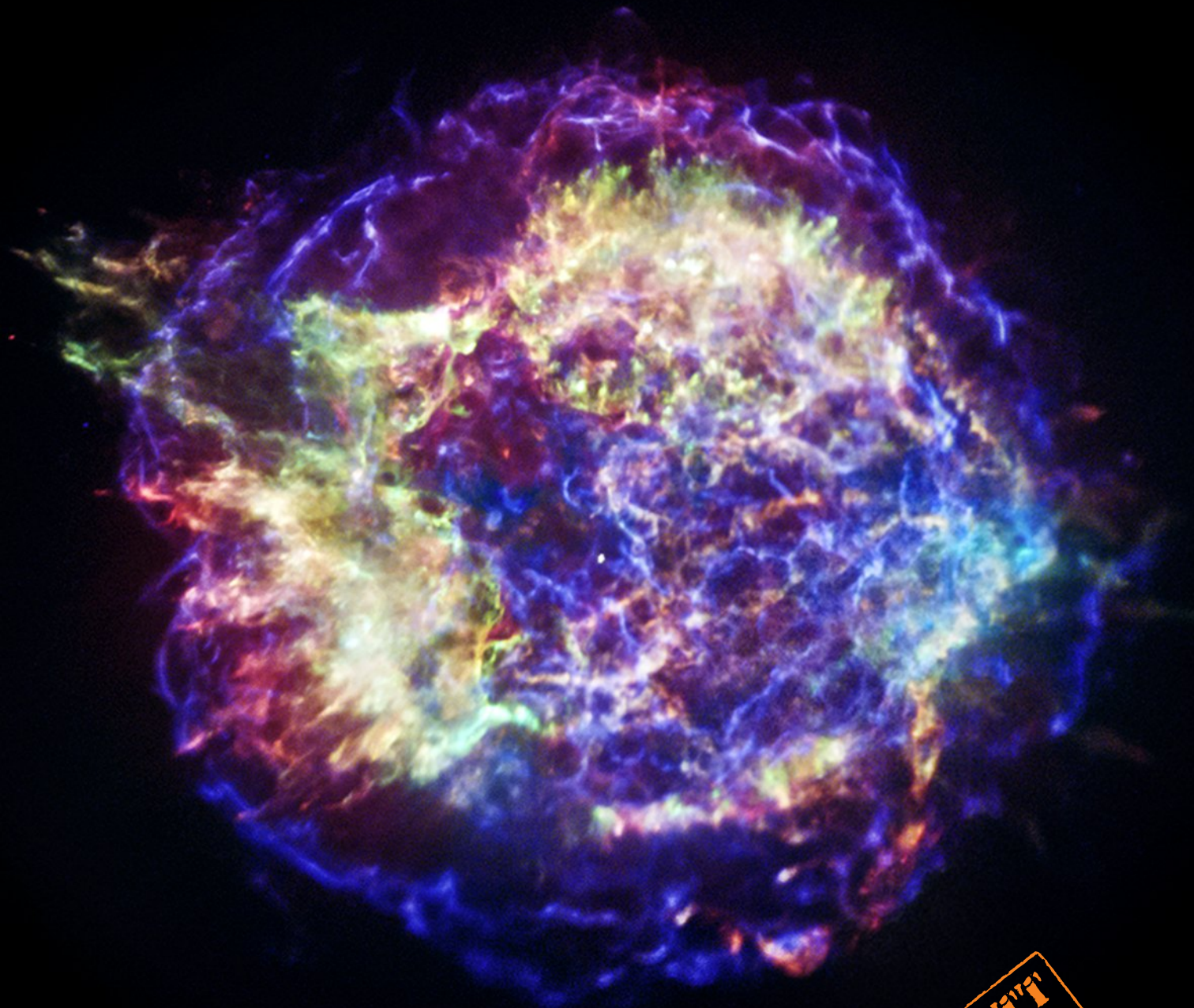


fizikai szemle



2017/5

BEÁGYAZOTT
VIDEOVAL

FROM TEACHERS
FOR TEACHERS

2017. JÚNIUS 29. – JÚLIUS 2.

INVENTING THE FUTURE OF SCIENCE EDUCATION

SCIENCE ON STAGE Fesztivál 2017, Debrecen

Július 1-jén
(szombaton)
Nyílt Nap lesz.
Ingyenes belépés!
Mindenkit szeretettel várunk!

Több mint 400 európai és néhány Európán kívüli tanár jön mintegy 300 projekttel Debrecenbe, a Kölcsey Központba a jubileumi, tizedik Science on Stage Europe fesztiválra, hogy kiállításon, műhelyeken, illetve színpadi előadásokon bemutassák egymásnak leginnovatívabb módszereiket, amelyekkel a természettudományos tárgyakhoz csinálnak kedvet a fiataloknak. A nagyközönség a Nyílt Napon tekintheti meg a fesztivált. További információk magyar nyelven: <http://szinpadon-a-tudomany.hu> és angolul: <http://sons2017.eu>

SCIENCE ON STAGE 2017
DEBRECEN

THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

SZERVEZŐK:



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:
Bencze Gyula, Czitrovszky Aladár, Faigel Gyula, Füstöss László, Gyulai József, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Németh Judit, Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Szerkesztő:
Lendvai János

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

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

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

A NASA Chandra teleszkópjával készült kép a Tejút legfiatalabb, II-es – azaz „core collapse” – típusú szupernóva-maradványáról, a Cassiopeia A-ról (lásd Kiss Gábor Gyula írását).

Patkós András, Sükösd Csaba: Marx György (1927–2002) 146
Megemlékezés a 20. század kiemelkedő magyar tudósa születésének 90. évfordulóján

Gali Ádám: Kvantumtechnológiai rendszerek: szimuláció 157
és kísérleti megvalósítás
A kvantuminformáció alapját képező kvantumbitek fizikai megvalósításának egy lehetősége

Kiss Gábor Gyula: A nehéz, protongazdag magok keletkezése 163
robbanásos folyamatokban
A stabilitási völgy protongazdag szélén található neutronszegény p-magok keletkezésének vizsgálatát célzó legújabb kísérleti erőfeszítések bemutatása

A FIZIKA TANÍTÁSA

Tóth Eszter: „A természet játéka” 168
Marx György könyvében leírt ötletek megvalósítása az oktatásban

Bokor Nándor: Ikerparadoxon videóüzenettel 171
Az írás a téridődiagramok szemléletességére és a relativisztikus jelenségek megértésében és tanításában való pedagógiai hasznára hívja fel a figyelmet

Tasi Zoltánné: XXVI. Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny 175
A 14 éves korosztály számára kiírt verseny – hagyományosan a győri Kazinczy Ferenc Gimnáziumban megrendezett – országos döntőjének krónikája

Móróné Tapody Éva: Napsugárzás és a Föld – a fizikatanítás 179
a felmérések tükrében

60. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató Ankét – 2017. március 15–18.

A fizikatanárok hagyományos, éves találkozásának négy napja

A. Patkós, Cs. Sükösd: George Marx (1927–2002)

Á. Gali: Quantum technological systems: simulation and experimental implementation

G. G. Kiss: Production of proton-rich nuclei by explosive processes

TEACHING PHYSICS

E. Tóth: Games of Nature

N. Bokor: Twin paradox with video message

Z. Tasi: The XXVI. Öveges József Contest in physics

É. Móróné-Tapody: Solar radiation and the Earth – Physics teaching in the light of the surveys – 60th Conference of Physics Teachers, 15–18 March 2017



MARX GYÖRGY (1927–2002)

Patkós András – ELTE, Atomfizika Tanszék
Sükösd Csaba – BME Nukleáris Technikai Intézet

Marx György a 20. század fizikájának kiemelkedő magyar tudósa, a természettudomány felső- és közoktatásának világszerte elismert továbbfejlesztője, a magyar társadalom modernizációjának nagyhatású képviselője volt. 1927. május 25-én, pedagógus családban született. Édesapja, *Marx István* földrajz-történelem szakos, édesanyja, *László Júlia* biológiatanár volt. Első, tudományhoz kapcsolódó publikációját 16 éves korában közölte a *Bűvár* című folyóirat, *A nagy számok története* címmel [1]. 1945-ben érettségizett a Lónyai utcai Református Gimnáziumban. Matematikából a differenciálszámítás, fizikából a kvantummechanika elemeinek ismertetésével maturált.

A tudós

A Pázmány Péter Tudományegyetem matematika-fizika szakára iratkozott be, harmadik szakként a kémiát is felvette. 1947–48-ban *Lassovszky Károly* tanszékvezető hívására a Csillagászati Tanszék demonstrátora volt. Miután Lassovszky távozni kényszerült a Csillagászati Tanszék éléről, Marx György az Elméleti Fizikai Tanszékhez, *Novobátczy Károly* mellé csatlakozott, akinek tudományos teljesítményét baloldali nézetei miatt csak a háborút követően ismerték el egyetemi katedrával. Ez idő tájt az Elméleti Fizikai Tanszéken új, fiatal elméleti fizikusi gárda szerveződött.

Jelen cikk a TypoTEX Kiadónál 2005-ben megjelent *Marx György, Gyorsuló Idő* című könyv számára, a szerzők által írt életrajz átdolgozott változata. A kiadó engedélyével közöljük.



Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektroyenge anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatóval kapcsolatos program vezetője.



2002-ben, 75. születésnapján az MTA-ban.¹

Korai évek

A kvantum-elektrodinamika és a magfizika hazai meghonosításán lázas munka folyt. A háború alatt elmaradt folyóirat-évfolyamok pótlásával *Richard Feynman*, *Julian Schwinger*, *Viktor Weisskopf* és *Wigner Jenő* klasszikus műveinek szellemi kihívása egyszerre, koncentráltan jelentkezett. Ugyanakkor a magyar kutatókat a legördült vasfüggöny elzárta a vezető nyugati centrumoktól. Marx György kezdeményezte a „Puskín utcai szerdai szemináriumokat”, amelyeken az eredeti cikkekből sajátították el a fiatalok a kor két vezető kutatási irányának legújabb eredményeit. Ezt a szeminárium sorozatot egészen a hatvanas évek végéig gondozta.

Marx György még diplomája elnyerésének évében, 1950-ben az egyetemi doktori fokozatot is kiérdemelte *Nemstatikus gravitációs terek* című disszertációjával [2]. Doktori szigorlatot fizikából, matematikából és csillagászatból tett. A klasszikus térelméleti módszereket Novobátczytól tanulta. Tőle kapta első sikeres tudományos témáját is, a mozgó dielektrikumok energia-impulzus tenzorának származtatását. *Györgyi Gézával* közös munkája egészen az 1970-es évek közepéig megőrizte aktualitását, amikor a *Max Abraham* és *Hermann Minkowski* által adott alternatívák között

¹ A 2002-ben készült felvételeket Kármán Tamás készítette.

töltés megmaradása címmel tartotta meg. E törvény érvényességére – különösen a neutrínóoszillációk 2001-es felfedezése óta – sok korlátozó körülmény ismeretes. Eredetének, időbeli változásának megértése azonban az Univerzum barion-, illetve lepton-aszimmetriájának kulcsa. Ez a kérdés a 21. század elméleti fizikájának egyik legvilágosabban megfogalmazott kihívása.

Marx György pályája első évtizedében a mikrofizika legaktuálisabb jelenségein dolgozva, a fizika klaszikus és kvantumos eszközeit ötvözve bizonyította tehetségét. 1955-ben a Kossuth díj III. fokozatával, 1956-ban kormánykitüntetéssel ismerték el teljesítményét. 1956-ban *Relativisztikus dinamika* címmel védte meg kandidátusi disszertációját [8].

1956 után

1956 végén az ELTE TTK Forradalmi Bizottságának a Gólyavárba összehívott gyűlésén történt az, amit az MSzMP KB-tag Novobáztzy „a mi okos Marxunk megzavarodásaként” értékelt. Marx György hozzászólásában javasolta a győri „ellenkormány” támogatását. Emiatt 1957. március 15. előtt „begyűjtötték”, és egy hétig fogdában volt. Mivel tanítványai között népszerű volt, a hatalom attól félt, hogy a MUK („márciusban újra kezdjük”) egyik hatékony szervezője lehet. A tanszékről *Román Pál* és Szamosi Géza a forradalom leverése után emigrált, ezért a politikai veszélyfelhők elmúltával a tanszék oktatási és tudományos életének szervezése immár Nagy Károlyra és Őrá hárult. Az 56-os felszólalás „pillangóhatása” azonban az elkövetkező évtizedekben végigkísérte Marx György felsőoktatási pályáját.

Amerika

Politikai megbízhatatlansága ellenére az Elméleti Fizika Tanszékről ő volt a második kutató, akinek a II. világháború után lehetősége nyílt hosszabb amerikai kutatóútra. *Leonard Schiff*, a Stanford Egyetem híres elméleti fizika professzora hívta meg, akivel 1958-ban a CERN-ben találkozott. Ott Amerika nagy kísérleti fizikusaival, *Frederic Reinesszel*, *Clyde Cowannel*, *Raymond Davisszel* ismerkedett meg (a szovjet iskola kiemelkedő képviselőivel Jakov Zeldoviccsal és *Bruno Pontecorvóval* már korábban találkozott). Második egyesült államokbeli útja során több állásajánlatot kapott, amelyeket azonban elhárított. Visszatért budapesti katedrájához, amelyre 1961-ben nevezték ki, egy évvel azután, hogy a fizikai tudomány doktora lett. Immár megtalálta a rá jellemző kutatási stílust: a legújabb elképzelések felvetői között egyenrangú, villámgyorsan reagálni képes diszkussziópartnerként gyűjtötte a kutatások élvonala számára legérdekesebb témákat, majd itthon a részletes és hosszadalmas számításokra „éhes” diplomamunkásaival kísérletileg ellenőrizhető jóslatokra vezető intenzív vizsgálatokat végzett. Átfogó érdeklődése egyszerre vonzotta *Heisenberg* világegyenletéhez,



Werner Heisenberg, Novobáztzy Károly, Gombás Pál, Nagy Károly és Marx György

amely az összes elemi részt egyetlen egységes térgerjesztéseként szerette volna megérteni, a csillagokat alkotó forró nukleáris gáz állapotegyenletéhez és az űrhajózáshoz.

Spontán szimmetriasérülés

Marx életében az 1956-os esztendő tudományos szempontból is fordulópontnak tekinthető. Ez az év hozta meg a természet tértükrözési aszimmetriájának felismerését a tudományban. A fizika legújabb eredményeire mindig érzékenyen reagáló Marx György eddigi témáitól búcsút véve, új kutatási programba fogott a töltéstükrözési szimmetria sérülési mechanizmusának tisztázására. Amerikai útjai során a töltéstükrözési szimmetria sérülésének számos vezető szakemberével is dolgozott [8].

A budapesti elméleti fizikai iskolára Werner Heisenberg és az egységes térelmélet általa megfogalmazott változata különösen nagy hatással volt. Marx György a Heisenberg-féle egységes térelmélet szempontjából értékelt *Jeffrey Goldstone* 1961-ben kimondott tételét a folytonos szimmetriák spontán sérülésének térelméleti megvalósulásáról. A Goldstone-bozonok és a nehéz gerjesztések közötti energiarés létében kereste az elektron és a müon természetét megkülönböztető mechanizmust [9].

Az 1962-es nemzetközi részecskefizikai konferenciát követően – kiemelkedő pályáját az ő témavezetésével kezdő – *Kuti Gyulával* nemzetközi figyelmet keltő cikksorozatot [10–12] írt a spontán szimmetriasértés nem-perturbatív térelméletéről. Bár személyes részvételét ezekben a vizsgálatokban a hatvanas évek végén befejezte, de erőteljesen támogatta az erős kölcsönhatások megértésére Kuti körül kialakuló csoport munkájának elismertetését.

Neutrínók

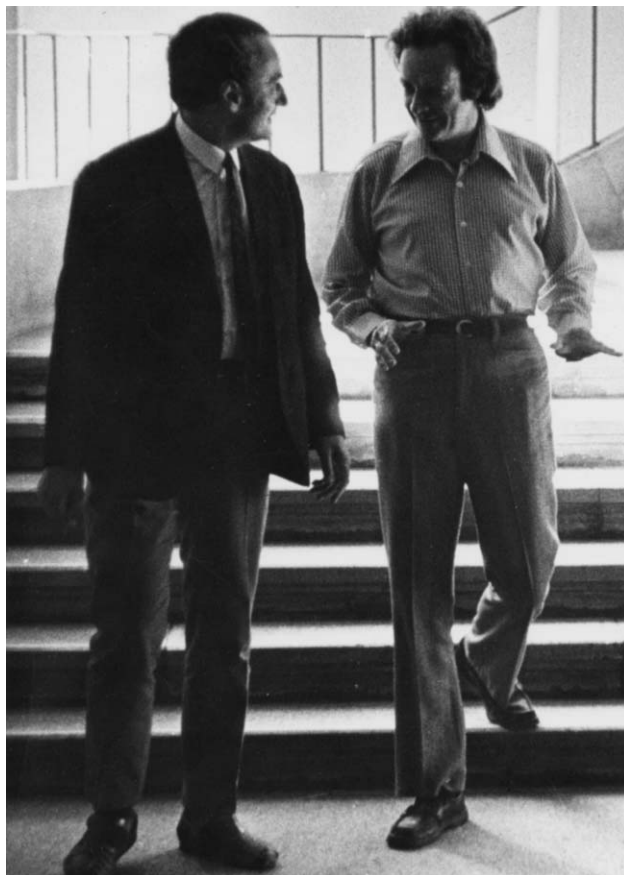
1960-ban *Menyhárd Nórával* – látszólag előzmények nélkül – a neutrínócsillagásatról írt tanulmányt [13, 14]. A *Science*-ben megjelent cikke a következő öt évben, többek között, *J. N. Babcall*, *B. Pontecorvo* és *F. Reines* is hivatkozott. Azt gondoljuk, hogy a kül-

földi útjai során megismert kiemelkedő személyiségek vezették vissza a csillagászathoz egy – akkor még a fantasztikus irodalomba illő – új eszköz lelkesítő víziójával. Sorsformáló találkozásai közül kimagaslik a Zeldoviccsal Moszkvában, 1958-ban kötött életre szóló barátság. Tartós kutatói-emberi kapcsolatokat eredményezett az 1959-es részecskefizikai világkonferencián létrejött kijevei találkozása *Telegdi Bálinttal* is.

A neutrínókról írott dolgozatai negyven éven át szüntelenül jelen voltak életművében. A neutrínók laboratóriumon kívüli fizikája legkülönbözőbb aspektusainak kidolgozásába nagy élvezettel, óriási aktivitással vetette be magát. E területen a magyar elméleti fizika számos, ma nemzetközileg jól ismert személyiségét (köztük *Kövesi-Domokos Zsuzsát* [15], *Nagy Tibort* [16], *Németh Juditot* [17]) nyerte meg rövidebb-hosszabb együttműködésre. *Lux Ivánnal* az 1960–70-es évek fordulóján dolgozott a Föld antineutrínó-luminizálásának kérdésén [18, 19], amely jelenség a 2010-es évekre ért el a reális kimutathatóság határára. 2007-ben a jelenséget kimutató japán kutatók, az *Earth and Planetary Science* folyóiratban megjelent összefoglaló cikkükben Marx György cikkét említették első helyen a földszerkezet neutrínókkal való felderítésének kezdeményezői között. *Gajzágó Évával* az 1970-es évek első felében a tükrözési szimmetria sérülése molekuláris megnyilvánulásának mértékére adott becslést [20]. Az 1980-as évek elején *David Dearbornnal* és *Ruff Imrével*, az ELTE kémia professzorával feltűnést keltő, nagy eredetiségű javaslatot tett a Nappól várt neutrínók részleges hiányának esetleges kémiai jellegű magyarázatára [21].

A nem-múló világhírt a neutrínók nyugalmi tömegére *Szalay A. Sándorral* közösen adott asztrofizikai felső korlát és a neutrínók lehetséges kozmológiai szerepére tett javaslat hozta meg Marx Györgynek. Elsőként 1966-ban Zeldovics és *Szemjon Szolomonovics Gerstein* vetették fel azt, hogy a neutrínók tömegére asztrofizikai korlát adható. Zeldovics a hetvenes években azt a kiváltságot élvezte, hogy évente egyszer részt vehetett egy magyarországi nemzetközi konferencián. Itt buzdította Marx akkori diploma-

Mester és tanítvány, Szalay A. Sándorral 2002 májusában, 75. születésnapján, a tiszteletére rendezett tudományos ülésen, az MTA-n.



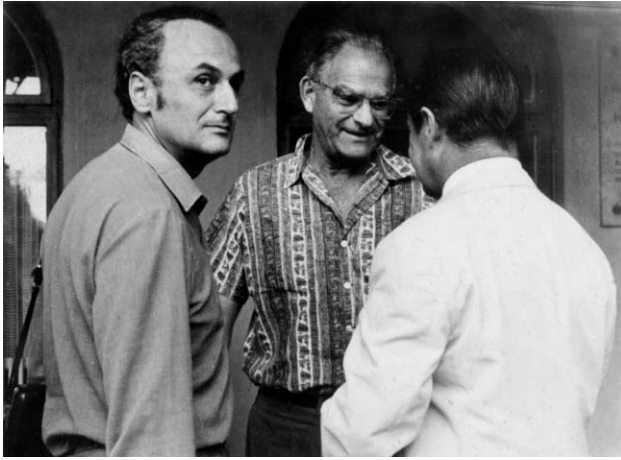
Az első, 1972-es Neutrínó-konferenciára érkező Richard Feynman az ELTE D épület Atomfizikai Tanszékéről levezető, jellegzetes lépcsőfordulóban.

munkását, Szalay A. Sándort a probléma részletes számítógépes vizsgálatára, és ebből született meg először a Marx–Szalay-féle tömegkorlát, majd ugyanők javasolták e részecskék figyelembevételét a kozmikus sötét anyag természetére vonatkozó kutatásokban. A tömegkorlát harminc év alatt századrészére csökkent, a neutrínók részesezése a sötét anyagban ezreléknyi, mégis a kijelölt stratégia fő vonala változatlanul érvényes.

Az is biztos, hogy a neutrínók túl könnyűek ahhoz, hogy a sötét anyag lényeges komponensét alkothassák, ám az úgynevezett „forró sötét anyag” lehetősége, amint azt Marx és Szalay 1976-ban hangsúlyosan felvetette [22], évtizedekig szerepelt az asztro-részecskefizika fontos kutatási irányai között. Marx és Szalay munkája méltán szerepel a *Részecskék Adattárában* (*Particle Data Book*) a neutrínótömeg meghatározásához vezető mérföldkövek felsorolásában.

A neutrínóoszillációk jelenségének pár évvel ezelőtti felfedezése bizonyossá teszi, hogy a neutrínók össztömege nullától különböző. Az egyes tömegek abszolút nagyságának megmérése a 21. század fizikájának feladatsorában előkelő helyen áll.

1972-ben szervezte meg a Neutrínó-konferenciák máig tartó sorozatának nyitányát. E konferenciának igazi „álmocspat” adott rangot: Richard Feynman, *Tsung-Dao Lee*, Bruno Pontecorvo, Frederick Reines és Viktor Weisskopf versengve elemezte a nukleon-



Viktor Weisskopffal Balatonfüreden, az 1992-es Neutrínó-konferencián.

szerkezet neutrínónyalábbal történő letapogatásának, illetve a Világegyetemet kitöltő neutrínógáz észlelésének lehetőségeit. Jellemző a kozmológia egy mai szaktekintélye, *Edward W. Kolb* chicagói professzor visszaemlékezése, aki diákként a balatoni konferenciaköteteket cikkről-cikkre olvasva sajátította el a terület frontvonalának eredményeit.

A csillagászattól az élet eredetének megértéséig

Marx György a tudományban is igazi reneszánsz alkat volt. A bonyolult és aprólékos számítások helyett a nagy gondolat megragadásának ideálját vallotta. A tudomány minden területe és minden újabb eredmény érdekelt. A *Nature* magazinban 1967-ben megjelent cikke olyan javaslatokat tartalmaz az űrhajók lézerefényes távmeghajtására, amelyet napjaink űrhajózási konferenciáin is komolyan idéznek [23].

A tudományos újságírók 2002-ben az év ismeretterjesztő tudósának választva átadták neki a Virgo csillagkép egyik csillagának róla történt elnevezését tanúsító okmányt.² Ennek fordítása: „Ezúton tudatjuk, hogy a Nemzetközi Csillag Katalógus ezennel átnevezi a Virgo RA 12h 57m 43.76s D 4° csillagot Dr. Marx György nevére. Tudatjuk továbbá, hogy mostantól ezt a csillagot ezen a néven kell megnevezni. Ez a név véglegesen elküldésre került a Katalógus kezelőjének Svájcba, és beírásra került az Egyesült Államok copyright irodájában regisztrált könyvbe.”



Meghívták arra a bjurakáni konferenciára is, amelyen a világ vezető tudósai a Földön kívüli civilizációk létéről és a velük való kommunikáció lehetőségeiről tanácskoztak.

A 33 éves Marx György a következőképpen írt *Túl az Atomfizikán* című, nagyhatású, népszerűsítő könyvében [24]: „A Nap és a Föld neutrínósugárzásának detektálása véleményem szerint olyan feladat, amelyet századunkban [tudniillik a 20. században] megold a tudomány. A neutrínócsillagászat révén bepillant majd az ember az égitestek belsejébe. Hogy a Naprendszeren túlról érkező neutrínósugárzás valaha is észlelhető lesz-e, az nagyon kétséges... Lehet, hogy egyszer majd [a neutrínó] a kutatás tárgyából a kutatás eszközüvé válik, olyan feladatok elvégzését teszi lehetővé, amelynek más anyag nem tudna eleget tenni.”

Marx Györgynek megadta a sors, hogy e fejlemények alkotó, elismert részese lehetett. A Magellán-felhőben robbant szupernóva neutrínóinak 1987-es észlelése még az ő várakozásait is felülmúlta. Utolsó publikált szövegében, a Neutrino'02 konferencián, a Nemzetközi Neutrínó Bizottság lelépő elnökeként elmondott összefoglalójában, joggal írhatta: „...most, a századfordulón ténylegesen látjuk a Nap közepét, és látjuk ott azokat a fúziós reakciókat is, amelyek Napunk energiáját adják. Közvetlen kísérleti tényvé vált az az állítás, hogy a napsugárzás forrása az atommagok fúziója.”³

A hetvenes évek közepétől Marx Györgynek a részecskefizikusok, az űrkutatók és a kozmológusok (csillagászok) között nemzetközileg elismert helye volt. Az MTA rendes tagjává választása után, 1983-ban, székfoglalóját *Az Univerzum termodinamikája* címmel tartotta meg. Betöltötte az Európai Fizikai Társaság Részecskefizikai Divíziója elnöki tisztségét, alelnöke volt a Nemzetközi Fizikai Uniónak (IUPAP)⁴ és a Nemzetközi Asztronautikai Uniónak; vezette a Nemzetközi Csillagászati Unió bioasztronómiai szakosztályát és az Amerikai Fizikai Társaság tiszteleti tagja volt.

A Nobel-díjasok magyarországi látogatásait kihasználva szervezte meg a balatonfüredi „emlékfa-ültetési” akciókat. Neki köszönhető a Tagore-sétányon ültetett, kiemelkedő tudósok által saját kezűleg, vagy a rájuk emlékezve ültetett emlékfák sokasága. Halála után az Eötvös Loránd fizikai Társulat Marx György emlékére is ültetett fát.

² Az eredeti szöveg: „Know we herewith that the International Star Registry doth hereby redesignate star number Virgo RA 12h 57m 43.76s D 4° to the name Dr. Marx György.”

Know ye further that this star will henceforth be known by this name. This name is permanently filed in The Registry's vault in Switzerland and recorded in a book which will be registered in the copyright office of the United States of America.”

³ Az angol eredeti szöveg: „... at this turn of the century, we do see the centre of the Sun and we observe the nuclear fusion reactions there producing the solar energy... the statement, that the source of sunshine is nuclear fusion, has become a direct empirical fact...”

⁴ IUPAP: The International Union of Pure and Applied Physics



Dirac fája előtt a Dirac Centenáriumon

A tanár

A tanár feladatának mindent megelőző fontosságát családi hagyományként örökölte. Már másodéves egyetemi hallgató korában – amikor a Csillagászati Tanszék gyakornoka lett – elkezdte oktatói munkáját. Az oktatás egész életét végigkísérte, a tudás átadása mindig, mindenkinek, minden szinten a lételemévé vált. „Nem mentem el ebből az országból. A fizikát igazán szépen csak magyarul lehet tanítani. Én tanár vagyok” – hangoztatta.

Egyetemi oktatás

Kristálytisza logikával felépített, élvezetes egyetemi előadásai az ELTE Természettudományi Kar megszámlálhatatlan hallgatójának pályáját irányították a fizika legmodernebb területeinek kutatása felé. Előadásain az egyetemi hallgatók zsúfolásig megtöltötték a termet, és többször is megtapsolták – ami sem akkoriban, sem ma nem mindennapos. Egyéves előadássorozatáért, amelyre *Walter Thirring*, világhírű bécsi elméleti fizikus kérte fel, az ottani tudományegyetem tiszteletbeli professzorának fogadta. Életének utolsó hónapjaiban az Eötvös Egyetem Atomfizikai Tanszéke emeritus professzoraként egy, a newtoni mechanikáról szóló, az iszonyatos testi szenvedések felett is győzedelmeskedő előadás-sorozattal fejezte be pályafutását. Még akkor is megtalálta a módját, hogy a másodéves hallgatókat a kaotikus mozgás, vagy az Univerzum globális mozgástörvényeinek legújabb fejleményeivel lelkesítse a fizika lezárhatatlan perspektívájú kutatásaiban való részvétellel.

A klasszikus fizika, a kvantumfizika, a magfizika és a részecskefizika új fejezeteiről írott egyetemi jegyzeteinek sorát publikációs listája sem képes számon tartani. Társszerzője volt az évtizedekig használt *Elméleti Fizikai Példatárnak* [25], amelyet követett a három magyar kiadást megélt, nemzetközi karriert is befutott *Kvantummechanika* könyve [26]. A fizikus hallgatóknak szóló tankönyvek sorát a Károlyházy Frigyessel és Nagy Károssal írott *Statisztikus Mechanika* zárta 1965-ben [27]. Telegdi Bálint és *Lev Okun* egyaránt kiemelten méltatták a gyenge kölcsönhatásokról [28], vagy a kaonok CP-sértő tulajdonságairól írott [29], pedagógiai is alaposan átgondolt, összefoglaló munkáit.

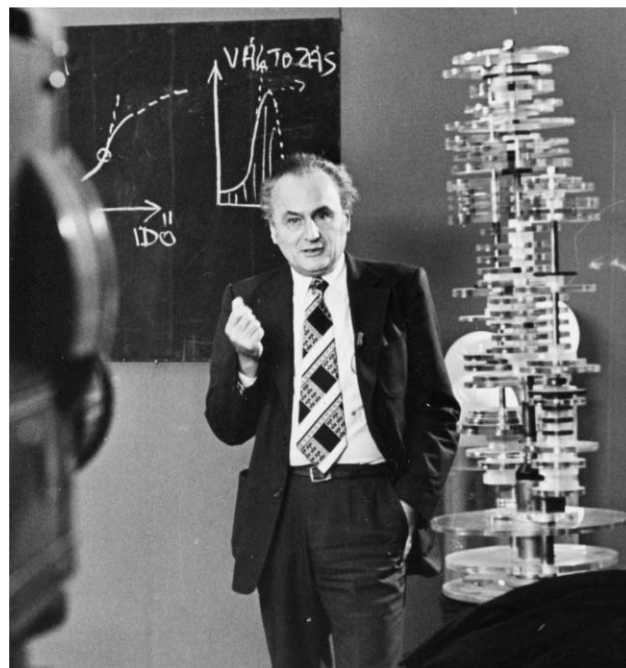
A hetvenes évektől egyetemi oktatói érdeklődése középpontjába egyre inkább a természet egységes szemlélete, a modern fizika és a társtudományok közötti kölcsönhatás került. Így született az *Éltrevaló atomok* című tankönyv biológusoknak 1975-ben [30].

Az Eötvös Társulat elnökeként bátorította a tanulmányi versenyek és a *KöMaL* hagyományos, megérdemelten nagytekintélyű tehetséggondozó rendszerének helyi, illetve eltérő tanulói készségeket díjazó új versenyekkel való kiegészítését. Óriási szeretettel és várakozással köszöntötte egyetemi hallgatóként a versenyeken megismert középiskolásokat, és szinte szülői büszkeséggel dicsekedett, amikor nemzetközi karriert befutó fiatal kutatókká fejlődtek.

Közoktatás és a nukleáris kultúra terjesztése

A társadalom cselekvő jobbításának soha nem szűnő igényéből fakadóan kezdte meg a természettudományok integrált közoktatási programjának kidolgozást.

Az MTV *Jövönk titkai* című tudományos-ismeretterjesztő sorozata első részének felvételén 1981-ben (fotó: Sárospataki Györgyi, Fortepan/Rádió és Televízió Újság).

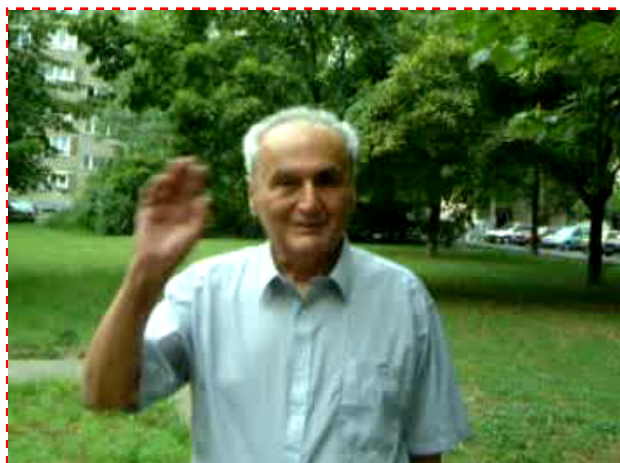


sát, amely igen éles vitákat váltott ki idehaza. E viták eredményeként a fizika volt az a tantárgy, ahol már a nyolcvanas évek közepén a tanár választásától függhetett, hogy melyik tankönyvet használja.

A minden újra fogékony Marx György már a hazai nukleáris történelem hajnalán aktívan részt vett a nukleáris kultúra terjesztésében. Az 1971-ben a Műegyetemen megnyitott Egyetemi Atomreaktoron Eötvös-egyetemi hallgatói voltak az elsők, akik hallgatói méréseket végeztek – még a műegyetemi hallgatók előtt. Vallotta, hogy az atomenergia társadalmi elfogadottságához elengedhetetlen az, hogy a fiatalok már az iskolában megismerkedjenek a magfizikai és sugárvédelmi alapfogalmakkal. Fizika-, kémia- és biológiaszakos tanárokat gyűjtött maga mellé, akik számára 1971-től 1988-ig évente őszi és tavaszi iskolákat, valamint „nukleáris továbbképzéseket” szervezett. Megalakította a „nukleáris tanárok” ma is élő hálózatát. Az érdeklődő tanárokat elvitte Paksra, Püspökszilágyiba, a CERN-be, a romániai CANDU reaktorokhoz és Csernobilba is. Ezekben az években jelentek meg a részvételével és irányításával készült tankönyvek, valamint azok a népszerű tudományos munkái, amelyek közoktatás-fejlesztési elkötelezettségét tükrözik [31–33]. Ezen tankönyvekben hangsúlyos szerepet kapnak a magfizikai, atomenergetikai fogalmak. A modern fizika középiskolai oktatásáról szóló tankönyvei közül többet sok nyelvre lefordítottak, és egyes országokban (például Japán és Kína) ma is használnak. Kezdeményezte és megszervezte az Országos Szilárd Leó Fizikaversenyt, amelyen a nukleáris és modern fizikai ismeretekben leginkább jártas középiskolai tanulók mérhették – és azóta is mérhetik – össze tudásukat.

Atomenergetikával foglalkozó ismeretterjesztő újságcikkeivel igyekezett eloszlatni az új, modern energiatermelési móddal kapcsolatos alaptalan félelmeket. 1986-ban, a csernobili baleset után – dacolva az akkori hatalom elkendőző hozzáállásával – nemcsak az Atomfizikai Tanszék munkatársainak, de fizikatanárok csoportjainak is nyíltan beszélt a baleset akkor csak a „beavatott” szakemberek számára ismertté vált

Születésnapi videóüdvözlő gimnáziumi padtársának, 2002. tavasz



Eric Rogers amerikai professzorral Balatonfüreden

tényeiről, a hazai sugárzási helyzetről, és az azzal kapcsolatos kockázatokról.

Élete utolsó nagy kutatási projektjét, amelynek tudományos célja a hazai természetes környezeti radioaktivitás megismerése és az ország radontérképének elkészítése lett, fizikatanárok és iskolások segítségével valósította meg. *Tóth Eszter* középiskolai fizikatanárral indította el azt a programot, amelynek oktatási-pedagógiai célja a kisiskolások megismertetése volt azzal a ténnyel, hogy a radioaktív sugárzás mindennapos kísérője életünknek. Ezzel egy korábban soha nem ismert, tömegeket mozgósító kutatási projekt jött létre, amely Amerikától Indiáig érdeklődést váltott ki, és követőkre talált.

Halálos betegen, utolsó nagy oktatási tárgyú nemzetközi konferenciáját is a nukleáris energetika közoktatási kérdéseiről szervezte 2002 nyarán Debrecenben.

Nemzetközi oktatási tevékenység

Élénk figyelemmel kísérte a fizika oktatásának javítására irányuló nemzetközi erőfeszítéseket. Tagja, majd később elnöke lett a Fizikaoktatás Nemzetközi Társaságának (GIREP⁵). Évente nemzetközi tanítási konferenciákat szervezett, ahova a terület legkiválóbb képviselőit hívta meg Japántól az Egyesült Államokig és Svédországtól Afrikáig, és ahol a fizika legmodernebb területeinek (atomenergia, káosz, atomfizika, számítógép az iskolában stb.) középiskolai oktatásáról folyt a vita. Ezen konferenciák kiadványait nem lehetett akkora példányszámban kinyomtatni, amelyet ne kapkodtak volna el külföldi oktatási szakemberek. Marx György személyes jóbarátja *Jon Ogborn* (Anglia) – felhasználva Marx György angolul megjelent írásait és a modern fizika középiskolai oktatásának magyar tapasztalatait – munkatársaival a világ egyik legkere-

⁵ Groupe International de la Recherche et de l'Éducation de la Physique



Afrikai gyerekekkel

settebb, középiskolásoknak írt tankönyvét valósította meg (*Advancing Physics A2 and AS*; Bristol: Institute of Physics Publishing).

A természettudományok közoktatásból való kiszorulásának problémájával már régebben küszködő Nyugat-Európában az általa elképzelt megoldások közül jó néhány – párosulva az internetes tartalomfejlesztési lehetőségekkel – megvalósult. Marx György képes volt egyszerű, középiskolás nyelven és mégis igaz módon megfogalmazni a huszadik század fizikájának legszebb és leghatékonyabb eredményeit. A nagy tekintélyű brit Institute of Physics ezért jutalmazta Marx György oktatásfejlesztési munkásságát 2001-ben Bragg-éremmel.

Mély meggyőződéssel szimpatizált a harmadik világgal. Az UNESCO szakértőjeként szenvedélyesen vitte a modern fizika oktatásának számítógépes programjait afrikai és ázsiai országok tanárképző intézményeibe, és tanította az ottaniakat szimulációs programok írására. Az utolérés vágyától hajtott, a tudománytörténet klaszszikus útjának bejárására elegendő idővel nem rendelkező környezet ezeket az eszközöket a „nagy ugrás” ritka lehetőségeként fogadta, és elterjedten használja a közoktatásban Kínában, Indiában, Kenyában, de Japánban is. Halálos betegen is gondja volt arra, hogy vízumot kapjanak az iráni és pakisztáni résztvevők az általa szervezett, 2002-es, debreceni II. International Radiation Education Symposiumra. A fejlődésben lemaradt világrégiók kimozdításáért érzett pózmentes, őszinte szolidaritást kifejező felelőssége, a fejlett világ pazarló energiagazdálkodása miatti aggodalma és az 1970-es, 1980-as évek reaktorbalesetei vezették a nukleáris környezet használatának és valós kockázatának széles társadalmi megismertetésén dolgozók élvonalába.

A tudományszervező

Novobáztzy Károly 1967-es halála után az Elméleti Fizikai Tanszék vezetőjévé Nagy Károlyt nevezték ki, aki már 1961-től számos állami feladatot vállalt. Marx György túlságosan individuális gondolkodású, kevésbé kompromisszumkereső egyéniség volt ahhoz, hogy az akkori (és a máig is) merev felsőoktatási hierarchia könnyen befogadta volna vezetőként. Ugyanakkor

gondolkodásának eredetisége hasznosíthatónak tűnt a saját dogmáival küszködő politikai berendezkedés megújulási próbálkozásai számára. A hetvenes években több egyetemi, akadémiai közművelődési bizottság vezetését vállalta, a természettudományok és humán kultúra egységének jegyében [34].

Atomfizikai Tanszék

Nemzetközileg is elismert tudományos tevékenysége, itthoni közéleti szereplése, és a politikai szférával kialakított – önfeladás nélküli – együttműködése meghozta annak elismerését, hogy Marx Györgynek joga van önálló tudományos iskola alakítására, saját tanszék vezetésére. Erre az alkalmat 1970-ben *Jánossy Lajos* visszavonulása szolgáltatta az Eötvös Egyetem Atomfizikai Tanszéke éléről. Ez a váltás tekinthető Marx György pályája második sorsfordulójának. Érdeklődését tovább mélyítve, a részecskefizikától a biofizikáig terjedő spektrumban sikeresen keltette életre a tanszék tagjainak tudományos ambícióit. Néha félkomolyan, félig tréfaként, egyes MTA kutatóintézetek tudományos produkciójával vetette össze a tanszék publikációinak számát és azok hivatkozottságát.

A tanszék személyi összetételére ráépítette egy szinte teljes fizikus tanterv tanítását, továbbá jelentős részt vállalt a matematika-fizika és a kémia-fizika szakos tanárok, valamint a vegyész, geofizikus, geológus, csillagász és biológus hallgatók képzésében. Az informatikai és a nukleáris laboratóriumok modernizálását személyesen menedzselte. Már a hetvenes években igényelte a számítógépes feladatmegoldás készségét fejlesztő elméleti fizikai gyakorlatokat. A fizikusi diplomák gyakorlati értékét sugárvédelmi tanfolyamok rendszeres megszervezésével fokozta.

Munkatársaitól szigorúan megkövetelte, hogy kutatásaikkal csatlakozzanak az irányadó nemzetközi trendekhez. Minthogy a fiatalok a hatvanas években csak nagy nehézségek árán jutottak útlelélhez, már 1966-ban balatoni konferenciát szervezett, amelyen részt vett a későbbi Nobel-díjas *Sheldon Lee Glashow* és *Steven Weinberg* is. A Nobel-díjasok magyarországi szakmai látogatásainak megszervezése később szinte szenvedélyévé vált. 1968-ban, Csehszlovákia megszállását követően a már korábban is időközönként működő Bécs–Budapest szeminárium rendszerítésében állapodtak meg a Bécsi Tudományegyetem professzoraival, azt háromszöggé egészítve ki Pozsony bevonásával. Így sikerült a nemzetközi kapcsolatok egy kiskapuját nyitva tartani szlovák barátaink számára. Ez a „Háromszög” kooperáció, amely 1968-tól 2004-ig folyamatosan működött, a nyugati kapcsolatok szimbóluma lett.

Ha kellett, politikai kapcsolatait használta, hogy nemzetközi meghívások elfogadását, külföldi nyári iskolákon való részvétel lehetőségét biztosítsa tanítványai és munkatársai számára. A tanszék csütörtöki szemináriumai kiemelkedő hazai és külföldi tudósok interdiszciplináris találkozóhelyévé váltak. A külföldi munkavállalásokat feltétlen támogatta, de kikötötte,

hogy egy év után haza kell jönni tanítani. Ebben a legígéretesebb pályát befutó tanítványaival sem tett kivételt, még akkor sem, ha egy-egy „hazarendelés” néha a személyes kapcsolatok rövidebb-hosszabb elhidegülését okozta.

A nyolcvanas-kilencvenes évek fordulóján a tanszéki tudományos profil hangsúlyait megváltoztató személyi megújulást kezdeményezett. Az 1992-ben lezárult és Szent-Györgyi-díjjal elismert tanszékvezetői korszakát követő szervezeti átrendeződés bebizonyította, hogy legalább három tanszéknyi erőt felváltató kutatóintézetévé fejlesztette a 22 évvel korábban rábízott tanszéket.

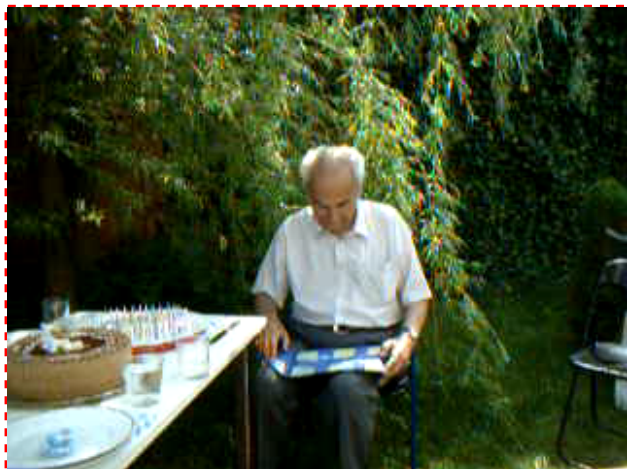
Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a *Fizikai Szemle*

A fizikusnak és a közéleti embernek a legegységesebb cselekvési terepet az Eötvös Loránd Fizikai Társulat jelentette. 1957 óta szerkesztette a Társulat folyóiratát a *Fizikai Szemlét*, amelybe haláláig közel 200 közleményt írt (és ennek sokszorosát javította közzétehetővé). *Eötvös Loránd* szellemében az Eötvös Társulathoz Európa-szerte irigyelt kuriózumot hozott létre: egy szakmai egyesületet, amelyben tanárok és kutatók képesek együttműködni. A tanári ankétok és a kutatók nagy nemzetközi konferenciái egymást váltogatták. Felismerte, hogy e konferenciák adják meg a Társulat tagjainak a nemzetközi fizikai közösség fórumain az egyenrangú partnerként való megjelenés lehetőségét. Ezzel a felelősségteljes lehetőséggel maga is élt. Az Eötvös Társulat főtítkárának 1972-ben választották meg. Ezt 1976 és 1999 között több alkalommal követte megválasztása az elnöki posztra. 1999-től haláláig volt tiszteletbeli elnök. Megmarad a Társulat örökös elnökének.

Magyar Nukleáris Társaság

Az Európai Nukleáris Társaság mintájára 1990-ben megalakuló Magyar Nukleáris Társaság egyik alapítója, és az Elnökség tagja volt hosszú évekig. Kezdemé-

A *Fizikai Szemlével* 75. születésnapján, Mátraderecskén, ahol barátai köszöntötték.



Pakson, a Szilárd Leó Fizikaverseny eredményhirdetésén

nyezésére alapította a Társaság a Szilárd Leó-díjat, amely a nukleáris kultúra terjesztésében, az emberek egészségét, életkörülményeit javító nukleáris módszerek fejlesztésében, a nukleáris módszerek környezetbarát hasznosításában elért kiemelkedő tevékenységeket ismeri el. A tanárok iránti tiszteletét és szeretetét mutatja, hogy a Szilárd Leó-díj alapításakor javasolta, hogy a díjat időnként a nukleáris kultúra terjesztésében kiemelkedő tanárok is kapják meg.

Az író és a közéleti szereplő

Marx György nemcsak kiváló fizikus és tanár volt, hanem élvezetes stílusú, a nyelvet tökéletesen használni tudó író is. Igazi reneszánsz ember volt – tudása messze túllépett a szűken vett természettudományokon. Kevés természettudós hagyott nála nagyobb nyomot az elmúlt évszázad magyar kultúrájában. Széles baráti köre kiterjedt a művészetek minden ágára, akikkel saját humán területükön is egyenrangú partnerként beszélgetett. Közel került a magyar humán értelmiség számos vezető személyiségéhez. Elsőként *Németh László* (Németh Judit közvetítésével), majd *Juhász Ferenc*, később a radikális mondandójú filmrendező barátságát nyerte el. *Juhász Ferenc*, *Borsos Miklós*, *Jancsó Miklós*, *Bódy Gábor*, *Varga Imre* gyakori vendégek voltak az Atomfizikai Tanszéken.

A „Gyorsuló idő” fogalma – amely az *Új Írásban* megjelent cikkében fogalmazódott meg először – a 70-es évek magyar kultúrájának szimbólumává vált [35]. „Szédítően szép korunkban tanárok állnak a vártán” – az egész akkori magyar tanártársadalom évekig idézte, fejből. Hatása alól még a magyar könnyűzenei világ sem tudta kivonni magát – „az idő kitágul, és görbül a tér” – énekelte *Koncz Zsuzsa*, *Bródy János* szövegére.

A fizikát társadalmi-kulturális jelenségnek tekintette, ezért a fizikatörténet kiemelkedő eseményeinek évfordulóiról való méltó megemlékezések szervezése életeleme volt. Elsőként számolt be a fizikatörténethez fűződő színdarabok, regények, visszaemlékezések megjelenéséről. Népszerűsítő könyvei, majd a



Juhász Ferenc költővel 2002 tavaszán, az MTA-n

nem-fizikusoknak sok beleérzéssel megírt atomfizikai ismertetői, televíziós ismeretterjesztő sorozatai, meghívásokra tartott előadásai természetesen velejárói voltak mindennapjainak. Életének utolsó hónapjaiban, a betegség kényszerítésében született szűkszavú, minden szónak jelentést adó „új” stílusa bevésődik mindazok emlékezetébe, akik hallották 2002. szeptemberi Dirac-előadását, októberben az *Élet a nukleáris völgyben* című hitvallásszerű előadását a nukleáris fizika és energetika fontosságáról, november elején Wigner-memlékeztetését és élete utolsó, Pakson tartott előadását az erőmű 25. születésnapján.

Marx György hitt abban, hogy minden kérdésben, amelyre a tudomány hiteles választ talált, habozás nélkül a tudományosan megalapozott választ kell alkalmazni, és erre a társadalmat is fel kell készíteni. Ezt a hitvallást tükrözik a fizikát és a tudományt népszerűsítő írásai. 1960-ban írta nagyhatású népszerűsítő könyvét *Túl az atomfizikán* címmel [24]. Az elemi részecskék fizikájának friss fejleményeiről a világot akkor megosztó és minden területet átható politikai szembenálláson átlépve számolt be, e kutatói közösség nemzetközi kapcsolatrendszerét vonzó életmintaként kínálva a korabeli (és a mai) fiataloknak.

A *Népszabadságban* 1970-től sorozatban jelentek meg közérthető, optimista kicsengésű tanulmányai: *Változó mennyből* [36], *Úton a csillagok között* [37], *Egyetlen világunk* [38], *A természet négy arca* [39], *A tudás fájának gyümölcse* [40], *Földnek adni az ég tüzeit* [41], *Megváltó változás* [42]. Íme hét karácsonyi



Wigner Jenővel

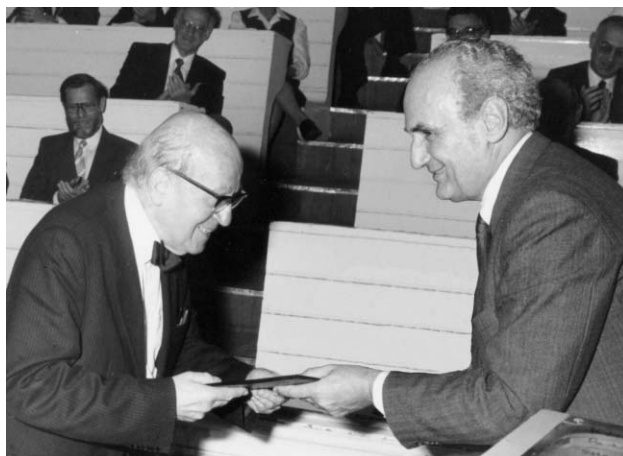
cím egy évtized terméséből. Képessége a legkülönbözőbb arcélú politikusoknak támogatóként való megnyerésére különösen lenyűgöző volt a kilencvenes évek demokratikus kavalkádjában, amikor a társadalmi modernizáció ügyében tett kezdeményezéseit egyéb politikai ügyekben élesen szembenálló ellenfelek egyaránt szimpátiával fogadták [43].

A Marslakók

Az Eötvös Társulat adott háttérrel az 1970-es évektől Marx György egyszemélyes tudományos nemzetegyesítési akcióinak. Kedvenc okfejtésében a sajátos magyar kreativitás forrását a 20. században a magyarságot ért történelmi sorsfordulókra és az egymást gyors ütemben váltó, szögesen ellentétes „örök igazságokhoz” való alkalmazkodásra vezette vissza.

A külföldre szakadt világhírű magyar tudósok hazai kapcsolatainak megerősítésére irányuló erőfeszítéseinek első sikerét *Szent-Györgyi Albert* gólyavári előadása jelentette. *Gábor Dénes*, *Kürti Miklós* meghívása, Wigner Jenő gyakori hazalátogatásai, majd Teller Ede profétai fellépése után *Hevesy György* és *Szilárd*

Kürti Miklós átveszi a *Fizikai Szemle* nivódját az ELTE Eötvös termében (Puskin utca).





Teller Edével Pakson 1996 októberében

Leó „hazatérésének” megszervezésével teljesítette ki azt a törekvését, hogy visszaadja a magyaroknak saját teljesítményükbe vetett hitüket.

Megpróbálta ráébreszteni a társadalmat arra, hogy ha a 20. század elejének magyar oktatása az egész világ sorsát meghatározó lángelméket tudott képezni, akkor ez a lehetőség a mai Magyarország számára is nyitva áll [44], csak megfelelő módon kellene sáfárkodni a tehetségekkel. A főszereplők mellé olyan fantasztikusan érdekes „epizodistákat” talált, mint *Arthur Koestler*, *Elie Wiesel*, *Harsányi János* vagy *Milton Friedmann*. A fiatalabbak közül tisztelettel fogadta Marx közeledését ifjabb *Simonyi Károly*, a Word szövegszerkesztő atyja, és *Gróf András*, a mikroprocesszor-gyártó óriás, az Intel alapító elnök-vezérigazgatója is.

Csak kívánhatjuk, hogy a 21. század magyarsága fogadja meg útmutatásait, és tegye magáévá Marx Györgynek a szellem kiemelkedő alkotói köré épített, korlátozás nélkül nyitott nemzetfelfogását. Vajon akad-e egyhamar Marx Györgyhöz mérhető képességű kommunikátora a természettudományoknak, a társadalomnak felelős kutató és a tudományra épülő társadalmi jólét ügyének, aki magyarul szól hozzánk, és aki büszkévé tesz bennünket, hogy magyarul szólhatunk?

Irodalom

A teljes bibliográfia a *Fizikai Szemle* 2003. januári emlékszámában található. Az ott olvasható lista 43 könyvet, idegen nyelven 109 szaktudományos, 63 oktatásfejlesztéshez kapcsolódó, 78 tudománytörténeti publikációt, magyar nyelven 553 tudományos cikket, esszét, tudománynpszerűsítő cikket, interjút és egyéb sajtóban megjelent alkotást sorol fel.

1. A nagy számok története. *Bűvár* 9 (1943) 280.
2. *Nemstatikus gravitációs terek*. Eötvös Egyetem, Budapest (1950) 62 oldal.
3. G. Marx, G. Györgyi: Der Energie Impuls-Tensor und ponderomotorischen Kräfte in Dielektrika. *Acta Physica Hungarica* 4 (1954) 213–242.
4. G. Marx, K. Nagy: Der Energie-Impuls-Tensor der Strahlung in Dielektrika. *Acta Physica Hungarica* 4 (1955) 297–300.
5. Relativistic Effects in Heavy Nuclei. *Nuclear Physics* 1 (1956) 660–669.

6. Die Wechselwirkung der Elementarteilchen und die Erhaltungssätze. *Acta Physica Hungarica* 3 (1953) 55–58.
7. *Relativisztikus dinamika*. – MTA, Budapest (1956) 82 oldal.
8. Yashunori Fujii, G. Marx: Meson decays as possible tests for a strong C violation. *Physics Letters* 17 (1965) 75–77.
9. Model with Superconductive Solution in Quantum Field Theory. *Acta Physica Hungarica* 14 (1962) 27–36.
10. J. Kuti, G. Marx: Model with Superconductive Solution in Quantum Field Theory. *Acta Physica Hungarica* 17 (1964) 125–156.
11. J. Kuti, G. Marx: Scalar field with ground state of decreased symmetry. *Nuovo Cimento* 35 (1964) 155–157.
12. J. Kuti, G. Marx: Broken symmetries in the two Goldstone models. *Acta Physica Hungarica* 19 (1965) 67–83.
13. G. Marx, N. Menyhárd: Über die Perspektiven der Neutrino-Astronomie. *Mitteilungen der Sternwarte Budapest* 44 (1960) 1–13.
14. G. Marx, N. Menyhárd: Cosmic Neutrino Radiation. *Science* 131 (1960) 299–300.
15. I. Fodor, S. Kövesi-Domokos, G. Marx: Neutrino Density of the Universe and Cosmology. *Acta Physica Hungarica* 17 (1964) 171–184.
16. G. Marx, T. Nagy: Photoneutrino Production in Degenerated Gases. *Acta Physica Hungarica* 63 (1976) 141–154.
17. G. Marx, J. Németh: The Role of Photoneutrinos in the Evolution of Stars. *Mitteilungen der Sternwarte Budapest* 52 (1963) 1–12.
18. G. Marx, I. Lux: Geophysics by Neutrinos. *Czechoslovak Journal of Physics, Praba B19* (1969) 1471–1479.
19. I. Lux, G. Marx: Hunting for Soft Antineutrinos. *Acta Physica Hungarica* 28 (1970) 63–70.
20. É. Gajzágó, G. Marx: Energy Differences in Mirror Molecules. *Proc. Neutrino '74* Pennsylvania, American Institute of Physics, New York (1974) 93–100.
21. D. Dearborn, G. Marx, I. Ruff: A Classical Solution for the Solar Neutrino Puzzle. *Progress in Theoretical Physics*, Kyoto 77PL/1 (1987) 12–15.
22. A. S. Szalay, G. Marx: Neutrino Rest Mass from Cosmology. *Astronomy and Astrophysics, Amsterdam* 49 (1976) 437–441.
23. G. Marx: Interstellar Vehicle Propelled by Terrestrial Laser Beam. *Nature* 211 (1967) 22–23.
24. *Túl az atomfizikán*. Gondolat, Budapest (1960) 278 oldal.
25. Békéssy A., Freud G., Károlyházy F., Marx Gy., Nagy K.: *Elméleti fizikai feladatok*. Tankönyvkiadó, Budapest – 1. kiadás (1951) 501 oldal; 2. kiadás (1962) 528 oldal.
26. *Kvantummechanika*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest – 1. kiadás (1957) 296 oldal; 2. kiadás (1965) 416 oldal; 3. kiadás (1971) 291 oldal.
27. Károlyházy F., Marx Gy., Nagy K.: *Statiztikus mechanika*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1965) 360 oldal.
28. Weak Interactions outside the Laboratory. *Acta Physica Austriaca Supplementum, Vienna* 13 (1974) 569–594.
29. K^0 and CP – a review. *Fortschritte der Physik, Berlin* 72 (1967) 675–740.
30. *Életrevaló atomok*. Akadémiai Kiadó, Budapest (1978) 320 oldal.
31. Tóth E., Holics L., Marx Gy.: *Atomközelségben*. Gondolat Könyvkiadó, Budapest (1980) 297 oldal.
32. Bakányi M., Fodor E., Marx Gy., Sarkadi I., Tóth E., Ujj J.: *Fizika a gimnáziumok I. osztálya számára*. (első kiadás: 1981) 151 oldal.
33. Gecső E., Maróthy L., Csom Gy., Marx Gy., Tóth E., Sükösd Cs.: *Nukleáris ismeretek*. OOK, Veszprém (1989) 172 oldal.
34. Berend T. I., Császár A., Marx Gy., Nádori L., Poszler Gy., Szentágothai J., Szépe Gy., Szűcs E.: *Műveltségkép az ezredfordulón*. Kossuth Könyvkiadó, Budapest (1980) 237 oldal.
35. Gyorsuló idő. *Új Írás* 8 (1968) 69–73.
36. Változó mennyibolt. *Népszabadság* (1969) dec. 25.
37. Úton a csillagok között. *Népszabadság* (1971) dec. 25.
38. Egyetlen világunk. *Népszabadság* (1973) dec. 25.
39. A természet négy arca. *Népszabadság* (1976) dec. 23.
40. A tudás fájának gyümölcse. *Népszabadság* (1977) dec. 25.
41. Földnek adni az ég tüzét. *Népszabadság* (1978) dec. 24.
42. Megváltó változások. *Népszabadság* (1980) dec. 25.
43. Marx Gy., Náray-Szabó G. (szerk.): *Modernizációs Charta '97*. MTESZ (1997)
44. *A marslakók érkezése*. Akadémiai Kiadó, Budapest (2000) 422 oldal.

KVANTUMTECHNOLÓGIAI RENDSZEREK: SZIMULÁCIÓ ÉS KÍSÉRLETI MEGVALÓSÍTÁS

Gali Ádám

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont SzFI

A kvantuminformatikán alapuló kvantumtechnológia már nem csak elméleti konstrukció, hanem a küszöbön álló forradalmi technológia, amely hamarosan beépül a mindennap használt „okos” eszközeinkbe, hatással lesz az internetes hálózatra, a biztonságos kommunikációra, a közlekedés szervezésére, és az új szenzorok és kontrasztanyagok révén az egészségiparra is. Ezt felismerve jelentették be 2016. május végén, hogy az Európai Bizottság elindítja a *Kvantumtechnológia zászlóshajó* programot egymilliárd euró költségvetéssel. A tématerület jelentőségét felismerve Magyarországról az NKFI Hivatal csatlakozott a Quanteraprogramhoz, amelynek felhívásai 2017 januárjától olvashatók. A Quanteraprogramhoz csatlakozó országok kutatócsoportjai a fenti témakörben kisebb kutatási konzorciumot tudnak létrehozni, amely jó alapot adhat a zászlóshajóprogramhoz való sikeres csatlakozáshoz. A zászlóshajóprogramban a kvantumszámítógépet, kvantumszimulátort, kvantumkommunikációt, valamint szenzorokat és méréstechnikát emelték ki, mint a kvantumtechnológiához tartozó kutatási területek. Így időszerű, hogy a kvantumtechnológia lehetséges gyakorlati megvalósítását szélesebb körben ismertessük.

Az információ fizikai objektum, így a kvantuminformáció alapját képező kvantumbitek valamilyen anyagból kell létrehozni. Fizikai megvalósítások lehetnek például atomok atomcsapdáiban, szupravezető kvantumbitek, kvantumbitek félvezető kvantumpöttyökben, topologikus kvantumbitek félvezető nanohuzalokban, vagy ponthiba alapú kvantumbitek szilárd testekben. Gyakran ezek hibrid rendszereit is meg lehet valósítani. Fontos megemlíteni, hogy gyakran a fény a kvantuminformáció „szállítóeszköze”, emiatt – amennyiben kvantumkommunikációt szeretnénk megvalósítani – alapvető fontosságú a fény koherens csatolása a fenti kvantumbitekhez. Így az optikai módszerek majdnem mindegyik megvalósítás esetén e technológia fontos részei.

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás szerkesztett változata.



Gali Ádám, az MTA doktora, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos munkatársa, a Lendület Félvezető Nanoszerkezetek kutatócsoport vezetője, a Wigner Perspektivikus Anyagok Integrált Laboratóriumának egyik alapítója, a BME Atomfizika Tanszéke egyetemi docense. Fő szakterülete félvezető (nano)szerkezetekben előforduló ponthibák magneto-optikai vizsgálata atomi szintű szimulációs és kísérleti módszerekkel biológiai jelzőrendszerek, napelemek és kvantumbitek fejlesztése céljából.

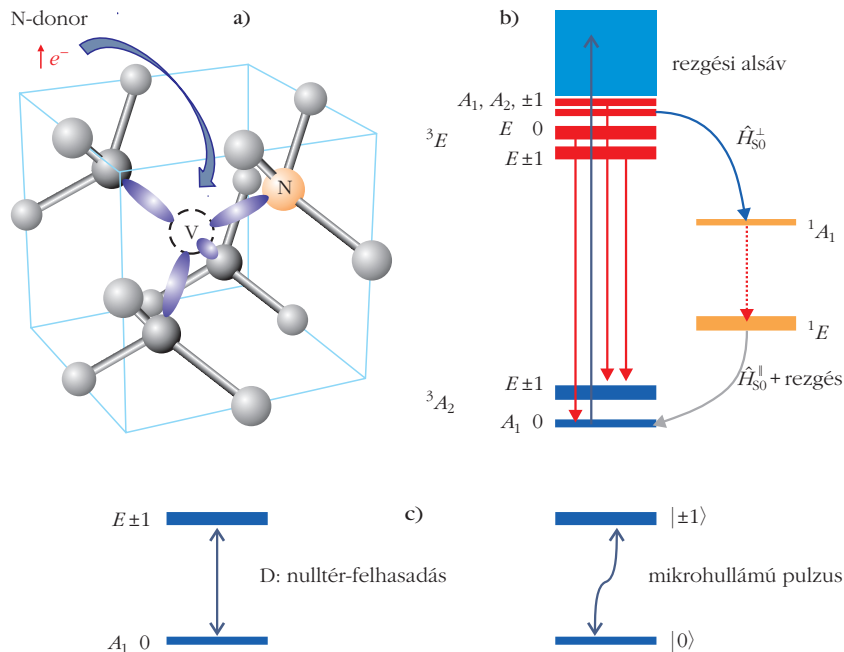
A cikk kereteit meghaladja, hogy az összes lehetséges megvalósításról részletesebb leírást adjunk. Emiatt a fenti megoldások közül kiemeljük a ponthiba alapú kvantumbitek szilárdtestekben az úgynevezett gyémántbeli nitrogénvakancia (NV) centrum példáján keresztül, amit ezen túl röviden NV-centrumnak nevezünk. Az NV-centrum azon ritka kvantumbit-megvalósítások közé tartozik, amelyek szobahőmérsékleten is megbízhatóan működik, emiatt akár közvetlen biológiai környezetben, például nagy érzékenységű és egyben 10 nanométer térbeli felbontású szenzorként, szuperrezolúciós módszereket használva lehet hasznosítani.

Az NV-centrum egy ponthibakomplexum a gyémántkristályban, ahol a nitrogén az egyik szénatomot helyettesíti, amely egy szomszédos vakancia mellett helyezkedik el (*1. ábra*). Ez a ponthiba gyémántban a természetben is keletkezhet, de szándékoltnak is előállítható. Egyik lehetséges módszer, hogy nitrogénnel szennyezett gyémántot (a mesterségesen előállított, nagy nyomású, nagy hőmérsékletű gyémánt tipikusan e kategóriába esik) veszünk, majd – az atomokat a helyükről elektronbesugárással vagy ionimplantációval kiütve – vakanciákat keltünk. Utána 600 °C-nál magasabb hőmérsékletű hőkezelést alkalmazva a vakanciák a nitrogénatomok mellé vándorolnak, és ott stabil komplexumot alkotnak. Ezzel a gyémántban nagy koncentrációban lehet NV-hibákat előállítani. Egyedi NV-centrumok keltésére finomabb módszer tiszta gyémántból kiindulni (például, kémiai gőzleválasztással növesztett gyémántréteg), ebbe N_2^+ -molekulát implantálni és hőkezelés után NV-centrumokat kelteni. Fontos hozzátenni, hogy az NV-centrum alatt a negatívan töltött NV-ponthibát értjük. Az NV-hiba negatív töltését egy másik nitrogén – amely mellett nincs vakancia – tudja biztosítani. Ez a szubsztitúciós nitrogén hibadonorként viselkedik, és elektront adhat át az NV-hibának. A fent leírt előállítási módszerekben valóban létrehozható a negatívan töltött NV-hiba, azaz az NV-centrum.

A tiszta gyémántban a teljesen betöltött elektronállapotokat adó vegyértéksávot és az üres állapotokat adó vezetési sávot egy széles tiltott sáv választja el (5,42 eV), amely a távoli ultraibolya-tartományba esik, emiatt a tiszta gyémánt átlátszó. Az NV-centrumban három szénatom felszakadt kötése maradnak vissza, illetve a nitrogénatom úgynevezett magányospárpályája. Ezekből olyan, a ponthibára lokalizált állapotok jönnek létre, amelyek energiaszintjei megjelennek a gyémánt tiltott sávjában. Az NV-centrumnak olyan szimmetriája van a gyémántrácsban (C_{3v} pontcsoport), amely elfajuló, más néven degenerált elektronállapo-

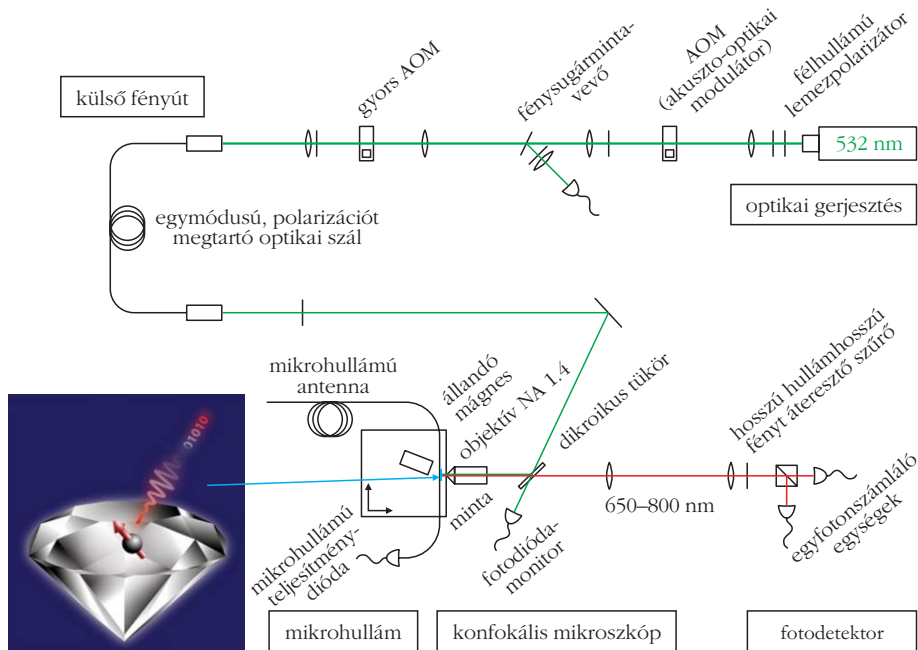
tokat ad, amely magas, $S = 1$ elektronspin-állapotot hoz létre az NV-centrum alapállapotaként (3A_2 állapot). Ezt az $S = 1$ spinállapotot tudjuk kvantumbitként hasznosítani. Mivel a rendszer szimmetriája a köbösnél alacsonyabb, emiatt a spin szerint eredetileg háromszorosan degenerált alapállapot külső mágneses tér jelenléte nélkül is felhasad $ms = 0$ és $ms = \pm 1$ szintekre az elektronspin-elektronspin dipól-dipól kölcsönhatás következtében. Ezt nevezük nulltérfelhasadásnak, amelynek mértéke 2,87 GHz (mikrohullámú frekvencia). A rendszerre egy kis külső állandó mágneses teret kapcsolva az $ms = +1$ és $ms = -1$ szintek felhasadnak. Mikrohullámú generátorral – váltakozó mágnesestérpultust kapcsolva – szelektíven lehet az $ms = 0 \rightarrow +1$ vagy $ms = 0 \rightarrow -1$ állapotok között az elektronspint billegtetni, amennyiben a tér frekvenciája a megfelelő $ms = 0 \pm 1$ energiakülönbséggel megegyezik. Ezt nevezük elektronspin-rezonanciának (ESR). A kettő közül az egyik rezonanciafrekvenciát kiválasztva, és a váltakozó mágneses tér irányát megfelelően manipulálva, egy kvázi (0,1) kvantumbitállapotot lehet létrehozni.

Az NV-quantumbit inicializálását és kiolvasását először optikai módszerrel sikerült megvalósítani. Ennek megértéséhez az NV-centrum gerjesztett állapotairól is szót kell ejteni. Az $S = 1$ 3A_2 alapállapot mellett létezik egy $S = 1$ 3E gerjesztett állapot, amelynek zérusfononvonal (angol rövidítéssel ZPL) energiája 1,946 eV (637 nm). Az optikai gerjesztésben – a viszonylag erős elektron-fonon csatolás miatt – fononok is részt vesznek, emiatt a fenti rendszer jól lehet gerjeszteni az NV-centrum abszorpciós fonon alsóávjába (tipikusan a 2,34 eV-nak megfelelő 532 nm hullámhosszú lézerral). A legerjesztődés során pedig egy széles hullámhossztartományban sugároz az NV-centrum 637-900 nm-en, tehát viszonylag erős Stokes-eltolódást kapunk, amely segíti az optikai mérést. A kibocsátott fény hullámhossza a vörös színnek felel meg, emiatt az NV-centrumot gyakran színcentrumnak nevezik, amely az eredetileg átlátszó gyémántot megszínezi. Az optikailag aktív $S = 1$ 3E állapot mellett megjelennek sötét $S = 0$ szingulett állapotok is (1A_1 és 1E), amelyek energiaszintjei a két tripllett állapot energiaszintjei közé esnek. A szimmetriából eredő kiválasztási szabálynak köszönhetően a 3E $ms = \pm 1$ megfelelő állapotaiból az elektron – fononokkal segített spin-pálya kölcsönhatás révén – átszórhat az 1A_1 állapotba, de az $ms = 0$ állapotból csak nagyon kicsi valószínűséggel. Az $S = 0$ szingulett állapotokon keresztül az elektron végül a 3A_2 alapállapot $ms = 0$ állapotába kerül. E fo-



1. ábra. A nitrogénvakancia (NV) centrum. (a) Sematikus ábra az atomi szerkezetről. (b) Sematikus ábra az elektronszerkezetről. A 3A_2 tripllett alapállapot a szimplacsoport-reprezentáció szerint jelöli az elektronállapotot. Tőle jobbra található a duplacsoport-ábrázolás, amely mutatja, hogyan hasadnak fel a spinállapotok szerint az energiaszintek a relativisztikus hatások miatt. Az egyenes nyilak jelzik az optikai átmeneteket, míg a hajlított nyilak a nem-sugárzásos átmeneteket, amelyeket a spin-pálya (\hat{H}_{SO}) kölcsönhatás okozza a hiba C_3 szimmetriatengelyére (N–V-n keresztülhaladó tengely) merőleges (L), illetve azzal párhuzamos (||) komponense. A szaggatott egyenes nyíl gyenge optikai legerjesztődést jelez, amely versenyez a direkt nem-sugárzásos lebomlással a szingulett állapotok között. (c) Az alapállapot elektronszerkezete kinagyítva azt mutatja, hogy nulla mágneses tér esetén a spinállapotok szerint felhasadnak az energiaszintek, amelyek között mikrohullámú váltakozó mágneses teret kapcsolva lehet billegtetni az elektron spinjét.

lyamat – sugárzásos folyamathoz viszonyított – valószínűsége nagyjából 30%. Ez azt jelenti, hogy megfelelően hosszú ideig, optikailag pumpálva a hibát, az NV-centrumot az $ms = 0$ alapállapotba lehet spinpolarizálni, azaz inicializálni tudjuk az $ms = 0$ kvantumbit-állapotot. Ez a folyamat nagyon robusztus, és szoba-hőmérsékleten is kiválóan működik! A ~3 GHz (0,15 kelvin) energiakülönbség ellenére a legalacsonyabb, $ms = 0$ energiaszintet – akár 300 kelvin, azaz szoba-hőmérsékleten is – szinte 100%-osan tudjuk betölteni. A kvantumbit kiolvasása optikai módszerrel történik: amennyiben a kvantumbit az $ms = 0$ állapotban tartózkodott, akkor az optikai gerjesztés hatására fényes fluoreszcenciát kell tapasztalunk, ha pedig például az $ms = 1$ állapotban, akkor körülbelül 30%-kal sötétebb jelet érzékelünk. Összefoglalva: az ESR-átmenetet optikai fotonok detektálásával lehet kiolvasni, amelyet röviden optikailag detektált mágneses rezonancia (ODMR) jelenségnek, illetve mérési módszernek nevezünk. Ezzel a módszerrel a mikrohullámú rezonanciafrekvenciájú fotonok mérését optikai fotonok kiolvasására konvertáljuk át. Az optikai fotonokra nagyon érzékeny detektorokat fejlesztettek ki, emiatt – szemben az ESR abszorpciós módszerekkel – akár egyetlen centrum spinjét is ki lehet mérni. Ha az NV-centrumok kellően távol helyezkednek el egymástól, akkor – megfelelő fókuszfoltot képezve egy konfokális mikroszkóppal – el lehet érni azt, hogy egyetlen



2. ábra. A konfokális mikroszkóppal kombinált, optikailag detektált mágneses rezonancia mérés-technika tipikus kiépítése, amellyel egyedi NV-centrumok spinjét lehet mérni és koherensen manipulálni. Az AOM (akusztó-optikai modulátor) segítségével lehet időzíteni az optikai és mikrohullámú gerjesztéseket. Az egyfotonszámlálók (single photon counting modules) segítségével lehet igazolni, hogy valóban egy NV-centrumból származik az emisszió, azaz egyetlen spin állapotát olvassuk ki.

NV-centrumot manipuláljunk fényvel, így csak annak fluoreszcenciajelét detektáljuk [1]. Így egy kvázi atomi rendszerhez hasonlítható elektronspint tudunk manipulálni. Az ODMR-módszer tipikus kiépítését 2. ábra mutatja, amely egy kapuzó optikai és elektronikai elemeket tartalmazó, mikrohullámú generátorral kombinált, nem túl bonyolult optikai módszer. A módszer robusztusságának és egyszerűségének köszönhetően nagyon gyors fejlődést tett lehetővé a különböző kvantuminformaticai tesztek és szenzoralkalmazások terén. Nemrég például ezzel a rendszerrel sikerült bizonyítani a kvantummechanikában alapvető jelentőségű Bell-tesztet, ahol két 1,3 km-re levő NV-centrumból kilépő fény összefonódását mérték ki [2]. Mivel a két kvantumbit egymástól olyan messze volt, hogy az összefonódott állapot kimérésének időpillanatában a két kvantumbit csak fénysebességnél gyorsabb információátadás útján, „rejtett” módon tudott volna egymásnak információt átadni, így ez a mérés kizárta a „rejtett” paraméterek létezését, amelyek megkérdőjelezték volna a kvantummechanika törvényeit. Ebben a mérésben azt a jelenséget használták ki, hogy a Stark-effektus révén a két izolált NV-centrum ZPL-energiáját – megfelelő külső elektromos tér rákapcsolásával – össze lehetett hangolni, kiküszöbölve a két izolált NV-centrum gyémántbeli környezetének kis eltéréseit.

Az NV-centrum, bár sok tekintetben nagyon előnyös tulajdonságokat mutat, a gyémánt hordozóanyag miatt nem ideális, hiszen előállításra drága, és elektronikai eszközökhöz – egyelőre – nehéz integrálni. Elsők között javasoltam, hogy gyémánt helyett egy széles tiltott sávú félvezetőt, szilícium-karbidot próbál-

junk használni, amelyből félvezető-elektronikai eszközöket lehet gyártani, és egyben olyan ponthibákat hordozhat, amelyek az NV-centrumhoz hasonlóan viselkednek. Sűrűségfunkcionál-elméleten (angol betűszóval DFT) alapuló atomi szintű számításokkal bizonyítottam, hogy a semleges divakancia-hiba (szomszédos szén- és szilíciumvakancia komplexuma, 4.a ábra) nagyon hasonló elektronszerkezettel rendelkezik, mint a gyémántbeli NV-centrum, csak az előbbinél a gerjesztett állapot energiája a közeli infravörös (angol betűszóval NIR) tartományba esik szemben az NV-centrum látható fény tartományával [3]. Később kísérletekben igazolták, hogy NIR-fotonokkal valóban lehet optikailag manipulálni a szilícium-karbidbeli semleges divakanciák elektronspinjét

[4]. Ezek az eredmények több kutatócsoportot is arra inspiráltak, hogy kvantuminformaticai kutatásokban a gyémánt mellett széles tiltott sávú félvezetőket is vizsgáljanak. Ezek közül a szilícium-karbid – amelyben a klasszikus elektronikát a kvantumtechnológiával lehet ötvözni – nagyon ígéretes anyag.

A fenti példa is mutatja, hogy az atomi szintű DFT-számítások igen hasznosak lehetnek a ponthibák elektronszerkezetének pontos meghatározásában, amelyekkel akár jóslatokat tehetünk a kvantumtechnológiában hasznos ponthibák azonosításában. Az NV-centrum kapcsán láthattuk, hogy a ponthibák tulajdonságait nagyon mélyen kell megismerni: gyakorlatilag az összes magneto-optikai paramétert (elektronspin-elektronspin, elektron-fonon, spin-pálya, hiperfinom csatolási állandók) meg kell határozni. Kutatócsoportomban az elmúlt években ezen paraméterek számítására sikerült módszereket kifejlesztenünk és implementálnunk. Ezeket alkalmaztuk például a SiC-beli divakancia-quantumbit tulajdonságainak feltárásában is. Az előbb említettem a hiperfinom csatolási állandókat, a hiperfinom-kölcsönhatásról még nem esett szó. A hiperfinom-kölcsönhatás az elektronspinek és a kristályban található magspinek egymásra való hatását jellemzi. A Földön a ^{13}C és ^{29}Si feles magspinű izotópok természetes előfordulási valószínűsége rendre 1,1 és 4,5%. A többi szén- és szilícium-izotópnak nincs magspinje. Eszerint a szénből és szilíciumból felépülő SiC-ban a fenti valószínűségekkel magspinek is megtalálhatók. Ezen magspinek mágneses tere a SiC-ban kölcsönhat a divakancia elektronspinjével. A közös elektronspin- és magspinrendszer vezethet kvantumbitállapothoz. Az elektronspin és magspin összjátéka egy másik, nagyon érdekes jelenséghez is

vezethet. Alább azt mutatjuk meg, hogyan lehet – akár szobahőmérsékleten is – divakancia közelében magspineket optikai gerjesztéssel spinpolarizálni.

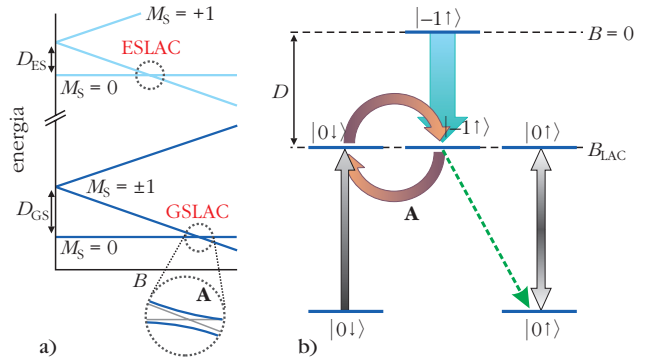
A SiC alapállapotában a divakancia nulltérfelhasadási állandója 1,1 GHz, ami nagyjából harmada az NV-centruménak. Az elektronspin optikai spinpolarizációját az NV-centrum példáján már elmagyaráztuk. A divakancia elektronspin optikai spinpolarizációja hasonlóképpen működik. Tétélezzük fel, hogy az elektronspint már spinpolarizáltuk. Erre a rendszerre egy konstans, külső, pozitív mágneses teret kapcsolunk, amelynek iránya párhuzamos a ponthiba szimmetriatengelyével. A mágneses tér nagyságát lassan növelve az $ms = -1$ szint – a Zeeman-felhasadás miatt – megközelíti az $ms = 0$ szintet. Analizáljuk a fenti helyzetet, amikor egy $I = 1/2$ magspinünk van a hiba közelében. Ebben az esetben felírhatjuk a perturbáló spin Hamilton-operátort:

$$\hat{H}_{\text{spin}} = D \left(\hat{S}_z^2 - \frac{2}{3} \right) + g_e \mu_B B_z \hat{S}_z - g_N \mu_N B_z \hat{I}_z + \hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{A} \hat{\mathbf{I}}, \quad (1)$$

ahol $\hat{\mathbf{S}}$ és $\hat{\mathbf{I}}$ az elektron- és magspinoperátorok, \hat{S}_z és \hat{I}_z a spin z -komponensű operátorai, D a nulltérfelhasadási állandó a tripllett állapotban, B_z a hiba szimmetriatengelyével párhuzamosan álló külső mágneses tér, g_e és g_N az elektron- és magspinek giromágneses faktora, μ_B és μ_N pedig rendre a Bohr- és magmagnetonok. Az utolsó tag az \mathbf{A} hiperfinom-kölcsönhatás tenzorral az elektronspin és egy magspin közötti csatolást ír le általános esetben, amelyet az A_{xx} , A_{yy} , A_{zz} főértékekkel és az A_{zz} -hez tartozó sajátvektor irányával lehet paraméterezni, ahol az utóbbit a θ polárszöggel és ϕ azimuttszöggel lehet leírni. A legtöbb esetben $A_{xx} \approx A_{yy}$, teljesül és így a ϕ -függés elhanyagolható. Ekkor elég három paraméterrel jellemezni a rendszert: $A_{\parallel} = A_{zz}$, $A_{\perp} = A_{xx} \approx A_{yy}$ és θ . Abban a speciális esetben, amikor a magspin pontosan a ponthiba szimmetriatengelyére esik az (1) egyenletben levő utolsó tag az alábbi alakra egyszerűsödik:

$$\hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{A} \hat{\mathbf{I}} = A_{\parallel} S_z I_z + \frac{A_{\perp}}{2} (S_+ I_- + S_- I_+), \quad (2)$$

ahol (+) és (–) indexű operátorok a megfelelő léptető operátorokat jelölik. Látható, hogy az A_{\perp} tag az elektronspinten keresztül össze tudja keverni a különböző magspinű állapotokat. Amennyiben az elektronspin már spinpolarizált, akkor ezt a spinpolarizációt az A_{\perp} révén lehet átvinni a magspinekre [5]. A mágneses tér nagyságát D közelébe állítva, azt találjuk, hogy az $ms = +1$ állapot energiaszintje túl messze kerül ahhoz, hogy az kölcsönhatásba tudjon kerülni bármelyik másik spinállapottal, azaz energetikailag tiltott a $|0\uparrow\rangle$ állapot átforgatása $|+1\downarrow\rangle$ állapotba, ahol vektor első tagja az elektronspin, második tagja a magspin állapotait jelöli. Ennek megfelelően az (1) és a (2) egyenleteket elég a $|0\uparrow\rangle$, $|0\downarrow\rangle$, $|+1\uparrow\rangle$ és $|+1\downarrow\rangle$ bázisban kifejezni. Megol-



3. ábra. Az elkerülő kereszteződés (LAC) jelensége és az optikai dinamikus magspin polarizációja egy feles magspinre. (a) Az $S = 1$ -re jellemző centrumok energiaszintjei a külső, B mágneses tér függvényében. D a nulltérfelhasadást jelöli. A „GS” az elektronspin alapállapotot, míg az „ES” az elektronspin gerjesztett állapotot jelöli. Az ábrán látható, hogy a LAC környékén a $|+1\rangle$ állapot energiaszintje nagyon messze kerül a $|0\rangle$ és $|+1\rangle$ energiaszintjeitől. Az alapállapotra koncentrálva, a LAC körül kinagyítva mutatjuk az \mathbf{A} hiperfinom-kölcsönhatás energiaszintekre tett hatását. Látszik, hogy egy kis tiltott sáv alakul ki. A vékony szürke vonalak jelzik a hiperfinom-kölcsönhatás nélküli megoldást. (b) Sematikus ábra a dinamikus optikai magspin-polarizáció folyamatára. A széles nyíl jelzi azt a mágneses teret (B_{LAC}), amelynél a folyamat \mathbf{A} hatására beindul. A szaggatott nyíl jelzi az elektronspin nem-sugárzásos legerjesztődését, amely által az elektronspint polarizáljuk a $|0\rangle$ állapotba. Ezen keresztül a magspint a $|\uparrow\rangle$ állapotba polarizáljuk.

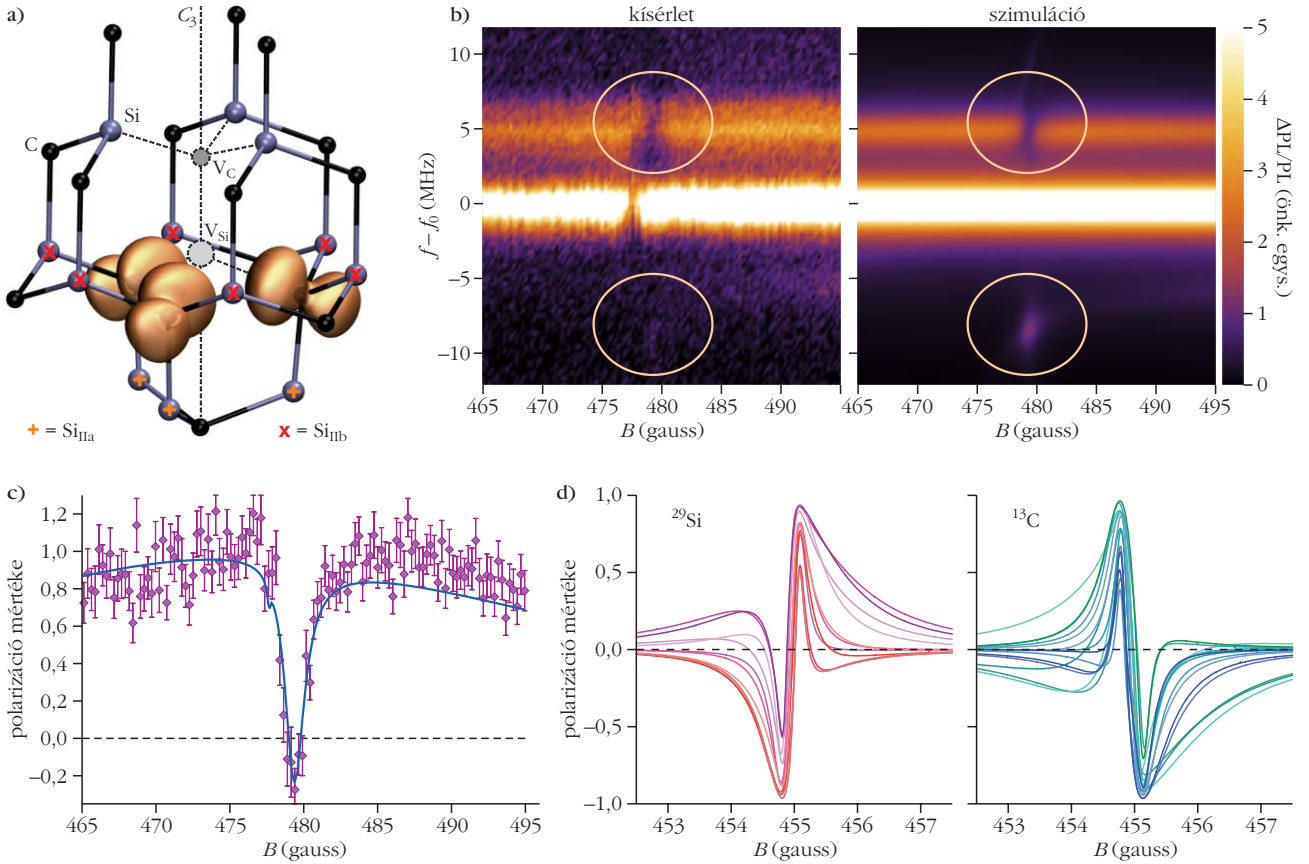
dásként azt kapjuk, hogy a $|0\downarrow\rangle$ állapot keveredik a $|+1\uparrow\rangle$ állapottal, és a kereszteződési szint,

$$g_e \mu_B B_z \approx D - \frac{A_{\perp}}{2}$$

környékén egy kis tiltott sáv nyílik. A fenti kis tiltott sáv miatt ezt a pontot az angol nyelvű irodalomban szintek elkerülő kereszteződésének (vagy szintek nem-kereszteződésének) is nevezik, amelyet röviden LAC-nak jelölnek (3. ábra). Ennél a térnél az elektronspin és magspin keveredésének körfrekvenciája hozzávetőlegesen

$$\frac{|A_{\perp}|}{\sqrt{2}} \hbar,$$

ahol \hbar a Planck-állandó osztva 2π -vel. Ha az elektronspin koherenciaideje elég hosszú, akkor a már $|0\rangle$ állapotba spinpolarizált elektronspin a \downarrow magspint a \uparrow magspinbe kezdi beforgatni. Eközben az elektronspin is kifordul a $|+1\rangle$ állapot irányába. Ugyanakkor – ha közben optikailag pumpáljuk a rendszert – az elektronspint folyamatosan visszaállítjuk a $|0\rangle$ állapotba, így megfelelően sok optikai gerjesztés után az elektronspint és magspint is polarizálni lehet a $|0\uparrow\rangle$ állapotba, azaz a magspint a $|\uparrow\rangle$ állapotba polarizáljuk. Mindez szobahőmérsékleten is működhet minden olyan rendszerre, ahol az elektronspin optikai spinpolarizációját szobahőmérsékleten meg lehet valósítani! A fenti speciális rendszerre egy jó példa a ^{15}N $I = 1/2$ magspinű NV-centrum a gyémántban [6]. A fenti analízis demonstrálja az optikai dinamikus magspin-polarizáció jelenség lényegét.



4. ábra. (a) Divakancia-hiba a szilícium-karbidban (SiC). $V_C(V_{\text{Si}})$ a kristályból hiányzó szén (szilícium) atom helyét jelöli. C_3 a hiba szimmetriatengelyét jelöli. A V_{Si} melletti szénatomokra lokalizált a spinsűrűség, amelyet narancssárga felhők jeleznek. A divakancia melletti Si-atomokat külön jelöltük ($\text{Si}_{\text{IIa,b}}$), amelyeken a hiperfinom-kölcsönhatás 5-10 MHz nagyságrendbe esik. (b) A kísérletben és szimulációban kapott optikailag detektált mágneses rezonancia (ODMR) spektrum a külső mágneses tér függvényében. A legfényesebb jel (0 MHz) felel meg a hiperfinom-kölcsönhatástól mentes esetnek. Az +5 MHz körüli jel a ^{29}Si izotópú $\text{Si}_{\text{IIa,b}}$ magspinekből származik. Látható, hogy -5 MHz körül nincs jel, ami a \uparrow spinpolarizáció következménye. Ugyanakkor a mágneses tér bizonyos állásánál (bekarikázott rész) a pozitív tartományban levő hiperfinom jel lecsökken, és a negatív tartományban megjelenik egy gyenge jel. (c) A (b) ábrán mutatott ODMR-spektrumból származtatott kísérleti magspin-polarizáció (lila vonalak), illetve a szimulációból származó értékek (folytonos kék vonal). $B = 478$ MHz körüli egy közel +100%-os \uparrow spinpolarizáció közel -20%-os spinpolarizációra vált. (d) Szimulációs eredmények távolabbi elhelyezkedő ^{29}Si és ^{13}C magspinekre kis hiperfinom-kölcsönhatással. A mágneses tér kis változtatásával a magspin polarizációját teljes mértékben invertálni lehet. Az egyes vonalak az egyes magspinekre vonatkoznak.

A divakanciában az $S = 1$ elektronspin például egy, a divakancia közelében található ^{29}Si izotóp $I = 1/2$ magspinjével hathat kölcsön (4.a ábra). Ez a magspin azonban nem a szimmetriatengely mentén helyezkedik el, amely a legtöbb magspin helyzetére is igaz.

Ebben az esetben a hiperfinom tenzort egy általánosabb alakban lehet leírni a fenti bázisban:

$$\hat{H}_{\text{hyp}} = \hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{A} \hat{\mathbf{I}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} b & \frac{1}{\sqrt{2}} c_- \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} c_+ & -\frac{1}{\sqrt{2}} b \\ \frac{1}{\sqrt{2}} b & \frac{1}{\sqrt{2}} c_- & -A_z & -b \\ \frac{1}{\sqrt{2}} c_+ & -\frac{1}{\sqrt{2}} b & -b & A_z \end{pmatrix}, \quad (3)$$

ahol

$$\begin{aligned} A_z &= A_{\parallel} \cos^2\theta + A_{\perp} \sin^2\theta \\ b &= (A_{\parallel} - A_{\perp}) \cos\theta \sin\theta \\ c_{\pm} &= A_{\parallel} \sin^2\theta + A_{\perp} (\cos^2\theta \pm 1). \end{aligned}$$

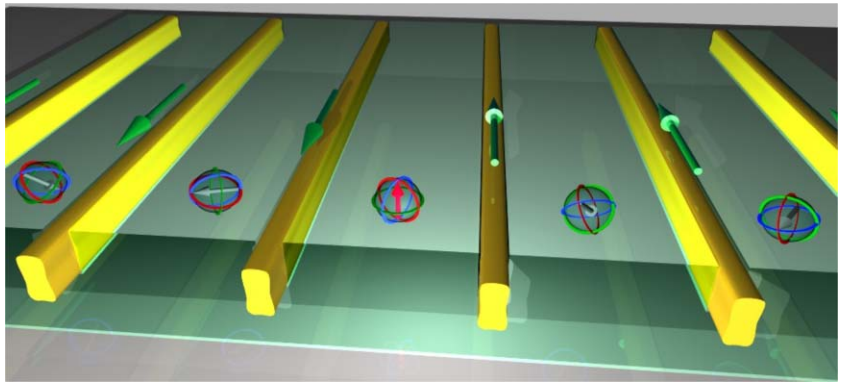
A $\theta = 0$ esetben a korábban tárgyalt speciális esetet kapjuk vissza és ekkor a (3) tenzorban az egyedüli, főtengeyen kívüli tag a c_+ , amely az $\hat{S}_{\pm} \hat{I}_{\pm}$ szerint tudja keverni az elektronspin- és magspinállapotokat. Azonban divakancia-hiba esetén sokkal fontosabb a $\theta \neq 0$ analízise, amely szinte az összes ^{29}Si és ^{13}C magspinre teljesül. Ekkor négy különböző LAC azonosítható, amelyek közül egy g_N negatív értéke esetén lép fel. Ez a ^{29}Si magspinre teljesül. A hiperfinom tenzorban szereplő b tag az effektív spin $\hat{S}_{\pm} \hat{I}_{\pm}$ Hamilton-operátora, míg c_{\pm} -é $\hat{S}_z \hat{I}_{\pm} + \hat{S}_{\pm} \hat{I}_z$ összefüggésnek felel meg. Ennek megfelelően, a mágneses tér függvényében egy adott magspinre \uparrow és \downarrow polarizációt is kaphatunk. Pontos analízisünk megmutatta, hogy távoli magspinekre, amelyekre az $A_z < g_N \mu_N B_{\text{LAC}} \approx 0,4$ MHz teljesül, a mag-

spin Zeeman-effektus lesz a domináns tényező – a harmadik tag az (1) egyenletben –, amely meghatározza spinpolarizáció jellegét.

David D. Awschalom csoportja (University of Chicago) a fenti leírt mágneses tereket alkalmazva – javaslatunkra – megvizsgálta a divakancia-kvantumbitét a SiC-ban [7]. A kísérleti és elméleti ODMR-spektrumot összehasonlítva kiváló egyezést kaptunk (4.b ábra), ahol az ODMR-spektrumban megjelenik a divakancia-hiba közelében levő ^{29}Si izotópok hiperfinom jele is. A karikával jelölt terület mutatja a mágneses tér azon állását, ahol sikerült invertálni a közeli ^{29}Si magspinek polarizációját. A szimuláció alapján a negatív spinpolarizáció nagyjából 20%-os (4.c ábra). Ugyanezt az analízist a divakancia-hibától távolabb elhelyezkedő magspinekre is el lehet végezni. Az eredményeket 4.d ábra foglalja össze. A ^{29}Si és a ^{13}C izotópokra is azt találtuk, hogy a mágneses tér kis változtatásával a magspinek spinpolarizációját teljes mértékben, közel +100%-ról (teljes \uparrow spinpolarizáció) közel -100%-ra (teljes \downarrow spinpolarizáció) lehet invertálni. A szén és szilícium magspinek eltérő előjelű változása miatt van, mert a ^{29}Si és a ^{13}C izotópok giromágneses faktora ellenkező előjelű. A fent leírt módszerrel a magspineket rádiófrekvenciájú gerjesztés nélkül, viszonylag kis állandó mágneses tér rákapcsolásával lehet billegtetni, és mindezt szoba-hőmérsékleten.

A fent leírt folyamat több érdekes alkalmazáshoz vezethet. Szimulációs eredményünk szerint egy, a SiC-eszköz tetejére vitt, egyszerű vezeték árama olyan mágneses teret tud kelteni viszonylag nem túl mélyen elhelyezkedő divakancia-hibákra, amellyel a fent leírt billegtetést el lehet érni. Ezzel gyakorlatilag magspineken működő spintronikát tudunk megvalósítani (5. ábra). Technológiai értelemben nagyobb kihívást jelent, hogy viszonylag közeli divakancia-párokat hozunk létre, és akkor lehetővé válik az, hogy – a külső mágneses teret megfelelően manipulálva – az egyik divakanciát, amelyet a mellette levő kvantumbittel vezérlünk, kvantumbitként használjunk.

Az optikai dinamikus magspin-polarizáció egy másik területen is nagyon fontos alkalmazásra ad lehetőséget. A biológiai és orvosi alkalmazásokban hatalmas igény mutatkozik fMRI-vizsgálatokhoz kontrasztanyagok kifejlesztésére. A gyémánt és szilícium-karbid olyan anyagok, amelyek sok tekintetben biokompatibilisnak tekinthetők; szilícium-karbidot már számos formában használnak emberi szervezetben, például csontpótlásra. Ez jó alapot adhat arra, hogy ezen anyagokat élő szervezetekben is, nanokristályos formában vizsgáljuk. Ha ezen nanokristályokban megfelelő ponthibákat hozunk létre – amelyekben a bejuttatott ponthibák által polarizálni tudjuk a magspineket –,



5. ábra. A klasszikus és kvantumelektronika interfész lehetséges megvalósítása szilícium-karbidbeli (SiC) divakancia-hibákkal, amelyek közelében magspinek vannak. A SiC eszköz tetejére rézvezetékeket helyezünk, ezekre tetszés szerinti irányú és nagyságú I áramot kapcsolhatunk. Ezek olyan állandó mágneses teret generálnak a divakancia-hiba közelében, amelyekkel a szövegben leírt módon billegtetni tudjuk a magspineket. A szimulációk alapján $I \approx 10\text{--}100 \mu\text{A}$ áram esetén a divakancia-hibákat a felülethez képest $73\text{--}727 \text{ nm}$ mélyen kell kelteni, ez – például szén implantációval – technológiailag megvalósítható.

akkor hatásos fMRI kontrasztanyagként tudjuk használni. A gyémánt nanokristályok polarizálhatóságát már el is kezdték vizsgálni ebben az irányban.

Összefoglalásként: megmutattam, hogy a szilárd testekben található ODMR-centrumok nagyon hatásosak lehetnek mind a kvantumszámítógép alapját jelentő kvantumbitek fizikai megvalósításában, mind a klasszikus és kvantumelektronikai interfészek kialakításában, és akár orvosi alkalmazásokban is. Ezen témaköröket – bár egymástól távolinak tűnnek – összeköti, hogy direkt módon hasznosítunk kvantumos jelenségeket. Talán ebből a kiragadott példából is jól látható, hogy a kvantumtechnológia már nem a távoli jövő ígérete, hanem a mindennapi életünkre is kiható új ipari forradalom egyik hajtóereje.

Irodalom

1. A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, C. von Borczyskowski: Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers. *Science* 276(1997) 2012–2014.
2. B. Hensen, H. Bernien, A. E. Dréau, A. Reiserer, N. Kalb, M. S. Blok, J. Ruitenber, R. F. L. Vermeulen, R. N. Schouten, C. Abellán, W. Amaya, V. Pruneri, M. W. Mitchell, M. Markham, D. J. Twitchen, D. Elkouss, S. Wehner, T. H. Taminián, R. Hanson: Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature* 526(2015) 682–686.
3. Adam Gali: Time-dependent density functional study on the excitation spectrum of point defects in semiconductors. *Physica Status Solidi B* 248/6(2011) 1337–1346.
4. William F. Koehl, Bob B. Buckley, F. J. Heremans, Greg Calusine, David D. Awschalom: Room temperature coherent control of defect spin qubits in silicon carbide. *Nature* 479(2011) 84.
5. Adam Gali: Identification of individual ^{13}C isotopes of nitrogen-vacancy center in diamond by combining the polarization studies of nuclear spins and first-principles calculations. *Phys. Rev. B* 80(2009) 241204.
6. V. Jacques, P. Neumann, J. Beck, M. Markham, D. Twitchen, J. Meijer, F. Kaiser, G. Balasubramanian, F. Jelezko, J. Wrachtrup: Dynamic polarization of single nuclear spins by optical pumping of nitrogen-vacancy color centers in diamond at room temperature. *Phys. Rev. Lett.* 102(2009) 057403.
7. Viktor Ivády, Paul V. Klimov, Kevin C. Miao, Abram L. Falk, David J. Christle, Krisztián Szász, Igor A. Abrikosov, David D. Awschalom, Adam Gali: High-fidelity bidirectional nuclear qubit initialization in sic. *Phys. Rev. Lett.* 117(2016) 220503.

A NEHÉZ, PROTONGAZDAG MAGOK KELETKEZÉSE ROBBANÁSOS FOLYAMATOKBAN

Kiss Gábor Gyula

RIKEN Nishina Center for Accelerator Based Science, Radioactive Isotope Physics Laboratory
MTA Atommagkutató Intézet, Ionnyaláb Fizikai Osztály

Energiatermelés és a nukleoszintézis a csillagokban

A nukleáris asztrofizika a kémiai elemek és izotópjaik keletkezésében, illetve a csillagok energiatermelésében kulcsszerepet játszó magreakciók tanulmányozásával foglalkozik. A csillagok életútja és a kémiai elemek szintézise szorosan összekapcsolódik, a lejátszódó égési folyamatokat az égítetek tömege határozza meg. Az elemszintézis első lépéseként hidrogénmagokból héliumatomok épülnek fel, az így felszabaduló energia tartja egyensúlyban az égítetet a gravitáció ellenében. A hidrogén „üzemanyag” azonban néhány milliárd év alatt elfogy. Amennyiben a csillag tömege megfelelően magas, a gravitációs összehúzó hatására belseje elég magas hőmérsékletre hevül fel, hogy a következő égési folyamat elinduljon. A fűtőanyag kimerülése okán bekövetkező összehúzó hatás és összesűrűsödés – felhevülés – következő égési folyamat elindulása ciklus számos alkalommal ismétlődik, a reakciók egyre nehezebb elemeket egyesítenek; átmenetileg gátolva a csillag magjának összeroskadását. Azonban az egymást követő folyamatokban fajlagosan egyre kevesebb energia szabadul fel, így egyre rövidebb ideig képesek egyensúlyban tartani a csillagot. A fúziós folyamatok a vas csoport elemeinek felépítéséig tartanak, hiszen ezen izotópok esetén a legnagyobb az egy nukleonra jutó kötési energia [1].

A csillagfejlődés során azonban számos esetben keletkeznek neutronok, amelyek Coulomb-gát híján nagy hatáskeresztmetszettel fogódnak be. Jelenlegi ismereteink szerint a vasnál nehezebb kémiai elemek izotópjai jellemzően sorozatos neutronbefogások és β -bomlások révén, az asztrofizikai s- (slow = lassú), illetve r- (rapid = gyors) folyamatokban jönnek létre [1, 2]. A stabilitási völgy protongazdag szélén, a ^{74}Se és ^{196}Hg izotópok közt azonban található $^{32-35}\text{1}$ olyan neutronszegény, úgynevezett p -mag

[3], amely a fent említett módon nem keletkezhet (hiszen stabil, illetve rövid felezési idejű izotópok választják el ezen magokat a neutronbefogásos folyamatok ösvényeitől).

A p -magok relatív gyakorisága alacsony, egy adott kémiai elem 1000 atommagja között tipikusan csak 1-10 a p -magok száma.² Jelenlegi ismereteink szerint a p -magok γ -indukált fotobomlási reakciókban (γ -folyamat), gyors protonbefogások révén (rp -folyamat) esetleg neutrínóindukált reakciók útján (νp -folyamat) keletkeznek. Jelen írás célja, hogy a p -magok keletkezésének vizsgálatát célzó legújabb kísérleti erőfeszítésekbe nyújtsunk bepillantást. A kutatási terület érdekessége, hogy a p -izotópok eredetének megértéséhez nemcsak a létező legnagyobb gyorsítókkal és összetett detektorrendszerekkel, hanem a hazánkban rendelkezésre álló berendezésekkel is szükséges mérni, kísérleteket végezni.

Röntgenkitörések, gyors protonbefogások és könnyű p -magok

1976-os felfedezésük óta kitüntetett figyelem övezi a röntgenkitörések (X-ray burst) kutatását, amelynek céljából számos égi obszervatóriumot – például EXOSAT (Európai Űrügynökség, 1983–1986), RXTE (NASA, 1995–2012), HETE-2 (NASA, 2000–2008) és Chandra (NASA, 1999-től napjainkig) – állítottak Föld körüli pályára. A röntgenkitörések egymáshoz közeli, kettős rendszert alkotó csillagok kölcsönhatásából származnak. A rendszer egyik tagja, a donor egy főágbeli vagy Vörös Óriás csillag, a másik pedig egy neutroncsillag. Napjainkig megközelítőleg 100 ilyen csillagászati objektumot sikerült azonosítani. A neutroncsillag erős gravitációs terének hatására az anyag a donorcsillag felszínéről a neutroncsillag felé áramlik (*1. ábra*), egyre jobban összenyomódik, illetve ennek hatására egyre jobban felhevül. Ez a folyamat néhány (1-100) másodpercig tart, és nagy, 10^{30} - 10^{32} J/s energiakiáramlás jellemzi. A kibocsátott sugárzás időbeli eloszlását egy gyors, 1-10 másodpercig tartó felfutási, majd 10 másodperctől a néhány percig tartó lecsengési szakasz írja le. Ezt követően, 10^3 - 10^9 másodperc múlva a jelenség megismétlődik.



Kiss Gábor Gyula Junior Prima-díjas fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa, a vasnál nehezebb elemek keletkezésének kutatója. 2008-ban szerzett PhD fokozatot, majd az olaszországi INFN-LNS kutatóintézetben az s-folyamat neutrontermelő reakcióit vizsgálta. Hazatérve a nehéz, protongazdag magok keletkezésében szerepet játszó magreakciókat tanulmányozta. 2014-től a japán RIKEN Nishina Center vendégkutatója, témavezető, a késő neutron- és protonkibocsátás asztrofizikai szerepét vizsgálja.

¹ A ^{152}Gd , ^{164}Er és ^{180}Ta magok keletkezési körülményeire ellentmondásos elméleti modellek állnak rendelkezésre.

² A molibdén és ruténium elemek kivételek, esetükben 1000-1000 atommagjuk között 148 a ^{92}Mo és 92 a ^{94}Mo , illetve 55 a ^{96}Ru és 18 a ^{98}Ru mag.

A magas hőmérséklet és nagy sűrűség hatására a nukleoszintézis folyamata eltér az általános fúziós folyamattól (kitör az úgynevezett CNO-ciklusból) és sorozatos gyors (a kölcsönható magok energiája általában meghaladja a Coulomb-gát magasságát) protonbefogások révén – az úgynevezett rp -folyamatban – egyre nagyobb rendszámú magok keletkeznek. A sorozatos befogásokat azonban a protonelhullatási vonal elérése megakasztja, hiszen egy további protonbefogása energetikailag kedvezőtlen (negatív Q érték), illetve a reakciót az ellentétes protonbomlás, illetve fotobomlás meggátolja, így lokális egyensúly áll be és az rp -folyamat kényszerűen „megvárja” a β -bomlást.³ Az rp -folyamat izotóptérképen bejárt útja bizonytalanul ismert. A rendelkezésre álló magszerkezeti adatok alapján annyit kijelenthetünk, hogy a folyamat az ón-tellúr tartományban található α -bomló magokig tarthat. A protonfluxus megszűntével az egzotikus magok sorozatos β -bomlással kerülnek vissza a stabilitás völgyébe hozzájárulva a p -magok izotópgyakoriságához. Egy tipikusnak mondható rp -folyamatszámítás eredménye látható a 2. ábrán. A folyamat magtérképen bejárt útjának meghatározásához – illetve a röntgenkitörések fényesség görbéinek reprodukálásához – a protonelhullatási vonal közelében található magok bomlási tulajdonságainak (bomlási mód, felezési idő, protonszeparációs energia) vizsgálata szükséges.

A modern radioaktívnyaláb-gyárok – mint például a RIKEN Nishina Center (Japán) – az rp -folyamatban szerepet játszó, igen rövid felezési idejű ($T_{1/2} \ll 1$ s) izotópokat már megfelelő ($>10^{-4}$ 1/s) intenzitással képesek előállítani, így ezen magok tulajdonságai vizsgálhatók. A 2015 tavaszán kivitelezett kísérletsorozatunk során a protongazdag nikkel-kripton tartományban található izotópokat vizsgáltuk (2. ábra, sárga)

[4]. Az egzotikus magok bomlási paramétereinek megállapításához első lépésként – a 345 MeV/nukleon energiájú ^{78}Kr -nyalábot egy 7 mm vastag berillium-céltárggyal ütköztetve létrehozott radioaktív nyalábot alkotó részecskék sokaságából a BigRIPS szeparátor precíz beállításával – kiválasztottuk a kísérleteinkhez szükséges magokat. A nyalábot alkotó részecskék repülési ideje és energiavesztesége különbözőképpen függ tömegüktől, töltésüktől és sebességüktől, tehát ha ezen mennyiségeket egymás

³ Bizonyos esetekben (a protonelhullatási vonal szélén, nagy proton-sűrűség esetén) azonban kettős protonbefogások révén az rp -folyamat „átugorhatja” a protonelhullatási vonalat.

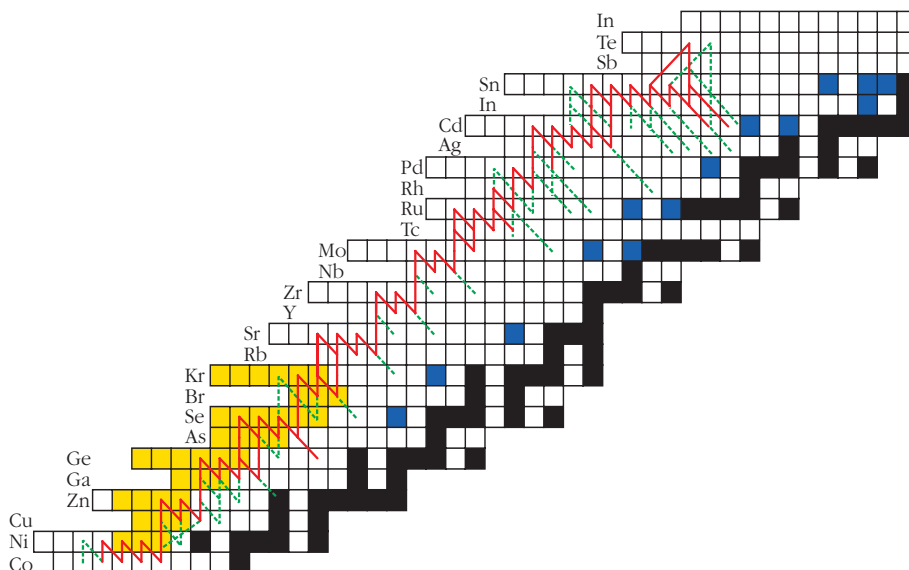


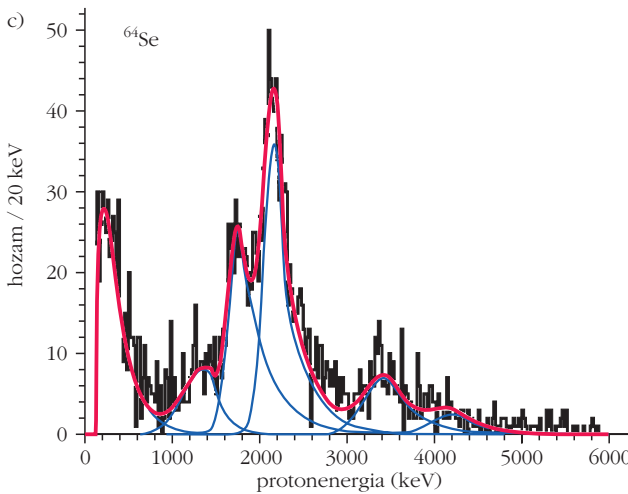
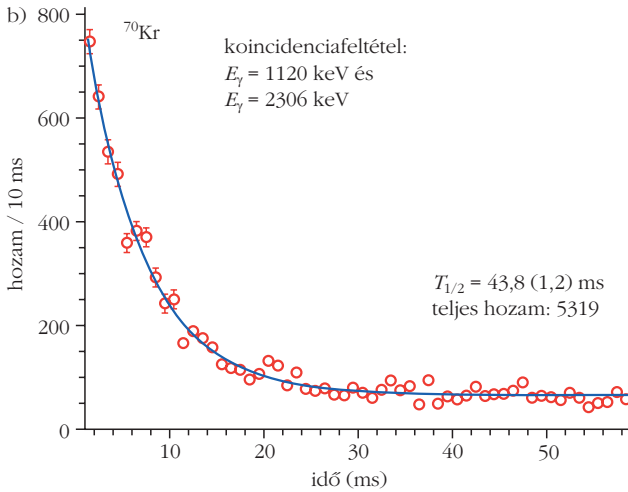
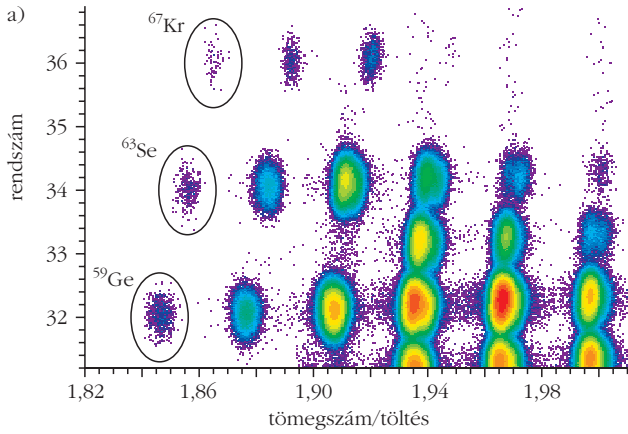
1. ábra. Röntgenkitörés fantáziarajza. A neutroncsillag gravitációs terének hatására az anyag a donor csillag felszínéről a neutroncsillag felé áramlik, összenyomódik, felhevül, amelynek hatására a nukleoszintézis folyamata kitör a CNO-ciklusból és sorozatos, gyors protonbefogások révén a protonelhullatási vonal közelében található magok épülnek fel.

függvényében ábrázoljuk a különböző magok megfelelően elkülönülnek egymástól – mint az a 3.a ábrán látható.

A β -bomlás vizsgálata céljából a létrehozott egzotikus magokat három réteg mind függőleges, mind vízszintes irányban szegmentált szilíciumlapka alkotta detektorrendszerbe implantáltuk. A könnyebb magok fajlagos energiavesztesége kisebb, így a harmadik rétegben a Ni-Cu izotópok, a közepesen nehéz Ga-As izotópok a középső, míg a legnehezebb Se-Kr magok már az első szilíciumrétegben teljesen lefékeződtek. Az implantációs események során GeV nagyságú energia kerül leadásra, a bomlást nagyságrendekkel kisebb, maximum néhány MeV energiájú pozitronok,

2. ábra. Egy rp -folyamat hálózatszámítás eredménye az izotóptérkép kobalt ($Z = 27$) – indium ($Z = 53$) magtartományában. A folyamat domináns ágát a vörös vonal jelzi, az egy nagyságrenddel alacsonyabb valószínűségű elágazásokat zöld szaggatott vonallal jelöltem. A fekete és kék négyzetek a stabil, illetve a p -magokat, a sárga szín pedig azon izotópokat jelöli, amelyek szerkezetét és bomlásmódját tanulmányoztuk [4].





3. ábra. Az a) ábrán a 2015-ben végzett kísérletünk során a kóktélyalábot alkotó részecskék azonosítására használt spektrumot ábrázoltam, a legegzenyesebb, első alkalommal létrehozott ^{59}Ge , ^{63}Se és ^{67}Kr izotópokat bekereteztem [4]. A b) ábra a ^{70}Kr mag felezési idejének meghatározásához használt, β - γ koincidenciával mért bomlásgörbét mutatja. A c) ábrán a ^{64}Se mag β -bomlását követően kibocsátott protonok energiaeloszlása látható. Kísérletünk során a radioaktív nyaláb intenzitása tipikusan két nagyságrenddel haladta meg a korábbi mérésekhez rendelkezésre álló áramot, így az ismert magok bomlási paramétereinek bizonytalanságát jellemzően az ötödére tudtuk csökkenteni.

illetve protonok kibocsátása követi, így az energiák precíz mérésével az egyes eseményeknek megfelelő

jelek megkülönböztethetők. A detektor szegmentációjának megfelelően, az egyes szálak jeleit elektronikusan kiolvastva, minden implantációs esemény egy $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ -es pixelben elhelyezhető. Az egyes izotópok azonosítása és detektorbeli megállásuk helyének meghatározása után következő feladat a bomlások során kibocsátott protonok/pozitronoknak azonosítása a szomszédos pixeleken. A detektor adatait úgynevezett listamódban gyűjtöttük, azaz minden eseményhez tartozott egy időbélyeg. A felezési idő meghatározására az időbélyegek nyújtanak lehetőséget: a detektor összes elektronikus jele közül meg tudjuk keresni azokat a jeleket, amelyek 1. az implantációs esemény közvetlen környezetében található, 2. implantált radioaktív mag elméletből ismert felezési idejének néhányszorosán belül kerültek detektálásra, illetve 3. maximum néhány MeV energiával rendelkeznek. A felezési idő meghatározását megkönnyíti, hogy az implantációs detektort 84 darab – 12, egyenként 7 detektort tartalmazó fűrtbe rendezett – nagy tisztaságú germánium (HPGe) detektorral vettük körül. Ezen detektorok segítségével mértük a bomlás során kibocsátott γ -sugárzást. A 3.b ábrán a ^{70}Kr mag sokszoroskoincidencia-feltételekkel meghatározott bomlásgörbéje látható. Kísérletünk során számos, az rp -folyamat örvényén található izotópot elsőként állítottunk elő, továbbá az ismert magok felezési idejének bizonytalanságát jellemzően az ötödére-tizedére csökkentettük.⁴

A fent részletezett technikával mintegy 40 atommag β -bomlásának tulajdonságait térképeztük fel (a 3.b, illetve 3.c ábrákon néhány kísérleti eredmény látható). Az első izgalmas eredmények már publikálásra kerültek [4] azonban ekkora adatmennyiség teljes feldolgozása a kísérletben résztvevő 37 fizikus számára évekre munkát ad. A jövőben további kísérleti eredmények várhatók, amelyek előreláthatóan az rp -folyamat jobb leírását teszik lehetővé.

A p -magszintézis szupernóvák robbanásában

Gyors protonbefogások révén – mint az előbb láttuk – maximum a tellúr-ón tartományban található p -magok jöhetnek létre. Magától adódik a kérdés, hogy a nehezebb p -magok milyen magfolyamatokban, milyen asztrofizikai környezetben keletkeznek? Jelenlegi ismereteink szerint létrejöhetnek a neutronbefogás révén keletkezett nehezebb magok fotobomlásával is, ez – a γ -folyamatnak nevezett – mechanizmus felelős a nehéz p -magok keletkezéséért.

A csillagok belsejében a fotonok energiaeloszlása a hőmérsékletfüggő Planck-eloszlást követi. A $100 < A < 200$ magtartományban, a stabilitási völgy közelében a protongazdag oldalon a neutronseparációs ener-

⁴ A γ -sugárzás mérése a késő proton azonosításában is segít. Egy $^A_Z Y_1$ mag „közönséges” β -bomlása $^A_{Z-1} Y_2$ magra vezet, amennyiben azonban későproton-kibocsátás történik az $^A_{Z-1} Y_3$ izotóp bomlását jellemző γ -átmeneteket fogjuk detektálni.

giák tipikusan az 5-10 MeV energiatarományba esnek [5]. Amennyiben a plazma hőmérséklete néhány gigakelvin, megfelelő mennyiségű foton áll rendelkezésre ahhoz, hogy a korábban s - , illetve r -folyamatokban [1, 2] létrejött magokból – sorozatos (γ, n) reakciók révén – egyre neutronszegényebb magok keletkezzenek. Ily módon egyre távolodva a stabilitási völgytől a neutronseparációs energiák egyre magasabbak,⁵ és így – állandó plazmahőmérsékletet feltételezve – egyre kevesebb megfelelő energiájú foton áll rendelkezésre, tehát a további (γ, n) reakciók valószínűsége egyre alacsonyabb. Ezzel párhuzamosan a töltött részecskék (p , α -rész) kilökésének valószínűsége megnő, így a γ -folyamat a kisebb rendszámú magok irányába folytatja útját.⁶ A (γ, n) reakciók mellett a (γ, α) fotobomlások a nehezebb ($A > 150$), a (γ, p) reakciók pedig a könnyebb p -magok létrehozásában játszanak kulcs szerepet [6].

Jelenlegi ismereteink szerint a nehéz p -magok a II-es típusú – „core collapse” – szupernóvák robbanása során keletkeznek.⁷ Azon csillagok, amelyek tömege legalább Napunk tömegének 9-10 szerese (de nem több, mint 40-50-szerese) életüket úgynevezett II-es típusú szupernóva-robbanással fejezik be. Az ilyen csillagok felépítése a hagyma szerkezetére emlékeztetnek: a csillag – fejlődése folyamán – magjában a szilíciumégés során vas- és nikkelmagok jönnek létre, a külsőbb, alacsonyabb hőmérsékletű rétegekben korábbi fúziós folyamatok (belülről kifelé haladva: oxigén-, neon-, szén-, hélium-, és hidrogénégés) játszódnak le. Amint a csillagmagot alkotó szilícium és kén vassá, illetve nikkellé alakul – körülbelül 1 nap alatt –, a csillag törzse többé nem képes egyensúlyt tartani a gravitációs nyomással, és bekövetkezik a robbanás. A robbanás fizikájának pontos leírásával még adós a tudomány, azonban annyit kijelenthetünk, hogy a II-es típusú szupernóvák robbanása az Univerzum leglátványosabb jelensége, hiszen mintegy 10^{44} J energia⁸ szabadul fel körülbelül 0,1-1 másodperc alatt [7]. A címlapon a NASA Chandra teleszkópjával készült kép a Tejút legfiatalabb, II-es típusú szupernóvájának maradványairól, a Cassiopeia A-ról készült felvétel látható. A jelenlegi γ -folyamatmodellek azt jósolják, hogy a p -magok a szupernóva-robbanást megelőző fázisban, illetve a robbanás során jöhetnek létre a csillag oxigénben, illetve neonban gazdag rétegében [6].

⁵ Természetesen az így létrejött magok szerkezete árnyalja a kijelentést: adott kémiai elem páros neutronszámú magjának neutronseparációs energiája magasabb, mint a páratlan számú neutron tartalmazó szomszédjáé.

⁶ Szemben a stabilitás völgyétől szintén távol lejátszódó rp -folyammal, a β -bomlás nem játszik szerepet a γ -folyamat során. Ennek magyarázata, hogy a γ -folyamat időskálája sokkal rövidebb, mint a fotobomlások során létrejövő magok felezési ideje.

⁷ Új elméleti modellek megmutatták, hogy fotobomlás révén IA típusú szupernóvák (olyan kettős rendszerek, amelyek egyik tagja egy fehér törpecsillag) robbanása során is létrejöhetnek könnyű ($A < 100$) p -magok [8].

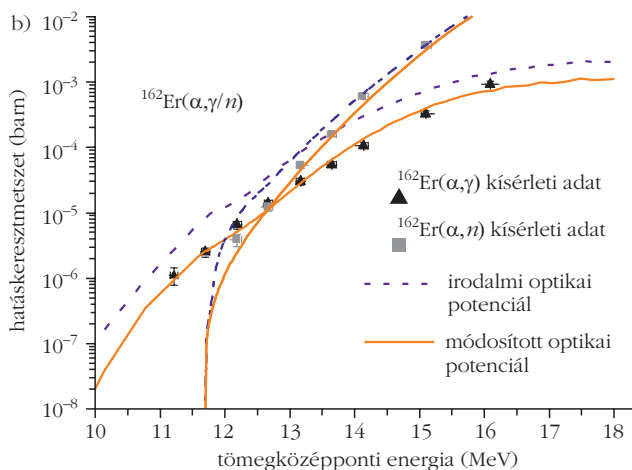
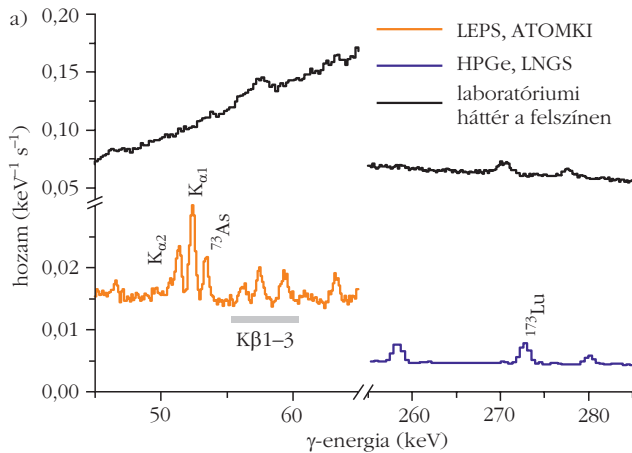
⁸ Összehasonlításképpen: ennyi energiát Napunk körülbelül 6-7 milliárd év alatt sugároz ki.

Amennyiben a létrejött p -magok a robbanás során kijutnak a csillagközi térbe, akkor a második generációs csillagok – mint például a Napunk –, illetve a körülötte keringő bolygók anyaga tartalmazhat p -magokat. A p -magok keletkezését reakcióhálózat-számításokkal vizsgálják; egy-egy ilyen számításban nagyságrendileg 2000 magon lejátszódó 20 000 magreakciót vesznek számításba. A jelenlegi γ -folyamatmodellek a p -maggyakoriságokat csak nagyságrendileg képesek reprodukálni [6]. Az eltérés oka az asztrofizikai bemenő paraméterek (a csillagot jellemző hőmérséklet és sűrűségviszonyok időbeli változása, rendelkezésre álló nehéz elemek mennyisége stb.) hiányos ismerete, valamint a hálózatszámítás során használt, statisztikus modell szolgáltatta hatáskeresztmetszetek, illetve asztrofizikai reakciósebességek pontatlansága egyaránt lehet. Ennek megfelelően, a γ -folyamatmodellek egy lehetséges hibaforrásának kiküszöbölése érdekében a statisztikusmodell-számítások ellenőrzése elengedhetetlen.

Kísérleti és elméleti megfontolások alapján a γ -indukált reakciók helyett az inverz befogási reakciók vizsgálata a célszerű [9]. Az így mért befogási hatáskeresztmetszeteket a részletes egyensúly elvének segítségével fotobomlási hatáskeresztmetszetre „alakíthatjuk”, majd a hálózatszámítás során az úgynevezett „stellar enhancement” faktor segítségével vesszük figyelembe, hogy a csillagok belsejében termikusan gerjesztett állapotban lévő magok közt játszódnak le a reakciók. A nehéz magok tartományában a (γ, α) fotobomlások hatáskeresztmetszeteinek pontos ismerete kulcsfontosságú a γ -folyamatmodellek sikeréhez ugyanis a nehéz p -magok számolt gyakorisága érzékenyen függ a statisztikus modell szolgáltatta (γ, α) bomlások hatáskeresztmetszeteitől: egy kettes faktorral való hatáskeresztmetszet-eltérés akár nagyságrendi különbséget is eredményezhet a jósolt izotópgyakoriságban. Ennek ellenére – mérésorozatunk kezdete előtt – ¹⁴⁴Sm izotópnál nehezebb magon nem állt rendelkezésre Coulomb-gát alatti energiákon kísérleti (α, γ) reakció-hatáskeresztmetszet.

A γ -folyamat leírása szempontjából releváns hatáskeresztmetszeteket a legtöbb esetben az aktivációs eljárással mérték. Ezen kétlépcsős mérési eljárás első fázisában – céltárgyunkat megfelelő energiájú protonokkal, illetve α -részecskével bombázva – létrehozuk a kívánt magreakciót. Ezt követően a mérés második fázisában HPGe detektorral mérjük a reakciótermékek β -bomlása során kibocsátott γ -sugárzás hozamát. A korábbi évek során azon reakciókat tanulmányozták, amelyek esetén a termék felezési ideje körülbelül 15 percnél hosszabb, de néhány napnál rövidebb, illetve ahol a β -bomlást egy jól mérhető, legalább 20-25% intenzitású γ -legerjesztődés követi.

Az $A \geq 150$ tömegszám-tartományban azonban számos olyan izotóp található, amelyek esetén az (α, γ) reakció vagy igen hosszú (év nagyságrendű) felezési idejű izotópra, vagy olyan magra vezet, amelynek β -bomlását csak kis relatív intenzitású γ -legerjesztődés követi. Annak érdekében, hogy ebben a tarto-



4. ábra. A $^{169}\text{Tm}(\alpha,\gamma)^{173}\text{Lu}$ reakció során a reakciótermék bomlását követően kibocsátott sugárzás spektrumai – amelyeket az ATOMKI-ban, illetve egy föld alatti laboratóriumban mértünk – láthatók az a) ábrán [10]. Összehasonlításképp, a fekete görbe – egy 100% hatásfokú HPGe detektorral – a felszínen mért háttérrel mutatja. A b) ábrán a $^{162}\text{Er}(\alpha,\gamma)^{166}\text{Yb}$ és $^{162}\text{Er}(\alpha,n)^{165}\text{Yb}$ reakciók mért hataskeresztmetszet-értékeit hasonlítom össze az irodalmi, illetve a módosított energiatartományú α -mag optikai potenciállal elvégzett számítások jöslataival [11].

mányban is végezhetünk α -indukált magreakció hataskeresztmetszet-méréseket, az aktivációs eljárást tovább kellett fejlesztenünk. Az $A > 100$ magtartomány-

ban az (α,γ) reakció révén létrejövő magok tipikusan elektronbefogással bomlanak. Ezen bomlási folyamat alapja, hogy az $1s$ pályán „keringő” K -elektronok esetén a hullámfüggvény abszolút értékének négyzete (azaz az előfordulás valószínűsége) éppen az atommagban veszi fel a maximumértéket. Amennyiben bekövetkezik egy K -elektron befogása, a megüresedett helyet egy, a külsőbb héjon található elektron tölti be, az energiakülönbséget az atom karakterisztikus röntgensugárzás formájában kibocsátja.

Amennyiben kísérleteink tárgyául olyan – asztrofizikai szempontból releváns – magot választunk, amely esetében az (α,γ) reakció révén keletkező izotóp felezési ideje lényegesen hosszabb, mint a többi α -indukált reakció által termelt magé, a karakterisztikus röntgenfotonhozam-mérés felhasználható a magreakciók hataskeresztmetszetének meghatározására. Ilyen esetekben a röntgenfotonhozam-mérés kivitelezésére választható olyan időtartomány, amelyben a zavaró α -indukált reakció termékének bomlásából származó hozzájárulás már elhanyagolható szintre csökkent. Például, míg a $^{169}\text{Tm}(\alpha,\gamma)$ reakcióban keletkező ^{173}Lu mag felezési ideje 1,37 év, addig az ugyan ezen magon lejátszódó (α,n) reakcióban keletkező ^{172}Lu izotópé 6,7 nap. A felezési időket – illetve azt a tényt, hogy az (α,γ) és (α,n) reakciók hataskeresztmetszete másképp függ az energiától – figyelembe véve azt találtuk, hogy amennyiben a röntgenfotongyűjtést legalább 6-8 hónappal a besugárzás után végezzük a ^{172}Lu mag bomlásából származó röntgenhozam praktikusán 0-ra csökken.

Az ilyen módon meghatározott $^{169}\text{Tm}(\alpha,\gamma)^{173}\text{Lu}$ magreakció-hataskeresztmetszeteket természetesen ellenőrizni szerettük volna. A ^{173}Lu mag bomlását mindösszesen egy kis intenzitású 272,11 keV energiájú γ -foton kibocsátása követi. Az ATOMKI-ban (és más felszíni laboratóriumban, a háttérsugárzás miatt) még vastag ólomárnyékolású detektorokkal sincs lehetőség ezen γ -átmenet alapján a hataskeresztmetszet meghatározására. A röntgenhozzammérésen alapuló hataskeresztmetszeteket a Gran Sasso-ban található föld alatti (alacsony háttérű) laboratóriumban

egy vastag ólomárnyékolással ellátott detektor segítségével tudtuk a 272,11 keV átmenet hozama alapján ellenőrizni. A 4.a ábrán a ^{169}Tm mag $E_\alpha = 13,5$ MeV energiájú α -részekkel való besugárzása után 7 hónappal az ATOMKI-ban, illetve további egy hónappal később Gran Sasso-ban mért röntgen-, illetve γ -spektrum részlete látható. Összehasonlításképp feltüntettem egy 100% relatív hatásfokú, árnyékolt HPGe detektor földfelszínen mért háttérspektrumát is.

Az 1. táblázatban felsorolt kísérletekben, mélyen a Cou-

| 1. táblázat | | | | |
|--|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Az ATOMKI-ban kivitelezett (α,γ) reakció hataskeresztmetszet-mérések néhány kísérleti részlete | | | | |
| céltárgy | releváns energiatartomány (MeV) | reakciótermék felezési ideje | $K_{\alpha 1}$ foton energiája (keV) | vizsgált energiatartomány (MeV) |
| ^{127}I | 6,2 – 8,6 | 9,7 nap | 29,78 | 9,5 – 15,15 |
| ^{162}Er | 7,8 – 11,5 | 2,4 nap | 50,74 | 11,21 – 16,09 |
| ^{169}Tm | 7,8 – 10,7 | 1,37 év | 52,39 | 13,16 – 17,08 |
| ^{168}Yb | 8,0 – 11,6 | 1,87 év | 54,07 | 12,54 – 14,73 |
| ^{191}Ir | 8,4 – 11,6 | 0,51 év | 68,81 | 13,42 – 16,41 |

A táblázatban az asztrofizikai szempontból releváns energiatartomány ($T = 3$ GK hőmérséklet, tömegközépponti rendszer), a reakciótermék felezési ideje, a bomlás során kibocsátott karakterisztikus röntgensugárzás energiája és a mérés energiatartománya (tömegközépponti rendszerben) szerepel.

lomb-gát alatt és mindössze 1-2 MeV energiával az asztrofizikailag releváns energiatartomány felett számos magreakció hatáskeresztmetszetét megmértük. Minden esetben – összhangban a más csoportok által végzett (α, n) hatáskeresztmetszet-mérések eredményeivel – azt találtuk, hogy a hálózatszámítások során használt α -mag optikai potenciállal elvégzett számítás felülbecsüli a kísérleti adatokat [10, 11] (mint látható a 4.b ábrán). A számos új kísérleti adat az optikai potenciál energiafüggésének pontosítását tette lehetővé. A módosított optikai potenciállal számított hatáskeresztmetszetek jól egyeznek a kísérleti eredményekkel (4.b ábra). A pontosítással a jövőbeni reakcióhálózat-számítások megbízhatóbb elméleti hatáskeresztmetszet-adatokra támaszkodhatnak.

Összefoglalás

Az asztrofizikai p -folyamat az egyik legkevésbé ismert nukleoszintézis-szenárió, hiszen a jelenlegi elméleti modellek sem a röntgenkitörések fényesség görbéit sem a Naprendszerbeli p -maggyakoriságokat nem ké-

pések reprodukálni. A vezető modern radioaktívnyaláb-gyárakban az rp -folyamat ösvényén elhelyezkedő magok megfelelő intenzitással előállíthatók, így szerkezetük és bomlásaik tulajdonságai tanulmányozhatóvá váltak. A hazai magfizikai kutatások is hozzájárulnak a p -magok keletkezésének megértéséhez: az α -indukált magreakciók hatáskeresztmetszetének pontos mérése – és különösen az optikai potenciálok finomítása – megbízhatóbb p -folyamatmodell-számításokhoz vezet.

Irodalom

1. C. Iliadis: *Nuclear Physics of Stars*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2007).
2. Kiss G. Gy., *Fizikai Szemle* 57(2016) 7.
3. Gyürky Gy., *Fizikai Szemle* 60(2010) 37.
4. Goigoux T., ..., Kiss G. G. és mts., *Physical Review Letters* 117 (2016) 162501.
5. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/help/index.jsp>
6. Rauscher T. és mts., *Reports on Progress in Physics* 76 (2013) 066201.
7. Gilmore G., *Science* 304 (2004) 1915.
8. Travaglio C. és mts., *Astrophysical Journal* 739 (2011) 93.
9. Kiss G. Gy. és mts., *Physical Review Letters* 101 (2008) 191101.
10. Kiss G. Gy. és mts., *Physics Letters B* 695 (2011) 419.
11. Kiss G. Gy. és mts., *Physics Letters B* 735 (2014) 40.

A FIZIKA TANÍTÁSA

»A TERMÉSZET JÁTÉKAI«

Tóth Eszter
Vác

Idézőjelbe tettem a címet, mert idézet. 1982-ben írta meg Marx György *A természet játéka*i című könyvét. Kilencvenedik születésnapján az ő emlékének ajánlom ezt a cikket.

A könyv (1. ábra) írásakor Marx György játékeit tanítványaimmal próbáltuk ki, a számítógépes programok egyes verzióit tanítványaim írták. Játsoztunk a természettel. És közben észrevétlenül együtt tanulunk fizikát és biológiát. Mert tanítani lehet – állítólag – úgy is, hogy a tanár 17-szer elmondja tanítványainak

a bemagolandót. És úgy is lehet, hogy a tanár a gyerekekkel együtt kérdezi a természetet, közösen alkotnak többé-kevésbé jól működő modelleket, hogy megértsék a tapasztalt jelenségeket. Szóval sok-sok derűvel játszanak. És ez által maradandóbban és többet tanulnak.

A megélt dolgok nem múlnak el nyomtalanul. A fizika tanítása (játsozása?) mellett, tanítványaim kérésére – főként péntek délutánonként – mikrobiológiai kísér-

1. ábra. A könyvborító.



leteket, méréseket terveztünk, hajtottunk végre. Az internetnek, meg néhány nagyon jó könyvnek hála, sokat tanultunk a baktériumokról és az antibakteriális hatóanyagokról. (Én is, hiszen csak fizika-tanár vagyok.)

Falusi kutak emberi fogyasztásra is használt vizéből tenyésztettünk ki baktériumokat, amelyeket a *Mikrobiológiai praktikum* című csodálatos szakkönyv szerint homo-

Köszönöm a két fiatal, Frey Sári és Varga Marci intellektuális örömtől sugárzó munkáját. És ábrákat.

A cikkben idézett kutatás anyagi igényeit részben a Nemzeti Tehetség Program NTP-MITD-16-0215 pályázata fedezte.



Tóth Eszter Rátz tanár úr életmű díjas fizikatanár. Több fizikatanácsot írt, amelyek a magyarokon kívül japán, kínai, portugál, angol és orosz nyelven is megjelentek. Az 1980-as évektől tanórákon kívüli kutatásokat szervezett diákjainak (Országos lakótériradon-felmérés; vörösiszap vizsgálata; falvak felszín alatti vizeinek elemzése; radioaktív sugárzások hatása növényekre, penészgombákra; baktériumok és antibakteriális anyagok kölcsönhatása). Fizikát is tanított, nem eredménytelenül.



2. *ábra.* Középen a fehér itatóspapír, amire az antibiotikum-szuszpenziót csöpögtettük. Körülötte a tápszínű gátlási zóna, a fehér sáv valószínűleg a kezdetben még odaszaporodó, de elhalt baktériumok, és azon kívül a szaporodó baktériumpázsit.

gén telepekre választottunk szét. Kísérleteinkben felfismertük, hogy a kútvizеkből kitenyészett baktériumok nagy többsége érzékenyen reagál a fokhagymára. Egészen pontosan a fokhagymából kinyerhető allicinre, amely vegyület a fokhagyma illatát, szagát is adja. „Kérem, szagoljon meg egy fokhagymafejet!” Meg fog lepődni. Nincs fokhagymaszaga. Ez azért van, mert a fokhagyma csak akkor termel allicint, ha sejtjeit megsértik. Így védekezik a bakteriális fertőzés ellen. (Evolúció: ma azok a fokhagymák vannak életben, amelyek képesek voltak megsérülésükkor a bennük fellelhető allinin molekulákból egy enzim segítségével az allicint legyártani.) Csodálatos volt felfedezni, hogy az ajánlott népi gyógymód: „Vágd apróra a fokhagymát, tedd vízbe, rotytanásig főzd, majd naponta egy-két kanállal egyél belőle, akkor elmúlik a bakteriális fertőzés okozta náthád!” – NEM működik. Csak a friss fokhagyma írtotta a Petri-csészékben a táptalajon egyébként vígan szaporodó baktériumokat. Nemcsak a főzött, de már a 30, 40, 60 fokos vízfürdőn tartott fokhagymalé sem volt elég hatásos. (Ez kellemes tulajdonsága az allicinnek abból a szempontból, hogy mire a vastagbélben lévő jótékony bélbaktériumainkhoz érkezne, elbomlik.) Olyan cikket találtunk a gyerekekkel, ahol spektrofotométeres mérés-

sekkel bizonyították, hogy az allicin hőbomló vegyület. A magasabb hőmérsékletek felé haladva szépen, exponenciálisan csökkent az allicin mennyisége, de a cikk szerzői igazi laboratóriumban dolgozva, megfelelő eszközökkel rendelkeztek az allicinsűrűség kiméréséhez.

A gyerekek előtt azonban nincs megoldhatatlan feladat. Felfedeztük az úgynevezett korongdiffúziós eljárást. Akkor még nem tudtuk, hogy a mikrobiológiai kutatásokban ezt gyakran alkalmazzák annak kiderítésére, hogy egy adott hatóanyag mennyire hatékony egy-egy baktériumtörzssel szemben. Mi bőrlukasztóval itatóspapír-korongokat vágunk ki. A frissen öntött, majd megdermedt táptalajra egyenletesen rákentük a baktériumból készült szuszpenziót, végül a közepére tettük a hatóanyagba áztatott korongot. A korongról kidiffundált hatóanyag összetalálkozott a baktériummal, és vagy megölte azt, vagy gátolta szaporodását. Így a korong körül gyűrű alakú gátlási zóna alakult ki, míg a zónán kívül szemmel jól látható baktériumpázsit jött létre (2. *ábra*).

Az elmúlt években nagyon sok kísérletet végeztünk, nagyon sok mindenre derült fény. Nem csupán a fokhagyma hatóanyagáról, de többféle, gyógyszer-tári antibiotikumról is. Most arra szaladok rá, aminek kutatásakor visszaköszönt nekem Marx György könyve.

A táptalajokat a gyerekek főzték, megdermedése előtt, forrón öntötték Petri-csészébe. Nagyon vigyáztak, hogy lehetőleg azonos mennyiséget öntsenek egy-egy csészébe. Hiszen, ha össze akarják hasonlítani például néhány baktériumtörzs reagálását ugyanazon hatóanyagra, akkor minden, baktériumszaporodást befolyásoló tényezőt azonosnak kell tartani. Így például a tenyésztés idejét, a tenyésztés alatt a hőmérsékletet, a korong méretét, azon a hatóanyag sűrűségét stb. Bármennyire is igyekeztek, néha vastagabb, néha vékonyabb volt a táp a csészében. A csuda se gondolta volna, hogy a táp felületén tenyésző baktériumok felé a korongról kidiffundáló hatóanyag más méretű gátlási zónát hoz létre, ha a felület alatt vastagabb a táp. De hát ezt tapasztaltuk. Ezért öntés helyett áttértünk egy lófecs kendős tápanyagkészítésre. És a fecskendővel pontosan 25 ml tápot juttattunk minden

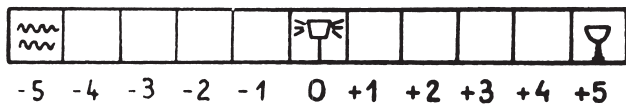
3. *ábra.* Balról jobbra egyre vastagabb a táp. Jól látszik, hogy a vastagabb táp fölött kisebb átmérőjű gátlási zóna alakul ki.



Petri-csészébe. A dolog működött. De sem a gyereket, sem engem nem hagyott nyugton, hogy miért van ez. Honnan tudja a hatóanyag, hogy alatta még mennyi táp van (3. ábra)?

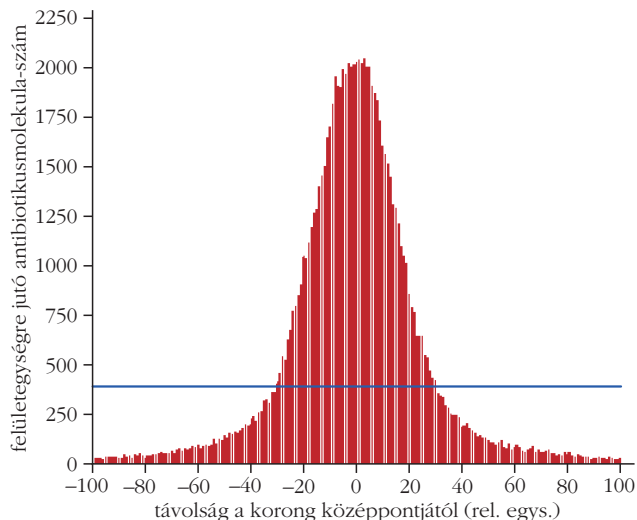
Egy mikrobiológia iránt (kezdetben) egyáltalán nem érdeklődő, programozó szakképzős tanítványomnak elmondtam, hogy a gátlási zónák méretének meghatározásához nagyon sok mérést kell elvégezni, nem dolgozna-e ki egy eljárást, hogy a számítógépre bizzuk e feladatot. Ennek nemcsak a kevesebb munka elérése volt a célja, hanem az objektivitás biztosítása is. (Az ember hajlamos egy kicsit kisebb átmérőt leolvasni, ha az jobban illeszkedik az elméletéhez.)

Szóval: összeeresztettem egyik mikrobiológias lányomat a programozó fiúval. Miközben kidolgozták a számítógépes mérést, természetesen szóba került a nyomasztó – a zónaméret tápvastagsággal való kapcsolata – nem-értésünk. Időközben a mikrobiológias kislány a zónamérettel kapcsolatban szakirodalmat talált, amelyben szépen kimutatják a szerzők, hogy az mennyi mindentől és hogyan függ, csak egyedül a tápvastagságot nem vizsgálták a cikkben. De szó volt a hatóanyag molekuláinak diffúziójáról. És akkor nekem beugrott Marx György könyvének hatodik, *Bolyongás* fejezete, ami a tengerparti kocsmáról és a részeg matrózokról szól (4. ábra). „Tíz matróz ácsorog a kocsmá ajtajában ($X = 4$), egy lépésre a kocsmától ($X = 5$). Tántorogva elindulnak. A kocsmá közelebb van, legtöbbjük ott köt ki. Lesz-e olyan is a vak-tában lépegető szesztársak közül, aki eljut a kijózanító fürdőig ($X = -5$), és hazamegy kabinjába?”



4. ábra. Marx György könyvéből az ábra (emlékszem, ő rajzolta, mert a könyv rajzolásának nem sikerült kifejeznie a lényegét ☹).

Hát, a diffúzió bolyongás! Megkértük a programozó fiút, írjon egy programot arra, hogy a korongból kidifundáló molekulák merre járnak a tápban. Azután, amelyik hatóanyag-molekula eljut a felszínen lévő bacikhoz, az semmisítse meg a bacit. ÉS! Tegye bele a programba azt is, hogy a tápban van alja, onnan a molekula nem tud tovább bolyongani, hanem „visszaverődik” (5. ábra). Midőn ez készen van, változtassa a táp vastagságát.



5. ábra. A számítógépes szimuláció eredménye egy adott tápvastagság esetén. Függőlegesen a felültre jutó antibiotikus molekulák száma. Vízszintesen a táp felületének metszete, ahol az origó az antibiotikus korong középpontja. Ott lesz a gátlási zóna, ahol elegendő hatóanyag-molekula (vízszintes vonal) jut a felszínre. (Ezt a kísérleti eredményekhez illően lehetett kalibrálni. A képen körülbelül 60 egység átmérőjű gátlási zónát látunk.) Több, különböző tápvastagsággal lefuttatott program megmutatta, hogyan függ a tápvastagságtól a gátlási zóna átmérője.

Nem csak a kísérletekben már tapasztaltakat – vastagabb táp, kisebb a gátlási zóna átmérője, és mintha összefüggésük lineáris lenne – sikerült megmutatni a modellel is, és így szemléletesen megérteni. De a modellt ki lehetett terjeszteni nagyobb tápvastagságokra. Nagyobb tápvastagságnál a modell szerint jól láthatóan már nem lineárisan, hanem egyre kevésbé csökken a gátlási zóna átmérője. A mikrobiológias kislány pedig kigondolta, kísérletileg miként bizonyítsa a modellkiterjesztés eredményét. És a kísérlet eredménye, figyelembe véve a mérési hibát is, igazolta a modellt alapján vártakat!

Ha Marx György vissza tud ide nézni, akkor most nagyon örül a két fiatal sikerének: a mikrobiológiát tudó kislány és a programozásban jártas fiú egymásra figyelő, eredményes együttműködésének. Könyve 35 éve készült. Azóta a számítógépek sokat fejlődtek, a fiatalok pedig azokat még jobban tudják használni, mint 35 éve. Nekünk, tanároknak a dolgunk, hogy ne (csak) lövöldözős, autóversenyzős játékokra használják, hanem a természet játékaival. Mert a természet játékeit nem lehet megünni.

A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Fizikai Szemle hasábjain az olvasókkal!

Hosszú űrkirándulásra készül egy négytagú család: Anya, Apa és a 10 éves ikrek, Adorján és Bálint. 2016-ban indulnak, és éppen a 2044-es nyári olimpiára szeretnének hazatérni. Útjuk során, rövid gyorsulási szakaszokat kivéve, végig kikapcsolt hajtóművel,

$$v = \frac{c}{\sqrt{3}} \approx 173\,205 \text{ km/s}$$

állandó sebességgel suhannak majd a világűrben. (Abból a bolondos okból választják épp ezt a számértéket, mert így könnyű a világvonalukat ábrázolni egy téridődiagramon.)

A fellövés utáni percekben, a több évtizedre pakolt ennivaló kicsomagolásakor derül ki, hogy a figyelmetlen szülők Adorjánt a földi támaszponton felejtették. Szerencsére Adorján talpraesett gyerek. Azonnal az űrhajó után küld egy videóüzenetet, amelyben tudatja családtagjaival, hogy jól van. Azután végiggondolja: szülei akkor lennének igazán nyugodtak, ha a következő évtizedekben rendszeresen hírt adna magáról. Elhatározza hát, hogy minden este videóüzenetet küld az űrhajóra, amelyben beszámol az aznapi földi eseményekről. Számít rá, hogy lelki-furdalással küzdő szülei, Bálinttal együtt, minden beérkező híradást azon nyomban megfognak nézni.

Adorján, ahogy cseperedik, egyre többet tanul a relativitáselméletről. Megérti, hogy az út elején családtagjainak több mint 24 órás szüneteket kellett kibírnia 1-1 videóüzenet megérkezése között (tehát Bálint ekkor minden üzenet nézése közben *öregebb* lesz, mint amilyen Adorján a képernyőn). Másrészt az ikerparadoxonból az derül ki, hogy amikor 28 év múlva személyesen is viszontlátják egymást, már Bálint lesz *fiatalabb* őnála. Adorján rájön: mindezekből az következik, hogy az út folyamán Bálint *az egyik videóüzeneten épp saját magával napra pontosan egyidősnek fogja látni Adorjánt*. Elhatározza, hogy aznapi videóblogját ezzel a furcsa ténnyel fogja kezdeni. („Szia Bálint, ma látsz pont annyi idősnek, mint amennyi te vagy!”) Segítsünk Adorjánnak kiszámítani, melyik videóblogját indítsa ezzel a köszöntéssel.

Az 1. ábra a folyamat téridődiagramját mutatja. A t -tengelyt *években* kalibráljuk, az x -tengelyt pedig *fényévekben* (az utóbbi kalibrációs osztásait nem tün-

tettem fel az ábrán). Ez azért praktikus mértékegység-választás, mert ekkor az x -tengely mentén haladó fénysugarak világvonalai $\pm 45^\circ$ -os egyenesek, a fénysebesség számértéke pedig

$$c = \frac{1 \text{ fényév}}{1 \text{ év}} = 1.$$

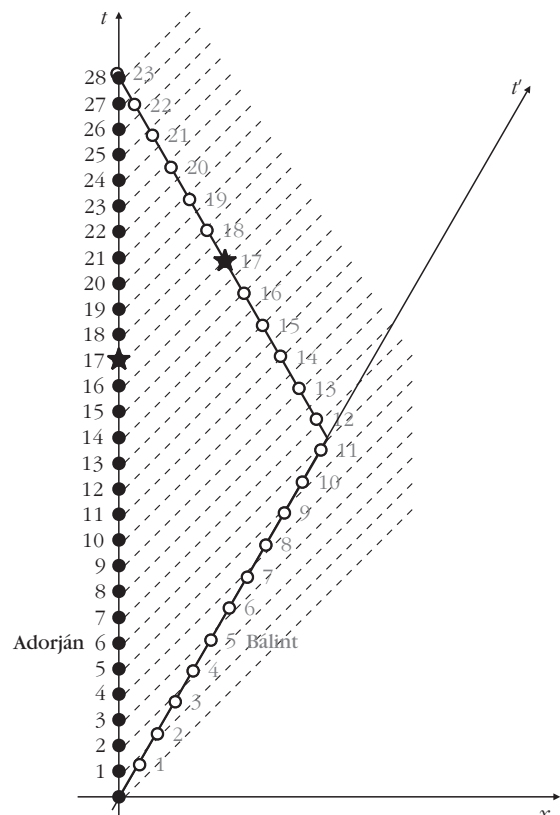
(Emiatt a továbbiakban csak felesleges kolonc lenne a c -t szerepeltetni képleteinkben.) A családi űrhajó sebessége tehát $v = 3^{-1/2}$, ami azt jelenti, hogy az űrhajó (és benne Bálint) világvonalát

$$\arctg\left(\pm \frac{1}{v}\right) = \pm 60^\circ$$

meredekségű egyenesek képviselik a téridődiagramon. Az 1. ábra fekete pontjai évenként bekövetkező eseményeket jeleznek, tehát például azon videóüzenetek elkészítését, amelyek épp Adorján születésnapjaira esnek. A Bálint világvonalán feltüntetett fehér körök Bálint születésnapjai.

Bálint világvonalán az évenkénti osztásokat az idődilataciónak megfelelő módon rajzoltam be: két Bálint-születésnap között Adorján inerciarendszerében mérve több mint 1 év telik el (két szomszédos fehér kört vízszintes segédvonalakkal – Adorján inerciarendszerének *egyidejűségi vonalaival* – a t -ten-

1. ábra



Bokor Nándor egyetemi docens a BME-n szerzett villamosmérnök diplomát 1993-ban, majd ugyanott fizikából PhD fokozatot 1999-ben. Munkájában – az optika számos területén végzett kutatásai mellett – legszívesebben a fizika, azon belül kiemelten a relativitáselmélet oktatásának pedagógiai kérdéseivel foglalkozik. Ez utóbbi témában számos publikációja jelent meg a *Fizikai Szemlében*, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.

gelyre vetítve leolvashatnánk, hogy Adorján inerciarendszerében

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}} \approx 1,225 \text{ év}$$

telik el köztük). Az ábrán nyomonkövethető, hogy míg Adorján a többiek visszaérkezésekor $T_A = 28$ évvel lesz idősebb, addig Bálint és a szülők számára csak

$$T'_B = 28 \cdot \sqrt{1-v^2} \approx 23 \text{ év}$$

telik el. Az ábráról az is leolvasható – lásd a két, csillaggal jelölt eseményt –, hogy Adorjának, a saját mérése szerint, $T \approx 17$ évvel a többiek indulása után kell a különleges tartalmú videóüzenetet elküldenie.

T pontos kiszámítása a 2. ábra téridődiagramjából egyszerű geometriai megfontolásokkal adódik. Csak arra kell vigyázni, hogy az ábrán szereplő távolságokat ne euklideszi értelemben használjuk, hanem vegyük figyelembe a téridő-geometria sajátosságait – például az idődilatációt – úgy, ahogy azt már az 1. ábra időtengelyeinek kalibrációja is mutatta.

A 2. ábrán a Bálint által mért időértékek szürke ovális keretben szerepelnek. A szürke keretben nem szereplő adatokat Adorján inerciarendszere méri.

Kétféle módon írjuk fel az x_T távolságot (ez az a távolság, amelyre Bálint Adorjától elhelyezkedik – Adorján rendszerében mérve –, amikor a különleges videóüzenetet megkapja)! Először úgy, mint a fényjel által megtett utat:

$$x_T = \frac{T}{\sqrt{1-v^2}} - T, \quad (1)$$

ahol az első tagban az idődilatációt alkalmaztam.

Másodszor úgy, mint Bálint eredő elmozdulását:

$$x_T = \frac{T_A}{2} v - \left(\frac{T}{\sqrt{1-v^2}} - \frac{T_A}{2} \right) v. \quad (2)$$

Az (1) egyenletet a (2) egyenletből kivonva, és az így kapott egyenletet T -re megoldva a

$$T = T_A \frac{v\sqrt{1-v^2}}{1-\sqrt{1-v^2}+v} \quad (3)$$

összefüggés adódik. Számértékeink behelyettesítésével: $T \approx 17,348$ év. Figyelembe véve a T_A és T'_B között érvényes

$$T'_B = T_A \sqrt{1-v^2}$$

idődilataciót, T kifejezhető a Bálint óráján eltelt teljes időtartammal is:

$$T = T'_B \frac{v}{1-\sqrt{1-v^2}+v}. \quad (4)$$

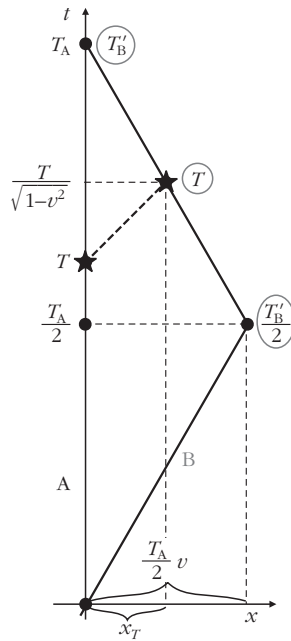
Megjegyzés: Kicsit módosul a 2. ábra kinézete, ha $T < T_A/2$, azaz ha T a $T_A/2$ alá kerül a függőleges tengelyen, az (1) és (2) egyenletek azonban ekkor is változatlan formában igazak.

A 3. ábra a (3) és (4) képleteket mutatja v függvényében.

T értékét megkaptuk, Adorján tehát már megnyugodhat. Helyesen tudja majd időzíteni különleges tartalmú videóüzenetét. Mi viszont további részletekre is legyünk kíváncsiak.

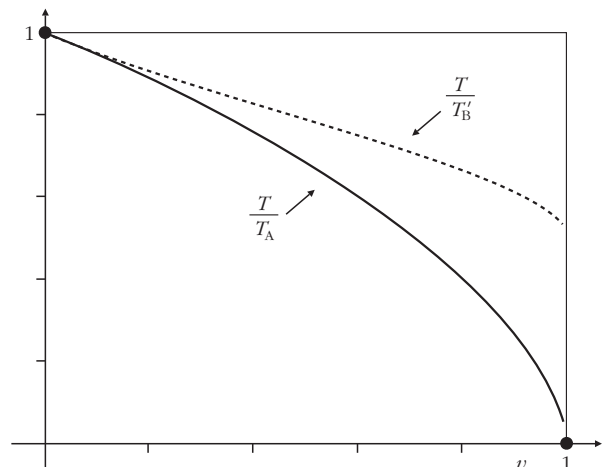
Hogyan néz ki az Adorjától érkező videóüzenetek sorozata Bálint számára? Ezekon milyen ütemben látja öregedni Adorját?

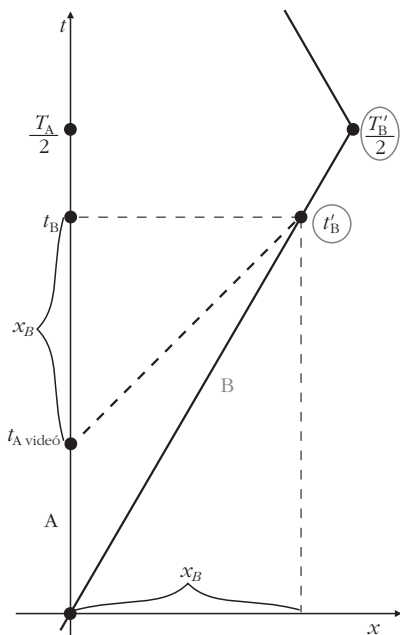
A klasszikus kinematika szerint, mivel Bálint az útja során mindvégig valamekkora távolságra van Adorjától, és a fénynek azon távolság megtételéhez időre van szüksége, Bálint végig egy saját magánál fiatalabb Adorját lát a képernyőn. Az út első felében, amíg távolodik Adorjától, saját magánál lassabb tempóban látja öregedni testvérét (hiszen Adorján napi üzenetei nem naponta, hanem annál ritkább időközönként jutnak el hozzá). Visszaút alatt viszont Adorján – Bálint képernyőjén követhető – öregedése felgyorsul (hiszen napi üzenetei kevesebb, mint 24 órás időközönként érkeznek meg Bálinthoz). Végül Adorján videóüzeneteken látható öregedése „utoléri” Bálint öregedését, és személyes találkozásukkor a két testvér pontosan ugyanannyi idősnak látja egymást. Ez összhangban van a 3. ábrával, amelyről leolvasható, hogy a klasszikus határesetben ($v \ll 1$) $T \approx T_A \approx T'_B$, tehát Bálint ép-



2. ábra

3. ábra





4. ábra

pen a visszaérkezéskor (az „utolsó videóüzeneten”) látja saját magával azonos korúnak testvérét.

A helyes, *relativisztikus* tárgyalás azonban más eredményt ad.

A *teljes oda-vissza útra* határozzuk meg a $t_{\text{Avidéo}}(t'_B)$ függvényt, ahol t'_B a Bálint karóráján (naptárán) mutatott idő akkor, amikor Adorján adott videóüzenetét nézi, $t_{\text{Avidéo}}$ pedig a Bálint által épp nézett videóüzeneten a képernyőn látható Adorján karóráján (naptárán) mutatott idő.

A 4. ábráról – az idődilatació figyelembevételével – leolvasható, hogy a fordulópontig (azaz $t'_B \leq T'_B/2$ -re) t'_B és $t_{\text{Avidéo}}$ között az alábbi kapcsolat áll fenn:

$$t'_B = t_B \sqrt{1-v^2} = (t_{\text{Avidéo}} + x_B) \sqrt{1-v^2}, \quad (5)$$

ahol x_B Bálint pozíciója az üzenet megnézésekor (Adorján inerciarendszerében mérve), amelyre

$$x_B = v t'_B = v \frac{t'_B}{\sqrt{1-v^2}}. \quad (6)$$

(5) és (6) felhasználásával a keresett $t_{\text{Avidéo}}(t'_B)$ függvény $t'_B \leq T'_B/2$ -re vonatkozó szakasza:

$$t_{\text{Avidéo}}(t'_B) = t'_B \sqrt{\frac{1-v}{1+v}}, \quad (7)$$

$$\text{ha } t'_B \leq \frac{T'_B}{2}.$$

Az (5)–(7) gondolatmenet voltaképpen az elektromágneses *Doppler-effektus* levezetése volt az egymástól távolodó fényforrás és megfigyelő esetére, a (7) képlet pedig maga a Doppler-formula.

A fordulópont után (azaz $t'_B > T'_B/2$ -re) a visszafordulás utáni szakaszra ugyanilyen megfontolás alapján

az egymáshoz közeledő forrásra és megfigyelőre vonatkozó Doppler-formula használandó. Ebből a $t_{\text{Avidéo}}(t'_B)$ függvény $t'_B > T'_B/2$ -re vonatkozó szakasza:

$$t_{\text{Avidéo}}(t'_B) = \frac{T'_B}{2} \sqrt{\frac{1-v}{1+v}} + \left(t'_B - \frac{T'_B}{2}\right) \sqrt{\frac{1+v}{1-v}}, \quad (8)$$

$$\text{ha } t'_B > \frac{T'_B}{2}.$$

A teljes $t_{\text{Avidéo}}(t'_B)$ függvény tehát – mint a fenti klasszikus gondolatmenet alapján is sejthető volt – egy 45° -nál lankásabb és egy annál meredekebb egyenes szakaszból áll, amelyek $t'_B = T'_B/2$ -nél kapcsolódnak össze.

Ellenőrzésképpen még nézzük meg, kiadja-e a (8) képlet a teljes ikerparadoxonra vonatkozó idődilataációs eredményt. Ehhez helyettesítsük be (8)-ba az újra találkozásnak megfelelő $t'_B = T'_B$ értéket:

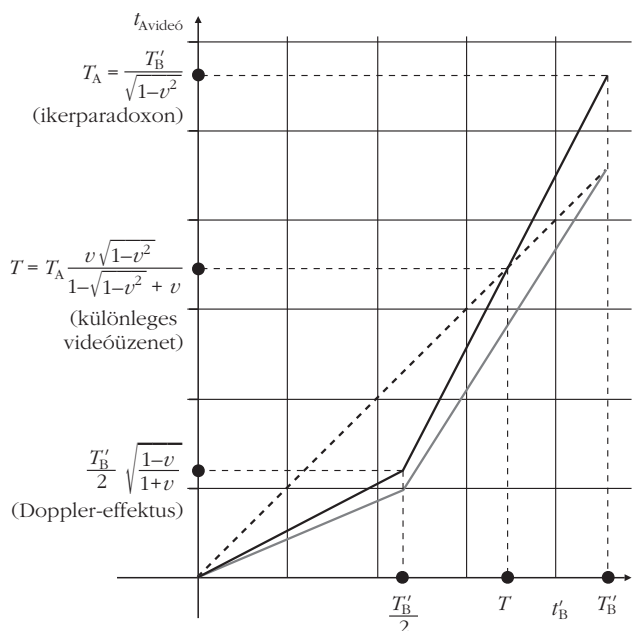
$$\begin{aligned} T_A &= t_{\text{Avidéo}}(t'_B = T'_B) = \\ &= \frac{T'_B}{2} \sqrt{\frac{1-v}{1+v}} + \frac{T'_B}{2} \sqrt{\frac{1+v}{1-v}} = \\ &= \frac{T'_B}{\sqrt{1-v^2}}, \end{aligned} \quad (9)$$

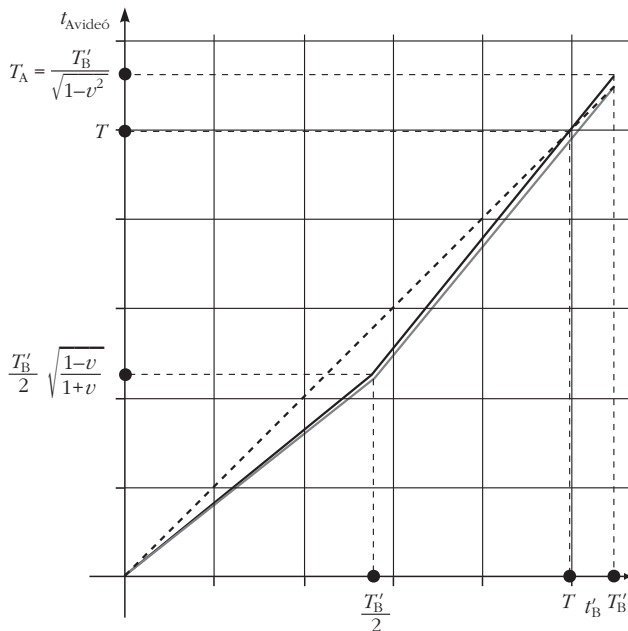
tehát valóban visszakaptuk az oda-vissza út teljes tartamára vonatkozó idődilataációs összefüggést.

A (7) és (8) képletekkel adott $t_{\text{Avidéo}}(t'_B)$ függvény az 5. ábrán látható (fekete, folytonos vonal) $v = 3^{-1/2}$ -re, azaz a történetünkben szereplő Adorján és Bálint esetére. Az 5. ábrából leolvasható a feladattal kapcsolatos összes lényegi információ.

Tanulságos felírni, hogy milyen függvény adódik $t_{\text{Avidéo}}(t'_B)$ -re a klasszikus mechanikából.

5. ábra





6. ábra

Mivel ekkor az idődilataőról – hibásan – nem veszünk tudomást, az (5)–(7) levezetés így módosul:

$$t'_B = t_B = t_{\text{Avideó}} + x_B, \quad (5, \text{klassz.})$$

ahol

$$x_B = v t_B = v t'_B, \quad (6, \text{klassz.})$$

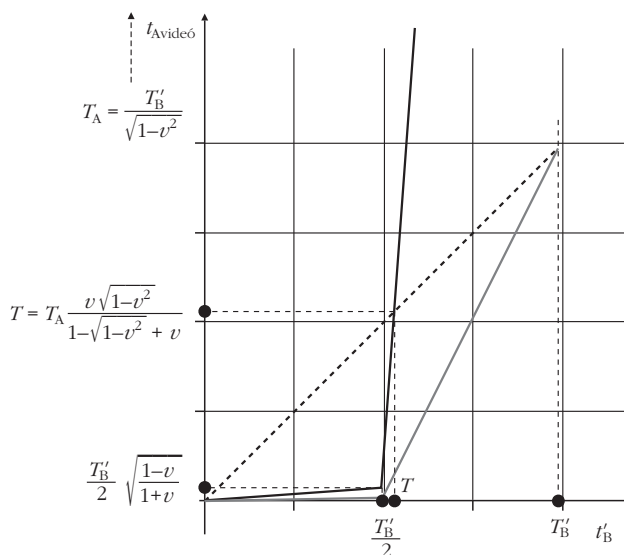
és így

$$t_{\text{Avideó}}(t'_B) = t'_B (1 - v), \text{ ha } t'_B \leq \frac{T'_B}{2}. \quad (7, \text{klassz.})$$

Ez voltaképpen a klasszikus (hangtanból ismert) Doppler-effektus képlete, a „közeghez képest” álló forrás és tőle távolodó megfigyelő esetére (valóban: klasszikusan a periodikus fény- és a hangjeltek terjedését ugyanolyan törvények írják le). Érthető tehát, hogy a visszafordulási szakaszra (azaz $t'_B > T'_B/2$ -re) az álló forrás és hozzá képest közeledő megfigyelő hangtani Doppler-formulája használandó. Ebből:

$$t_{\text{Avideó}}(t'_B) = \frac{T'_B}{2} (1 - v) + \left(t'_B - \frac{T'_B}{2} \right) (1 + v), \quad (8, \text{klassz.})$$

ha $t'_B > \frac{T'_B}{2}$.



7. ábra

A klasszikus gondolatmenet is olyan $t_{\text{Avideó}}(t'_B)$ függvényhez vezet, amely egy 45° -nál lankásabb és egy annál meredekebb egyenes szakaszból áll, és ezek a $t'_B = T'_B/2$ -nél kapcsolódnak össze. Az 5. ábra szürke vonala a (8, klassz.) függvényt mutatja. Újratalálkozásakor a klasszikus kinematika téves következtetése szerint Adorján éppen annyi idős, mint Bálint; nincs ikerparadoxon.

A 6. ábrán a $v = 0,2$ eset látható. Ennél a sebességnél a relativisztikus és a klasszikus eredmény csak kis mértékben tér el – például az idődilataőról faktor értéke $(1 - v^2)^{-1/2} \approx 1,02$ –, mint ez a 6. ábra vastag fekete és szürke függvénygörbéin látszik.

A 7. ábra a $v = 0,99$ ultrarelativisztikus esetet mutatja. Ekkor a idődilataőról faktor jelentősen eltér 1-től $(1 - v^2)^{-1/2} \approx 7$, és a különleges üzenet elküldésének időpontja: $T \approx T'_B/2$, összhangban a 3. ábrával.

Két záró megjegyzés: ezzel a cikkel az a fő célom, hogy felhívjam az olvasók figyelmét a tér-idődiagramok szemléletességére, a relativisztikus jelenségek megértésében és tanításában való pedagógiai hasznárra. Adorján és Bálint története lélektanilag (is) valószínűtlen. Érthetetlen, hogy Adorján hősiességgel egyre csak küldi az üzeneteket, de nem kíváncsi rá, mi történik közben Bálinttal és szüleivel, és nekik sem igényük, hogy otthon felejtett családtagjuknak rendszeresen hírt adjanak magukról. A hiányosságot orvosló, válaszüzenetekkel is kiegészített sztoriváltozat végiggondolását az olvasóra bízom.

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!

KÖSZÖNJÜK A TÁMOGATÁST!

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

XXVI. ÖVEGES JÓZSEF KÁRPÁT-MEDENCEI FIZIKAVERSENY

Tasi Zoltánné
Fontos Sándor Általános iskola, Üllés

„Az oktatás célja nem az, hogy befejezett tudást adjon, hanem az, hogy szilárd alapot teremtsen a továbbhaladásra.”

Öveges József

A XXVII. Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny országos döntőjéhez közeledve tekintsük át, mire is számíthatnak a résztvevők, milyen volt a tavalyi megmérettetés.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat fontos feladatának tekinti a természettudományok iránt érdeklődő, fizikából tehetséges tanulók e képességének korai felismerését és kibontakoztatásának segítségét. Ennek egyik jól bevált, több évtizedes múlttal rendelkező módja a tanulmányi versenyeken való szerepeltetés.

Ezen versenyek első lépcsője az Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny, amely a 14 éves korosztálynak ad lehetőséget az erőpróbára. A háromfordulós verseny az egész ország területét lefedi, a megyék és a főváros legjobban felkészült tanulói vesznek részt az országos döntőn (sőt a határon túl a fizikát magyarul tanulók is indulhatnak a versenyen). A 2016. évi, 26. megmérettetésre 268 általános és középiskolából 1219 versenyző nevezett. A döntőbe 70 hazai és 11 határon túli magyar diák kapott meghívást, közülük 68 hazai és 7 határon túli tudott részt venni. Két-két versenyző Románia és Szerbia területéről, három pedig Kárpátaljáról érkezett.

A verseny anyagi hátterének megteremtése érdekében pályázatot adtunk be a Nemzeti Tehetség Program keretében, amellyel 2 500 000,- Ft vissza nem térítendő támogatást nyertünk. Az NTP-TV-15-0043 azonosító számú pályázatra kapott összeget a három forduló megszervezésére, a versenyzők és rendezők ellátására az országos döntőn és díjak vásárlására fordítottuk. A pályázatot minden évben – a titkárság támogatásával – *Lévainé Kovács Róza* készíti el. Hálás köszönet a munkájáért.

Az Emberi Erőforrások Minisztériuma által kiírt pályázat biztosította forrás mellett szükség volt még támogatókra is, akik felajánlását ezúttal is köszönjük.¹

Versenyünk fővédnöke *Fazekas Sándor* vidékfejlesztési miniszter és a Magyar Innovációs Szövetség. Köszönet a támogatásukért!



Tasi Zoltánné 35 éve tanít matematikát, fizikát az üllési Fontos Sándor Általános iskolában. Tanítványai számára rengeteg érdekes projektet és különleges foglalkozást szervez a természettudományok iránti érdeklődés felkeltésére. Diákjai számos versenyen értek el sikereket. Tagja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Általános Iskolai Oktatási Szakcsoportja vezetőségének és az ELFT Csongrád megyei elnökségének. 2014-ben elnyerte az Ericsson-díjat a fizika népszerűsítéséért.

A verseny krónikája

2016. május 20–22. között került sor a XXVI. Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny országos döntőjére. A helyszín 2003 óta Győr megyei jogú város, a Kazinczy Ferenc Gimnázium 13. alkalommal adott otthont a versenynek.

A délelőtti folyamán az országból és a határon túlról 75 versenyző érkezett kísérőjével. A szükséges regisztráció, helyfoglalás és az elfogyasztott finom ebéd után 14 órakor volt a verseny ünnepélyes megnyitója. A Kazinczy Ferenc Gimnázium udvarán ünneplőbe öltözött diákok gyülekeztek tanáraikkal, kísérőikkel, hogy közösen induljanak a megnyitó színhelyére, a győri Városházára. Az országos döntőbe jutott tanulók felkészítő tanárai, akik diákjaik révén már visszatérő résztvevői a versenynek, jól ismert és mégis új helyszínen érezhették magukat. Az elmúlt egy év alatt a Városháza díszterme teljesen megújult, az üléstermet az eredeti állapotoknak megfelelően állították helyre, a falak is új ruhába öltöztek, méltó helyszíne az országos döntő megnyitójának.

A megnyitó előtt a kivétíton a verseny támogatóinak névsora, Öveges József képe és az elmúlt évi verseny fotódokumentációja követték egymást.

„Van valami, amit bárki igénybe vehet, ha megtanulja, hogyan kell használni. Ezt a valamit fizikának hívják. Ez kell ahhoz, hogy megértsük a körülöttünk lévő univerzumot.” *Lucy Hawking* szavait idézve kezdte a megnyitót *Wöller Lászlóné*. A résztvevők köszöntése után elsőként a díszelnökség tagjait mutatta be: *Kroó Norbertet*, az ELFT örökös elnökét, *Újfalussy Balázst*, az ELFT főtítkárát, *Simon Róbert Balázst* országgyűlési képviselőt, *Lévainé Kovács Rózá*t, az ELFT Általános Iskolai Oktatási Szakcsoportjának elnökét, *Kiss Gyulát*, a verseny társelnökét, *Hadházy Tibort*, a zsűri elnökét, *Barla Ferencet*, az ELFT Győr-Moson-Sopron Megyei Csoportjának elnökét, *Német Tibort*, a Kazinczy Ferenc Gimnázium igazgatóját.

¹ Tovább támogatóink: Emberi Erőforrások Támogatáskezelő, Paksi Atomerőmű Zrt., SZTE TTIK Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Klebelsberg Intézményfenntartó Központ Győri Tankerülete, Révai Miklós Gimnázium, Győr, *Mébész János*, Mozaik Kiadó, Pannon Egyetem Mérnöki Kar, *Csákány Anikó*, *Hubai Imre*, SZIE Varga Tibor Zeneművészeti Intézet, Magyar Tehetséggondozó Társaság, Duna Takarékszövetkezet Bank Zrt., Almus Pater Zrt., Győrlakk Festékgyártó Kft., Győr Plusz Média, „Emelj fel emléket” Alapítvány, Eötvös Loránd Geofizikai Alapítvány, Czuczor Gergely Gimnázium, Győr, Coop Győr Zrt., Tourinform, *Székelly István* és neje, Karcagi Ipari Park Kft., Alcufer Kft., Széchenyi István Egyetem, Femtonics Kft. és Kétfoton Képfalkotó központ.

Az ünnepélyes megnyitón Kroó Norbert és Újfalu-sy Balázs köszöntötte a versenyzőket és a megjelente- ket. A versenyt Simon Róbert Balázs országgyűlési képviselő nyitotta meg.

Közben *Vámos Áron*, a Kazinczy Ferenc Gimnázium 11. osztályos tanulójának tolmácsolásában hallgattuk meg *Petőfi Sándor: Az apostol* című művének egy részletét, a Szőlőszem-monológót. A verseny fővédnöke, Fazekas Sándor földművelésügyi miniszter levelét *Pőbeim Judit*, a helyi szervezők vezetője olvasta fel.

A 75 versenyzőnek színvonalas megmérettetést tudtunk biztosítani fizikából. A feladatsorokat a szakma jeles képviselői állították össze, lektorálták. A tanulók munkáját elismert szakemberekből álló zsűri javította, többszörös ellenőrzéssel.² A tanulók számára ismerkedési lehetőség is volt ez a szűk három nap.

A versenyen kívüli idejüket változatos programmal tudtuk megtölteni: megismerhették Győr belvárosát, a Jedlik-kiállítást, jártak a Káptalan dombon, a Bazilikában, a Széchenyi téren, megemlékeztek és koszorúztak Jedlik Ányos szobránál.

Első este a zsinagógában volt tárlatlátogatás (Vasilescu-gyűjtemény) és hangverseny, majd *Szalai Tamás* csillagász, tudományos munkatárs (SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék) előadását kísértük figyelemmel, nagy érdeklődéssel, hiszen már a címe is izgalmas volt: *A Mars és a Mars-utazás lehetősége*.

A szombati verseny a kísérletelemzéssel, a számítá-sos feladatok megoldásával és a mérőkísérlettel indult. Délutánra maradt a fizikatörténet és a teszt.

A kollégáknak tapasztalatszerzés, szakmai megújulási lehetőség, munkájukban visszajelzés ez a verseny. Míg a tanulók a versenyfeladatokat oldották, a felkészítő pedagógusokkal, kísérőkkel beszélgettünk a versenyszervezés aktuális és jövőbeni kérdéseiről, a fizikaoktatás és tehetséggondozás helyzetéről, problémáiról, eredményeiről.

A versengés után, pihentetésül a Mobilis Interaktív Kiállítási Központba látogatott a csoport, ahol a munkatársak kísérleti bemutatóval kedveskedtek, majd a versenyzők kedvük szerint kipróbálhatták a kiállított eszközöket, játszhattak, kísérletezhetek. Második este a Révai gimnáziumban *Némi atom- és kvantumfizika egyszerű eszközökkel* címmel *Orba Zoltán* csillagász, középiskolai fizikatanár előadását hallgatták meg az érdeklődők, majd *Pál Zoltán* tanár úr kísérleti

² A verseny szervezői hálás köszönetüket fejezik ki a feladatkitűzőknek: 1. forduló: *Juhász Nándor* és *Juhász Nándorné*, 2–3. forduló: *Halász Tibor*, *Kopasz Katalin*, *Horváthné Fazekas Erika*, *Pál Zoltán*, *Varga István*, a lektoroknak: *Hadházy Tibor*, *Halász Tibor*, *Kopasz Katalin*, *Kovács László*, *Horváthné Fazekas Erika*, *Juhász Nándor* és *Juhász Nándorné*, a győri főszervezőknek: *Pőbeim Judit* és *Szabó Miklós*, az online rendszer működtetőjének, *Reszegi Miklós*nak, a 2. forduló lebonyolításában közreműködőknek, a 2. forduló javítóinak: *Halász Tibor*, *Juhász Nándor*, *Juhász Nándorné*, *Pál Zoltán*, az országos döntőn, a versenybizottság elnökének, *Kopasz Katalin* tudományos munkatársnak, az országos döntőn a zsűri elnökének, *Hadházy Tibor* nyugalmazott főiskolai tanárnak és segítőjének, *Kiss Gyulának*, az ELFT alelnökének, a győri szervező kollégáknak, az országos döntő javítóinak!

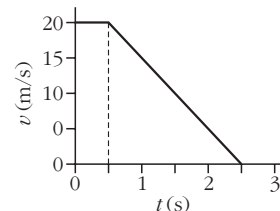
bemutatója következett. A késő estébe nyúló, sokszor a hallgatóságot is megmozgató, aktivizáló program címe: *Kísérletek Öveges és Jedlik szellemében*.

Az ünnepélyes eredményhirdetésen köszöntött mondott Kiss Gyula, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat főtítkárhelyettese. A feladatmegoldást a zsűri elnöke, *Hadházy Tibor* tanár úr értékelte.

A döntő feladatai

Számolós feladat I.

Egy autó tömege – vezetővel együtt – 1060 kg. Az autó 72 km/h sebességgel halad. Amikor a vezető észreveszi, hogy a kocsi előtt 50 m-re egy szarvas áll az úton, fékezni kezd. Az autó mozgásának sebesség-idő grafikonját az *ábra* mutatja.



a) Határozd meg:

1. a vezető reakcióidejét (az észlelés és a cselekvés kezdete között eltelt időt);

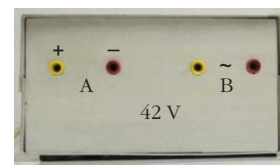
2. lassulás közben, 1 s alatt mennyivel változott az autó sebessége;

3. mekkora erőhatás lassította az autót!

b) Sikerült-e fékezéssel megakadályozni az ütközést? Ha igen, hány méter távolság marad a szarvas és a már álló autó között? Ha nem, hány méter út hiányozna még a megállásig?

Számolós feladat II.

Egy 24 V, 60 W-os izzót kell működtetni, de a szertárban csak 42 V-os tápegység van (*1. ábra*). Van még két-két, különböző tolóellenállásunk is; az egyik 20 Ω, 5 A-es, a másik 20 Ω, 2 A-es.



1. ábra.

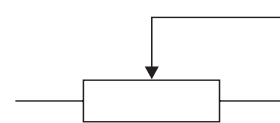
A tolóellenállás változtatható ellenállás. Szorosan felcsévél, szigeteletlen ellenálláshuzalból készítik. Esetünkben mindkét tolóellenállás 2 mm átmérőjű huzalból készült, a menetek száma mindkettőnél 175, csak a huzalok anyaga különböző.

Ahogy a *2. ábrán* is láthatod, a tolóellenállásnak 3 csatlakozási pontja van, de a mi ellenállásainkon csak az 1. és a 3. csatlakozási pontok használhatók.



2. ábra.

A sínen mozgó csúszóérintkező tökéletes fémes érintkezést biztosít. A tolóellenállás áramköri jelét a *3. ábrán* láthatod.



3. ábra.

Kérdések:

a) A tápegység melyik kivezetését használhatod? Kari-kázd be a helyes válasz sorszámát, és írd rövid indok-lást! *A választ csak indoklással együtt fogadjuk el!*

1. Csak az *A* kivezetést.
 2. Csak a *B* kivezetést.
 3. Az *A* és a *B* kivezetés is használható.
- b) Állítsd össze az izzólámpa áramkörét úgy, hogy csak az üzemi feszültség essen rajta! Készítsd el a kapcsolási rajzot! (Csak egy tolóellenállást használhatsz!) A tápegységet az áramforrás *általános* áramköri jelével jelöld!

Mérőkísérlet

Feladat:

Izzólámpák ellenállásának és teljesítményének meghatározása.

Rendelkezésre áll: 1 db mérőműszer, 2 db vezeték, 1 db fekete doboz (*A*; *B*; *C* mérési pontokkal, L_1 , L_2 , L_3 izzólámpákkal (amelyek közül kettőnek ugyanakkora az ellenállása), K_1 , K_2 nyomógombos kapcsolóval és K_f főkapcsolóval, amit bekapcsoláskor a nyíl irányába kell elforgatni).

Előzetes ismeretek és tanácsok:

- A mérőműszer méréshatára a mérőműszer maximális kitérése esetén mért érték.
- A feszültségmérőt a 6 V, az ampermérőt a 0,6 A méréshatáron használd!
- Ha a mérőműszer mutatója ellentétes irányban mozdul, akkor cseréld fel a bekötési pólusokat!
- Az ampermérő ellenállása elhanyagolhatóan kicsi, úgy viselkedik, mint egy vezető.
- A fogyasztókat csak a mérés idejére kapcsold be!

Kísérletelemző feladat

1. Zsinegre függesztve két lufi lóg egymáshoz közel. Mit láatsz, ha levegőt fújunk át közöttük?
2. Helyezd a vízszintesen tartott alkarodra a feladatlapot, fogd meg a felőled eső szélét és fújj el felette! Mit tapasztalsz?
3. Égő gyertya lángjára úgy fújunk rá, hogy az ne aludjon el. Másodszer egy tölcseren keresztül fújunk a lángra. Van-e különbség a két esetben a láng viselkedése között? Ha igen, mi az?

Kérdések a három kísérlettel kapcsolatban:

- a) Mi volt a közös mindhárom kísérletnél?
- b) Mi volt ennek a következménye mindhárom esetben?

Milyen fizikai jelenséggel magyarázhatók a tapasztaltak?

Itt egy áramlási csőben lezajló változásokat kell megfigyelni és értelmezni az előző kísérletek megállapítása segítségével.

(Előzetes megjegyzés a következő kísérlettel kapcsolatban: amennyi levegőt befújunk az áramlási csőbe, ugyanannyinak kell távoznia abból.)

- c) Mit mérnek az áramlási csőhöz kapcsolt mérőszondák (U-alakú csövek)?

A cső keresztmetszetének változásával hogyan változott a csőben áramló levegő áramlási sebessége?

- d) Mi állapítható meg a mérőszondák adatai, a levegő áramlási sebessége és az áramlási cső alakjának ismerete alapján?

A versenynap zárásaként a versenyzőknek még fizika-történeti és tesztfeladatokat kellett megoldaniuk.

Értékelés

Hadházy Tibor, a zsűri elnökének értékeléséből:

„Amikor a verseny feladatait összeállítják, mindig kérdés, hogy a feladatkitűzők jól dolgoztak-e, jók-e a feladatsorok, azok a kompetenciákat mérik-e? Összeségében 64%-os az eredmény, de ennél árnyaltabb a kép az egyes részekenél.

A *feladatmegoldás* nagyon jól sikerült, az első számításos feladatnál több mint 50% a hibátlan megoldás. A második számításos feladat munkásabb volt, szépen sikerült. A legnagyobb nehézséget – amit mi a legkisebbnek gondoltunk – a 42 V váltófeszültséggel való számítás jelentette.

A *teszt* nagyon izgalmas volt, itt 76% a megoldási szint. A *fizikatörténetről* azt hittük, könnyű lesz, de nagyon gyengén teljesítettek, 38% az eredmény. Valószínűleg elolvastatok a hozzá tartozó anyagot, de nem jegyzeteltetek. A *kísérletelemzés* 77%-os megoldása jó. A *kísérleti mérőfeladat* 34 tanulónál volt sikeres.

Általánosan elmondható, hogy a dolgozatok olvashatósága, külalakja javult, dicséret érte, de a helyesírás továbbra is gondot okoz, akár csak a 2-vel való osztás, és a 10-zel való szorzás.”

Eredmények, díjazottak

Abszolút I. helyezett

Pácsonyi Péter, a Zalaegerszegi Zrínyi Miklós Gimnázium diákja, felkészítő tanára: *Pálovics Róbert*.

Általános iskola

I. díjas:

Kiovics Dániel, Budafoki Herman Ottó Általános Iskola, Budapest, felkészítő tanára: *Forgóné Ollári Zsuzsanna*.

II. díjasok:

Tóth Balázs, Kastélydombi Általános Iskola Budapest, felkészítő tanára: *Petrányiné Petrik Mária*,

Tusnady Simon, Bornemissza Péter Gimnázium, Ált. Isk. és AMI, Budapest, felkészítő tanára: *Szocsák Ildikó*.

Gimnázium

I. díjas:

Borsi Szilárd, Szigetszentmiklósi Batthyhány Kázmér Gimnázium, felkészítő tanára: *Bülgözdi László*.

II. díjasok:

Jánosik Áron, Révai Miklós Gimnázium és Kollégium, Győr, felkészítő tanára: *Jubász Zoltán*,

Kozák Áron, Békásmegyeri Veres Péter Gimnázium, Budapest, felkészítő tanárai: *Erdősi Katalin* és *Rakovszky Andorás*,

Kozák András, ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium és Kollégium, Budapest, felkészítő tanára: *Basa István*,

Beke Csongor, Békásmegyeri Veres Péter Gimnázium, Budapest, felkészítő tanárai: *Erdősi Katalin* és *Rakovszky Andorás*,

Garamvölgyi István, Kecskeméti Katona József Gimnázium, felkészítő tanára: *Sáróné Jéga-Szabó Irén*,

Martinák Zalán, Fazekas Mihály Általános Iskola és Gimnázium, Budapest, felkészítő tanára: *Horváth Gábor*.

III. díjasok:

Nagy Nándor, Budapesti Fazekas Mihály Általános Iskola és Gimnázium, Budapest, felkészítő tanára: *Horváth Gábor*,

Földesi András János, Baár-Madas Református Gimnázium és Általános Iskola, Budapest, felkészítő tanára: *Horváth Norbert*,

Fajsi Bulcsú, Fazekas Mihály Általános Iskola és Gimnázium, Budapest, felkészítő tanára: *Horváth Gábor*,

Vida Tamás, Kazinczy Ferenc Gimnázium és Kollégium, Győr, felkészítő tanárai: *Poóczy József* és *Takács Éva*,

Markó Gábor, Révai Miklós Gimnázium és Kollégium, Győr, felkészítő tanára: *Juhász Zoltán*,

Rusvai Miklós, Lehel Vezér Gimnázium, Jászberény, felkészítő tanára: *Magyar Géza*,

Tordai Tegze, Bethlen Gábor Református Gimnázium, Hódmezővásárhely, felkészítő tanára: *Nagy Tibor*,

Fialovszky Márk, Baár-Madas Református Gimnázium és Általános Iskola, Budapest, felkészítő tanára: *Horváth Norbert*,

Csimma Viktor, Kazinczy Ferenc Gimnázium és Kollégium, Győr, felkészítő tanára: *Takács Éva*,

Marozsák Tádé, Óbudai Árpád Gimnázium, Budapest, felkészítő tanára: *Gärtner István*,

Gulácsi Máté, Fazekas Mihály Általános Iskola és Gimnázium, Budapest, felkészítő tanára: *Horváth Gábor*,

Veres Kristóf, Zalaegerszegi Zrínyi Miklós Gimnázium, felkészítő tanára: *Pálovics Róbert*.

Különdíjasok

Az I. számításos feladat legjobb megoldásáért:

Gyóni Ákos, Áldás utcai Általános Iskola, Budapest, felkészítő tanára: *Rudolf Tamásné*.

A II. számításos feladat legjobb megoldásáért:

Nagy Soma Bence, Soproni Széchenyi István Gimnázium, felkészítő tanára: *Lang Ágota*.

A mérőkísérlet legjobb megoldásáért:

Nagy Domonkos, Keszthelyi Vajda János Gimnázium, felkészítő tanára: *Farkas László*.

A fizikátörténeti feladat legjobb megoldásáért:

Koloszár István, Soproni Széchenyi István Gimnázium, felkészítő tanára: *Lang Ágota*,

Pontyos Kata Sára, Keszthelyi Vajda János Gimnázium, felkészítő tanára: *Farkas László*.

A kísérletelemzés és a teszt legjobb megoldásáért:

Benedek Eszter, Óbudai Árpád Gimnázium Budapest, felkészítő tanára: *Gärtner István*,

Vaszary Tamás, Kazinczy Ferenc Gimnázium és Kollégium, Győr, felkészítő tanára: *Takács Éva*.

A támogatók további különdíjakat ajánlottak fel például a legeredményesebb leány versenyzőnek, a legkisebb településről érkezett tanulónak, a határon túliak közül a legeredményesebb versenyzőnek és felkészítőjének, ...

Tanári emlékdíjak

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat az általános iskolai oktatási szakcsoport kezdeményezésére két emlékdíjat alapított.

Csákány Antalné-díjban részesülhet az a fizikatanár, aki 5 év távlatában a legeredményesebb felkészítő tanárnak bizonyul. Az alapján állítunk rangsort, hogy az elmúlt 5 év alatt hányszor ért el a felkészítő tanár tanítványa 1–3. díjas helyezést. Azonos érték esetén a kisebb településről érkezett kolléga élvez előnyt. A díjat 5 évente egyszer kaphatja meg ugyanaz a kolléga.

Rónaszéki László-díjban részesülhet az a fizikatanár, aki a legtöbb versenyzőt indítja az Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny első fordulójában és a legjobb arányban jutnak be közülük a döntőbe. Az értékelésnél kigyűjtjük az 1. fordulóban legtöbb versenyzőt indító tíz kolléga nevét és megnézzük, versenyzői milyen arányban jutottak a döntőbe.

2016. évben Csákány Antalné-emlékdíjban részesült: *Horváth Norbert* kolléga, a budapesti Baár-Madas Református Gimnázium és Általános Iskola tanára.

2016-ban Rónaszéki László-emlékdíjban részesült: *Horváth Gábor* kolléga, a budapesti Fazekas Mihály Általános Iskola és Gimnázium tanára.

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 Újfalussy Balázs főtltkár, felelős szerkesztő Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

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

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

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

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

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

NAPSUGÁRZÁS ÉS A FÖLD – A FIZIKATANÍTÁS A FELMÉRÉSEK TÜKRÉBEN

60. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató – 2017. március 15–18.

A 60. jubileumi ankétot ebben az évben Gödöllőn, a Szent István Egyetemen, valamint a Premontrei Szent Norbert Gimnázium, Egyházzenei Szakgimnázium és Diákotthonban tartottuk. A résztvevők száma 166 fő volt. Örömmel tapasztaljuk, hogy egyre több kolléga tartja hasznosnak ezt a nagyszerű továbbképzési lehetőséget.

A helyszín kiváló volt. Minden egy helyen, pár perces sétával elérhető. Az előadások az egyetem főépületének előadótermében, az eszközkiállítás és a műhelyfoglalkozások a gimnáziumban, az étkezés az egyetem éttermében svédasztalos megoldásban, a résztvevők nagy részének szállása a Gödöllői Egyetem kollégiumában vagy a Premontrei Gimnázium kollégiumában volt. A résztvevők másik része az Erzsébet Királyné Szállodában lakott.

Az ankét előkészítésében segítségünkre volt a helyszínt adó intézmények részéről *Seres István* és *Gémesi Zoltán*. Az ankét négy napján *Víg Piroskához*, Seres Istvánhoz, és *Jánossy Zsolt*hoz fordulhattunk kéréseinkkel-problémáinkkal, folyamatos jelenlétükkel biztosították a rendezvény zavartalan lebonyolítását. Köszönjük áldozatos munkájukat.

Első nap, 2017. március 15. szerda

A regisztráció során a hivatalos adminisztráción kívül örömmel üdvözlöttük régi ismerőseinket és az „új anketosokat”. A finom ebéd után 2 órakor kezdődött a megnyitó ünnepség, melyet *Ujvári Sándor*, az ELFT Középiskolai Oktatási Szakcsoportjának elnöke vezetett.

Szilágyiné Polgár Évának Lévainé Kovács Róza, az Általános Iskolai Oktatási Szakcsoport elnöke, Seres Istvánnak Patkós András, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöke gratulál a Mikola-díjhoz.



Gémesi György, a házigazda Gödöllő polgármestere

Gémesi György, Gödöllő polgármestere; *Szabó István* rektorhelyettes, a Gépészmérnöki Kar igazgatója; *Kátai László*, a Gépészmérnöki Kar dékánja; *Takácsné Elek Borbála*, a Premontrei Szent Norbert Gimnázium, Egyházzenei Szakgimnázium és Kollégium igazgatója; *Sipos Imre* miniszteri biztos köszöntötte az ankét résztvevőit, majd *Patkós András*, az ELFT elnöke hivatalosan is megnyitotta az ankétot.

A megnyitó ünnepség része volt a díjak átadása. A Társulat elnöksége a Mikola Sándor-díjat az általános iskolai kategóriában *Szilágyiné Polgár Évának* (Csorna), a középiskolai kategóriában Seres Istvánnak (Gödöllő) ítélte oda.



A *Marx György* által 1990-ben újtárá indított Vándorplakettet ebben az évben *Kirsch Évának* (Debrecen) adta tovább az előző évi díjazott, *Csiszár Imre*. Kirsch Éva távolléte miatt a Vándorplakett tényleges átadására későbbi időpontban kerül sor.

Patkós András *Naphimnusz Gödöllőn* című nyitó-előadásával megkezdődött a szakmai programok sorozata. *Farkas István*: Napenergia-hasznosítás – hazai és nemzetközi helyzetkép • *Darabont Tibor*: Teller Ede titkára voltam • *Heltai György*: A fizika és a kémia kapcsolata című előadását hallgathattuk meg.

Az előadások után az eszközkiallítókat mutatkoztak be röviden: *Beszeda Imre* (Nyíregyháza), *Finta Zsannett* (Szombathely), *Jendrék Miklós* (Vác), *Kalló Bernát* (Budapest), *Márki-Zay János* (Hódmezővásárhely), *Molnár Milán* (Győr), *Nyerges Gyula* (Budapest), *Pál Zoltán* (Gödre), *Piláth Károly* (Budapest), *Sebestyén Zoltán* (Pécs), *Stonawski Tamás* (Nyíregyháza), *Tarján Péter* (Nyíregyháza), *Zátonyi Sándor* (Békéscsaba), 3B Scientific Europe Kft. (Budapest).

Ezután megtekintettük az eszközkiallítást a Premontrai Szent Norbert Gimnázium, Egyházzenei Szakgimnáziumban. A szakmai programokat fogadás követte finom svédasztalos vacsorával.

2. nap, március 16., csütörtök

A nap *Mester András* elnökletével előadásokkal kezdődött. Délelőtt *Radnóti Katalin*: A hiányzó korszak, a római és az iszlám aranykor fizikusai • *Krasznaborkay Attila*: A sötét anyag nyomában • *Csernovszky Zoltán*: Organikus napelemek, a fizikatanítás sokoldalú eszközei • *Horváth Gábor*: A Nap szerepe a légköroptikában, valamint az állatok és az ember tájékozódásában című előadásával mélyítettük ismereteinket. Délután műhelyfoglalkozásokkal bővítettük módszertani eszköztárunkat. Számítalan ötlettel, kísérlettel gazdagodtunk. A korábbi évekhez képest lényegesen többen jelentkeztek műhelyek tartására, nehéz volt választani az érdekesebbnél érdekesebb foglalkozások között.

Csütörtökön a következő műhelyeken vehettünk részt: *Adorjáné Farkas Magdolna, Hasznosi Tamásné, Nagy Dóra*, Radnóti Katalin: A gondolkodásfejlesztés lehetőségei a fizikaórán • *Beszeda Imre*: Hőerőgép készítése • *Tarján Péter*: Kísérletek olcsó elektronikkával • *Horváthné Szőke Gyöngyi*: A Bálint – nap a laborban • *Hömöstre Mibály*: Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye – A fizikasakkörtől a nemzetközi szintéig • *Jánossy Zsolt*: Talán még nem késő – Újdonságok a fizikaérettségén – 2017 • *Jendrék Miklós*: Muzsikáló fizika • *Lévainé Kovács Róza, Tasi Zoltánné, Varga István*: Fizikatanítás az általános iskolában • *Molnár Milán*: Komplex felfedező játék okostelefonos mérésekkel • *Nagy-Czirok Lászlóné*: Az iskola tetőjén levő napelemek működésében rejlő lehetőségek • *Seres István, Víg Piroska*: Mindennapi eszközök nem szokványos használata a fizikaórán • *Sinkó Andrea*: Ig-NOBEL-Díjak ÁTADÁSA a Kanizsai Dorottya Gimnázium laborjában • *Szabó László Attila*: Ne habozz!

Kísérletezz! • *Szigetlaki Zsolt*: Webkamera használata a fizika oktatásában • *Szittyai István*: Okostelefonok a fizikaórán • *Szombati Edit*: Játékelmélet és a fizika kapcsolata • *Tasi Zoltánné*: Let's get together and play physics • *Zátonyi Sándor*: Színes kísérletek egyszerűen • *Zsoldos Tamásné*: A Nap titkai.

Este a Gödöllői Királyi Kastélyban kulturális élményben volt részünk. Először a gödöllői Frederic Chopin Zenei Alapfokú Művészeti Iskola tanárai és diákjai játékában gyönyörködhattunk. Köszönjük *Buka Enikő* igazgatónő, a felkészítő tanárok és a diákok áldozatos munkáját. A koncert szervezői meglepetést is tartogattak számunkra: *Mészáros Adrienn* operaénekes és *Káldi Kiss András*, az Operaház magánénekes előadásában hallhattunk opera- és operettáriákat *Kassai Róbert* zongoraművész zongorakíséretével. A programot *Nikolényi István* PhD hallgató, fizikatanár éneke zárta.

3. nap, március 16., péntek

Lévainé Kovács Róza üléelnök rövid tájékoztatója után előadások következtek: *Lévai Péter*: Kutatótanárok és kutatóintézetek együttműködési formái • *Sós Katalin*: Tudomány a természetben és a művészetben. Ötletek a szerethető fizikához • *Csapó Benő*: A fizikaoktatás feladatai a nemzetközi felmérések tükrében • *Nagyné Szokol Ágnes*: KöMaL – szellemi kalandpark.

Délután ismét műhelyfoglalkozásokon vehettünk részt: *Cserbáti András*: Infografikák készítésének módszertana • *Gémesi Zoltán*: Videokonferencia és virtuális látogatás a CERN-ben • *Jánossy Zsolt*: Világos?! – Egy természettudományos digitális projekt • *Komáromi Annamária*: Masat-1 és Skylab • *Márki-Zay János*: Szemléltetéssel a túlterhelés ellen • *Nagy Anett*: Házias kísérletek • *Ördögné Legény Sarolta*: Természettudományos Tehetség Gondozás • *Radnai Tamás, Jenei Péter*: Oktatási kísérlet mozgásszimulációs programok középiskolai felhasználásra • *Sebestyén Zoltán*: Lépésfeszültség modell • *Theisz György*: A Társulat felmérése az iskolai tananyagról.

Härtlein Károly és Sükösd Csaba





Pál Zoltán az eszközkkiállítás, Szabó László Attila a műhelyek, Zátonyi Sándor pedig mindkét kategória első helyezettje

Ezt követően fakultatív programként látogatást tettünk a kastélyban, illetve a NAIK Mezőgazdasági Biotechnológiai Kutatóintézetében.

A vacsorát a mindig népszerű 10 perces kísérletek követték, ami már szinte az éjszakába nyúlt.

4. nap, március 17., szombat

Az utolsó nap *Farkas László* elnökletével előadásokkal indult: *Sükösd Csaba*: A neutrínó-sztori • *Härtlein Károly*: A széndioxidról fizikatanár szemmel (Elsőbb-ség a kísérleteknek!) • *Sükösd Csaba*: Megemlékezés Marx Györgyről születésének 90. évfordulója alkalmából című előadása volt az ankét záró előadása.

Az ankét alatt beszélgettünk többek között az érettségiről, a tananyagról, az adminisztrációról is. A középiskolában tanító kollégák közül sokan nehezményezték az érettségi vizsga leírásának ezen rendelkezését:

„A közép- és emelt szinten szóbeli vizsgákat szervező intézmények legalább 60 nappal a tanév rendjéről szóló miniszteri rendeletben elrendelt közép-, illetve emelt szintű szóbeli vizsgák kezdőnapját megelőzően honlapjukon közzéteszik a kísérleti elrende-

Seres István és Víg Piroska a 10 perces kísérletek első helyezettje



zésekben, illetve a mérési feladatokban használt eszközök részletes listáját és fényképeit.” Ezzel kapcsolatban levelet fogalmaztunk az Oktatási Hivatalnak, amelyben kértük, hogy csökkentsék a fizika középszintű szóbeli érettségivel kapcsolatos adminisztratív feladatokat. A levelet a kollégák nagy többsége aláírta, majd eljuttattuk a hivatalhoz. Az áprilisban kapott válasz sajnos elutasító volt.

Ezen rendkívüli kitérő után az Eszközkkiállítás, a Műhelyfoglalkozások és a 10 perces kísérletek díjainak átadása következett.

A műhelyek díjazottjai

1. díj: Szabó László Attila (Csongrád) és Zátonyi Sándor (Békéscsaba),
 2. díj: *Borbély Venczel* (Szentendre) és Zsoldos Tamásné (Nagykanizsa),
 3. díj: Ördögné Legény Sarolta (Jászberény) és Szittyai István (Kecskemét),
- Különdíjat és vele Marx-émlékérmet kapott Nagy Anett (Szeged).

Az eszközkkiállítás díjazottjai

1. díj: Pál Zoltán (Gödre) és Zátonyi Sándor (Békéscsaba),
2. díj: Beszeda Imre (Nyíregyháza) és Molnár Milán (Győr),
3. díj: Márki-Zay János (Hódmezővásárhely), Piláth Károly (Budapest) és Sebestyén Zoltán (Pécs).

A tízperces kísérletek helyezettjei

1. Seres István, Víg Piroska (Gödöllő),
2. Molnár Milán (Győr),
3. Sebestyén Zoltán (Pécs).

A díjak kiosztása után Ujvári Sándor elnök megköszönte házigazdáink, előadóink munkáját.

Sükösd Csaba bejelentette, hogy jövő márciusban Szeged fogja vendégül látni a fizikatanárokat, majd hivatalosan bezárta az ankétot.

Moróné Tapody Éva

A FIZIKA MINDENKIÉ 3.0



Szombathely



Budapest, BME



Budakeszi



Debrecen



Budapest, Leővey Klára Gimnázium



Tápiószentmárton



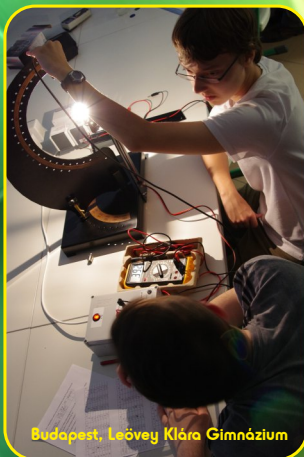
Szombathely



Nagykanizsa



Zalaegerszeg



Budapest, Leővey Klára Gimnázium



Budakeszi



Csongrád



Budapest, BME

2017.
ÁPRILIS
21-22.



ISSN 0015325-7

9 770015 325009 1700 5