematika–fizika szakos tanárként a Comenius Egyetemen, 2000-ben szintén Pozsonyban gazdasági informatikai diplomát szerzett a Közgazdasági Egyetemen. 2008 óta magyarországi középiskolákban tanít. 2019-ben PhD fokozatot szerzett az Eötvös Loránd Tudományegyetemen a Fizika Tanítása Doktori Iskola programjában a tanulói tévképzetek témakörében. GeoGebra-szimulációkat készít, amelyekkel a fizika egyes témaköreinek elsajátítását segíti.

$$\frac{x - v\,t}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}\,, \quad \text{illetve} \quad \frac{x - v\,t + \dfrac{c^2\,T}{v} - v\,T}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} \tag{4}$$

koordinátájú pontjába transzformálódnak.

Távolságuk

$$\lambda' = \frac{\dfrac{T\,c^2}{v} - v\,T}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} = T\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\,\frac{c^2}{v}, \tag{5}$$

ahol a

$$T' = T\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

szorzat a K' rendszerben mérhető lecsökkent periódusidő (K'-ben nagyobb a konstans x' helyen tapasztalható frekvencia, mint a K rendszerben a konstans x helyen tapasztalt frekvencia). A K' rendszerben az azonos fázisú helyek fázissebességgel mozognak, (3)-ból és (5)-ből pedig látjuk, hogy ez a sebesség c^2/v.

Az eddigiekből az látszik, hogy egy (2)-vel megadott egyszerű függvény hogyan transzformálódik Lorentz-transzformációval. De ha (5)-be egy m_0 nyugalmi tömegű kvantum

$$\frac{h}{m_0\,c^2}$$

periódusidejét helyettesítjük és figyelembe vesszük az

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$$

összefüggést, a

$$\lambda' = \frac{h}{m_0\,c^2}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\,\frac{c^2}{v} = \frac{h}{m\,v} \tag{6}$$

de Broglie-hullámhosszat kapjuk (általános, relativisztikus esetben). Ebből látható, hogy a de Broglie-hullámra, mint valamilyen állóhullám relativisztikus transzformáltjára tekinthetünk. (5) alapján rögzíthetjük a

$$\lambda' = T'\,\frac{c^2}{v} \tag{7}$$

összefüggést. A c^2/v fázissebesség csak a K és K' rendszerek egymáshoz viszonyított v sebességétől (és a fénysebességtől) függ, és mivel $v < c$, a fázissebesség nagyobb, mint a fénysebesség. Felírhatjuk, hogy

$$v_f v = c^2, \tag{8}$$

vagyis a fázissebesség és a két vonatkoztatási rendszer egymáshoz viszonyított v sebességének szorzata c^2 (lásd [2]-ben is).

Mérlegelésünkben a v sebességet olyan kvantum „haladási” sebességének tekinthetjük, amely a K rendszerben van nyugalomban, a K' rendszerben pedig v sebességgel mozog. Ilyenkor általában csoportsebességről beszélünk, de esetünkben nem foglalkoztunk különböző hullámhosszúságú hullámokból összetett hullámcsomaggal. A „kvantum” szóba egyébként valamilyen véges kis térfogatot kitöltő képződmény fogalmát nem célszerű beleérteni.

A K és K' rendszerekben zajló történések közti különbséget olyan ábrával szemléltethetjük, amely egy végtelen hullámhosszúságú állóhullám K' rendszerbe való transzformációját mutatja (*1. ábra*). Ez a transzformáció egy általam készített GeoGebra-szimulációban is tanulmányozható [3]. A kép felső felében egy konstans függvény „rezeg”, az alsó felében pedig e függvény K' rendszerből szemlélt képét látjuk, mint haladó de Broglie-hullámot.

A K rendszerben meglévő állóhullám K' rendszerbeli hullámmá való „gyűrődése” az egyidejűség relativitása nélkül nem lépne fel. (7)-ből látjuk, hogy ha a v sebesség a nullához tart, akkor a fázissebesség a végtelenhez tart és megszűnik a különböző helyeken fellépő rezgések közt a fáziskülönbség, visszakapjuk a végtelen hullámhosszat.

A de Broglie-hullám frekvenciája

$$\nu' = \frac{\nu_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}.$$

A $h\nu'$ szorzat a kvantum K'-beli energiája. A K rend-

1. ábra. A K rendszer végtelen hullámhosszúságú állóhulláma a [−1; 1] függvényértékek között rezeg, a K' rendszerben viszont ezt haladó hullámként látjuk.

szerben csak az időbeli periodicitásnak megfelelő $h\nu_0$ nyugalmi energia van jelen, a K' rendszerben viszont a $h\nu' = \hbar\omega'$ energia mellett a $k' = 2\pi/\lambda'$ hullámszámmal leírható térbeli periodicitás és a neki megfelelő hk' lendület (impulzus) is. Az energia és impulzus együtt négyesvektort alkot. Az $(\omega'/c;\ k')$ négyes hullámszám az $(\omega_0/c;\ 0)$ négyes hullámszám relativisztikus transzformáltja. Számítással ellenőrizhetjük, hogy ezek azonos nagyságú vektorok. Belőlük Planck-állandóval való szorzás után az $(E'/c;\ p')$ négyesimpulzus kapható, amelynek nagyságát az

$$E'^2 - p'^2\, c^2 = m_0^2\, c^4 \tag{9}$$

összefüggés mutatja gyökvonás után (bal oldalon a pszeudoeuklidészi metrika miatt a négyzetek különbsége van). A négyesimpulzus nagyságában a kvantum m_0 nyugalmi tömege szerepel. Ez a transzformáció során nem változik, ez az invariáns tömeg.

A kvantumot az ő nyugalmi rendszerében csak három dimenzióban működő sajátdinamika jellemezheti, amely az adott kvantum sajátságait hordozza és a kvantum létezési módját is tükrözi. Egy geometriai pont nem foglalhatja magában a teljes kvantumot, egy pontban legfeljebb azt követhetjük, hogy a kvantum dinamikája ott milyen tér- és időbeli változásokkal jár. A pontszerűség végtelen energiasűrűséget jelentene, ami a fizikában nem megengedett. Egy kvantum teljes hatása esetenként igen kis tartományban is jelentkezhet, de ez nincs ellentmondásban a hullámjelleggel.

A kvantumok hullámjellegének elsődlegességére a kvantumelmélet jellegéből is következtethetünk. A részecskejelleg a kvantumok megszámlálhatóságában és változatlan formában való reprodukálhatóságában merül ki (nem állíthatunk elő harmad vagy negyed elektront), de ez a részecskejelleg nem jár valamiféle véges mérettel vagy pontszerűséggel. A „részecskék” pontszerűségének gondolatától *Dirac* is elzárkózott [4].

Transzformáció egyenletesen forgó rendszerbe

Felmerül a kérdés, milyen formában jelentkezik a K inerciarendszert állóhullámként kitöltő tér olyan K' vonatkoztatási rendszerben, amely a K rendszerhez képest egyenletesen forog például a z tengely körül. Ez a forgás az x és y koordinátát érinti.

Jelentsen a (2) függvény csomófelületektől mentes háromdimenziós állóhullámot a K rendszerben. Ψ csak az időtől függ, a térkoordinátáktól nem. A K' rendszer szögsebessége legyen Ω, az O és O' kezdőpontok végig essenek egybe. A vonatkoztatási rendszerek egymáshoz viszonyított helyzetét mérjük a φ azimutszöggel. Mivel a z tengely mentén nem történik változás, a valóságnak csak egy „szeletét” vizsgáljuk, mintha csak kétdimenziós rezgést transzformálnánk.

A haladó mozgások esetén érvényes (1) transzformáció mintájára a transzformációt a

$$\varphi' = \frac{\varphi - \Omega\, t}{\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}} \quad \text{és a} \quad t' = \frac{t - \dfrac{r^2\,\Omega\,\varphi}{c^2}}{\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}} \tag{10}$$

képletekkel végezzük (nézzük a hasonló képletet [2]-ben, de hasonlítsuk össze [5] 2. fejezetével is). Az előzőekhez hasonlóan két eseményt transzformálunk, most az origótól adott r távolságban megfigyelt

$$(\varphi,\ t) \text{ és } (\varphi + \Delta\varphi,\ t + T)$$

eseményeket. Azt keressük, hogy a K' rendszerben mekkora $\Delta\varphi'$ szög választja el a szomszédos, azonos fázisú rezgéseket hordozó irányokat. A K' rendszerben egyidejű eseménypárt kell kapnunk.

Ahhoz, hogy a $(\varphi+\Delta\varphi,\ t+T)$ és $(\varphi,\ t)$ események egyidejű eseményekbe menjenek át, (10) alapján teljesülnie kell a

$$T = \frac{\Delta\varphi\, r^2\,\Omega}{c^2}, \quad \text{azaz a} \quad \Delta\varphi = T\frac{c^2}{r^2\,\Omega} \tag{11}$$

összefüggésnek. Az origótól adott r távolságban megfigyelt $(\varphi,\ t)$ és $(\varphi+\Delta\varphi,\ t+T)$ esemény (10) alapján a

$$\frac{\varphi - \Omega\, t}{\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}} \quad \text{és a} \quad \frac{\varphi + \Delta\varphi - \Omega\,(t + T)}{\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}}$$

szögkoordinátájú pontba transzformálódik. Az eltérésük, tekintettel (11)-re,

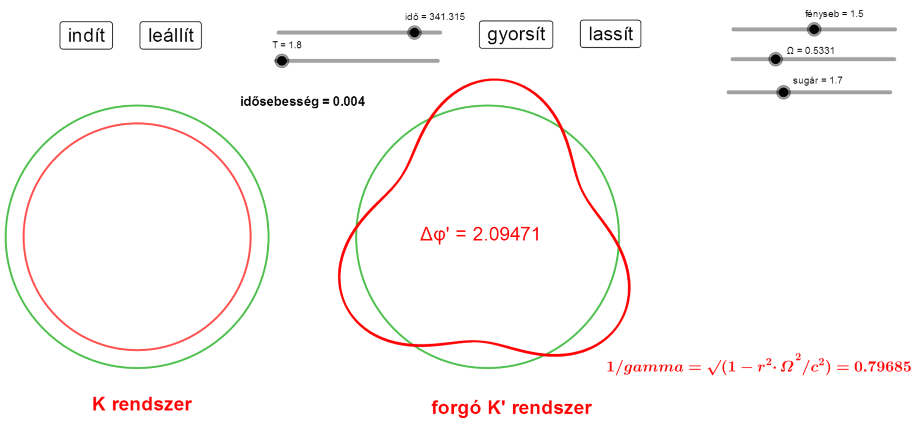
$$\Delta\varphi' = \frac{\Delta\varphi - \Omega\, T}{\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}} = \frac{T\dfrac{c^2}{r^2\,\Omega} - \Omega\, T}{\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}} =$$

$$= \frac{T\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}\; c^2}{r^2\,\Omega}.$$

Rögzíthetjük, hogy egy elkészített pillanatfelvételen a K' rendszerben az azonos fázist hordozó irányok szögeltérése

$$\Delta\varphi' = T c^2\,\frac{\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}}{r^2\,\Omega}. \tag{12}$$

A (12) összefüggés úgy ad meg mérőszámot a forgás hatására fellépő fáziskülönbségekre (gyűrődésre), mint a (6) összefüggés haladó mozgás esetén. A fáziskülönbségek akkor is megjelennek, ha a $\partial\psi/\partial\varphi$ derivált értéke a K rendszerben mindenütt nulla volt (a transzformált függvény értékei nem függöttek φ-től).



2. ábra. Rezgések transzformációja forgó vonatkoztatási rendszerbe.

Nézzük, mi történik, ha a K rendszerben a rezgések olyan

$$T = \frac{h}{m_0\, c^2}$$

periódusidővel zajlanak, ami egy kvantum nyugalmi frekvenciájának felel meg. A (12)-be való behelyettesítés $v = \Omega r$ és

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$$

figyelembevételével a

$$\Delta\varphi' = \frac{h}{m_0\, c^2}\, c^2\, \frac{\sqrt{1 - \dfrac{r^2\,\Omega^2}{c^2}}}{r\,v} = \frac{h}{m\,v\,r} = \frac{h}{L'} \qquad (13)$$

eredményt adja, ahol L' a K' rendszerben mérhető perdület (lásd [6]-ban a (29) képletet). Erre a haladó mozgásoknál érvényes $\Delta x' = \lambda' = h/p'$ képlet mintájára számíthattunk is. A $\Delta\varphi'$ szögeltérés a forgó K' rendszer adott t' pillanatban rögzített „pillanatfelvételén” lenne látható, ezt mutatja a *2. ábra* [3] alapján.

A K rendszerben a különböző φ szögkoordinátájú helyek közt nincs fáziskülönbség (a program egy lüktető kört mutat), a K' rendszerben viszont fáziskülönbségek jelennek meg a (10) transzformáció eredményeként, miközben a hullám forgást is végez. $\Delta\varphi'$ nagysága a két vonatkoztatási rendszer egymáshoz képest mért Ω szögsebességétől függ (állandó r esetén). Egyértelmű fázis a K' rendszerben csak bizonyos kitüntetett Ω szögsebességek beállításával kapható. Ilyenkor $\Delta\varphi'$ teljesíti a

$$\Delta\varphi' = \frac{2\pi}{n}, \qquad n = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \text{ stb.} \qquad (14)$$

feltételt, ami annak kifejeződése, hogy K' rendszerben a fázis 2π szögű körülfordulás után a kiindulási értékbe tér vissza. A transzformáció eredményeként előálló (13) és (14) összefüggések együtt az impulzusmomentum kvantáltságát jelentik, hiszen

$$\frac{2\pi}{n} = \frac{h}{L'}, \quad \text{illetve} \quad L' = n\frac{h}{2\pi}. \qquad (15)$$

Szoros összefüggés van tehát a forgó vonatkoztatási rendszerbe vivő (10) transzformáció sajátságai és az impulzusmomentum kvantáltsága közt.

A *2. ábrán* a K' rendszerben $n = 3$ periódus látható ($\Delta\varphi' = 2{,}09471 \approx 2\pi/3$), amely alkalmas Ω szögsebesség mellett áll elő. Más alkalmas szögsebességek esetén más természetes n-nek megfelelő képhez jutunk. Adott r sugár mellett minél nagyobb az Ω, annál több periódusból áll a „stabil” hullámtér. A (14) összefüggés teljesítésével nem együtt járó szögsebességek esetén a K' rendszerben nem egyértelmű a fázis, önmagát zavaró a hullámtér.

Mivel egy fordított (forgó vonatkoztatási rendszerből inerciarendszerbe történő) transzformációnál hasonló viszonyokra számíthatunk, a kapott megkötést úgy is megfogalmazhatjuk, hogy egy inerciarendszerhez képest forgó vonatkoztatási rendszerben csak olyan frekvenciájú rezgések lehetnek jelen, amelyek jól illeszkednek a forgó rendszer szögsebességéhez. Jól mutatja ezt az, hogy amikor a szimulációban a T periódusidőt megváltoztatjuk, az állandósult hullámtér széthangolódik.

Összefoglalás

Leírásunkban a de Broglie-hullám, mint a kvantum nyugalmi vonatkoztatási rendszerében lévő állóhullám relativisztikus transzformáltja jelenik meg (a vonatkoztatási rendszerek kis relatív sebessége esetén is). A gondolatmenet haladó mozgások esetén a de Broglie-hullámhosszat szolgáltatja tetszőleges $v < c$ sebességre. Egyenletesen forgó vonatkoztatási rendszerre áttérve követhető, hogy a hullámtérben jelentkező fáziskülönbségek csak akkor osztói 2π-nek, ha a forgás szögsebessége jól illeszkedik a K rendszerben felvett frekvenciához. Egy kvantum nyugalmi frekvenciáját felhasználva ilyenkor a $h/2\pi$ mennyiség egész számú többszöröseit kapjuk, érzékelve a perdület kvantáltságának mechanizmusát.

Irodalom

1. Gombás P., Kisdi D.: *Bevezetés az elméleti fizikába, 2. kötet.* Akadémiai Kiadó Budapest, 1971.
2. D. Dieks, G. Nienhuis: Relativistic aspects of nonrelativistic quantum mechanics. *Am. J. Phys. 58/7* (1990) 650.
3. Kuczmann I.: https://www.geogebra.org/m/W3JSsfsF#chapter/508000
4. N. C. Petroni, J. P. Vigier: Dirac’s Aether in Relativistic Quantum Mechanics. *Foundations of Physics 13/2* (1983) 253–286.
5. L. Hsu, Jong-Ping Hsu: *Exact Rotational Space-time Transformations, Davies-Jennison Experiments and Limiting Lorentz–Poincaré Invariance.* arXiv:1307.0662v1 [gr-qc] 2 Jul 2013.
6. R. D. Klauber: *New Perspectives on the Relativistically Rotating Disk and Non-time-orthogonal Reference Frames.* arXiv:gr-qc/0103076 22 Mar 2001.

MIT IS CSINÁL A SÍKTÜKÖR A JOBB MEG A BAL OLDALLAL?

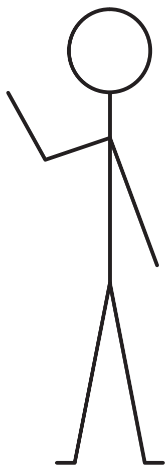
Siposs András
ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium

A folyóirat már többször foglalkozott az iskolai tankönyvekben elterjedt azon közkeletű állítással, hogy „a síktükör a jobb és a bal oldalakat felcseréli”. Legutóbb *Holics László* tanár úr írt arról (szellemes ábrákkal), miért helytelen ez az állítás. (Amit *Zátonyi: Fizika 8.* OFI-kiadású könyvéből vett idézettel szemléltetett. Érdekes, hogy az idézett szöveg *szó szerint ugyanúgy* szerepel *Dégen–Elblinger–Simon: Fizika 11.* emelt szintű, szintén OFI-s tankönyvében, képpel is illusztrálva. Ez az újkeletű, központosított tankönyvírással kapcsolatban vet fel – például szerzői jogi – kérdéseket, de nem ez a jelen cikk témája.)

Valljuk be, a hétköznapi tapasztalatunk hajlik elfogadni ezt az oldalfelcserélős állítást – de ha helytelen, akkor miért része ennyire a közvélekedésnek? Gondoljuk tovább a helyzetet! Ha a tükör előtt álló ember felemeli az egyik (például a bal) kezét, a tükörképe (látszólagos kép!) pedig (látszólag, azaz „úgy látjuk”) a másikat (a jobbat).

Mi okozza ezt a képzetet?

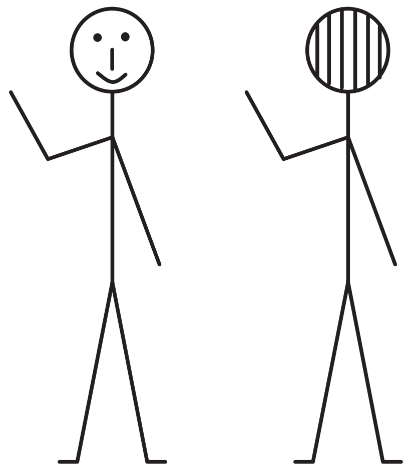
Nézzünk az egyszerű *1. ábrát:* melyik kezét emelte fel ez a pálcikaemberke?



1. ábra. Melyik kezét emeli ez a pálcikaemberke?

Amíg ennyire stilizált a rajz, nem tudunk válaszolni. Hiszen válaszunk attól függ, hogy az emberkét elölről vagy hátulról látjuk. A bal–jobb irány ugyanis csak ahhoz képest értelmezhető, hogy „merre van előre”. Ha az emberkének arcot vagy éppen hajat rajzolunk, már el tudjuk dönteni a kérdést (*2. ábra*).

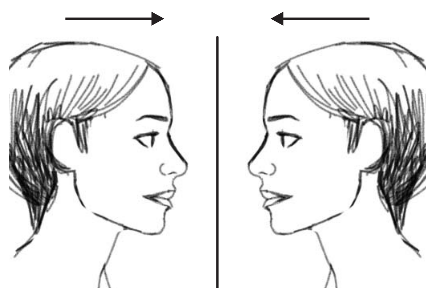
Épp ez okozza a síktükör leképezésének eme furcsaságát. A tükör ugyanis *valójában az „előre–hátra” irányt fordítja meg!* Mivel ehhez viszonyítjuk a „bal–jobb” oldalakat, ezért látszanak ezek felcserélődni.



2. ábra. Az elől-hátul tudtával a bal-jobb kérdése már eldönthető.

(Miközben a „lent–fönt” nem ehhez viszonyítódik, ezért azok „nem cserélődnek fel”.)

A matematikában, a geometriában a síktükrözés, mint transzformáció úgynevezett „sodrásváltó” tulajdonságú, ami épp ezt a helyzetet írja le. A síktükrözés egybevágóság, de nem helyettesíthető mozgatással (*3. ábra*): semmilyen mozgás révén sem lehet átvinni a tárgyat a tükörben látott képébe – mint ahogy Holics tanár úr cikkében is a tükörkép „át kellene öltözzön” ahhoz, hogy jobb oldalon zsebes ingben legyen.



3. ábra. A síktükrözés „sodrásváltó” tulajdonságú: a tárgyat semmilyen mozgatással sem lehet átvinni a tükörben látott képébe.

Tanulság: a közérthetőség kedvéért alkalmazott hétköznapi szóhasználat és gondolkodás sokszor leegyszerűsítő, de ez nem feltétlenül jelenti azt minden esetben, hogy „hibás” – csak a tudományos precizitás kielégítéséhez további kiegészítéseket kell tenni. (Amelyekre a hétköznapokban sem idő, sem igény nincs. Mondjuk, egy tankönyv – vagy általában „a” tankönyvek – esetében szerencsésebb volna, ha lenne, de ez messzire, más vizekre vezet. A Műszaki Kiadó *Túlélőkönyv fizikából* című feladatgyűjteményének 886. feladata viszont éppen ezt a kérdést tárgyalja, helyes megközelítésben.)

A *Fizikai Szemle* szerkesztősége ezen írással lezártnak tekinti a síktükörről tavaly indított polémiát.

Siposs András matematika–fizika tanár, sokszoros tankönyv- és példatárszerző, kutatótanár, szaktanácsadó, vezetőtanár, Ericsson-díjas. Emellett dalszerző, aktív zenész, az indián kultúra kutatója, háromgyermekes apuka.

KARANTÉN ALATTI KÍSÉRLETEIM

Bognár Gergely
Révai Mikós Gimnázium és Kollégium, Győr

A koronavírus szülte pandémia 2020 tavaszán az oktatást a tantermekből a digitális térbe kényszerítette. Tudjuk, és mára szinte közhellyé vált, hogy a digitális oktatás hatékonysága messze elmarad a tantermitől, ugyanakkor e nem várt új helyzet olyan módszerek kidolgozására kényszerített bennünket, amelyeket érdemes lehet a mindennapi gyakorlatba átemelni. A digitális oktatásban a hagyományos ismeretátadási és számonkérési formák nem vagy csak kis hatékonysággal használhatók. Belekényszerülve e helyzetbe gondolkodtam el azon, milyen kísérleteket, méréseket, modern pedagógiai kifejezéssel élve, projektfeladatokat tűzhetnék ki a diákok számára, amelyek elvégzésével a kötelező tananyag feldolgozható. Szerencsére az internet világában számtalan jó ötletre bukkanhatunk, köztük e folyóirat korábbi számaiban megjelent kísérleti leírásokra is. Továbbgondolási, ötletindítási szándékkal a következőkben röviden ismertetem az általam kidolgozott és videofelvételen rögzített kísérleteket.

A tanulói mérések elsődleges célja, hogy a diákok megismerjék a jelenségeket és értsék az azokat értelmező fizikai törvényeket. Otthon, önálló projektmunkában elvégzett feladatoknál észszerű kompromisszumot kell kötnünk. Nem a pontosság az elsődleges cél – bár törekedni kell rá –, hanem a feladat elvégzése, így a nagyságrendileg helyes eredmények már elfogadhatók. Értékeléskor nem a számszerűsíthető végeredményeket, hanem a feladat elvégzését, valamint annak során elsajátított ismereteket és kompetenciákat kell figyelembe vennünk.

A konyhai tűzhely melegítési teljesítményének mérése

A közönséges konyhai tűzhely melegítési teljesítményét könnyedén megbecsülhetjük. Ismert $m_{\text{víz}}$ tömegű vagy térfogatú vizet öntünk egy edénybe, megmérjük a víz hőmérsékletét, majd a vizet melegíteni kezdjük, és közben mérjük a víz forrásáig eltelt t időt, a mért adatok, valamint a víz $c_{\text{víz}}$ fajhője és T_2 forráspontjának ismeretében a melegítés P teljesítménye becsülhető [1]:

$$P = \frac{Q}{t}, \tag{1}$$

ahol

$$Q = c_{\text{víz}}\, m_{\text{víz}} \left(T_2 - T_1\right). \tag{2}$$

Fontos megjegyezni, hogy a mérés során a hasznos melegítési teljesítményt kapjuk meg egy adott lábasnál és nem a tűzhely általános teljesítményét. A mérési eredmény ugyanazon tűzhely mellett és különböző körülmények esetén egészen eltérő lehet. A mérés pontosságát javíthatjuk, ha átlátszó fedő alatt végezzük a kísérletet, és ezzel minimalizáljuk a párolgást.

A feladat tetszés szerint tovább fejleszthető. Gáztűzhely esetén ugyanezt a gázlángot hosszabb ideig égetve a gázóra segítségével megmérhetjük a tűzhely fogyasztását, természetesen közben ügyelnünk kell arra, hogy más fogyasztók ne legyenek bekapcsolva. A hosszabb fogyasztási időből egyszerű aránnyal kiszámítható a rövidebb ideig tartó forralás közben elhasznált $m_{\text{gáz}}$ gázmennyiség. Ezek után a földgáz L égéshőjének ismeretében akár a melegítés hatásfoka is becsülhető.

$$Q_{\text{égés}} = L\, m_{\text{gáz}}. \tag{3}$$

Becslés a hatásfokra:

$$\eta = \frac{Q_{\text{melegítés}}}{Q_{\text{égés}}}. \tag{4}$$

Elektromos tűzhely esetén könnyebb dolgunk van, a műszaki leírás tartalmazza a főzőlap teljesítményét, és ennek segítségével a hatásfok már könnyen számítható:

$$\eta = \frac{P_{\text{melegítés}}}{P_{\text{főzőlap}}}. \tag{5}$$

Elektromos vízforraló hatásfokának mérése

Egy vízforraló hatásfokát könnyen megmérhetjük, lényegében az előbb bemutatott mérést ismételjük meg. Ismert mennyiségű és hőmérsékletű vizet töltünk a forralóba, bekapcsoljuk, és közben mérjük az időt, amíg a víz felforr (100 °C-os nem lesz) [2]. (1)-hez hasonlóan:

$$P_{\text{hasznos}} = \frac{Q}{t}. \tag{6}$$

ahol a Q hőmennyiséget a (2)-ben már megadtuk.

Bognár Gergely 2006-ban végzett az ELTE TTK fizikatanári szakán, illetve 2008-ban a PPKE BTK filozófia szakán. Jelenleg a győri Révai Mikós Gimnázium és Kollégium fizika–filozófia szakos tanára. Érdeklődési területe a fizika és a filozófia határterületei, és a fizika tanításának módszertana, amelyekkel kapcsolatban több publikációja jelent meg.

A vízforralón megtalálható a hálózatból felvett $P_{\text{gyári}}$ teljesítmény, a két teljesítmény aránya – (5) egyenlet analógiájára – megadja a hatásfokot:

$$\eta = \frac{P_{\text{hasznos}}}{P_{\text{gyári}}}. \tag{7}$$

Borospohárból készített gyűjtőlencse

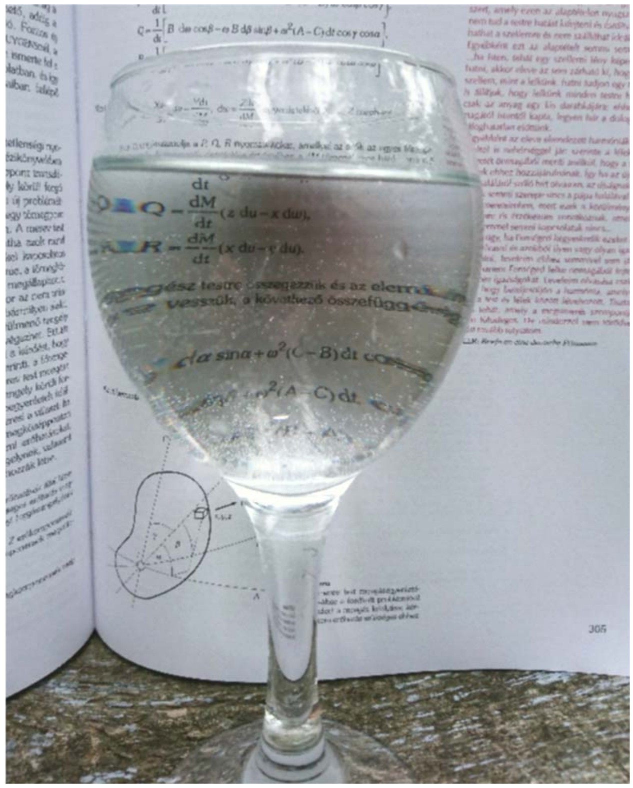
A borospoharak – gömbölyű formájuknak köszönhetően – vízzel töltve gyűjtőlencseként funkcionálnak. Természetesen e poharak nem tökéletesen gömb alakúak, ezért a hagyományos lencsékhez képest torz képet hoznak létre. A kép minőségét tovább rontja az üveg vastagsága, hiszen a víz mellett a pohár falában ki- és belépéskor is megtörik a fény. Mindezek ellenére, ha gömbölyded és nem szögletes formájú üvegeket használunk, a vízzel töltött borospoharak kiválóan alkalmasak arra, hogy segítségükkel a diákok a gyűjtőlencséket közelebbről is megismerjék.

Középiskolában, ahol a lencsék f fókusztávolságát megadó összefüggés, az

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{8}$$

– n a törésmutató, R_1 és R_2 a lencse be- és kilépő oldalának (előjeles) görbületi sugara – a tananyag részét képezi, kitérhetünk arra, hogy a vízzel töltött gömbölyded üvegpohár miért viselkedik gyűjtőlencseként, alsóbb évfolyamokban elegendő a lencse képalkotását megvizsgálni.

Az üvegpohárhoz, mint lencséhez közel helyezett tárgyakról egyenes állású nagyított képeket láthatunk, pontosan úgy, mint egy nagyítóként használt gyűjtőlencse esetén (*1. ábra*). Ha a tárgyat kicsit távolítjuk – a fókusz és a kétszeres fókusz közé helyezzük –, fordított nagyított képet kapunk, míg a kétszeres fókuszon kívüli tárgyakról fordított kicsinyített kép jelenik meg. Jól megfigyelhető, hogy a vízzel töltött borospohár gyűjtőlencseként viselkedik [3].



1. ábra. Gyűjtőlencse borospohárból.

„Diavetítés” borospohárral

A vízzel teli borospohár gyűjtőlencseként alkalmas arra, hogy segítségével képet vetítsünk a falra. A kísérlethez teljes sötétségre van szükség, ezért este sötétedés után, esetleg pincében vagy ablak nélküli szobában érdemes a kísérletet elvégezni. A teljes sötétségre azért van szükség, mert a víz jelentős mennyiségű fényt nyel el, így a keletkezett kép meglehetősen halvány, ráadásul a fent említett okok miatt enyhén torz is. A kísérleti elrendezés a klasszikus diavetítést követi.

Egy égő gyertya és a fehér fal közé helyezzük a vízzel teli borospoharat, majd a gyertya és a fal között addig mozgassuk, amíg a falon meg nem jelenik a gyertya nagyított, fordított képe! A vízzel töltött pohár fókusztávolsága – erőteljes görbültsége miatt – nagyon kicsi, ezért a poharat a gyertya közelében elhelyezve kell a képet keresnünk. A másik, kicsinyített kép, amely a falhoz közeli pohár esetén jönne létre, sajnos nehezen megfigyelhető a pohár torzító hatása miatt. Fontos, hogy a pohár gömbölyű, vízzel teli része és a gyertya lángja egy magasságban legyen [4].

A kísérlet tovább bővíthető, ha a gyerekek lemérik a k kép (pohár–fal) és a t tárgy (pohár–gyertya) távolságokat, majd az

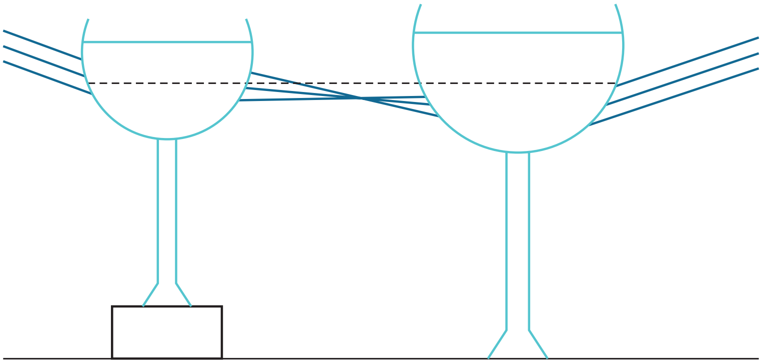
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{k} + \frac{1}{t} \tag{9}$$

leképezési törvény segítségével becslést adnak a pohár f fókusztávolságára:

$$f = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{t}}. \tag{10}$$

Kepler-féle távcső készítése borospoharakból

Ismeretes, hogy két különböző fókusztávolságú gyűjtőlencse segítségével Kepler-féle távcső készíthető. A nagyobb fókusztávolságú lencsét (az objektívet) helyezzük előre, míg a kisebb fókuszút (az okulárt) hátra úgy, hogy a lencsék közötti távolság a két lencse fókusztá-



2. ábra. Kepler-féle távcső készítése borospoharakból.

volságának összege legyen (*2. ábra*). A lencsékbe az okuláron keresztül nézve nagyított fordított állású képet kapunk. Ezt az optikai összeállítást két különböző méretű (fókusztávolságú), vízzel töltött borospohárral is megvalósíthatjuk. A nagyobb fókusztávolságú (nagyobb átmérőjű) poharat tesszük előre, a kisebb fókusztávolságú (kisebb átmérőjű) poharat pedig a szemünk közelébe, ügyelve arra, hogy a poharak azonos magasságban legyenek. A poharakon keresztül egy távoli objektumra tekintve (például kinézve az ablakon) nagyított fordított állású képet láthatunk, pontosan ugyanúgy, mint a Kepler-féle távcsőnél. A kép természetesen nem tökéletes, a széleinél kifejezetten homályos, de a jelenség lényege megfigyelhető [5].

Ha hagyományos gyűjtőlencsék is a gyerekek rendelkezésére állnak (például: nagyítók, olvasószemüvegből kiszerelt lencsék stb.), akkor azokból is készíthetnek Kepler-féle távcsövet, és a keletkezett képet összehasonlíthatják a poharakból készült összeállítással.

3. ábra. A kanál, mint domború tükör.

Mikroszkóp borospoharakból

Két különböző méretű, vízzel töltött borospohárból mikroszkópmodellt is készíthetünk. Lényegében a Kepler-féle távcsőmodellünket kell megfordítanunk, azaz a tárgyhoz közeli lencse legyen a kisebb fókuszú, és a két „lencsét”, poharat kicsit messzebb helyezni egymástól, majd a tárgyak és a poharak helyzetét addig változtatjuk, míg fordított állású, nagyított képet nem kapunk. Tárgyként apróbetűs papírlapot célszerű használni, mert a fordított, nagyított képünk a tökéletlen lencsék miatt torz lesz, de a betűk még eltorzulva is könnyen felismerhetők. Az iménti kísérlethez hasonlóan, ha a gyerekeknek gyűjtőlencsék is a rendelkezésükre állnak, akkor azokkal is megvalósíthatják a modellt, esetleg az egyik poharat gyűjtőlencsére cserélhetik.

A kanál, mint domború és homorú tükör

Az egyszerű kanál domború és homorú tükörként is használható. Fontos, hogy gömbcikkelyhez hasonló és ne különleges formájú kanalat válasszunk, valamint a felszínük fényes és tükröző legyen.

A kanál domború felét szemünk elé fordítva – a távolságtól függetlenül – kicsinyített egyenes állású képet látunk benne, pontosan úgy, mint a domború tükörnél (*3. ábra*). Ha megfordítjuk a kanalat és ujjunkat a kanál előtt mozgatjuk, a homorú tükörre jellemző képalkotást figyelhetjük meg. Közvetlenül a kanál közelében egyenes állású képet láthatunk. Ujjunkat kicsit távolítva – a fókuszpont környékén – ujjunk „képe” teljesen betölti a kanalat, ezt követően a kép megfordul. A kétszeres fókuszig nagyított fordított képet láthatunk, utána kicsinyített és fordítottat [6]. A kanál természetesen nem tökéletes gömbcikkely, ezért a benne látható kép torz, érdemes azt is megfigyelni, hogy a függőlegesen és vízszintesen tartott kanál másképpen torzítja a képet. Ügyes és érdeklődő diákok akár meg is magyarázhatják az iménti jelenséget.

Hivatkozott videók

1. Tűzhely hatásfokának mérése: https://www.youtube.com/watch?v=-Ajn4WPS_68
2. Vízforraló hatásfokának mérése: https://www.youtube.com/watch?v=c805vive1Qc
3. Borospohárból készített gyűjtőlencse: https://www.youtube.com/watch?v=y03ofLzAn9U&t=15s
4. Diavetítés borospohárral: https://www.youtube.com/watch?v=QR0ZQqohB28&t=56s
5. Kepler-féle távcső poharakból: https://www.youtube.com/watch?v=886MQfaHnZU
6. Kanál, mint domború és homorú tükör: https://www.youtube.com/watch?v=QLDjSZNHGQk

ÚTMUTATÓM A FIZIKATANÍTÁSHOZ

Takács László

Takács László (1950–2019) nemrég elhunyt fizikusról folyóiratunk ezen számában olvasható megemlékezés. A soproni Széchenyi István Gimnázium első matematika–fizika tagozatos osztályában érettségizett, ahol a „gimnázium jeles tanárai” között nyilvántartott (https://www.soproniszig.hu/post/152#Auth) *Autheried Éva* (1914–1978) osztályfőnök-szaktanár (http://www.fotomedia.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=14453:autheried-eva-1914-1978-&catid=113:pedagogusok&Itemid=38) keltette fel igazán érdeklődését ezen tárgyak iránt. Országos Középiskolai Tanulmányi Versenyen és a Nemzetközi Fizikai Diákolimpián elért dobogós helyezései után fizikus lett, egy évtizedig aktívan részt vett az itthoni középiskolai tehetséggondozásban (1980 és 1984 között a magyar fizikai diákolimpiai csapat egyik felkészítő tanáraként is), majd az USA-ba távozása után 30 évig tanított egy marylandi egyetemen (UMBC, Baltimore). Fizikatanítással kapcsolatos elképzeléseit 25 évvel ezelőtt fogalmazta meg és ezt adjuk most közre, remélve, hogy gondolatai a mai fizikaoktatásban is hasznosíthatók. Angolból fordította: *Bakonyi Imre.*

✧

A diákok jó része a fizikát nehezebbnek találja az összes többi tárgynál. Amitől a fizika valóban nehéz, de egyúttal izgalmas, kihívást jelentő és szellemi élvezetet nyújtó tárgy, az azon képességek és készségek együttese, amit a fizika eredményes tanulása és sikeres művelése igényel. Nem elég csupán memorizálni a fizikai koncepciókat. Ezeket meg is kell érteni, és sikeresen kell tudni alkalmazni mind ismert, mind szokatlan helyzetekre. Egy probléma megoldásának, legyen az akár tankönyvi vagy valós, azzal kell kezdődnie, hogy kvalitatívan értsük meg a jelenséget, fokozatosan fogalmazzuk meg matematikai eszközökkel egészen addig, amíg a probléma egy jól definiált matematikai feladattá nem válik. Ezután a matematikai feladványt szabatosan – technikailag hibátlanul – meg kell oldani, miközben a formulák fizikai jelentését is szem előtt tartjuk. A matematikai eredményt értelmezni kell, aminek mennyiségi – és a kiindulásihoz képest magasabb szintű – kvalitatív megértéshez kell vezetnie.

Mindez azoban nem egyszerű feladat. Számos képességet kíván egyidejűleg, úgymint intuíciót, matematikai tudást, kreativitást, pontosságot, memorizálást, megértést, ügyelést a részletekre is és az általános kép megragadásának képességét, amelyek öszszességükben igen sokrétű jártasságot és készséget igényelnek.

A jó fizikaoktatásnak minden szinten tükröznie kell ezt a sokrétű megközelítést. A fizika nem csupán egy leíró jellegű tárgy, a lényegét nem lehet felfogni feladatmegoldás nélkül. A diákoknak meg kell tapasztalniuk, hogy egy elvont számítás igenis képes megjósolni valós rendszerek viselkedését. A fizika nem csupán matematika, tárgya a valós anyagi világ, nem pedig egy ember alkotta axiómarendszer. Pusztán számítások elvégzése önmagában még nem fizika, legyen az egy egyszerű behelyettesítéses feladat, vagy valamilyen bonyolultabb matematikai kiértékelés. A matematikai megfogalmazásnak valamilyen fizikai meglátásból kell erednie, és az eredménynek tudnia kell mondania valamit a természetről.

A fenti meggondolásokból számos következmény származik:

1. A tanításnak komoly hangsúlyt kell helyeznie a kvalitatív megértésre, irányítani kell tudja a diákot a közös élményszerzéstől, a demonstrációktól és a diák által végzett kísérletektől a probléma egyre pontosabb megfogalmazása felé.

2. A szabatosságban nem szabad kompromisszumot kötni. A kvalitatív jelző nem a pongyola vagy pontatlan szinonimája. A probléma tárgyalásának végén pontos, egy adott szinten egzakt – szóbeli és matematikai – állításokat kell tennünk. Bármely leírás egyszerűsített, bizonyos mértékig korlátozott képet ad a valós jelenségekről. Az analízis nem a természetről szól a maga bonyolultságában, hanem a természet egy általunk adott modelljéről. Ez teljesen rendben van, amennyiben világosan megfogalmazzuk a feltevéseket és a korlátokat. Ugyanaz a szituáció leírható több különböző szinten, és mindegyik egzakt lehet az adott szintű leíráshoz pontosan megfogalmazott feltételek mellett.

3. A fizikatanítás spirálhoz hasonlítható. Ugyanazt a jelenséget tárgyaljuk egyre magasabb szinten. Ez lényeges elem, mert az egyszerűbb tárgyalás egyúttal a magasabb szintű tárgyalás előkészítése. Ugyanakkor az egyszerű tárgyalás nem felesleges, egyszerű problémákat egyszerű eszközökkel kell kezelni. Közismert, hogy az egyszerűbb tárgyalás segíti a probléma jobb megértését.

4. Azt tartja a mondás: hiszem, amit látok. Ezért a demonstrációk, a diákok által végzett kísérletek, a mindennapi megfigyelésekre és tapasztalatokra történő utalások különösen fontosak.

5. Némi rajzolás hatékonyabb tud lenni a szövegnél és képleteknél olyan esetekben, amikor nehéz koncepciókat és szituációkat kell komolyan megértetni. Könnyedén írhatunk egy egész bekezdésnyi szöveget, aminek semmi felfogható értelme nem lesz. Ugyanakkor sokkal nehezebb felvázolni egy helyzetet, ha valójában nem értjük meg azt. Hasonlóképpen, felírhatunk valami egyenletnek kinéző összefüggést, remélve hogy legalább részben helyes lesz, de nehéz ábrázolni ezt az egyenletet anélkül, hogy valami elképzelésünk lenne annak jelentéséről. Ezért a vázlatoknak és ábrázolásoknak mindig a fizikaoktatás fontos eszköztárai közé kell tartozniuk.

TEHETSÉGGONDOZÁS A BUDAPESTI BERZSENYI DÁNIEL GIMNÁZIUM FIZIKATÁBORÁBAN

Baranyai Klára, Lendvai Dorottya, Csernovszky Zoltán,
Izsa Éva, Csonka Dorottya, Gál Györgyné,
Vidra Ágnes, Virág Miklós, Varga György
Berzsenyi Dániel Gimnázium, Budapest

„A lélek is csak úgy emelkedik
A józanság tisztább világához,
Ha a tudományok és ismeretek
Tárából gazdag zsákmányt gyűjt magának.”
Berzsenyi Dániel

A tehetséggondozás egy lehetséges formája

Negyven-ötven évvel ezelőtt fizikából leginkább feladatmegoldással fejlesztették a tehetséges gyerekeket. Értékes hagyományokkal rendelkezünk ezen a téren: a feladatmegoldó versenyeink (Öveges-, Jedlik-, Mikola-verseny, OKTV, Nemzetközi Diákolimpia stb.), az ezekre felkészítő iskolai és országos szakkörök vagy a *KöMaL,* mind a megtanult ismeretek matematikai modellekben való furfangos felhasználására építenek. A jelenleg pályán lévő fizikatanárok többsége is ezen nevelkedett, ezt szerette meg, és sokáig értetlenül állt a diákok zömének érdektelensége előtt. Még a legtehetségesebb gyerekeket is nehéz rávenni a kitartó gyakorlásra, önálló feladatmegoldásra.

Az új pedagógiai irányzatok a korábbi kompetitív szemlélet helyett a kooperatív, projektalapú munkaformákat részesítik előnyben. Ez a szemlélet is megteremtette a maga versenyeit és programjait (KutDiák események, természettudományos csapatversenyek és pályázatok, IYPT, ICYS, BME TTK Science Camp…). A gyerekek szívesen választják a közösségi munkaformákat, ám a tehetséges gyerekek közül is csak kevés diákot tudunk a – komoly felkészülést igénylő, valamint előzetes szelektálással járó – versenyek és programok szintjéig eljuttatni. Első alkalommal 2011-ben ezért szerveztük meg a Berzsenyi Dániel Gimnázium fizikaönképzőkörét és -táborát (*1. ábra*), ami azóta hagyománnyá vált, minden évben sor kerül rá. Ezt a szakmai és sokrétűen emberi fejlődést is elősegítő programlehetőséget szeretnénk a tanárkollégák figyelmébe ajánlani.

Az iskola és az önképzőkör

Az iskolánkban négyosztályos fizikatagozat, valamint hatosztályos speciális matematikatagozat működik. Van négyosztályos biológia–kémia, nyelvi és humán tagozatos képzésünk is. A fizikából tehetséges gyerekek zömében fizika- és matematikatagozatosok, de más osztályokban is vannak érdeklődő gyerekek.

A fizika önképzőköri program az első félév folyamán a gyerekek kiválasztásával indul. A 13–17 éves tanulókat – addigi teljesítményük alapján – szaktanáraik hívják meg a közös munkára. Egy-egy osztályból 4-8 diák, összesen 40-50 tanuló kerül a meghívottak közé. A kiválasztott diákok – tanári támogatás mellett – 3-6 fős csoportokban valamilyen izgalmas témán dolgoznak. Egy csoport általában egy osztályból kerül ki, de előfordul olyan projekt is, ahol a kisebbek és nagyobbak együtt dolgoznak.

A tanév vége felé négynapos tábort szervezünk, ahol a csoportok bemutatják egymás-

A cikk szerzői az elmúlt tíz év folyamán mind a Berzsenyi Dániel Gimnáziumban tanítanak vagy tanítottak fizikát. A munkaközösség tagjai matematika–fizika szakos tanárok, az Eötvös Loránd Tudományegyetemen szerezték diplomájukat, és mindkét tárgyukat tanítják. *Izsa Éva* és *Borbélyné Vidra Ágnes* informatika kiegészítő szakot is végeztek, ők informatikát is tanítanak. *Baranyai Klára* és *Csernovszky Zoltán* PhD-fokozatot szerzett az ELTE Fizika Tanítása Doktori Iskolájában, *Lendvai Dorottya* ugyanitt fokozatszerzés előtt áll.

Az elmúlt években néhányan munkahelyet váltottak: Izsa Éva a Fasori Evangélikus Gimnáziumban, *Varga György* az ELTE Trefort Ágoston Gyakorló Gimnáziumban, *Csonka Dorottya* átmenetileg Brüsszelben, az I. számú Brüsszeli Európai Iskolában tanít.

nak a projektjeiket, emellett közös mérések, csoportos és egyéni feladatmegoldás, meghívott előadók, gyalogtúra színesítik a programot. A tábort tanítási időben szervezzük, általában szerda délután indulunk és szombat délután érkezünk haza, így két napot hiányzunk az iskolából.

A program előnye, hogy a projektmunkáknak természetes befejezést, célt ad a tábori bemutatkozás. Kifejezetten barátságos légkörben, versenyhelyzet nélkül, mégis inspiráló környezetben mutathatják be a gyerekek a munkájukat. A fizikatábor szempontjából pedig nyereség, hogy a táborozó gyerekek maguk is a program alakítói, nem azt érzik, hogy a felnőttek készítik el számukra a tábort, hanem tudják, rajtuk is múlik, hogy milyen élményekkel térnek majd haza onnan.

1. ábra. Életképek a táborból: spektroszkópiai vizsgálatok.

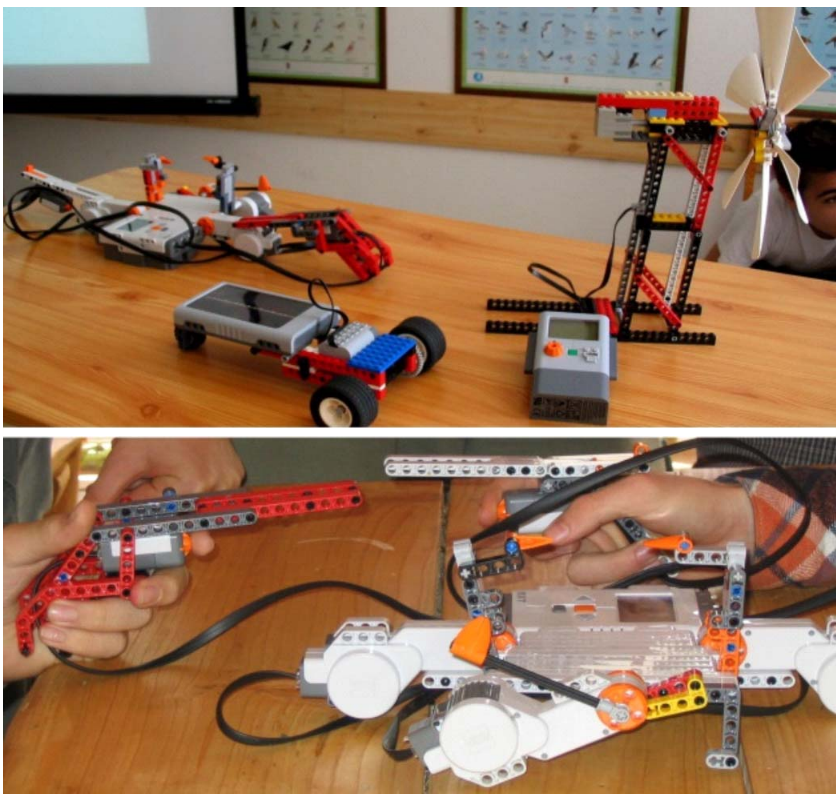
A projektekről

A projekteknek nincsen előre kötött formája. Lehet ez egy adott témában kísérletezés, mérés, sokszor kísérleti eszköz építése, számítógépes szimuláció vagy mérőprogram elkészítése, használata, illetve egy szűkebb témakör elméleti tanulmányozása. A táborban megtartott diákelőadások időtartama körülbelül 30 perc. Az előadások után a gyerekek kérdezhetnek egymástól, a szünetekben megnézhetik, kipróbálhatják az eszközöket.

Az elmúlt kilenc év 86 projektmunkáját lehetetlenség felsorolni. Az iskola honlapján elérhetők a tábori programok. Az egyes projektek anyagait igyekszünk feltölteni a tábori feladatsorokkal együtt. Ezek bárki által bátran és szabadon felhasználhatók [1]. Megemlítünk néhány olyan témát, amelyek tanulságairól a *Fizikai Szemle* hasábjain is beszámoltunk: környezeti jelenségek modellezése [2], vízen lebegő rézlemez [3], pendulumhullám [4]. Tanulmányoztunk organikus napelemeket [5], építettünk üstököst, mértünk NXT-robotokkal (*2. ábra*), foglalkoztunk optikai rácsok fázisvektorokkal történő leírásával, a diákok Rubens-csövet, Héron-eszközöket készítettek, fegyvereket és járműveket vizsgáltak, és még hosszasan sorolhatnánk.

A tanulók a szaktanárral együtt találják ki a témát. Akár egy idegen nyelvű cikk [6], versenyfeladat, internetes videó, vagy egyéb érdekesség ihletése nyomán. Néha azonnal „ránk talál a téma”, máskor csak hosszas kutakodások eredményeként. Azután a projekt nehézségétől, bonyolultságától és életkori sajátosságoktól függően megfelelő mértékű tanári segítséggel munkálkodnak a gyerekek a tábort megelőző hónapokban. A diákoknak mindenképpen nagy szüksége van a szaktanári támogatásra, hiszen ezek a témák általában túlmutatnak az alapórán tanultakon, azonban a segítségadás

2. ábra. Projektmunka: NXT-robotok.



3. ábra. Csapatverseny: feladatmegoldás.

formája, módszere, mértéke eltér az egyes esetekben. A megfelelő – kihívásokkal teli, de nem lehetetlenül nehéz – téma megtalálása, a részfeladatok kiosztása és koordinálása, az elméleti és gyakorlati háttértudás elsajátítása, az időbeosztás, az „előadói magatartás” gyakorlása, a prezentáció elkészítésének igényessége mind-mind odafigyelést igényel.

A felkészülés többségében a tanórákon kívül történik. A heti óraszám teljesen fakultatív és a tanév során változik is, de fontos a rendszeres, folyamatos konzultáció. A ráfordított idő az órarendek, a téma nehézsége, a gyerekek ügyessége, korábbi projekttapasztalatai, életkora szerint eltérhet; a folyamat során szükségszerűen kialakul. A tanári segítség éppen abban rejlik, hogy segít a munkafolyamatok reális, egyenletes felosztásában, figyelembe veszi az iskolai egyéb elfoglaltságokat (versenyre készülés, sok dolgozat az adott héten, szünetek stb.).

A foglalkozások jó esetben (ha a tantárgyfelosztás erre biztosít órakeretet, és ezt a fenntartó is jóváhagyja) szakkör keretén belül zajlanak. Ha erre nem kapunk szakköri órát (és egyre nagyobb az ilyen irányú nyomás), akkor a szabadidőnket áldozzuk e célra.

Ha a projekt sikeres, nemcsak a gyerekeket tölti el örömmel, hanem a tanárok is sokat tanulnak. Különleges és lelkesítő helyzet, amikor a tanár és a diák együtt tanul meg valami új dolgot. Ez a típusú műhelymunka szakmailag kölcsönösen motiváló, viszont rendkívül sok energiát igénylő vállalkozás.

A tábor végén közös értékelést tartunk, de a csoportokon belül az előzetes munkát és a végső bemutatót is érdemes komolyabban értékelni (utóbbit akár videofelvételen rögzíteni és utólag megnézni, kielemezni). Másrészt a kollégák között is érdemes a tanulságokat megbeszélni, nemcsak egymás projektmunkáira, hanem a tábor további programjaira kiterjedően is.

A tábor programja

Feladatmegoldó csapatverseny

A táborba általában szerdán, az 5. óra után indulunk. A szálláshely elfoglalása után a programot feladatmegoldó csapatversennyel indítjuk (*3. ábra*). A 7-8 fős csapatok minden korosztályt felölelnek, a feladatok kitűzésénél ezt is figyelembe vesszük. A másfélkét órára szánt feladatsor kellően hosszú ahhoz, hogy egy csapat csak akkor érhessen el jó eredményt, ha annak valamennyi tagja jól dolgozik. Vannak teszt- és számítási feladatok a kicsiknek és a nagyoknak, de vannak olyan feladatok is, amelyek a függvénytáblában fellelhető rengeteg információ felhasználására épülnek. A korábbi évek feladatsorai a munkaközösség honlapján megtalálhatók, szabadon felhasználhatók.

Túrórudi-feladatok

Minden táborban közzétesszük a „túrórudi-feladatokat”, amelyeket egyéni gondolkodásra szánunk. Ezek furfangosabb, különböző korosztálynak szánt feladatok. A megoldáson a tábor teljes ideje alatt lehet töprengeni. A helyes megoldásért, amelyet bármelyik kollégának el lehet mondani, normál vagy óriás méretű túrórudi jár. A jutalmazásnál az életkort, a feladat nehézségét és a megoldás szépségét is figyelembe vesszük. A tábor legelső estéjén mi, tanárok is megoldjuk a feladatokat. Sokszor nagyon tanulságos a megbeszélés. Érdemes megemlíteni, hogy a feladatsor összeállítása hosszabb gyűjtőmunka eredménye. Olyan feladatokat kell találnunk, amelyek kihívást jelentenek ugyan, de megoldására van remény, elég nehéz, de nem túl nehéz és élvezetet jelent, ezek sokszor az órán elhangzottak folytatása. Intuíciót meríthetünk különböző internetes és nyomtatott forrásokból, amelyek közül néhányat megemlítünk az irodalomjegyzékben [7–9]. Néha a tábor közben egy-egy ötlet nyomán

4. ábra. Tanulói mérések: granulált anyagok rézsűszögének mérése (balra) hidrosztatikai feketedoboz (jobbra).

5. ábra. Gyenes Gábor fizikatörténeti előadása.

újabb túrórudi-feladat születik, akár diákok is találhatnak ki kérdéseket. A tábor hangulata elég inspiráló ahhoz, hogy a diákokat ne hagyja nyugodni egy-egy érdekesebb, megoldatlan probléma. A tábor végén a gyerekekkel közösen is megbeszéljük a megoldásokat. A túrórudi-feladatsorok is megtalálhatók a honlapunkon.

Projektbemutatók

A második-harmadik napon (csütörtök–péntek) hallgatjuk meg a csoportok előadásait, körülbelül 9-12 előadást.

Tanulói mérések

Az egyik délután korosztályonként tanulói méréseket szervezünk, amelyeket általában a tanárok vezetnek. Ízelítőül néhány téma: mértük már granulált anyagok rézsűszögét (*4. ábra,* balra), izzószál hőmérsékletét és sugárzási teljesítményét. Meghatároztuk földrajzi helyzetünket a Nap segítségével [10], dolgoztunk hidrosztatikai feketedobozzal (*4. ábra,* jobbra), volt arduinós, napelemes mérésünk is. Készítettünk karcolt hologramot, foglalkoztunk tojások teherbírásával. A mérésekhez különböző forrásokból merítünk ötleteket: a *KöMaL* mérési versenyéből [7], az IYPT projektjeiből [11], különböző internetes és nyomtatott cikkekből.

Esti előadások

A tábori estékre többségében külső előadókat hívunk meg. Ők fizikatörténeti vagy modern fizikához kapcsolódó témákról mesélnek, furfangos feladatokat ismertetnek, kísérleteznek. Ha az időjárás engedi, csillagnéző estét is tartunk. A korábbi években előadóink voltak: *Gyenes Gábor,* iskolánk nyugdíjas tanára, aki minden évben fizikatörténeti érdekességgel készül. Külső előadóink voltak *Balázs Boldizsár* a kollektív viselkedésekről, *Gnädig Péter* részecskefizikáról, *Honyek Gyula* furfangos kísérletekről és feladatokról, *Horváth Ákos* a proton belsejéről, *Jendrék Miklós* érdekes kísérletekről, *Kerényi Lilla* és *Nyerges Gyula* a csillagokról, *Piláth Károly* különleges kísérletekről, *Várkonyi Péter* „nemcsak a gömböcről” tartott előadást. Ezen esti programok népszerűségét mutatja, hogy az előadások után a gyerekek még hosszasan beszélgetnek az előadókkal (*5. ábra*).

Kirándulás

A sűrű szakmai programba pihenésképpen egy félnapos kirándulást szoktunk beiktatni valamelyik délelőtt vagy délután. Ezt a tábori helyszínek és az időjárás eddig lehetővé tették számunkra.

Kreatív vetélkedő

Szombat délelőtti hagyománnyá vált a csoportos kreatív vetélkedő. Visszajáró öregdiákjaink – mára már egyetemisták – állítják össze a kreatív vetélkedő feladatait: volt, hogy lufiból, celluxszal, pálcikákkal jól terhelhető, stabil hajót (*6. ábra*) kellett építeni, vagy minél hosszabb golyópályát kellett érdekes akadályokkal létrehozni [12], nagy teherbírású papírhidat hajtogatni, messzire vivő hajítógépet építeni stb. A gyerekek általában nagy örömmel, igyekezettel, az alkotás lázában égve valósítják meg az ötleteiket.

6. ábra. Kreatív vetélkedő: nagy teherbírású hajó építése.

7. ábra. „Öregdiákok" és tanárok közös munkában.

Táborzárás

A tábor zárásaképp megbeszéljük az első napi csapatverseny és a túrórudi-feladatok megoldását, valamint még a friss élmények közepette röviden, közösen is értékeljük az egyes projektmunkákat, majd a végső pakolás után hazaindulunk.

Személyi és anyagi lehetőségek

A Berzsenyi Gimnázium szerencsés, mert az 52 fős tantestületben 12 olyan kolléga van, aki fizikaszakos, és közülük heten tanítanak is fizikát. A fizika-munkaközösség mind a hét tagja részt vesz az önképzőköri előkészületekben és magában a táborban is. Azonban az iskolai hiányzások csökkentése érdekében van, aki csak egy-egy napra, délutánra vagy estére tud eljönni a táborba. Előfordul, hogy más reálszakos kolléga is eljön előadást tartani, vagy csupán kíváncsiságból. A természettudományos tantárgyak összefonódására is jó terep lehet ez. A biológia–kémia tagozatos táborozók gyakran készülnek „határterületi" témákból: elektrokémia, ozmózis, különleges folyadékok stb.

Nagy segítséget jelentenek a kreatív vetélkedőknél emlegetett öregdiákjaink, akik a korábbi berzsenyis éveik során több fizikatáborban is részt vettek, így mostanában már az egyes programok megszervezésében, lebonyolításában segédkeznek (*7. ábra*). Többen közülük előadást is vállalnak a táborban.

A helyszín legtöbbször egy előadótermekkel/tantermekkel felszerelt erdei iskola, ahol egy nagyobb (60 fős) közösségi helyszín és legalább 3-4 kisebb (csoportfoglalkozásokra alkalmas) helyiség található. Erre a célra kiválóak voltak a nemzeti parkok erdei iskolái: jól felszereltek, tiszták, barátságosak és többnyire az erdő közepén vannak. (A nemzeti parkok átszervezése után is nyitott maradt ez a lehetőség, de nem tudjuk, meddig.) Ezeken a helyeken általában nemigen van térerő, de a szükséges internet-hozzáférés megoldható. Kedvencünk a királyréti Hiúz Ház.

8. ábra. Házi készítésű Rubens-cső.

Az önképzőkör és a tábor költségei sokszor befolyásolhatják egy-egy projekt, vagy akár a csoportos mérések, egyéb tábori bemutatók és játékos feladatok minőségi kivitelezését és lehetőségeit, valamint a táborhelyszín színvonalát. Ezen anyagi forrásokhoz több éven keresztül részben pályázatok útján sikerült hozzájutnunk. A fennmaradó részt egyéb iskolai, szülői keretekből tudtuk finanszírozni. Ez minden évben sok előzetes munkát és a pályázatok esetén stabil idegrendszert(!) kíván a munkaközösség tagjaitól. A pályázati pénzből az évek során kisebb eszközöket is tudtunk vásárolni. A gyerekek által épített kísérleti eszközök elkészítéséhez, amit lehet, a meglévő, évrőlévre kisebb-nagyobb mértékben bővülő fizikaszertárunkból is felhasználunk, de a diákok sokszor az otthonról hozott alapanyagokból is elképesztő dolgokat képesek építeni: Rubens-csövet (*8. ábra*), Héron-szökőkutat, Stirling-motort, szélcsatornát vagy éppen egy ember nagyságú camera obscurát.

A bemutatókhoz, mérésekhez szükséges eszközöket a tábor helyszínére valamelyik tanár szállítja. Ez nem kis feladat, szinte a teljes fizikaszertár kiürül, amivel egy mikrobuszt meg tudunk tölteni.

Összefoglalás, a program hosszú távú pozitív tapasztalatai a tehetséggondozásban

A tábor hagyománnyá vált, bekerült az iskola pedagógiai programjába is. A hatalmas munka ellenére tanárként és diákként is mindig jó szívvel emlékezünk vissza a közös munkára és magára a táborra. Mi sem mutatja ezt jobban, mint hogy a diákok évről évre küzdenek a programba való bekerülésért, és mi évről évre vezetjük a projekteket, megszervezzük a tábort (*9. ábra*).

A tehetséggondozás ezen formája, a műhelymunka hangulata, úgy tűnik, nagyon vonzó a diákok számára. Fontos, hogy nem magányosan, időkorlátok közé szorítva kell küzdeniük a feladatokkal, hanem az közösségi élményt is jelent a gyerekeknek. Az önképzőköri munkához sokszor olyan diákok is csatlakoznak, akik nem kaptak meghívást a táborba, de szívesen vesznek részt a közös alkotómunkában. Egy jó csapatban mindenki máshoz ért igazán, néha több dologhoz is, miközben maga is fejlődik. Ki az elméletet kutatja, más barkácsolni szeret, van, aki a prezentációkészítés nagymestere. Némely diák a feladatmegoldásban, számításokban ügyes, avagy épp a nyelvérzékét hasznosítja cikkeket vagy az internetet bújva. Egy-egy eszköz vagy számítógépes bemutató igényes elkészítése egyáltalán nem könnyű feladat, főleg a kicsiknek. Jó látni, hogy a fiatalok évről-évre mennyit fejlődnek. A sok új téma és eszköz a táborozók számára kész „felfedezőtúra”, amire az iskolai órákon kevésbé vagy egyáltalán nem jutna idő. A fizikai tartalmak mellett matematikai és informatikai készségeket, valamint például kísérletezést is tanulnak. Az utóbbi sokaknak egyáltalán nem könnyű műfaj.

A gyerekek a tantárgyakhoz köthető ismereteken túl együttműködést, időbeosztást, szertárismeretet és rendet, precizitást, igényességet, a csoportmunkához elengedhetetlen egymáshoz való alkalmazkodást, toleranciát, egymás tanítása által segítőkészséget, önálló kutatómunkát, kézügyességet, a barkácsolás mindenféle formáját, kreativitást, problémamegoldást is tanulnak.

A jó témák még sokáig foglalkoztatják őket, sokszor minket is. Előfordul, hogy a későbbiek során még hozzáteszünk ezt-azt egy projekthez. Egyes munkák végül akár más környezetben (évfolyam-bemutató keretében, külföldi, illetve magyar konferenciákon, cikkekben, versenyeken) is hasznosulnak [2–5, 13].

A 2020. évi, 10. tábort – a koronavírus-járvány miatt – nem tudtuk lebonyolítani, de optimistán folytatjuk a projekteket a következő, 2021-es tábor reményében.

Határozottan úgy érezzük, az önképzőkör és a tábor bevált. Bátran ajánljuk mindenkinek a kipróbálását, egy hasonló, saját arculatra formált program megvalósítását. Nem állítjuk, hogy könnyű vagy egyszerű, de mégis megéri! Mind a munkaközösség, mind a diákközösség számára összekovácsoló, tanulságos, ösztönző!

9. ábra. Életkép a kirándulásról.

Irodalom:

1. http://fizika.berzsenyi.hu/fizika-tabor
2. Baranyai Klára: Olvadó jéghegyek, melegedő tengerek. *Fizikai Szemle 63/7–8* (2013) 267–269.
3. Baranyai Klára: Vízen lebegő rézlemez. *Fizikai Szemle 65/4* (2015) 131–134.
4. Lendvai Dorottya, Czövek Márton, Forrás Bence: Pendulumhullám, avagy szerelem első látásra. *Fizikai Szemle 65/5* (2015) 171–177.
5. Csernovszky Zoltán: Organic solar cells and physics education. *European Journal of Physics* IOP, ©2018 European Physical Society
6. http://www.nsta.org/publications/quantum.aspx
7. https://www.komal.hu/lap/archivum.h.shtml
8. Gnädig Péter, Honyek Gyula, Vigh Máté: *333+ Furfangos feladat fizikából.* Typotex Kiadó, 2017, ISBN 978 963 279 903 2, http://docplayer.hu/42650720-Gnadig-peter-honyek-gyula-vigh-mate-333-furfangos-feladat-fizikabol.html
9. http://fizikaverseny.lapunk.hu/?modul=oldal&tartalom=1040029
10. Baranyai Klára: Földrajzi helymeghatározás a Nap segítségével. *Fizikai Szemle 59/4* (2009) 147–150.
11. http://hypt.elte.hu/
12. https://drive.google.com/file/d/0B2_N7efQBye-S1VRcmp4NHFyRE0/view
13. http://parrise.elte.hu/tpi-15/slides.php

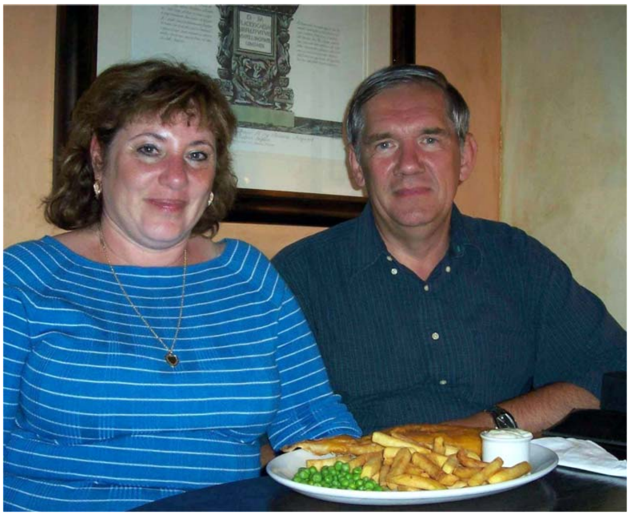
HÍREK – ESEMÉNYEK

TAKÁCS LÁSZLÓ (1950–2019)

Az MTA Központi Fizikai Kutatóintézet (KFKI) egykori tudományos munkatársa és a University of Maryland Baltimore County (UMBC, Baltimore, MD, USA) tanára, *Takács László* fizikus 2019. november 13-án, 69 éves korában elhunyt.

Takács László 1950. április 30-án született Szombathelyen. Középiskolai tanulmányait a soproni Széchenyi István Gimnáziumban végezte, ahol magába szívta a matematika és fizika szeretetét. Mindkét tárgyból dobogós helyezést ért el az 1968-as OKTV-n, majd a magyar csapat tagjaként második helyezett lett a Nemzetközi Fizikai Diákolimpián. Nevét többször megtaláljuk a *KöMaL* legsikeresebb megoldói között.

Érettségi után az Eötvös Egyetem fizikus szakára iratkozott be, ahol 1974-ben diplomázott. Életrajza szerint „nagyszerű tanároktól tanultam, elméleti fizikát Marx Györgytől, szilárdtest-fizikát Nagy Elemértől”. Diplomamunkájában vas-alapú ötvözeteket vizsgált Mössbauer-spektroszkópiával a Központi Fizikai Kutatóintézetben. A diploma megszerzése után itt kezdte meg doktori tanulmányait, amelynek során fémüvegek atomi szerkezetével, elektronsáv-szerkezetével és mágneses tulajdonságaival foglalkozott. Egyetemi doktori fokozatát 1978-ban szerezte meg, majd a KFKI-ban maradva továbbra is főleg fémüvegek vizsgálatával foglalkozott.



Takács László feleségével, Évával és az elmaradhatatlan „fish-and-chips”-sel angliai üdülésükkor.

Egyetemi évei alatt és azután is szívén viselte a középiskolások tehetséggondozását, aktívan dolgozott a *KöMaL*-nak, részt vett fizikaversenyek szervezésében és haladó szintű tanfolyamokat tartott középiskolásoknak, majd az 1980–1984 években a magyar fizikai diákolimpiai csapatot felkészítő két tanár egyike volt.

1984–86 között a Northwestern University (Boston, MA, USA) posztdoktori kutatója volt, ahol Mössbauer-spektroszkópiai és mágneses méréseket végzett komplex kémiai vegyületeken. Ezt követően (1987–89) a Clark University (Worchester, MA, USA) vendégtanára lett, ahol az oktatás mellett főleg magas hőmérsékletű szupravezetők kutatásával foglalkozott. 1989-ben csatlakozott a UMBC frissen indult Fizika Tanszékéhez, ahol aktívan kivette részét a fizikusképzés részleteinek kidolgozásában. Saját kurzust indított a *Fizika alkalmazása a régészetben* címmel. Mindvégig nagy odaadással oktatott, élvezetes előadásai mindig telt ház előtt folytak, diákjai nagyon szerették, ahogy kollégái is tisztelték. A fizikaoktatásról alkotott elképzeléseit összegző írását a *Fizikai Szemle* jelen számának FIZIKATANÍTÁS rovatában adjuk közre. 1997-ben a UMBC-n állandó állást kapott docensi minőségben (associate professor), és 1998-ban megszerezte az amerikai állampolgárságot.

Egyetemén új kutatási irányvonalként kezdett el foglalkozni a mechanikai ötvözéssel előállított nemegyensúlyi anyagokkal, illetve bevonatokkal, majd a világon elsőként a golyós őrlés által előidézett önfenntartó reakciókkal, amely területről egy sokat idézett (>500) összefoglalót írt [L. Takács: Self-sustaining reactions induced by ball milling. *Progr. Mater. Sci. 47* (2002) 355–414]. A mechanokémia fejlődésének történetéről is több közleményt írt, köztük egy szintén sokat idézett összefoglalót. Ezzel a tevékenységével Takács László a mechanokémia egyik világhírű művelőjévé vált, hosszú időn át, egészen a haláláig tagja volt az International Mechanochemical Association testületnek, amely a szakterület rendszeres konferenciáit szervezi (https://www.income2020.it/organizers).

Takács László mindvégig széleskörű amerikai és nemzetközi együttműködés keretében végezte kutatásait. Összességében körülbelül 120 nemzetközi folyóiratcikket publikált, amelyekre mintegy 4000 hivatkozást kapott. Bár az USA-ba kerülése után viszonylag keveset járt haza, de rendszeresen voltak közös publikációi magyar kutatókkal is. Külön kiemelendő, hogy e sorok egyik íróját (*RÁ*) 2005–2006-ban egyéves HAESF posztdok ösztöndíjra fogadta, amiből négy közös közlemény született. A megemlékezés másik szerzője (*BI*) szép emlékekkel gondol vissza 1984-től kezdődő amerikai útjaira, amelyek során Takács Lászlóval rendszeresen találkozhatott. Többször voltak együtt amerikai konferenciákon, valamint közösen tett laboratóriumi látogatásokon az USA keleti parti kutatóhelyein és egyetemein és Takács László szívesen fogadta otthonában és az egyetemén is. A legutóbbi út során büszkén mutatta meg az új SEM berendezésüket, amit a tanszékük az általa szervezett konzorcium keretében szerzett be, és amivel még sok terve volt. Sajnálatos, hogy halála miatt ezeket már nem tudja megvalósítani.

Bakonyi Imre és *Révész Ádám*

PATKÓ GYÖRGY (1933–2020)

Patkó György 1933. május 16-án született Kál községben. Az elemi iskola öt osztályát szülőfalujában végezte, a gimnázium nyolc osztályát Egerben, a római katolikus Ciszterci Gimnáziumban, majd az állami Dobó István Gimnáziumban érettségizett. A debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetemen 1956-ban nyert fizika–matematika szakos középiskolai tanári oklevelet.

Diplomaszerzést követően tanított Szűcsiben, általános iskolában, Hatvanban a Bajza József Gimnáziumban, majd 1962-ben került az egri Tanárképző Főiskola Fizika Tanszékére. 1972-ben Szegeden, a JATE Természettudományi Karán doktorált.

Több mint három évtizeden át, nyugdíjba vonulásáig, oktatott a főiskolán. Folyamatosan tanított optikát, vezetett speciálkollégiumokat kísérleti atom- és molekulafizikából, lézerfizikából.

Főiskolai fénytan (optika) jegyzetet írt – *Mátrai Tibor* szerzőtársával – a fizikaszakos tanári és fizikusi felsőoktatási hallgatók számára. Szerkesztésében jelent meg a tanszéki kollektíva által készített *Fizikai praktikum* című főiskolai jegyzet. Atomfizika demonstrációs gyakorlatok kidolgozásával, optikai, spektroszkópiai és tantárgy-pedagógiai kutatásokkal foglalkozott.

Patkó György előadást tart az Egri Dobó István Gimnáziumban.

1976-tól 17 éven át vezette a főiskola fizikai tanszékét. Ez időszak alatt a tanszék oktatói 80 publikációt jelentettek meg és hárman doktoráltak. Publikációinak száma közel 200, több mint 400 tudományos és ismeretterjesztő előadást tartott. Vezetője volt a tanszéki tudományos diákkörnek, működése alatt 132 szakdolgozatot vezetett. Gyakran szervezett főiskolai hallgatóknak hazai tanulmányi kirándulásokat és külföldi főiskolákra, kutató intézetekbe szakmai utakat.

Tagja volt a *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottságának, tevékenykedett a Debreceni Akadémiai Bizottságban, a Minisztérium mellett működő Fizika Tantárgyi Bizottságban. Több évtizeden át látta el az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Heves megyei Csoportjának titkári, majd elnöki teendőit. 1995-től 1999-ig az Eötvös Társulat főtitkárhelyettese volt. Hosszú évekig a főiskola szakszervezeti bizottságának élén, szervező titkárként érdekvédő munkát végzett.

1966-tól 1976-ig vezette a Heves megyei Művelődési Központban az Ifjú Fizikusok Körét. Felelős szerkesztője volt az évente megjelenő *Ifjú Fizikus* kiadványnak, több éven át szervezte a középiskolásoknak szóló Ifjú Fizikusok Országos Találkozóit.

Nyugdíjba vonulását követően még 13 éven át tanított fizikát Aszódon az Evangélikus Gimnáziumban. Itt irányítója volt a természettudományt tanítók munkaközösségének, a tanulók számára lézerszakkört vezetett és megszervezte az Ifjú Fizikusok Körét.

1993-tól 1998-ig vezette Egerben a Környezetvédők Klubját. Környezetvédelmi kiadványokat szerkesztett, előadásokat tartott az Eszterházy Károly Főiskola fizikai tanszékén és a Gábor Dénes Főiskolán. Éveken át az egri Életfa Környezetvédő Szövetség vezetőségi tagja volt.

Aktív pályafutása alatt több jelentős kitüntetésben részesült, ezek az alábbiak voltak: az Oktatásügy Kiváló Dolgozója (1971), a Munka Érdemrend bronz fokozata (1977), Kiváló Munkáért (1981), a Magyar Felsőoktatásért (1993). 2011-ben az Eszterházy Károly Főiskola II. sz. Gyakorló Iskolájában létesített modern természettudományi laboratóriumok egyikének névadója lett. 2006-ban aranydiplomát vehetett át a Debreceni Egyetemen, 2016-ban pedig megkapta a gyémántdiplomát is.

Volt kollégái, tanítványai, barátai, ismerősei emlékét megőrizve búcsúznak Patkó György tanszékvezető főiskolai tanártól. Értékteremtő, alkotó, kutató és oktató munkásságát, derűs emberségét nem feledjük.

Tisztelt Tanár Úr, nyugodj békében!

Vida József
volt tanítványa, munkatársa, barátja

Patkó György írásai a *Fizikai Szemlében*

Patkó György: Fizika az egri Tanárképző Főiskolán — 1979/308
Gábos Zoltán: Az elméleti fizika alapjai (*Patkó György*) — 1991/108
Patkó György, Vida József: „Ifjú fizikusok” egri országos találkozóinak története — 1992/156
Patkó György, Stumphauser Tamás: Az Io keringési idejének meghatározása — 1994/365
Patkó György, Stumphauser Tamás, Stumphauser Ildikó, Lehoczky Alfréd: A napfogyatkozás mérése Egerben — 1999/337
Ujfaludi László: A környezeti problémák természettudományos alapjai – környezetfizika (*Patkó György, Stumphauser Tamás*) — 2001/139

HREHUSS GYULA (1932–2020)

Már középiskolás korában fogékony volt a fizikai jelenségek iránt, emiatt lehetőséget kapott, hogy látogassa a debreceni egyetem kísérleti fizikai intézetét. Egyetemi tanulmányait 1950-ben Budapesten kezdte, fizikus oklevelét 1955-ben szerezte. Közben diplomamunkáját az Atomkiban készítette, ahol ködkamra építésén dolgozott. A diploma megszerzése után ugyanitt folytatta azokat a kísérleteket, amelyek diplomamunkája idején felvetődtek. 1957 elején a KFKI Atomfizikai Osztályára került. Később a Magfizika I. Laboratóriumban, majd a Magfizikai Főosztályon dolgozott. Kutatási területe eleinte a kísérleti magfizika, a neutron – töltött részecske vizsgálatok területe volt. *A nehéz-részecske spektrometria speciális módszerei és alkalmazásuk magreakciók vizsgálatára* című értekezésével szerezte meg a fizikai tudomány kandidátusa fokozatot 1967-ben.

1970–1972 között vendégkutatóként a jülichi Kernforschungsanlage (KFA) Magfizikai Kutatóintézetének vendégkutatója volt, ahol az induló, első izokron ciklotronnál az akkoriban unikálisnak számító 60 és 90 MeV tartományban folyó deuteronszórás-kísérletekbe kapcsolódott be. A C^{12}, Mg^{24}, Al^{24}(d,d) és (d,d’) rugalmas és rugalmatlan szórás szögeloszlását mérte. A kísérleti adatokat az optikaimodell- és a csatoltcsatornamódszerével analizálta és az alap- és gerjesztett állapotok deformációjára nyert új eredményeket.

A 1970-es évek első felében – az optimista elképzelések szerint – a termonukleáris fúzió elérhető közelségbe került. Így az intézet kutatás-fejlesztési elképzelésébe belefért egy „fúzióreleváns” berendezés építése, illetve megvásárlása. Így létrejött a Magfizikai Főosztály keretén belül egy, a fúziós kutatások előkészítésére alakult csoport, amelyik a fogadandó berendezés és a téma elméleti előkészítésére alakult. Ennek vezetésére és a kutatócsoport megalakítására *Hrehuss Gyulát* kérték fel. A témát ismerő kutatók felkutatásával, azok bevonásával tanuló szemináriumokat szervezett, amelyek eredményeként megfelelő tudásra tettünk szert a megépülő fúziós berendezés fogadására. A berendezés 1979 közepén kezdett működni. Az első vizsgálatok a plazma instabilitásának és hőmérsékletének vizsgálatára irányultak. 1976-tól kezdődően foglalkozott gáz proporcionális szcintillációs detektor építésével. Az első példányt az RMKI a Kurcsatov Intézetben használta a T-10 tokamak elektronhőmérsékletének mérésére. Később még egy példány készült a Kurcsatov Intézet részére. A detektorépítéssel párhuzamosan kidolgozott egy elméleti megközelítést a detektorral elérhető legjobb felbontás meghatározására.

Az 1980-as évek első felében a Jülichi KFA Plazmafizikai Intézetében dolgozott vendégkutatóként, az akkor unikálisnak tekintett TEXTOR tokamak mellett. A plazma hőmérsékletét vizsgálták különböző körülmények között, mikrohullámok megfigyelésével.

Sajnos kinttartózkodása során egészsége megromlott, továbbá szürkehályog-betegsége előrehaladott állapotba került. Egy elsőre sikeresnek tűnő operáció után azonban látása tovább romlott és emiatt nyugdíjba vonult.

Kísérleti fizikus mentalitására jellemző, hogy a szürkehályog korai felismerésére egy eszközt tervezett és megépíttetett, amivel több száz gépkocsivezetőt megvizsgáltak. Az első eszközt az RMKI Elektronikus és Műszaki Főosztályán készítették el.

Kardon Béla

Hrehuss Gyula írásai a *Fizikai Szemlében*

Hrehuss Gyula, Lakatos István: Cataractometer és cataractoscop — 1998/329

Hrehuss Gyula, Molnár Béla: Egyszerű szerkezetű diffúziós ködkamra oktatási célokra — 1982/299

Hrehuss Gyula: Diffúziós ködkamra — 1956/153

Mayer-Böricke Claus, 1929–1992 (*Hrehuss Gyula*) — 1993/13

NAGY MÁRTON (1932–2021)

Alig hiszem, hogy van olyan fizikatanár e hazában, aki ne ismerte volna – mégha nem is úgy, mint a Soproni Evangélikus Líceum tanárát, sokkal inkább – a Mikola Sándor Országos Tehetségkutató Fizikaverseny, a Vermes Miklós Nemzetközi Fizikaverseny, a Fényes Imre Fizika Olimpiai Válogatóverseny létrehozóját, megszervezőjét, koordinálóját, *Nagy Márton* tanár urat (Marci bácsit). Volt az ELFT Fizikai Társulat alelnöke, főtitkára, számos országos pozíció viselője, elismerés kitüntetettje. Nehéz lenne felsorolni mindazt, amit tett, hátrahagyott a távozásával.

Magam huszonöt éve dolgoztam vele a versenyek kapcsán. Óriási vitalitással, ötletgazdagon, hatalmas szervezőkészséggel, jól összetartva az ország elismert fizikatanáraiból általa létrehozott munkaközösséget. Tanári munkáját közvetlenül nem ismertem, de tanítványai elragadtatással beszéltek órái közvetlenségéről, jó humoráról, diákközpontúságáról.

A Sopronért emlékérem kitüntetettje (fotó: Mészáros Nikolett).

Úgy is szíven ütött a halálhíre, hogy az utóbbi néhány évben a versenyekkel, a konferenciákkal, az évkönyvekkel kapcsolatos megbeszéléseinket egyre többször tarkította egészségi állapotáról szóló párbeszéd köztünk. Vitalitása azonban annyira nem csökkent, hogy amikor már nem tudott lelépcsőzni a lakásából sem, még mindig felhívott újabb ötletekkel. Aztán elhallgattak ezek a hívások.

A fizikatanárok közössége Nagy Márton legfőbb érdemének azt tartja, hogy egyedülálló tehetséggondozó fizikaverseny-rendszert dolgozott ki és tartott fent egy olyan korban, amikor szemünk előtt veszít a fizikaoktatás a presztizséből. Ezek a versenyek képezik a hazai fizikus tehetséggondozás gerincét, de lelkesítik és mozgatják a határainkon túli magyar anyanyelvű diákokat is, s egyúttal ápolják a három névadó tanár – *Mikola Sándor, Fényes Imre* és *Vermes Miklós* – emlékét.

Most rajtunk a sor: ne feledjük ikonikus személyiségét, szervező munkáját, humorát, kitartását, példamutatását, miszerint felkarolta a tehetségeket. Folytassuk (segítsük folytatni) ezt a munkát, mert tehetséges diákok továbbra is vannak, és a nemzetnek szüksége van a kiváló szakemberekre.

Búcsúzunk Tőled, Marci bácsi!

Pápai Gyula

Nagy Márton írásai a *Fizikai Szemlében*

Nagy Márton: Mikola ünnepség Sopronban — 1981/472
Nagy Márton: 125 éves a soproni Berzsenyi Dániel gimnázium — 1983/112
Nagy Márton: A matematika és fizika tanításának kezdetei Sopronban — 1985/235
Nagy Márton: Sopron, a fizika-tehetségkutatás fellegvára — 1991/97
Nagy Márton: Az Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) kovásznai tanári találkozója — 1992/276
Nagy Márton: Vermes Miklós nyomdokain — 1993/120
Nagy Márton, Tolvaj László: Soproni versenyek, 1994 — 1994/446
Nagy Márton: Protestáns iskolák részvétele a fizikus tehetségek felkutatásában — 1994/449
Nagy Márton: Szlovákiai fizikatanárok első konferenciája — 1995/287
Baranyi Károly: A fizikai gondolkodás iskolája (*Nagy Márton*) — 1996/184
Nagy Márton: Emlékezés Vermes Miklósra születésének 100. évfordulóján — 2005/171
Varga István, 1952–2007 (*Nagy Márton*) — 2007/382

KITÜNTETÉSEK

Rátz Tanár Úr Életműdíj 2020. évi kitüntetettjei

Lévainé Kovács Róza matematika–fizika szakos tanár, a Karcagi Általános Iskola és Alapfokú Művészeti Iskola intézményvezető-helyettese. Fő célja a fizika népszerűsítése az általános iskolai diákok körében, iskolájában irányítja a Tehetségpont munkáját, vezeti a Fizika kört. Iskolán túlmutató tevékenysége rendkívül gazdag, tág rálátással bír a közoktatás szinte minden területére. Szaktanácsadó, mentor, kiemelt projektek szakértője fizikából, az ELFT Általános Iskolai Szakcsoport elnöke. 15 éven át rendezte a Fizika Próbaversenyt, amelyen 16 ezernél több tanulót versenyeztetett, majd 2011-ben Fizika$^+$ néven országos fizikaversenyt indított és szervez máig is. Tehetséggondozó munkája a különféle csapatversenyek tekintetében rendszeres és kiemelkedő, így az általa felkészített diákok számos jó helyezést és különdíjat értek el évtizedeken át.

Farkas László matematika és fizika szakos tanár, a keszthelyi Vajda János Gimnázium munkaközösség-vezetője, szaktanácsadó, mesterpedagógus. Tehetséggondozó programjában eddig több mint 2000 diák vett részt. Tanítványai közül többen értek el kiváló helyezést az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenyén, az OKTV-ken és egyéb rangos hazai versenyeken. Nevéhez fűződik a keszthelyi Newton Kupa komplex természettudományi verseny elindítása, amely több mint negyedszázada minden évben megrendezésre kerül. Tudásmegosztó tevékenysége is példaértékű, szaktanácsadóként ismereteit előadások tartásával, helyi és országos lapokban való publikálással osztja meg. Munkájával – az ELFT tagjaként, illetve 16 éven keresztül a középiskolai tanári szakcsoport vezetőségi tagjaként – hozzájárult a hazai fizikaoktatás fejlődéséhez.

Ericsson-díj, 2020

A fizika tehetségeinek gondozásáért

Hömöstrei Mihály a Budapesti Német Iskolában német nyelven oktatja a fizikát. Szakkörei rendkívül népszerűek, munkája nyomán diákjai nagy arányban választják a természettudományos és mérnöki pályát. Gimnáziumi munkája mellett 2013-ban tagja lett az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye nemzetközi vezetőtestületének, és szervezi a magyar csapat kiválasztásának-felkészítésének folyamatát. A magyar csapat 2015 óta minden évben éremmel tér haza. A sikerekben kulcsfontosságú volt a felkészítés módszertanának kidolgozása: a féléves folyamatban a kísérletalapú felfedező kutatómunka mellett hangsúlyos szerepet kap a kommunikációs készségek és a csapatmunkával kapcsolatos kompetenciák fejlesztése. A tehetséggondozást nem csak magas fokon űzi, de oktatja is. A 2015/16 tanévtől kezdődően az ELTE Anyagfizikai Tanszékének részállású mesteroktatója.

Siposs András az ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium vezetőtanára, az évek során nagyon sokat tett a fizika népszerűsítéséért és a tehetséges tanulók gondozásáért. Iskolájában rendszeresen szervezett fizika feladatmegoldó versenyeket. Tanítványai gyakra szerepelnek az elsők között hazai fizika versenyeken (Mikola versenyen, KöMaL, OKTV). A Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpiákon két tanítványa is dobogós helyezést ért el. Eredményes munkájával, szakmai tudásával, színes egyéniségével példát mutatva komoly elismerést vívott ki diákjai és tanártársai között.

A fizika népszerűsítéséért

Rudolf Tamásné a budapesti Áldás Utcai Általános Iskolában tanít matematika–fizika szakos tanárként. Nagyon fontosnak tartja, hogy minden segítséget megadjon tanítványainak a tudás megszerzéséhez. Komoly hivatástudattal, kellő derűvel és szeretettel foglalkozik tanítványaival. Rendszeresen viszi őket a Magyar Tudományos Akadémia előadásaira, ahova egyetlen általános iskolai tanárként meghívást kap. Rövidebb-hosszabb filmeket készít a fizika tanulásához, megértéséhez. Tehetséggondozó munkája is példaértékű. Régi és jelenlegi tanítványai országos és nemzetközi versenyeken díjazottak.

Szabó László Attila az egyetem elvégzése óta a Csongrádi Batsányi János Gimnáziumban tanít, jelenleg a matematika–fizika–informatika munkaközösség vezetője, illetve az iskola természettudományos laboratóriumának átadása óta az Öveges-projekt szakmai vezetője. Rengeteg energiát fektet abba, hogy a kísérletezésen keresztül szerettesse meg a fizikát. Nyári táborokat és kísérletező délutánokat szervez, természettudományos kísérletezős versenyt is szervez általános iskolásoknak. Nemcsak diákjai, de saját foglalkozásai is több díjban részesültek az évek során.

Kitüntetések október 23-a alkalmából, 2020

Magyar Érdemrend tisztikeresztje polgári tagozata

Bozóki Zoltán fizikus, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar Fizikai Intézete Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének egyetemi tanára a fotoakusztikus elvű, környezetvédelmi és ipari célú gázkoncentráció-mérő műszerek pontosságát, megbízhatóságát növelő berendezések, illetve eljárások fejlesztése területén elért kiemelkedő szakmai eredményei elismeréseként érdemelte ki a díjat.

Geresdi István fizikus, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, a Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Földrajzi és Földtudományi Intézete Földtani és Meteorológiai Tanszékének egyetemi tanára a meteorológia, a felhőfizika és a statisztika területén elért, nemzetközi szinten is alkalmazott kutatási eredményeiért, valamint kiváló oktatói munkájáért kapta a magas elismerést.

Kürti Jenő fizikus, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Bolyai Kollégiumának igazgatója, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizikai Intézete Biológiai Fizikai Tanszékének egyetemi tanára a szén nanoszerkezetek vizsgálatában elért, nemzetközileg is kimagasló tudományos eredményei, kiváló oktatói, valamint intézetvezetői és szakkollégium-irányítói tevékenysége elismeréseként részesült a kitüntetésben.

Magyar Arany Érdemkereszt polgári tagozata

Kiss Áron Keve, a Magyar Csillagászat Nonprofit Kft. ügyvezetője a hazánkban megrendezett 2019. évi Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia szervezése és lebonyolítása során végzett tevékenysége, valamint a tudomány-népszerűsítés új, innovatív hazai műhelye, a Svábhegyi Csillagvizsgáló létrehozásában és működtetésében vállalt szerepe elismeréseként részesült a díjban.

Krassói Kornélia, a budapesti XXI. kerületi Jedlik Ányos Gimnázium korábbi igazgatóhelyettese, nyugalmazott tanára a középiskolai fizikaoktatás területén végzett több mint öt évtizedes, elhivatott pedagógusi munkájáért kapta a kitüntetést.

Kitüntetések március 15-e alkalmából, 2021

Széchenyi-díj

Szabó György fizikus, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Energiatudományi Kutatóközpontja Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének tudományos tanácsadója Magyarország számára kivételesen értékes tudományos pályafutása során az evolúciós játékelméletek kidolgozásában, illetve társadalmi problémákra történő alkalmazásában, valamint a komplex rendszerekben önszerveződést eredményező kölcsönhatások azonosításában elért, világviszonylatban is kimagasló eredményei elismeréseként részesült a díjban.

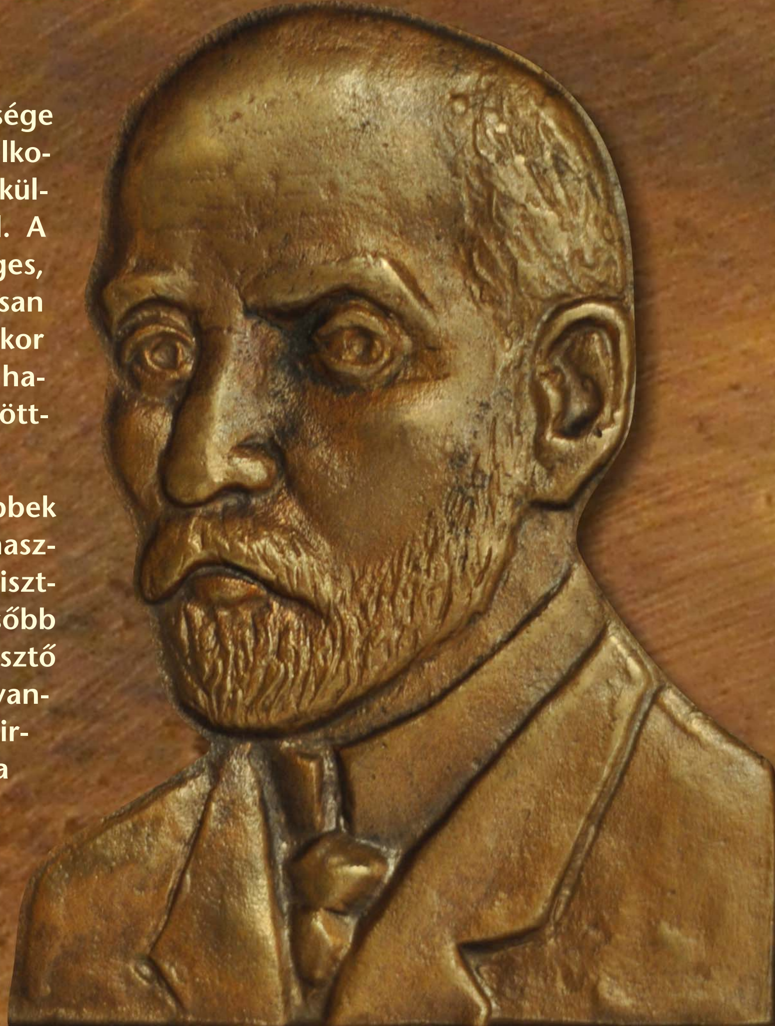
Magyar Érdemrend tisztikeresztje polgári tagozata

Korpa Csaba mérnök-fizikust, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, a Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizikai Intézete Elméleti Fizika Tanszékének egyetemi tanárát az elméleti magfizika területén folytatott kutatói munkájáért, valamint a pécsi egyetemi elméleti fizikai oktatás fejlesztésében és a tanárképzésben vállalt jelentős szerepéért tüntették ki.

Magyar Érdemrend lovagkeresztje polgári tagozata

Hegedüs Tibor fizikus, csillagász, a Szegedi Tudományegyetem Bajai Obszervatóriumának igazgatója, a Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizikai Intézete Csillagászati Tanszékének vezetője, tiszteletbeli egyetemi docense nemzetközileg is elismert asztrofizikai kutatásai, oktatói és tudományos közéleti tevékenysége, valamint a Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpiára készülő magyar középiskolások felkészítésében vállalt szerepe elismeréseként részesült a díjban.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Elnökségének nyilatkozata



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Elnöksége 2021. április 14-én tartott ülésén foglalkozott a szokásosan májusban tartott küldöttgyűlés összehívásának kérdésével. A koronavírus-világjárvány miatt kétséges, hogy mikor tartható meg biztonságosan egy jelenléti küldöttgyűlés, ugyanakkor vannak halaszthatatlan vagy nehezen halasztható feladatok, amelyekben a küldöttgyűlés illetékes.

Az idei küldöttgyűlés napirendjén többek között kiemelt helyen szerepel a közhasznúsági jelentés elfogadása, valamint a tisztújítás. A közhasznúsági jelentést legkésőbb május 31-ig be kell nyújtani. Ez jogvesztő határidőként most is érvényes. Ugyanakkor a koronavírus-járvány miatt kihirdetett – és a második hullám okán újra életbe léptetett – veszélyhelyzetben érvényes szabályozás szerint lehetőség van arra, hogy – a Felügyelőbizottság jóváhagyása esetén, jelenléti küldöttgyűlés összehívása nélkül – az Elnökség maga fogadja el a jelentést, a járványveszély elmúltával utólag terjesztve a küldöttgyűlés elé, ahogyan az a tavalyi évben is történt. A tisztújítást viszont csak jelenléti küldöttgyűlésen tudjuk szabályosan lebonyolítani.

Ezért az Elnökség úgy határozott, hogy a két ügyben eltérő eljárást követ. A legközelebbi, májusi elnökségi ülésen elfogadja a 2020. évi közhasznúsági jelentést, megkéri a Felügyelőbizottság állásfoglalását, és jóváhagyás esetén, egy újabb távolléti ülés után benyújtja azt. Természetesen utólag tájékoztatjuk a küldöttgyűlést.

A májusi elnökségi ülésig remélhetőleg tisztázódik, hogy még június folyamán lehet-e jelenléti küldöttgyűlést tartani. Amennyiben igen, akkor a 30 napos határidő betartásával június második felére összehívjuk a küldöttgyűlést, és akkor tartjuk meg a tisztújítást. A tagságtól és a jelöltektől megértést és türelmet kérünk.

Budapest, 2021. április 14.

Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöksége