

fizikai szemle



2015/12

bozonok (kölcsönhatások)

2,4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1,27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171,2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 γ foton
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e elektron-neutrínó	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ műon-neutrínó	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau-neutrínó	91,2 GeV 0 1 Z⁰ Z-bozon
0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ műon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80,4 GeV ± 1 1 W[±] W-bozon

kvarkok

leptonok



Jelmagyarzat: a részecske tulajdonságait leíró téglalapban középén a részecske jele, fölötté nyugalmi tömege, balra elektromos töltése, alatta spinje, alul pedig teljes neve.

Idén ünnepeljük *Albert Einstein* mesterműve, az általános relativitáselmélet századik születésnapját. Megszületése óta sokan gondolták úgy (köztük például *L. D. Landau* és *E. M. Lifšic*), hogy talán ez a „létező legszebb” fizikai elmélet. A *Szemle* szerkesztője bölcsen döntött, amikor az elmélet keletkezéstörténetének összefoglalását a legilletékesebbre, magára Einsteinre hagyta. Einsteinnek ez az 1933-ban keletkezett rövid írása hatvan évvel ezelőtt, Einstein halála évében a *Szemlében* egyszer már megjelent – most *Illy József* új, értő fordításában olvashatjuk ismét –, de az általános relativitáselmélet genezisének mindmáig legtömörebb, legautentikusabb összefoglalása.

„A már megszerzett tudás fényénél a szerencsésen elért eredmény szinte magától értetődőnek látszik, és bármelyik intelligens egyetemi hallgató nagyobb nehézség nélkül fölfogja.” – áll az utolsó bekezdésben, ám ezen a naivitásnak csak mosolyogni lehet. Olvasunk csak el *Radnai Gyula* érdekesítő elbeszélését Einstein Nobel-díjának vizontagságairól, amely az évfordulós megemlékezés második darabja: „A Bizottság felkérésére ... Allvar Gullstrand állított össze értékelő jelentést a relativitáselmületről... A speciális relativitáselmélet jósolta effektusokat mérhetetlenül kicsiknek, hibahatáron belülieknek tartotta, az általános relativitáselmélet bizonyítékául felhozott perihélium-mozgást pedig nem egészen értette meg.” Pedig a Merkúr perihéliumának eltolódási sebessége, amelyet Einstein 1915 novemberében kiszámított, megegyezett a már ötven éve jól ismert, de mindaddig minden magyarázatnak ellenszegülő megfigyelési eredménnyel.

A gravitáció geometriai elméletének felfedezése káprázatos teljesítmény volt, de alig néhány évvel később Einstein fantáziáját már a továbblépés foglalkoztatta: a gravitáció és az elektromágnesség egységes geometriai leírását kereste. Sokan felróják neki, hogy tevékenységének ebben a periódusában sokkal inkább támaszkodott a matematikai lehetőségekre, mint fizikai intuíciójára, és ez is hozzájárulhatott ahhoz, hogy ez a törekvése teljes fiaskóval végződött. Az egységes tételmeletről közölt cikkei alapján ez a vélemény ugyan megalapozottnak tűnik, de *Illy József* írásából kiderül, hogy ugyanakkor létezett egy „másik Einstein” is, aki nem az íróasztal mellett, hanem a laboratóriumban, a girokompassz kifejlesztésével és gyártásával foglalkozó üzemből, vagy éppenséggel egy észak–déli irányban haladó vonaton végezhető megfigyelés segítségével kutatott kifejezetten empirikus kapcsolódási pontok után a gravitáció és az elektromágnesség között. A Föld és a Nap mágneses terének eredete akkoriban még teljesen megmagyarázatlan volt. Einstein azt remélte (egyébként nem egyedülként), hogy a tömeg nemcsak görbíti a téridőt, hanem ha forog, mágneses mezőt is létrehoz maga körül. Az ilyen irányú próbálkozásai azonban rendre kudarcot vallottak. „Semmi baj, ha ezt a reményt [is] el kell temetni; népes és jó társaságban lesz” – jegyezte meg az öniróniában sohasem szűkölködő nagy tudós. *Illy* ma egyike azoknak, akik a legjobban ismerik Einstein ilyen természetű munkásságát, amelyről Einstein maga szinte semmit sem tett közzé. 2012-ben *The Practical Einstein (Experiments, Patents, Inventions)* címmel könyvet is jelentetett meg róla.

Horaskó Péter

EGY S MÁS AZ ÁLTALÁNOS RELATIVITÁSELMÉLET KIALAKULÁSÁRÓL

Albert Einstein

Szívesen teszek eleget annak a felkérésnek, hogy mondjak valamit tudományos munkásságomról. Nem, mintha erőfeszítéseimet érdemtelenül nagyra tartanám. Mások munkásságáról írni azonban feltételezi, hogy előzetesen el kell mélyednünk az idegen gondolkodásmódban, és ezt sokkal könnyebben tehetik meg azok, akik jártasak a történelmi munkában, míg saját korábbi gondolataink megmagyarázása összehasonlíthatatlanul könnyebbnek tűnik. Itt sokkal kellemesebb helyzetben vagyunk, mint bárki más: ezt a lehetőséget nem szabad szerénységből elszalasztani.

Ezt az előadást Einstein a Glasgovi Egyetemen 1933. június 20-án tartotta, angol nyelven. Az eredeti német szöveg 1934-ben jelent meg a *Mein Weltbild* című cikkgyűjteményben. A jelen fordítás erről készült. A cikkgyűjteményt magyarul először 1934-ben, majd 1959-ben adták ki *Hogyan látom a világot?* címmel.

Az előadás korábbi fordítása, *Hogyan született meg az általános relativitáselmélet?* címen megjelent, *Fizikai Szemle* 5 (1955) 101.

Mihelyt 1905-ben a speciális relativitáselmélet révén sikerült elérni, hogy minden úgynevezett inerciarendszer egyenrangú legyen a természettörvények leírásában, szinte elkerülhetetlenül merült föl a kérdés, nincs-e még ezen túlmenő egyenrangúság is a koordinátarendszerek között. Másképp fogalmazva, ha a sebesség fogalmának csupán relatív értelmet tulajdoníthatunk, miért kellene ragaszkodnunk hozzá, hogy a gyorsulás abszolút maradjon.

Tisztán kinematikai szempontból nem volt kétséges, hogy bármely tetszőleges mozgás relatív, fizikai szempontból azonban úgy tűnt, hogy az inerciarendszernek kitüntetett szerepet kell tulajdonítanunk, és emiatt a másképp mozgó koordinátarendszerek erőltetetteknek mutatkoztak.

Természetesen ismertem *Mach* azon véleményét, amely szerint elképzelhető, hogy a tehetetlenségi ellenállás nem a gyorsítással szembeni ellenállás, hanem a

világegyetemben lévő többi test tömegével szembeni. Ez a gondolat valahogyan izgalmasnak tűnt, de nem volt elegendő, hogy új elméletet építsék rá.

Akkor kerültem egy lépéssel közelebb a probléma megoldásához, amikor azt vizsgáltam, hogyan lehetne a gravitációs törvényt a speciális relativitáselmélettel tárgyalni. Amint a legtöbb akkori kutató, én is megpróbáltam, hogy mezőegyenletet állítsak föl a gravitációnak, mert már lehetetlen, de legalábbis valamiféle természetes módon lehetetlen volt, hogy azonnali távolhatást vezessek be, mivel az abszolút egyidejűség fogalma értelmét veszítette.

A legegyszerűbb természetesen az volt, hogy a gravitáció Laplace-féle skaláris potenciálját megtartsam, és a Poisson-egyenletet egy idő szerinti deriválttal alkalmas módon úgy egészítsem ki, hogy eleget tegyen a speciális relativitáselméletnek. De a gravitációs mezőben mozgó tömegpont mozgásegyenletét is hozzá kellett illeszteni a speciális relativitáselmülethez. Az ide vezető út nem volt valami egyértelműen kitűzve, mivel a test tehetetlen tömege függhetett a gravitációs potenciáltól. Ez már az energia tehetetlenségi tétele miatt is várható volt.

Az ilyesféle vizsgálatok eredménye csak az lett, hogy nagyon elbizonytalanodtam. A klasszikus mechanika szerint ugyanis a test függőleges gyorsulása függőleges gravitációs mezőben nem függ a gyorsulás vízszintes komponensétől. Ezzel kapcsolatos, hogy a mechanikai rendszernek, illetve súlypontjának függőleges gyorsulása ilyen gravitációs mezőben függetlennek adódik belső mozgási energiájától. Az általam vizsgált elmélet szerint azonban az esési gyorsulás nem volt független a rendszer vízszintes sebességétől, illetve belső energiájától.

Ez nem hangzott egybe azzal a régi tapasztalattal, hogy a testek mind ugyanazon gyorsulással esnek egy bizonyos gravitációs mezőben. Ez a tétel, amelyet úgy is megfogalmazhatunk, hogy ez a tehetetlen és a súlyos tömeg egyenértékűségének tétele, így teljes világosságában tárult elém. Nagyon csodálkoztam, hogyan állhat fenn, és sejtettem, hogy benne rejlik a tehetetlenség és a gravitáció mélyebb megértésének kulcsa. Szigorú érvényességében annak ellenére sem kételkedtem, hogy *Eötös* szép kísérleti eredményéről nem tudtam – ha jól emlékszem, csak később szereztem róla tudomást. Felhagytam hát azzal a próbálkozással, hogy a gravitációt a fentebb említett módon a speciális relativitáselmélet keretében tárgyaljam, mert alkalmatlannak bizonyult. Nyilvánvalóvá vált, hogy éppen a gravitáció legalapvetőbb tulajdonságáról nem tud számot adni. A tehetetlen és a súlyos tömeg egyenlőségét nagyon szemléletesen a következőképpen fogalmazhatjuk meg: homogén gravitációs mezőben minden mozgás úgy megy végbe, mint olyan egyenletesen gyorsuló koordináta-rendszerben, amelyben nincs gravitációs mező. Ha e tétel bármilyen folyamatra igaz („ekvivalencia-elv”), akkor ez arra utal, hogy a relativitási elvet egymáshoz képest egyenlőtlenül mozgó koordináta-rendszerekre is ki kell terjeszteni, ha nem akarunk erőltetett gravitációelmülethez jutni. Ilyesféle gondolatok

foglalkoztattak 1908 és 1911 közt, és megkíséreltem, hogy speciális következtetéseket vonjak le, de ezekről most nem akarok szólni. Az a felismerés volt egyelőre fontos, hogy észszerű gravitációelmületet csak akkor kaphatunk, ha kiterjesztjük a relativitási elv érvényét.

Arról van tehát szó, hogy olyan elmületet állítsunk föl, amelynek egyenletei nemlineáris koordináta-transzformációval szemben is megtartják alakjukat. Hogy ennek teljesen tetszőleges (folytonos) transzformációkra is fenn kell-e állnia, vagy csak bizonyosakra, ezt egyelőre még nem tudtam.

Csakhamar beláttam, hogy az ekvivalencia-elv szerint fölfogott nemlineáris transzformációkkal a koordináták elvesztik egyszerű fizikai jelentésüket, azaz nem követelhetjük meg ezután, hogy a koordinátákülönbség ideális mérőruddal, illetve órával végzett mérés közvetlen eredménye legyen. Ez a fölismerés nagy gondot okozott, mivel sokáig nem tudtam átlátni, hogy akkor egyáltalán mit is jelentenek a koordináták a fizikában. Ettől a dilemmától úgy 1912 körül szabadultam meg, a következő megfontolással.

Kell hogy legyen a tehetetlenség törvényének olyan megfogalmazása, amely egy igazi, „inerciarendszerben vett gravitációs mező” nélküli koordináta-rendszerben a tehetetlenség Galilei-féle megfogalmazásába megy át. Ez utóbbi kimondja: az olyan anyagi pontot, amelyre nem hat erő, a négydimenziós térben egyenes vonal, azaz legrövidebb vonal vagy pontosabban extrémális írja le. Ez a fogalom feltételezi az ívelem hosszának fogalmát, azaz a metrikát. A speciális relativitáselmületben a metrika – miként *Minkowski* megmutatta – kvázieuklideszi¹ volt, azaz az ívelem ds „hosszának” négyzete a koordinátadifferenciálok bizonyos kvadratikusság függvénye volt.

Ha nemlineáris transzformációval más koordinátákat vezetünk be, a ds^2 ugyan a koordinátadifferenciálok homogén függvénye marad, de a $g_{\mu\nu}$ függvények együttthatói már nem maradnak állandók, hanem a koordináták bizonyos függvényei lesznek. Matematikailag ezt úgy fejezzük ki, hogy a fizikai (négydimenziós) térnek Riemann-metrikája lesz. E metrika időszzerű extrémálisai határozzák meg azon anyagi pont mozgásegyenletét, amelyre a gravitációs erőn kívül más erő nem hat. E $g_{\mu\nu}$ metrika együttthatói egyszersmind megadják a gravitációs mezőt a kiválasztott koordináta-rendszerre vonatkozóan. Ezzel sikerült megtalálni az ekvivalencia-elv természetes megfogalmazását, és teljesen magától adódó föltevés volt, hogy ezt tetszőleges gravitációs mezőre kiterjesszük.

A fenti dilemma megoldása tehát a következő: nem a koordinátadifferenciáloknak kell fizikai jelentést tulajdonítani, hanem csak a hozzájuk rendelt Riemann-metrikának. Ezzel leraktuk az általános relativitáselmület alapját. Két problémát azonban még meg kellett oldanunk.

1. Ha egy mezőtörvény a speciális relativitáselmület szerinti kifejezését ismerjük, miként kell ezt átvinni a Riemann-metrika esetére?

¹ Manapság ezt a metrikát pszeudoeuklideszinek hívjuk, a fordító.

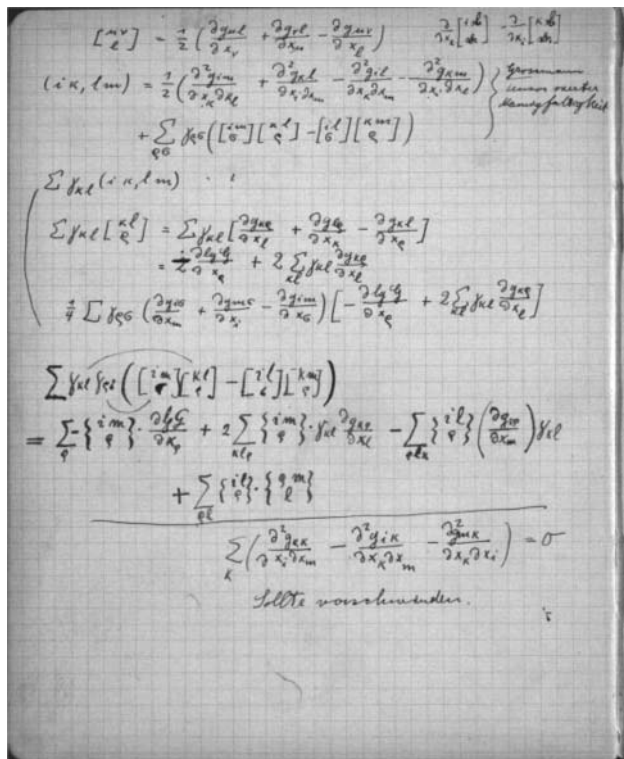
2. Melyek azok a differenciálegyenletek, amelyek magát a Riemann-metrikát – azaz a $g_{\mu\nu}$ -ket – határozzák meg?

Ezeket a kérdéseken dolgoztam 1912-től 1914-ig barátommal, *Marcel Grossmann*-nal. Úgy találtuk, hogy az

1. kérdés megoldásának matematikai eszköze már készen állt *Ricci* és *Levi Civita* infinitezimális differenciálkalkulusában.

Ami a 2. kérdést illeti, megválaszolásához nyilvánvalóan a $g_{\mu\nu}$ -kből képzett másodfokú invariáns differenciálkifejezésekre van szükség. Hamarosan rájöttünk, hogy ezeket *Riemann* már fölállította (görbületi tenzor). Az általános relativitáselmélet közzététele előtt két évvel már megtaláltuk a helyes gravitációs mezőegyenleteket, de nem tudtuk eldönteni, hogy fizikailag felhasználhatók-e. Sőt, meg voltam győződve róla, hogy nem képesek számot adni a tapasztalatról. Általános megfontolás alapján még azt is hittem, hogy az általános koordináta-transzformációval szemben invariáns gravitációs törvényt nem lehet összeegyeztetni az okság elvével. Mindez téves elgondolás volt, és két évi nagyon kemény munkámba telt, mire 1915 végére erre rájöttem, és megtaláltam a kapcsolatot a csillagászati tapasztalat tényeivel, miután töredelmesen visszatértem a Riemann-féle görbülethez.

A már megszerzett tudás fényénél a szerencsésen elért eredmény szinte magától értetődőnek látszik, és bármelyik intelligens egyetemi hallgató nagyobb nehézség nélkül fölfogja. De csak az tudhatja, mit jelent



Einstein „Zürichi jegyzetfüzeté”-ből (© Héber Egyetem, Jeruzsálem).

évekig sötétben, sejtések közepette kutatni, feszült várakozással, a bizakodás és a csalódás váltakozásával, és végül az igazság feltárulásával, aki maga is átélte.

(*Illy József* fordítása)

EINSTEIN, A GEOFIZIKUS?

2015 háromszoros Einstein-évforduló: 120 éve született meg a speciális relativitáselmélet, 100 éve az általános relativitáselmélet, és 60 éve hunyt el *Albert Einstein*. Ez alkalomból érdekes lehet olyan gondolataival megismernedni, amelyek látszólag kívül estek e két elmélet körén.

A pörgettyűk

1921 októberében *Hermann Anschütz-Kaempfe* kieli üzemének két mérnöke különös kísérletbe fogott. Forró olajjal melegített rézhengert forgatott tengelye körül, és vizsgálta, hogy kialakul-e körülötte mágneses mező.

Azt gondolhatnánk, hogy mivel pörgettyűs iránytűket gyártottak, bizonyára az iránytűben forgó pörgettyűk esetleges mágneses mezejét akarták kimutatni, hogy zavaró hatásával számoljanak.

A valódi ok azonban más volt. „Habár még nem látom világosan, vajon várható-e pozitív hatás, szá-

momra még mindig ez az egyetlen kézenfekvő lehetőség arra, hogyan kössük össze a hőáramot a földáramokkal, mivel az utóbbiak csakis *irreverzibilis* folyamat következményei lehetnek.” Ezt az az *Albert Einstein* írta a mérnököknek decemberben, akinek kedvéért eljátszadzodtak a forgó, forró hengerral.

Hőáram? Földáram?

Einstein egy másik levelében, amelyet már magának az üzem tulajdonosának, *Anschütz*nek írt, a kísérlet esetleges pozitív eredményét „hatalmas jelentőségűnek” nevezte. Ettől még mindig azt gondolhatnánk, hogy a kifejlesztés alatt álló iránytűről van szó. Arra a hírré azonban, hogy több sikertelen próbálkozás után 1922 júniusára fölhagytak a kísérlettel, *Einstein* megjegyezte: „Köszönöm nagyon Önnek [*Anschütz*nek] hogy megismételték a hőforgatásos kísérletet. A Föld [mágneses] mezejének mivoltán morfondírozva valószínűtlen föltevéseknél rekedtem meg.”

Így a kísérlet célja az volt, hogy laboratóriumi modell révén megtalálják a Föld mágneses mezejének forrását a Földben a Földdel keringő elektromos áramokban, amelyeket, meglehet, a Föld belső melege tart fön.

Hogyan került Einstein egy iránytűüzembe?

1914 novemberében Anschütz-Kaempfe, az első használható pörgettyűs iránytű feltalálója, elsőbbségi vitába keveredett egy amerikai feltalálóval, *Elmer Sperry-vel*. Tudva levő, hogy ezt az iránytűt nem befolyásolja a hajó, a tengeralattjáró vagy a repülőgép acélszerkezete. A vita akkor mérgesedett el, amikor Sperry a német haditengerészetnek eladott egy iránytűt. II. Vilmos császár ugyanis olyan hadiflottát akart építeni, amelyik fölveheti a versenyt unokatestvére, V. György angol király flottájával, így nagy üzletre nyílt kilátás. A felek tehát perre mentek.

Mivel az ügyet Berlinben tárgyalták, közelben lakó szakértőt akartak bevonní, ezért Einsteinre esett a bíróság választása. Persze, nemcsak ezért. Ismeretes volt, hogy fiatal korában szakértőként dolgozott a berni Találmányi Hivatalban.

Einstein először nem készült föl kellően, de végül is sikerült elérnie, hogy az utolsó tárgyaláson, 1915 augusztusában, a bíróság Anschütz javára döntsön.

Ez az eset majd két évtizedes barátság nyitánya lett. Einstein még két szabadalmi perben szerepelt, mint Anschütz szakértője, 1919-től pedig már rendszerint Anschütz kieli gyárában töltötte a nyár egy részét, és részt vett a pörgettyűs iránytű továbbfejlesztésében, oly mértékben, hogy a végső szabadalomnak is részesevé vált. Anschütz kényeztette: lakosztályt rendezett be neki, vitorlás, zongora és orgona várta a zenekedvelő Einsteint és fiait.

A pörgettyűs iránytű nagyon szellemes készülék. Einstein élvezte a sok apró, de különleges megoldást.

Anschütz és Einstein Kielben (© Raytheon Marine GmbH, Kiel).



Leber Han Anschütz!

Ich habe ein bisschen Sorge wegen der Verteilung.
Ich glaube nicht daran, dass man das Hartgummi durch
das Sprengen eines
Kohlensäure ausreichen kann. Man natürliches, gelbes
es, die Aluminiumlegierung mit einem kleinen Metall
zu mischen um den Elektrodenzellen und die Lösung
zu einem Teil dieses Metalls zu sättigen. Haben Sie
das schon versucht? Oder gibt es gar ein Mittel, wie Graphit
Schicht aufzubringen? Oder gibt es einen so dünnen Schicht
eines chemisch unempfindlichen Platins, dass die Elektrode
als Kondensator genügend Kapazität auszubilden werden
könnte? (Ich bin sicher nach meiner Erfahrung nicht wohl
möglich, weil die Schichtdicke nahezu molekulare Dünne sein
müsste). Jedenfalls ist das eine unethische Schicht.
Kellert würde platinierter Platin als Elektrode brauchbar
sein. Ich würde aber nicht, ob das Hydrogelen. vordem
werden kann.

Ich fürchte, dass eine Vermischung der Platinstücke wenig
hilfen wird, weil die Oberflächigkeit dann die die Flüssigkeits - Lage
flach wird. Aber einen Versuch wird es wohl sein. Ich danke Ihnen
sehr für die Wiederholung der Wärme - Potentia - Messungen. Mit
dem Nachdenken über die Natur der Flüssigkeit bin ich im
Thermodynamik - Gebiet stehen geblieben.
Erfreut mich, dass es Ihnen besten gut geht. Wenn
ich einmal etwas bekommen kann, kommt ich gerne
sinnvoll mit einem Teil. Denn dieser Wunsch muss ich
ich erfüllt werden.

Freundliche Grüsse an Sie beide, auch von
meiner Frau von Hans A. Einstein.

Einstein levele Anschütznek (© Raytheon Marine GmbH, Kiel).

Anschütz pedig, aki művészettörténész létére csak műkedvelő mérnök volt, alkalmazott ugyan mérnököt, de Einsteinben nemcsak a képzett fizikus tanácsadót és ötletgazdát tisztelte, hanem a nagy tekintélyű személyiséget, a Porosz Tudományos Akadémia tagját, Nobel-díjvárományos egyetemi tanárt.

A kapcsolatból nemcsak Anschütz húzott hasznot. Anschütz találmánya is „felpörgette” Einsteint. Lelki szemei előtt két különleges pörgettyű merült föl: az egyik molekulányi volt, a másik pedig maga a Föld.

A molekulányi *André-Marie Ampère* ötlete volt, még 1820-ból: a ferro- és paramágneses anyagok mágnesességét az anyag molekuláiban folyó köráramoknak tulajdonította. Ha ehhez hozzávesszük, hogy *Hendrik A. Lorentz* elektronelmélete szerint minden elektromos áram részecskék (elektronok) áramlása, amelyeknek van tehetetlen tömegük, akkor ez a föltevés úgy is megfogalmazható, hogy az ilyen anyagokban mikroszkopikus pörgettyűk forognak. Ha ezek forgástengelye valamilyen okból párhuzamosra és azonos irányúra vált, mágneses mezejük összeadódik, így a mágnesesség makroszkopikusan is kimutatható. Ezt akarta Einstein kísérletileg megvizsgálni holland kollégájával, *Johannes Wander de Haas*-szal.

A kísérlet 1915-ben kapott pozitív eredményéből Einstein további következtetést is levont: ezzel „annak is megtaláltuk az okát, miért esik majdnem egybe a Föld mágneses tengelye és forgástengelye” – írta Lorentznek.

Íme a Föld-méretű pörgettyű, amely forgása révén létrehozza mágneses mezejét! De hol van az az elektromos töltés, amely a köráramot alkotja? A kieli rézhenger forgatása nem adott erre választ. Einstein tehát mélyebbre nyúlt: az elméleti alapokhoz.

„Az a hír járja, hogy új elméleted van a metrikus és az elektromágneses mező kapcsolatáról – írta *Max Born* Einsteinnek 1923 tavaszán – és hogy ennek meg kell adnia az összefüggést a gravitáció és a Föld mágneses mezeje között.” Válaszában Einstein megerősítette: „Jelenleg nagyon érdekes tudományos kérdésen dolgozom az affin mezőelmélet kapcsán. Megvan a lehetősége annak, hogy megértsük a Föld mágneses mezejét és a Föld elektromágneses háztartását, és hogy ezt a véleményt kísérletileg alátámasszuk.”

Arra a kísérletre utalt, amelyet *Hermann Mark* fizikai kémikussal folytatott. Erről a próbálkozásáról csak egy cikk kéziratának első oldala maradt fenn. Eredetileg négyoldalas volt, de három oldala *Hitler* hatalomra jutása után – Mark többi iratával együtt – a Gestapo martaléka lett. A cikknek már a címe elárulja, hogy a kísérlet sikertelen volt: *A geomágneses mező okára vonatkozó nyilvánvaló föltevésről és kísérleti cáfolatáról*. A részletekről nem tudunk semmit.

Az elektromosan semleges anyag elektromosan töltött?

1924 nyarán Einstein menettértei jegyet váltott a berlini elővárosi vasút egyik észak-déli irányú vonalára. Az volt a célja, hogy egy zsebiránytűvel megállapítsa, más mágneses mezőt észlel-e az a megfigyelő, amelyik mozog a Föld felszínéhez képest, mint amelyik nyugszik. Még a fülkébe lépő tiszteteket is megkérte, hogy máshova üljenek, nehogy kardjuk befolyásolja az eredményt. Talán nem meglepő, hogy ez a „kísérlet” is kudarcot vallott.

A kérdés azonban továbbra sem hagyta nyugodni, kivált, mivel egységes mezőelméleti próbálkozása és a foton létezése vagy nemlétezése körüli vita arra utalt, hogy valami gyökeresen új felismerésre van szükség.

„Mindent összevéve úgy tűnik, hogy ma sokkal távolabb vagyunk az alapvető elektromágneses törvények megértésétől, mint a század elején” – mondta 1924 októberében egy luzerni előadásán.

Ebben az előadásban úgy okoskodott, hogy a Maxwell-elméletnek megfelelően a Föld és a Nap mágneses mezeje olyan elektromos áramlás eredménye lehet, amely e két égitest forgásával ellentétes irányban folyik. Mivel pedig ilyen áramlás aligha létezhet kellő intenzitással, nem marad más hátra, mint hogy az elektromosan semleges tömeg ciklikus mozgásának kell keltenie a mágneses mezőt, habár sem az eredeti értelmében vett, sem az általános relativitáselmélet szerint kibővített Maxwell-elmélet nem jogosít föl erre a föltevésre. „A természet itt olyan alapösszefüggésre utal, amellyel eddig még nem foglalkoztak elméletileg” – mondta. Meg is fogalmazta, hogyan képzei:

$$dh = \frac{\sqrt{K}}{c} dm \frac{[v, r]}{r^3},$$

ahol dh a v sebességgel mozgó dm tömeg által r távolságban keltett mágneses mező, K a gravitációs

állandó, c a fénysebesség. Hozzátette, hogy mindez legfőljebb ciklikus mozgásra és első közelítésben lehet igaz. Mindenesetre a Nap és a Föld mágneses mezejének hányadosa nagyságrendileg helyes értéknek adódik, a forgó Földre alkalmazva pedig a geomágneses mezőt lehet megkapni, ugyancsak nagyságrendileg. „Ezek az összefüggések figyelemre méltóak, de meglehet, hogy mindez csak a véletlen műve” – tette hozzá óvatosan.

Ugyanezt írta decemberben: „Számomra szinte kizártnak tűnik, hogy a Föld, a Nap és a napfoltok mágneses mezejét vezetési vagy konvekciós elektromos áramokkal lehessen megmagyarázni. Inkább az a benyomásom, mintha a forgó tehetetlen tömegnek éppolyan mágneses hatása lenne, mint a tömeg sűrűségével arányos negatív elektromos tömegnek. [...] Ezen felül szembetűnő a következő: a ponderábilis tömeg szorzata a gravitációs állandó négyzetgyökével pontosan olyan dimenziójú, mint az elektromos tömeg¹.” Eddig azonban ezt még nem sikerült értelmes elmélettel megmagyarázni, tette hozzá.

Térjünk vissza a luzerni előadásra. A hallgatóság egyik tagja, *August Piccard* figyelmét az ragadta meg, hogy Einstein az előadás vitájában a fenti négyzetgyökös kifejezést azzal a föltevessel magyarázta, hogy a proton töltésének abszolút értéke nem egyezik meg az elektron töltésének abszolút értékével, és hogy különbségük arányos a proton és az elektron tömege közti különbséggel. Az arányossági tényező pedig a gravitációs állandó négyzetgyöke. A „semleges” anyag ilyen piciny töltése elegendő hozzá, jelentette ki Einstein, hogy a Földben és a Napban keringve megmagyarázza mindkét égitest mágneses mezejét.

Mindjárt meg is állapodtak, hogy Piccard utánanéző furcsa állításnak. Einstein azt javasolta, hogy nézzék meg, marad-e mégis elektromos töltés a teljesen semlegesnek vélt ionmentesített gázban az elektron és a proton töltésének különbözősége folytán. Mivel a várható hatás 10^{-19} nagyságrendű volt, Piccard ugyancsak nehéz feladatra vállalkozott. A kísérlet hónapokig tartott, és a részletekről a Brüsszelben dolgozó Piccard folyamatosan tájékoztatta Einsteint.

A végeredmény nem igazolta a föltevést, de Einstein nem tartotta fölöslegesnek a próbálkozást, mivel „nincs okunk a priori azt hinni, hogy a protonnak és az elektronnak azonos [nagyságú] a töltése. [...] Semmi baj, ha ezt a reményt [is] el kell temetni; népes és jó társaságban lesz” – utalt előző, hamvába holt ötleteire.

Ugyancsak a luzerni előadáson jegyezte meg, hogy a gravitáció elméletének (az általános relativitáselméletnek) a Maxwell-elmélettel való bármiféle egyesítése azzal járna, hogy kissé módosítani kellene az utóbbi elméletet, így a Föld mágneses mezeje nem volna pontosan merőleges az ezt keltő elektromos áram síkjára, azaz nem volna pontosan párhuzamos a Föld forgástengelyével.

¹ Az „elektromos tömeg” az elektromosan töltött részecske tehetlenségének azon része, amely az elektromágneses mezőtől származik. Lásd Lorentz transzverzális és longitudinális elektrontömegét.

Két szakember is utánanézett annak, mit mondanak erről a mérési adatok. *Louis Bauer* arról tájékoztatta Einsteint, hogy valóban van egy kis eltérés a Poisson-egyenlethől számítható potenciáltól, ami azzal jár, hogy a geomágneses mező tényleg nem párhuzamos a Föld forgástengelyével. *Albert Wigand* pedig szintén eltérést tapasztalt a légköri mágneses mezőben. A magyarázat azonban váratott magára. „A dolog még mindig teljesen ködös és zavaros” – írta Einstein jó barátjának, *Paul Ebreinfestnek* 1924 novemberében végén.

1925 februárjában *Theodor Kaluza* ajánlólevelet kért Einsteintől. „Akárcsak eddig, ezután is meg vagyok róla győződve – válaszolta Einstein –, hogy az Ön gondolatai, amelyek kapcsolatot igyekeznek teremteni a gravitáció és az elektromosság között, nagyon eredetiek, és a szakértők legkomolyabb érdeklődésére tarthatnak számot [...]. Jómagam eddig teljesen hiába küszködtem ezzel a problémával. Egyre inkább úgy tűnik, hogy a földmágneses mező a gravitáció és az elektromágnesesség közötti eddig ismeretlen kapcsolatra épül, de nem tudok megszabadulni az ellentmondásoktól.”

1926 őszén, egy tudományos rendezvényen, megkereste egy jénai fizikus, *Teodor Schlomka*. A beszélgetés során Einstein nagy ötletére terelődött a szó, azaz arra, hogy meglehet, elektromos töltése van a semleges anyagnak. Ezt a különös töltést Einstein „szellemtöltés”-nek (*Gespensterladung*) keresztelte el. Elmesélte Schlomkának az észak-dél-észak irányban mozgó elővárosi vonaton végzett „kísérletét” is. Azt is említette, hogy eddig nem észleltek eltérést az iránytű állásában az Amerikába járó, keletről nyugatnak és visszafelé tartó óceánjárók sem.² Ebből pedig az következik, vonta le a tanulságot, hogy a Föld mágneses mezejének oka nem lehet a forgás.

Ebből ez még nem következik, mondott ellent Schlomka 1927. január elején. Számítása szerint ugyanis akár nyugat-keleti irányban mozognak, akár dél-északi irányban, a mozgás révén adódó további mágneses mezőket csak akkor lehet az iránytű kilengésével kimutatni, ha a mozgás sebessége elég nagy. Az elővárosi vonat legföljebb 10 m/s-os dél-északi sebessége mellett alig 2°-nyi eltérés várható, ami a környezeti vaselemek zavaró hatása és a mérés pontatlansága miatt aligha mutatható ki. A nyugat-keleti irányban haladó óceánjáró vagy repülőgép pedig a néhány foknyi eltérést a léglökések és a hullámlás miatt nem vehette eddig észre. Az Amerikába járó hajók ezen kívül lentebb földrajzi szélességen haladnak, ahol ez a hatás még kisebb. Ha azonban délről észak felé 30 m/s sebességgel repülnék, már várható volna ez a hatás.

Schlomka ezen felül alaposan utánanézett az irodalomnak. A „szellemtöltést” magát egyszerűen meg lehet magyarázni azzal a Mossotti–Zöllner–Lorentz-

féle föltevessel³ – írta –, hogy az ellentétes elektromos töltések közti vonzás kissé nagyobb, mint az azonosak közti taszítás. Rájuk alapozva két német fizikus 1905 és 1912 között kidolgozott egy elméletet, amely szerint egy test akkor „töltetlen” (azaz homogén elektromos mezőben nem hat rá erő), ha minden térfogatelemében valamivel több negatív töltés halmozódik föl, mint pozitív, és fordítva: ha a test minden elemében ugyanannyi pozitív töltéshordozó van, mint negatív, akkor e testnek pozitív „töltésfeleslege” („szellemtöltése”) lesz.

Ezt az elméletet a brit *Arthur Schuster* 1911-ben úgy módosította, folytatta Schlomka, hogy két negatív töltés másképp taszítja egymást, mint két pozitív, de az ellentétes előjelűek egyformán vonzzák egymást. Ha a pozitív töltések taszítása csupán 10⁻²⁷-ed résznyivel volna gyöngébb, mint a negatívaké, ez már megmagyarázná a földmágnesességet. Az ugyan-csak brit *William Swann* 1926-ban a Maxwell–Lorentz-egyenleteket módosította úgy, hogy nemcsak a geomágnesességet sikerült megmagyaráznia, hanem a geoelektromosságot is. Ezen felül elmélete kielégíti a speciális relativitáselméletet, és könnyen módosítható úgy, hogy az általános elméletet is kielégítse, vélte Schlomka.

Mindhárom elmélet a földmágnesességet elektromos töltések keringésére vezeti vissza. Ezt az általános következtetést szeretné Schlomka repülőn (tehát nem a Földdel együtt forogva és kellő sebességgel) ellenőrizni.

Válaszában Einstein a várható hatást nagyon kicsinek ítélte, „ha pedig minden elmélettel elvonatkoztatunk és föltételezzük, hogy a tömeg forgása kelti közvetlenül a mágneses mezőt, akkor azt is elvárhatjuk, hogy a tömegek translációs mozgása is mezőt keltessen”. Ekkor pedig az ilyen további mozgás keltette változás olyan hatást kell hogy előidézzon, amelyre már föl kellett volna figyelnie a Dél-Amerika és Európa közti hajózásnak. „Úgy vélem, hogy az amerikaiak a mágneses mérésre használt motoros fahajójukkal bizonyára fölfedezték volna ezt a durva hatást” – utalt Louis Bauer kutatóhajójára, a Carnegie-re.

Mivel Schlomka ajánlatát kételkedve fogadta, további tervet kért tőle. Ezt Schlomka meg is adta,

„Az Ön kísérlete csak akkor vezethetne pozitív eredményre – írta Einstein válaszában –, ha teljesen hibás volna az elektromágneses mezőt antiszimmetrikus tenzorként fölfogni, és az elektromosság és a gravitáció között sokkal szorosabb kapcsolat lenne, mint eddig véltük. Jó ideje kutatok ilyen elmélet után, de eddig nem sikerült megtalálnom.”

Bár további leveleiben Schlomka vitába szállt Einstein elméleti kifogásaival, végül belátta, hogy a korabeli nézetek szerint a hatás nem várható. Tájékoztatta Einsteint arról, hogy már három „rátermett” szakember: *Michael Faraday*, *Pjotr Lebegyev* és *Harold A.*

² Ez a megjegyzése arról is árulkodik, hogy amikor 1925 április-májusában dél-amerikai előadókörúton járt, megkérdezte a kaptányt.

³ *Ottaviano Mossotti* 1836-ban, az ő nyomán *Friedrich Zöllner* 1878-ban, *Hendrik A. Lorentz* pedig 1899–1900-ban publikálta ezt az elképzelését.

Wilson negatív eredményt kapott, amikor a forgó semleges tömeg által keltett mágneses mezőt laboratóriumi kísérlettel igyekezett kimutatni.

Négy hónapos szünet után, július 30-án, Schlomka beszámolt Einsteinnek arról, hogy mégis elkezdte a repülőgépes méréseket, és a földfelszínen mérhető iránytűállástól dél-északi és észak-déli irányban körülbelül 3° eltérést tapasztalt, kelet-nyugati irányban viszont $14,5^\circ$ és 21° közöttit. Az eredményt azonban nem tartotta perdöntőnek, mert egy második iránytű más értékeket mutatott.

Einstein következő fennmaradt levele 1927 szeptemberében íródott. Érdekesnek tartotta Schlomka eredményeit, de nem fogadta el. Részletekről nem tudunk, mert a levelezés hiányos.

Az elődök és pályatársak

1932-ben Schlomka magántanári habilitációjára értekezést nyújtott be *Gravitáció és földmágnesesség* címmel. Ebben sorra vette a földmágnesesség addigi elméleteit: a forgási, az éter- és az elektromos elméleteket, és kifejtette saját elgondolását is. Einstein neve a forgási elméletek közt kétszer is szerepel. Az egyik elméletet jól ismerjük: a forgó Föld tömegének „szellemtöltést” tulajdonít; a másik „elmélet” viszont meglepetés: Schlomka „magnetomechanikus-giromágneses” elméletnek nevezi, és szerzőjét Einsteinben és De Haasban adja meg. Ez az Ampère-féle molekuláris köráramok létezését igazoló kísérlet! Mivel a kísérletet ismertető 1915-ös cikkében Einstein és De Haas nem említette, hogy a földmágnesesség magyarázata lett volna a céljuk, ezt Schlomka csak Einsteintől hallhatta. Ha ehhez hozzávesszük a Lorentznek még 1915-ben tett, már idézett megjegyzését, állíthatjuk, hogy mind a molekuláris, mind a Föld méterű „pörgettyű” vizsgálata mögött Einsteinnek az a szándéka húzódott meg, hogy tapasztalati fogódzót találjon a gravitáció és az elektromágnesesség egységes elméletének megfogalmazásához.

Einstein valószínűleg nem olvasta Schlomka ezen cikkét, mert mire 1933-ban megjelent, ő már elhagyta Németországot, de talán jobb is így. Míg Schlomka addigi leveleiből azzal szembesült, hogy az elemi elektromos töltések különbözőségét már a 19. század közepétől javasolták, ebből a cikkből azt is megtudhatta volna, hogy az általa oly merésznek tartott $e = K^{1/2} m$ alap gondolata több mint harminc évvel korábban, a 19. század végén már fölmerült. Arthur Schuster ugyanis 1891-ben tette föl az általa extravagánsnak ítélt kérdést, „nem lehet, hogy a forgó test mágnesként hat, és hasonlóképp nem lehetne a Föld mágnességének oka a tengely körüli forgása?” 1892-ben megint megkérdezte: „Minden nagy forgó tömeg mágnes?” Ha a mágnesség a molekulán belüli elektronok keringésének tulajdonítható, írta 1911–1912-ben, ezeket bizonyos mértékig pörgettyűs iránytűknek tekinthetjük, amelyek párhuzamosra állítják be magukat azon test forgástengelyével, amelyben vannak. Ez

nagyon emlékeztet Einstein és De Haas az Ampère-féle molekuláris köráramok létezését igazoló kísérletére, habár azt három évvel később végezték el. Nehéz elfogadnunk, hogy Einstein nem találkozott Schuster gondolataival, pedig ennek semmi nyoma. De csak később szerzett tudomást az amerikai *Samuel Barnett* méréseiről is, aki 1909-től vizsgálta, hogy egy hirtelen forgásba hozott vasrúd mágnesessé válik-e. Nem is csoda, mert Barnett 1915 nyaráig nem publikált róluk, Einsteiné pedig már februárban beküldték saját eredményeiket a *Német Fizikai Társaság Közleményeibe*. De miért ne tarthatnánk lehetségesnek, hogy egy gondolat több agyban, egymástól függetlenül is megszülethessen?

Az ugyancsak angol Wilson 1923-ban megállapította, hogy a legígéretesebb az az elmélet, amely szerint az elektromosan semleges anyagban a hatalmas mennyiségű pozitív és negatív elektromos töltés nem ellensúlyozza tökéletesen egymás hatását, kis maradékhátas várható, amelybe a gravitáció és a geomágnesesség is „belefér”. Ha föltételezi, hogy a tömeg gravitációs egysége, $K^{1/2} M$ egyenrangú az elektromosság elektrosztatikus egységével, Q -val, azaz $Q = K^{1/2} M$, akkor a Föld forgásából az egyenlítőjén 1 gausst kap, ami körülbelül háromszorosa az ott megfigyelt horizontális mágneses mezőnek. A Napnál is háromszoros, azaz nagyságrendileg helyes eredményt kap.

A „töltött semleges” tömeg gondolata német szakmai körökben is fölmerült. Az 1905–1906-os évben érdekes vita zajlott le a *Physikalische Zeitschrift* hasábjain. Kiváltó oka *Victor Fischer* cikke volt. „Az elektromosságtan jelenlegi fejlődése mindinkább arra utal – írta –, hogy a gravitációt és az elektromosságot ugyanarra az alapra helyezzük [...]. Ha az elektromos töltést és a szokásos tömeget az anyag [együtt] egyenértékű együtthatójának tekintjük, akkor azt találjuk, hogy az első egysége $1,5 \cdot 10^7$ -szer akkora, mint a másodiké, vagy másképp

$$\frac{e}{m} = 1,5 \cdot 10^7.$$

Ez az elektrosztatikusan mért töltés és a gravitációs tömeg közötti viszony szembevetően egyezik az elektromágnesesen mért elektromos töltés és az elektromágneses tömeg viszonyával, amint ezt különféle sugárzásoknál találták.”

Az amerikai *Bergen Davis* németre is lefordított, 1904-es munkájában ugyanonnan indult ki, mint Fischer: „Az a föltevés, hogy az anyag elektronokból áll, ma már jól meg van alapozva. Ez az anyag, amely tömegvonzást mutat, valószínűleg elektronok fölhalmozódása, amelyek viszont elektromos hatást gyakorolnak. A jelen dolgozat megkísérli, hogy föllelje a legvalószínűbb kapcsolatot e két erő között, amelyek a tömegek közt két kombinációban hatnak.” Végeredményül azt kapta, hogy egy bizonyos tömeghez tartozó elektromos és nehézségi erő aránya a fénysebesség negyedik hatványa, de e számnak nincs dimenziója.

A *Physikalische Zeitschrift* szerkesztősége először visszautasította Davis cikkét, úgy vélvén, hogy itt csak

véletlen számbeli egybeesésről lehet szó, de mivel Fischer cikke ugyanezt pedzette, mégis közzétették, igaz, két olyan cikkel együtt, amelyek bírálják mind Fischert, mind Davist. Bírálatak lényege az, hogy Fischer is, Davis is olyan számokat hasonlít össze, amelyek nem azonos dimenziójúak, vagy nem azonos mértékegységben vannak kifejezve.⁴

Gustav Angenheister húsz év múlva, 1923–1924-ben is úgy találta, hogy a $Q = K^{1/2} M$ föltevés majdnem helyesen adja meg a Föld és a Nap mágneses mezejének arányát, de fizikailag nehéz elképzelni, hogy a Föld elektromosan vezető belső magvában ekkora igazi töltés és a vele járó elektromos mező létezhet.

A földmágnesesség eredete nemcsak német és angol fizikusokat izgatott a 20. század első két évtizedében. A $Q = K^{1/2} M$ összefüggés, $e = m\phi^{1/2}$ alakban, megjelent a francia *Louis Décombe*-nak a gravitációs elektromos elméletéről 1913-ban írt cikkében is.

Mi lett a történet vége? 1947-ben *Patrick Blackett* áttekintette a forgó tömeg által keltett mágneses mezőre vonatkozó irodalmat Schustertől 1947-ig. „Régóta ismert – írta –, kivált Schuster, Sutherland és Wilson munkáiból, habár később alig említették, hogy a Föld és a Nap P mágneses momentuma és U forgatónyomatéka majdnem arányos egymással, és hogy az arányossági tényező közel egyenlő a gravitációs állandó négyzetgyökének és a fénysebességnek hányadosával. Ezt így írhatjuk föl:

$$P = \beta \frac{G^{1/2}}{c} U,$$

ahol β egységnyi nagyságrendű állandó.”

Hosszú cikke végén Blackett megvizsgálta, mekkora lehet a valószínűsége annak, hogy laboratóriumi kísérlettel igazolhatják ezt az összefüggést, és borúlátó eredményre jutott. „Egy laboratóriumi gömb anyagának fizikai körülményei oly mértékben eltérnek a Földétől, nemcsak méretében, de hőmérsékletében, nyomásában és feszültségében, a gravitációs és a centrifugális erő arányában stb. is, hogy csekély eredményre számíthatunk, míg meg nem találják a [fenti] összefüggés elméletét.” Egyetlen ilyen kísérletről volt tudomása. Swann és *Longacre* 1928-ban 10 cm sugarú rézgömböt forgatott másodpercenként 200 fordulattal. A vizsgált összefüggés szerint 10^{-9} gauss erősségű mágneses mezőre lehetett számítani, de a kísérlet 10^{-4} -nél kisebb értékre már nem volt érzékeny. Einstein forgó rézhengerét nem említhette, mivel erről Einstein nem publikált.

Einstein Ampère-áramos kísérletéről sem szólt, pedig Schlomka általa idézett 1933-as cikkében találkozhatott vele. De Blackett cikke után sem törődött senki az előzményekkel, ezért a $Q = K^{1/2} M$ hatást még vagy tíz évig Blackett-hatásnak hívták. A tanulság: érdemes összefoglaló cikket írni!

⁴ Einstein ötletére ez nem vonatkozik, mert ott mind a gravitációs tömegegység, mind az elektrosztatikusan mért töltésegység dimenziója $\text{cm}^{3/2} \text{g}^{-1/2} \text{s}^{-1}$.

Az egységes elmélet két útja

Az eddigiekben idézett megjegyzései alapján kijelenthetjük, hogy Einstein geofizikai kirándulásának mozgató rúgója az volt, hogy az elektromágnesesség és a gravitáció kapcsolatára tapasztalati utalást találjon.

Mossotti, Zöllner és Lorentz a faraday–maxwell–hertzi elektrodinamikától megrészegülve a gravitációt az elektrodinamikára akarta visszavezetni, és ehhez elég volt – visszafelé gondolkodva – akkora különbséget föltételezniük a két elemi elektromos töltés abszolút értéke között, amekkora éppen megadja a gravitációs vonzást.

Einstein feladata nehezebb és bizonyos értelemben fordított volt. Bizonyos értelemben, mert nem alkalmazhatta az elektromágneses „receptet”: nem állt rendelkezésére két ellentétes gravitációs töltés, amelyek töltéséből vagy kölcsönhatásából annyit „lefaraghatott” volna, hogy megkapja az elektromos vonzást (a taszítást nem is említve), ráadásul a gravitációs erő „lefaragás” nélkül is csak parányi hányada az elektromosnak. Ő az általános relativitáselmélet mezőegyenleteit akarta úgy kiegészíteni vagy átalakítani, hogy mindkét kölcsönhatást megkapja. Élete során kilenc ötlettel próbálkozott, mint tudjuk, sikertelenül.

Ami pedig a geomágnesesség forrását illeti, Schuster is, Einstein is kétségbeesésében nyúlt a „töltetlen töltött” anyag extravagáns gondolatához, miután el kellett fogadnia a geomágneses mező forrását a geoelektromosságban kereső kísérletek negatív eredményét.

Pedig napjaink geofizikusai mégis a geoelektromosságban reménykednek, az úgynevezett önfenntartó dinamómodellben. Eszerint egy kezdeti mágneses mező hatására a Föld belsejének vasban dús rétegei – eltérő forgásuk és eltolódásuk révén – elektromos áramot indukáltak, amely erősítette a kezdeti mágneses mezőt. Mihelyt beindult ez a „dinamó”, a kezdeti mezőre már nem lett szükség, a dinamót a külső rétegek konvektív mozgása tartja fenn azóta is. Ha helyesnek bizonyul, már „csak” azt a kérdést kell megválaszolni, hogy mi a kezdeti mágneses mező forrása...



A tudományos közösségben meglehetősen egységes jelenség- és kérdéscsoportok keringenek. Ezeket *Gerald Holton* témáknak nevezte, és váltakozásukat, változásukat a tudományfejlődés fő mechanizmusának tartotta. Hogy azután sikerül-e e témákat minden érdeklődő kutatónak nyomon követnie és így továbbfejlesztenie, attól függ, marad-e nyomuk és ha marad, a kutatók megtalálják-e. Ha nem, akkor újraalkotnak másutt már elért eredményeket. Kivált, ha valaki, mint Einstein, jobban szeret saját gondolataiban kutatni, mint mások cikkeiben.

Irodalom

Einstein 1905 és 1923 márciusa közötti cikkeit, leveleit a *Digital Einstein Papers* honlapon lehet olvasni eredeti és angol nyelven. Az 1923 márciusa és 1925 májusa közti dokumentumok a *Collected Papers of Albert Einstein* 14. kötetében található, hamarosan a világhálón is. A cikkben említett, 1925 júniusa és 1927 májusa közti dokumentumok pedig a 15. kötetben, körülbelül két év múlva lesznek hozzáférhetőek.

I. A fizikai Nobel-díj első két évtizede

Alfred Nobel (1833–1896) igazán gyakorlati ember volt. A dinamit feltalálójának valamennyi – több mint 300 – szabadalmazott találmánya robbanóanyagok előállítására, gyártására vonatkozott. Békés célra bányászatban, útépitéséknél, alagutak fúrásakor használták ezeket a találmányokat, de ténylegesen a hadianyaggyártás volt az, amelynek Nobel óriásira nőtt vagyonát köszönhette. Ezért tartotta fontosnak, hogy neve ne csak az öldöklés, hanem valamilyen világra szóló jótett révén is örözdjön meg az utókor számára, ezt foglalta írásba 1895. november 27-i végrendeletében:

„Hagyatékom gondnokai által biztos értékpapírokban elhelyezett tőkémet alapot képvisel majd, amelynek évi kamatai azok számára osztassanak fel, akik az elmúlt esztendőben az emberiségnek a legnagyobb hasznot hajtották.”

Nagy ívű cél, amelyet rögtön követ a gyakorlati megvalósításról, a kamatok öt egyenlő részre osztásáról és az öt tárgykör felsorolásáról szóló rendelkezés. Ebből most csak a fizikát és a kémiát idézzük:

„Egy rész azé, aki a fizika terén a legfontosabb felfedezést vagy találmányt érte el; egy rész azé, aki a legfontosabb kémiai felfedezést vagy tökéletesítést érte el.”

Miről van szó? Az emberiség számára leghasznosabb és legfontosabb felfedezésről, találmányról, tökéletesítésről – ebből a megfogalmazásból világlik ki igazán Nobel praktikus gondolkodása.

Ennek szellemében mondhatta később a Svéd Királyi Tudományos Akadémia Fizikai Osztályának csillagász elnöke, amellet a fizikai Nobel-bizottság tagja, amikor a Bizottságban Einstein Nobel-díjra jelöléséről

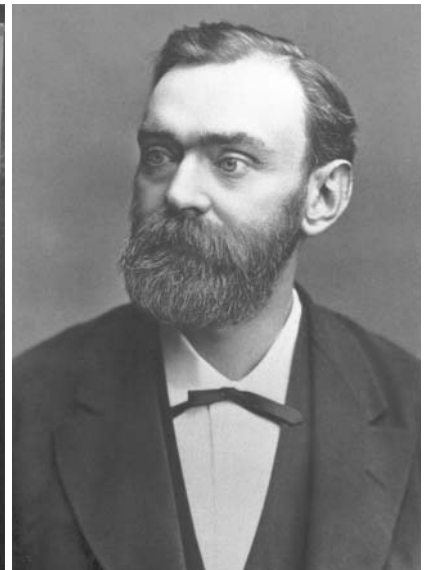
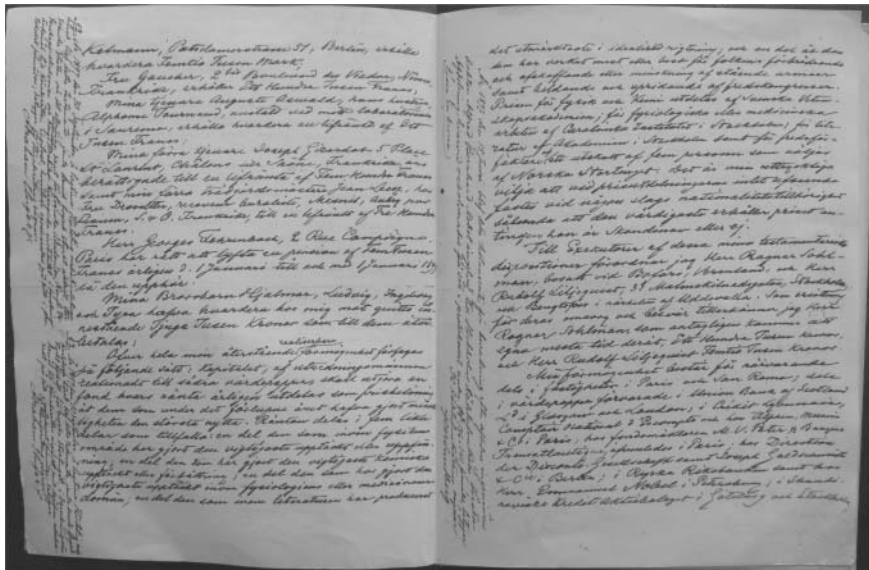
vitáztak, hogy „nem valószínű, hogy olyan spekulációkra szánta volna Nobel a díjat, mint amilyen Einstein relativitáselmélete”.

Nobel 1895-ös végrendelete 1897-ben került nyilvánosságra. Azzal okozott meglepetést, hogy a fizikai és a kémiai Nobel-díjról a döntést nem a korábban megjelölt, 1878-ban alapított stockholmi Höögskolára, az egyetem elődjére bízta, ahogy például az orvosi-fiziológiai Nobel-díjért az 1810-ben alapított stockholmi Karolinska Intézet lett a felelős, hanem az 1739-ben alapított Svéd Királyi Tudományos Akadémiára, amelynek tagjai legnagyobb részt Svédország legrégebbi egyeteme, az 1477-ben (!) alapított Uppsalai Egyetem tanárai voltak. Ezen egyetem tiszteletbeli doktora lett 1893-ban maga Alfred Nobel is.

Milyen nevezetes tanárai voltak már ennek az egyetemen? A 18. században Uppsalában volt professzor és itt építtette meg az egyetemi obszervatóriumot *Anders Celsius* (1701–1740) csillagász, aki bevezette a ma már szinte egész Európában használatos hőmérsékleti skálát. A 19. században itt működött *Anders Jonas Ångström* (1814–1874), aki először az obszervatórium, majd a fizikai tanszék vezetője lett. (Róla nevezték el a nanométer tizedrészt, mint a spektroszkópiában kiválóan használható hosszúságegységet.) Ő honosította meg Uppsalában azokat a spektroszkópiai kutatásokat, precíz méréseket, amelyeket azután tanítványai, majd tanítványainak tanítványai folytattak és tettek a fizika szinte kizárólagos kutatási tárgyává Uppsalában a 19. század végére.

Fontos tudni, hogy 1900-tól az akkor megalapított Nobel Alapítvány felelős a díjjal kapcsolatos ügyek intézéséért. Az Alapítvány koordinálásában mindegyik díjhoz tartozik egy-egy 5 tagú Bizottság, amely-

Alfred Nobel (1833–1896) és végrendeletének 2–3. oldala, a díj alapításáról 2. oldal utolsó bekezdésétől esik szó.



hez a díjra adott javaslatok befutnak a felkért egyetemi tanároktól, s ez a Bizottság terjeszti elő javaslatát, amelyet azután a döntéshozók majdnem mindig megszavaznak. A fizikai és a kémiai Nobel-bizottság tagjai kezdettől fogva svédországi akadémikusok, rendszerint egyetemi kutatók voltak, ez ma is így van.

Az 1900-ban alakult első fizikai Nobel-bizottság tagjai a következők voltak:

Robert Thalén (1827–1905), aki a ritka földfémek spektrumát mérte, kutatta Uppsalában.

Klas Bernhard Hasselberg (1848–1922) csillagász fizikus, Thalén tanítványa. Üstökösök, az északi fény és különböző fémgőzök spektrumait mérte és katalogizálta Uppsalában. Svédországot képviselte Párizsban, a Nemzetközi Mértékügyi Bizottságban.

Knut Johan Ångström (1857–1910), az idősebb Ångström fia, aki precíz műszert épített, amellyel a Nap infravörös spektrumát tudta meghatározni Uppsalában.

Hugo Hildebrand Hildebrandsson (1838–1925) meteorológus fizikus, az uppsalai meteorológiai obszervatórium igazgatója, a kumulusz felhők kutatója.

Svante Arrhenius (1859–1927) fizikai kémikus, az elektrolitos disszociáció elméletének megalapozója, 1895-től a stockholmi Högskola professzora, az 1903-as kémiai Nobel-díj kitüntetettje, 1905-től az Akadémia Nobel Intézetének igazgatója. Ő volt a legfiatalabb, egyben a legdinamikusabb személy a bizottságban. A tagok megbízatása három évre szólt, azonban meg lehetett hosszabbítani. Arrhenius ebben is csúcspont volt: húsz évnél is tovább maradt a fizikai Nobel-bizottságban.

Időközben a Bizottságból ketten is elhunytak, helyettük újak jöttek. Thalént váltotta *Gustaf Granqvist* (1866–1922) szintén uppsalai kísérleti fizikus, Ångströmöt pedig *Vilhelm Carlheim-Gyllensköld* (1859–1934) földmágnességgel foglalkozó fizikus, a Högskola tanára. Még egy változás történt az első két évtizedben: a már 72 éves Hildebrandsson helyére 1910-ben a 38 éves *Allvar Gullstrand* (1862–1930) uppsalai szemészprofesszor került, aki azután teljesen azonosulni tudott az uppsalai kísérleti fizikusok sugárzás- és méréscentrikus felfogásával.

Az első két évtizedben működő fizikai Nobel-bizottság szemléletét elég jól tükrözik azok a rövid indoklások, amelyek az átadott Nobel-díjakat kísérték:

Az első fizikai Nobel-díjat 1901-ben *Wilhelm Conrad Röntgen* (1845–1923) német fizikus kapta „a róla elnevezett sugárzás felfedezésével szerzett rendkívüli érdemeiért”. A következőt 1902-ben megosztva *Hendrik Antoon Lorentz* (1853–1928) és *Pieter Zeeman* (1865–1943) két holland fizikus „a mágnesség sugárzási jelenségekre gyakorolt hatásainak vizsgálataért”. Az 1903-as fizikai Nobel-díjat megosztva *Henri Antoine Becquerel* (1852–1908) francia fizikus kapta „a spontán radioaktivitás felfedezéséért”, valamint a *Curie-házaspár*, *Pierre* (1859–1906) és *Marie* (1867–1934), „a Becquerel által felfedezett sugárzás tanulmányozásában való nagy érdemeikért”. Sorolhatnánk tovább. 1905-ben *Philipp Lenard* (1862–1947) „a ka-

tódsugarakkal kapcsolatos munkásságáért”, 1909-ben *Guglielmo Marconi* (1874–1937) és *Ferdinand Braun* (1850–1918) „a drótnélküli távíró kifejlesztésében való érdemeik elismeréséül” kapott megosztott fizikai Nobel-díjat. Az elmélettől, a spekulációktól való idegenkedés jól látszik az első amerikai Nobel-díjas, *Albert Abraham Michelson* (1852–1931) 1907. évi kitüntetésének indokolásában: „pontos optikai berendezéseiért, és az ezekkel végzett spektroszkópiái és meteorológiai (!) kutatásaiért” részesült az elismerésben.

A kémiai Nobel-bizottságban a szerves kémikusok voltak négyen, egyetlen fizikai kémikus, a gázanalízishez értő oceanográfus, *Otto Pettersson* (1848–1941) mellett. Pettersson is a stockholmi Högskola tanára volt, annak idején az ő rektorsága kellett ahhoz, hogy 1895-ben Arrhenius megkapja itt a fizika tanszéket. Mindketten a német természettudomány nagy tisztelői voltak. Az Európában széleskörű levelezést folytató matematikus, *Magnus Gösta Mittag-Leffler* (1846–1927), ugyancsak a Högskola tanára volt, szívesen törtek borsot egymás orra alá. 1903-ban például, amikor még csak Becquerel és Pierre Curie volt a fizikai Nobel-díjra jelölve, ezt megtudván Mittag-Leffler levelet írt Pierre-nek, érdeklődve felesége szerepéről a felfedezésben. Pierre Marie szerepét az övével azonos súlyúnak ítélte, így azután Skłodowska-Curie is bekerülhetett a díjazottak közé. Mittag-Leffler egyébként különösen odafigyelt a tehetséges női tudósokra, ő támogatta a matematikai zseni *Szofja Kovalevszkaja* (1850–1891) egyetemi tanári kinevezését is. Nobelt viszont már nem sikerült rávennie arra, hogy új matematikai tanszéket alapítson Szofja Kovalevszkaja számára...

1914-ben kitört a világháború, amelyben Svédország semleges maradt. A Nobel-bizottságoknak is ügyelniük kellett az egyensúlyra, amely a fizikában érdekes módon sikerült. 1914 decemberében még a német *Max von Laue* (1879–1960) vehette át a svéd király kezéből a Nobel-díjat „a röntgensugár kristályokon létrejövő diffrakciójának felfedezéséért”, de a következő évre már az angol *Sir William Henry Bragg* (1862–1942) és fia, *Sir William Lawrence Bragg* (1890–1971) oszthatta meg egymás között a Nobel-díjat „a kristályszerkezet röntgensugarak segítségével történő meghatározásának felfedezéséért”. A témák hasonlósága sem lehet véletlen. 1916-ban senki se kapott Nobel-díjat, állt a háború, többé-kevésbé döntetlenre állt. Még 1917-ben se volt Nobel-díj kiosztás, csak 1918-ban, amikor a háború eldőlt, akkor kapta meg egy angol tudós: *Charles Glover Barkla* (1877–1944) visszamenőleg az 1917-es fizikai Nobel-díjat „az elemek karakterisztikus röntgensugárzásának felfedezéséért”. Az 1918-as fizikai Nobel-díj kiadása is késleltetve történt, az 1919-es Nobel-díjjal együtt kivételesen 1920. június 1. lett a ceremónia ideje. Az 1918-ast *Max Planck* (1858–1947) német elméleti fizikus, az 1919-est *Johannes Stark* (1874–1957), szintén német fizikus kapta. Planck esetében sikerült az elméleti fizika áttörése, hiszen ő a díjat azon érdemeinek elis-

merésével kapta, „amelyeket a fizika továbbfejlesztésében az energiakvantum felfedezésével szerzett”, Stark díja viszont beleillett az eddigi gyakorlatba, mivel ő ezt „a csőugarak Doppler-effektusának és a spektrumvonalak elektromos térben való felhasadásának felfedezéséért” kapta.

Mindenesetre úgy tűnt, hogy megnyílt a lehetőség az elméleti fizikai kutatások Nobel-díjjal történő elismerésére, és talán ez követhette ki az utat *Einstein* Nobel-díja előtt. A meccs azonban még nem dőlt el: általános meglepetésre a fizikai Nobel-bizottság senkit se javasolt a következő, 1921. évi Nobel-díjra, ennek kiadását 1922-re halasztotta.

Einstein nevét akkor már az egész világ ismerte, erős bírálatok érték a Nobel-bizottságot, magának a Nobel-díjnak a tekintélye került veszélybe. Izgatottan várta mindenki az 1922-es évet.

II. Einstein életének második két évtizede

Természetesen most is a huszadik század első két évtizedéről lesz szó, ugyanarról, mint az előző részben. A hely kémelése végett, meg azért is, mert ezek többé-kevésbé az Einstein-életrajzokból jól ismert események, csupán időrendi felsorolására szorítkozunk, a témánkat érintő legfontosabb történések megemlékezésével.

1900: a zürichi Polytechnikumon (a későbbi Szövetségi Műszaki Főiskolán, az ETH-n) Einstein matematika-fizika szakos diplomát szerez.

1901: megkapja a svájci állampolgárságot.

1902: a berni Szövetségi Szabadalmi Hivatal ügyvivője lesz.

1903: házasságot köt volt évfolyamtársnőjével, *Mileva Marić*-tyal (1875–1948).

1904: megszületik első kisfiúk, *Hans Albert*.

1905: a csodálatos év. Sikeres doktori szigorlat Zürichben és négy fontos tanulmány megjelenése az *Annalen der Physik*ben. (Speciális relativitáselmélet, tömeg-energia egyenértékűség, Brown-mozgás statisztikus elmélete, fényelektromos hatás fotonelmélete.)

1910: megszületik második kisfiúk, *Eduard*. Az előző évben kémiai Nobel-díjat kapott *Wilhelm Ostwald* (1853–1932) most Einsteint javasolja fizikai Nobel-díjra.

1911. január: Zürichben Einstein előad a relativisztikus idődilatacióról.

1911. április – 1912. július: professzor a Prágai Német Egyetemen – ezáltal az Osztrák–Magyar Monarchia állampolgára lesz. Munkatársául szegődik *Otto Stern* (1888–1969).

1911. október 30. – november 3.: Brüsszelben részt vesz az első Solvay-konferencián, ő tartja a záró előadást a szilárdtestek fajhőjéről. Jelen van *Henri Poincaré* (1854–1912) is.

1911 folyamán *Paul Langevin* (1872–1946) francia fizikus egy párizsi előadásán felveti a relativisztikus ikerparadoxont. Jelen van *Henri Bergson* (1859–1941) francia filozófus is.

1912. augusztus – 1913. november: Einstein újra Zürichben, az ETH-n már professzor.

1912. őszi: az általános relativitáselmélet kidolgozása közben felmerült matematikai problémák megoldásához volt évfolyamtársától, *Marcel Grossmann* (1878–1936) budapesti születésű svájci matematikustól kér és kap segítséget. (Grossmann akkor már az ETH-n egyetemi tanár, nagyrészt az ő hívására tért vissza Einstein Svájcba.)

1913. őszi: Bécsben részt vesz és előadást tart a Német Természetkutatók és Orvosok Társaságának ülésén. Einsteint Max Planck és *Walther Nernst* (1864–1941) hívja Berlinbe.

1913. novemberől Einstein már a Porosz Tudományos Akadémia tagja, berlini egyetemi tanár, ezáltal Németország állampolgára.

1914: Mileva a gyerekekkel visszaköltözik Svájcba. Einstein Berlinben megtartja akadémiai székfoglalóját. Kitér az első világháború.

1915. nyár: Göttingában Einstein több előadást tart az általános relativitáselmületről, kapcsolatba kerül *David Hilbert* (1862–1943) matematikussal.

1915. őszi: Einstein és Hilbert levélváltása és előadásai Berlinben és Göttingában az általános relativitáselmületről. (Lásd *Illy József* cikkét a *Magyar Tudomány* 2015. júniusi számában.)

1916: először az *Annalen der Physik* folyóiratban, azután könyv formában is megjelenik *Az általános relativitáselmélet alapjai*. Ez Einstein első könyve. Rengeteget dolgozik, hajszolja magát, ami lassan az egészsége rovására megy.

1917. őszi: Einstein egyetemi statisztikus mechanika előadása Berlinben. (Lásd *Hajdu János* cikkét a *Fizikai Szemle* 2005/12. számában.)

1918: betegeskedik, keveset publikál, a gravitációs hullámok lehetősége foglalkoztatja.

1919: Einstein válása Milevától, majd házassága *Elsa Löwenthallal* (1876–1936).

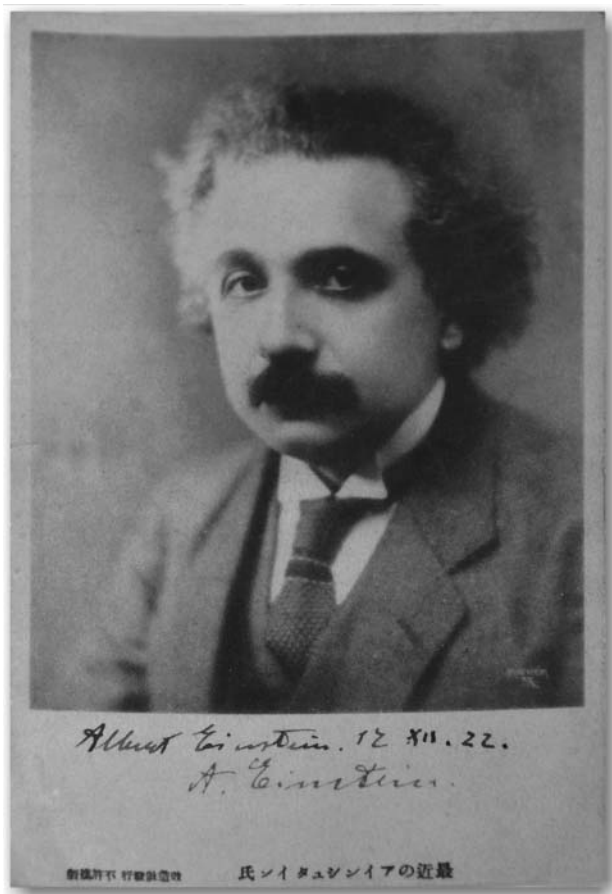
1919. május 29.: Teljes napfogyatkozás, *Arthur Eddington* (1882–1944) és *Frank Dyson* (1868–1939) brit csillagász afrikai és dél-amerikai mérései igazolni látszanak Einstein általános relativitáselmületét, amely a gravitációs fénygörbülésre a klasszikus newtoni érték kétszeresét jósolja. Ezt november 6-án *J. J. Thomson* (1856–1940) jelenti be Londonban, a Royal Society ülésén. Vezető angol és amerikai napilapok szenzációként tárlják a hírt. Einstein a sajtó érdeklődésének középpontjába kerül.

1920. szeptember 23.: Konfrontáció Philipp Lenarddal Bad Nauheimben, a háború utáni első német természettudományos konferencián.

1921: előadókörút az Egyesült Államokban, az amerikai elnök is fogadja a híres tudóst.

1922. április 6. Párizsban Einstein és Bergson nyilvános vitája az idő fogalmáról.

1922. június 24.: Berlinben halálos merénylet *Walther Rathenau* (1867–1922) német külügyminiszter, Einstein barátja ellen. Einstein sem érzi magát biztonságban Berlinben, októberben távol-keleti hajóra indul feleségével.



Einstein fényképe sajátkezű aláírásával, Kioto, 1922. december 12.

1922. november 17. – december 29. Elzával körutat tesz Japánban. Nemrég került elő Einstein – valószínűleg japán kísérőjének ajándékba adott – fényképe Kiotóból, Einstein sajátkezű aláírásával.¹ A ráírt dátum: 1922. december 12. Csupán két nap telt el azóta, hogy Stockholmban kiosztották a Nobel-díjakat...

III. Arrhenius Einstein-laudációja

50 évig maradnak titokban a Nobel-díjra érkező javaslatok. Utána a javaslattevő személye és a javaslat tartalma is szabadon kutatható és publikálható. Innen tudjuk ma már, hogy 1910-ben még csak Ostwald javasolta Einsteint Nobel-díjra.

Nobel-díjra persze nem akárki tehet javaslatot, csak akiket a Nobel-bizottság felkér erre. Köztük vannak mindig azok, akik már részesültek Nobel-díjban. A javaslat viszont csak abban az évben érvényes, amikor benyújtják. Ha valaki a következő évben is szeretné javasolni az illetőt, mert az adott évben nem kapta meg a díjat, új javaslatot kell készítenie. Ostwald 1912-ben és 1913-ban is javasolta Einsteint, hiába. 1912-től kezdve azonban, valószínűleg a sikeres Solvay-konferencia hatására, egyre többen javasolták az

¹ <http://mno.hu/szinesvilag/einstein-atal-alairt-kepeslapra-bukkantak-1258399>

egyre ismertebbé váló Einsteint. Köztük volt *Wilhelm Wien* (1864–1928), *Ernst Pringsheim* (1859–1917), *Emil Warburg* (1846–1931), *Pierre Weiss* (1865–1940), Max von Laue, Max Planck.

1920-ban Hendrik Lorentz és *Niels Bohr* (1885–1962) is csatlakozott a javaslattevőkhöz. Ekkor a fizikai Nobel-bizottság felkérésére Svante Arrhenius összefoglaló értékelést állított össze Einstein általános relativitáselméletéről az utóbbi 1-2 évben megjelent szakmai cikkek, vélemények alapján. Ebben erős kritikát fogalmazott meg mind a gravitációs vöröseltolódásra, mind a fénygörbülésre nyert mérési adatok pontosságára vonatkozóan, s a Bizottság ezért úgy látta, hogy még nincs elég meggyőző tapasztalat a relativitáselméletre.

1921-ben Planck ismételten javasolta Einsteint, támogató javaslatok érkeztek többek között Arthur Edingtontól, valamint *Gunnar Nordström* (1881–1923) finn és *Carl Wilhelm Oseen* (1879–1944) svéd elméleti fizikustól. A Bizottság felkérésére ekkor Allvar Gullstrand állított össze értékelő jelentést a relativitáselméletéről, Arrhenius pedig a fotoeffektusról, miután Carl Oseen azt javasolta, hogy a fotoeffektus magyarázatáért ítéljenek Einsteinnek Nobel-díjat.

Gullstrand értékelése még negatívabb lett, mint Arrheniusé volt. A speciális relativitáselmélet jósolta effektusokat mérhetetlenül kicsiknek, hibahatáron belülieknek tartotta, az általános relativitáselmélet bizonyítékául felhozott perihéliummozgást pedig nem egészen értette meg. Arrhenius a fotoeffektus Einstein-féle kvantummagyarázatát elfogadta ugyan, de mivel kvantumelméletért nemrég kapott Planck Nobel-díjat, Arrhenius véleménye ekkor még az volt, hogy inkább a fotoeffektus kísérleti igazolásáért járna most a díj. Ezek után a Bizottság az 1921. évi fizikai Nobel-díj elhalasztására szavazott. Nem először fordult elő ilyesmi: az 1917-ben elhalasztott Nobel-díjat Barkla csak 1918-ban, az 1918-as késleltetett Nobel-díjat Planck csak 1920 nyarán vehette át, de ez a halasztás most mégis nagy meglepetést keltett a közvéleményben.

1922-ig Einsteinre összesen 63 javaslat érkezett, a legtöbb (17) éppen ebben az évben. Sokan ismételték meg előző évi javaslatukat, s az új javaslattevők közé felsorakozott *Arnold Sommerfeld* (1868–1951), *Marcel Brillouin* (1854–1948) és Paul Langevin is. A Bizottság számára szóló jelentést a relativitáselméletéről újra Gullstrand, a fotoeffektusra vonatkozó elméletéről pedig Carl Oseen készítette, aki ebben az évben lett tagja a fizikai Nobel-bizottságnak az 1922. május 23-án elhunyt Hasselberg helyett. Arrhenius ebben az évben már a Bizottság elnöke volt. Gullstrand kitartott előző évi álláspontja mellett, Oseen azonban olyan ügyesen érvelt az ensteini fotonkonceptió mellett, hogy meggyőzte a Bizottságot: Einstein fényelektromos törvénye Bohr atommodelljéhez kapcsolódik, mindkettő pedig Planck kvantumelméletéhez. Arrheniust még azzal az érveléssel is maga mellé állította, hogy Einstein díjazása nemcsak a közvélemény várakozásának felel meg, de segítene



Allvar Gullstrand (1862–1930)



Carl Wilhelm Oseen (1879–1944)



Svante Arrhenius (1859–1927)

felújítani a nemzetközi tudományos együttműködést az egymás ellen nemrég még háborút viselő országok tudósai között.

Látva a kedvező alkalmat, Carl Oseen azt javasolta, hogy az 1921-es Nobel-díjat kapja meg Einstein, az 1922-eset pedig Bohr. Ezt azután elfogadták.

A fizikai Nobel-bizottság titkára ekkor *Wilhelm Palmaer* (1868–1942), a Högskola elektrokémia-tanára volt, elnöke a már 63 éves Svante Arrhenius, tagjai pedig a szintén 63 éves Vilhelm Carlheim-Gyllensköld, a 60 éves Allvar Gullstrand és a 43 éves (Einsteinnel egyidős) Carl Oseen. (Időközben 1922. szeptember 18-án elhunyt az 56 éves Gustaf Granqvist is.) A Bizottság javaslatát a Svéd Királyi Tudományos Akadémia megszavazta.

Az Akadémia titkára – ahogy az ilyenkor lenni szokott – 1922. november 10-én táviratilag értesítette Einsteint és Bohrt a kedvező döntésről, és egyben meghívta őket a december 10-i díjátadásra. Csakhogy ezt a táviratot Einstein már nem tudta átvenni Berlinben, mert éppen a világ másik oldalán hajózott, úton volt Japánba! Az Akadémia nehéz helyzetbe került. Kinek adja át *V. Gusztáv* svéd király Einstein Nobel-díját? Ki lehet méltó azt átvenni? Úgy gondolták, hogy annak az államnak a stockholmi nagykövete, ahonnan a kitüntetett származik. Meg is hívták a német nagykövetet, de ekkor meg a svájci nagykövet kezdett tiltakozni, mondván, hogy Einstein svájci állampolgár! Izgatott telefonálgatások, egyeztetések után végül is *Rudolf Nadolny* (1873–1953) német nagykövet, tapasztalt diplomata vette át a díjat, s a díjátadást követő ünnepi banketten a következő szavakkal igyekezett feloldani a feszültséget: „Szeretném kifejezni a német nép örömét, hogy ismét közülük volt képes valaki az egész emberiség javát szolgáló értéket teremteni. Azt remélem, hogy Svájc is, ahol a tudós hosszú éveken át otthonra lett és munkára talált, osztozni fog ebben az örömben.”

Lássuk hát a laudációt, amelyet a fizikai Nobel-bizottság elnöke tartott december 10-én.

A beszéd svéd nyelven hangzott el, az angol fordítás a *Nobel Lectures, Physics 1901–1921* (Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1967) kiadványban jelent meg.

„Felség, Királyi Fenségek, Hölgyeim és Uraim!

Valószínűleg nincs ma még egy fizikus, akinek neve olyan széles körben lenne ismert, mint Albert Einsteiné. Legtöbbször Einstein relativitáselméletéről beszélnek az emberek. Ennek ugyanis szükségképpen vannak ismeretelméleti vonatkozásai, amelyek élénk vitát váltottak ki a filozófusok körében. Nem titok, hogy *Bergson*, a híres párizsi filozófus megtámadta ezt az elméletet, más filozófusok viszont teljes odaadással kiálltak mellette. A kérdéses elméletnek csillagászati vonatkozásai is vannak, ezek szigorú vizsgálata jelenleg is folyik.

Századunk első évtizedében az úgynevezett Brown-mozgás állt az érdeklődés előterében. 1905-ben Einstein egy olyan kinetikus elméletet dolgozott ki erre a mozgásra, amelynek segítségével meghatározta a szuszpenziók – szilárd részecskéket tartalmazó folyadékok – fő tulajdonságait. Ez a klasszikus mechanikán alapuló elmélet segít megmagyarázni a kolloidoldatok viselkedését, amelyet *Svedberg*, *Perin*, *Zsigmondy* és számos más tudós tanulmányozott egy új tudományág, a kolloidkémia keretében.

A tanulmányok harmadik csoportja, amelyekért Einstein a Nobel-díjat kapta, a Planck által 1900-ban megalapozott kvantumelmélet tárgykörébe esik. Ez az elmélet azt állítja, hogy a sugárzó energia „kvantumoknak” nevezett individuális részecskékből áll, nagyjából úgy, ahogyan az anyag is részecskékből, azaz atomokból épül fel. Ez a nevezetes elmélet, amelyért Planck az 1918-as fizikai Nobel-díjat kapta, sok gondot okozott, és századunk első évtizedének közepére egyfajta holtpontra jutott. Ekkor lépett elő Einstein a fajhőre és a fényelektromos hatásra vonatkozó munkáival. Ez utóbbi hatást *Hertz*, a híres fizikus fedezte fel 1887-ben. Azt találta, hogy két fém-

gömb között gyakrabban üt át elektromos szikra, ha egy másik elektromos kisülés fénye világítja meg a két gömb közötti szikra útját. *Hallwachs* alaposabban megvizsgálta ezt az érdekes jelenséget, és megmutatta, hogy adott feltételek esetén egy negatívan töltött test, például fémlemez, midőn egy bizonyos színű fényel megvilágítják – az ultrabolya adta a legerősebb hatást – elveszti negatív töltését és végül pozitív töltésűvé válik. 1899-ben Lenard tárta fel a jelenség okát azzal, hogy demonstrálta: elektronok lépnek ki bizonyos sebességgel a negatívan töltött testről. A legmeglepőbb az volt, hogy a kilépő elektron sebessége független a megvilágítás erősségétől – ezzel a kilépő elektronok száma arányos – viszont a sebesség a fény frekvenciájával együtt növekszik. Lenard hangsúlyozta, hogy ez a jelenség nem volt összhangban az akkor érvényes elképzelésekkel, fogalmakkal.

Ide csatlakoztatható jelenség a foto-lumineszcencia, vagyis a foszforeszcencia és a fluoreszcencia. Bizonyos anyagok, ha fény éri őket, maguk is világítani kezdenek. Mivel a fénykvantum energiája nő a frekvenciával, nyilvánvaló, hogy egy bizonyos frekvenciájú fénykvantum csak nála kisebb, vagy legfeljebb egyenlő frekvenciájú fénykvantum kialakulásához vezethet. Egyébként energia keletkezne. A foszforencia és a fluoreszcencia során keletkező fény így csak kisebb frekvenciájú lehet, mint az a fény, amely keltette azt. Ez a Stokes-féle szabály tehát magyarázatra talált Einstein kvantumelméletében.

Hasonlóképpen, amikor fénykvantum esik egy fémlemezre, legfeljebb a teljes energiáját tudja átadni egy ottani elektronnak. Ezen energia egy része arra használandó fel, hogy kilépjen az elektron a levegőbe, a többitől lesz az elektron kinetikus energiája. Mindez a fém felületi rétegében lévő elektronra vonatkozik. Ki lehet számítani azt a pozitív potenciált, amely-

re a fém fénybesugárzással feltölthető. Csak akkor tud kilépni az elektron a levegőbe, ha a fénykvantum elegendő energiával rendelkezik ahhoz, hogy fedezze a munkát, amellyel az elektron leválasztható a fémről. Következésképpen csak bizonyos értéknél magasabb frekvenciájú fény képes fényelektromos hatást kiváltani, akármilyen nagy is a beeső fény intenzitása. Ha viszont a frekvencia már ezt a határértéket meghaladta, akkor az állandó frekvenciájú fény intenzitásával arányosan nő a hatás. Hasonló folyamat történik a gázmolekulák ionizációjakor is, és az ionizálásra képes fény frekvenciájának ismeretében az úgynevezett ionizációs potenciál kiszámítható.

Einstein fényelektromos hatásra adott törvényét különösen szigorúan tesztelte az amerikai *Millikan* tanítványával, s a törvény ragyogóan vizsgázott. Einstein tanulmányainak köszönhetően a kvantumelmélet nagy mértékben kiteljesedett, bőséges irodalom bontakozott ki ezen a területen, kétségtelenül bebizonyosodott az elmélet fontossága. Einstein törvénye a kvantitatív fotokémia olyan bázisává vált, mint amilyen bázisa *Faraday* törvénye az elektrokémiának.”

IV. Einstein Nobel-díjának utóregzései

Még vissza se ért Einstein Japánból Európába, de már megérkezett a Svéd Királyi Tudományos Akadémiához Philipp Lenard négy oldalas tiltakozó levele, amiért Einsteinnak ítelték („érdemtelenül!”) a Nobel-díjat. A levél eljutott a sajtóhoz is, amely azután örömmel csámcsogott rajta.



Márciusban már Berlinben vette át Einstein Arrhenius levelét, amelyben azt javasolta, hogy Einstein júliusban látogasson el Göteborgba, ahol a város alapításának 300. évfordulóját fogják ünnepelni, s ahol megtarthatná Nobel-előadását is, mégpedig a relativitáselmületről. (Olvashattuk a laudációban, hogy Arrhenius 1922-ben a relativitáselmületet már az egyik olyan témaként említette, amelyért Einstein a Nobel-díjat kapta.) Einstein válaszában megköszönvén a lehetőséget, előadása témájául az egyesített térelméletet ajánlotta.

Szokatlan meleg volt 1923. július 11-én Göteborgban. Einstein mégis kitett magáért: ünnepélyes fekete öltönyben jelent meg a Jubileumi Hallban, mintegy kétezer (!) meghívott vendég előtt, s így tartotta meg az előadást, amelynek címe végül is ez lett: *A relativitáselmélet alapvető fogalmi és problémái*. Vagyis eleget tett Arrhenius kérésének. A hallgatóság soraiban elől, középen ült V. Gusztáv svéd király, aki az előadás után néhány szót is váltott Einsteinnel...

Einstein előadása 2000 fős hallgatóságának 1923. július 11-én.



Magát az érmet és az okmányokat a berlini svéd nagykövet adta át Einsteinnek Berlinben, a vele járó pénzüsszeget pedig Einstein – a váláskor tett írásbeli nyilatkozatához híven – átutalta Milevának, elvált feleségének, a fiúk számára. Mileva az összeg kamataihoz férhetett hozzá, abból gazdálkodhatott.



Allvar Gullstrand, a relativitáselmélet legfőbb bírálója a Nobel-bizottságban, a következő évben, 1923-ban átvette Arrheniustól a Bizottság elnöki tisztét. A fényelektromos hatás magyarázatáért járó 1922-es Nobel-díjjal ő is egyetértett.

Amikor 1923-ban Robert Millikan (1868–1953) amerikai kísérleti fizikusnak ítelték a fizikai Nobel-díjat, Allvar Gullstrand tartotta a laudációt, s többek között ezeket mondta: „Millikan kitüntetésének indoklásakor az Akadémia nem feledkezhet meg a fényelektromos hatásra vonatkozó vizsgálatairól. Anélkül, hogy részletekbe bocsátkoznék, annyit állíthatok, hogy ha Millikannek ezek a vizsgálatai más eredményt adtak volna, Einstein törvénye értéktelenné, Bohr elmélete pedig megalapozatlanná vált volna. Millikan eredményei nyomán kaptak mindketten fizikai Nobel-díjat a múlt évben.”

Millikan Nobel-díjának hivatalos indoklásában ez állt: „az elektromosság elemi töltésére és a fényelektromos hatásra vonatkozó munkájáért”. Nem nehéz az indoklás második feléből megsejteni a Bizottság új elnökének fenti álláspontját.



Arrhenius Einstein laudációjában kiemelte Einstein Brown-mozgásra kidolgozott elméletét, s ennek kapcsán megemlítette Svedberg, Perrin és Zsigmondy nevét. Arrhenius jó jósnak bizonyult: Richard Zsigmondy (1865–1929) 1925-ben, Theodor Svedberg (1884–1971) 1926-ban kapott kémiai Nobel-díjat.

A fizikai Nobel-díjat 1926-ban Jean Baptiste Perrin (1870–1942) francia fizikus vehette át. A laudációt ekkor Carl Oseen tartotta, aki újra megtalálta az utat Einsteinhez, miközben Perrin munkáját dicsérte: „A Brown-mozgásra vonatkozó mérései megmutatták, hogy Einstein elmélete teljes egyezésben van a valósággal.”



1981-ben a lézer-spektroszkópia és az elektron-spektroszkópia kifejlesztéséért járt fizikai Nobel-díj. Így kezdte laudációját *Ingvar Lindgren* (1931–) göteborgi fizikaprofesszor:

„Mindkét módszer Albert Einstein korábbi felfedezésén alapul. A múlt század fizikusai előtt álló egyik súlyos probléma volt, hogy hogyan lehet a »klasszikus« fogalmakkal értelmezni a fényelektromos hatást, vagyis a rövid hullámhosszú fényvel megvilágított fémfelületről kilépő elektronok emisszióját. 1905-ben Einstein magyarázta meg ezt a jelenséget, egyszerű és elegáns módon, felhasználva a Max Planck által öt évvel korábban bevezetett kvantumhipotézist.”

Később még hozzátette: „1917-ben Einstein fedezte fel, hogy a fény arra tudja stimulálni az atomokat vagy a molekulákat, hogy összehangolt módon bocsássa ki fényt. Ez az alapfolyamat a lézerben.” Ha az



Olga Botner (1953–)

1917-es dátumot tekintjük, eszünkbe juthat, hogy akár ez a felfedezés is szerepelhetett volna Einstein 1921-es Nobel-díjának indokai között. De azután az is eszünkbe juthat, hogy közben sajnos háború volt, amikor köztudottan hallgatnak a műzsák, és nemigen értesülnek egymás munkáiról a tudósok...



Végül tekintsünk egy 21. századi laudációt. Nem is olyan régen, 2011-ben „a Világegyetem gyorsuló ütemű tágulásának távoli szupernóvák megfigyelésével történt felfedezéséért” adták ki a fizikai Nobel-díjat. A laudációt *Olga Botner* (1953–) dán fizikus, az uppsalai egyetem professzora, a fizikai Nobel-bizottság tagja tartotta – egyáltalán nem a régi uppsalai szellemben. Stílszerűen egy dán gyermekverssel indított és olyan természetességgel jutott el néhány mondat múlva a Nagy Bummtól a lehetséges Nagy Krachig, mintha csak az unokáinak mesélt volna. Ugyanilyen természetességgel mondta ki ezt a mondatot is: „Ha összevetjük a különböző objektumokra mért vöröseltolódásokat, és a táguló Univerzumra alkalmazzuk mindazokat a modelleket, amelyeket Einstein általános relativitáselmélete megenged, rátalálhatunk arra a modellre, amelyik valódi világunkat írja le.”

Ezt hallván, Einstein is csettintene.

Vagy már csettintett is?

Források

- Vészits Ferencné (szerk.): *A Nobel-díjasok kislexikona*. Gondolat, Budapest, 1974.
- Albert Einstein: *A speciális és általános relativitás elmélete*. Gondolat, Budapest, 1967.
- Elisabeth Crawford: *The Beginnings of the Nobel Institution: The Science Prizes, 1901–1915*. Cambridge Univ. Press, 1985.
- Abraham Pais: *Subtle is the Lord, The science and the life of Albert Einstein*. Oxford Univ. Press, 1982, 2005.
- Jimena Canales: *The Physicist and the Philosopher: Einstein, Bergson and the debate that changed our understanding of time*. Princeton Univ. Press, 2015.
- B. J. Hillman, B. Ertl-Wagner, B. C. Wagner: *The Man Who Stalked Einstein: How nazi scientist Philipp Lenard changed the course of history*. Rowman & Littlefield, 2015.
- Internetoldalak, például: <http://www.nobelprize.org>

A paksi atomerőmű jelenleg üzemelő négy VVER-440¹ típusú blokkjának üzemideje 2032 és 2037 között lejár. A leállításra kerülő reaktorok teljesítményének pótlására két VVER-1200 típusú reaktort fognak építeni, amelyek a tervek szerint 2025-ben és 2026-ban lépnek üzembe.

A világon üzemelő legtöbb erőművi reaktorhoz és a jelenlegi paksi blokkokhoz hasonlóan az új reaktorok is urán-dioxid üzemanyaggal fognak működni. A VVER-1200 üzemanyag-kazetta sok hasonlóságot mutat a VVER-1000 reaktorok kazettáival. Kifejlesztésekor támaszkodtak a VVER üzemanyagok gyártásának és erőművi használatának több évtizedes tapasztalataira.

A VVER-440 üzemanyag fejlesztése

A paksi atomerőmű reaktorainak aktív zónájában jelenleg használt kazetták sok tekintetben eltérnek attól az üzemanyagtól, amivel a blokkok a nyolcvanas években elindultak. Az orosz fűtőelemgyárak 1997-ig olyan kazettákat gyártottak, amelyek fűtőlemeiben azonos dúsítású tabletták voltak. 1998-tól megjelentek az úgynevezett profilírozott kazetták, amelyekben szigorú elrendezés szerint, különböző dúsítású fűtőelemek voltak elhelyezve. 2003 után megkezdődött a Gd (gadolinium) kiégőmérget² tartalmazó kazetták gyártása is. Jelenleg Pakson és más VVER-440 erőművekben is Gd-tartalmú, profilírozott kazettákkal üzemelnek. Ezeket a fejlesztéseket elsősorban a gazdaságosabb üzemanyag-felhasználás és a teljesítménynövelés motiválta. A továbbfejlesztett kazettákkal egyre nagyobb kiégéseket érnek el, csökken a kampányonként cserélendő kazetták száma, a fűtőelemek egyre hosszabb időt töltenek a reaktorban, és mindezzel együtt csökken az egységnyi villamos energia előállításához felhasznált természetes urán mennyisége [1]. A VVER-440 üzemanyag továbbfejlesztése teszi lehetővé azt is, hogy a paksi atomerőműben áttérjenek a 15 hónapos kampányokra a jelenlegi 12 hónapról [2].

¹ VVER (oroszul: ВВЭР – водо-водяной энергетических реактор) szovjet, majd orosz fejlesztésű és gyártmányú nyomottvízes reaktortípus-család, amely 440, 1000 és 1200 MW teljesítményű változatokat tartalmaz. A VVER típus alapelveit Szavelij Frejberg dolgozta ki a Kurcsatov Intézetben 1954-ben.

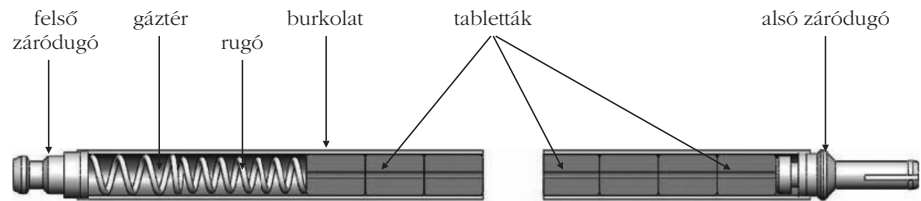
² Kiégőmérget: olyan anyag, amely nagy hatáskeresztmetszettel nyeli el a neutronokat, és ezáltal olyan izotóppá alakul, amely további neutronot már csak kis valószínűséggel nyel el. Egy friss kazettába a sok hasadóképes anyag reaktivitásának „lekötésére” ilyen „mérgeket” tesznek. Ezek az anyagok a reaktorüzem során a hasadóanyaggal párhuzamosan fogynak, „kiégnek”, így az ilyen kötegeket tartalmazó reaktorzónákkal az eredeti szabályozórendszer változtatása nélkül is nagyobb teljesítmény vagy hosszabb üzemidő érhető el.

A VVER-1000 üzemanyag fejlesztése

A VVER-1000 reaktorokban megőrizték a fűtőelemek háromszög-rácsos elrendezését, de a hatszög-keresztmetszetű kazetták mérete és konstrukciója jelentősen eltér a VVER-440 kazettától. Az első VVER-1000 reaktor a novovoronyezsi erőmű ötös blokkja volt. A prototípus fejlesztésének tapasztalatai alapján a szériában gyártott VVER-1000 blokkok zónája és üzemanyaga jelentősen változott. A novovoronyezsi reaktorban 151 kazettából állt a zóna, egy kazettában 317 fűtőelem és 12 szabályozó és biztonságvédelmi (SzBV) rúd volt. A kazettát 1,5 mm vastag cirkónium kazettafal vette körül. A további blokkon elhagyták a kazettafalat, a zónát pedig 163 darab olyan kazettából állították össze, amelyekben 312 fűtőelem és 18 SzBV-rúd volt [3]. A VVER-1000 kazetták további fejlesztéseinek indokai között megjelent a kazetták megbízható működésének elősegítése, a teljesítménynövelés, a kampányhossz növelése, a kiégés növelése és a teljesítménykövető üzemmód bevezetése. A jelenleg használt kazetták átlagos ²³⁵U dúsítása megközelíti az 5%-ot [1]. A kazetta stabilitásának növelésére merev szerkezetet alakítottak ki. Törmelékiszűrőt építettek be az idegen tárgyak bejutásának megakadályozására és antivibrációs rácsokat fejlesztettek ki a rezgések csökkentésére [1]. Továbbfejlesztették a fűtőelem burkolatát és a kazetta szerkezeti anyagát képező cirkónium-ötöveteket a sugár- és korrózióállóság növelésére. Keverőrácsot építettek be a hőátadás javítására. A gázkibocsátás és a tablettaburkolat kölcsönhatás csökkentésére megnövelték az UO₂ szemcsék méretét [4]. A fűtőelemes fejlesztések fontos szerepe volt abban, hogy az oroszországi VVER-1000 erőművek többségében 2012 és 2014 között áttértek a 18 hónapos kampányokra [5].

A kazetták szerkezeti elemeinek egy része kezdetben acélból készült, 1998-ban tértek át a cirkóniumkomponensekre. Ezekkel párhuzamosan bevezették a Gd kiégőmérget tartalmazó kazettákat is, és az eredetileg fix fejrészt levehetőre cserélték. A levehető fejrésszel lehetővé vált a kazetták szétszerelése és a szivárgó fűtőelemek eltávolítása az erőművekben. A kazetta szerkezetének rögzítéséhez a TVSA jelű kazettáknál függőleges sarokpántokat is használtak. A TVS-ALFA típusnál vékonyabb burkolatot és tömör tablettákat vezettek be. A 2006-tól gyártott TVS-2M típusnál masszív távtartórácsok rögzítik a fűtőelemeket. E típus fűtőelemei 150 mm-rel hosszabbak a korábbi kazetták fűtőelemeinél. A VVER-1200 reaktor jelenlegi terveiben szereplő kazetta a TVS-2M kazetta továbbfejlesztésének tekinthető, mivel a két konstrukció csak abban különbözik, hogy az új kazetta fűtőelemei 5 cm-rel hosszabbak (és ugyanennyivel rövidebb az új kazetta fejrésze) [1].

Az orosz fűtőelemgyártón kívül a Westinghouse is kifejlesztette a saját VVER-1000 kazettáját, amely természetesen az orosz kazettákhoz hasonló geometriai elrendezéssel rendelkezik [6]. A VVER kazettában hasznosították a korábbi PWR fejlesztések tapasztalatait. Tömör, dúsított UO_2 tablettákat használtak, de a fűtőelemekben elhelyeztek néhány lyukas, természetes urántartalmú tablettát is, a belső gáznyomás optimalizálására. A kazetta Zircaloy-4 és ZIRLO komponensekből állt. Az SzBV-rudak bór-karbidot és ezüst-indium-kadmium ötvözetet tartalmaztak. A tabletták egy részének külső felületére ZrB_2 kiégőmérégből képezett réteget vittek fel. A VVER-1000 kazettákat a PWR kazettákhoz hasonló masszív távtartórácsokkal látták el. A temelini erőműben 10 évig használtak Westinghouse üzemanyagot, majd a kazetták deformációja, elhajlása miatt áttértek az orosz üzemanyagra [7]. A Westinghouse üzemanyagot 2009-től Ukrajnában is kipróbálták.



1. ábra. A fűtőelem fő részegységei.

A VVER-440 és a VVER-1200 üzemanyagok összehasonlítása

A VVER-440 és a VVER-1200 reaktorok fűtőelemei nagyon hasonlóak. Mindkettőben 7,6 mm külső átmérőjű, lyukas UO_2 tablettákat helyeznek el 9,1 mm külső átmérőjű, cirkóniumburkolatból készített csövekben. A pálcákat alul és felül cirkónium-záródugókkal látják el. A gyártás során az alsó dugó behegesztése után betöltik a tablettákat a csőbe, felülre egy rugót tesznek be az üzemanyagoszlop hosszváltozásának kezelésére, a csövet héliummal töltik fel, majd a felső záródugó behegesztésével hermetikusan lezárják a fűtőelemet (1. ábra).

Az új reaktor fűtőelemei 1,4 méterrel hosszabbak és a lineáris hőteljesítményük is nagyobb (1. táblázat). A fűtőelemek háromszögárcs szerinti elrendezésben helyezkednek el mind a két típusnál és a kazetta keresztmetszete szabályos hatszög alakú. A VVER-440 kazettában 126 fűtőelem, míg a VVER-1200 kazettában 312 fűtőelem található. A jelenlegi paksi kazettákban a fűtőelemeket kazettafal veszi körül, míg az új kazettáknál nem alkalmaznak kazettafalat. Lényeges különbség, hogy a VVER-440 reaktorokban a szabályozó és biztonságvédelmi funkciót a kazetták felső részéhez csatlakozó bóracél-toldat látja el, a VVER-1200 reaktorokban pedig SzBV-rudakat alkalmaznak. Az SzBV-rudak bejutását a kazetta belsejében található megvezető csövek segítik elő.

A hazai szakemberek számára újdonság lesz, hogy az VVER-1200 kazetták szétszerelhetők. Az erőműben lesznek olyan eszközök, amelyekkel a kazettákon belül azonosítani lehet az inhermetikus fűtőelemeket, azokat el lehet távolítani és az érintett kazetta a reaktorban tovább üzemelhet.

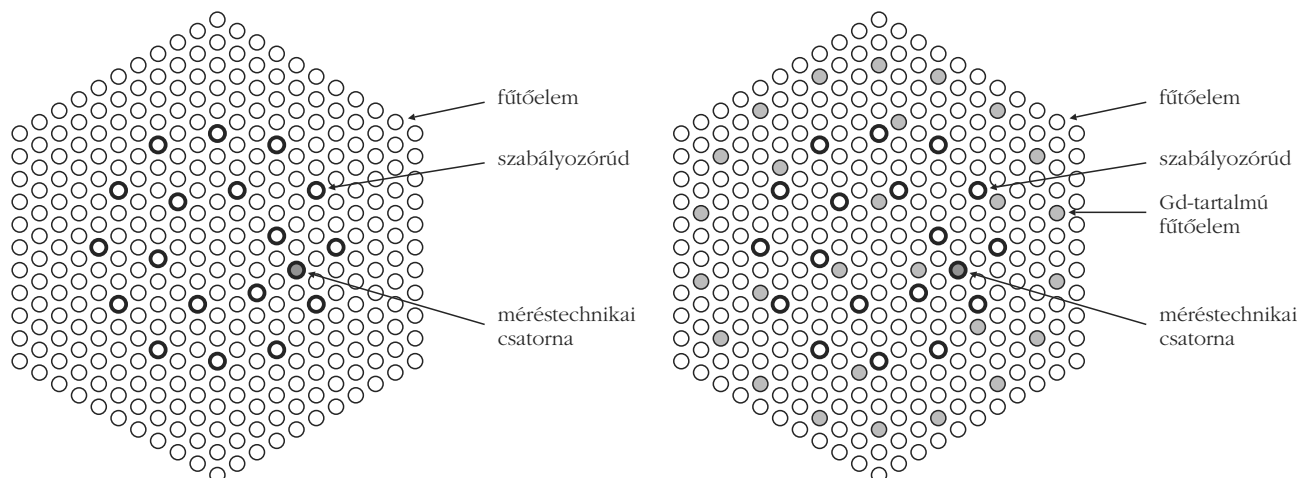
A VVER-1200 kazetta néhány jellemzője

A VVER-1200 reaktor zónája fő méreteit tekintve megegyezik a VVER-1000 zónájával, így a kazetták külső méretei is azonosak. A VVER-1200 kazettában 534 kg UO_2 van, ami 7 kg-mal több, mint a VVER-1000 kazettában. A 312 fűtőelem mellett 18 szabályozórúd kap helyet. Az új kazetta egyik különlegessége, hogy a mérés-technikai csatornát nem a kazetta közepén, hanem attól valamivel kijebb helyezik el. A VVER-1200 zónába egyaránt terveznek gadolíniumos fűtőelemeket tartalmazó és csak UO_2 tablettákkal ellátott kazettákat is (2. ábra).

Az SzBV-rudak bór-karbid és $Dy_2O_3TiO_2$ szakaszokból állnak. A bór-karbidos részek a biztonságvédelmi funkció ellátásakor kerülnek a zónába. A diszprózium-titanát szakaszok – amelyekben nincs gázképződés a magreakciók következtében – a szabályozó funkciók ellátására szolgálnak.

Az új blokkoknak alkalmasnak kell lenniük arra, hogy teljesítménykövető üzemmódban működjenek. Ez ciklikus terhelést jelent a fűtőelemekre. Kulcskérdés, hogy a felterhelések során a tabletták és a burkolat közötti mechanikai kölcsönhatás ne vezethessen a burkolat sérüléséhez. Ezért úgy tervezik a fűtőelemeket, hogy a tabletták és a burkolat méretváltozásai a kiégés során ne vezethessenek intenzív kölcsönhatáshoz. Az üzemeltetés során pedig törekedni kell arra,

1. táblázat		
A VVER-440 és a VVER-1200 kazetták fő jellemzői [8, 9]		
	VVER-440	VVER-1200
a fűtőelem hossza	2600 mm	4033 mm
az üzemanyagoszlop hossza	2480 mm	3730 mm
a tabletták külső/belső átmérője	7,6/1,2 mm	7,6/1,2 mm
a burkolat külső/belső átmérője	9,1/7,8 mm	9,1/7,8 mm
a He töltőgáz nyomása	6 bar	20 bar
átlagos lineáris hőteljesítmény	13,8 kW/m	16,7 kW/m
maximális lineáris hőteljesítmény	32,5 kW/m	42 kW/m
a kazetta magassága	3217	4570 mm
kazettafal	van	nincs
fűtőelemek száma a kazettában	126	312
kulcsméret	145 mm	235 mm
SzBV-toldat	bóracél	nincs
SzBV-rudak	nincs	18 db



2. ábra. VVER-1200 kazetták keresztmetszeti képe és a kazetták fő komponensei.

hogyan a zónában ne keletkezzenek olyan egyenlőtlen-ségek, amelyek lokálisan magas mechanikai feszültségek kialakulásához vezethetnének a burkolatban.

A VVER-1200 üzemanyag fejlesztése a következő években is folytatódni fog [5]. A fűtőelemgyár tervezi tömör tabletták és vékonyabb burkolat bevezetését. Valószínűleg új típusú keverőrácsokat vezetnek be a hőelvitel optimalizálására. Vizsgálják az erbium kiégőanyag használatát, és folyik a cirkónium-ötvezetek továbbfejlesztése is. Az 5%-nál nagyobb ^{235}U dúsítás bevezetése is valószínűleg hamarosan napirendre kerül, ehhez azonban a fűtőelemgyárak számos, maximum 5% dúsításra tervezett berendezését is meg kell változtatni.

Az orosz szállító hosszú távú terveiben szerepel a kiégett üzemanyag újrahasznosítása is [10]. A REMIX (REgenerated MIXture of U, Pu oxides) típusú üzemanyagban a kiégett üzemanyagból kinyert plutóniumhoz és uránhoz természetes uránból származó dúsított uránt adnak. Az így létrehozott üzemanyagban körülbelül 1% ^{239}Pu és 3% ^{235}U hasadóanyag van. Ez a megoldás továbblépést jelent a jelenleg használatos MOX (Mixed Oxide) üzemanyaghoz képest, amely csak a plutóniumot hasznosítja a reprocessálás után.

Következtetések

Az új paksi reaktorok üzemanyagában hasznosul a VVER kazetták gyártásának és üzemeltetésének több évtizedes tapasztalata. Várható, hogy a tíz év múlva induló blokkokban a jelenlegi tervekben szereplő kazetták továbbfejlesztett változatai jelennek majd meg.

Irodalom

1. V. Molchanov: Nuclear fuel for NPPs, Current Status and Main Trends of Development. *10th Int. Conf. WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, 2013, Bulgaria
2. Czibula Mihály: Üzemeltetési ciklus hosszabbítás az MVM PA Zrt. VVER-440 blokkokon. *XIII. Nukleáris Technikai Szimpózium*, Paks, 2014, http://nuklearis.hu/sites/default/files/docs/XIII_szimpozium/03.pdf
3. A. N. Prytkov, A. B. Tereshchenko, Yu. N. Kravchenko, N. V. Boldyrev, I. V. Pozychanyuk, D. I. Lisitsin, E. I. Golubev: Transition of Novovoronezh Unit 5 reactor VVER-1000 to uranium-gadolinium fuel and implementation of control based on local parameters. *10th Int. Conf. WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, 2013, Bulgaria
4. A. Enin, Y. Bezborodov, D. Pluzhnikov: Improvement of VVER-1000 FA design and manufacturing techniques. Main operational results for VVER-1000 fuel assemblies fabricated at JSC NCCP. *10th Int. Conf. WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, 2013, Bulgaria
5. Yu. Ryabinin, O. Novikova: Experience on new fuel implementation at VVER-1000 NPPs in Russia in course of the power up-rate program. *10th Int. Conf. WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, 2013, Bulgaria
6. R. Svoboda: Implementation of New Fuel System at Temelin. *Nuclear Power for the People*, Nesebar 26–29 September, 2010, www.bgns.bg/web/pub/bgns/7_paper.doc
7. Horváth Á.: Nyomottvízes atomreaktorok fűtőelem-kötegeinek elhajlása. *Nukleon* (2013) 136. http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_6_2_136_Horvath.pdf
8. Generation 2 Fuel Assembly TVS-2M. http://www.gidropress.podolsk.ru/files/booklets/en/TVS_angl.pdf
9. Nuclear Fuel for VVER reactors. http://tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/resources/21e9e68040dca3578c7bfe6048932ed2/4_Brochure_VVER_ENG.pdf
10. Yu. S. Fedorov, O. V. Kryukov, A. V. Khapeskaya: Multiple Recycle of REMIX Fuel Based on Reprocessed Uranium and Plutonium Mixture in Thermal Reactors. *Int. Conf. Spent Fuel Management*, 15–19 June, 2015, Vienna



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!**

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-41**



KVANTUMJELENSÉGEK KOZMIKUS MÉRETEKBEN: A 2015. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJ ÉS HÁTTERE

Király Péter
MTA Wigner Kutatóközpont RMI

A 2015. évi fizikai Nobel-díjat fele-fele arányban két nagy kutatócsoport vezetője – a japán Szuper-Kamio-kande kísérlettől *Takaaki Kajita* és a kanadai Sudbury Neutrínó Observatóriumtól *Arthur B. McDonald* – kapta az ezredforduló táján elért neutrínófizikai eredményekért. A Nobel-díj Bizottság hivatalos indoklása: „A neutrínóoszillációk felfedezéséért, amelyek megmutatják, hogy a neutrínóknak van tömegük.”

A díj odaítélésének bejelentésekor a Bizottság két ismertető anyagot is közzétett [1, 2], az egyiket „gyalogosok”, a másikat szakemberek számára. E két anyag közérthetően, illetve szakszerűen ismerteti a neutrínóoszillációk vizsgálatának történetét és az új felfedezéseket, elolvasásuk a *Fizikai Szemle* olvasói számára is ajánlott, bár ők a folyóirat korábbi számaiban már elég alaposan tájékozódhattak a témakörrel (különösen ajánlom itt *Fényes Tibor* 2012-es cikkét [3], valamint a régi füzetekben *Marx György* írásait).

A bejelentés kapcsán azonban sokakban maradt némi hiányérzet. Egyrészt úgy emlékeztek, hogy a neutrínóoszillációk és a neutrínótömeg létezése már sokkal korábban is evidencia volt, sőt Nobel-díjakat is kiosztottak ezzel kapcsolatban. Másrészt felidéztek azok nevét, akik a díjazottaknál talán érdemesebbek lettek volna a díjra. Mindkettőben van némi igazság, de itt figyelembe kell venni a díjazás szabályait is.

A Nobel-díj bizottságok munkája egyre nehezebbé válik, különösen a nagy kísérleti kollektívák által elért eredmények megítélésénél. Ma már a részeredmények publikációiban is gyakran ezernél több társszerző szerepel. Hatalmas feladat hárul a csoportok vezetőire, de nehéz szétválasztani, hogy mekkora a szervezői, illetve a tudományos érdemük. Az viszont igaz, hogy ilyen nagy csoportok vezetésére általában elismert kutatókat választanak. Elméleti eredmények értékelésénél talán valamivel egyszerűbb a helyzet, de itt is probléma, hogy az egyes ötletek egymásra épülnek, nem könnyen választhatók szét. Mekkora az ötletadók, illetve az ötletek kidolgozóinak, illetve publikálóinak érdeme? Szabály az is, hogy csak élő személyek kaphatják meg az elismerést. A felfedezés és a Nobel-díj odaítélése közötti

hosszú idő óhatatlanul a hosszabb életűeknek kedvez, és a korábban elhalt társakat az utókor is könnyebben elfelejti. Az alábbiakban – részben saját emlékeim alapján – megpróbálok egy kis áttekintést nyújtani e Nobel-díj előzményeiről és azokról, akiknek fontos szerepe volt, de már nincsenek közöttünk.

Semleges részecskék és oszcillációik

Wolfgang Pauli 85 éve írta meg híres levelét a „radioaktív hölgyeknek és uraknak” arról, hogy a β -bomlásnál az elektron mellett egy semleges részecskének is keletkeznie kell, aminek közvetlen detektálhatóságát ő kevéssé tartotta valószínűnek. Ez az először neutronnak, majd az atommagok részét képező neutron felfedezését követően neutrínónak keresztelt hipotetikus részecske az elméleti fizikán belül hamar polgárjogot nyert, tényleges kísérleti kimutatására viszont egészen az 50-es évekig kellett várni. Arra viszont csak 1962-ben derült fény, hogy legalább kétféle neutrínó létezik: egyik az elektronhoz, másik annak nagyobb tömegű testvérehez, a müonhoz társul. Emlékszem, hogy 1962 nyarán Jénában voltunk szakmai gyakorlaton fizikus szakos évfolyamtársaimmal, és ott kaptuk a hírt e nem várt felfedezésről. Bár *Nagy Károlytól* és *Marx Györgytől* jó elméleti felkészítést kaptunk, a hír jelentőségét akkor nem tudtuk felfogni. Pedig a semleges kaonok oszcillációiról már tudtunk, egyik évfolyamtársunk ebből a témából készült diplomamunkája megírására is. Kozmikus

Takaaki Kajita



Arthur B. McDonald



sugárzási témákról is tanultunk *Fenyves Ervintől*, akinél a müon-bomlásnál kimutatható paritássértésből készültem kísérleti diplomamunkát írni. Azt persze nem sejtettük, hogy a két, már ismert tömeges leptonhoz később egy harmadikat is találnak, és mindháromhoz neutrínó is társul, amelyek akár kozmikus méretű távolságokon is képesek a semleges kaonokhoz hasonló kvantummechanikai oszcillációs jelenségeket mutatni. Azóta több Nobel-díjat is kiosztottak neutrínófizikai eredményekért. A két idei díjazott nagy kutatócsoportok vezetőjeként érdemelte ki az elismerést a hiányzó Nap-neutrínók rejtélyének megoldásáért, illetve a kozmikus sugárzás hatására a légkörben keletkező részecskék bomlásából származó neutrínók vizsgálatáért. A két csoport eredményei a korábbiaknál közvetlenebb bizonyítékot adtak arra, hogy a neutrínók tömege nem zérus, bár ezt már korábbi közvetett bizonyítékok alapján is sejteni (többek szerint tudni) lehetett.

Pauli hipotézise alapján 1934-ben *Enrico Fermi* alkotta meg a gyenge kölcsönhatások elméletét. Kísérleti téren ekkor az elemi részecskék fizikáját a kozmikus sugárzási vizsgálatok uralták. A pozitron, müon, pion felfedezése is ilyen kísérletek során történt. A második világháború idején *Jánossy Lajos* és *George Rochester* Manchesterben igen kifinomult koincidencia-technikát fejlesztett ki új részecskék keresésére és a kölcsönhatások tanulmányozására. A háború befejezése után Jánossy Dublinba ment, Rochester viszont lehetőséget kapott arra, hogy új munkatársával, *Clifford Butlerrel*, sokkal jobb anyagi körülmények között folytassa kutatásait, így modernizált ködkamrájukban erős mágneses tér mellett is tudtak méréseket végezni. 1946–47-ben két érdekes, V-alakú nyomot találtak, amelyek tulajdonságait az ismert kölcsönhatások alapján nem tudták értelmezni [4]. Később ezek a hiperon, illetve a kaon bomlásából származónak bizonyultak. E nyomokról Rochester az első külföldi előadását Jánossy meghívására Dublinban tartotta, amin neves elméleti szakemberek is részt vettek. Mint kiderült, később magas hegyeken sokkal több hasonló nyomot sikerült detektálni. Ezek voltak az első kísérletileg megfigyelt „ritka” részecskék, amelyek a későbbi terminológia szerint a ritka (strange) kvarkot tartalmazták.

A semleges kaon, illetve antirészecskéje erős kölcsönhatásban születik, de csak gyenge kölcsönhatásban tud elbomlani. A két és három pionra való bomlást is megfigyelték mindkettőnél, más-más bomlási állandóval. Kiderült, hogy a gyenge kölcsönhatási sajátállapotok jó közelítésben a kaon és az antikaon „+”, illetve „-” előjellel vett szuperpozíciói, és a töltéstükrözés (C) és paritás (P) operátorok szorzatának sajátállapotai. A gyorsan bomló változat 2 pionra bomlik, nem sértve a CP-paritást, míg a lassan bomló változat számára csak a 3 pionra bomlás megengedett. A semleges kaonoknak nagy szerep jutott a paritássértés (1956), majd később a CP-sértés (1964) felfedezésénél is. Mindkét felfedezés Nobel-díjat ért. Mivel a két CP-sajátállapot tömege kissé különbözik, a szu-

perpozícióban a relatív fázis idővel eltolódik, vagyis a két állapot között oszcilláció lép fel. *Bruno Pontecorvo* már 1957-ben felvetette, hogy ha a szintén semleges neutrínó tömege (a korábbi várakozásokkal ellentétben) nem pontosan zérus, akkor esetleg ott is felléphetnek hasonló oszcillációk. Ekkor még a müon-neutrínó nem volt ismert, így neutrínók és antineutrínók közötti átalakulásokra gondolt.

A Nap-neutrínók rejtélye

Régóta érdekli a fizikusokat és csillagászokat, de a laikus közvéleményt is, hogy mitől és meddig világít a Nap. A felszínt jól látjuk (de például a forró napkorona stabilitását most sem értjük igazán), viszont a Nap legbelső részében végbemenő energiatermelési folyamatokról sokáig csak elméleti elképzeléseink voltak. Ezek szerint az alapvető folyamat a hidrogén héliummá alakulása, amelynek részfolyamatai különböző energiaspektrumú neutrínókat hoznak létre, amelyek azután a várakozások szerint szinte akadálytalanul eljutnak hozzánk. Csak egy elég érzékeny, energiaspektrumokat is mérni képes neutrínóteleszkópra van tehát szükség ahhoz, hogy beelérjünk a Nap belsejébe, és ellenőrizzük elméleteinket. A Napból érkező neutrínók várható fluxusa cm^2 -enként és másodpercenként mintegy 60 milliárd, így a feladat első látásra nem látszik túl nehéznek.

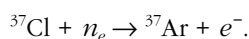
Van azonban néhány bökkenő. A modellek szerint a Nap-neutrínók túlnyomó része 1 MeV-nél kisebb energiájú, és nagyon nehezen detektálható. A mindenütt jelen lévő radioaktív szennyeződések hatásának csökkentése is hatalmas feladatot jelent. A nagyobb, körülbelül 14 MeV-ig terjedő energiájú neutrínók sokkal kevesebben vannak, és a kozmikus sugárzás másodlagos, Földünk légkörében létrejövő komponense ezek megfigyelését is nehezíti. Ezért a méréseket mélyen a földfelszín alatt kell végezni. Végül nagyon nagy tömegű detektorokra van szükség, hogy a detektált események száma ne legyen túl kicsi.

Az antineutrínók atomreaktorból származó fluxusát *Fred Reines* és *Clyde Cowan* 1956-ban már sikeresen megmérte, ezzel bebizonyítva, hogy Pauli pesszimizmusa indokolatlan volt. Ezért a bravúros méréseért Reines csak 1995-ben kapta meg a Nobel-díjat (sajnos Cowan már 1974-ben elhunyt) *Martin Perl* társaságában, aki a tau-lepton felfedezéséért részesült az elismerésben. Ez utóbbi, a müonnál is jóval nehezebb lepton neutrínópárját viszont csak később, 2000-ben sikerült detektálni.

Raymond Davis méréseivel kissé bővebben kell foglalkoznunk, mivel ezek meglepő eredményei adták a fő motivációt az idén Nobel-díjjal jutalmazott Nap-neutrínó mérésekhez. Ő maga 2002-ben részesült az elismerésben. Vele együtt kapta meg a díjat *Masatoshi Koshiba* is, akinek munkássága viszont a Kamiokande vizes Cserenkov-detektorhoz kapcsolódik. Ez utóbbi detektor Japánban, a Kamioka bányában volt mintegy 1000 méter mélységben, és az „nde”

végződés arra utal, hogy a berendezés eredeti célja a protonbomlás detektálása volt (*nucleon decay experiment*, de Koshiha szerint e három betűt később sokan *neutrino detection experiment*ként értelmezték). E berendezés sokkal nagyobb és szofisztikáltabb utódja, a Szuper-Kamiokande viszont elsősorban már neutrínók detektálására készült, és a másik idei díjazott csoportja ennek segítségével érte el későbbi eredményeit.

Raymond Davis (1914–2006) fiziko-kémikusként doktorált. Nobel-díj előadásában [5] ír 20 éves mérésorozata előzményeiről is. Bruno Pontecorvo egy 1946-ban Kanadában írt titkosított dolgozata alapján Davis már 1951-ben kezdett foglalkozni azzal a radio-kémiai neutrínódetektálási reakcióval, amit később kísérletében felhasznált:



A kísérletet Pontecorvo klór-tetraklorid felhasználásával javasolta, amelyből forralással választanak le a ${}^{37}\text{Ar}$ atomokat, amelyek radioaktív bomlását detektálná (felezési idő 35 nap). Davis annál a nagyteljesítményű Savannah River reaktornál is elvégezte a mérést, ahol Reines és Cowan a szabad antineutrínók létezését bizonyította. Amennyiben az antineutrínó és a neutrínó azonos, a kapott felső korlátnál 20-szor nagyobb fluxust kellett volna mérnie. Ahhoz, hogy a valódi Nap-neutrínók detektálásához kezdjen, nagy előkészítő munkára volt szükség. Nem volt még kidolgozva, hogy a Nap belsejében milyen reakciósorok mennek végbe, és ezekből mennyi és milyen energiájú neutrínó várható. Emellett a dél-dakotai Homestake aranybányában 1500 méter mélységben ki kellett alakítani egy hatalmas laboratóriumot, amelyben a 380 m^3 folyadékot tartalmazó tartály és a vizsgálatokhoz szükséges egyéb berendezés elhelyezhető. Az elméleti munkát nagyrészt *John Bahcall* végezte, akitől Davis segítséget kért. Számításai szerint a Napban lejátszódó reakciók közül a ${}^8\text{B}$ bomlásából származnak a legnagyobb energiájú neutrínók, és ezek adják a fő járulékot a keletkező ${}^{37}\text{Ar}$ produkcióhoz, noha az összes érkező neutrínók számának mindössze néhány tízezredét teszik ki.

A tényleges mérések 1967-ben kezdődtek. Az első eredmények kiábrándítóak voltak. Egyes háttérforrások csökkentése és a kémiai leválasztás ellenőrzése után ugyan már láttak jelet, de az a vártnál körülbelül 3-as faktossal kisebb volt, és az is maradt majdnem 25 évig, egészen a kísérletek befejezéséig. Sokáig nem lehetett tudni, hogy a kísérletben, a Nap-modellben vagy magukban a neutrínókban lehet a hiba. A rengeteg ellenőrzés után Davis és Bahcall is biztos volt a saját mérésében, illetve számításában, és mások sem tudtak ezekben hibát találni. Új mérések is indultak, amelyek más neutrínóindukált reakciókat használtak fel, és alacsonyabb energiájú Nap-neutrínókra is érzékenyek voltak. A mért jel azonban mindegyik kísérletben kisebb volt a vártnál. Így a kutatókban fokozatosan kialakult az a meggyőződés, hogy a Pontecorvo által javasolt neutrínóoszillációk

miatt látunk kevesebb elektron-neutrínót. Más típusú neutrínókra ugyanis a radiokémiai detektorok nem voltak érzékenyek. Szilárd kísérleti bizonyíték azonban nem volt erre a sokak által már evidenciának tekintett megoldásra.

Herb Chen 1984-ben vetette fel azt a szerencsés ötletet, hogy ha közönséges víz helyett nehézvizet töltünk egy detektorba, akkor az képes lesz szétválasztani az elektron-neutrínók és a más típusú neutrínók hatását. A beérkező neutrínók ugyanis kétféleképpen tudnak kölcsönhatni a deutériummal: az úgynevezett töltött áramok segítségével, amelynek hatására elektron és két proton keletkezik, valamint a semleges áramok segítségével protont és neutront keltve, míg a neutrínó ugyanaz marad. Az első folyamatot csak az elektron-neutrínó, míg a másodikat bármelyik keltheti. Emellett a bejövő neutrínó elektronon is szóródhat, és ezt a folyamatot az elektron-neutrínók nagyobb hatáskeresztmetszettel generálják, de a másik két típus is létrehozhatja. Az elektronon való rugalmas szóródásból a bejövő neutrínó irányára is következtethetünk, ami segít annak eldöntésében, hogy egy neutrínó valóban a Napból érkezett-e. Sajnos Herb Chen 1987-ben fiatalon elhunyt, és a detektor építését, valamint a kísérleteket már kollégája, Arthur B. McDonald vezette. E mérések bizonyították először, hogy sem Davis, sem Bahcall nem tévedett és a számított ${}^8\text{B}$ neutrínófluxus valóban megvan, de különböző típusú neutrínók formájában. John Bahcall ezt az eredményt még megérthette, de 2005 augusztusában ő is eltávozott.

A Sudbury Neutrínó Observatórium létrehozásához mély bányára és hatalmas mennyiségű nehézvízre volt szükség. Szerencsére ez utóbbi Kanadában rendelkezésre állt, és az állam 1000 tonnányit kölcsönzött a kísérlet céljaira. Itt megjegyzem, hogy a nehézvíz világpiaci ára körülbelül tízszer akkora, mint a tokaji aszúé.

Kozmikus sugárzás és neutrínók

A nagy gyorsítók korában kevesen gondolták, hogy a neutrínóoszillációk egyik döntő bizonyítékát a kozmikus sugárzás légköri kölcsönhatásaiban keletkező részecskék bomlásából származó neutrínók fogják adni. A pionok bomlásából müon-neutrínót, a müonokból elektron- és müon-neutrínót is kapunk. A főleg protonokból álló kozmikus sugárzás magnetoszféránk határára közel izotróp módon érkezik, de a légkör határán már csak a néhányszor 10 GeV-nél nagyobb energiájúak érkeznek egyformán minden irányból, mivel a Föld mágneses tere az alacsony energiájú protonokat és más atommagokat részben eltéríti. A légkörbe érkező részecskék által keltett instabil pionok, kaonok stb. további sorsa energiájuk mellett attól is függ, hogy az eredeti részecske milyen irányból érkezett a légkörbe. A függőlegessel (zenittel) nagy szöget bezáró irányból érkező részecskék utódai ugyanis nagyobb valószínűséggel bomlanak el

a további kölcsönhatás helyett, mint a függőlegesen beérkezőkéi. Így a Föld adott pontján a neutrínók várt irányeloszlásának kiszámítása nem triviális feladat, és részletes Monte Carlo-számításokat igényel. Az eredeti várakozás természetesen az volt, hogy a neutrínók a Földön akadálytalanul áthatolnak, ezért a számolásoknál a szilárd Föld jelenlétét nem kell figyelembe venni.

Már az 1980-as évek közepén felmerült, hogy a nagy Cserenkov-detektorokba alulról, a Földön keresztül a vártnál kevesebb neutrínó érkezik, az eredmény azonban nem volt szignifikáns. Az eddig néhány ezer tonna vizet tartalmazó detektoroknál nagyobb és több fotoelektron-sokszorozóval megfigyelt, valamint a radioaktív háttér ellen jobban védett detektorokra volt szükség. A fejlesztéshez újabb motivációt jelentett a Nagy Magellán-felhőben mintegy 160 ezer éve felrobbant 1987A szupernóva, amelyből származó neutrínókat Amerikában és Japánban is észleltek. E megfigyelést tekintették a neutrínó-asztrfizika születésének, amiért, mint már említettük, Koshiha 2002-ben Nobel-díjban részesült. Ekkor a Kamiokande-detektor helyett egy új, Szuper-Kamiokandénak elnevezett berendezés építését határozták el. Koshiha visszavonult, és a vezetést munkatársa, *Yoji Totsuka* vette át. Az új detektor 3 ezer tonna helyett már 50 ezer tonna vizet tartalmazott, amit ezer helyett több, mint 11 ezer nagyméretű fotoelektron-sokszorozó figyelt meg. E berendezéssel már – a Cserenkov-fénykúp alakja segítségével – jól szét tudták választani az elektron- és müon-neutrínók kölcsönhatásaiból származó eseményeket, sőt a ${}^8\text{B}$ Nap-neutrínók azonosítására is lehetőség nyílt. Az utóbbiak kiválasztásában nagy segítséget nyújtott nem csak a többinél alacsonyabb energia, de a Cserenkov-kúpoknak a Nap irányával bezárt szöge is. A detektor tehát mintegy 1 km mélységből neutrínófényben látta a Napot. A Nap-eredetű neutrínók száma a Davis-kísérlettel összhangban itt is mintegy 3-as faktoriall kisebb volt az eredeti várakozásnál.

De ami még fontosabb, fény derült az alulról jövő neutrínók kisebb számának okaira is. A két típusú neutrínó irányeloszlását külön-külön vizsgálva azt találták, hogy az elektron-neutrínók a vártnak megfelelő irányeloszlásúak, míg a Föld túlsó oldaláról származó müon-neutrínók mintegy 2-es faktoriall kevesebben vannak. Ezt az 1998. évi Neutrínó Konferencián jelentették be. A hiányzó neutrínók minden bizonnyal tau-neutrínóvá alakultak. Az eredmény fényesen igazolta a neutrínóoszilláció hipotézisét, és sok új, gyorsítókkal végzendő vizsgálatra adott indítást. Emlékszem, hogy közvetlenül e konferenciáról való hazaérkezése után többször is beszéltem Marx professzorral részben az eredmények értelmezéséről, részben *Arnold Wolfendale* professzor látogatásáról, akinek programját vele közösen szerveztük. A két téma azért is kapcsolódott, mert az 1960-as években Wolfendale csoportja volt az egyik első, akik Indiában egy bányában nagyenergiájú neutrínókat észleltek (a másik Fred Reines csoportja volt Dél-Afrikában).

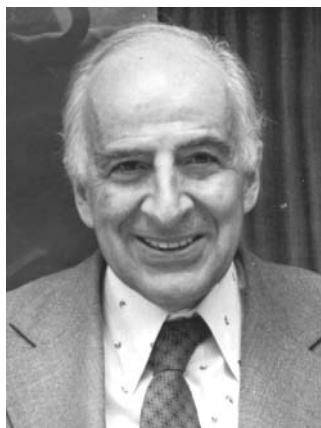
A Szuper-Kamiokande detektort 2001-ben váratlan baleset érte. A fotoelektron-sokszorozók mintegy fele láncreakciószerűen berobbant. Yoji Totsuka hatalmas energiával látott a berendezés újjáépítéséhez. Végzetes betegsége miatt azonban idővel át kellett adnia a vezetést munkatársának, a most kitüntetett Takaaki Kajita professzornak, aki a Nobel-díj kihirdetését követő intézeti fogadáson elsőként Totsuka professzornak, mint mentorának mondott köszönetet. Amikor megkérdezték, hogy szeretné-e még másnak is megköszönni a díjat, a neutrínókat és a kozmikus sugárzást nevezte meg.

Hazai vonatkozások

Magyarországon a kozmikus sugárzás és a neutrínók kutatásának is nagy hagyománya van. A második világháború előtt *Forró Magdolna* és *Barnóthy Jenő* a dorogi bányákban az elsők között végeztek ilyen nagy mélységben kozmikus sugárzási méréseket. Jánossy Lajos manchesteri méréseit már említettük. Hazatérte után a KFKI-ban sok fiatal munkatársa kozmikus sugárzási méréseken tanulta meg a szakmát. Föld alatti mérésekre is lehetőség volt a 4. épület közelében elhelyezkedő akna jövöltárból. Diplomamunkámat én is ott készítettem a müonok 40 méter vízekvivalens mélységben végzett vizsgálatával. Fenyves Ervin és *Somogyi Antal* vezetésével még sok érdekes mérés helyszíne volt ez az akna.

A neutrínófizika egyik első érdekes hazai eredménye *Csikai Gyula* és *Szalay Sándor* 1956-ban Debrecenben végzett rendkívül szellemes kísérlete volt, amelynek során ${}^6\text{He}$ béta-bomlásánál sikerült kimutatniuk a kilépő neutrínó visszalökő hatását [6]. Több fontos nemzetközi neutrínóprojektben vett részt *Kiss Dezső*, így a Bajkál-tó mélyén végzett mérésekben. A napjainkban is folyó Borexino-kísérletben ma is több magyar dolgozik. Természetesen a CERN neutrínókkal kapcsolatos kísérleteiben is jelentős a magyar részvétel.

Külön ki kell emelni Marx György szerepét, aki oktatói és ismeretterjesztő tevékenysége mellett egyrészt sok tanítványával együtt vett részt neutrínófizikai kutatásokban, másrészt nemzetközi téren is vezető szerepet játszott. Ő hívta össze 1972-ben Balatonfüreden az első Neutrínó Konferenciát, amin sikerült mind a Szovjetunióból, mind Nyugatról meghívnia a vezető kutatókat. Sokan itt találkoztak először. Ezen a konferencián magam is részt vettem, és most is emlékszem, milyen nagy élmény volt egy-egy eddig csak könyvekből ismert kutató előadását hallani. E konferenciák sorozata azóta már a 27-iknél jár, és Marx professzor egészen haláláig volt a tanácsadó testület vezetője. Jó lenne tudni, hogy az ő szervező tevékenysége milyen nagy mértékben járult hozzá, hogy idén e témából ünnepelhetjük a Nobel-díjasokat. Ki kell még emelni, hogy több régi ötlete ma intenzív kutatás tárgya. Ilyen a geo-neutrínók vizsgálata, amelyek a Föld belsejében végbemenő radioaktív bomlásról és energiatermelésről adnak hírt.



Bruno Pontecorvo



John Bahcall



Herb Chen



Yoji Totsuka

A neutrínóoszillációkkal kapcsolatban még valakiről meg kell emlékeznünk, aki tiszteletbeli kollégánként a KFKI RMKI tanácsadója volt 17 évig, és aki korai haláláig a nagyenergiájú elméleti fizika egyik legelismertebb, rendkívül invenciózus szakértője volt. *Vlagyimir Gribov* (1930–1997) [7] neutrínóoszillációval kapcsolatos, 1968-ban Bruno Pontecorvóval közösen írt cikkét nagy előrelépésnek tekintik, és rengetegen idézik. *Nyíri Júlia* emlékei szerint később is foglalkozott e témakörrel, és ő úgy tudja, hogy Pontecorvóval már a 60-as években is gyakran tárgyaltak meg aktuális tudományos kérdéseket. Gribov azonban csak akkor publikált bármit is, ha biztos volt abban, hogy eljutott a megértésig. Nem tudjuk és már nem is fogjuk megtudni, hogy a neutrínóoszilláció eredeti ötletének felvetésében mekkora volt az ő szerepe.

Kiknek járt volna még a díj?

Nem bocsátkozom spekulációkba arról, hogy a neutrínóoszillációk felfedezéséért járó Nobel-díjat milyen arányban kellett volna megosztani, ha a Bizottság hatalmában állna, hogy érdemük szerint ítéljen meg

„élőket és holtakat”. A fentiek alapján csupán négy személyről – akik biztosan érdemesek lettek volna rá – mutatok be fényképet: Bruno Pontecorvo (1913–1993), John Bahcall (1934–2005), Herb Chen (1942–1987) és Yoji Totsuka (1942–2008).

Irodalom:

1. The Nobel Prize in Physics 2015, Popular Science Background: The Chameleons of Space. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/popular-physicsprize2015.pdf
2. The Nobel Prize in Physics 2015, Advanced Information: Scientific Background: Neutrino Oscillations. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/advanced-physicsprize2015.pdf
3. Fényes T.: Neutrínóoszilláció, leptogenezis, neutrínógyarak. *Fizikai Szemle* 62/2 (2012) 37. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1202/fenyest2012.html>
4. Király P.: A manchesteri kozmikus sugárzási iskola és a ritka részecskék felfedezése. *Fizikai Szemle* 52/6 (2002) 186. <http://www.fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0206/kiraly0206.html>
5. R. Davis: *A half-century with solar neutrinos. Nobel-lecture, 2002.* http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/davis-lecture.pdf
6. Dóczi R.: A neutrínó visszalökő hatásának észlelése a ${}^6\text{He}$ béta-bomlásában – 50 évvel ezelőtt. *Fizikai Szemle* 55/10 (2005) 356. <http://www.fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0510/DocziR.pdf>
7. Frenkel A.: Vladimir Gribov 1930–1997. *Fizikai Szemle* 47/9 (1997) 286. <http://epa.oszk.hu/00300/00342/00093/vgribov.html>

Ez is a Kanári-szigetek!

Nézzed meg!
Töltsd le!
Mutasd meg másoknak!
Tanítsd meg diákjaidnak!

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keress a fizikaiszemle.hu mellékletek menüpontjában!

KÉZZEL FOGHATÓ RÉSZECSKÉK NEM CSAK A RÉSZECSEKEFIZIKA OKTATÁSÁHOZ

Komáromi Annamária

Szent István Király Zeneművészeti Szakközépiskola, Budapest

Részecskefizikát külön fejezetként oktatni középiskolában – kiváltképpen szakközépiskolában – nem áll módunkban, annak ellenére, hogy fizika egy különlegesen érdekes, fejlődő és kutatott területéről van szó. Ezért tanórába úgy próbálok becsempészni, hogy a fizika más-más területeinek tanítása közben adok egy-egy kis ízelítőt ebből a témakörből. Úgy vélem, ezáltal közelebb kerülök ahhoz a célomhoz, hogy a diákok átérizzék a különböző területek közötti kapcsolatokat és komplex „fizikai világkép” alakuljon ki bennük.

Évekkel ezelőtt – a Mérei Ferenc Fővárosi Pedagógiai Intézet szervezésében – szakmai műhelyfoglalkozáson vettem részt, ahol az előadó a részecskefizikáról nem csupán beszélt, hanem egy bőröndből előhúzva mutatta be különböző részecskéket ábrázoló kis figurákat. Annyira megtetszett, hogy eldöntöttem: én is szeretnék egy ilyen készletet. Tekintettel az igen borsos árra, elhatároztam, hogy nem megveszem, hanem inkább saját magam tervezem meg a kis figurákat, de úgy, hogy a kis figurák érzékeltesék a részecskék jellemzőit. A továbbiakban bemutatom az elkészült részecskefigurákat, s azt, miként tudom használni azokat az oktatásban.

Az univerzum sötét része

Először néhány szót a táskáról, amelyet a részecskék tárolására készítettem. Az első alkalommal, amikor a fizikaórára beviszem a „dark matter” feliratú fekete táskámat (1. ábra), elmondom a diákoknak, hogy a fizika jelenlegi eredményei szerint a világegyetem 68,3%-át az a sötét energia teszi ki, amelynek létét 1998 óta fogadják el a világegyetemet kutató kozmológusok, 26,8%-a sötét anyag és mindössze 4,9% a hagyományos értelemben vett anyag [1]. A diákok részéről teljes joggal felmerülhet a kérdés, hogy ezt milyen kísérleti, mérési eredmények alapján állítják a tudósok. Elmondom nekik, hogy ezeket az arányokat legutóbb a Planck-űrszonda (2. ábra) mérési adatainak kiértékelésével kapták meg. Az űrszondát az ESA

A cikk színes változata letölthető a folyóirat honlapjáról: <http://fizikaiszemle.hu/archivum/1512/KomaromiA.pdf>, lásd a QR-kódot.

A <http://fizikaiszemle.hu> honlap mellékletek menüpontjában megtalálható és letölthető az elemi részecskék és az alapvető kölcsönhatások Standard modelljét bemutató poszter.



1. ábra. A részecskék tárolására szolgáló „sötét anyag”.

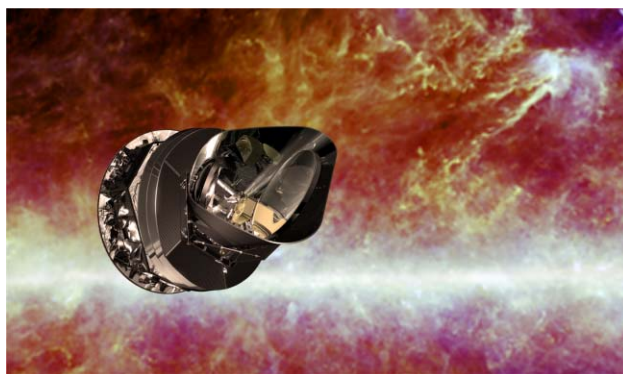
– azaz az Európai Űrügynökség, amelynek idén novemberben hazánk is teljes jogú tagja lett – állította pályára, ilyen jellegű megfigyelések céljából.

Az érdeklődőbb diákoknak még elmondom, hogy a kozmológusok szerint a sötét energia egyenesen oszlik el a térben, nyomása negatív (azaz „szívó hatása” van), ezért az univerzum gyorsulva tágul.

Az elektron, a proton, a neutron és építőelemeik

Az elektront szemléltető figurát (3. ábra) már az elektromos áram tanításakor érdemes bemutatni. Az elektron felfedezésének tanításakor a táskából ismét

2. ábra. A Planck-űrszonda a kozmikus háttérsugárzás feltérképezésére. www.esa.int/Our_Activities/Operations/Planck_on_course_for_safe_retirement





3. ábra. Az elektront szemléltető figura.

előkerül a kis gömbölyű részecske. Elmondom a diákoknak, hogy a két szem alá azért nem száj, hanem egy hullámvonal került, mert – kísérletileg is bizonyított – az elektronnak hullámtermészete is van. Az elektron tervezésekor azért fektettem erre hangsúlyt, mert ez az elsőként bemutatásra kerülő részecske. A többi részecskénél – ez után – a kettős természet már könnyebben elfogadható. Mindig megjegyzem, hogy az elektron tovább már nem osztható, így elemi részecske. Fontosnak tartom a diákok figyelmét felhívni arra, hogy – a középiskolában tanított kémiában valamilyen értelemben az elektronnal egyenrangú részecskének, mint atomi összetevőnek tekintett – proton és neutron már nem elemi részecskék, ugyanis mindkettőjüket 3-3 kvarknak nevezett elemi részecske alkotja. Itt a figurák segítségével bemutatom, hogyan épül fel a proton két up és egy down kvarkból, hogy végül kijöjjön a töltések összegeként a +1 töltés (4. ábra), illetve a neutronnál két down és egy up kvarkból kialakul az elektromosan semleges neutron. A két kvark megkülönböztetésére az up kvarknál frizurát, a down kvarknál szakállt terveztem. Az up és down kvarkok alakját olyan körcikknek választottam, amelyekből 3 darab (5. ábra) együtt alkot egy egészet (protont vagy neutront). Elmondom a diákok-

5. ábra. A kialakult proton, ahol a kvarkokat a „gluonpárna” fogja össze.



4. ábra. A proton elemi „építőpárnácskái”: a két up és egy down kvark.

nak, hogy ezen kvarkok színeit nem véletlenül választottam pirosnak, kéknek és zöldnek, hiszen – az elektromos és spintöltés (perdület) mellett – a kvarkoknak még úgynevezett színtöltésük is van, és ezek összege a fehéret kell kiadja. Így emlitem meg nekik a kvantum-színdinamika fogalmát, amely a részecskefizika hangsúlyos kutatási területe. Itt lehet rámutatni, hogy – bár sokan még csak nem is hallottak e tudományterület létezéséről – a szuperszámítógépek felhasználásának jelentős területe ez a kutatás.

A protonok tárgyalásakor képzeletben elhagyhatjuk bolygónkat és megemlíthetjük a DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) műholdat (6. ábra), amely 2004 nyara óta kering bolygónk körül 730 km magaságú poláris, közel napszinkron pályán, és így detektálni tudja a sugárzási övezetekből érkező elektronokat és protonokat. Fontos, hogy a diákokban a proton és az elektron fogalma ne csak az atom alkotórészeként legyen jelen, hiszen a napkitörések során nagy mennyiségű töltött részecske érheti el a Föld környezetét és légkörét. A kedvezőtlen üridőjárás, azaz e

6. ábra. A DEMETER-űrszonda.





7. ábra. A PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) műszer. http://pamela.roma2.infn.it/index.php?option=com_mjfrontpage&Itemid=159

részecskék megzavarhatják a körülöttünk keringő – például távérzékelő, távközlő – műholdak elektronikai rendszerét. A 2005. január 20-i napkitörés során olyan erőteljes fluxusú protonkilökődés történt, amely 15 perc alatt érte el a Földet, szemben az átlagos 2 napnyi időtartammal [2].

A diákok között mindig vannak, akik már hallottak az antirészecskékről is. Megemlíthetjük, hogy antirészecskékkel nem csak a részecskegyorsítóknál találkozhatunk, hiszen 2011-ben nagy számban sikerült a proton antirészecskéjét, az antiprotonot is detektálni az – egy orosz műhold fedélzetén működő – olasz PAMELA műszerrel (7. ábra). A mérések szerint ezeket az antiprotonokat a Föld mágneses tere a belső Van Allen-övben csapdába ejti.

Részecskék „ragasztóanyaga” – a gluon

A proton és neutron összeállításánál a kis tartópárnával utalok a gluon nevére, kölcsönhatást közvetítő bozonra (8. ábra), és elmondom, hogy a fekete párna az összetartó, „ragasztó” gluont szimbolizálja. Ekkor újra megmutatom, hogy a harmad körcikknek választott up és down kvarkok éppen a gluonpárnába illeszkednek, s így alkotják a protont és a neutronot.

Természetesen jelentősen egyszerűsítet a modellem, hiszen nem beszélek arról, hogy nyolcféle gluon van, nekik is van „színük”, azaz színtöltésük, továbbá léteznek még úgynevezett tengerkvarkok is a protonban, illetve a neutronban. Ezek megbeszélésére normál órán nincs idő, ez kifejezetten csak szakkörön lehetséges. Azt viszont megjegyzem, hogy kvarkok szabadon, önmagukban csak a világegyetem kialakulásának kezdeti időszakában léteztek, jelenleg természetes körülmények között már csak kötött állapotban fordulnak elő. Az univerzum ezen kezdeti korszakát,



8. ábra. A „ragasztó” gluont szimbolizáló fekete párna.

amikor a kvarkok még szabadon léteztek az úgynevezett kvark-gluon plazmában, részecskegyorsítóknál lehet reprodukálni. Kvar-k-gluon plazmát először az Amerikai Egyesült Államokban épített RHIC-ben (Relativistic Heavy Ion Collider) tudtak kimutatni. Megemlíthetjük, hogy ezt a kvark-gluon plazmát sokáig gázként képzelték el, de kiderült, hogy olyan folyadéként viselkedik, amelyben nincs belső sűrűdés. A részecskegyorsítóban létrehozott kvark-gluon plazma vizsgálata rendkívül nehéz, és csak közvetett módon lehetséges. Ennek egyik oka, hogy csak 10^{-24} s ideig tartható fenn, és – ugyanúgy, mint az univerzum – tágul, közben hűl [3].

A müön és a piramisok

A következő részecske, a müön a speciális relativitáselmélet tanításánál jut főszerrephhez, amikor elmondjuk, hogy a Földön is érzékelhető müönök az idődilatáció bizonyítékai. Ekkor már megmutatom a Standard modell hivatalos táblázatát és az általam tervezett figurák beillesztésével készült képét (színes ábra az első belső borítón), hogy el lehessen képzelni a müön helyét a már megismert kvarkok és elektron mellett.

9. ábra. A müön, a dupla szájjvonal a mintegy 200-szoros elektron-tömegre utal.





10. ábra. A Nap-piramis Mexikóban. http://multkor.hu/20080707_osi_titkokat_keresnek_a_mexikoi_nappiramis_alatt

A müönt (9. ábra) a kozmikus sugárzás összetevőinek vizsgálata során 1937-ben *Carl Anderson* és PhD tanítványa, *Seth Neddermayer* fedezte fel. „Néhéz elektronnak” is nevezhetnénk, hiszen töltése az elektronnal megegyező, de tömege annak 200-szorososa. A kozmikus sugárzásnál beszélhetünk elsődleges és másodlagos sugárzásról. A müonok ebben a másodlagos sugárzásban találhatók, sebességük megközelíti a fény sebességét. Tudott, hogy a világűrben a kozmikus részecskék eloszlása irányfüggetlen. A Földön megfigyelt müonokra ez nem igaz, ugyanis ha a függőlegessel bezárt szöget növeljük, a müonok száma csökken. Ennek oka az, hogy a Föld felszínére merőlegesen a legvékonyabb a légkör vastagsága. Mérések alapján megállapítható, hogy az észlelt müonfluxus ingadozása egy nap folyamán 3%-nál nem több, tehát napszaktól független, a Nap nem befolyásolja. A Föld felszínén állva másodpercenként 5-10 müon halad át rajtunk, de ez az egészségre ártalmatlan. A müonok földi jelenléte az idődilatació – lásd *Einstein* speciális relativitáselmélete – kísérleti bizonyítéka, hiszen 2,2 μs alatt elektronra és neutrínókra bomlanak, így – ha az idő számukra ugyanúgy telne, mint a földi megfigyelők számára – nem érhetnék el a Föld felszínét. Érdekességként elmondható, hogy a müonok olykor hasznos segítőitársai a régészeknek. 1966-ban például *Luis W. Alvarez* és munkatársai egy 1,8 m² felület müondetektort helyeztek el a Kefren-piramis alá fúrt kamrában. E detektor segítségével a piramis falának megbontása nélkül információkat kaptak a piramisban levő üregekről. Ilyen módon akár az esetlegesen elrejtett kincseskamrákat is meg lehet keresni. A mérés elve azon alapszik, hogy ismert a müonfluxus mélységfüggése a felszín alatt, tehát ha az előzetes számításoknál kevesebb müont detektálunk, egy üreg jelenlétére következtethetünk. Hasonló kutatásokat végeznek Mexikóban a világ harmadik legnagyobb piramisa, a 65 m magas Nap-piramis belső szerkezetének feltárására (10. ábra).

Megemlíthetjük az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet és az ELTE által közösen fejlesztett gáztöltésű müondetektort, amely extrém körülmények között is használható és előállítása sem költsé-



11. ábra. A Molnár János termálbarlang Budán. <http://label.web.cern.ch/label/MolnarJanos.html>

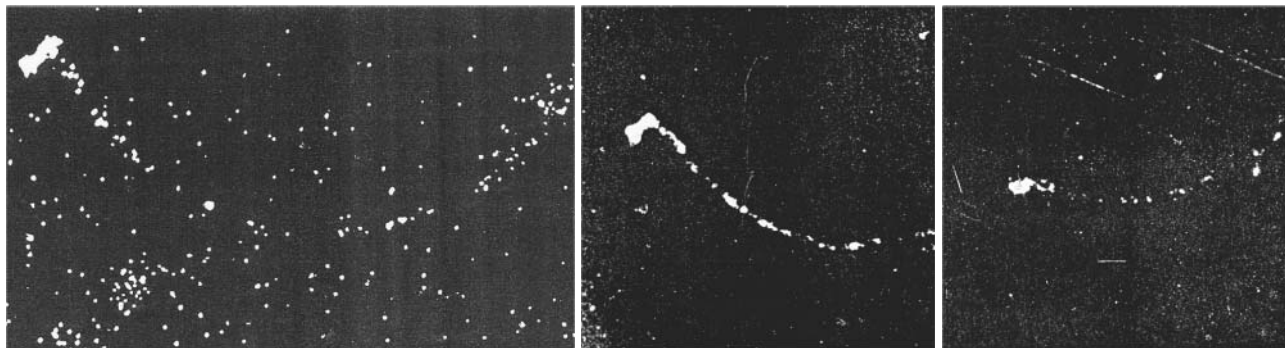
ges. Budapesten, a II. kerületi Molnár János termálbarlang (11. ábra) járatainak feltérképezéséhez a detektort közel 100%-os páratartalmú környezetben kellett használni. A műszert 2011-ben helyezték el, 3 hónapra a barlangot légmentesen lezárták, hogy biztosítsák a megfelelő működéshez szükséges, egyenletes 60%-os páratartalmat [4].

A tau-részecske

Az elektron és müon mellett néhány szót érdemes ejteni a tau-részecskéről (12. ábra) is, amely szintén a Standard modell egyik leptonja. Ezt a részecskét 1975-ben fedezték fel a kaliforniai SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) részecskegyorsítóban. (A SLAC a világ legnagyobb lineáris részecskegyorsítója, 3,2 km hosszú, ezért tervezésekor a Föld alakját is figyelembe kellett venni.) A felfedezés érdekessége, hogy az nem közvetlenül történt, hanem a tau létezésére a bomlási folyamat energiamérlegének hiányából lehetett következtetni. Elektromos töltése az elektron töltésével megegyező. Élettartama 10^{-13} s, tömege körülbelül kétszerese a protonénak. Ez az egyetlen olyan lepton, amely hadronokká is képes bomlani. Felfedezéséért *Martin Lewis Pell* 1995-ben Nobel-díjat kapott.

12. ábra. A tau-részecske, a tripla szávjonal a részecske extrém nagy tömegére utal.





13. ábra. Az első sikeres felvételek a neutrínó magvisszalökő hatásáról (J. Csikai: Photographic evidence for the existence of the neutrino – *Nuovo Cimento* 5 (1957) 1011).

A neutrínó-család – amely közelebb visz minket az Ősrobbanás megértéséhez

A neutrínók elektromosan semleges részecskék. Detektálni nehéz, mert a gravitációs kölcsönhatáson kívül csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. Az elektronnak megfelelő első részecskeszaládba tartozik az elektron-neutrínó, majd a másodikba a müon párja a müon-neutrínó és végül a harmadik család tagjaként a tau-neutrínó. (A tau-neutrínót csupán 2000-ben sikerült közvetlenül megfigyelni a Chicago melletti levő Tevatron részecskegyorsítóban.) A neutrínó létezését *Wolfgang Pauli* jósolta meg 1930-ban, a β -bomlás vizsgálatakor. A β -bomlás során látványosan nem teljesült az energiamegmaradás törvénye, így Pauli feltételezte, hogy még egy részecskének kell keletkeznie. Közvetlen kísérleti kimutatása 1956-ban sikerült, amelyért 1995-ben – a tau-részecskét felfede-

14. ábra. A három féle neutrínó.



ző Pell-lel együtt – kapott Nobel-díjat *Frederick Reines*. Pauli, amikor értesült a kísérleti bizonyítékról, választáviratában a következőt írta: „Köszönöm az üzenetet, minden megérkezik annak, aki tudja, hogy hogyan kell rá várni.” Fontos megjegyezni, hogy két magyar kutatónak, *Csikai Gyulának* és *Szalay Sándornak* – szintén 1956-ban – ködkamrában sikerült kimutatnia és fényképfelvételeken rögzítenie a neutrínó magvisszalökő hatását (13. ábra). Ezeket a felvételeket 1957-ben publikálták.

A neutrínó az anyaggal gyengén hat kölcsön, gyakorlatilag nem nyelődik el benne, mindenben áthatol. Ezért szellemrészecskének is szokták nevezni. Az általam készített figurák fehér színükkel és kísérteties alakjukkal is ezt érzékeltetik (14. ábra). Tömege az elektron tömegének 1/2000 részénél is kisebb. Elektromosan semleges, nem hat rá az elektromos és mágneses mező, így a keletkezési helyétől egyenes vonalban érkezik az észlelési ponthoz, megtartva az információt keletkezése körülményeiről mind az impulzus, mind az energia tekintetében. Ebből adódik, hogy előszeretettel használják geofizikai és csillagászati kutatásokban is.

A Föld-neutrínó anti-elektronneutrínó, amely a Föld belsejében található urán és tórium bomlási sorok radioaktív izotópjainak β -bomlásakor keletkezik. 2004-ben mértek először a Föld belsejéből érkező Föld-neutrínókat föld alatti neutrínódetektorral. Ezek a neutrínók nagyban hozzásegítik a tudósokat, hogy jobban megismerjék a Föld belsejében lezajló folyamatokat. A geofizikusok szerint eljön az idő, amikor háromdimenziós komputertomográfiai felvételekhez hasonló képeket lehet készíteni a Föld belsejéről. A Föld-neutrínó segítségével a Föld mágnességének eredetét is hatékonyabban lehet vizsgálni, ezenkívül ellenőrizni lehet vele a különböző geofizikai modelleket. A mérések a modellek helyességét igazolják.

A Nap-neutrínókat is megemlíthetjük tanításunk során, amelyekkel kapcsolatban a középiskolás diákok sok érdekes kutatási eredményt gyűjthetnek össze.

Még egy érdekesség a neutrínók témakörében. Jelenleg a legősibb fény, amit észlelni lehet az Ősrobbanás után 380 000 évvel keletkezett. Ennek oka, hogy ekkor csatolódt le az elektromágneses sugárzás az



15. ábra. A foton, mint részecske.

anyagról. Volt viszont egy másik sugárzás is, ami már jóval korábban lecsatolódt. A neutrínók már 2 másodperc után szabadon mozoghattak és ezért elképzelhető, hogy a neutrínók segítségével az univerzum keletkezése utáni két másodperccel történt eseményekről is szerezhettünk ismereteket. Ennek megvalósítása még a jövő kihívása [5].

Fény a sötétségben – a foton

A részecskéket szimbolizáló figurák közül a foton (15. ábra) akkor mutatom be, amikor a fényelektromos jelenség kapcsán eljutunk a fény kettős természetéig. Úgy vélem, ezzel a kézbe fogható kis bábuval a diákoknak könnyebben befogadhatóvá válik a fény részecsketermészete. Itt jegyzem meg, hogy minden részecske hátoldalra felírtam a töltését, spinjét (perdületét) és a spin paritását.

Újra a kvarkokról

Térjünk vissza a kvarkok világába. Az up és down kvark mellett fontos szerep jut a strange (ritka, furcsa) kvarknak is (16. ábra). Murray Gell-Mann, aki 1963-ban először beszélt a kvarkokról, ezen három elemi rész segítségével fel tudta építeni az akkor ismert több száz részecskét. Ez ekkor még csak elméleti spekuláció volt, hiszen a kvarkok létezését kísérletileg csak 1968-ban bizonyították a SLAC-ban. Itt és az Egyesült Államok keleti partján levő Brookhaven gyorsítóban 1974-ben egyszerre találták meg a – korábban már szintén megjósolt – charm kvarkot is (16. ábra). A charm és anticharm együtt al-

kotja az akkor felfedezett J/psi mezont. Itt érdemes megállni és megjegyezni, hogy a kvarkok vagy hárman alkotnak egy hadront, ilyenkor hívjuk őket bariónoknak, vagy egy kvark és egy antikvark alkot egy hadront, ebben az esetben mezon a nevük. Fontos szabály, hogy a hadronokba zárt kvarkok összetöltése az elektron töltésének csak egész számú többszöröse, színeik összege csak fehér lehet, azaz piros és kék meg zöld, vagy egy szín és antiszíne. Az antianyag létezését P. A. M. Dirac elméleti úton jósolta meg az energiára általa felírt egyenlet egyik lehetséges megoldásaként.

Mindössze négy évvel később 1933-ban Carl Anderson a kozmikus sugárzást vizsgálta ködkamrában és azonosította az antielektront, elterjedtebb nevén a pozitront. A fizikusok munkáját dicséri, hogy a CERN-ben, az Európai Részecskefizikai Kutatóintézetben mért eredmények alapján ma már kijelenthetik, hogy a proton és az antiproton tömege közötti különbség annál is kisebb, mintha az Eiffel-torony tömegét akaránk megmérni úgy, hogy egyszer rászállt egy dongó, egyszer pedig nem.

Megjegyzem, a diákok számára ez a hasonlat sokkal érzékletesebb, hatásosabb, mintha a 10 hatványai-val fejeznék ki a különbséget. Nem igazán tudnak – és megkockáztatom, hogy mi sem – különbséget tenni 10 egyik vagy másik nagyon kicsi, illetve nagyon nagy kitevőjű hatványa között [6].

A bottom vagy ritkábban használt, de lényegesen szebb nevén beauty kvarkot (17. ábra) 1977-ben fedezték fel a Chicago közelében levő Tevatron ré-

16. ábra. A strange (ritka, furcsa) és párja a charm kvark.



17. ábra. A legnehezebbek: a bottom (beauty) és a top kvark.





18. ábra. Két, kölcsönhatást közvetítő részecske a Z- és a W-bozon.

szecskegyorsítóban, amely a CERN Nagy Hadronütköztetőjének 2008-as üzembe helyezéséig a világ legnagyobb energiájú részecskegyorsítója volt. 1995-ben ugyanitt figyelték meg a hatodik, a top kvarkot (17. ábra). A kvarkoknál is beszélhetünk – hasonlóan a leptonokhoz – első (up, és down), második (charm és strange) és harmadik (top és bottom) részecskecsaládról. E kvarkcsaládok – hasonlóan a már említett elektronhoz, müonhoz és tau-részecskéhez – egyre nehezebbek, a figurák számvonalainak száma most is erről árulkodik. A harmadik részecskecsaládba tartozó top kvark tömege a proton tömegének 175-szöröse. Jegyezzük meg, hogy a részecskék esetében a tömeget nem a szokásos kilogrammban adják meg, hanem az Einstein-féle tömeg-energia ekvivalencia egyenlet alapján eV/c^2 -ben fejezik ki! Így a proton tömege $1 \text{ GeV}/c^2$, a top kvark tömege $175 \text{ GeV}/c^2$. Lényeges hangsúlyozni, hogy ez a nyugalmi tömeget fejezi ki, hiszen a részecskegyorsítóban a relativisztikus tömegnövekedést is figyelembe kell venni. A megtárgyalt hat kvark kapcsán lezárásul elmondhatjuk, hogy 2008-ban az a három japán elméleti fizikus kapta meg a Nobel-díjat, akik megjósolták, hogy 6 kvarktípusnak kell lennie a természetben.

A legújabb felfedezés: a Higgs-bozon és a többiek

A kvarkok és leptonok tárgyalása után a Standard modell hiányzó elemei, a bozonok következnek. Elmondom a tanulóknak, hogy a természetben négy alapvető kölcsönhatás van és ezek közül háromban kölcsönhatást közvetítő részecskéként szerepelnek a Standard modell bozonjai. Az erős kölcsönhatás tartja össze az atommagot, illetve a protont és neutronot alkotó kvarkokat. E kölcsönhatás közvetítő részecskéi a már korábban említett gluonok. A második, elektromágneses kölcsönhatás közvetítő részecskéje a foton, amelyet a részecskefizikában γ -részecskének hívnak. A gyenge kölcsönhatás nehezebben magyarázható el, a radioaktív bomlásoknál lehet megérteni, a β -bomlás vizsgálatakor ismerték meg. Közvetítő részecskéi a W- és Z-bozonok (18. ábra). A negyedik, mindenki által jól ismert alapvető kölcsönhatásnál, a gravitációs kölcsönhatásnál eddig nem találtak közvetítő részecskét, de ennek elle-

nére nevet már adtak neki, ez lenne a graviton.

Elérkeztünk a legizgalmasabb részecskéhez, a Higgs-bozonhoz (19. ábra), amelynek létezését Peter Higgs jósolta meg még a hatvanas években és kísérleti kimutatására 2012 nyaráig kellett várni. Ez az anyagi részecskék (kvarkok és leptonok), továbbá az említett kölcsönhatásokat közvetítő részecskék mellett egy harmadik típusú ré-

szecskének tekinthető. Tulajdonképpen egy kvantummező, amellyel való kölcsönhatásként kap a többi részecske tömeget – a Standard modell szerint. Középszintű oktatásban nem, érdekességképpen viszont lejátszhatjuk a Higgs-bozon – a CERN fizikusai által lekottázott – dallamát, amely úgy született, hogy a kísérlet során mért különböző energiaértékeknek különböző hangmagasságokat feleltettek meg.

További megjegyzések az általam tervezett részecskékhez

A gyenge kölcsönhatás vizsgálatakor derült ki, hogy a kvarkok és leptonok 3 részecskecsaládba sorolhatók. Az első családba tartozók a legkönnyebbek, ezt a figurákon az egyszeres számvonal, vagy hullámvonal jelzi, ha kézbe vesszük a bábukat, érezzük, hogy nagyon könnyűek. A második részecskecsalád elemeinél már dupla számvonalat (hullámvonalat) terveztem és a tömőanyag is nehezebb, ahogy a valóságban is nehezebb részecskékről van szó. A harmadik részecskecsaládnál ennek megfelelően hármasszámvonal (hullámvonal) látható és a tömőanyag itt a legnehezebb. Az antianyagot mindössze egy bábuval szemléltetem (20. ábra), hiszen céloom kifejezetten a Standard modell részecskéinek bemutatása volt, de számítógép képernyőjén könnyen láthatjuk bármelyik részecske antirészecskéjét is a „a színek invertálása” vagy a „negatív-készítés” menüponttal.

19. ábra. A Standard modell 2012-ig kísérletileg hiányzó részecskéje, a Higgs-bozon.





20. ábra. A piros up kvark és antirészecskéje az „antipiros” – invertált piros színű – antiup kvark.

által meghirdetett *Fizika a tudományokban és művészetekben* versenyen.

Irodalom

1. http://www.urvilag.hu/urcsillagaszat_europaban/20130325_az_osrobbanas_nyoma_nagy_felbontassal
2. http://www.urvilag.hu/hazai_kutatohelyek_es_uripar/20101113_nagyenergiaju_reszecskek_vizsgalata_a_plazmaszferaban
3. http://atomfizika.elte.hu/magreszfiz/birogabor_nemext.pdf
4. Barnaföldi G. G., Bencédi Gy., Hamar G., Melegh H., Oláh L., Surányi G., Varga D.: Kincskeresés kozmikus müonokkal – avagy kozmikus müondetektálás alkalmazott kutatásokban. *Fizikai Szemle* 61/12 (2011) 401–407.
5. <http://www.csillagaszat.hu/hirek/ko-korai-vilagegyetem/ko-kozmikus-hattersugarzas/meg-kozelebb-az-osrobbanashoz/>
6. <http://www.nature.com/nature/journal/v475/n7357/full/nature10260.html>

A részecskék sikere

A 2012/13-as tanévben három szolfézs-szakos tanítványom első helyezést ért el a részecskék és fizikai tulajdonságaik – középiskolai szinten elvárható – ismeretével a Mérei Ferenc Fővárosi Pedagógiai Intézet

MEGÚJULÓ FIZIKATANÍTÁS

– nemzetközi konferencia az ELTE-n

Jávor Márta
ELTE PhD hallgató
Fizika tanítása program

2015. augusztus 17. és 19. között a világ különböző tájairól érkezett, fizikát tanító tanárok töltötték meg az ELTE TTK két nagy fizika-előadóját, hogy e szerteágazó, mindennapi életünket átszövő természettudomány tanítása során szerzett tapasztalataikat megosszák egymással. A fizika iránti általános érdeklődés az egész világon csökkent, így kiemelkedő aktualitása és jelentősége volt a rendezvénynek.

Az ELTE Fizika Doktori Iskolája nyolc éve indította el a kifejezetten tanároknak szóló *Fizika tanítása programot* (<http://fiztan.phd.elte.hu>). A program évről évre egyre népszerűbb. Ez a tanári doktori program jelentette az augusztusi nagyszabású nemzetközi rendezvény bázisát, amely hosszú szünet után újra megnyitotta a nagyvilágot a fizikatanárok előtt. Szerencsére a nyelvi nehézségek csökkentek, sok, angolul kiválóan beszélő tanár dolgozik az ország iskoláiban, akik közül többen angolul (is) tanítanak fizikát a speciális, két nyelven tanuló osztályokban.

A fizikának számos olyan részterülete szerepelt az előadásokban, amely azelőtt elképzelhetetlen volt a középiskolai fizikatanításban; ilyen például a részecskefizika vagy a komplex rendszerek fizikája. Nagy érdeklődés kísérte a társadalmilag érzékeny problémák és a Csodák Palotája jellegű Science Center komplex témájával foglalkozó előadásokat. Ezek a témák is most szerepeltek először hazai fizikatanári konferencián. A rendezvény nem csupán a fizikáról szólt, a fő hangsúly a fizika tudománya megismertetésének, tanításának módszerein volt. Az iskolai tanítás során nem egy-egy területet kell mélyre-

hatóan áttanulmányozni, hanem a minél szélesebb körű ismeretszerzés a cél.

Sokan jelentkeztek előadással, de voltak, akik „csak” hallgatni, ötleteket meríteni és nem utolsó sorban szakmai kapcsolatokat építeni jöttek. A szünetekben lehetőség volt beszélgetésre, eszmecsere, kapcsolatépítésre.

Minden délelőtti és délutáni program (részletesen lásd <http://parrise.elte.hu>) plenáris üléssel kezdődött, amelyen a szervezők által felkért kutatók tartottak előadást. Ezeket követően két szekcióban folyt a mintegy 100 résztvevő munkája. A szervezők gondosan vigyáztak az előadások időkorlátjának betartására, ezért két előadás között át lehetett menni a másik szekcióba, így érdeklődési körének megfelelően mindenki kedvére válogathatott.

A meghívott előadók neves külföldi és magyar egyetemi oktatók, a tanítás módszertanával is foglalkozó kutatók voltak.

Marisa Michelini a GIREP (Groupe International de Recherche sur l’Enseignement de la Physique) elnöke, az Udinei Egyetem professzora tartotta az első plenáris előadást a modern fizika középiskolai oktatásával kapcsolatos kutatásairól. Kiemelte a „modern fizika” középiskolai tanításának fontosságát, amely a tantervfejlesztést, a tanárok továbbképzését és az oktatási kutatásokat egyaránt szükségessé teszi.

Hannu Salmi Finnországból érkezett, a Helsinki Egyetem Science Center pedagógiai központjának igazgatója. Előadása a tudományos központoknak a hagyományos iskolai (formális) és a – 21. században egy-



Miha Kos (fotó: Radnai Tamás)

szélesebb körben elfogadott – hétköznapi tapasztalatokból merített (informális) tanulási módok közötti szakadék áthidalásában betöltött szerepéről szolt.

Az első nap délutánján *Miba Kos*, a szlovéniai Ljubljánában található „Kísérletek házána” alapító igazgatója magával ragadó, szellemes előadásában egyszerű érzékszervi csalódásokon keresztül, a „lát-szat néha csal” bemutatásával illusztrálta, hogyan lehet felébreszteni a kételkedést és a kritikai gondolkodás igényét a tanulóknban, ami a tudományos kutatások területén is fontos mozgatórugó.

Ulrike Feudel, a németországi Oldenburgi Egyetem Tengerkémiiai és Biológiai Intézetének elméleti fizika professzora a komplex rendszerek középiskolai tanulmányozásának módszereiről beszélt.

David Featonby bemutatta az egyre nagyobb népszerűségnek örvendő *Science on Stage* – Színpadon a tudomány – természettudományokat tanító, új módszereket fejlesztő tanárokat összefogó hálózatát, és a kétévenként megrendezésre kerülő *Science on Stage* fesztivált, amely 2017-ben Debrecenben lesz.

A *fény nemzetközi éve* jegyében, a fény különleges tulajdonságaiból kiindulva mutatta be *Néda Zoltán*, a kolozsvári Babeş–Bolyai Egyetem tanára, az MTA külső tagja a téridő és a speciális relativitáselmélet újszerű, középiskolában is követhető felépítését. A fizikai tér és a fizikai idő egyaránt definiálható fénysugarak segítségével. Ebben a felépítésben a speciális relativitáselmélet „természetes módon adódik”.

A játékelmélet tudománya ma már messze túlmutat a matematikán, ahonnan indult. Eredményeit számos területen, széleskörűen alkalmazzák, például a társadalmi-gazdasági mozgások leírásában. *Szabó György* – az MTA Energiatudományi Kutatóközpont tanácsadója – izgalmas előadásában két egyszerű játékon keresztül mutatta be az evolúciós játékelmélet középiskolai taní-

tásának lehetőségét. A kutatásban használt játékok eljátszhatók, számítógéppel szimulálhatók, mindez szórakoztató a diákok számára, miközben tudásra tesznek szert, és érdeklődésük is fokozódik a matematika és a fizika iránt.

Az ELTE Fizikai Intézetének különleges laboratóriuma a Kármán Laboratórium, amelyben környezetünk áramlásai modellezhető speciális hullámkádakban lévő folyadékokkal. A labort *Vincze Miklós* mutatta be filmekkel illusztrált előadásában. A forgó, tengelye mentén hűtött, palástján melegített henger alakú tartályban lévő víz festékkel láthatóvá tett áramlása jól szemlélteti a forgó Föld felszínén kialakuló tengeráramlásokat és a vízhez hasonlóan áramló levegő mozgását. Újdonság, hogy ezzel az eszközzel kísérletileg tanulmányozható a klímaváltozás jelensége is.

Aszódi Attila, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézetének egyetemi tanára, a Paksi Atomerőmű teljesítményének fenntartásáért felelős kormánybiztos „első kézből” adott szakmai tájékoztatást a magyar társadalmat foglalkoztató kérdéssről, a Paksi Atomerőmű tervezett bővítéséről. Érzékeltette, hogy az energiagazdálkodás hazai rendszere mellett elkerülhetetlen az atomenergia tervezett mértékű igénybevétele. Előadását kiemelkedő érdeklődés kísérte, hiszen az új blokkok építésének társadalmi elfogadottsága döntő momentum lehet a projekt megvalósításában.

A debreceni Atommagkutató Intézet csapata egy „igazi” számítógépes kalandjátékot fejlesztett a fizika népszerűsítéséért. A játékot *Fülöp Zsolt*, a kutatóintézet igazgatója mutatta be. A játék helyszínei valódiak: az intézet laboratóriumai, amelyeket a könnyebb tájékozódás érdekében különböző színek jeleznek. A laboratóriumokban az intézet munkatársai várják a játékost. A „küldetés” teljesítése során a játékosok fizikai ismereteket szereznek, és „kipróbálhatnak” különböző eszközöket is.

A konferenciát a társadalmilag érzékeny problémákkal foglalkozó kerekasztal-beszélgetés zárta.

A beszélgetés témájához kapcsolódó kirándulásként a résztvevők egy csoportja meglátogatta a Paksi Atomerőmű Karbantartási Gyakorló Központját, ahol – radioaktív sugárzástól mentes környezetben – a reaktor belsejének életnagyságú alkotóelemei láthatók.

A *Fizika tanítása* doktori program hallgatói nagy számban vettek részt előadóként, majdnem mindenki jelentkezőt a kedvenc témájával. A szekciókban elhangzott prezentációk majd felét ők tartották. A szekciók tükrözték a konferenciára meghirdetett témaköröket.

Környezettudományok

A környezettudomány volt a legnépszerűbb témák egyike. Az energiatermeléssel, -felhasználással foglalkozó előadások bepillantást engedtek a megújuló („zöld”) energiaforrások alkalmazásának lehetőségeibe is. Több előadás foglalkozott tágabb környezetünk megismerésével: csillagászatral és űrkutatással. Az űrszondák fizikai modelljeinek tanulmányozása jó lehetőséget adhat a technikai ismeretek fejlesztésére is.

A fizikatanítás módszertani innovációi

Korunk diákjai információban gazdag környezetben élnek. A körülöttük lévő forrásokból rengeteg ismeret és érdekesség veszi körül őket. A tanárnak az iskolában egyre nehezebb dolga van az érdeklődés felkeltésében és fenntartásában. Ennek megfelelő volt a módszertani szekció gazdag kínálata. A szekciókban előadó tanárkollégák és kutatók számtalan eredeti ötletet mutattak be arra, hogyan lehet érdekesebbé és vonzóbbá tenni nemcsak a fizikaórákat, de magát a tudományt is. Fontos terület az érdeklődő, tehetséges fiatalok képességeinek fejlesztése. Számukra a különleges jelenségek és problémák, valamint a különböző szintű és tematikájú versenyek jelenthetik a fő motivációt. Több előadó tért ki a játékok szerepére az ismeretek megszerzésében.

A kísérletek szerepe a fizika tanításában

Nem létezhet korszerű fizikaoktatás kísérletek nélkül. A hagyományos („szertári”) eszközök mellett megjelentek az elektronikus berendezések és maga a számítógép is. A számítógép nem csupán a mérési eredmények feldolgozására szolgál, hanem kísérletezni, mérni lehet vele. A fizikai kutatások teljesen új módszere a számítógépes szimuláció, amelyre több példát is láthattak a résztvevők. Kreatív kollégák maguk által tervezett és kivitelezett kísérleteket mutattak be, amelyek nem túl nagy anyagi ráfordítással elkészíthetők.

Informális módszerek a fizika tanítása során

Míg a formális tanulás legnagyobb részben szervezett, iskolai keretek között történik, az informális tanulás a mindennapi életünk része, közvetlen tapasztalatainkból folyamatosan új ismeretekhez jutunk, kibújni alóla nem lehet. Az iskolai fizikatanítás és -tanulás hatékonysága és élvezete jelentősen növelhető, ha a tanár munkája során ezekre a hétköznapi ismeretekre épít. Az egyik szekcióban a hallgatók ötleteket kaptak arra, hogy miként használhatók a mindennapi tapasztalatok a fizikaórán, és megtanulhatták, hogyan nézzenek tanítványaikkal közösen kritikus, fizikus szemmel látványos filmeket.

A tudományos központok szerepe a fizika tanításában

A tanulás új helyszínei a tudományos központok. Azon túl, hogy mindenki számára igyekeznek közelebb hozni a fizikát, az iskolákkal is együttműködnek, ezekben a központ munkatársai segítségével – az eszközpark használatával – „kihelyezett” fizikaórákat lehet tartani. Bemutathatók olyan jelenségek is, amelyekre az iskolai fizikaórán nincs lehetőség. A központot a tanulók családjukkal újra felkereshetik, a látottakat együtt megnézhetik. Ez a fizikai ismeretterjesztés hatékony módszere lehet.

Társadalmilag érzékeny témák és komplex rendszerek a fizika tanításában

A fizika tudományának ismeretei és eredményei beépültek mindennapi életünk szinte minden területére,

ezért társadalmi hatásuk igen jelentős. Például a biofizika eredményeit, a modern fizika eredményeinek alkalmazásával működő eszközöket a mindennapi gyógyításban alkalmazzák. A fizikai és biofizikai jelenségek megértése segítségünkre lehet a fogynéppel, például látáshibával élő társaink segítségével. A világ „energiagondjai” és azok megoldási lehetőségei napjainkban fontos társadalmi tényezőkké váltak. Mindezt tanítványainkkal is meg kell ismertetni. Egyes fizikai módszerek segíthetnek társadalmi jelenségek megértésében. A majdani döntéshozók véleményét – amely évek múlva a földi életet sok szempontból meghatározhatja – befolyásolják az adott területen meglévő ismereteik. Ebben a szekcióban a résztvevők kitekintést kaptak ezekre a területekre is.

Multimédia, informatikai és kommunikációs eszközök a fizika tanításában

Mára általánosan használt eszközzé vált a számítógép. Alkalmazásának számos lehetőségét bemutatták az előadók: mérés, adatfeldolgozás, grafikonkészítés, szimuláció, modellezés stb. Kiderült, a diákok sokszor jobban tudnak programozni tanáraiknál, a bemutatott számítógépes anyagokat sok esetben diákok készítették. Több szoftverfejlesztő cég is foglalkozik a fizika oktatásához használható programok készítésével, amelyek iskolai tapasztalatairól is hangzottak el beszámolók.

Korunk fizikája, új kutatási eredmények

A 21. század fizikája részben „túl kicsi” részecskékkel, részben „túl elvont”, magas fokú matematikátudást igénylő elméletekkel foglalkozik, ezért nehéz feladat a legújabb kutatások iskolai ismertetése, bemutatása és főleg magyarázata. A legszemléletesebb segítséget a számítógépes szimulációk adják. Az iskolában részben magát a jelenséget, részben a magyarázatot lehet szimulációval bemutatni. A megértést nagymértékben segíti, ha a tanulók legalább el tudják képzelni az „elképzelhetlent”, mi is történik a parányi anyagi részecskék egy-egy jelenség során. Sok ötlet hangzott el az előadóktól, hogyan tehetjük szemléletesebbé a mai fizika kutatási területeit és eredményeit.

Nukleáris fizika

A társadalmak energiaellátási gondjai kapcsán nap mint nap előkerül a nukleáris energiaforrások kérdése. A hiteles véleményalkotáshoz a döntéshozók számára nélkülözhetetlenek a megfelelő fizikai ismeretek, amit az emberek túlnyomó többsége az iskolai oktatás során szerezhethet meg. A nukleáris ismeretek sem tartoznak a fizika legegyszerűbb fejezetei közé, ezért a fizikatanárnak meghatározó szerepe van az ismeretek közvetítésében. Az előadók saját, kipróbált ötleteiket mutatták be, még a játék motivációs erejét is bevetették.

A konferenciát kerekasztal-beszélgetés, végül kirándulás zárta. A résztvevők egy csoportja meglátogatta a Paksi Atomerőművet.

Folytatás a belső borítóoldalon.

A FIZIKAI SZEMLE LXV. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

<p><i>Aszódi Attila, Boros Ildikó:</i> Új blokkok a paksi telephelyen – 2. rész 377</p> <p><i>Aszódi Attila:</i> Új blokkok a paksi telephelyen – 1. rész . . . 334</p> <p><i>Bakonyi Imre, Tóth Bence, Péter László:</i> Nanohuzalok előállítása 223</p> <p><i>Barna B. Péter:</i> Pócza tanár úrról – születésének 100. évfordulóján 372</p> <p><i>Barnaföldi Gergely Gábor, Bencédi Gyula, Karsai Szilvia:</i> Gravitációs fényelhajlás szimulációja optikai lencsékkel: készítsünk fekete lyukat házilag! 182</p> <p><i>Blabó Miklós, Herczeg Tamás, Száz Dénes, Czínke László, Horváth Gábor, Barta András, Egri Ádám, Farkas Alexandra, Tarjányi Nikolett, Kriska György:</i> Matt fekete autók poláros fényszennyezése: a matt bevonat sem környezetbarát – 1–2. rész 7, 38</p> <p><i>Borbidi Attila:</i> A paksi erőmű és a környezeti rendszerek között várható kölcsönhatások 239</p> <p><i>Buzády Andrea, Szegő Dóra:</i> Millikan és az elemi töltés meghatározásának története – 1–2. rész 245, 301</p> <p><i>Einstein Albert:</i> Egy s más az általános relativitáselmélet kialakulásáról 402</p> <p>Előszó (<i>Hraskó Péter</i>) 402</p> <p><i>Fábián Margit:</i> Atomerőművi hulladékok kezelése – 1–2. rész 241, 311</p> <p><i>Finta Viktória:</i> Az „elektroszmog”-ról tudományosan . . . 189</p> <p><i>Gucsik Arnold, Bartók Ádám:</i> Gyémántok a világűrben . . 118</p> <p><i>Györgyi Géza (1930–1973):</i> Sugárnyalábok ingadozásai és korrelációja a részecskekép alapján 252</p> <p><i>Gyürky György, Farkas János:</i> Az első számjegyek Benford-törvénye és a radioaktív izotópok felezési ideje 297</p> <p><i>Hagymási Imre:</i> Újfajta kritikus viselkedés ritka földfémvegyületekben 42</p> <p><i>Horváth Dezső, Oláh Éva, Sükösd Csaba, Varga Dezső (Patkós András lábjegyzeteivel):</i> Beszélgetés az elektron méretéről 151</p> <p><i>Horváth Dezső:</i> Higgs-bozon és a világ vége vagy kezdete 115</p> <p><i>Horváth Gábor, Egri Ádám, Blabó Miklós, Barta András, Barta Pál, Horváth Ákos, Karl Bumke, Andreas Macke:</i> Felhőzöttségmérés, optikai felhőfelismerő algoritmusok összehasonlítása – 1–2. rész 227, 294</p> <p><i>Horváth Gábor, Száz Dénes, Egri Ádám, Farkas Alexandra, Barta András, Barta Pál, Kovács József, Csák Balázs, Jankovics István, Szabó Gyula:</i> A Hold és Nap által megvilágított égbolt polarizációátmenete biológiai vonatkozásokkal: a szürkületi ég rendellenes polarizációja részleges holdfázis idején 74</p> <p><i>Hózer Zoltán:</i> Az új paksi reaktorok üzemanyaga 417</p> <p><i>Illy József:</i> Einstein, a geofizikus? 404</p> <p><i>Jaeckel Joerg, Lindner Axel, Ringwald Andreas:</i> Ultrakönnyű részecskék nyomában 218</p> <p><i>Kereszturi Ákos:</i> A New Horizons űrszonda első eredményei a Plútóról és holdjairól 330</p> <p><i>Király Péter:</i> Kvantumjelenségek kozmikus méretekben: a 2015. évi fizikai Nobel-díj és háttere 420</p> <p><i>Kolláth Zoltán, Dömény Anita:</i> A kozmikus fény végzete 110</p> <p><i>Kovács László:</i> Wigner Jenő levelei Györgyi Gézához . . . 156</p>	<p><i>Krizsán Áron Krisztián, Varga József, Forgács Attila, Balkay László:</i> Orvosi képalkotás: diagnosztika a képelemek mögött 88</p> <p><i>Márki-Zay János:</i> Akik kiderítették hogyan történik a fémek képlékeny alakváltozása 10</p> <p><i>Molnár János:</i> Két muzeális műtárgy és egy régi törvény ürügyén – 1–2. rész 339, 382</p> <p><i>Pál Lénárd 90 éves (Patkós András, Szatmáry Zoltán)</i> . . . 366</p> <p><i>Pázsit Imre:</i> Együtt dolgozni Pál Lénárddal 367</p> <p><i>Radnai Gyula:</i> A kétszáz éves Brewster-törvény 83</p> <p><i>Radnai Gyula:</i> Einstein Nobel-díjáról négy tételben 410</p> <p><i>Radnai Gyula:</i> Fizikus tehetségpont a két háború között . 249</p> <p><i>Rátz Tanár Úr életműdíj 2014 – Tóth Eszter tanárnővel Kármán Tamás beszélget</i> 121</p> <p><i>Regály Zsolt:</i> Több, mint égen a csillag – 1–2. rész . . 233, 306</p> <p><i>Sódor Ádám:</i> Csillagászati spektroszkópia 2</p> <p><i>Varga János:</i> Teller Edéről mondták – pályatársak, barátok, ellenségek véleménye 193</p> <p><i>Vibók Ágnes, Halász Gábor:</i> Fénnyel indukált elfajulások molekuláris rendszerekben 146</p> <p><i>Wirth Lajos:</i> A' mennykönek mivoltáról 's eltávoztatásáról való böltselkedés 45</p> <p>A FIZIKA TANÍTÁSA</p> <p>Akkreditált tanártovábbképzés 30</p> <p><i>Baranyai Klára:</i> Vízen lebegő részlemez 131</p> <p><i>Barta Zsuzsanna:</i> Játékok a fizikai mennyiségek jelének, mértékegységének gyakorlására 357</p> <p><i>Beke Tamás:</i> A nap- és a szélenergia lakossági felhasználási lehetőségeinek modellezése iskolai projektfeladatban 263</p> <p><i>Beke Tamás:</i> Kerékpár mozgási jellemzőinek meghatározása iskolai projektfeladatban 344</p> <p><i>Beke Tamás:</i> Színes kaméleonok fázisátalakulása 18</p> <p><i>Bokor Nándor:</i> Vénusz a hálószobában 270</p> <p><i>Csatári László:</i> Öveges József nyomdokán a 21. században 390</p> <p><i>Csatári László:</i> Szem – fény – vesztés 178</p> <p><i>D'Intino Eugenio Ádám, Pham Thi Linh, Hömöstrei Mihály:</i> Karcolt hologram 101</p> <p><i>Döményné Ságodi Ibolya:</i> Nem csak a Zselichen pompázik csillagfényben az éjszakai égbolt 351</p> <p>Eötvös-verseny 2015 358</p> <p><i>Fraller Csaba:</i> Mérésekkel a Kozmosz nyomában 314</p> <p><i>Gnädig Péter:</i> Alkalmazható-e a Biot-Savart törvény nem záródó „áramkörökre”? – I–II. rész 123, 162</p> <p><i>Gócz Éva, Horváth Zsuzsa:</i> Üstökösprojekt két budapesti gimnáziumban 55</p> <p><i>Gyermán György:</i> Számítógéppel segített mérések a fizika tanításában (MyDAQ és LabView segítségével) 348</p> <p><i>Hárs György, Varga Gábor:</i> A mágneses vektorpotenciál, mint valóságosan létező vektormező 14</p> <p><i>Härtlein Károly:</i> Fotoeffektus bemutatása „házilag” 139</p> <p><i>Hegedüs Tibor, Horváth Zsuzsa, Udvardi Imre:</i> Csillagászati diákolimpia Magyarországon 319</p> <p><i>Hraskó Péter:</i> Elmélkedés a relativisztikus sebességösszeadás képletéről 343</p> <p><i>Inczeffy Szabolcs Zsombor:</i> Lissajous-görbék előállítása ferdeszögű rezgések egymásra tevődésével 278</p>
--	---

<i>Jávor Márta</i> : Megújuló fizikatanítás – nemzetközi konferencia az ELTE-n	432	A kritikus pontot keresik a CERN-ben az MTA Wigner kutatói	143
<i>Jendrək Miklós</i> : Elektroakusztikus átalakítók	128	A kutatók gyémántot használnak a rák korai felismeréséhez	399
<i>Kiss Lászlóné</i> : Bródy Imre Országos Fizika Kísérletverseny, 2014	29	A lézer felfedi az őskori leletek korábban nem észlelt részleteit	326
<i>Komáromi Annamária</i> : Kézzel fogható részecskék nem csak a részecskefizika	425	A neutrínódetektorok diszkréten figyelni tudják az atomreaktorokat	363
<i>Leitner Lászlóné</i> : Információs és kommunikációs technológiák a Szalay Sándor Emlékverseny szolgálatában	64	Állami kitüntetések augusztus 20. alkalmából	359
<i>Lendvai Dorottya, Czövek Márton, Forrás Bence</i> : Pendulumhullám, avagy szerelem első látásra	171	Almási István, 1944–2015 (<i>Kovács László</i>)	396
<i>Márki-Zay János</i> : A fémkristályok modellezésére szolgáló Bragg–Nye–Lomer-féle buborékmodell	204	Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2015. évi Küldöttközgyűlése	286
<i>Menich Péter, Szabó László</i> : Kripton gáz nyomásának mérése izzólámpában	214	Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2015. évi Küldöttközgyűlése (meghirdetés)	142
<i>Morvay Bálint, Pálfalvi László</i> : Az Ampère-féle gerjesztési törvény alkalmazhatóságának feltétele	169	Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat közhasznúsági jelentése a 2014. évről	281
<i>Piláth Károly</i> : Hullámhosszmérés videóanalízissel	97	Az iráni nukleáris megállapodás megnyitja az utat a tudományos együttműködés előtt	363
<i>Piláth Károly</i> : „Exobolygó kutatás” Trackerrel	387	Az USA két új világklasszis szuperszámítógépet fog építeni	70
<i>Radnóti Katalin, Adorjáné Farkas Magdolna</i> : A kutatás alapú tanulás lehetőségei a fizikaórán	198	<i>Bársony István</i> : Az céltudatosság jutalma	33
<i>Radnóti Katalin</i> : A fény: az Univerzum megismerésének eszköze	92	Beszámoló a LIGHTtalks rendezvénysorozat hazai eseményeiről	398
<i>Stonawski Tamás</i> : A Hold keringési sebességének mérése	61	Chile és a Kanári-szigetek lesz a gamma-obszervatórium helyszíne	362
<i>Stonawski Tamás</i> : Csírázási sebességek mérése – egy tévhit tisztázása a mikrohullámú sütőről	211	Elindult a Nemzeti Nukleáris Kutatási Program	360
Találd fel magad!	359	Először mérték meg az egyetlen elektron által kibocsátott ciklotronsugárzást	326
<i>Tasi Zoltánné</i> : XXIV. Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny	179	Emlékezés Fülöp Viktornéra (<i>Lévainé Kovács Róza</i>)	36
<i>Tichy Géza, Vankó Péter, Vigh Máté</i> : A 2014. évi Eötvös-verseny	23	Európai Érdekesképek a <i>Europhysics News</i> válogatásából (2014. szeptember–november)	71
<i>Ujvári Sándor</i> : 2015 a Fény éve – Oktatás – 58. Fizikatanári Ankét	393	Európai Érdekesképek a <i>Europhysics News</i> válogatásából (2015. január–február)	216
<i>Varga János</i> : A zsonglörködés fizikája	275	Európai Érdekesképek a <i>Europhysics News</i> válogatásából (2015. március–április)	327
<i>Vida József, Ósz György, Janóczki József</i> : 25 éves az Öveges József Fizikaverseny	134	Európai Érdekesképek a <i>Europhysics News</i> válogatásából (2015. május–június)	364
VÉLEMÉNYEK		India beindította az ASTROSAT-missziót	400
Ami még brutális... (<i>Bencze Gyula</i>)	396	Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira (<i>Kürti Jenő, Kamarás Katalin</i>)	68
<i>Horváth Péter</i> : A vektorpotenciálról (aki A -t mond, mondjon B -t is)	52	Jóhírünk a világban	215
KÖNYVESPOLC		Juhász András: Részecskefizika	144
Benkő József, Mizser Attila (szerk.): Meteor csillagászat évkönyv 2015 (<i>Füstöss László</i>)	31	Kínának már két éve működik távcsöve a Holdon	399
Gribbin John: Számolás kvantummacskákkal (<i>Füstöss László</i>)	261	Kitüntetések	141
Horváth Péter: Relativitáselmélet (<i>Füstöss László</i>)	260	Kutatási csúcserendezésből „szobor” – ajándék a CERN-ből	360
Kugler Sándor, Shimakawa Koichi: Amorphous semiconductors (<i>Füstöss László</i>)	260	<i>Lévai Péter</i> : Györgyi Géza emléktáblájának avatására	258
Miazma, avagy az ördög köve (<i>Füstöss László</i>)	181	Magasabb szintre lépett az európai neutronkutató központ, az ESS	398
Oláh Anna: „Mint kemencemester is országos híres” (<i>Oláh Anna</i>)	262	Meghívó EPS Fizikatörténeti Emlékhely avatási ünnepségére	142
HÍREK – ESEMÉNYEK		MOL MesterM-díj 2015	216
<i>A fizika mindenkié</i> rendezvény margójára (<i>Fábián Margit, Cserti József</i>)	292	Pakisztán a CERN tagállama lett	364
A fizikusok régi vulkán által megégetett papirusztekercseket olvastak el	144	Pákó Gyula, 1955–2014 (<i>Basa István</i>)	35
A fúziós reaktorok gazdaságilag megvalósíthatók lehetnek	362	Rátz Tanár Úr Életműdíj, 2014	69
A japán neutrínófizikusok gondoltak egy nagyot	144	Rekordenergia az LHC-ben, magyar közreműködéssel	325
		Szalay Sándornak ítelték a Sidney Fernbach-díjat	360
		Tudományos és módszertani konferencia fizikatanároknak	143
		Tudományos ülés Pócza Jenő születésének 100. évfordulóján	361
		Tudósok, akik csálnak	400
		Új eszköz a láthatáron sebészeknek a rák kezelésére	399
		Világhírű matematikai fizikus látogatása Magyarországon	361

Áttekintés

A *Fizika tanítása* doktori program keretében szervezett, de minden tanár számára elérhető konferencia lehetőséget adott a fizika tanítását szívügyüknek tekintő tanárok és kutatók számára, hogy nemzetközi szinten tájékozódhassanak az új módszerekről és saját eredményeiket bemutathassák. Fontos, hogy a fizikát tanító tanárok megismerjék a fizika oktatásával foglalkozó nemzetközi szervezeteket és az egyes országokban működő oktatási kutatással, a fizika „népszerűsítésével” foglalkozó nemzeti intézményeket is. Erre jó lehetőség kínálkozott ezen a konferencián, több szervezet és intézmény vezetője tartott előadást azok tevékenységéről. A szünetekben személyes beszélgetésekre is sor került. A tudományegyetemek oktatói és kutatói aktívan foglalkoznak az eredményes fizikatanítás kérdésével. Több egyetem ez irányú kutatásait ismerhették meg a résztvevők.

Különösen érdekesek voltak azok az előadások, amelyek több tudományterületet, többféle, új ötletes módszert, vagy több irányú tanulói tevékenység együttes alkalmazását mutatták be. Az új megoldások, ötletek továbbgondolásra készítenek. Befejezésül még ezekből az előadásokból emelek ki néhányat.

David Featonby angol fizikatanár elméleti és megfigyelési kutatásokat végzett a színvaksággal kapcsolatban. A különböző színű fénysugarak eltérő fizikai tulajdonságai teszik lehetővé a színlátást, amely bonyolult biofizikai folyamat. Ha a színlátás folyamata rosszul működik, színtévesztés vagy egyes színek esetében vakság következhet be. Az előadó megvizsgálta és szimulálta, mit lát egy olyan személy, akinek színlátása hibás. Érdekes volt szembesülni, mennyire eltérően érzékeli a világot az egészséges látású személyekhez képest. Felhívta a figyelmet az eltérő látás társadalmi problémájára is: például a színvak tanuló nem úgy látja a feladatlap színeit, mint a jól látók, és előfordulhat, hogy rosszul értelmezi a megoldandó feladatot. Lehet, hogy nem látja a tanár különböző színű jelzései közötti eltérést, ezért félreértelmezi azokat. A színvakság nehezíti a tanulást, amire a környezetnek, jelen esetben a tanárnak figyelemmel kell lennie. A kutatás a fizika, a biofizika és a társadalomtudomány területét egyaránt érinti.

Több hónapon át, elméleti úton és mérések sorozatával vizsgálta tanítványaival *Fülöp Csilla* a szánkóhúzás különböző eseteit. Először a mozgásegyenletet vizsgálták, a matematikai nehézségeket pedig számítógép segítségével hidalták át. C++ nyelven írt programmal elemezték az egyenleteket. A szükséges adatokat (lejtő hajlásszöge, súrlódási együttható) közvet-



Piláth Károly (fotó: Radnai Tamás)

len méréssel állapították meg. A „szánkóprojekt” egy egyszerű és ötletes példa a kutatás folyamatának bemutatására és kipróbálására.

A részecskefizika napjaink egyik legdinamikusabban fejlődő tudományága. A részecskék „elképzelhetetlenül” parányiak. A fizikaórák kis száma miatt csak tanórán kívül jut rá idő. *Oláh Éva* egy olcsó és egyszerű eszközt fejlesztett, amellyel játékosan szemléltethető a részecskék közötti kapcsolat. Egymásba rakható színes papírkockákkal lehet „eljátszani” a részecskék átalakulásait. A játék közben végzett manipuláció segíti a részecskék átalakulásának rendszerezését, áttekintését.

„A szivárvány a legszebb jelenség a természetben.” Már az ókorban is megragadta az emberek figyelmét. Az apró vízcseppeken megtörő napsugár útját a geometriai optika és a Maxwell-egyenletek segítségével egyaránt tanulmányozhatjuk. Ezeket a módszereket mutatta be *Cserti József*. A geometriai optikai számítások nem bonyolultak, középszintűen is megmutathatók. A falu fölött ívelő hatalmas szivárvány a gyerekek figyelmét felkelti, hiszen „mesés” tulajdonságai vannak és látványos.

Látványosak voltak *Piláth Károly* saját tervezésű és kivitelezésű kísérletei, közöttük a láthatóvá tett infravörös vetítés. Az ötlet minden iskolában megvalósítható.

A konferencia jó hangulatú volt, a szervezők minden apró részletre figyeltek. Az elhangzott előadások anyaga – a tervek szerint – a későbbiekben mindenki számára ingyenesen letölthető kötetben lesz elérhető, természetesen angol nyelven.

FROM TEACHERS
FOR TEACHERS



29 JUNE – 2 JULY 2017

INVENTING THE FUTURE OF SCIENCE EDUCATION

SCIENCE ON STAGE FESTIVAL 2017 DEBRECEN | HUNGARY

350 primary and secondary school teachers from all over Europe will present their most extraordinary teaching ideas at stands, in workshops and performances. Participants will be chosen through competitive national events in 25 countries for their science, technology and mathematics projects.

www.science-on-stage.eu

SCIENCE ON STAGE 2017
DEBRECEN

