

# fizikai szemle



2018/6

FROM TEACHERS  
FOR TEACHERS

MAGYAR SCIENCE ON STAGE Fesztivál



SZEGED, 2018.  
OKTÓBER 5-7.

ÚJ UTAKON A DIGITÁLIS GENERÁCIÓHOZ



Természettudományos fesztivált és kiállítást rendez az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, az Informatika-Számítástechnika Tanárok Egyesülete, a Bolyai János Matematikai Társulat, a Magyar Kémikusok Egyesülete és a Magyar Biológiai Tanárok Országos Egyesülete 2018. október 5-7-ig Szegeden, a Szent-Györgyi Albert Agórában.

SCIENCE ON STAGE 2018  
SZEGED

THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

Szervezők:







Puztai Tamás (Akadémiai Díj)



Krausz Ferenc (Arany János-díj)



Szabados László Benő (Fizikai Fődíj)

## MÁJUSI ESEMÉNYEK

Május eseményekben gazdag hónapja a hazai tudományos és különösen a fizikai közéletnek. Minden évben május elején tartja közgyűlését a Magyar Tudományos Akadémia. A közgyűlésen adták át az MTA Elnöksége által odaítélt Akadémiai Díjakat, amit idén tizenegy kutató érdemelt ki. Fizikusok közül *Puztai Tamás*, az MTA Wigner Fizikai Kutatóintézet tudományos tanácsadója vehetett át Akadémiai Díjat a heterogén kristálycsíra-képződés fázismező-elméleti leírásának megalapozásáért, a spirálózó eutektikus dendritik fázismező-elméleti modelljének kidolgozásáért, valamint a polikristályos megszilárdulás térelméleti módszerének kifejlesztésében játszott meghatározó szerepéért.

Az Akadémia külső tagjai számára szervezett fórumon adták át az Arany János-díjakat és -érmeket, amelyekkel az MTA a külföldi magyar kutatók munkásságát ismeri el. Kiemelkedő tudományos teljesítményéért Arany János-díjat kapott *Krausz Ferenc* Németországban dolgozó fizikus, az MTA külső tagja. Krausz Ferenc bécsi csoportjával elsőként állított elő ultrarövid fényimpulzusokat, amivel egy új tudományterület, az attoszekundumos fizika alapjait fektette le. 2004-től tevékenységét a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézet igazgatójaként végzi, ezzel párhuzamosan a müncheni Ludwig Maximilian Egyetem tanszékvezető professzora. Vezetésével számos magyar doktorandusz és kutató dolgozott Bécsben és Münchenben, akik közül többen hazai vagy külföldi professzori vagy MTA-doktori címet szereztek.

Az MTA közgyűléséhez kapcsolódóan a Fizikai Tudományok Osztálya évről-évre számos előadóülést rendez. A *Fizika fejlődési irányjai* című ülésen kerülnek átadásra az Osztály által odaítélt Fizikai Fődíj és Fizikai Díj kitüntetések. A Fizikai Fődíjat ebben az évben *Szabados László Benő*, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézet tudományos tanácsadója kapta az általános relativitáselmélet és a gravitációs tér megmaradó mennyiségeinek kutatásában elért eredményeiért, amelyekkel – egyebek között – jelentősen hozzájárult a gravitációelmélet kanonikus (hamiltoni) szerkezetének mélyebb megértéséhez. A témáról írt, folyamatosan aktualizált összefoglaló cikke a terület alpművének számít. Fizikai Díjat kapott *Dóra Balázs*, a BME Elméleti Fizika Tanszék egyetemi tanára és *Szabó Róbert*, az MTA CSFK tudományos tanácsadója.

Ezen az előadóülésen Puztai Tamás és Szabados László is előadást tartott a díjak elnyerésének alapjául szolgáló legfontosabb eredményeiről. Nagy örömmünkre, Puztai Tamás és Szabados László felkérésünket elfogadva előadásait cikkekben is leírták, amelyeket jelen számunkban már olvashatnak is.

A másik fontos májusi esemény az Eötvös Loránd Fizikai Társulat küldöttgyűlése, amelynek eseményeiről részletes beszámolót olvashatnak lapunkban. Ugyancsak ismertetjük a Társulat ez alkalommal átadott kitüntetéseit és díjait. A Díjazottak közül többen rendszeres szerzői lapunknak, és több díjazott (*Kürti Jenő*, *Vannay László*, *Juhász András*, *Opitz Andrea*, *Kóspál Ágnes*) írásaival a *Szemle* valamelyik közeljövőben megjelenő számában találkozhatnak majd.

Immár hagyomány, hogy a küldöttgyűlésen kerül átadásra a Fizikai Szemle Nívódíj az előző évfolyamban megjelent cikkek közül a szerkesztőbizottság által legjobbnak ítélt írás szerzői számára. A Társulat elnöksége elfogadta azt a javaslatunkat, hogy ezentúl „A fizika tanítása” rovatban megjelent cikkek közül is díjazunk egyet, az új eredményekkel, illetve tudománytörténettel foglalkozó cikkek mellett, így ezúttal már két cikk szerzője vehették át ezt az elismerést. A tanítási témájú díjazott cikk szerzője meghívást kap a következő tanári anketon való részvételre és előadás tartására. Remélem, hogy ez még több színvonalas cikk írására serkenti majd a *Szemle* közönségét.

  
Lendvai János  
főszerkesztő

# Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítő az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

**Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.**

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

*Főszerkesztő:*  
**Lendvai János**

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

*Műszaki szerkesztő:*  
**Kármán Tamás**

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

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

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



*A címlapon:*

**A Szegedi Tudományegyetemen kifejlesztett fotoakusztikus műszerek egyik jellemző felhasználási területe a tengeri fúrótornyokon kitermelt gáz minőségének mérése. (Lásd Bozóki Zoltán írását a 192–196. oldalakon.)**

## TARTALOM

<i>Lendvai János: Májusi események</i>	181
<i>Szabados B. László: A gravitációs energia-impulzusról</i> <i>A gravitációs energia-impulzus különös tulajdonságainak és ezek okának bemutatása</i>	183
<i>Pusztai Tamás: Anyagtudomány számítógéppel – 1. rész</i> <i>Hogyan váltja le a fizikai modellek számításán alapuló tervezés a korábbi „melegíts, kalapálj és reménykedj” módszereket</i>	188
<i>Bozóki Zoltán: A fotoakusztikus laboratóriumtól a tengeri fúrótornyokig</i> <i>– egy sikeres műszerfejlesztés története</i> <i>Egy több mint 20 év alatt megvalósított, eredményes innovációs tevékenység tanulságos leírása</i>	192

## A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Simon Alpár, Tunyagi Arthúr, Fülöp Zalán, Kapusi Zalán, Kandrai Konrád: Sűrűdési együttható meghatározása ellenállásmérés alapján</i> <i>Egy tanulságos labormérés – inkább egyetemi szintre</i>	197
<i>Bokor Nándor: Milyen alakú a száguldó autó kereke?</i> <i>A kérdés megválaszolása során szép példát kapunk a háromdimenziós téridődiagramok hasznosságára</i>	203
<i>Csatári László, Molnár Tamás, Zámbo Szabolcs: Törésmutató meghatározása saját mérőeszköz segítségével</i> <i>A 2017. évi myDAQ pályázaton III. helyezést elnyert munka bemutatása</i>	209

## HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2018. évi Küldöttgyűlése</i>	214
<i>A Társulat 2018. évi kitüntetései és tudományos díjai</i>	216

*J. Lendvai: This happened in May*  
*L. B. Szabados: On gravitational energy-momentum*  
*T. Pusztai: Computational materials science – Part 1*  
*Z. Bozóki: From a photoacoustic laboratory to an offshore drilling rig – story of a successful instrument development*

## TEACHING PHYSICS

*A. Simon, A. Tunyagi, Z. Fülöp, Z. Kapusi, K. Kandrai: Determination of friction coefficient by electrical resistance measurement*  
*N. Bokor: What shape is the wheel of a fast moving car?*  
*L. Csatári, T. Molnár, Sz. Zámbo: Refractive index measurement by a home-made device*

## EVENTS

*Delegates Assembly of the Roland Eötvös Physical Society*  
*Honors and scientific awards of the Roland Eötvös Physical Society*

**Fizikai Szemle**

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



# A GRAVITÁCIÓS ENERGIA-IMPULZUSRÓL

Szabados B. László

Wigner Fizikai Kutatóközpont, RMI Elméleti Osztály

A fizikai mennyiségek között a megmaradó mennyiségek különleges szerepet játszanak, mert általuk csökken a megoldandó mozgásegyenletek száma, vagy segítségével a fizikai rendszerek néhány kvalitatív tulajdonsága a mozgásegyenletek megoldása nélkül is megjósolható. Például eldönthető, hogy a rendszer adott kezdőállapotból mely állapotokba *nem* fejlődik; vagy ismert módon a fizikai rendszerek stabilitási tulajdonságainak vizsgálata az energiefunkcionál globális tulajdonságain alapul. Épp ezért meglepő, hogy a nem-gravitációs fizika majd minden területén oly alapvető fontosságú energia-impulzus *sűrűség* az általános relativitáselméletben nem jól definiált, illetve a teljes gravitációs energia-impulzus számos furcsasággal rendelkezik. Például, minden gravitációs energia-impulzus *sűrűség lényegi módon* függ attól a koordinátarendszertől, amelyben a számolásainkat végezzük [1]; és jól definiált gravitációs energia-impulzus csupán a téridő *kiterjedt* tartományaihoz rendelhető. Ráadásul ez utóbbi nem is egy háromdimenziós térfogati, hanem csupán egy *két-dimenziós zárt felületi integrál* alakját ölti.

A gravitációs energia-impulzus e furcsaságainak oka a gravitáció *univerzális jellege*, azaz a Galilei-Eötvös-kísérletek tanulságait összefoglaló *ekvivalenciaelv*. De a Galilei-Eötvös-kísérletek a gravitációs *jelenségekről* szólnak, függetlenül attól, hogy e jelenségekről relativisztikus vagy nem relativisztikus elmélet keretében kívánunk számot adni. Így a gravitációs energiával kapcsolatos nehézségek már a Newton-elméletben is jelentkeznek, feltéve, hogy a Galilei-Eötvös-kísérletek tanulságait következetesen vesszük figyelembe. Mivel a Newton-elmélet technikailag sokkal egyszerűbb mint az általános relativitáselmélet, ezért várhatóan a problémák gyökere, fizikai oka is sokkal világosabban látszódik, mint az általános relativitáselméletben.

Jelen cikk célja a gravitációs energia-impulzus fenti furcsaságainak, és e furcsaságok okának bemutatása. Így az írás első felében a gravitáció Newton-féle elméletében vizsgáljuk a gravitációs energiával kapcsola-

tos problémákat, és az általános relativitáselmélet teljes gravitációs energia-impulzusát csupán a dolgozat második részében diszkuáljuk.

## A newtoni gravitációelmélet

A Newton-féle gravitációelmélet szerint egy adott inerciarendszerben ( $x^i$ ,  $i=1, 2, 3$ , Descartes-koordinátákkal) a gravitációs erőteret egy  $\phi$  skalárfüggvénnyel írjuk le, és ennek gradiense, pontosabban  $-\partial_i \phi$ , a gravitációs térerősség. Így ha egy  $m_i$  tehetetlen és  $m_g$  gravitációs tömegű pontrészcskét helyezünk ezen erőterbe, akkor Newton második axiómája értelmében a tömegpont mozgásegyenlete:

$$m_i \ddot{x}^i = -m_g \partial^i \phi, \quad (1)$$

ahol a pont idő szerinti deriválást jelöl. (Emlékeztetőül megjegyezzük, hogy e két tömegfogalom a tömegpontok/testek elvben két teljesen független tulajdonságát jellemzi: míg a *tehetetlen tömeg* azon tulajdonság mértéke, hogy a tömegpont/test a rá ható adott erő során *az erő jellegétől függetlenül* milyen nehezen gyorsítható; a *gravitációs tömeg* annak mértéke, hogy a tömegpont/test milyen „erősen reagál” – azaz mekkora erőt „érez” – egy adott *gravitációs erőterben*, illetve – a 3. Newton-axióma és Newton tömegvonzási formulája miatt – milyen erős gravitációs erőteret hoz létre.  $m_g$  tehát az elektromosan töltött pontrészcseke töltésével analóg.)

A  $\phi$  térváltozóra vonatkozó téregyenlet a jól ismert Poisson-egyenlet,

$$\partial^i \partial_i \phi = 4\pi G \rho_g, \quad (2)$$

ahol  $\rho_g$  a forrás gravitációtömeg-sűrűsége és  $G$  a Newton-féle gravitációs állandó. (2) a  $\phi$ -t *lokálisan* csak egy

$$\phi(x) \rightarrow \phi(x) + C_i x^i + \phi_0$$

ambiguitás erejéig határozza meg egyértelműen, ahol  $C_i$  és  $\phi_0$  tetszőleges valós konstansok. Ha a  $-\partial_i \phi$  gravitációs térerősségnek jól definiált *fizikai jelentése* van, akkor nyilván  $C_i = 0$ . Legyen  $D \subset \mathbb{R}^3$  egy tartomány a háromdimenziós térben. Ekkor a gravitációs forrás gravitációs tömegének  $D$ -be eső része a (2) Poisson-egyenlet miatt még az

$$M_D := \int_D \rho_g d^3x = \frac{1}{4\pi G} \oint_{\partial D} v^i (\partial_i \phi) dS \quad (3)$$

alakba is írható, ahol a jobb oldali kifejezés a  $D$  tartomány  $\partial D$  határára (mint kétdimenziós *zárt felületre*)

Az MTA Fizikai Osztálya 2018. május 10-i rendezvényén *Gravitáció és megmaradási tételek* címen elhangzott előadás kissé bővített, írott változata.



Szabados B. László fizikus, az MTA doktora, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részcseke és Magfizikai Intézet, Elméleti Osztály (Térelméleti Kutatócsoport) tudományos tanácsadója. Kutatási területe az általános relativitáselmélet.

vett integrál. Itt  $v^i$  a  $\partial D$  felület kifelé irányított egység-normálisa. A (3) természetesen invariáns a potenciál  $\phi(x) \rightarrow \phi(x) + C_i x^i + \phi_0$  alakú transzformációira nézve, hiszen egy konstans  $C_i$  vektormező tetszőleges zárt felületre vett integrálja zérus.

A (3) tehát hasonló az elektrosztatika Gauss-tételéhez, ahol a  $D$  tartományban levő elektromos töltést megadhatjuk az elektromostérierősség-fluxus  $D$  határára vett integráljaként is. Ezen analógia az alapja annak a sokszor hallható állításnak, hogy a newtoni gravitációelmélet mind formalizmusát, mind tartalmát illetően lényegében az elektrosztatikával azonos, így annak oktatásával nem kell külön foglalkozni. Látni fogjuk azonban, hogy ez a vélekedés alapvetően hibás: a gravitáció a kölcsönhatások között kivételes jellegű, és ennek oka a Galilei–Eötvös-kísérleteken alapuló ekvivalenciaelv.

Mielőtt rátérnénk e kísérletek tanulságainak diszkutálására – az elektrosztatikai analógiát követve –, vesszük be a gravitációs erőtér *energiásűrűségét* az

$$\mathcal{E} := -\frac{1}{8\pi G} (\partial_i \phi) (\partial^i \phi) \quad (4)$$

definícióval. A negatív előjel fizikai jelentése az, hogy a gravitációs tömeg nemnegativitása (és így a gravitáció vonzó jellege) miatt a Newton-elméletben a gravitációs energia *kötési energia*. Valóban, egyszerű számolás mutatja, hogy ha például egy adott  $R$  sugarú, gömbszimmetrikus, homogén tömegeloszlású golyót akarunk felépíteni olyan pontrészcskékből, amelyeket a végtelenből szállítunk a felépülőfélben lévő  $r < R$  sugarú golyó felszínére, akkor a gravitációs erőtér által a pontrészcskéinken végzett összes munka éppen a  $-\mathcal{E}$  teljes háromdimenziós térre vett integrálja.

A (4) kifejezés a Poisson-egyenlet fundamentális megoldásával azonban a Newton-elmélet által leírt anyag + gravitáció rendszerek *belső instabilitását* mutatja. Valóban, a (2) tipikus megoldása  $1/r$  alakú, így  $\mathcal{E} \sim 1/r^4$ , aminek a teljes térre vett

$$\int_{\mathbb{R}^3} \mathcal{E} d^3x$$

integrálja *alulról nem korlátos*. Tehát a Newton-elmélettel leírt anyag + gravitáció csatolt rendszerből elvben tetszőlegesen nagy energia vonható ki a gravitációs kötési energia minden határon túl való növelése, azaz a forrás anyagának egyre kisebb és kisebb térrészbe zsúfolása árán. Látni fogjuk, hogy az általános relativitáselmélet orvosolja ezt a nehézséget, mert az általános relativitáselméletben a teljes energia *nem negatív*.

Jól ismert a Galilei–Eötvös-kísérletek eredménye, azaz bármely anyag/részecske gravitációs tömege arányos annak tehetetlen tömegével, és ez az arányossági tényező független a test anyagi minőségétől, illetve a részecske típusától. Másként fogalmazva, az  $m_g/m_t$  „fajlagos gravitációs tömeg” minden anyagra és részecskére azonos. Így megfelelő egységválasztás-

sal  $m_g = m_t$  elérhető (és így a  $g$  és  $t$  indexek elhagyhatók). Ez tehát nem *a priori* igazság, hanem *kísérleti tény*. Ekkor azonban az (1) mozgásegyenlet a tömegpontra vonatkozó semmilyen specifikus tulajdonságot sem tartalmaz: minden tömegpont adott gravitációs térben azonos módon mozog. Ez a *szabadesés univerzalitásának* elve.

Most tegyük fel, hogy az (1) mozgásegyenletben a  $-\partial_i \phi$  gravitációs térierősség egy *konstans vektormező*. Ekkor a mozgásegyenlet épp olyan alakú, mintha egy *egyenletesen gyorsuló* vonatkoztatási rendszerből nézve íránk le egy szabadon mozgó tömegpont mozgását. Tehát a homogén gravitációs erőtereket semmilyen *mechanikai kísérlettel* sem tudjuk megkülönböztetni az egyenletesen gyorsuló tehetetlenségi erőterektől. Ezt a kísérleti tényt emelte *Albert Einstein* elv rangjára, mondván, hogy nem csak mechanikai, de *semmilyen* kísérlettel sem tudunk e két erőter között különbséget tenni. Ez az *ekvivalencia elve*. Most – röviden – ezen elv három egyszerű következményét diszkutáljuk.

Először, mivel a homogén gravitációs és az egyenletes gyorsulású tehetetlenségi erőtereket elvben sem tudjuk megkülönböztetni, ezért a gravitációs térierősségben megjelenik egy  $\partial_i \phi \rightarrow \partial_i \phi + C_i$  ambiguitás, ahol  $C_i$  egy tetszőleges, konstans vektormező; épp az, mint amit a Poisson-egyenlet megoldása kapcsán fent már említettünk. Ez az ambiguitás egyúttal az inerciarendszerek meghatározásában is jelentkezik.

Másodszor, a gravitációs erőtér ambiguitásmentes tartalmát a  $\phi$  térváltozó  $\partial_i \partial_j \phi$  *második* deriváltja jeleníti meg. Ezt *árapályerőnek* is nevezzük, mert ez a mennyiség bukkan fel a Hold által a Föld óceánjaiban keltett árapályjelenség számolásában. Valóban, ha  $x_0^i(t)$  és  $x^i(t)$  két egymás közelében mozgó tömegpont pályája, akkor (1) miatt ezek

$$\ddot{\xi}^i(t) := \ddot{x}^i(t) - \ddot{x}_0^i(t)$$

*relatív gyorsulására* adódik, hogy

$$\ddot{\xi}^i = -(\partial^i \phi)(x) + (\partial^i \phi)(x_0) = -(\partial^i \partial_j \phi)(x_0) \xi^j.$$

$\partial_i \partial_j \phi$ -t spúrra és spúrmentes részre felbontva és felhasználva (2)-t, kapjuk, hogy

$$\partial_i \partial_j \phi = \frac{4\pi}{3} \rho \delta_{ij} + \left( \partial_i \partial_j \phi - \frac{1}{3} \delta_{ij} \partial_k \partial^k \phi \right). \quad (5)$$

A spúr tehát a testekben *izotróp*, míg a spúrmentes rész *nyíró deformációt* eredményez. A gravitáció tehát egy *tenzoriális, kvadrupól* jellegű kölcsönhatás; ellentétben az elektrodinamika *vektoriális, dipól* jellegével.

Talán érdemes megjegyezni, hogy az általános relativitáselmélet newtoni (gyenge tér) közelítésében a metrikus tenzor nem triviális része a  $\phi$  térmennyiség-re, a (nem tenzoriális) Christoffel-szimbólumok a  $\partial_i \phi$  térierősségre és a görbületi tenzor komponensei a  $\partial_i \partial_j \phi$  árapályerőre redukálódnak.



Végül, bár a gravitációs forrás (3) által adott  $M_D$  tömege a  $\partial_i \phi \rightarrow \partial_i \phi + C_i$  ambiguitás ellenére jól definiált, sem az  $\mathcal{E}$  gravitációsenergia-sűrűség sem az

$$\int_{\mathbb{R}^3} \mathcal{E} d^3x$$

integrállal értelmezett teljes energiafunkcionál nem jól definiált. Valóban, ha  $p$  a háromdimenziós tér adott, tetszőleges pontja, akkor mindig található olyan *egyenletesen gyorsuló* vonatkoztatási rendszer, hogy ebből a rendszerből nézve a  $p$  pontban a gravitációs térerősség, és ezzel együtt az  $\mathcal{E}$  gravitációsenergia-sűrűség is zérus; vagy akármilyen nagy érték (egy másik megfelelő gyorsuló rendszerből nézve). A gravitációsenergia-sűrűség nem jól definiált, a *gravitációs energia nem lokalizálható pontra*.

## Newtoni gravitációelmélet speciális relativisztikus korrekciókkal

A speciális relativitáselmélet szerint a testek tehetetlen tömege függ az energiatartalmuktól, azaz bármely energiához, illetve energiaeloszláshoz tartozik egy tehetetlen tömeg, illetve tömegeloszlás. Ekkor azonban a tehetetlen és gravitációs tömeg azonossága miatt minden energia a gravitációs erőter forrása. Például egy forró vasgolyó erősebb gravitációs erőteret hoz létre, mint ugyanaz a vasgolyó alacsonyabb hőmérsékleten, hiszen a magasabb hőmérsékletű test belső energiája nagyobb az alacsonyabb hőmérsékletűénél. Hasonlóan, a gravitációs erőter energiája magának a gravitációs erőternek is forrása – pontosabban, a (4) *negatív definit* jellege miatt ez *csökkenti* a newtoni gravitációs erőteret. Így e tagokat relativisztikus korrekcióként hozzá kell adni a (2) jobb oldali forrástagjához:

$$\partial^i \partial_i \phi = 4\pi G \left[ \rho + \frac{1}{c^2} (u + \mathcal{E}) \right], \quad (6)$$

ahol  $u$  a forrás belső energiájának sűrűsége. Az  $\mathcal{E}$  (4) által adott alakját beírva, kapjuk, hogy ez  $\phi$ -re egy *nemlineáris* Poisson-egyenlet. Érdeemes megjegyezni, hogy – két további relativisztikus korrekcióval együtt – (6) egzakt egyenletként megkapható a sztatikus gravitációs terekre felírt Einstein-egyenletekből is [2].

Végül számoljuk ki a  $D \subset \mathbb{R}^3$  tartományban az anyag + gravitáció csatolt rendszer energiáját a (6) által definiált elméletben. Ez nem más, mint a (6) jobb oldali forrástagjának térfogati integrálja:

$$\begin{aligned} E_D &:= \int_D (c^2 \rho + u + \mathcal{E}) d^3x = \\ &= \frac{c^2}{4\pi G} \oint_{\partial D} v^i (\partial_i \phi) dS. \end{aligned} \quad (7)$$

Azonban bármely konstans vektormező fluxusának zárt felületre vett integrálja zérus, ezért a gravitációs

térerősségben meglévő  $\partial_i \phi \rightarrow \partial_i \phi + C_i$  ambiguitás ellenére ez az  $E_D$  úgynevezett *kvázilokális* energia már jól definiált, s azt *kétdimenziós, zárt felületi integrál* alakjában kaptuk meg.

Összefoglalva: a (7) jól definiáltságát (a  $\partial_i \phi \rightarrow \partial_i \phi + C_i$  ambiguitás ellenére) az a három feltevés eredményezte, hogy 1) figyelembe vettük a gravitációs forrás  $\mathcal{E}/c^2$  *relativisztikus korrekcióját*; 2) nem csupán a gravitációs erőter, hanem az *anyag + gravitáció csatolt rendszer* energiáját számoltuk; 3) nem sűrűség jellegű, hanem *integrális kifejezést* kerestünk. E három feltevés már meghatározza azt a stratégiát, amelyet követve az általános relativitáselméletben jól definiált (teljes) energia-impulzus kifejezést határozhatunk meg.

## Energiasűrűség az általános relativitáselméletben

Az általános relativitáselméletben a  $\phi$  függvény – mint a gravitációs erőter állapothatározója – szerepét a négydimenziós  $g_{ab}$  metrikus tenzor veszi át; és az ekvivalenciaelv alapján megmutatható [3], hogy bármilyen, a téridő-geometria operatív meghatározására irányuló kísérlet a  $g_{ab}$  által definiált téridő-geometriát eredményezi. A metrikus tenzor tehát *kettős szerepet* játszik: az a gravitációs térváltozó és egyben a téridő-geometriát is definiálja. Az általános relativitáselméletben nincsenek olyan, a dinamikai változóktól független és *metrikus jelentéssel is bíró* koordináták, mint amilyenek a Descartes-koordináták a Minkowski-téridőben. A metrika e kettős szerepe a forrása számos nehézségnek, és speciálisan a gravitációs energia-impulzus nem lokalizálhatóságának is.

Formálisan – kiindulva például az elmélet Einstein által adott Lagrange-függvényéből – egy olyan kifejezést konstruálhatunk, ami analóg az anyag energia-impulzus tenzorával. Ez a Christoffel-szimbólumok egy homogén kvadratikus kifejezése. Viszont a differenciálgeometriából ismert, hogy bármely nem zárt görbe egy környezetében mindig be tudunk vezetni egy olyan koordinátarendszert, hogy ebben a Christoffel-szimbólumok mindegyike zérus a görbe pontjaiban. Így a fenti kifejezés nem lehet egy jól definiált fizikai mennyiség, ugyanis a görbét egy megfigyelő világvonalának választva azt kapnánk, hogy a gravitációs energia-impulzus sűrűséget a megfigyelő zérusnak vagy nem zérusnak méri attól függően, hogy milyen koordinátarendszert használ. Természetesen egy jól definiált energia-impulzus sűrűség *komponenseinek értéke* függ a választott vonatkoztatási (és ezzel a megfelelő koordináta) rendszertől, de az energia-impulzus sűrűség *összes komponensének eltűnése vagy nem eltűnése* már nem. A fenti kifejezés tehát *lényegi* módon függ a számolások végigviteléhez szükséges koordinátarendszertől, így az csupán egy úgynevezett *pszeudotenzoriális* mennyiség.

Az elmélet hamiltoni megfogalmazásában ugyanez a nehézség egy másik alakban jelentkezik: az Einstein-elmélet teljes Hamilton-függvénye a téregyenle-

tek teljesevése esetén csupán egy (végtelenbe kinyúló) térszerű hiperfelület végtelenbeli határára vett kétdimenziós, zárt felületi integrálra redukálódik. A Hamilton-függvénynek nincs peremintegrálra át nem alakítható térfogati integrál része, aminek integrandusát jól definiált gravitációs energia-impulzus sűrűségként azonosíthatnánk. *A gravitációs energia-impulzus nem lokalizálható pontra, az jól definiált fizikai mennyiségként csak a téridő kiterjedt tartományaihoz rendelhető.*

## A teljes energia-impulzus az általános relativitáselméletben

A  $\Lambda = 0$  eset

Hogy világosan lássuk, hogy a teljes gravitációs energia-impulzust miért úgy definiáljuk ahogy, nézzünk egy lokalizált gravitációs forrást. Ha az Einstein-egyenletekben a  $\Lambda$  kozmológiai állandó zérus, akkor a forrástól (illetve a téridőben annak világsövévtől) mind térszerű, mind fényszerű irányokban) távolodva a téridő görbületi tenzora minden határon túl csökken, zérushoz tart. A téridő tehát a forrástól nagy távolságokra a Minkowski-téridőhöz válik hasonlatossá (1. ábra). Megengedjük, hogy a forrás valamely, a végtelenbe kifutó  $N_1$  fényszerű hiperfelülettel definiált  $u_1$  retardált időpillanat után gravitációs hullámokat emittáljon, és ez az emisszió egy későbbi,  $N_2$  hiperfelülettel definiált  $u_2$  retardált időpillanat után megszűnjön. A gravitációs sugárzás fényszerű irányokban távolodva fut ki a végtelenbe. A fizikai probléma tehát analóg az elektrodinamikából jól ismert Hertz-dipól problémával; és ez az analógia segít a gravitációs teljes energiakifejezések mögötti fizikai kép megértésében is.

Zérus kozmológiai állandó mellett az általános relativitáselmélet standard teljes energiakifejezése az

$$E := \oint_{S_\infty} B dS \quad (8)$$

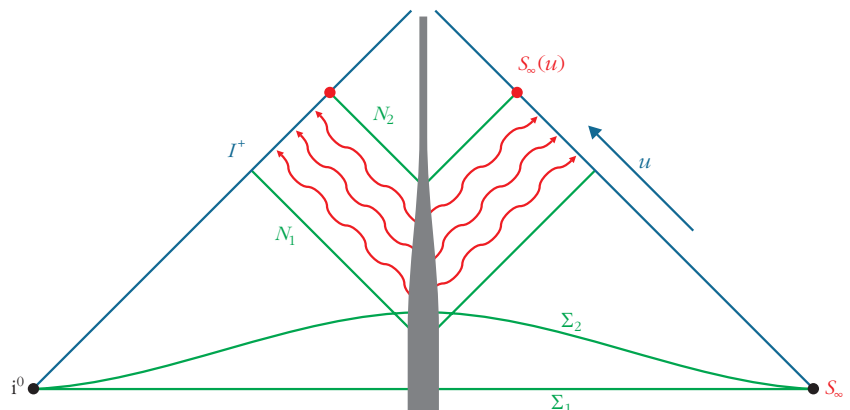
alakot ölti. Kérdés, hogy mi az integrációs tartomány, és hogy hogyan válasszuk meg az integrandust. Az *Arnowitz, Deser és Misner* (ADM) [4] által javasolt energiaintegrálban  $S_\infty$  a téridő (megfelelő jól definiált értelemben vett) aszimptotikusan sík térszerű  $\Sigma$  hiperfelületének végtelenbeli pereme, míg az integrandus az e hiperfelületen indukált háromdimenziós (térbeli) metrika aszimptotikus Descartes-koordinátaiban vett komponenseinek az  $1/r$  szerinti sorfejtésében megjelenő vezető kifejtési együtthatók, mint  $(\theta, \phi)$  függvények egy kombinációja. A Minkowski-téridő  $t = \text{constans}$  hipersíkjai, amelyek segítségével a Hertz-dipól problémában a teljes megmaradó energiát ér-

telmezzük, ilyen hiperfelületek. Az ADM-energia nem triviális tulajdonsága, hogy az *megmaradó* abban az értelemben, hogy a számolást egy másik, de szintén aszimptotikusan sík (és az előzőhöz képest aszimptotikusan nem busztolt) térszerű hiperfelületre megismételve, az energia előbbi értékét kapjuk.

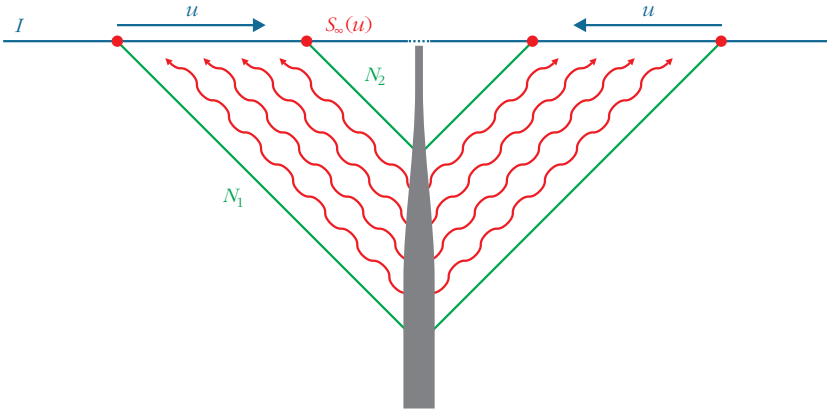
Az ADM-energiánál azonban talán még érdekesebb az úgynevezett Bondi-energia [5], ami a rendszer dinamikáját is jellemzi. Ez is (8) alakú, de az integrációs tartomány most a kifutó, fényszerű  $N$  hiperfelületek végtelenbeli  $S_\infty(u)$  pereme, míg az integrandus a metrika aszimptotikusan fényszerű koordinátákban megadott komponenseinek az  $1/r$  szerinti kifejtési együtthatóiból épül föl. Ez a kifejezés tehát függ az  $u$  retardált időtől, és a Bondi-energia nem triviális tulajdonsága, hogy az az  $u$ -nak *monoton csökkenő* függvénye. Az  $E_B(u)$  Bondi-energia  $u$ -függésének, illetve monoton csökkenő jellegének jelentése az, hogy valamely  $u_1$  és  $u_2 > u_1$  retardált időpillanatokhoz tartozó Bondi-energiák  $E_B(u_1) - E_B(u_2)$  különbsége a lokalizált rendszerből a sugárzás által elvitt energiát méri, illetve a monotonitás miatt a sugárzás által a rendszerből elvitt energia *pozitív*.

De vajon maguk az  $E_{ADM}$  és  $E_B(u)$  teljes energiák is pozitívak? Ezt a kérdést válaszolja meg a *pozitív energiátétel* [6]: *ha az anyag lokális energiasűrűségét minden megfigyelő nemnegatívnak méri és lokális energia-áramát kauzális vektornak látja (azaz a  $T_b^a V^b$  kontrakció jövőirányított kauzális vektor minden jövőirányított időszerű  $V^a$  vektorra), akkor  $E_{ADM}, E_B(u) \geq 0$ .  $E_{ADM} = 0$  vagy  $E_B(u) = 0$  bármelyike ekvivalens a téridő lokális Minkowski-jellegével.* Ez a tétel a fekete lyukakat tartalmazó téridőkre is igaz. Ez a modern relativitáselmélet egyik legfontosabb eredménye, amin nagyon sok eredmény alapul. Ezek közül csak egyet említünk meg: az Einstein-elmélet *alapállapota* (zérus kozmológiai állandó és „normál” anyag mellett) a Minkowski-téridő, és (a tétel második, úgynevezett rigiditási része miatt) ez *lokálisan stabil alapállapot* is. A Newton-elmélettel ellentétben tehát egyetlen fizikai rendszerből sem vonható ki korlátlanul nagy energia a gravitációs kötési energia minden határon túli növelése árán.

1. ábra.  $\Lambda = 0$  mellett egy lokalizált gravitációs forrás terének a sematikus téridődiagramja. A téridő aszimptotikusan sík.  $\Sigma_1$  és  $\Sigma_2$  két aszimptotikusan sík, a *térszerű* végtelenbe ( $i^0$ ) kifutó térszerű hiperfelület. A forrás a *jövő fényszerű* végtelenbe ( $I^+$ ) kifutó  $N_1$  és  $N_2$  fényszerű hiperfelületekkel definiált  $u_1$ , illetve  $u_2$  retardált időpillanatok között gravitációsan sugároz. E sugárzás fényszerű irányokban távolodik a forrás világsövévtől.







2. ábra. Ha  $\Lambda > 0$ , akkor a téridő aszimptotikusan állandó pozitív görbületű. A téridő  $I$  konformis végtelenje, ahova a gravitációs sugárzás kifut, most *térszerű*.

Bár a Newton-elméletben az energia önmagában egy jól definiált fizikai mennyiség, a relativitáselméletben az csupán egy négyesvektor egyetlen komponense. Valóban, mind az ADM-, mind a Bondi-energia csupán az időkomponense egy-egy energia-impulzus négyesvektornak, és e vektorok térbeli impulzusrésze az előző fejezetben említett hamiltoni, illetve pszeudotenzoriális módszerek felhasználásával is megkonstruálható. E vektorokkal átfogalmazva a pozitív energiatétel azt állítja, hogy e vektorok jövőirányítottak és időszerűek; az eltűnésük pedig a téridő lokális Minkowski-jellegével ekvivalens.

Az ADM és Bondi-féle energia-impulzus két különböző szituációra vonatkozik, és teljesen más módszerrel lett bevezetve. Ez felveti azt a kérdést, hogy nincs-e a háttérben egy olyan univerzális konstrukció, amelynek speciális eseteként mind az ADM, mind a Bondi-féle energia-impulzus megkapható? Horowitz és Tod [7] kétkomponensű spinorok felhasználásával megmutatta, hogy ilyen konstrukció létezik, és az

$$P^a \sigma_a^{A\bar{B}'} \lambda_A \bar{\lambda}_{B'} = \oint_S u(\lambda, \bar{\lambda}) dS \quad (9)$$

alakú. Az integrandus a  $\lambda_A$  Weyl-spinormező és komplex konjugáltja első deriváltjának egy kifejezése.  $\lambda_A$ -t az  $S (= S_\infty$  vagy  $S_\infty(u))$  felület pontjaiban a téridő aszimptotikus transzlációi spinorösszetevőinek választva e spinormezők egy kétdimenziós komplex vektorteret alkotnak. E térben egy bázist rögzítve a spinormező *konstans*  $\lambda_A$ ,  $A=0, 1$ , komponensekkel is megadható. Ekkor a négyesimpulzus  $P^a$ ,  $a=0, \dots, 3$ , komponenseit (9) definiálja, ahol  $\sigma_a^{A\bar{B}'}$  a négy  $SL(2, \mathbb{C})$  Pauli-mátrixot jelöli.

A  $\Lambda > 0$  eset

Távoli Ia típusú szupernóvák luminozitás-vöröseltolódás diagramjának analízise alapján két független asztrófizikus csoport is arra a következtetésre jutott, hogy az Univerzum *gyorsulva tágul* [8]. E jelenség legegyszerűbb magyarázata az, hogy az Einstein egyenletekben van egy nagyon kicsi, de pozitív  $\Lambda$  kozmológiai állandó. Habár ez a kozmológiai állandó sok számolásban (pél-

dául egy csillag gravitációs összeomlásának számolásában) elhanyagolható, kozmológiai skálán, vagy olyan problémákban, amelyekben a téridő aszimptotikus szerkezete szerepet játszik, a  $\Lambda$  pozitív voltának jelentősége van. Ilyen a gravitációs energia-impulzus értelmezése és tulajdonságainak a tisztázása is.

Valóban, ha  $\Lambda > 0$ , akkor egy lokalizált forrás gravitációs tere már nem aszimptotikusan sík, hanem egy aszimptotikusan *állandó pozitív görbületű*, úgynevezett aszimptotikusan de Sitter-téridővel írható le, amelynek aszimptotikus szimmetriacsoportja a

*főlegyszerű*  $SO(1,4)$  de Sitter-csoport. Így az ilyen téridőkben *nem létezik* természetes módon kiválasztható *aszimptotikus transzláció*. Ráadásul a téridő  $I$  konformis végtelenje, ami  $\Lambda = 0$  esetben *fényszerű* volt, most *térszerű* (2. ábra). Mivel az aszimptotikus szimmetriák  $I$ -t önmagába kell vigenek, a végtelen közelében *minden aszimptotikus szimmetria térszerű kell legyen*. De, ha az aszimptotikusan de Sitter-téridőkben nincs semmilyen természetes módon definiált aszimptotikus (idő-) transzláció, akkor például egy Bondi-típusú energia-impulzust hogyan lehet értelmezni?

Láttuk, hogy a  $\Lambda = 0$  esetben az ADM és Bondi energia-impulzust sikerült *egységes alakban*, az  $u(\lambda, \bar{\lambda})$  integráljaként (de a spinormezők és az integrációs tartományok más-más megválasztása mellett) megkapni. Ezért most is ebből az univerzális alakból célszerű kiindulni [9]. Mivel a Bondi energia-impulzus megfelelőjét keressük, az integrációs tartomány most is egy, a végtelenbe kifutó fényszerű hiperfelület végtelenbeli pereme. De az aszimptotikusan de Sitter-téridőkben nincsenek természetes módon meghatározott aszimptotikus transzlációk, így a  $\lambda_A$  spinormezőt nem tudjuk *a priori* előírni. A vizsgálataink során az egyetlen kritériumunk a *formalizmus matematikai önkonzisztenciája* (például az integrál végességének a követelménye) lehet. Meglepő módon, a formalizmus maga meghatározza a  $\lambda_A$  spinormezőt: az *ki kell elégítse Penrose 2-felületi twisztoregyenletét*. Ez egy lineáris elliptikus parciális differenciálegyenlet, megoldásai egy négydimenziós, komplex vektorteret alkotnak. Így ha a  $\lambda_A$  megoldás által meghatározott twisztort  $Z_\alpha$  jelöli, akkor a

$$H^{\alpha\beta'} Z_\alpha \bar{Z}_{\beta'} = \oint_{S_\infty(u)} u(\lambda, \bar{\lambda}) dS \quad (10)$$

előírással egy  $4 \times 4$ -es  $H^{\alpha\beta'}$  komplex mátrixot értelmezhetünk. Megmutatható, hogy ez

$$H^{\alpha\beta'} = \begin{pmatrix} P & Q \\ -\bar{Q} & P \end{pmatrix} \quad (11)$$

szerkezetű, ahol  $P$  egy  $2 \times 2$ -es hermitikus és  $Q$  egy anti-szimmetrikus komplex mátrix. Így  $H^{\alpha\beta'}$  maga is hermi-

tikus. Talán érdemes megemlíteni, hogy a fenti általános analízist a  $\Lambda = 0$  esetben megismételve azt kapjuk, hogy a twisztoeregnyelet megoldásai épp az aszimptotikusan sík téridők aszimptotikus transzlációinak spinorösszetevőit adják; (11)-ben  $Q = 0$ , míg  $P$  épp a Bondi-féle négyesimpulzus spinoralakja lesz. A  $\Lambda > 0$  esetben tehát az aszimptotikus transzlációk helyébe a 2-felületi twisztorok, a valós energia-impulzus négyesvektor helyébe pedig a  $H^{\alpha\beta}$  hermitikus mátrix lép.

De rendelkezik-e a  $H^{\alpha\beta}$  valamilyen nem triviális, „hasznos” tulajdonsággal is? Bizonyítható, hogy  $H^{\alpha\beta}$ -ra ugyanaz a pozitívítási és rigiditási tulajdonság igaz, mint a teljes energia-impulzusokra a  $\Lambda = 0$  esetben: *a pozitív energiátétel feltételei mellett  $H^{\alpha\beta}$  pozitív definit, és  $H^{\alpha\beta} = 0$  akkor és csak akkor, ha a téridő lokálisan de Sitter-féle.* E tétel azt a régi sejtést támasztja alá, hogy pozitív kozmológiai állandó mellett az Einstein-elmélet alapállapota a de Sitter-téridő, és az lokálisan stabil.

Irodalom

1. C. Misner, K. Thorne, J. A. Wheeler: *Gravitation*. Freeman, San Francisco, 1973.

2. J. Frauendiener, L. B. Szabados: A note on the post-Newtonian limit of quasi-local energy expressions. *Class. Quantum Grav.* 28 (2011) 235009, arXiv: 1102.1867 [gr-qc]
3. J. Stewart: *Advanced General Relativity*. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
4. R. Arnowitt, S. Deser, C. W. Misner: The dynamics of general relativity. in *Gravitation: An Introduction to Current Research*. (ed.: L. Witten) Wiley, New York, London, 1962, 227–265, arXiv: gr-qc/0405109
5. H. Bondi, M. G. J. van der Burg, A. W. K. Metzner: Gravitational waves in general relativity. VII. Waves from axi-symmetric isolated systems. *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 269 (1962) 21–52.
6. R. Schoen, S.-T. Yau: Proof of the positive mass theorem, II. *Commun. Math. Phys.* 79 (1981) 231–260.  
E. Witten: A new proof of the positive energy theorem. *Commun. Math. Phys.* 80 (1981) 381–402.
7. G. Horowitz, K. P. Tod: A relation between local and total energy in general relativity. *Commun. Math. Phys.* 85 (1982) 429–447.
8. A. G. Riess et al.: Observational evidence from supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant. *Astron. J.* 116 (1998) 1009–1038, arXiv: astro-ph/9805201  
S. Perlmutter et al.: Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift supernovae. *Astrophys. J.* 517 (1999) 565–586, arXiv: astro-ph/9812133
9. L. B. Szabados, P. Tod: A positive Bondi-type mass in asymptotically de Sitter spacetimes. *Class. Quantum Grav.* 32 (2015) 205011 (pp 51), arXiv: 1505.06637 [gr-qc]

## ANYAGTUDOMÁNY SZÁMÍTÓGÉPPLEL – 1. rész

Pusztai Tamás

Wigner Fizikai Kutatóközpont, SZFI Kísérleti Szilárdtestfizikai Osztály

A mostani és a következő számban megjelenő kétrészes cikk témája a számítógépes anyagtudomány. Itt, az első részben általános áttekintést szeretnék adni az anyagtudomány helyzetéről, különösen az új anyagok minél gyorsabb kifejlesztésének igénye kapcsán felmerülő kihívásokról és kezdeményezésekről, amelyben a számítógépes anyagtudománynak fontos szerepe van. A második részben pedig bemutatok néhány olyan, csoportunk által végzett munkát, amelyek azt illusztrálják, hogy a számítógépekkel végzett szimulációk miként segíthetik az anyagtudományi folyamatok megértését és miként kapcsolódhatnak valós, gyakorlati problémák megoldásához.

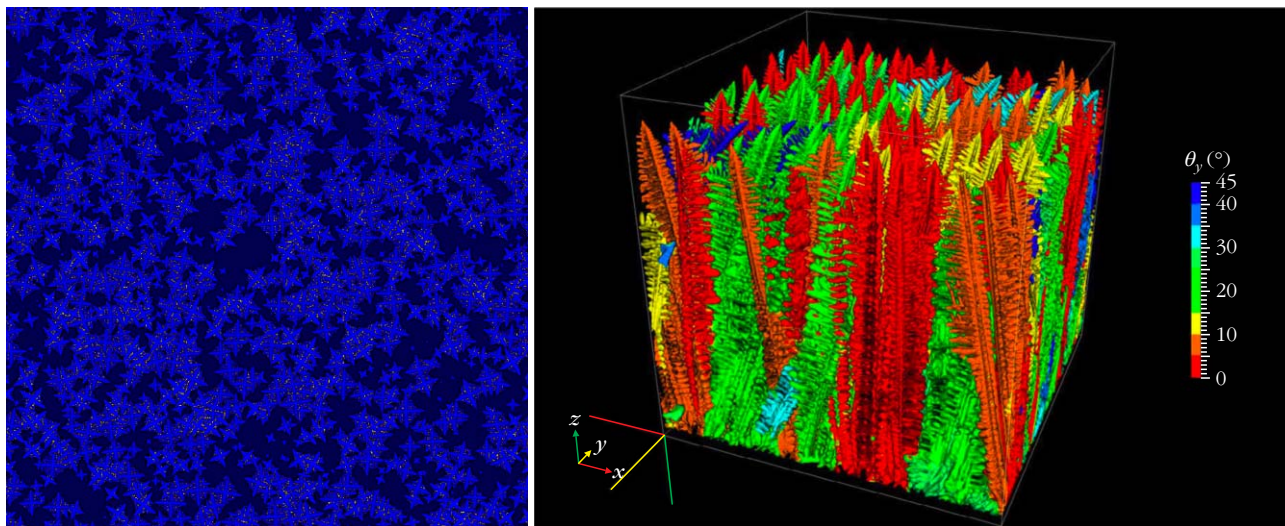
Az MTA Fizikai Osztálya 2018. május 10-i tudományos ülésén azonos címmel elhangzott előadás bővített, írott változata.



Pusztai Tamás (45) az MTA doktora, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója. Kutatásait a számítógépes anyagtudomány területén végzi, azon belül is elsősorban a megszilárdulás során kialakuló növekedési formák fázismezőmodellel történő leírásával foglalkozik.

### Az anyagtudomány fejlődése

Történelme során az emberiség egyre több tárggyal és eszközzel vette és veszi körbe magát. Ezeket túlnyomó részt speciálisan valamilyen feladatra – például saját védelmére, élelmének megszerzésére vagy előállítására, helyváltoztatásának elősegítésére stb. – készíti. A múlt század derekáig úgy gondolták, hogy az emberi fajt éppen ez a céltudatos eszközkészítésre való képessége emeli ki az állatvilágból. Ezt a széles körben elfogadott vélekedést borította fel *Jane Godall* 1960-ban tett megfigyelése, aki a tanzániai Gombe Nemzeti Parkban – lényegében a csimpánzok közé költözve – közvetlen közlőrl tanulmányozta egy csoport életét. Az egyik megfigyelt példány nem csak egy fűszálat természetvárbá dugva majd azt lenyalogatva „horgászott” természeteket, hanem vékonyabb ágakat letörve, a rajta levő leveleket letépve e feladatra készített célszerszámot [1]. A megfigyelésre érkezett *Louis Leakey*-től, a kor egyik vezető paleoantropológusától a következő, híressé vált mondat: „Mostantól vagy újra kell definiálnunk az eszköz fogalmát, vagy az ember fogalmát, vagy embernek kell elfogadnunk a csimpánzt.” [1]. Az azóta eltelt időben más fajokról is kimutatták, hogy képesek eszközöket előállítani. Nem közsímet, hogy ilyen téren egyes madarak, például a varjak is meglehetősen intelligensnek számítanak.



1. *ábra*. Polidendrites megszilárdulás fázismező-szimulációja, balra 7000×7000 cella, 10 nap futásidő 20 hagyományos processzoron, MTA SZFKI, Budapest, 2002 [3]; jobbra 4096×4104×4096 cella, 12 nap futásidő 768 grafikus kártyán, Institute of Technology, Tokyo, 2013 [4]. Mindkét ábra korának legnagyobb méretű ilyen típusú szimulációját mutatja. Az alig több, mint 10 év különbség lehetővé tette a lineáris méretben majdnem ugyanakkora, de már háromdimenziós szimuláció végrehajtását. A különbség elsősorban a rendelkezésre álló számítógépes kapacitás növekedésének köszönhető.

Megfigyelték, hogy az új-kaledóniai varjú szabadon élő példányai pálmalevelek fogazott széleiből formázott csíkokat csipkedve lándzsát készítenek, amivel azután fák kérgének repedéseiben, lyukaiban megbúvó rovarokra, férgekre vadásznak [2].

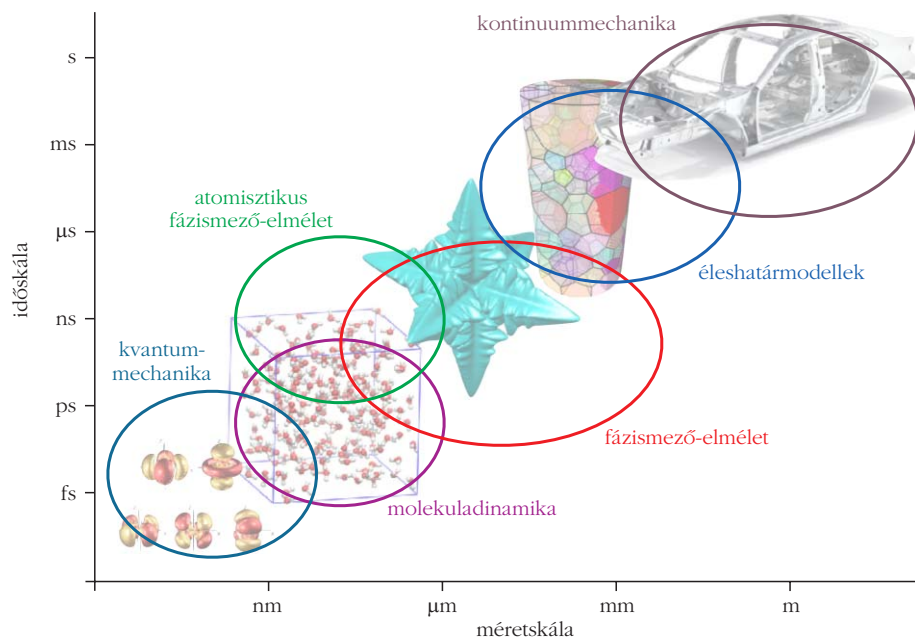
Az eszközök készítése terén a következő, még több intelligenciát igénylő fokozat – amelyben tudásom szerint továbbra is egyedülálló az emberi faj – az eszközök céljára legmegfelelőbb anyag elkészítése, azaz a *tudatos anyagelőállítás*. Ez a képesség még az emberek között is meglehetősen újnak tekinthető, amennyiben az időt az emberiség teljes történetéhez viszonyítjuk. Az őskor kezdeti, több millió évig tartó időszakában mi is csak a természetben talált anyagok felhasználásával, megmunkálásával voltunk képesek eszközöket készíteni. A változás csak néhány ezer éve, az első réz-, majd bronzszerszámok elkészítésével következett be. Ezen új anyagok megjelenésének fontosságát mi sem bizonyítja jobban, mint hogy egész történelmi korszakokat neveztek el róluk: réz-, bronz- és vaskor. Azóta azonban a fejlődés rohamosan felgyorsult. Eszközeinket egyre többféle anyag felhasználásával lettünk képesek előállítani. Az anyagokkal kapcsolatos ismeretek bővülése azonban e pár ezer éves időszak legnagyobb részében is még mindig szigorúan tapasztalati úton történt. Kovácsok generációi sok száz éven keresztül éltek abból a tapasztalathoz, hogy a vasat kis mennyiségű szénnel ötvözve erősebb anyagot kapnak anélkül, hogy értették volna miértjét. Az anyagtudományi folyamatok megértése, és ezzel egy magasabb szintű, tudatos anyagtervezés csak körülbelül az 1800-as évektől, a termodinamika és a statisztikus fizika megjelenésével kezdődhetett meg. A fejlődés ezen a téren is szédületesen felgyorsult. A kísérleti módszerek 20. századi gyors fejlődése, az újabb elméletek és modellek megjelenése és az utóbbi évtizedekben a számítási kapacitások rohamos növekedése (1. *ábra*) az anyagtudományi folyamatok egyre pontosabb leírását

tették lehetővé, ami az egyre újabb, egzotikusabb, és az adott célra speciálisan kifejlesztett anyagok megjelenéséhez vezetett. Figyelembe véve a modern ember igényeit, ez a fejlődés azonban még mindig nem elég gyors. Számos ötletünk, igényünk lenne adott tulajdonsággal bíró eszközök és így meghatározott tulajdonsággal rendelkező anyagok felhasználására – lehetőleg már holnap. Általánosságban elmondható, hogy az új eszközök kifejlesztése rövidebb időt vesz igénybe, mint az új anyagoké, ezért technikai fejlődésünk további gyorsításának egyik kulcsa az új anyagok kifejlesztésének gyorsítása. Ebben várhatóan nagy szerepet fognak játszani a számítógépes modellek, a számítógépes anyagtudomány.

## Modellek

Az anyagtudományban használatos modelleket áttekinthetjük a leírni kívánt jelenség méret- és időskálája szerint (2. *ábra*). Ha például a molekulák belső szerkezetét kívánjuk tanulmányozni, a kvantummechanikai, kvantumkémiai programokhoz nyúlunk. Ha az anyagot alkotó egyes atomok vagy molekulák – kölcsönhatásuk következtében fellépő – mozgására, rendeződésére vagyunk kíváncsiak, akkor molekuladynamikai szimulációkat végzünk. Ha a vizsgált folyamat szempontjából már nem fontos az anyag atomos szerkezete, kontinuum-modelleket használhatunk. Itt külön kiemelném a fázismezőmodelleket, egyrészt mert ezek a megszilárdulás során kialakuló mikroszerkezetek leírásának egyik leghatékonyabb eszközei, másrészt mert a Wigner Fizikai Kutatóközpontban működő csoportunk már körülbelül 15 éve foglalkozik velük. Legjelentősebb eredményeink, köztük a jelen cikk következő részében bemutatásra kerülő munkáink is, a fázismezőmodellek fejlesztéséből és alkalmazásából származnak. Amennyiben még nagyobb méretskálákra





2. ábra. Az anyagtudományban használatos néhány fontosabb modell méret- és időskála szerinti áttekintése.

megyünk, a vizsgált anyag fázisainak határát már matematikailag élesnek kell tekintenünk. Egy makroszkopikus méretű tárgy öntésének leírásához már valamilyen éleshatármodellt, valamint kontinuummechanikai, hidrodinamikai egyenleteket kell használnunk.

## A modellezés problémái

Egy új anyag kifejlesztésekor – általában – több méretskálán is felmerülnek modellezési feladatok. Ideális esetben ezeket a feladatokat egy integrált programmal lehetne megoldani, amelynek egymásra épülő részei lennének a fentebb felsorolt (és egyéb) anyagtudományi modellek, és az egyes részek, mint modulok, igény szerint kerülnének meghívásra. A kisebb skálán működő modellek kiátlagolt mennyiségei, mint bemenő paraméterek szolgálhatnának a nagyobb méretskálán dolgozó modellek számára (ahogy például a fázismezőmodellek számára szükséges, mérésekből nehezen meghatározható felületi szabadenergia-értékeket gyakran molekuladinamikai szimulációkból szerezzük), illetve a nagyobb méretskálán dolgozó modellek megadhatják a finomabb skálájú modellek kezdeti vagy peremértékeit (ahogy például egy makroskálájú hőterjedési modell meghatározhatja egy mikroszerkezeti szimulációban használandó hőmérséklet-gradiens értékét).

Ez az integrált, több skálán dolgozó megközelítés még nem terjedt el a gyakorlatban. Az egyes kutatócsoportok általában egy-egy modellre specializálódtak. Sok esetben még az azonos modellekkel dolgozó kutatócsoportok is különféle, saját maguk által írt kódokat használnak. Mivel a tudományos életben egy modell számítógépes implementálása nem közvetlen érték, a közösség csak a kóddal előállított eredményeket díjazza, ezeket az egyedi kódokat általában nem

teszik közzé. Ez lehetetlenné teszi a meglévő kódok más csoportok általi használatát és továbbfejlesztését, ami felesleges, párhuzamos fejlesztéseket indukál. Az egyedi számítógépes kódok ellenőrzése és validálása valószínűleg kevésbé történik meg, mint a szélesebb körben használtaké. Ha a kódokkal minden rendben is van, a szimulációkhoz felhasznált adatokkal is lehetnek problémák. Sok adat nehezen hozzáférhető, mert ezek általában nincsenek összegyűjtve, szabványosítva, kereshetővé téve. A számítógépes kódokkal együtt a publikációkban fel nem használt eredmények sem hozzáférhetők mások számára, pedig akár azok között is lehetnének értékes

eredmények. Ha mindezt megpróbáljuk nem az egyes kutatócsoportok szemszögéből, hanem valamivel magasabb szintről nézni, és ezeket a kutatócsoportokat egy olyan nagy csapat tagjainak tekintjük, amelynek célja az anyagtudományi ismeretek bővítése és új anyagok kifejlesztése, azt láthatjuk, hogy ez a fajta munkaszervezés nem optimális.

## Kezdeményezések

Ezen problémákat természetesen több helyen is felismerték és megfogalmazták, sőt, különböző kezdeményezések formájában megpróbálták változásokat is eszközölni. A nyílt hozzáférésű, vagy akár nyílt forráskódú szoftverek használata az anyagtudományban is terjed. Megjelennek olyan weboldalak is, amelyek a kódok helyes működésének ellenőrzését hivatottak segíteni, jól megválasztott standard tesztek, azok részletes kezdeti körülményeinek és végeredményének közzétételével [5–7]. Az ICME (Integrated Computational Materials Engineering) [8, 9] célja a fentebb említett integrált, azaz egyszerre minden méretskálát kezelő szimulációs programok előállítása, illetve ezen megközelítés elterjesztése. Egyik legfontosabb feladatuk az egyes modellek közötti adatcsere szabványosítása. A NOMAD (Novel Materials Discovery) [10] kezdeményezés az adatokra fókuszál. Céljuk az anyagtudományban hasznosítható adatok begyűjtése, egységes formátumra hozása és archiválása (NOMAD archívum). Természetesen ez csak akkor igazán értékes, ha az adatokat lekérdezhetővé és kereshetővé teszik. Egy hagyományos archívumon túlmutatóan a begyűjtött egyre nagyobb mennyiségű adatot *mesterséges intelligencia* segítségével is tervezik feldolgozni. Ez a kombináció (a máshol is sokat emlegetett Big Data és AI) új típusú információk kinyerését teszi lehetővé.

A fenti problémák megoldására, az új anyagok kifejlesztési idejének jelentős mértékű csökkentése érdekében tett talán legkomolyabb, de mindenképpen legnagyobb erővel támogatott kezdeményezés az Egyesült Államok kormánya által indítványozott, *Barack Obama* elnök által 2011-ben bejelentett Materials Genome Initiative (MGI) [11, 12], amit talán az Anyagok Genomja Kezdeményezésként lehetne fordítani. De mi is az az anyagok genomja? Biológiai rendszerekben genomnak valamilyen szervezet teljes örökítő információját hívjuk. Ezt az információt a szervezet (majdnem) minden sejtje kromoszómák, gének formájában tárolja. Egy adott egyed genomja, amely általában a szülei által örökített genomok valamilyen kombinációjaként áll elő, minden információt tartalmaz arról, ami az adott egyed „előállításához” szükséges. E kép általánosításával érzékelhetjük, mit jelenthet az anyagok genomja kifejezés. Egy anyag genomja azon információk összessége, amelyek az adott anyagot jellemzik, és amelyek az előállításához szükségesek. Ez magába foglalná az összetevő komponensek, fázisok termodinamikai, szerkezeti tulajdonságait, az előállítási módok pontos leírását stb., mindezt persze valamilyen alkalmas, digitális kódolásban. Az anyagok ilyen, mindenre kiterjedő leírása egyelőre meglehetősen utópisztikusnak tűnik, de egy kívánatos irányt jelöl ki az anyagtudományi kutatások számára.

Az MGI a fő hangsúlyt a modellezésre teszi. A modelleknek egyre jobbakká, jóslataiknak sokkal megbízhatóbbakká kell válniuk, hogy képesek legyenek egyes kísérletek, felesleges próbálkozások kiváltására. Ez jelentősen gyorsíthatná az anyagfejlesztés ütemét és csökkenthetné költségeit. A mostani számítógépes kódok, részben a fentebb említett problémák miatt, még nem tartanak itt. Jól kontrollált kísérletekre természetesen továbbra is szükség van, hiszen a megbízható jóslatokhoz a jó modelleken kívül megbízható bemenő adatokra is szükség van. A kísérleti és szimulációs eredményeket széles körben hozzáférhető adatbázisokba kell gyűjteni. Az adatok kezelését is jelentősen javítani kell. A hatékonyság növelése érdekében meg kell oldani az adatok szabványosítását, kereshetővé tételét, és az egyes kutatócsoportok közötti megosztását. Végül, mint minden újdonságot, ezt az újfajta megközelítést is népszerűsíteni és tanítani kell, hogy a következő generációk kutatóinak mindez már természetes legyen. Az MGI az anyagfejlesztésben részt vevő közösséget inkább együttműködő, mint egymással versengő csoportok összességéként képzelel el.

## Egy sikeres példa: a CALPHAD-módszer

Legtöbbünk számára valószínűleg még nem világos, hogy az MGI víziója az anyagok genomjáról, vagy például az MGI és az ICME törekvése a modellek közötti adatcsere szabványosítására miképpen fog megvalósulni. Szeretném azonban egy múlt század közepéből való példán keresztül megmutatni, hogy egy, a maga korában hasonlóan újszerű kezdeményezés

végül sikerrel járt, és mára az anyagtudomány egyik széles körben elterjedt eszközévé vált. Ez a példa a CALPHAD, teljes nevén Calculation of Phase Diagrams [13, 14], vagy magyarra fordítva Fázisdiagramok Számítása módszer. Az alapötlet a következő volt. Amennyiben ismert lenne az anyagot alkotó fázisok  $G(p, T, x_1, \dots, x_n, \xi_1, \dots, \xi_n)$  Gibbs-szabadenergiája, mint a  $p$  nyomás,  $T$  hőmérséklet, az alkotók  $x_i$  koncentrációi, valamint a  $\xi_i$  egyéb fizikai paraméterek függvénye, akkor abból számos fontos információ, például a fázisátalakulások hőmérsékletei, a fázisok közötti egyensúlyok feltételei, azaz például a fázisdiagramok, valamint az egyes átalakulások hajtóerejei is származtathatók lennének. A  $G$  függvény meghatározása azonban kísérletekből direkt módon nem lehetséges, ezért erre egy illesztési eljárást javasoltak. Felteletelték, hogy a  $G$  függvény alakja megfelel egy valamilyen általános modellel alátámasztott formának. Ilyen volt eleinte az egyszerű regulárisoldat-modellnek megfelelő függvényalak, ehhez jöttek egy magasabb rendű sorfejtésnek tekinthető Redlich–Kisterpolinomok, majd az 1970-es évektől az alrácsmodellek. Az illesztési eljárás az ezen függvényekben megjelenő tagok (hőmérsékletfüggő) együtthatóinak meghatározását célozta meg, úgy, hogy a kapott  $G$  függvényből származtatott egyensúlyi és nemegyensúlyi tulajdonságok minél nagyobb összhangban legyenek az illesztési eljáráshoz kiválasztott kísérleti eredményekkel. Ez a módszer meglehetősen fáradságos, a kapott eredmény függ attól, hogy például milyen koncentrációtartományt tekintünk hangsúlyosnak és milyen kísérleteket tekintünk referenciának. Az illesztés eredménye, különösen a komplexebb, például sokalkotós esetekben, gyakran fizetős adatbázisokba kerül, az egyszerűbb rendszerek, például tiszta anyagok, binér és ternér fémötvözetek adatai azonban mindenki számára hozzáférhetők.

Mint a legtöbb új dolog, a CALPHAD-módszer indulása sem volt zökkenőmentes. Kísérleti oldalról azért támadták, mert véleményük szerint az eredmények megkérdőjelezhető adatokon alapultak, elméleti oldalról pedig az volt a kifogás, hogy az illesztésekhez túlságosan leegyszerűsített modelleket használtak. Ennek ellenére a módszer elfogadottsága folyamatosan nőtt, az adatbázisok gyarapodtak, és több termodinamikai szoftvert is kifejlesztettek, amelyek CALPHAD-adatbázisokra épülnek. Az 1970-es évektől, amikortól a CALPHAD-módszer második generációját számítják, hasonló megközelítésen alapulva már az anyagok diffúziós adatai is megjelentek az adatbázisokban, lehetővé téve dinamikus jelenségek kezelését is. Így a CALPHAD-adatbázisok már genom-szerűnek tekinthetők, ezért többen az MGI kezdetének, alapjának tekintik [14].

## Irodalom

1. Jane Goodall: Essays on science and society: Learning from the chimpanzees: A message humans can understand. *Science* 282/5397 (1998) 2184–2185.
2. Richard Seed, Amanda amd Byrne: Animal tool-use. *Current Biology* 20 (2010) R1032–R1039.

3. László Gránásy, Tamás Börzsönyi, Tamás Pusztai: Nucleation and Bulk Crystallization in Binary Phase Field Theory. *Physical Review Letters* 88/20 (May 2002) 206105.
4. Tomohiro Takaki, Takashi Shimokawabe, Munekazu Ohno, Akinori Yamanaka, Takayuki Aoki: Unexpected selection of growing dendrites by very-large-scale phase-field simulation. *Journal of Crystal Growth* 382 (Nov. 2013) 21–25.
5. NIST. Pfhub: Phase field community hub. <https://pages.nist.gov/pfhub/>
6. A. M. Jokisaari, P. W. Voorhees, J. E. Guyer, James A. Warren, O. G. Heinonen: Benchmark problems for numerical implementations of phase field models. *Computational Materials Science* 126 (Jan. 2017) 139–151.
7. NIST. Additive manufacturing benchmarks 2018. <https://www.nist.gov/ambench>
8. Nitin Chopra: Integrated computational materials engineering: A multiscale approach. *JOM* 67/1 (Jan. 2015) 118–119.
9. Integrated computational materials engineering expert group. <http://www.icmeg.euproject.info>
10. The nomad laboratory. <https://www.nomad-coe.eu>
11. Materials genome initiative (mgi). <https://www.mgi.gov>, <https://mgi.nist.gov>
12. Materials genome initiative for global competitiveness. [https://www.mgi.gov/sites/default/files/documents/materials\\_genome\\_initiative-final.pdf](https://www.mgi.gov/sites/default/files/documents/materials_genome_initiative-final.pdf), 2017.
13. Calculation of phase diagrams (calphad). <http://www.calphad.org>
14. Larry Kaufman, John Ågren: CALPHAD, first and second generation – Birth of the materials genome. *Scripta Materialia*, 70/1 (Jan. 2014) 3–6.

# A FOTOAKUSZTIKUS LABORATÓRIUMTÓL A TENGERI FÚRÓTORNYOKIG – egy sikeres műszerfejlesztés története

Bozóki Zoltán  
MTA–SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport

A földgázipari fotoakusztikus műszerek fejlesztésének története több mint 20 évet ölel át. 1995-ben a szerző és munkatársai először fogalmazták meg azt az elképzelést, hogy egy gázüzemekbe telepített fotoakusztikus műszer alkalmas lehet a földgáz vízgőztartalmának folyamatos mérésére; 2015-ben pedig végleges formát öntött az algyői ipari parkban a holland tulajdonú Hóbré Laser Technology Kft. műszergyártó bázisa, ahonnan ma már Európába, Amerikába és Ázsiába szállítják a magyar szakemberek által kifejlesztett és gyártott fotoakusztikus műszereket. Felmerül a kérdés, hogy egy innovációs ötlet megvalósulásához sok vagy kevés ez a 20 év? Továbbá, lehet-e a mai pályakezdő fizikusokat egy ilyen történettel, amelyben a „vetéstől-aratásig” eltelt idő 20 év, lelkesíteni arra, hogy érdemes az innovációval foglalkozni? Először is megállapíthatjuk, hogy nemcsak a fizikának vannak vasszigorral érvényesülő törvényszerűségei, hanem – egészen meglepő módon – az innovációnak is, ami tulajdonképpen egy emberi-társadalmi tevékenység, így azt gondolhatnánk, hogy minden innovációs sikertörténet egyedi. Ehhez képest az innovációval foglalkozó könyvek szinte mindegyike leszögezi (például [1]), hogy kortól és országtól függetlenül

jellemzően 20 év az az időtartam, ami az ötlettől a megvalósulásig eltelik. Másodszor talán azzal lehet a fiatalokat lelkesíteni, hogy bár a 20 év soknak tűnik, de valójában ez egy folyamatos kihívásokkal, tanulás-sal, fejlődéssel eltöltött, rendkívül hasznos időszak volt, amit a szerző nagy lelkesedéssel dolgozott végig és szakmailag-emberileg rendkívül hasznosnak talált. Talán joggal remélem, hogy a munkában részt vevő, döntően fizikus végzettségű kollégák is hasznosnak ítélik meg szakmai karrierjük ezen időszakát, amit a fotoakusztikus műszerek fejlesztésével töltöttek/töltenek. Végül, de nem utolsó sorban, ez a történet ma is íródik, fizikus hallgatók ismerkednek meg a fotoakusztika alapjaival és kapcsolódnak be a fotoakusztikus kutatásokba, illetve a műszerfejlesztésbe akár az MTA–SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport, akár a fentebb említett Hóbré Laser Technology Kft., vagy a szintén fotoakusztikus műszerfejlesztéssel és gyártással foglalkozó Hilase Kft. kötelékében belül.

Mielőtt a fotoakusztikus műszerfejlesztés történetének részleteire rátérnénk, szeretném világossá tenni, hogy ez a cikk nem fog túlságosan sok tudományos részlettel szolgálni, nem röpködnek majd benne a lézerműködés törvényszerűségei, vagy a fotoakusztikus kamra akusztikus modellezésének részletei. Ugyanakkor – mivel remélem, hogy lesz olyan olvasó, aki szeretne a fotoakusztika mélyebb részleteivel megismerni – felhívom a figyelmet a cikk végén található irodalomjegyzékre, ahol a fotoakusztikus kutatásainkhoz kapcsolódó magyar nyelvű cikkeket és dolgozatokat [2, 3] soroltam fel. (Az angol nyelvű szakirodalom még a magyarnál is lényegesen bővebb, többek között tartalmazza a szerző és munkatársai közel 90 darab, nemzetközi tudományos folyóiratokban megjelent publikációját.)



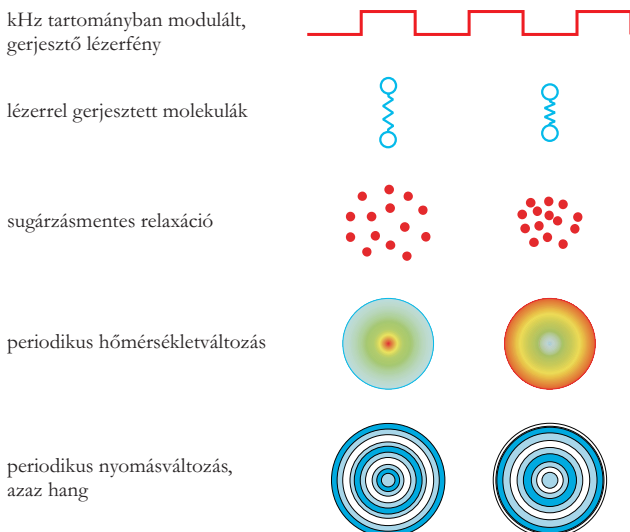
*Bozóki Zoltán* 1989-ben végzett fizikusként az ELTE-n, 1994 óta dolgozik a Szegedi Tudományegyetemen. 1997-ben PhD, majd 2012-ben MTA doktori fokozatot szerzett, 2013-tól az SZTE professzora. Az MTA–SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport tudományos tanácsadója és a Hilase Kft. ügyvezető igazgatója. 2017-ben a földgázipari fotoakusztikus műszerek fejlesztése és gyártásba vitele terén végzett tevékenységéért Gábor Dénes-díjban részesült.



## A kezdetek

A „Bokros-csomag” generálta leépítések következményeként lényegében friss pályakezdőként 1994-ben ott kellett hagynom az állásomat a budapesti Izotópkutató Intézetben. Szerencsémre Szabó Gábor és Bor Zsolt professzor urak nemcsak állást ajánlottak Szegeden a József Attila Tudományegyetem Optikai és Kvantum-elektronikai Tanszék keretein belül működő Lézerfizikai Tanszéki Kutatócsoportban, de még kutatási pénzzel is „kistafiroztak”, ami azokban a rendszerváltás utáni nehéz években óriási szó volt. Ráadásul lényegében szabad kezet kaptam a kutatási témám megválasztásában, egyetlen kikötésük az volt, hogy a lézerek gyakorlati alkalmazásával foglalkozzak. Valójában az alkalmazott kutatás mindig is közel állt hozzám, annak ellenére, hogy mérnök nem volt a közvetlen környezetemben és sohasem merült fel bennem, hogy mérnök legyek. Ugyanakkor mindig is azt gondoltam, hogy az a fizikus tevékenység csúcsa, ha az elért eredményeket a mindennapokban alkalmazzák, ha némi pátosszal szólva, azok megkönnyítik az emberek életét. Izotóp-intézetes időszakomban Lőrincz András és Miklós András témavezetésével két területen dolgoztam: egyrészt a pikoszekundumos lézerimpulzusok által keltett termikus és akusztikus hullámok modellezésével foglalkoztam (ebből írtam egyetemi doktori dolgozatomat), másrészt érintőlegesen részt vettem a fotoakusztikus kutatásokban is. E két tématerület közül azért volt az utóbbi szimpatikusabb számomra, mert abban az időben az előbbi területhez kapcsolódó lézeres anyagmegmunkálás, illetve roncsolásmentes anyagvizsgálat lényegében még nem létezett Magyarországon, így esély sem volt arra, hogy az ilyen irányú kutatási-fejlesztési tevékenységünk esetleges eredménye itthon is hasznosuljon, ami számomra (és úgy gondolom, hogy budapesti és szegedi mentoraim számára is) alapvető szempont volt. Ugyanakkor fotoakusztikus mérések végzéséhez nincs szükség extrém bonyolultságú és drága eszközökre: nagy érzékenyséű mérése-

1. ábra. A fotoakusztikus jel keletkezése.



ket lehet végezni egyszerű lézerekkel, házilag gyártott fotoakusztikus kamrákkal és a megfelelő, kereskedelmi forgalomban kapható mérőelektronikákkal. Nagyon röviden összefoglalva a fotoakusztikus jel úgy keletkezik, hogy a lézer hullámhosszát ráhangoljuk a mérendő gázkomponens egy elnyelési vonalára, majd a lézert akusztikus frekvencián moduláljuk (lényegében periodikus módon be- és kikapcsolgatjuk a kHz tartományban). A gázmintát, amelyben a komponens koncentrációját mérni szeretnénk, bevezetjük egy akusztikus szempontból optimalizált kamrába, amin keresztül világítunk a modulált lézerral. A fény egy részét a mérendő komponens elnyeli, ez által a molekulák gerjesztett állapotba kerülnek, majd sugárzásmentes relaxáció révén az elnyelt energiát átadják a környezetükben lévő gázoknak, ami megnövekedett hőmérsékletet eredményez (a növekedés mértéke a mK tartományba esik). A periodikus hőmérséklet-növekedés periodikus nyomásváltozást eredményez, azaz hang keletkezik, amit a fotoakusztikus kamrához rögzített mikrofonnal mérni lehet (1. ábra). A történehez visszatérve: egy viszonylag rövid ideig tartó témakeresési időszak után 1995-ben kezdtünk el foglalkozni a fotoakusztikus módszer földgázipari alkalmazásával, ami Szegeden, az algyői földgázmezők szomszédságában kézenfekvő gondolat volt. Felvettük a kapcsolatot Puskás Sándorral a MOL Nyrt. fejlesztőmérnök munkatársával, akinek prezentáltuk a fotoakusztikus módszer előnyeit, és azon gázok – elsősorban X-H kötést tartalmazó kis molekulák, mint például metán, ammónia, vízgőz – listáját, amelyeket a dióda-lézeres fotoakusztikus módszert alkalmazva nagy érzékenységgel lehet mérni. Ő először nem látott fantáziát egyik általunk javasolt komponens mérésében sem, de néhány nap elteltével újra jelentkezett, és azt mondta, hogy a földgáz vízgőztartalmának mérésére alkalmas műszer kifejlesztése fontos kutatási téma lehet. Ez némileg meglepett minket, mert a földgáz vízgőztartalmának mérésére (ami a földgázra vonatkozó előírások szerint éppúgy kötelező, mint például a fűtőérték mérése) már akkor is számos cég árult (persze nem fotoakusztikus elvű) műszert. Viszont Sándor a cégen belül konzultált néhány szakemberrel, akik elmondták neki, hogy ezen műszerek megbízhatósága erősen korlátozott. Szeretném hangsúlyozni, hogy nagyon sokat köszönhetünk kooperatív szakmai hozzáállásának, ugyanis nem azt kezdte el keresni, hogy miért nem jó a módszerünk a cége számára, hanem elgondolkozott azon, amit tőlünk hallott és vette a fáradságot, hogy megkeresse a mi munkánk és az Ő igényeik közös metszetét. Sajnos a későbbiek folyamán, egyéb ipari együttműködések során előfordult, hogy gondolkodás nélkül visszautasították az együttműködési ajánlatunkat, majd évek elteltével jöttek rá, hogy mégis csak van a javaslatunkban ráció, ezáltal komoly időbeli versenyhátrányba kerültünk, amit nagyon nehezen tudtunk csak legyőzni (de az már egy másik történet). Nyilván minden szakember rengeteg helyről rengeteg megkeresést kap, amelyek között – valljuk be – egészen „agyament” ötletek is vannak. Ugyanakkor sok-

szor csak egy kis továbbgondolásra lenne szükség (ezt a mai modern szóhasználattal úgy mondják, hogy ki kell lépni a komfortzónából), hogy valaki felelős szakemberként vagy döntéshozóként ne a nehézségeket, hanem a lehetőségeket lássa meg egy-egy ötletben.

Visszatérve történetünkhöz: 1995-ben elkezdődtek a fotoakusztikus módszer földgázipari alkalmazhatóságát vizsgáló laboratóriumi kísérletek, amelyeket a MOL Nyrt. K+F szerződés formájában támogatott. A gyakorlatban úgy néztek ki a kísérletek, hogy felhalmoztuk a szükséges mérőelektronikákat, fotoakusztikus kamrákat, emellett lézer fényforrásokat fejlesztettünk és nekiláttunk a földgáz főbb összetevőinek (metán, szén-dioxid, etán, propán stb.) fotoakusztikus spektrumát felvenni abból a célból, hogy megkeressük a közeli infravörös tartományban azt a hullámhosszat, ahol a vízgőz a legnagyobb érzékenységgel mérhető, miközben a földgáz egyéb komponensei a lehető legkisebb mértékben zavarják meg a vízgőzmérést. Sajnos, hamar kiderült, hogy a számunkra ideális hullámhossztartományokban, ahol elméletileg csak a vízgőznek vannak elnyelési vonalai, valójában „hemzsegek” a földgáz fő komponenseihez tartozó nagyon gyenge, a spektroszkópiai adatbázisokban legtöbbször fel sem tüntetett elnyelési vonalak. Azaz a földgázban ppm (parts per million, azaz 1 millió molekulából 1 darab) szinten jelen levő vízgőzmolekula erős elnyelési vonalait elfedik a metán (illetve a kén-hidrogén esetében a szén-dioxid) gyenge elnyelési vonalai, mivel ez utóbbi komponensek koncentrációja jellemző módon 5-6 nagyságrenddel nagyobb (metán esetében akár 98%, CO<sub>2</sub> esetében akár 10%), mint a mérendő vízgőzé, illetve kén-hidrogéné. Ezért eljárást dolgoztunk ki, amit a későbbiekben szabadalmaztattunk [4], amely lehetővé tette, hogy ebben az „elnyelésivonal-rengetegben” is megbízható méréseket tudjunk végezni.

Lépésről lépésre összeállítottunk egy fotoakusztikus mérőrendszert, amellyel laboratóriumi körülmények között megbízható vízgőzméréseket lehetett végezni. A MOL Nyrt. következő megbízási szerződése már egy gázüzembe telepíthető fotoakusztikus műszer kifejlesztésére vonatkozott. Az első és legfontosabb probléma, amivel szembesültünk, hogy egy gázüzem potenciálisan robbanásveszélyes terület, azaz olyan megoldásokat kellett alkalmaznunk, amelyek biztosították a műszer gyújtószikra-mentességet. Ez gyakorlatilag a teljes műszer újratervezését jelentette, mivel innentől kezdve meg kellett felelni a vonatkozó úgynevezett ATEX szabványoknak is. A 2000-es évek elejére elkészült az első műszer, amit büszkeségtől dagadó kebellet szállítottunk a MOL Nyrt. algyői gázüzemébe. „Apró” problémát jelentett, hogy a laboratóriumi körülmények között jól működő műszer teljesen használhatatlannak bizonyult terepi körülmények között, ugyanis a földgáz vízgőztartalma helyett egyetlen paraméterre volt igazából érzékeny, az pedig a környezeti hőmérséklet volt. Csalódottságunkat úgy próbáltuk enyhíteni, hogy erős öniróniát gyakorolva megállapítottuk, hogy sikerült elkészítenünk a világ legrágább hőmérőjét. Rövid kesergés

után nekiláttunk a rendszer hőmérséklet-érzékeny elemeinek a beazonosításához, majd a hőmérséklet-érzékenység megszüntetéséhez (pontosabban az elfogadható értékre való csökkentéséhez). Stabilizáltuk a mérőkamra hőmérsékletét, emellett rájöttünk arra, hogy az alkalmazott telekommunikációs típusú diódlézer hullámhosszának stabilizálásához nem elegendő a tokozásába gyárilag beépített Peltier-elemes hőmérséklet-stabilizálás, hanem szükség van a lézer teljes tokozásának hőmérséklet-stabilizálására is. Továbbá nyilvánvalóvá vált, hogy a mérőelektronika is számos olyan alkatrészt tartalmaz, amelyek stabilitása elegendő a laboratóriumi mérésekhez, terepi körülmények között azonban túlságosan hőmérséklet-érzékenyek, hiszen egy gázüzembe kitelepített műszer hőmérséklete magyarországi éghajlati körülmények között könnyedén változhat  $-20 - +45$  °C tartományban. Szerencsénkre addigra már elkezdődött egy hosszú és gyümölcsöző, jelenleg is tartó együttműködés a Videoton Holding Zrt. Fejlesztési Intézetével, ahol a mérnök kollégák, *Simon Ferenc* (†) vezetésével, azonosították azon elektronikai alkatrészeket, amelyek a rendszer hőmérséklet-érzékenységeért felelősek. Ez után oly módon alakították át a rendszer elektronikáját, hogy azzal a hőmérséklet-érzékenység a szükséges mértékben csökkent. Itt ismét szeretnék kitérőt tenni, és hangsúlyozni: a fizikus sikeres munkájához alapvető fontosságú, hogy legyen benne képesség és hajlandóság az együttműködésre az egyéb szakterületek munkatársaival, például mérnökökkel és vegyészekkel. Ez az együttműködés sokszor nem egyszerű, már csak ezért sem, mert nem ugyanazt a szakmai nyelvet beszéljük, ennek ellenére e kollégák segítségével a fizikus „félkarú óriás”. Az átalakított műszer már sikeresen vizsgázott terepi körülmények között, így a következő években újabb és újabb műszereket tudtunk telepíteni a MOL Nyrt. különböző üzemibe (Algyő, Üllés, Sávoly, Barcs, Százhalombatta stb.).

## A Hilase Kft.

Több körülmény szerencsés együttállása, azaz a már telepített fotoakusztikus műszerek megbízható működése, a spin-off cégek létrehozását támogató TST-program kiírása, tapasztalt (Szabó Gábor, Bor Zsolt és *Rácz Béla*) és fiatal (*Mobácsi Árpád*, *Szakáll Miklós* és jómagam) kutatók lelkesedése, valamint a Videoton Holding Zrt. mérnöki és vállalkozói tudása, elkötelezettsége tette lehetővé, hogy 2004-ben megalapítsuk a Hilase Kft.-t, a Szegedi Tudományegyetem első úgynevezett spin-out cégét, amely az egyetlen elért fotoakusztikus eredmények hasznosításával foglalkozik. A cég létrehozása és működtetése során a kezdetektől fogva számos, előtte számunkra ismeretlen feladatot kellett megoldanunk. Az egyik legfontosabb az volt, hogy a Szegedi Tudományegyetemmel rendezett szerződéses viszonya legyen a cégnek, amely egyértelműen rögzíti, hogy az SZTE végzi a fotoakusztikus kutatásokat, míg a Hilase Kft. gyártja a fotoakusztikus



A Hobre Laser Technology Kft. munkatársai az algyői gyártó- és fejlesztőközpont előtt. Az itt dolgozók több mint fele fizikus végzettségű.

műszereket, és az eladásokból meghatározott százaléokban royalty-t fizet az egyetemnek a szabadalmak és a know-how hasznosítása után. Ügyvezető igazgatót kellett találni a cég élére. Az alkalmazott konstrukció szerint az egyik ügyvezető (*Lak István*) képviselte a Hilase Kft. többségi tulajdonosát, azaz a Videoton Holding Zrt.-t, míg a másik a feltaláló kutatókat. Ez utóbbi én lettem, annak ellenére, hogy sokáig nagyon berzenkedtem ezen megoldás ellen, mivel ilyen tapasztalatom egyáltalán nem volt és nem éreztem magam alkalmasnak e feladatra. Végül sikerült megbirkóznom e teljesen új kihívással, mivel egyrészt rengeteg szakmai támogatást kaptam Szabó Gábortól, illetve a Videoton mérnökeiktől és munkatársaimtól, másrészt Lak István ügyvezetőtársamtól rengeteget tanultam arról, hogy egy cég miként tud rendezetten, „cégszerűen” működni. Ezek viszonylag egyszerű dolgok, nincs bennük semmi ördögösség, semmi olyan, ami ellentmondana a „józan paraszti észnek”. A teljesség igénye nélkül: el kell készíteni a gyártott műszerek részletes alkatrészlistáját (angolul BOM azaz bill of materials), vagy például: mielőtt bármit változtatunk a rendszeren, akár csak a legapróbb alkatrészt, végig kell gondolni, hogy e változtatás milyen egyéb, legtöbbször fel sem tételezett további változásokhoz fog vezetni. Egy minőségirányítási rendszer bevezetése roppant unalmas tevékenységnek hangzik, ugyanakkor – tapasztalataim szerint – rengeteg előnnyel jár. Ami egy fizikus számára talán a legnehezebb, hogy a cég alapvető célja a műszert sorozatban, egyenletes színvonalon legyártani. Persze fontos a gyorsaság és a minél olcsóbb gyártás, de talán a reprodukálás az, ami a normál kutatói-fizikusi gondolkodással leginkább szembe megy. Hiszen tegyük fel, hogy egy fizikus például megépíti a világ legérzékenyebb fotoakusztikus metánmérő műszerét, publikálja, majd a

cikke megjelenése után pár napig ünnepli magát, ezután teljesen mással kezd (például egy ammóniamérő megépítésével) foglalkozni. Némileg sarkítva, egy kutató számára teljesen értelmetlen tevékenység egy második – ráadásul az előzővel megegyező tulajdonságokkal rendelkező – metánmérő megépítése, hiszen nagy valószínűséggel ezt már nem tudná publikálni (mivel a reprodukciót nem szoktuk tudományos eredménynek tekinteni). Ugyanakkor az a jelenség, hogy két, azonos alkatrészekből álló és látszólag teljesen egyformán legyártott fotoakusztikus kamra érzékenysége (azaz, hogy mekkora mikrofonjelet kelt benne a mérendő komponens egységnyi koncentrációja ugyanazt a

lézett és mérőelektronikát alkalmazva) akár 20-25%-kal is különbözik, valójában önmagában is izgalmas tudományos kérdés, amelynek megválaszolása segíti a fotoakusztikus módszer mélyebb megértését (és persze a műszergyártást és eladást is).

A fentebb felsorolt vezetői képességek elsajátításának fontosságát nem lebecsülve, azt tekintem a sikerhez vezető legfontosabb lépésnek, hogy ügyvezetőként viszonylag hamar rájöttem a legfontosabb feladatomra, nekem kell kiválasztanom a legmegfelelőbb embereket, akik szívvel-lélekkel dolgoznak a cég sikeréért, azaz a fotoakusztikus módszer minél szélesebb körű alkalmazásáért a földgáziparban. A 2010-es évek elejére rendkívül jó csapat jött össze a Hilase Kft.-ben, itt mindenki tudja a dolgát, a kollégák jól kiegészítik egymást és jól tudnak együtt dolgozni. Ők döntően fizikusok, akiket az egyetemről ismertem, nem egy közülük fotoakusztikus témából írta szakdolgozatát vagy diplomamunkáját, azaz teljes mértékben elkötelezettek a fotoakusztika sikere iránt. Ők már akkor is bíztak a fotoakusztika földgázipari alkalmazhatóságában, pedig – nagy kockázatvállalás mellett – teljesen járatlan úton jártunk, hiszen előttünk senki sem alkalmazta a fotoakusztikus módszert ezen a területen (más területen se nagyon). Ez az úttörő szerep nem arról szólt, hogy egy bevált mérőmódszert még jobbra próbáltunk tenni. Sok nehézségünk volt és sokszor érezhettük volna, hogy a fotoakusztika földgázipari alkalmazása reménytelen vállalkozás, viszont korábban olyan sikerélményem volt, amiből mindig erőt tudtam meríteni. 2001 nyarán meghívást kaptam a houstoni Rice Egyetemre, ami mindössze két hétre szólt, és a fotoakusztikus módszer előnyeit kellett demonstrálnom. A hátizsákomba pakoltam egy fotoakusztikus kamrát és egy mikrofonerősítőt, így vittem ezeket Amerikába. (Megjegyzendő, hogy ez még



2001. szeptember 11-e előtt volt, ma már nem gondolom, hogy ilyen obskúr eszközt csak úgy fel lehetne vinni egy menetrendszerű utasszállító repülőgépre.) Houstonban egy nap alatt összeraktam a fotoakusztikus rendszert és összehasonlító méréseket végeztünk egy többszörös fényutas (multi-path) optikai abszorpciós koncentrációmérő rendszerrel, amit a houstoni kollégák a mérést megelőzően fél évig raktak össze és gondosan optimalizáltak ezen összehasonlító kampányra. A mérések során a „szedett-vedett” fotoakusztikus rendszer érzékenyebbnek bizonyult, mint a gondosan optimalizált optikai abszorpciós rendszer. A későbbiekben ez a mérés segített abban, hogy végig bízzak a fotoakusztikus módszerben, abban, hogy a fotoakusztikus földgázipari műszereink egyre jobbra tehetők, az átmenetileg fellépő nehézségek/problémák legyőzhetőek, hiszen tudtam, hogy optikai abszorpciós rendszereket alkalmaznak a földgáz vízgőz- és kénhidrogén-tartalmának mérésére, és tudtam, hogy a mi fotoakusztikus rendszerünk jobb ezen rendszereknél.

## A fotoakusztikus műszereink a nemzetközi piacon

Egyre megbízhatóbb és pontosabban mérő fotoakusztikus rendszereket gyártottunk, viszont folyamatosan szembe találtuk magunkat azzal a problémával, hogy a földgázipar rendkívül konzervatív iparág, ezért egy újonnan jött outsider cég (amely ráadásul egy volt szocialista, kelet-európai országból érkezett) által ajánlott új, korábban még nem alkalmazott mérési elven alapuló műszer lényegében se szakmai, se üzleti érdeklődést nem tudott generálni. Azonban egy szerencsés véletlen folytán fel tudtam venni a kapcsolatot a holland Hobre Instruments BV nevű, földgázipari műszereket a múlt század 70-es éveitől gyártó cég munkatársaival, akik gyorsan felismerték a fotoakusztikus műszerünkben rejlő üzleti potenciált és vállalták a műszerek marketingjét, illetve – ami legalább ennyire fontos – telepítését és szervizelését. Ez utóbbi fontosságának megértéséhez elég abba belegondolni, hogy egy tengeri fúrótornyra csak olyan szakember mehet szerviztevékeny-



Kiszállításra váró fotoakusztikus műszerek a Hobre Laser Technology Kft.-nél.

seget végezni, aki többek között helikoptervezetői engedéllyel is rendelkezik. Innentől kezdve a történet abszolút pozitív fordulatot vett, a műszereladásaink több kontinensen is folyamatos növekedésnek indultak, a fotoakusztikus módszer egyre elfogadottabbá vált és 2013-ban a Hobre BV megvásárolta a földgázipari gyártási jogokat és létrehozta a már korábban említett algyői gyártó és fejlesztőközpontot, ahol jelenleg 15 magyar szakembert – kiknek több mint fele fizikus – foglalkoztatnak.

Röviden összefoglalva ez az az innovációs sikertörténet, aminek köszönhetően 2017-ben megkaptam a Gábor Dénes-díjat. Büszkeséggel tölt el, hogy részese lehettem e történetnek, hiszen nagyon sokan nagyon sokat dolgoztunk a sikerért. Munkánk során rengeteg új dolgot tanultunk, többek között a fizika, az analitikai kémia, a műszerfejlesztés és a vállalkozás területén. Azt gondolom, akik részt vettek/vesznek ebben az elkötelezett munkában az itt megszerzett tudásukat kiválóan tudják hasznosítani jövőbeli szakmai karrierjük során.

## Irodalom

1. Jim Collins: *Jóbból kiváló. A tartós üzleti siker elemei.* HVG könyvek (2013) ISBN: 9789637525681.
2. Bozóki Zoltán: *Fotoakusztikus elvű, környezetvédelmi és ipari célú gázkoncentráció-mérő műszerek pontosságát, megbízhatóságát növelő mérési elrendezések és eljárások fejlesztése.* MTA Doktori értekezés, 2011.
3. Számos PhD dolgozat született a fotoakusztikus gázdetektálás témakörben. Néhány ezek közül Mohácsi Árpád, Szakáll Miklós, Huszár Helga és Pogány Andrea dolgozata.
4. Bozóki Zoltán, Mohácsi Árpád, Szabó Gábor, Puskás Sándor, Szakáll Miklós, Bor Zsolt: *Eljárás időben változó összetételű metántartalmú gázelegy, elsősorban földgáz, vízgőztartalmának fotoakusztikus elvű meghatározására.* P0201751 bejelentési számú magyar szabadalom.

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

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu)

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

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

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

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

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

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

# SÚRLÓDÁSI EGYÜTTHATÓ MEGHATÁROZÁSA ELLENÁLLÁSMÉRÉS ALAPJÁN

Simon Alpár, Tunyagi Arthúr, Fülöp Zalán, Kapusi Zalán, Kandrai Konrád  
Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia

A tartalmas és érdekes, de ugyanakkor korszerű és vonzó minőségi fizikatanítás elképzelhetetlen az egyénileg elvégzett, vagy frontálisan bemutatott szemléltető kísérletek nélkül. A modern neveléstudományi elméleteknek, szakmódszertanoknak és tanmeneteknek, illetve a „csináld magad” koncepciónak (DIY, „do-it-yourself”) köszönhetően a számítógép és a mikrokontrollerek egyre fontosabbá váltak a fizika tanításában is. A megértendő és tanulmányozandó jelenségek és a mérés–adatgyűjtés–feldolgozás hármast megvalósító számítástechnika közötti kapcsolatot az érzékelők, jelátalakítók és működtetők jelentik.

Mindezeknek köszönhetően ma már újra előkerülhetnek a sufnyiból a régi, klasszikus alapkísérletek, és modern köntösbe bújtatva, a mai generáció számára vonzóbb formában jelentkeznek a fizikaoktatásban.



*Simon Alpár* a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Fizika karán egyetemi docens, dékánhelyettes. Doktori disszertációját „Magna cum Laude” minősítéssel 2002-ben védte meg. Kutatási érdeklődési köréhez a modern fizikaoktatás, az interdiszciplináris fizika, a mikrokontrollerek által vezérelt szenzoros mérések és a gázkiszűlések fizikája tartozik.



*Tunyagi Arthúr* a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Fizika karán egyetemi adjunktus. Doktori címét 2004-ben az Osnabrücker Egyetemen szerezte. Kutatási területe a mikrokontrollerek által vezérelt mérések alkalmazása a fizikában.



*Fülöp Zalán* a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Fizika karán, Mérnöki-Fizika szakon III. éves hallgató. Középiskolai tanulmányait a szovátai Domokos Kázmér Iskola csoport keretén belül végezte. A Kolozsvári Magyar Egyetemi Intézet égisze alatt működő Fizika szakkollégium tagja.

A „tudományos barkácsolás” és a „csináld magad” típusú kísérletek igen fontos szerepet kaphatnak a fizikatanításban, hiszen az egyszerűség, a hozzáférhetőség és az alacsony költségkeret mellett, sokkal közelebb viszik az érdeklődőt a jelenséghez és az azt leíró elmélethez, mint a csúcstechnológiás, rendkívül pontos és kifinomult, legkorszerűbb, de ugyanakkor nagyon bonyolult kutatási kísérletek.

Az itt bemutatásra kerülő munkánkban a súrlódási erők tanulmányozásánál – a fentiek szellemében – a jól bevált, klasszikus, rugós erőmérős kísérletek esetén alkalmazott emberi húzást és leolvasást mikrokontrollerrel, a rugós erőmérőt pedig egy „rugalmas” ellenállással helyettesítjük. Reményeink szerint a leírtak a szakköri tevékenységeken résztvevő természet-tudományos és műszaki érdeklődésű gimnazisták, illetve a fizikaszakos főiskolai vagy egyetemi hallgatók számára hasznos és érdekes segítségként, kiindulópontként szolgálhatnak.

## Elméleti áttekintés

A súrlódás mindennapi életünkben – mind hasznos, mind pedig káros következményei révén – igen fontos szerepet játszik. Meghatározásaként azt mondhat-



*Kapusi Zalán* a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Fizika karán, Mérnöki-Fizika szakon III. éves hallgató. Középiskolai tanulmányait a székelyudvarhelyi Tamási Áron Gimnázium keretén belül végezte. A Kolozsvári Magyar Egyetemi Intézet égisze alatt működő Fizika szakkollégium tagja.



*Kandrai Konrád* a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Fizika karán, Mérnöki-Fizika szakon III. éves hallgató. Középiskolai tanulmányait a kolozsvári Brassai Sámuel Elméleti Líceum keretén belül végezte. A Kolozsvári Magyar Egyetemi Intézet égisze alatt működő Fizika szakkollégium tagja.

jük, hogy azon jelenségek összessége, amelyek az egymással érintkező testek érintkezési felületük mentén való elmozdulásukkal, illetve azok nyugalmi állapotról való megindulásuk akadályozásával kapcsolatosak [1, 2]. Ezért külön szokták vizsgálni és tárgyalni a *csúszó* vagy *mozgási súrlódást*, illetve a *tapadó* vagy *nyugalmi súrlódást*. Mindkét súrlódás annak köszönhető, hogy a felületek sohasem tökéletesen simák. Az egymással érintkező felületek egyenetlenségei (egymásba akadó kiemelkedések és bemélyedések) kölcsönösen nehezítik az egymáshoz viszonyított mozgást. A felületmegmunkálás sem oldja meg a súrlódás kérdését, hiszen a gondosan „simára” csiszolt felületek, a megjelenő molekuláris erők és kémiai kötések révén különösen nagy mértékben tapadnak egymáshoz.

A súrlódási erő reakcióerő, azaz csak akkor jelenik meg, ha egy külső erő a nyugalomban levő testet el akarja mozdítani, vagy – ha ez már sikerült – folyamatos mozgásban akarja tartani. A két súrlódástípust és a nekik megfelelő súrlódási erőket egy erő-idő diagramon [3] szemléltethetjük (1. ábra).

A vízszintes asztalra nyugvó téglatest csak akkor kezd csúszni, ha az érintkezési felülettel párhuzamosan egy húzó vagy toló erő nagysága egy meghatározott küszöbértéket elér. Mivel a téglatest a küszöbértéknél kisebb nagyságú erő hatására nyugalomban marad, a testre egy másik, ellentétes irányú és egyenlő nagyságú erő (kényszererő) is hat, amelyet *tapadási súrlódási erőnek* nevezünk.

A küszöbértékre, amelynél a test éppen megmozdul, vonatkozik a Coulomb-féle súrlódási törvény: az  $F_{\text{tapadási}}$  tapadási súrlódási erő független az érintkezési felület méretétől és arányos a felületre ható  $N$  nyomóerő nagyságával:

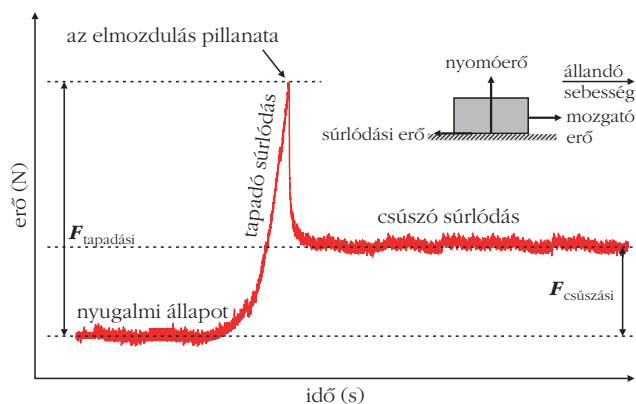
$$|F_{\text{tapadási}}| = \mu_0 |N|. \quad (1)$$

A  $\mu_0$  arányossági tényező a két érintkező felület anyagi minőségétől függő empirikus mennyiség és *statikus* vagy *tapadási súrlódási együtthatónak* nevezzük.

Ha legyőztük a tapadási súrlódást és a téglatestet egy bizonyos kezdősebességgel elindítottuk az asztalra, az tapasztaljuk, hogy sebessége egyre csökken és végül zérus lesz (megáll). A sebességcsökkenést, illetve a sebességgel ellentétes irányú gyorsulást az asztalra által ható *csúszási súrlódási erőnek* tulajdonítjuk. Erre az erőre is érvényes a Coulomb-féle súrlódási törvény: a sebességgel mindig ellentétes irányú  $F_{\text{csúszási}}$  súrlódási erő nagysága első közelítésben független az érintkezési felület és a sebesség nagyságától, és arányos a felületre ható  $N$  nyomóerő nagyságával:

$$|F_{\text{csúszási}}| = \mu |N|. \quad (2)$$

A  $\mu$  arányossági tényező szintén a két érintkező felület anyagi minőségétől függő empirikus mennyiség és *kinetikus* vagy *csúszási súrlódási együtthatónak* nevezzük.



1. ábra. Erő-idő diagram a súrlódási jelenségekhez.

Kísérletileg könnyen kimutatható, hogy a megmozdításhoz szükséges küszöberő nagyobb a már elindított test egyenes mozgásban való tartásához szükséges erőnél, ennek következtében a csúszási súrlódási együttható is kisebb, mint ugyanazon érintkező anyagpár tapadási súrlódási együtthatója:

$$\mu < \mu_0. \quad (3)$$

A súrlódás tanulmányozására és a súrlódási együttható meghatározására számos módszer áll rendelkezésünkre [4–8]. A változtatható hajlásszögű lejtős módszeren kívül mindegyik közös vonása az erőmérés.

A technikai fejlődésnek köszönhetően ma már nagyon sokfajta, modern erőmérő érzékelő áll rendelkezésünkre. Olyan eszközökről van szó, amelyek elektromos ellenállása megváltozik alakváltozás, külső erő vagy nyomás hatására [9–11]. Talán az egyik legegyszerűbb ilyen érzékelő a rugalmas ellenállás, vagy vezető gumiszál [12].

## Szükséges anyagok, eszközök

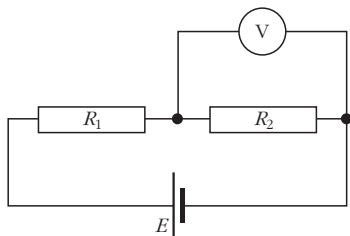
A kísérlet elvégzéséhez krokodilcsipeszekre, mérőszalagra, analitikai mérlegtányérra és súlyokra, vezető gumiszálra, Arduino Uno mikrokontrollerre, műanyag próbapanelre, 1 k $\Omega$ -os ellenállásra, számítógépre, vezérlő szoftverre, számítógép-vezérelt digitális multiméterre, fa téglatestre (hasábra), léptetőmotorra, damilra, különböző anyagi minőségű (fa, üveg, papír) felületekre van szükség.

## A mérőáramkör elméleti és gyakorlati szempontjai

Munkánkban a súrlódás során lejátszódó jelenségek és a számítástechnika közötti „tölcsmérés” rugalmas ellenállást használunk. Kísérleteink során ezen elektromos ellenállás értékét és az érték időbeli változását kell követnünk.

Az ellenállásmérés az egyik leggyakoribb elektromos mérés. A gyakorlatilag rendelkezésünkre álló lehetőségek közül a legegyszerűbbek és leggyorsab-





2. ábra. A feszültségosztó.

bak a multiméteres, illetve a feszültségosztós technikák. Ha a mérendő ellenállás értéke néhány száz  $\Omega$  és néhány száz  $k\Omega$  közé esik, a multiméteres kétvezetékes mérések kielégítő eredményt adnak, akkor is, ha a mérővezeték ellenállását nem kompenzáljuk, nem vesszük figyelembe az esetleges átmeneti ellenállásokat és a környezeti hőmérsékletet. A leggyakrabban elkövethető hiba a „kézhatás” lenne (a mérést végző személy az ellenállást a két kezével szorítja a mérőtűskékhez, testének ellenállása pár tíz  $k\Omega$ -os értéke lesöntöli a mérendő ellenállást, ezzel lényegesen meghamisítva a mérést), de ez krokodilcsipeszek vagy próbapanel segítségével kiküszöbölhető.

Közismert, hogy két ellenállás soros kapcsolása (egylépcsős) feszültségosztót képez (2. ábra). Az elnevezés onnan származik, hogy az  $E$  tápfeszültség megoszlik a két ellenálláson. A voltmérő kijelzésének ismeretében az ismeretlen ellenállás értéke meghatározható.

A voltmérő kijelzése:

$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E, \quad (4)$$

ha  $R_2$  az ismeretlen ellenállás, akkor

$$R_2 = \frac{U}{E - U} R_1, \quad (5)$$

ha pedig  $R_1$  az ismeretlen ellenállás:

$$R_1 = \frac{E - U}{U} R_2. \quad (6)$$

Kísérletünkben  $R_1$  a gumiszál ellenállása és  $R_2 = 1\text{ k}\Omega$ .

## A rugalmas ellenállás

Az erőérzékelőként használt rugalmas ellenállás egy szénszemcséket (ipari kormot) tartalmazó gumiszál, amelynek két hasznos tulajdonsága van: vezeti az áramot és megnyújtva elektromos ellenállása nő.

A hozzávetőlegesen 1 m hosszú és 2 mm átmérőjű gumiszál jópár online üzletből viszonylag olcsón és könnyen beszerezhető [12–16]. A csomag még 2 krokodilcsipeszt és egy 1  $k\Omega$ -os ellenállást is tartalmaz. A gyártó a következő jellemzőket adja meg: nyugalmi állapotban (megnyújtás nélkül) a hosszegységre jutó ellenállás 140–160  $\Omega/\text{cm}$ ; maximum 50–70%-os relatív megnyúlás megengedett; lineáris kapcsolat várható az ellenállás és a megnyúlás között; a relaxációs idő (az



3. ábra. A vezető gumiszál a hozzá kapott 2 krokodilcsipessel és az 1  $k\Omega$ -os ellenállással.

az idő, ami alatt a külső nyújtóerő megszűnése után a szál visszanyeri eredeti hosszát és ellenállását) nem megadott, de több perc nagyságrendű.

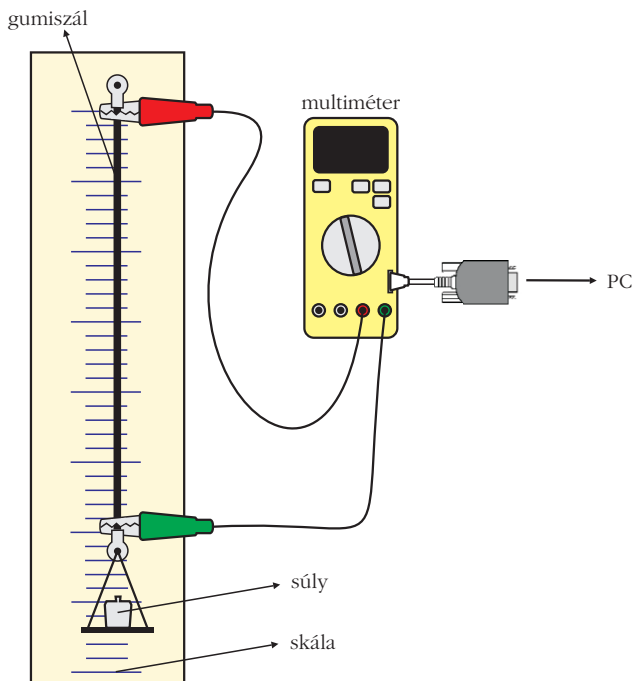
A [www.adafruit.com](http://www.adafruit.com) oldalról beszerzett 2 mm átmérőjű gumiszálunk (3. ábra) hossza 103 cm volt, elektromos ellenállása pedig 2,3  $k\Omega$ , ami 22,33  $\Omega/\text{cm}$  fajlagos ellenállást jelent. Ez kevesebb mint hatoda a termék leírásában található értéknek!

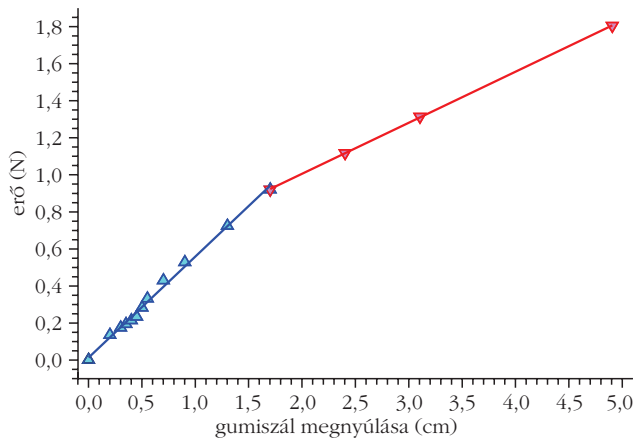
Ha a gumiszálát erőszenzorként akarjuk használni, akkor meg kell vizsgálni a szál elektromos és mechanikai tulajdonságait, illetve kapcsolatot kell találni közöttük.

## A rugalmas ellenállás tanulmányozása

Az eredeti gumiszálát félbe vágtuk, az így kapott két rövidebb szál végeit pedig szigetelt szemes sarukkal láttuk el. A mechanikai és elektromos tulajdonságok vizsgálata során elsődleges célunk az ellenállás idő- és erőfüggésének felderítése. Kísérleti berendezésünket a 4. ábra szemlélteti.

4. ábra. A gumiszál kalibrálása.





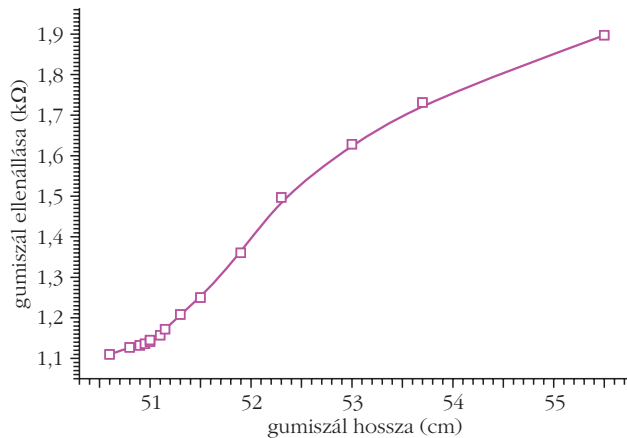
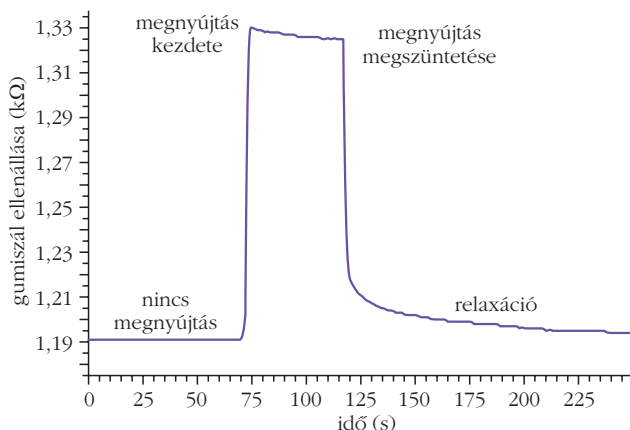
5. ábra. A gumiszál megnyúlása a rá ható erő függvényében.

A gumiszál egyik végén található sarut a mérőszalag origójába helyeztük (0 cm), a másik sarura pedig egy analitikai mérlegtányért erősítettünk, amelyre különböző nagyságú analitikai súlyokat helyeztünk. A szál mindenkor hosszát a mérőszalagról olvastuk le, ellenállását pedig a számítógép-vezérelt multiméterrel mértük és rögzítettük. A megnyúlás és az azt előidéző erő kapcsolatát a 5. ábra szemlélteti.

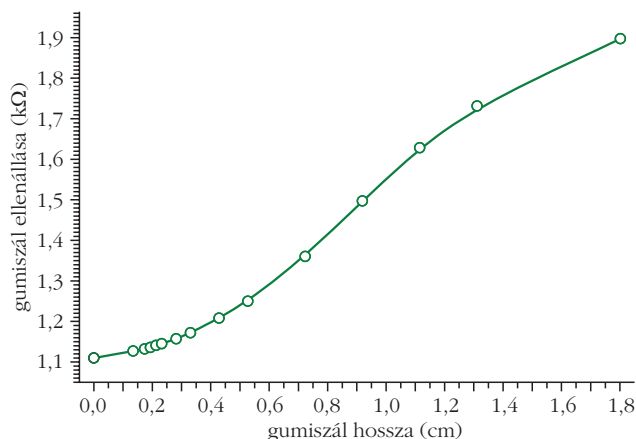
Megfigyelhető, hogy a gumiszál körülbelül 1 N erő értékig jó közelítéssel a Hook-féle rugalmassági törvény szerint viselkedik, majd – bár megnyúlása továbbra is lineáris 1,8 N-ig – rugalmassági modulusa megváltozik. A szál elektromos ellenállása a hossz növekedésével ugyan nő (6. ábra), de e növekedés nincs lineáris kapcsolatban a rá ható erővel (7. ábra), még akkor sem, ha a megnyúlás nem több, mint az eredeti hosszúság 10%-át jelentő 5 cm.

Kísérletünk során a multiméter másodpercenként mérte a gumiszál ellenállásának értékét és rögzítette azt a számítógép adattárolójába. Ezt az időfüggését a 8. ábra szemlélteti. Jól látható, hogy nyújtás hiányában a szál ellenállása állandó, az analitikai súly mérlegtányérra helyezése pedig a szál megnyúlását és az ellenállás ugrásszerű növekedését idézte elő. A súly eltávolítása az ellenállás hirtelen csökkenését vonja maga után, majd egy hosszabb relaxációs idő veszi kezdetét, amíg a szál visszanyeri eredeti méretét és ellenállását.

8. ábra. A gumiszál ellenállásának időfüggése különböző hatásokra.



6. ábra. A gumiszál hosszának hatása az ellenállásra.

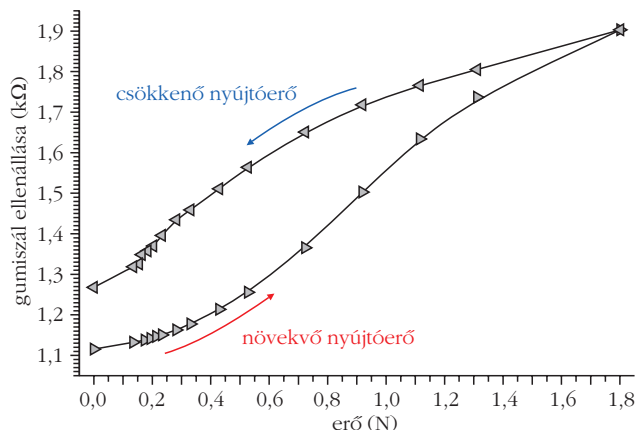


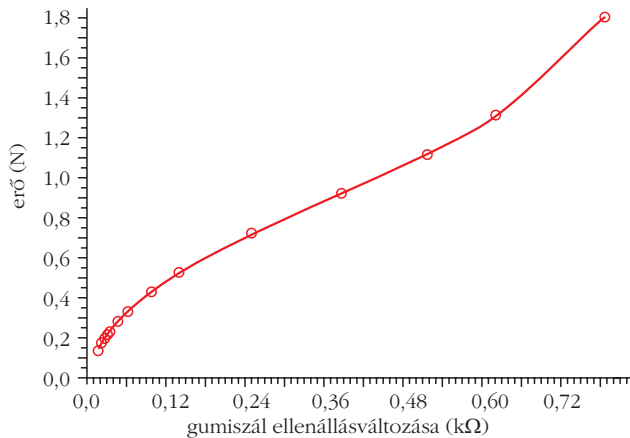
7. ábra. A gumiszálra ható erő hatása az ellenállásra.

Amennyiben az alkalmazások vagy a kísérletezések során nincs lehetőség kivárni a relaxációt, vagyis a gumiszálra folytonosan hat erő, hiszterézises viselkedésre számíthatunk (9. ábra).

A relaxációhiány és a hiszterézis miatt a kalibrálás során nem az erő-ellenállás kapcsolatot célszerű keresni, hanem egy olyan fizikai mennyiséget ajánlott találni, amelyet ezen hatások nem befolyásolnak. Érdeemesnek tűnt megvizsgálni, hogyan változik a gumiszál ellenállása (az eredeti nyújtatlan értékhez viszonyítva) a megnyújtó erő függvényében. Erre a kapcsot

9. ábra. A gumiszál hiszterézises viselkedése.





10. ábra. Megnyújtó erő az ellenállás-változás függvényében.

latra (10. ábra) legjobban egy polinom illeszhető, így a gyakorlati alkalmazások során megmért  $\Delta R$  ellenállás-változással kiszámolhatjuk az erőt és gumiszálunk erőszenzorként használható.

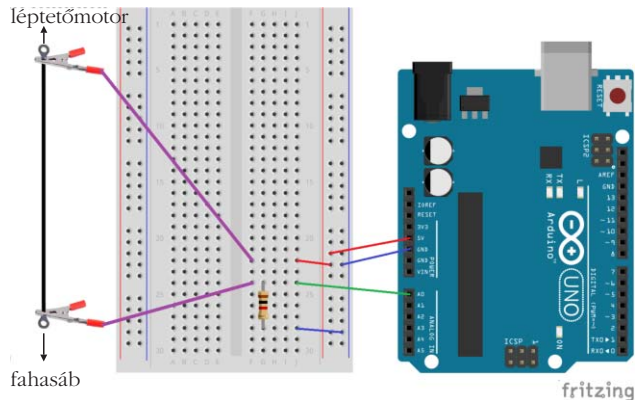
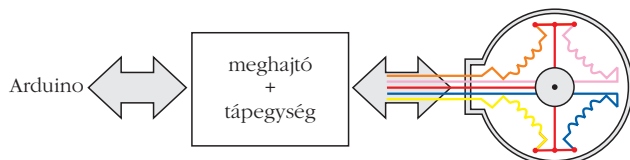
## A vezető gumiszál alkalmazása súrlódási együttható meghatározására

A gumiszál másik felét a súrlódási együttható meghatározására végzett kísérleteknél használtuk fel. A mikrokontrolleres kivitelezésben a feszültségosztó voltmérős méréseit az Arduino Uno mikrokontroller [17] végzi el, és az ismert ellenállás segítségével kiszámolja a mérendő ellenállás értékét, majd minden időpillanatban rögzíti azt (11. ábra). A kísérlet vázlatja a 12. ábrán látható.

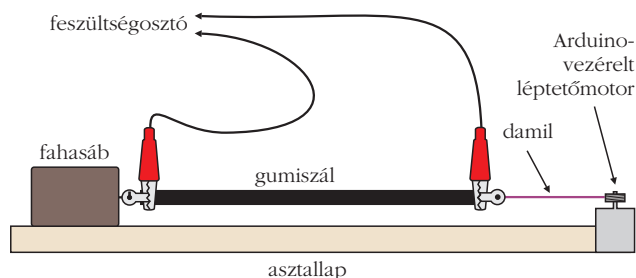
A súrlódási erő mérésekor a gumiszál egyik végén található szemes sarut a fa téglatesthez, a másik végén levőt pedig 0,3 mm-es horgászszinórral a léptetőmotor tárcsájához rögzítettük. A téglatest egyenletes mozgását egy 28BYJ-48 típusú léptetőmotorral [18] oldottuk meg, amelynek lépésszöge – a katalógusadatok alapján –  $0,09^\circ$ .

A léptetőmotor egy olyan egyenáramú motor, amely jól meghatározott kis lépésekben forog. Ezt a gyakorlatban úgy érik el, hogy a motor tengelyére szerelt mágneseket tekercsekkel (elektromágnesekkel) veszik körül, az éppen üzemben levő tekercs(ek) mágneses tere kölcsönhatásba lép a tengelyen levő állandó mágnes terével és egy lépést elfordítja, majd ezt a tekercset „lekapcsolják” és „felkapcsolják” a következőt és így tovább. Számítógépes vezérléssel eme szögelfordulás rendkívül pontos és reprodukálható. Fő hátrányuk, hogy áramfelvételük terhelésfüggetlen.

13. ábra. Az unipoláris léptetőmotor belső felépítése és huzalozása, a piros a közös szálat, azaz az 5 V-os tápfeszültséget, míg a többi az elektromágneseket jelöli.



11. ábra. Gumiszálás feszültségosztó Arduino Uno mikrokontrolleres kivitelezésben.



12. ábra. Kísérleti berendezés a súrlódás tanulmányozásához.

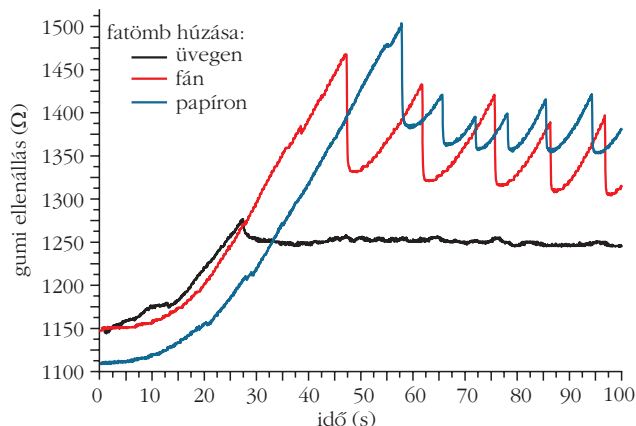
Kísérleteinkben használt unipoláris – azaz áramellátása egyetlen egy szálon történik – léptetőmotorunk az elfordulást a négy tekercs egymást követő fel- és lekapcsolásával (13. ábra) valósítja meg.

Az elfordulás sebességét a mikrokontroller „delay ()” függvényével, a soron következő elektromágnes felkapcsolásának késleltetésével, szabályoztuk. A mérések alatt a motor két lépése között 30 ms késleltetési időt használtunk. Ezzel és az apró,  $0,09^\circ$ -os lépésszöggel a motor ugrásmentes, állandó sebességű hűzást biztosít.

Itt érdemes megjegyezni, hogy a mérések és számítások, illetve a léptetőmotor meghajtásához szükséges program a [19] helyről tölthető le.

A szál ellenállásának húzás közbeni időfüggését a 14. ábra szemlélteti. Jól látható, hogy üvegen a tapadás legyőzése után folyamatosan csúszik a test, míg

14. ábra. A gumiszál ellenállásának húzás közbeni időfüggése.







15. ábra. A rugós erőmérő.

fán vagy papíron történő húzáskor a tapadás és a csúszás jelenségei periodikusan ismétlődnek.

A tapadási, illetve a csúszási súrlódási erőt minden esetben az 1. ábra szerinti értelmezés alapján határoztuk meg, a súrlódási együtthatókat pedig az (1) és (2) képletek alapján számítottuk ki.

Ellenőrzésként a kísérleteket rugós erőmérővel is elvégeztük. A gumiszalagot egy 2 N-os rugós erőmérővel (15. ábra) helyettesítettük, a húzás állandó sebességét a léptetőmotor biztosította, az erő leolvasása pedig az erőmérő skálájáról történt.

Kísérleteinket minden esetben négyszer végeztük el: az eredeti fatömb húzása után, 50 g, 100 g és 150 g tömegtöbblettel is megismételtük a méréseket. A kapott  $\mu$  tapadási és  $\mu_0$  csúszási súrlódási együtthatókat az 1. táblázat mutatja.

A táblázatban szereplő súrlódási együtthatók jó egyezést mutatnak az irodalmi értékekkel [20, 21]. Véleményünk szerint a két mérési módszer között megfigyelhető különbség az erőmérő skálájának szabad szemmel történő, kevésbé pontos leolvasásának következménye.

## Összefoglalás

A súrlódási együttható meghatározásának olyan érdekes – és olcsó – alternatíváját mutattuk be, amely a szakkörön résztvevő természettudományos és műszaki érdeklődésű gimnazisták, illetve fizikaszakos főiskolai vagy egyetemi hallgatók számára hasznos segítséget vagy kiindulópontot jelenthet. Méréseink és számításaink jó egyezést mutatnak az irodalmi eredményekkel. Meggyőződésünk, hogy érdemes hasonló mikrokontroller-vezérelt fizikai kísérleteket tervezni

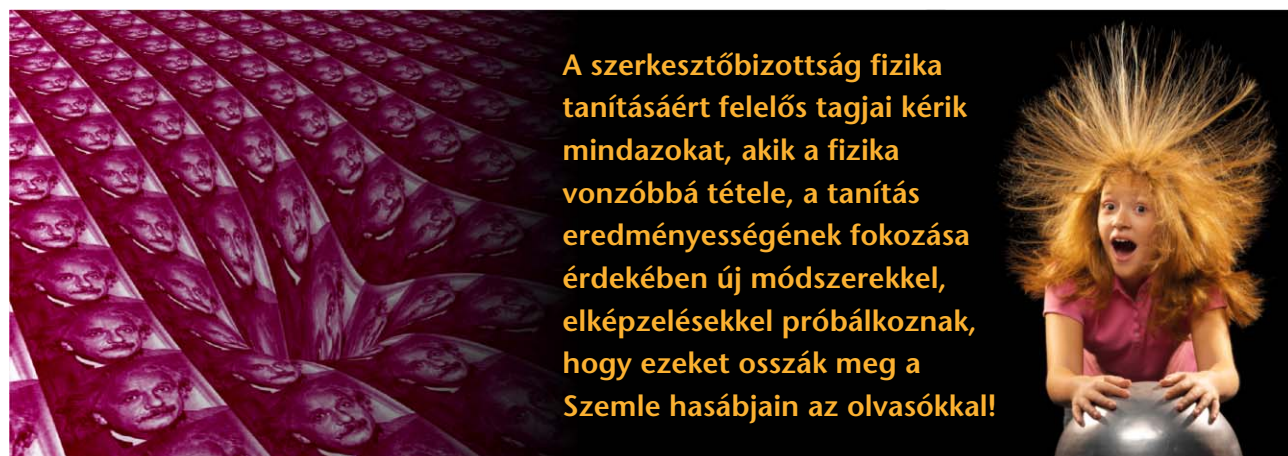
1. táblázat  
Súrlódási együttható-mérések eredményei

	vezető gumiszalag		rugós erőmérős	
	$\mu$	$\mu_0$	$\mu$	$\mu_0$
fa üvegen	0,24±0,08	0,19±0,02	0,27±0,03	0,13±0,01
fa fán	0,35±0,02	–	0,37±0,01	–
fa papíron	0,41±0,03	–	0,44±0,01	–

és megvalósítani. Tapasztalataink is azt mutatják, hogy az érdeklődésfelkeltés, a tudás, a megértés és a készségek kialakulása könnyebben elérhető ilyen gyakorlati munkák segítségével.

## Irodalom

1. Budó Ágoston: *Kísérleti Fizika I.* Tankönyvkiadó, Budapest, 1989.
2. Szalay Béla: *Fizika.* Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
3. <https://en.wikipedia.org/wiki/Friction>
4. Juhász A.: *Fizikai kísérletek gyűjteménye 1.* Typotex Kiadó, Budapest, 1996.
5. Halász Tibor: *Fizika 7.* Mozaik kiadó, Szeged, 2012.
6. Halász Tibor: *Fizika 9.* Mozaik kiadó, Szeged, 2012.
7. Halász Tibor: *FIZIKA 11–12.* Mozaik kiadó, Szeged, 2011.
8. <http://www.tribology-abc.com/abc/friction.htm>
9. [http://www.sensitronics.com/pdf/Sensitronics\\_FSR\\_101.pdf](http://www.sensitronics.com/pdf/Sensitronics_FSR_101.pdf)
10. <https://www.generationrobots.com/media/FSR400-Series-Integration-Guide.pdf>
11. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/fsrguide.pdf>
12. <https://www.adafruit.com/product/519>
13. <https://www.amazon.com/Adafruit-Conductive-Rubber-Stretch-Sensor/dp/B00NAY2R9A>
14. <http://www.bc-robotics.com/shop/conductive-rubber-cord>
15. <https://www.kiwi-electronics.nl/conductive-rubber-cord-stretch-sensor?lang=en>
16. <https://store.mansteri.com/fi/conductive-rubber-cord-stretch-sensor-extras.html>
17. <https://www.arduino.cc/>
18. <https://cdn.instructables.com/ORIG/FQY/RHST/HMVJ7U24/FQYRHSTHMVJ7U24.pdf>
19. <http://phys.ubbcluj.ro/~alpar.simon/friction.ino>
20. [http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)
21. David R. Lide (ed.): *CRC Handbook of Chemistry and Physics.* 85<sup>th</sup> Edition, CRC Press (2004) 15–51.



# MILYEN ALAKÚ A SZÁGULDÓ AUTÓ KEREKE?

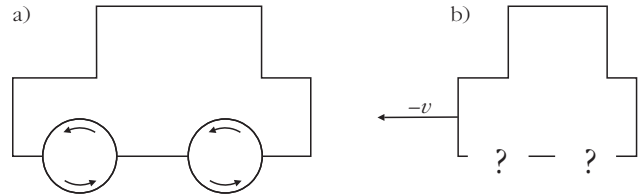
Bokor Nándor  
BME Fizika Tanszék

## Ellipszis. De miért?

Az út mellett leparkolt autó kereke kör alakú. Száguldás közben az autót vezető nyugalmi inerciarendszerében a kerék tisztán forgómozgást végez, ezért a szimmetria miatt továbbra is csak kör alakú lehet. Az út mellett álló megfigyelő szerint ez a kör alak hosszkontrakciót szenved, tehát *a száguldó autó kereke ellipszis alakú*.

Készen vagyunk, a cikk állhatna akár az előbbi három mondatból is. De ne elégedjünk meg ennyivel: értsük meg, hogy – bizonyos szempontból – miért meglepő és nem triviális a fenti válasz, azután gondosan indokoljuk meg, hogy miért mégis ez a válasz. Az *1.a ábrán* az autót vezető  $S$  nyugalmi inerciarendszeréből nézve látható a balra haladó autó. A kerekek körbeforognak, középpontjuk áll. Ami miatt rögtön elbizonytalanodhatunk az ellipsziszalak helyességében, az az, hogy a kerekek – az autó karosszériájával ellentétben – az úthoz képest *nem* egyszerű haladó mozgást végeznek, hiszen gurulnak. Az út mellett álló megfigyelő  $S'$  inerciarendszerének nézőpontját, a megrövidült mért karosszériát, és az elbizonytalanodást mutatja az *1.b ábra*.  $S'$  mérései szerint a autókerek egyes részei a haladó és forgó mozgás eredőjeként különböző irányokba mutató és különböző nagyságú sebességekkel rendelkeznek (a kerék alsó pontja például az úthoz képest *áll*, míg a felső pontja *gyorsabban* mozog az úthoz képest, mint az autó); emiatt a kerék egyes részeinek *különböző mértékű a hosszkontrakciója*.

A *2. ábrán* a dilemma részletesebben követhető.  $S$  mérése szerint a kerék összes kerületi pontja  $v$  sebességgel mozog, a felső pont például (a jobbra mutató irányt pozitívnak véve)  $u_f = -v$ -vel, az alsó  $u_a = +v$ -vel, míg a kerék középső pontja nyugszik:  $u_k = 0$ . Ha a kerék nyugalmi helyzetben kör alakú volt, akkor a tiszta forgás közben is kör alakú, ezt szimmetriaérveléssel könnyű belátni. (Itt érdemes megemlíteni az úgynevezett Ehrenfest-paradoxont [1], amelynek lényege, hogy amikor a kerék forgása álló helyzetből



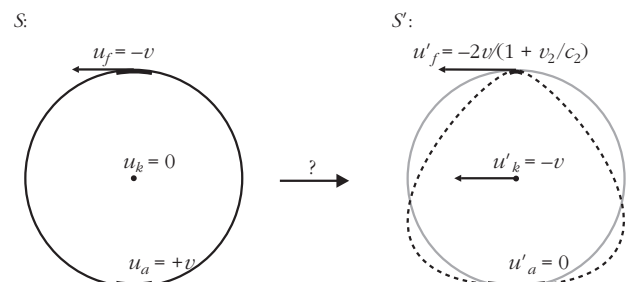
1. ábra. A balra haladó autó (a) az autóval együtt mozgó  $S$  inerciarendszerből, és (b) az út mellett álló megfigyelő  $S'$  inerciarendszeréből.

elindul, akkor a kerék anyagában – a kerület mentén – elkerülhetetlenül húzófeszültségek ébrednek, hiszen a kerület „hosszkontrakciót próbál szenvedni”, de a kerék anyaga nem engedi. Az Ehrenfest-paradoxon fogalmi alapjaiban hasonló a Dewan–Beran-gondolat kísérlethez, amelyben egy cérnát a hossza mentén gyorsítunk [2]. E cikkben az Ehrenfest-paradoxon részleteivel – és általában a kerék anyagának elasztikus tulajdonságaival – nem foglalkozom.) A *2. ábra* jobb oldalán  $S'$  nézőpontja látható: a kerék úthoz tapadó alsó pontja éppen nyugalomban van,  $u'_a = 0$ , középső pontja balra halad  $u'_k = -v$  sebességgel, felső pontja pedig szintén balra, de gyorsabban,

$$u'_f = -\frac{2v}{1 + \frac{v^2}{c^2}}$$

sebességgel, ahol  $c$  a fénysebesség. (Mindhárom vészős sebességértéket a Lorentz-féle sebességtranszformációs képletből kell megkapni, nem írhatjuk például – naivan –, hogy  $u'_f = -2v$ ). A *2. ábrán* a sebességvektorok relatív hosszának rajzolásakor  $v$  számértékét, nem törődve az autógyártás jelenlegi technológiai fejlettségével,  $0,8c$ -nek választottam. Ekkor  $u'_f \approx 0,976c$ , és a kerék alsó és felső részének vastagított vonallal jelölt darabkái – amelyeket úgy választottam meg, hogy  $S$  mérése szerint azonos hosszúságúak legyenek –  $S'$ -ből mérve nem egyenlő hosszúak: a felső darabka hosszkontrakció miatt  $0,37$ -szor *rövidebb*, az alsó pedig  $1,67$ -szor *hosszabb*, mint  $S$ -ből mérve.

2. ábra.  $S'$ -ből nézve a kerék aljának és tetejének más a sebessége. Ez azt jelenti-e, hogy  $S'$  mérése szerint a kerék alja szélesebb, a teteje keskenyebb?

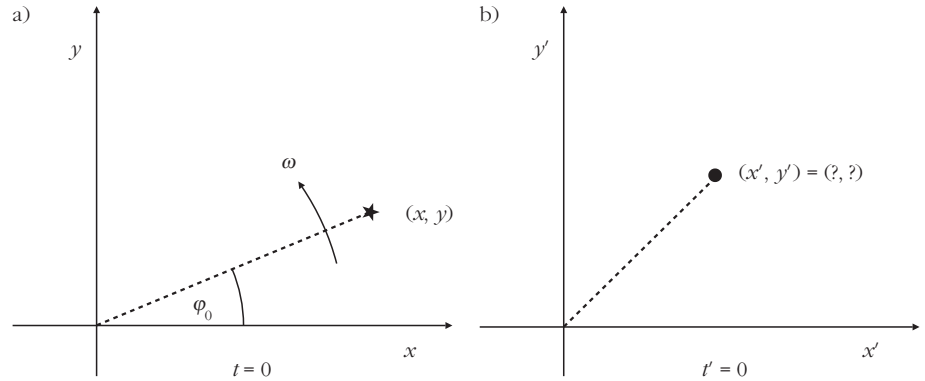


Köszönetemet fejezem ki *Jabn Kornélnak* értékes tanácsaiért.



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

( $S'$  az alsó darabka nyugalmi hosszát méri!) Az emberben ezek után természetesen merül fel a gondolat [3], hogy a kerék alakját az  $S'$  megfigyelő a 2. ábra jobb oldalán látható, alul szélesebb, felül keskenyebb ovális-szerűségnek méri, nem pedig ellipszisnek. Ez hibás következtetés, de nem könnyű minden részletre kiterjedően megmagyarázni, hogy miért.



3. ábra. A kerék egy pontja (a)  $S$  nézőpontjából és (b)  $S'$  nézőpontjából.

## Fizikai érvelés

A pusztán tény, hogy a 2. ábra jobb oldalán felrajzolt kerékalak nem lehet helyes, egyszerű fizikai érveléssel belátható: képzeljük el, hogy az autó karosszériája a kereket szorosan körülveszi, azaz a kerék egy kör alakú üregben forog, amelyhez a kerület mentén épp csak hozzá nem ér (az üregnek csak az alja hiányzik, hogy a kerék alul kicsit ki tudjon lógni, és az úthoz tudjon tapadni.)  $S'$  mérése szerint a karosszériához rögzített, kör alakú üreg tiszta haladó mozgást végez, *nem forog*, tehát pontosan a karosszériának megfelelő módon és mértékben szenved hosszkontrakciót: mozgásirányban megrövidül, alakja – ezt minden bonyodalom nélkül megállapíthatjuk – „oldalirányban arányosan összenyomott kör”, azaz ellipszis. Ebből viszont következik, hogy a guruló kerék alakja *sem lehet más*, mint ellipszis. Ha ugyanis  $S$  mérése szerint az üreg és a belülről hozzásimuló kerék alakja *ugyanolyan* (kör), akkor  $S'$  szerint is *ugyanolyannak* kell lennie az üreg és a kerék alakjának, különben olyan dologban nem értene egyet a két megfigyelő, amelyben muszáj egyetérteniük. Ha például  $S'$  az alul szélesebb, felül keskenyebb kerékalakot mérné, akkor az ő mérése szerint a kerék alul nekidörzsölné az ellipszis alakúvá rövidült üregnek, felül pedig elválna tőle, és ennek olyan mérhető következményekkel kellene járnia (például az üreg alja elkopna), amely ellentmondana az  $S$  által tapasztalt valóságnak. Ez az érvelés tehát meggyőző minket az ellipsziszalokról, de még mindig nem érthető, hogyan egyeztethető össze az ellipsziszalak a kerék aljának és tetejének eltérő hosszkontrakciójával.

## Érvelés algebraival (nyers erővel)

Kövessük nyomon a kerék egy pontjának mozgását mind az  $S$ , mind az  $S'$  inerciarendszerből nézve. A szemléletesség kedvéért képzeljük el, hogy a kerék egy kijelölt helyére egy világító LED-et teszünk. A LED-ről az  $S$  rendszerben  $t = 0$ -kor készült pillanatfelvételt mutatja a 3.a ábra (a LED-et csillag jelöli). Ugyanerről a LED-ről az  $S'$ -ben is készül egy pillanatfelvétel a  $t' = 0$  időpillanatban, ezt mutatja a 3.b ábra (a LED-et itt kör jelöli). Megjegyzés: a  $t$  és  $t'$  időkoor-

dináták nem ugyanazok, egyiket  $S$ , a másikat  $S'$  méri. A Lorentz-transzformáció – lásd alább – adja meg közöttük a matematikai kapcsolatot. A 3. ábrán látható két pillanatkép a LED életében nem ugyanazt az eseményt örökíti meg – ezt érzékeltettem úgy, hogy a LED kinézete más a két ábrán –, mert a LED világvonalán a  $t = 0$  koordinátájú esemény és a  $t' = 0$  koordinátájú esemény nem ugyanott van.

Figyeljük e világító LED mozgását a téridőben. Az  $S$  inerciarendszer  $(x, y)$  koordinátarendszerében a tisztán forgó mozgást végző LED koordinátáit az alábbi összefüggések írják le:

$$x = r \cos(\varphi_0 + \omega t), \quad (1)$$

valamint

$$y = r \sin(\varphi_0 + \omega t), \quad (2)$$

ahol  $r$  és  $\varphi_0$  a LED forgómozgásának sugarát és kezdeti ( $S$ -ből mérve kezdeti!) szöghelyzetét kijelölő polárkoordináták,  $\omega$  pedig a forgás szögsebessége, amely  $\omega = v/R$  alakba írható, ahol  $R$  a kerék sugara. Milyen összefüggések írják le a LED mozgását  $S'$  mérése szerint, azaz milyen képletek adják meg a LED pozícióját az  $(x', y')$  koordinátarendszerben egy-egy adott  $t'$  időpillanatban? A választ úgy kapjuk, ha felírjuk a vesszős és vesszőtlen koordináták között kapcsolatot teremtő (inverz) Lorentz-transzformációs összefüggéseket:

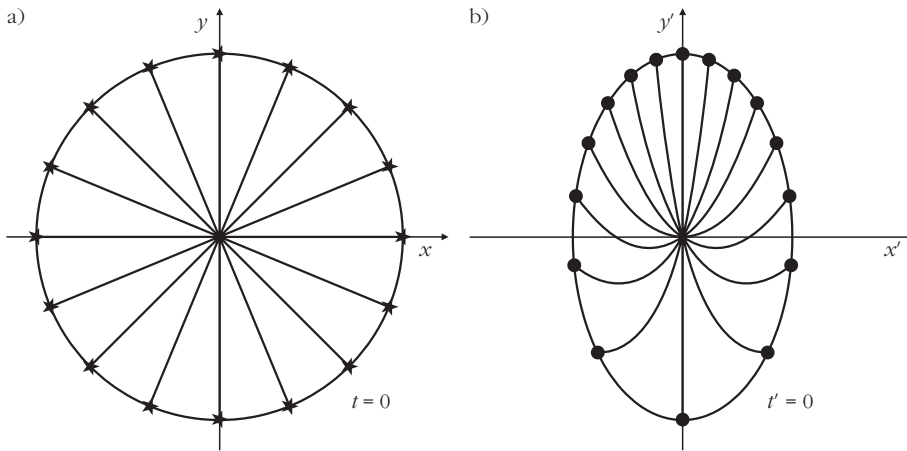
$$\begin{aligned} x &= \gamma(x' + vt'), \\ y &= y' \text{ és} \\ t &= \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right), \end{aligned} \quad (3)$$

ahol

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Az (1) és (2) egyenletekben  $x$ ,  $y$  és  $t$  helyébe a (3) összefüggések jobb oldalait helyettesítve az alábbi két egyenlethez jutunk:





4. ábra. A kerék és a küllők alakja (a)  $S$  mérése szerint és (b)  $S'$  mérése szerint.

$$\gamma(x' + vt') = r \cos \left[ \varphi_0 + \omega \left( \gamma \left( t' + \frac{v}{c^2} x' \right) \right) \right] \quad (4)$$

és

$$y' = r \sin \left[ \varphi_0 + \omega \left( \gamma \left( t' + \frac{v}{c^2} x' \right) \right) \right]. \quad (5)$$

A (4) és (5) egyenletek implicit módon megadják a LED világvonalának alakját  $(x', y', t')$  koordinátákkal kifejezve.  $t' = 0$ -t behelyettesítve a két egyenlet az alábbi alakra egyszerűsödik:

$$x' = \frac{r}{\gamma} \cos \left( \varphi_0 + \omega \gamma \frac{v}{c^2} x' \right), \quad (6)$$

valamint

$$y' = r \sin \left( \varphi_0 + \omega \gamma \frac{v}{c^2} x' \right). \quad (7)$$

Ezek után a  $t' = 0$  pillanatban a LED pozícióját megszerkeszthetjük az  $(x', y')$  síkon: először a (6)-os egyenletet numerikusan megoldva megkapjuk  $x'$ -t, majd az így kapott  $x'$ -t (7)-be helyettesítve megkapjuk  $y'$ -t. A 3.b ábra ezt a számolást követve ábrázolja a LED pozícióját  $t' = 0$ -ban,  $S'$  mérése szerint. (Az olvasó a (6) és (7) egyenletek négyzetre emelésével könnyen beláthatja, hogy a LED az  $S'$  mérése szerint valóban egy olyan *ellipszisen* helyezkedik el, amelynek nagytengelye  $y$  irányú és  $2r$  nagyságú, kistengelye pedig  $x$  irányú és éppen a hosszkontrakciós tényezőször kisebb.)

A teljes autókerék átfogó kinézetéről úgy kaphatunk pontosabb képet, ha képzeletben nem csak egyetlen LED, hanem a kerék sok pontjának történetét követjük a téridőben. A 4.a ábra a 3.a ábra általánosításaként a teljes autókeréket ábrázolja  $S$  nézőpontjából, a  $t = 0$  időpillanatban. Hogy a kerék alakjának módosulását követni tudjuk, a kerület mentén, egyenlő közönként 16 pontot vettem fel (ezeket csillagok ábrázolják), és az ábrára a kerék 16 küllőjét is berajzoltam. (Az autókerékre küllőket nehezen elkép-

zelhetőnek tartó olvasó figyelmét felhívom az egész gondolatkísérlet más, gyakorlati szempontból képtelen részleteire.) A kerület, valamint a küllők pontjainak mozgását az  $S'$  inerciarendszerben is követhetjük a (4) és (5) egyenletek alapján. A (6) és (7) egyenletek segítségével pedig megszerkeszthetjük, hogy *adott időpillanatban*, például  $t' = 0$ -ban az  $S'$  megfigyelő milyennek észleli ezen pontok elhelyezkedését az  $(x', y')$  síkon. A számolás eredménye a 4.b ábrán látha-

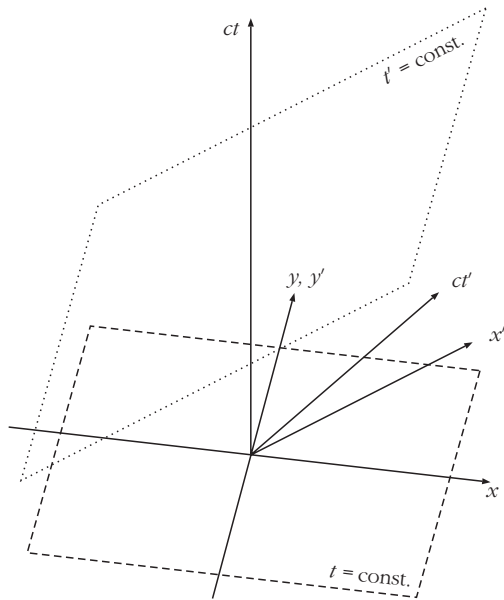
tó. Fontos látni, hogy mind a 4.a ábra, mind a 4.b ábra valóban a kerék és a küllők alakját mutatja, hiszen egy tárgy pontjainak adott időpillanatban mért helyzete definíció szerint a tárgy alakja. A 4.a és 4.b ábrákon az „adott időpillanat” kifejezés jelentése azonban eltérő: azok a pozíciómérések, amelyek eredménye a 4.a ábrán látszik,  $S$  mérése szerint történtek azonos időpontban (még precízebben: ezen pozíciómérési események  $t$  koordinátája volt azonos), míg a 4.b ábrán megjelenített pozíciómérési eredmények  $S'$  szerint származnak egyidejű pozíciómérési eseményekből (ezek  $t'$  koordinátája azonos). A 4.b ábra alapján most már össze tudjuk egyeztetni a kerék ellipszissé kontrahálódott alakját az egyes kerületi darabok eltérő hosszkontrakciójával.

## Érvelés 3D téridődiagrammal

A téridődiagramok olyan vizuális segédeszközök, amelyek természetüknél fogva egyetlen ábrán egész történeteket mesélnek el. Szemléletesek, meglepően sok információt tartalmaznak nagyon kompakt formában, gyakorlatilag algebra használata nélkül is kvantitatív eredményeket képesek adni, és erősítik a fizikai intuíciót. Pedagógiai értékük felbecsülhetetlen, akkor is, ha az ember maga akarja a jelenségeket mélyebben megérteni, és akkor is, ha másoknak akarja érthetően elmagyarázni.

Az autókerék-probléma háromdimenziós (3D) jellegű: a kerék számunkra érdekes pontjai síkban (két-dimenziós térben) helyezkednek el, ezt egészíti ki az idő, mint harmadik dimenzió. Szemléltetéséhez tehát a jól ismert  $(x, ct)$  kétdimenziós téridődiagramok, az úgynevezett Minkowski-diagramok [4] természetes 3D általánosítására van szükség (5. ábra).

Elkészítése úgy zajlik, hogy először az  $x$ ,  $y$  és  $t$  tengelyeket – a kényelem kedvéért páronként merőleges irányban – rajzoljuk fel. Természetes, hogy az  $x$  és  $y$  tengelyeket ugyanabban a hosszegységben kalibráljuk (felesleges bonyolítás lenne például az egyiket méterben, a másikat hüvelykben). A *téridő* egységes jellegét, a tér- és időbeli koordináták egyenrangúságát



5. ábra. 3D téridődiagram, amely  $S$  és  $S'$  nézőpontját egyaránt ábrázolja.

úgy hangsúlyozzuk ki hogy, az ábrán a  $t$  tengelyt sem másodpercben kalibráljuk, hanem ugyanabban a hosszegységben, mint az  $x$  és  $y$  tengelyeket, például méterben. Ezt az 5. ábrán úgy érzékeltetem, hogy a tengelyre „ $ct$ ”-t írtam, ahol  $c$  – a mindenki által ugyanakkorának mért vákuumbeli fénysebesség, mint egyetemes állandó – most a méter és a másodperc közötti átváltási tényező szerepét tölti be. Az ábra vesszős tengelyeit ezután a

$$\begin{aligned} x' &= \gamma \left( x - \frac{v}{c} ct \right), \\ y' &= y \text{ és} \\ ct' &= \gamma \left( ct - \frac{v}{c} x \right) \end{aligned} \quad (8)$$

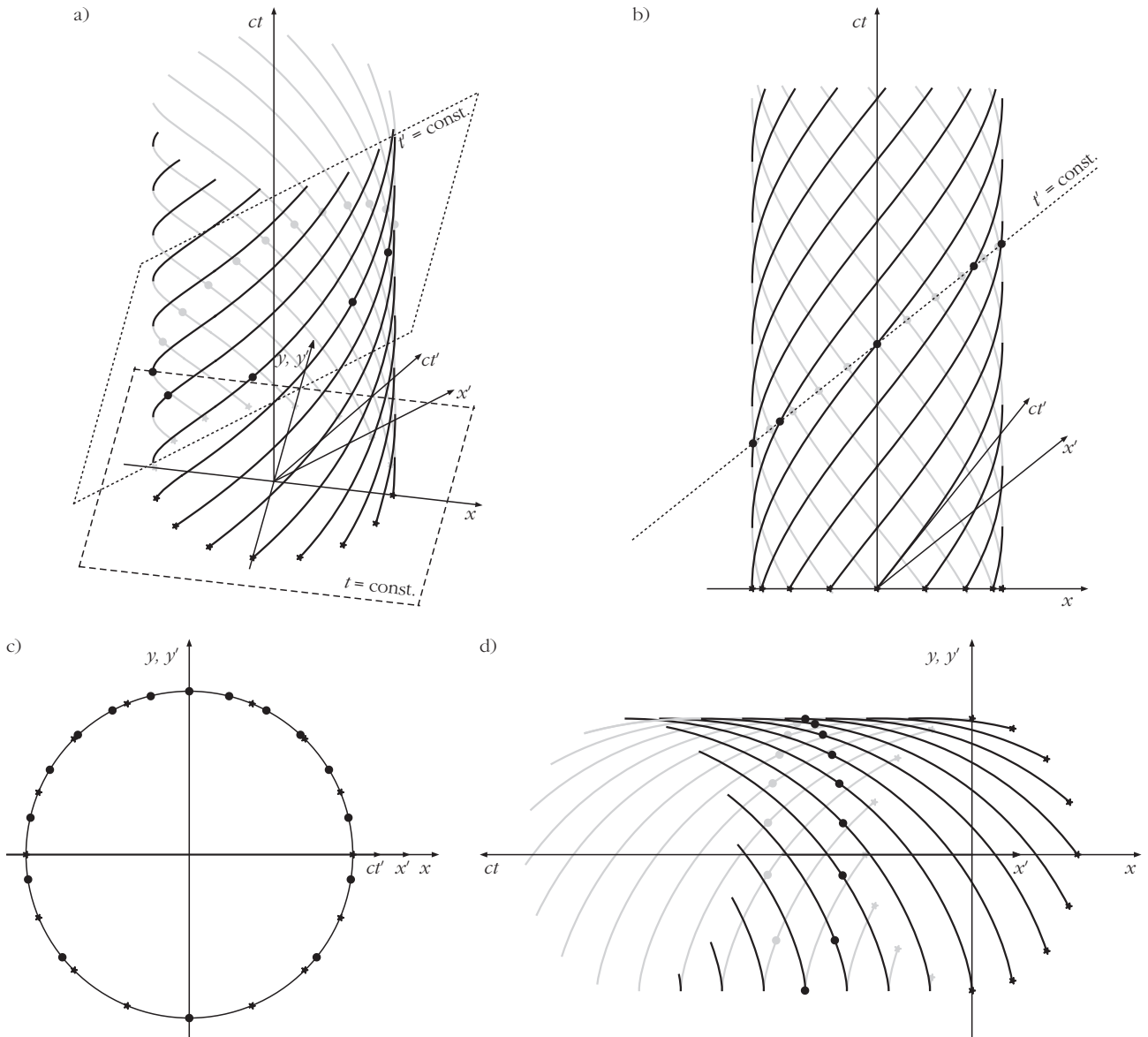
Lorentz-transzformációs egyenletek alapján egyszerűen kijelölhetjük. A  $ct'$  tengelyt definíció szerint olyan események sora alkotja, amelyek  $x'$  és  $y'$  koordinátája 0, az  $x'$  tengely mentén olyan események vannak, amelyek  $y'$  és  $ct'$  koordinátája 0 stb. Ezekből a feltételekből, a (8) egyenletek alapján könnyen felírhatjuk a három vesszős tengely egyenletét az  $(x, y, ct)$  koordináta-rendszerben, és berajzolhatjuk őket az ábrába. Az eredmény: a  $ct'$  tengely és az  $x'$  tengely egyaránt az  $(x, ct)$  síkban van (ez a 4 tengely együtt rajzolja ki a jól ismert kétdimenziós Minkowski-diagramot), az  $y'$  tengely pedig egybeesik az  $y$  tengellyel. A  $ct'$  tengely ábra szerinti iránya fizikai érveléssel is azonnal belátható: a  $ct$  tengely nem más, mint az  $S$  rendszer origójában nyugvó tömegpont (például az autó kereke középpontja) világvonala, így – szimmetria miatt – a  $ct'$  tengely sem lehet más, mint az  $S'$  origójában nyugvó tömegpont (például az út mellett álldogáló nyúl orra) világvonala. Márpedig ez az út mellett álldogáló orr  $+v$  sebességgel halad az autókerek középpontjához képest, tehát a

$ct'$  tengely  $+v$ -nek megfelelő szögben dől a  $ct$  tengelyhez képest az  $x$  tengely felé. Az  $(x, y)$  síkkal párhuzamos síkok, azaz az olyan események által alkotott felületek, amelyek  $t$  koordinátája azonos, az  $S$  megfigyelő egyidejűségi síkjai. Hasonlóképpen azok az események, amelyeket az  $S'$  megfigyelő adott  $t'$  időpontban egyidejűleg mér, az  $(x', y')$  síkkal párhuzamos sík mentén helyezkednek el. Az 5. ábrán egy-egy ilyen egyidejűségi sík is látható. Az  $x, y, ct$  tengelyekre az egymást méterenként követő kalibrációs osztásokat is rárajzolhatnánk. Ha ez megvan, a vesszős tengelyekre sem okozna különösebb nehézséget az egymást méterenként követő kalibrációs osztások berajzolása. (Például a  $ct'$  tengely 1 méteres osztásának pontját úgy kapjuk meg, hogy a (8) egyenletrendszer megoldjuk  $(x, y, ct)$ -re,  $(x', y', ct') = (0, 0, 1)$  feltétel mellett. Az eredmény az

$$(x, y, ct) = \left( \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, 0, \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

koordinátájú pont.) E cikkben a 3D téridődiagramok tengelyeire nem rajzoltam hosszegységként kalibrációs osztásokat, mert a guruló autókerek szemléltetéséhez erre nincs szükség.

Miután bekoordináztuk az ábrát, már csak „bele kell rajzolni a történetet”, azaz az autókereket alkotó pontok világvonala. A kerék az  $S$  rendszerben forgómozgást végez, kerületi pontjai éppen azzal a  $v$  sebességgel keringenek a tengely körül, amellyel az  $S'$  mozog az  $S$ -hez képest. A kerék kerületi pontjainak világvonalai tehát olyan spirális vonalak, amelyek a  $ct$  tengely (a kerék középpontjának világvonala) köré csavarodnak, és meredekségük  $c/v$ , azaz pont akkora szögben dőlnek az  $x$ - $y$  síkhoz képest, mint a  $ct'$  tengely. A 6.a ábrán látható a kerületi pontok mozgása a 3D téridődiagramon. A 6.b, c és d ábrákon erre a 3D téridődiagramra különböző irányokból „nézünk rá”. A 6.b ábrán „előlről” nézzük (az  $y$ - $y'$  tengely befelé mutat az ábra síkjába), a 6.c ábrán „felülről”, azaz a  $ct$  tengellyel szembenézve, a 6.d ábrán pedig „oldalról és felülről”, éppen a  $ct'$  tengellyel szembenézve. A 3D téridődiagram a feladatra vonatkozó összes lényegi információt tartalmazza. A kerék  $S$  által megfigyelt alakja – amit úgy kapunk, hogy a spirálisok által kirajzolt hengerfelületet az  $S$  egyidejűségi síkjaival elmetsszük – mindvégig kör marad, a kerületi pontok pedig egyenközűek. A  $t' = \text{const.}$  ferde síkkal való metszetre ránézve azonnal kirajzolódik – az (1)–(7) számolás nélkül – az  $S'$  által megfigyelt ellipsziszalak és a kerületi pontok összesűrűsödése-ritkulása a kerék tetején, illetve alján. Képzletben egymás feletti párhuzamos síkokkal elmetsszve a spirális hengert, az ábrát szemlélő fejben, moziszerűen le tudja játszani a teljes mozgást mind  $S$ , mind  $S'$  nézőpontjából. Megjegyzés: a 6.d ábrát körültekintően kell értelmezni. A  $t' = \text{const.}$  síkkal alkotott, kis körrel jelzett metszéspontokból itt csakugyan kirajzolódik a felül sűrűbb, alul rit-



6. ábra. A kerék kerületi pontjainak mozgása 3D téridődiagramon.

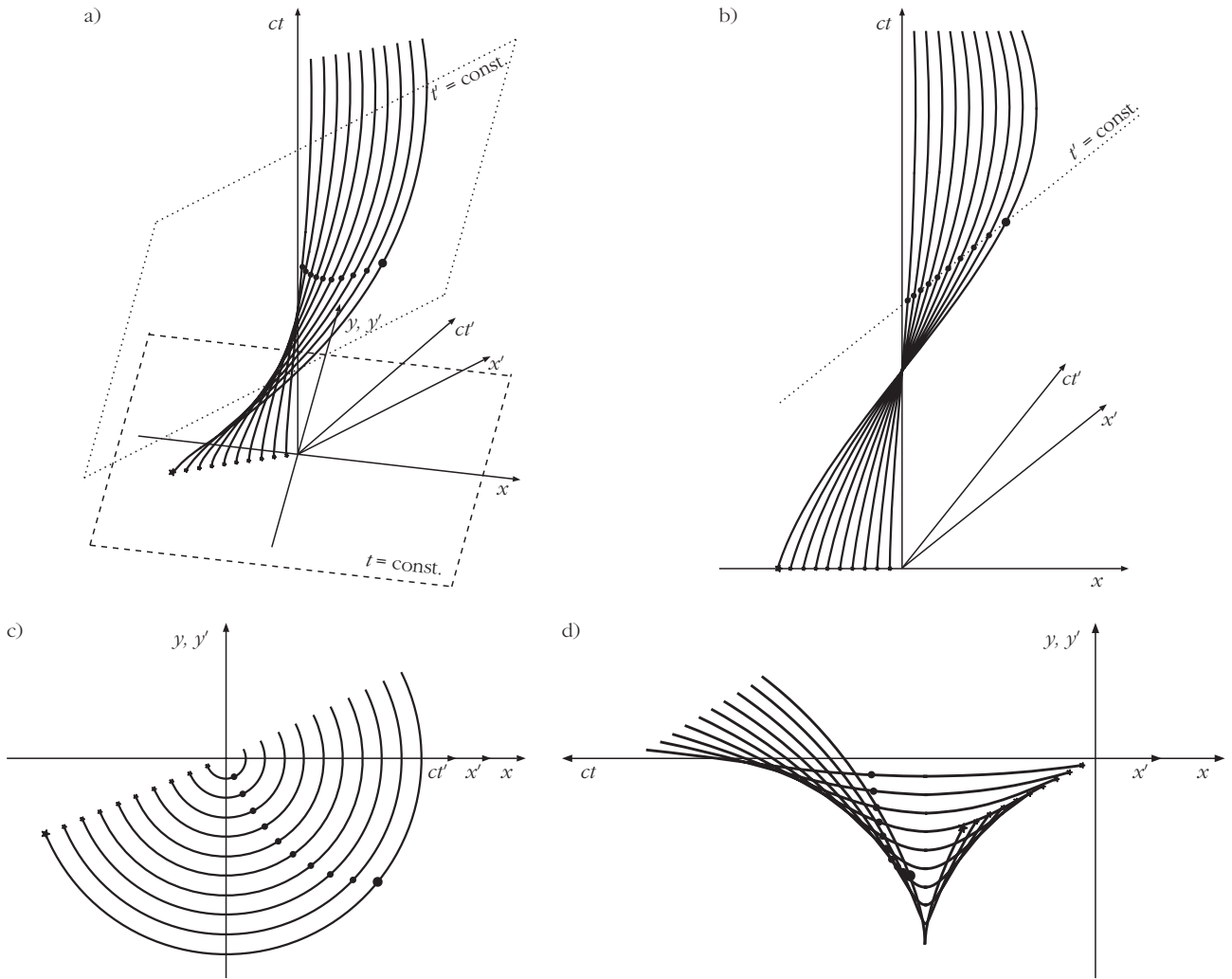
kább ellipszoid alakzat (és a sűrűsödés-ritkulás helyesen visszaadja a számolásból kapott 4.b ábrát), azonban a 6.d ábrán megjelenő ellipszis oldalirányban jobban össze van nyomva, mint az  $S'$  által ténylegesen mért (4.b ábrán látható) kerékalak. Ennek oka az, hogy a 6.d ábrán a kalibrációs osztások (ha berajzoltam volna őket) nem olyan közűeknek látszanak az  $x'$  tengelyen, mint az  $y'$  tengelyen. Hogy a helyes arányú ellipszoid alakot megkapjuk, oldalirányban addig kellene nyújtani a 6.d ábrát, amíg az  $x'$  és  $y'$  kalibrációs osztásai azonos közűeknek nem látszanak.

A 6. ábrán a kerületi pontok mozgását követtük. A 7. ábra egyetlen küllő pontjait követi a téridőben. (A 7.a–d ábrák nézetei pontosan megfelelnek a 6. ábra megfelelő nézeteinek.) A világvonalak ismét a  $ct$  tengely köré csavarodó spirális vonalak, de a kerék középpontja felé haladva egyre „függőlegesebbek” és egyenesebbek, mert egyre lassabban mozgó pontokat ábrázolnak a téridőben. A 3D téridődiagramon bo-

nyolult algebra (például a (6) egyenlet numerikus megoldása) nélkül azonnal, meglepő természetességgel rajzolódik ki, hogy az  $S$  által egyenesnek észlelt küllők alakját az  $S'$  megfigyelő miért méri görbének.

A 3D téridődiagramok akkor nyújtják a teljes információt, akkor erősítik leghatékonyabban a fizikai intuíciót, ha valóban „kézbe foghatjuk” és tetszőleges térbeli irányokból tudjuk szemlélni azokat. Egy folyóiratcikkben ez sajnos megoldhatatlan, ezért kellett kiválasztanom néhány nevezetes síkbeli nézetet a 6. és 7. ábrákhoz. Az ábrák 3D téridődiagramjait Matlab nyelven számoltam ki. Eredeti változatukban a képernyőn egérrel tetszőleges irányba forgathatók, tehát igazi pedagógiai értéküket a számítógép képernyőjén mutatják meg. Azonban akár valószínűleg kézbe vehető, a diákok között körbeadható makettet is készíthetünk belőle. Egy ilyen makett kezdetleges változatát – a kerék kerületi pontjainak világvonalát, a koordinátatengelyek nélkül – mutatják a 8. ábra fényképei. A kerék kerülete



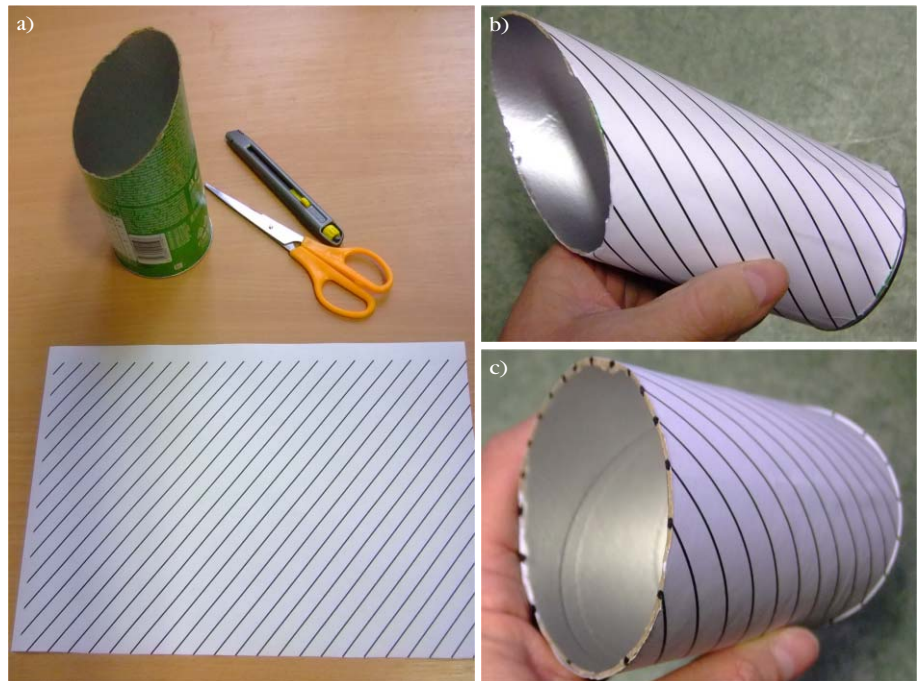


7. ábra. A kerék egy küllőjének mozgása 3D téridődiagramon.

által a téridőben kirajzolt hengerfelületet egy chips-es doboz felülete szolgáltatja. A doboz tetejét a 8.a fényképen látható módon ferdén, a vízszintes alsó laphoz képest  $\arctg(v/c) = 38,7^\circ$ -os szögben levágtam. A kerületi pontok világvonalát először egy papírlapra nyomtattam ki: a papírra párhuzamos egyenesek kerültek,  $\arctg(c/v) = 51,3^\circ$  dőlésszöggel (8.a fénykép), majd a papírt a hengerre ragasztottam (8.b fénykép). A henger vízszintes alsó lapja az  $S$  inerciarendszer egyik egyidejűségi síkját, ferdén levágtott teteje pedig az  $S'$  egyik egyidejűségi síkját jeleníti meg.

A 8.c fényképen a 6.d ábrához hasonló nézet látható. A fényképen jól nyomon követhető, hogy a kerék kerületén az  $S$  szerint egyenközű pontok

8. ábra. A 6. ábra 3D téridődiagramja, tengelyek nélkül, kézbe fogható változatban.



(lásd a doboz távolabbi végét) síkbeli elhelyezkedésének szimmetriája hogyan borul fel  $S'$  nézőpontjából, és hogyan lesznek sűrűsödések és ritkulások a kerék tetején és alján (lásd a doboz közelebbi végét).

## Záró gondolatok

A cikkben a guruló autókerék alakjának problémáját tárgyaltam ugyan, de a fő céloom az volt, hogy – egy konkrét példán keresztül – általában a *3D téridődiagramok* pedagógiai értékéről meggyőzzem az olvasót. Lenyűgöző tulajdonságuk, hogy térben és időben lezajló folyamatokat egyetlen statikus ábrán, részletekbe menően jelenítenek meg. Természetükből adódóan csak olyan jelenségek tárgyalásához nyújtanak segítséget, amelyek két térbeli dimenzióra szorítkoznak. A relativitáselméletben több fontos ilyen jelenség van. Első példaként a *Wigner-rotációt* (és a szorosan hozzá kapcsolódó *Thomas-precessziót*) említem. A Wigner-rotáció lényege, egyszerűsített megfogalmazásban: egy vízszintes irányú löket és egy függőleges irányú löket egymásutánja nem egyenértékű egy ferde irányú lökettel, viszont egyenértékű egy ferde irányú löket és egy *elfordulás* egymásutánjával. Ezt a meglepő, intuíciónknak ellentmondó jelenségét magától értetődő ter-

mészetességgel és szemléletességgel rajzolja ki egyetlen 3D téridődiagram. A Wigner-rotáció részletes tárgyalása és 3D téridődiagrammal való szemléltetése megtalálható az [5] internetes linken. Két további példa, amelyek meggondolását és a hozzájuk tartozó 3D téridődiagram felrajzolását az olvasóra bízom: a *fényszóróeffektus* (az elhaladó autó fényszórójának kúp-szerű fénycsóvája az út mellett álló megfigyelő mérése szerint az autó mozgási irányában szűkebb nyílású kúp-ra koncentrálódik) és az *aberráció* (két, egymáshoz képest mozgó távcső tengelye szöveget zár be, ha ugyanarra a távoli csillagra vannak irányítva). Mindhárom fenti példa (kvantitatív részleteket mellőző) szemléletes megjelenítéséhez elég egy-egy olyan 3D téridődiagram, amely – a 6–7. ábrákhoz hasonlóan – csak a koordinátatengelyek irányát mutatja, a kalibrációs osztásokat a tengelyeken nem.

## Irodalom

1. Ø. Grøn: Relativistic description of a rotating disk. *Am. J. Phys.* 43/10 (1975) 869–876.
2. Bokor N.: Relativisztikus fogócska I. *Fiz. Szemle* 62/9 (2012) 301–305.
3. V. N. Matvejev, O. V. Matvejev, Ø. Grøn: A relativistic trolley paradox. *Am. J. Phys.* 84/6 (2016) 419–425.
4. Lásd például: Bokor N.: Lucky Luke – az ember, aki gyorsabban lő, mint az árnyéka. *Fiz. Szemle* 64/11 (2014) 382–387.
5. [http://fizipedia.bme.hu/images/5/5b/Wigner\\_Thomas4.pdf](http://fizipedia.bme.hu/images/5/5b/Wigner_Thomas4.pdf)

# TÖRÉSMUTATÓ MEGHATÁROZÁSA SAJÁT MÉRŐESZKÖZ SEGÍTSÉGÉVEL

Csatári László, Molnár Tamás, Zámbo Szabolcs

Szent József Általános Iskola, Gimnázium, Szakgimnázium és Kollégium, Debrecen

A National Instruments myDAQ pályázatára beadott művűnkkel munkánkkal egy jól ismert fizikai mérés számítógépes feldolgozását mutattuk be. A Snellius–Descartes-törvény a fény törését írja le. Egyszerű szögmérések segítségével meghatározható a fénytörő közeg törésmutatója. A munkánk célja a klasszikus mérés számítógépes kiértékelésének megvalósítása volt. Ehhez saját „gyártású” mérőeszközt készítettünk.

A szerzők itt ismertették munkájukkal 2017. évi myDAQ pályázaton III. helyezést értek el.



*Csatári László* 1995-ben fizika – ábrázoló geometria, 1998-ban informatika szakos tanári diplomát szerzett a Kossuth Lajos Tudományegyetemen. A debreceni Szent József Gimnázium, Szakközépiskola és Kollégiumban tanít. A fizikatanári ankétok rendszeres résztvevője, ezeken több alkalommal tartott műhelyfoglalkozást. Legfontosabb kiténtetése: Színpadon a Természettudomány (2014 – fődíj), Öveges József-díj (2014, 2016), Ericsson-díj (2015).

## A Snellius–Descartes-törvény

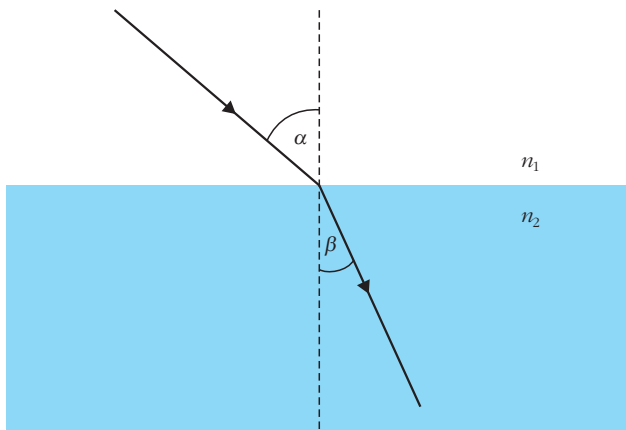
Új közegbe átlépő fény irányváltozást szenved. Ezt a

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n_{21}$$

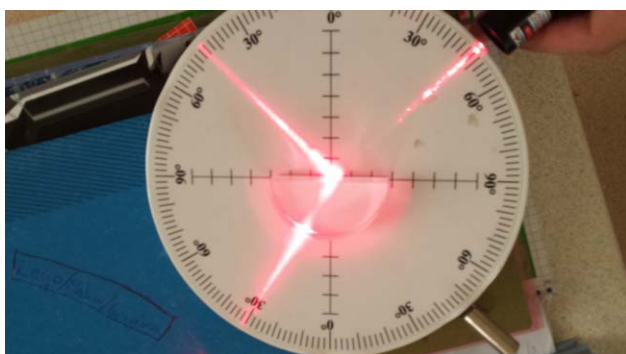
törvény fejezi ki, ahol  $\alpha$  a beesési,  $\beta$  a törési szög,  $c_1$  és  $c_2$  a közegbeli fénysebességek,  $n_{21}$  az adott közegre jellemző törésmutató (1. ábra).



*Molnár Tamás* a szakgimnázium informatika szakmacsoportjának 10. osztályos tanulója. Szívesen foglalkozik elektronikával, 3D nyomtatással.



1. ábra. A fény törése.



2. ábra. Mérés Hartl-koronggal.

Ha megmérjük a beesési és törési szöget, ki tudjuk számolni az anyag (levegőre) vonatkoztatott törésmutatóját. Mérés során egy szögbeosztással ellátott tárcsát, a Hartl-korongot használjuk (2. ábra). E korongra helyezük a félhenger alakú optikai testet, amelyet vékony fénysugárral (lézerrel) világítunk meg. Kihaszaljuk, hogy a sugárirányú fény a közeghatár váltásakor nem szenved irányváltást. A szöveget a skáláról olvashatjuk le.

## Számítógépes mérés

Mérési elrendezésünk hasonlít a fentebb leírtakhoz, de a szögek leolvasását, és ezekből a törésmutató meghatározását a számítógépre bízuk.

A mérésautomatizálás a következő problémákkal jár:

- hogyan határozhatók meg a szögek?
- hogyan detektáljuk a fénysugarakat?



Zámbo Szabolcs a szakgimnázium informatika szakmacsoportjának 10. osztályos tanulója. Az iskolai tananyagon kívül is szívesen foglalkozik elektronikával, informatikával. Rendszeresen részt vesz innovációs kiállításokon, megyei versenyeken.



3. ábra. Bipoláris léptetőmotort vezérlő.

Megoldás az első kérdésre a léptetőmotor használata, amelynél az elfordulás szöge arányos a lépésszámmal. A működtető program konvertálja a lépésszámot szöggé.

Két típusú léptetőmotort találhatunk: unipoláris és bipoláris motort.

Az unipoláris motor egy egyszerű kapcsolósorral is vezérelhető. A motor egy közös kivezetéssel (– pólus) és 4 tekercskivezetéssel rendelkezik, ez utóbbiakra + feszültséget adva vezérelhetjük. A motor „0001”, „0010”, „0100”, „1000” jelsorozattal az egyik, „1000”, „0100”, „0010”, „0001” jelsorozattal a másik irányba forog. A forgás sebességét a jelsorozat gyorsasága határozza meg.

A bipoláris motor vezérlése kicsit összetettebb, hiszen itt a tekercskivezetések (általában 4) felváltva kapnak + és – polaritást.

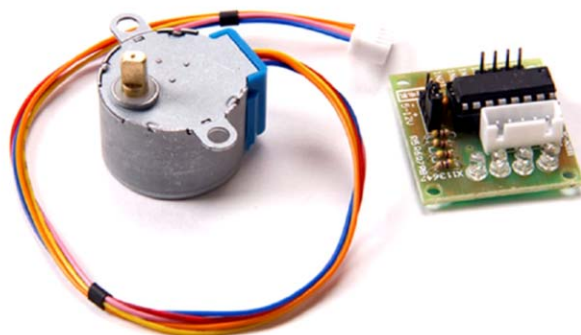
Szerencsére mindkét típushoz találunk vezérlőket. Bipoláris esetben csak egy léptető (STEP) és egy irányt meghatározó (DIR) digitális jelre van szükségünk. Mivel a léptetőmotorok általában nagy áramot igényelnek, a vezérlő hűtést is kap (3. ábra).

Eszközünkben ULN2003 alapú vezérlőt és 4 fázisú, 5 vezetékes unipoláris motort használunk (4. ábra).

A motorok fontos adata a lépésköz, azaz, hány lépéssel fordíthatók körbe. A motorunk (28BYJ-48) áttételes, ami azt jelenti, hogy egy teljes fordulathoz a motor 64 lépéses körbefordulása és az 1:64 áttételt figyelembe vételével 4096 lépés szükséges. Ebből könnyen kiszámíthatjuk, hogy egy lépés  $360^\circ/4096 = 0,087^\circ$ -ot jelent. Ezt később, a mérés során felhasználjuk.

A mérőeszköz elkészítéséhez a léptetőmotort a vezérlővel együtt fa talapzatra szereltük (5. ábra).

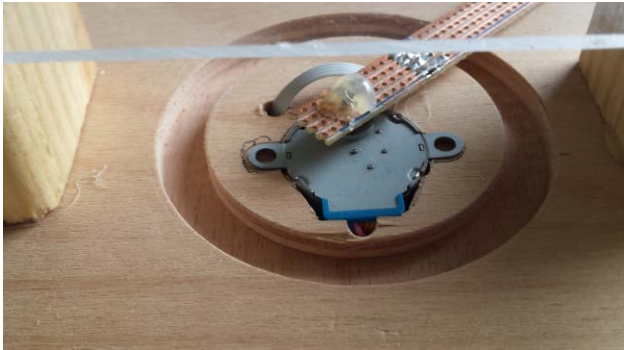
4. ábra. Unipoláris léptetőmotor és vezérlője.







5. ábra. A szerelt léptetőmotor és vezérlő.



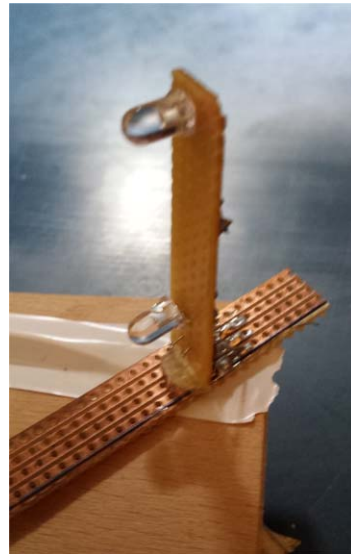
6. ábra. A detektort mozgató kar.

A fénysugár, amelyet mérésünkben lézer szolgáltat, detektálására fototranzisztort használunk.

A két szög (beesési és törési) meghatározásához két fototranzisztort egy próba NYÁK-lemez segítségével a léptetőmotor tengelyére erősítettük (6. ábra). Alátámasztását szigetelő szalaggal rögzített hurkapálcával oldottuk meg. Ezen kis súrlódással tud mozogni a kar és függőlegesen nem mozdul el, így biztosítva, hogy a lézerek mindig a detektorra világítsanak (7. ábra).

Mivel a beesési és törési szöget is meg kell határozni, ezért két lézert használunk. Az egyik fénye direktben jut az érzékelőbe (ez lesz a beesési szög) a másik a félhengeren megtörve (törési szög) A két lézert egy közös tartóra helyeztük el (8. ábra). A fadarabon fűrt lyukak pont olyan méretűek, hogy a bedugott lézermutatók kapcsolóit benyomott állásban tartásák. Itt finomíthatjuk a beállítást, hogy mindkét sugár elérje a fototranzisztort. A direkt sugárral nem lesz gond, a problémásabb a félhengeren szóródó fénysu-

8. ábra. A tartóba szerelt lézerciódák.



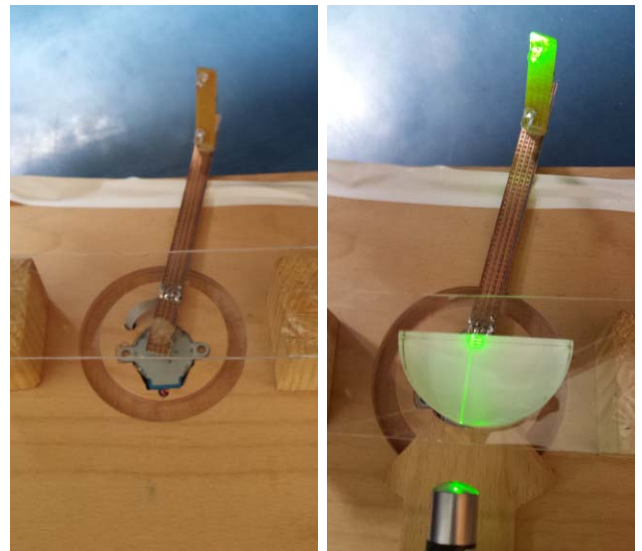
7. ábra. A fototranzisztor-detektorok.

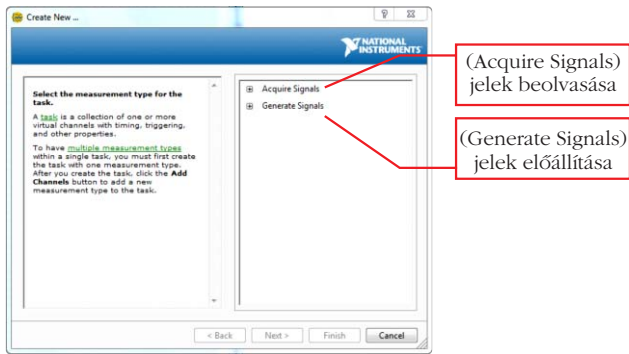
gár. Kísérleteink szerint ez is jól meghatározható fénysugár ad. A teljes mérőberendezés a következő 9. ábrán balra látható. A félhengeret kis emelvényre helyeztük. Az alatta elvilágító lézer a beesési, a félhengeren átvilágító a törési szöget adja. A félhenger elhelyezésénél gondosan ügyeljünk arra, hogy a alapkörének középpontja pontosan a léptetőmotor tengelye fölé essen (9. ábra, jobbra). (Klasszikus esetben is így állítjuk be a testet a Hartl-korongon.)

## Néhány gondolat a LabVIEW-ról és a myDAQ-ról

A program legfrissebb verziójának 45 napos ingyenes csomagja letölthető a National Instruments [www.ni.com/hu-hu/shop/labview/download.html](http://www.ni.com/hu-hu/shop/labview/download.html) honlapjáról. Az e-mail cím megadása és az alkalmazási terület kiválasztása után már le is tölthetjük a telepítőt. A myDAQ működtetéséhez saját szoftverét kell telepíteni (ezt

9. ábra. A kész mérőegység (balra) és a törésmutató-mérés (jobbra).





10. ábra. A DAQ Assistant.

megtaláljuk a dobozban). Ha készen vagyunk, a DAQ Assistant segítségével teremthetjük meg a program és az eszköz közti kapcsolatot.

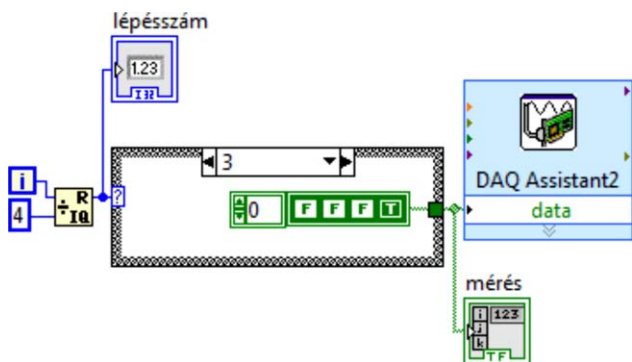
Csatlakoztassuk a myDAQ-ot a számítógéphez, majd a Block Diagramon állva válasszuk ki a Measurement I/O / NI-DAQmx / DAQ Assist-ot, majd tegyük le. Ekkor a program jelzi, hogy „Initializing”. Ezt követően a 10. ábrán látható ablakot kapjuk. Itt dönthetünk, hogy jeleket akarunk beolvasni, vagy kimeneti jeleket akarunk előállítani.

A következő funkciókat használtuk: a fototranzisztorok feszültségének mérésére az Analog Input bemeneteket (DAQ Assistant1), lásd a 11. ábrát!

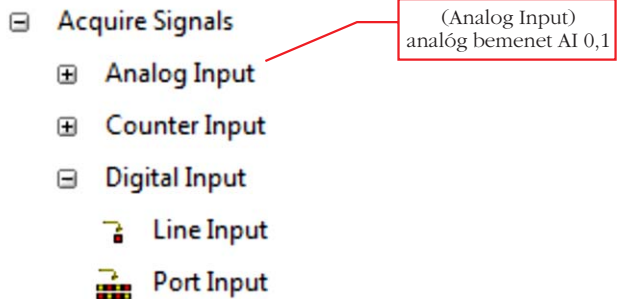
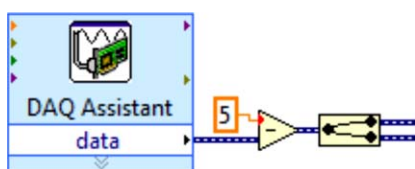
A léptetőmotor vezérlésre (12. ábra) a Digital Output kimeneteket (DAQ Assistant2).

A léptetőmotort meghajtó áramkör számára (IN1 – IN4 csatlakozók) a jelsorozatot a myDAQ D0 – D3 kimenetein kaptuk, a lépésszám nevű változó 0 – 4 értékekből egy Case-struktúra segítségével. Magát a változót a teljes program futási ciklusváltozójából (i) állítottuk elő maradékos 4-gyel osztással. A működtető jelsorozatot bináris konstansok segítségével generáltuk (13. ábra). Ezt a „mérés” nevű bináris tömb, mint visszajelző segítségével tettünk szemléletessé. (Itt a pontok vándorlása szemlélteti a léptetőmotor

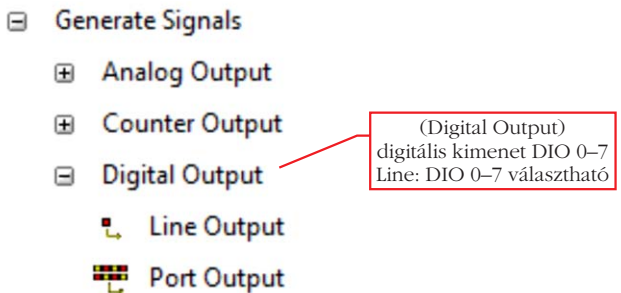
13. ábra. A léptetőmotor vezérlése.



14. ábra. A mért jelek beolvasása.



11. ábra. Analóg jel beolvasása.



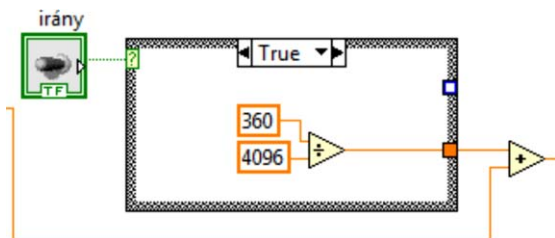
12. ábra. A digitális kimenetek kiválasztása.

„forgásirányát” mérés közben. Megjegyezzük, ilyen visszajelzés a léptetőmotor-meghajtó is ad LED-ek segítségével, de konstrukciónkban ezt az eszköz aljára szereltük.)

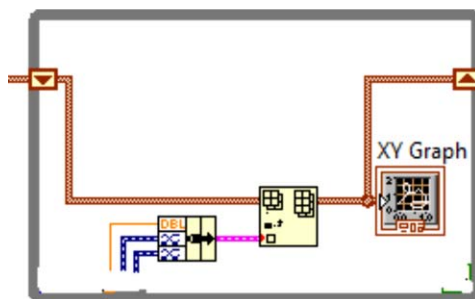
A mért feszültség feldolgozását szintén egy DAQ Assistant végzi (14. ábra). A két feszültséget az AI0 és AI1 bemeneteken mértük. Mivel a fototranzisztor növekvő fényerőre csökkenő ellenállással válaszol a jelet „invertáltuk” ami egyszerűen az 5 értékből való kivonást jelent, majd a bemeneteknek megfelelően a „Split Signals” segítségével szétosztottuk.

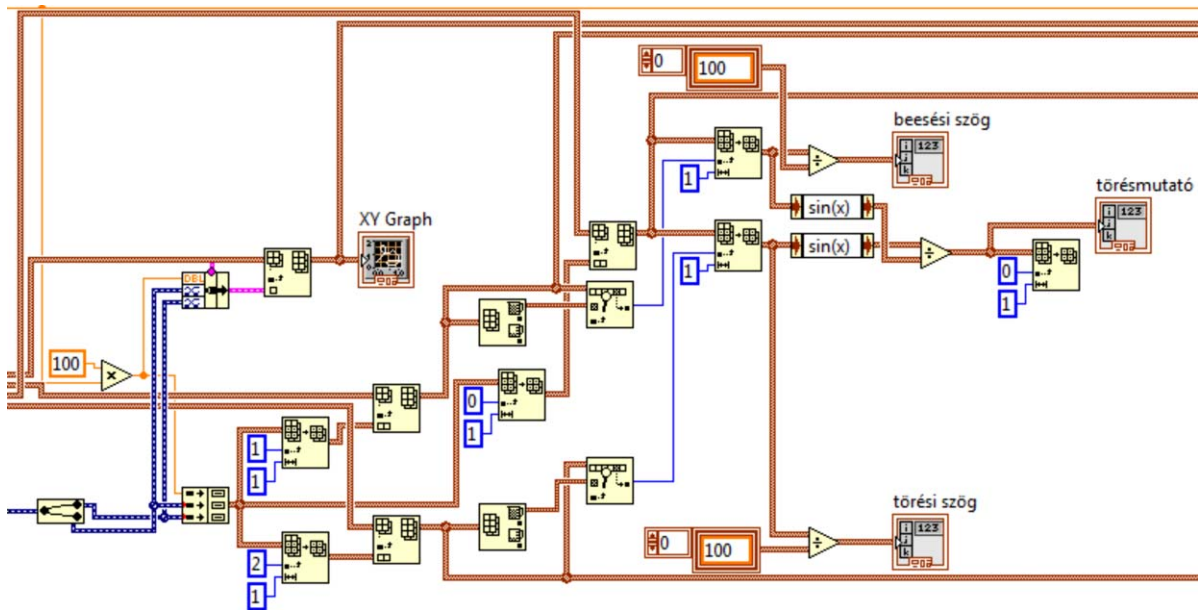
A méréshez szükségünk volt a léptetőmotor szögelfordulására. Ezt a körbefordulás lépésszámából és az áttételből ki lehet számolni. A pillanatnyi értékhez

15. ábra. Az egy lépéshez tartozó szög meghatározása.



16. ábra. A mérési grafikon rajzolása.





17. ábra. A kiértékelő program részlete.

folyamatosan hozzáadjuk (ellentétes forgásnál levonjuk) az egy lépéshez tartozó szöget (15. ábra).

A két jelből (vastagabb szaggatott vezeték) és a léptetőmotor szögfordulásából (vékony vezeték) egy tömböt fűztünk össze a megjelenítés számára (XY Graph). A LabVIEW működéséből adódóan a mérés közbeni megjelenítést shiftregiszterek segítségével oldottuk meg. (A programrészlet – 16. ábra – csak a Shiftregiszterek használatát szemlélteti, önmagában nem működőképes!)

Innen bonyolódik a program, hiszen a mért jeleket összefűztük, egy clustertömbben tároltuk, majd (a beeső és a megtört fénysugár intenzitását tartalmazó) résztömbökben maximumértékeket kerestünk. Ezen értékekből kerestük vissza a beesési és törési szögeket, és a jól ismert képlettel határoztuk meg a törésmutató értékét (17. ábra). (Azt tapasztaltuk, pontosabb értéket kapunk, ha a feldolgozás során a szög értéket 100-zal felszorozzuk, majd a kijelzés előtt visszaosztjuk. Ezért szerepelnek 100-as konstansok a programban.)

18. ábra. A mérés képernyőképe.



## A mérés menete

A meghatározandó törésmutatójú félhengert az emelvényre tesszük. Úgy állítjuk be a lézereket, hogy a félhenger egyenes oldalára merőlegesen álljanak, majd a „nulláz” feliratú gombbal lenullázzuk a fokszámlálót. Ezzel tulajdonképp a beesési merőleges helyzetét határoztuk meg. Elmozgatjuk a lézereket, majd kiválasztjuk a haladási irányt, és elindítjuk a mérést a „lépés” feliratú kapcsolóval. A léptetőmotor folyamatosan mozgatja a kart, rajta a detektorokkal. Mérés során mindkét detektor értékét rögzíti a program, majd meghatározza az egyes detektorok által szolgáltatott jel maximumhelyét, vagyis a szögeket. Innen a törésmutató a képlet alapján kiszámolható. A mérés képernyőképe a 18. ábrán látható. Jól megfigyelhető a beeső és a megtört sugarakhoz tartozó maximumérték, amely helyének (a tulajdonképpeni szögnek) meghatározását a LabVIEW egyszerűen elvégzi.

## Összegzés

A LabVIEW grafikus program, a myDAQ és a saját készítésű mérőeszköz segítségével egy egyszerű optikai mérést valósítottunk meg. A Snellius–Descartes-törvény segítségével történő törésmutató-meghatározást végeztük el.

Az eszköz megépítése kidobásra szánt anyagokból, fillérekből megoldható. A vezérlő elektronika és a léptetőmotor, valamint a fototranzisztorok sem jelentenek nagy kiadást. A mérés során felhasználtuk a klasszikus Hartl-korongos elrendezést, amit egy elektronikus mérőegységgel egészítettünk ki. A program kiértékelő része kicsit bonyolult, de ez szükséges a teljes automatizáláshoz. Szerencsére a LabVIEW sok beépített függvényt tartalmaz, ezekkel a mérés könnyen kiértékelhető.



## AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT 2018. ÉVI KÜLDÖTTGYŰLÉSE

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat május 12-én 10 órai kezdettel az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának tanácstermében tartotta meg 2018. évi küldöttgyűlését. *Sólyom Jenő* elnök úr távollétében *Pántyáné Kuzder Mária*, a Társulat alelnöke vezette le az ülést. Megállapította, hogy a küldöttgyűlés határozatképes, a 75 szavazati joggal rendelkező küldöttből 66-an jelentek meg.

Alelnök asszony bevezetőjében az elmúlt év eseményeiből az alábbiakat emelte ki:

A Társulat kezdeményezte az UNESCO Magyar Nemzeti Bizottságánál, hogy 2019-ben *Eötvös Loránd* halálának centenáriumi évéről az egész világ az UNESCO védnökségével emlékezzen meg. A programsorozat szervezése elindult. *Patkós András* professzor vezetésével megalakult az operatív bizottság, amelynek feladata lesz, hogy meghatározza, mely programok kerüljenek bele a minisztériumi támogatást igénylő felterjesztésbe.

A 2017. december 1-jén a Társulat által megrendezett *Fizika és fizikusok az iparban és a gazdaságban* kerekasztal-beszélgetésen többen jelezték, hogy szívesen létrehoznák az „Ipari Fizikai Szakcsoportot”. Ez a rendezvény volt az első nyitás az ipar felé. *Harmat Péter* és *Kazi Károly* segítségével a szervezés elindult, és mostanra több mint 10 fő jelentkezett az új szakcsoportba. Így az új szakcsoport az alapszabály szerint megalakulhat, a küldöttgyűlésnek szavaznia kell arról, hogy hozzájárul-e a megalakuláshoz.

A napirend elfogadása után a küldöttgyűlés résztvevői meghallgatták *Groma István* főtitkári beszámolóját. A beszámoló a Társulat 2017. évi közhasznúsági jelentésének ismertetésével kezdődött. A jelentés az új Civil törvény előírásainak figyelembe vételével készült.

Az ELFT *közhasznú tevékenysége* 4 alapcél köré szerveződik.

A *tudományos tevékenység és kutatás területén* a tudományos eredmények közzétételének, azok megvitásának színteret adó tudományos konferenciák, iskolák, előadóülések, valamint más tudományos rendezvények szervezése és lebonyolítása tartozik ide. Példaként a 191 fő részvételével megrendezett Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyamot, a Fizikus Doktoranduszok Országos Konferenciáját (27 fő) említette. A Társulat segíti a területi és szakcsoportok által szervezett előadások, bemutatók, kiállítások (például: *Egy Kis Esti Fizika*, *Kutatók Éjszakája*, *Szkeptikus Konferencia*, *Fizikus Napok*, *Statistikus Fizikai Nap*, *ECOSS-33 Konferencia*, *Elméleti Fizikai Szeminá-*

*rium*, *Magfizikus Klubdélutánok*) lebonyolítását, és – mint már szóba került – 2017. december 1-jén az MTA Fizikai Tudományok Osztályával *Fizika és fizikusok az iparban és a gazdaságban* címmel kerekasztal-beszélgetést szerveztek.

A második terület a *szakmai folyóiratok megjelenítése és a kulturális örökség megóvása*. A Társulat havonta megjelenő hivatalos folyóirata, az 1951 óta folyamatosan kiadott *Fizikai Szemle* 2017. évben a 67. évfolyamába lépett, annak júniusi száma a 750. volt. Egyre több tag választja az elektronikus kiadást (430 fő). Cél a modernizálás: az elektronikus változatban az ábrák színesek, esetenként beágyazott videót is tartalmaznak, a nyomtatott lapban a videók, színes képek – alkalmas eszközzel – akár QR-kód leolvasásával is megnyithatók. A *Fizikai Szemle* honlapját folyamatosan bővítik, szépítik.

A *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* társulajdonosaként az ELFT részt vesz a folyóirat megjelenítésében.

A kulturális örökség megóvása érdekében rendszeresen koszorúzzák a fizikus nagyjaink síremlékeit, továbbá emléktáblát állítottak *Marx György* születésének 90. évfordulója alkalmából.

A közhasznú tevékenység harmadik területe a *tehetség gondozás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés*. A Társulat általános és középiskolai tanulóknak, valamint egyetemi hallgatóknak a képességfejlesztés szolgálatában fizikaversenyeken kínál felmérési lehetőséget. A 2017-ben szervezett és lebonyolított – adott esetben több száz főt is megmozgató – versenyek száma változatlanul meghaladja a húszat. Ezek közül többet hosszabb idő óta évente rendszeresen megrendeznek. Így megszervezték az országos jellegű fizikaversenyeket, mint az Eötvös Loránd Fizikaverseny, Ortvy Rudolf Nemzetközi Fizikai Problémamegoldó Verseny, Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny és Országos Szilárd Leó Fizikaverseny. Ezekon kívül számos helyi fizikaverseny szervezésében is részt vettek.

A Társulaton keresztül történik a diákok, hallgatók nemzetközi versenyekre történő kijuttatása. Ismét megszervezték *A fizika mindenkié* eseménysorozatot, országsszerte 54 programmal. Alkalmoszerűen, önkéntes alapon működik a Társulat Tehetségpontja.

A *köznevelés, tanártovábbképzés* területén a tevékenység a Társulat oktatási szakcsoportjai, valamint területi csoportjai szervezésében folyt. Az oktatási szakcsoport 2017-ben is megrendezte az akkreditált továbbképzésként is elismert Országos Fizikatanári

Ankét és Eszközbemutatót, amit Gödöllőn, 155 tanár részvételével tartottak. A fizika és általában a természettudományok közoktatásban betöltött szerepével kiemelten foglalkoznak. 2017-ben Magyarországon, Debrecenben nagy sikerrel szervezték meg a *Science on Stage* nemzetközi fesztivált. MyDAQ pályázatot hirdettek tanároknak és tanítványaiknak, ahol az adminisztrációs feladatokat a Társulat látja el. Az Ericson-díjjal, valamint a Rátz Tanár Úr Életműdíjjal jutalmazott fizikatanárok kiválasztását a Társulat ezzel foglalkozó díjbizottsága végezte.

Groma István a Társulat *idei és jövő évi terveit* ismertette elmondta, hogy 2019 augusztusában esedékes a legközelebbi Fizikus Vándorgyűlés megtartása. A háromévenként tartott *Magyar Fizikus Vándorgyűlés* lehetőséget ad a Társulat fiatalabb tagjainak, hogy munkájukat bemutassák a széles hazai szakmai közösség előtt, továbbá az itt szervezett fórumokon közvetlenül találkozhatnak a fizikai kutatásban és a fizika alkalmazásában érintettek. Lehetséges helyszíneként Sopron és Veszprém merült fel.

A Társulat kezdeményezte az UNESCO Magyar Nemzeti Bizottságánál, hogy 2019-ben Eötvös Loránd halálának centenáriumi évéről az egész világ az UNESCO védnökségével emlékezzen meg. 2018. március 12-én az EMMI miniszteréhez intézett levéllel kezdeményezték az UNESCO-val közösen ünnepelt *Eötvös-évforduló* eseményeinek állami támogatását, a megemlékezés nemzeti üggyé emelését. Az Eötvös-évforduló nyitóeseményeként 2018. október 12-én a Trefort-kertben felavatják az *Eötvös-emléktáblát*. Az esemény Európai Fizikai Társaság (EPS) általi elfogadása folyamatban van. A tervezett Eötvös-év rendezvényei között szerepel egy nemzetközi fizikaoktatási konferencia, a *GIREP 2019* megrendezése is, a konferenciára 350-400 fő részvételét várják a világ minden tájáról.

A főtitkári beszámoló másik része a Társulat 2017. évi költségvetésének ismertetése volt. A mérleget és eredménykimutatást *Pusztainé Holczer Magdolna* készítette. A Társulat vagyona: 6 550 000 Ft, tárgyévi eredménye 259 900 Ft. A tagdíjat fizetők száma: 907-ről 871 főre csökkent. Ennek ellenére a tagdíjbevételek magánszemélyektől növekedett: 4 981 162 Ft. A személyi jövedelemadó 1%-ából a bevétel 758 531 Ft volt.

A Társulat 50 millió forint nagyságrendű összeggel gazdálkodik, amelyet lényegében teljes egészében kiad a rendezvények, versenyek, események megszervezésére, lebonyolítására. A *Fizikai Szemle* kiadására is jelentős összeget fordítanak. Az ELFT pénzügyi háttere, gazdálkodása stabilnak mondható, a bevétel és a kiadás egyensúlyban van.

A főtitkári beszámoló ismertetését követően *Theisz György*, a Felügyelő Bizottság elnöke ismertette a Bizottság jelentését. A jelentés szerint az ELFT elnökségének és titkárságának működése jogszerű. A titkárság munkatársai minden kérdésben készséggel álltak rendelkezésre. A rendezvények áttekintése – más sürgősebb feladatok miatt – csak részlegesen történt meg. A szakcsoportok és a területi csoportok működése körül komoly problémák kerültek felszínre. Sajnos, több területi csoport működésének jelei egyáltalán nem látszanak, de ez egyes szakcsoportokkal is előfordul. Ennek kapcsán az elnökség elkezdte a helyzet vizsgálatát, amelynek egyik lépéseként tekinthető az alapszabály felülvizsgálata. A szakosztályok működése kapcsán a legfontosabb hiányosság, hogy a szakosztályok munkáját irányító szakosztálytanácsoknak – az alapszabály értelmében – saját ügyrenddel kellene rendelkezniük; ennek hiányát igen rövid időn belül orvosolni kell.

Összefoglalóan megállapította, hogy mind a titkárság, mind az elnökség odaadón törekszik a törvényes, jogszerű működésre, mindkettő folyamatosan reagált az észrevételekre.

A beszámoló véleményezése a Felügyelő Bizottság 2018. április 27-én megtartott ülésén megtörtént, e szerint a Bizottság a beterjesztett dokumentumokat megvitatta, egyhangúlag elfogadta; azokat a küldöttgyűlésnek is elfogadásra ajánlja.

A Felügyelő Bizottság foglalkozott az elnökség alapszabály-módosításra tett javaslataival is. Ezek nagyobb része a jogszabályi környezet megváltozása miatt szükséges, vagy technikai jellegű. A Felügyelő Bizottság értékelése szerint a javaslatokkal az alapszabály bizonyosan javul, így azokat elfogadásra ajánlják.

A beszámoló elhangzását követő vita után az elnökség pénzügyi és szakmai beszámolóját, az Országos Bírósági Hivatalnak továbbítandó 2017. évi közhasznúsági jelentést, a Társulat 2018. évi költségtervét és a Felügyelő Bizottság jelentését egyenként, egyhangúlag elfogadta a Küldöttgyűlés.

Ezután az elnökség alapszabály-módosításra tett javaslatának ismertetése és megvitatása következett. Az elnökség javaslatát minden küldött előzetesen megkapta. A változások egy része technikai, jogszabályi változások miatti módosítás. Az előterjesztés javaslatot tett továbbá az ifjúsági tagság intézményének bevezetésére, az Ipari Szakcsoport megalakítása. A javaslat ismertetését követő vitában *Nagy Dénes Lajos* rámutatott a szakcsoport tagok és a területi csoport-tagok szavazati jogával kapcsolatos problémára, miszerint a Budapesti Szakcsoport hiányában a budapesti tagok eggyel kevesebb szavazattal rendelkeznek, mint a vidéki szakcsoportok tagjai. Groma István szerint alapos átgondolást igényel, hogy milyen módon kellene módosítani az erre vonatkozó részeket, hogy egyensúly legyen a tagok szavazati jogiban. Azt kérte, hogy az alapszabály ezen részeit most ne módosítsák, megvitatását jövőre halasszák. *Földes István* és *Tremmel Bálint* küldöttek technikai jellegű észrevételeket tettek. *Gyulai József* az Ifjúsági Szakcsoport megalakításához szólta hozzá. Végül a küldöttgyűlés az összes alapszabály-módosítási javaslatot egyhangúlag elfogadta. Ugyancsak egyhangúlag fogadta el a küldöttgyűlés az Ipari Fizikai Szakcsoport megalakítását.

Ezután a levezető elnök ismertette az elnökség javaslatait a küldöttgyűlés által odaítélhető társulati címekre és tiszteletbeli elnöki címre. Az elnökség azt

javasolta, hogy *Patkós András*t, a Társulat előző elnökét, tiszteletbeli elnöknek válasszák meg. Az elnökség továbbá *Kürti Jenő* részére Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érem, *Vannay László* részére Prométheusz-érem adományozását javasolta.

Ezt követően *Tél Tamás Mitől örvény egy örvény? Festékcspadázó kísérletek kevés elmélettel* címmel tartott érdekes szakmai előadást.

Az előadás utáni szünetben lezajlott a titkos szavazás a tiszteletbeli elnök választásáról és a küldöttgyűlés által odaítélhető társulati díjakról. A titkos szavazás mindhárom javaslatot egyhangúlag támogatta. A kitüntetések Pántyáné Kuzder Mária alelnök és Groma István főtktár adták át. A Társulat tudományos díjait *Kamarás Katalin*, a Díjbizottság elnöke ismertette. A díjakkal együtt adták át a Fizikai Szemle Nívódíjait is.

## A TÁRSULAT 2018. ÉVI KITÜNTETÉSEI ÉS TUDOMÁNYOS DÍJAI

### *Patkós András – az ELFT tiszteletbeli elnöke*

Patkós András professzor az ELTE Atomfizika Tanszékén dolgozik, 1989 óta egyetemi tanár, 2012 óta professor emeritus. Két időszakban 1998 és 2003, illetve 2007 és 2010 között vezette is a tanszékét, bár közben többször volt külföldön vendégkutatóként, vendégprofesszorként a Niels Bohr Intézetben, a Bonni Egyetemen, a Rutherford Laboratóriumban és a CERN-ben. Rövid ideig az államigazgatásban is dolgozott, 1996 és 1998 között a Művelődési és Közoktatási Minisztérium tudományos főosztályát vezette. Kutatási területe az elméleti részecskefizika, a kozmológia, a forró univerzum kialakulása, a kvantumtervek egyensúlytól távoli dinamikája és a statisztikus fizika. Tudományos munkásságával 1987-ben szerezte meg a fizikai tudomány doktora címet, akkor még fokozatot. A Magyar Tudományos Akadémia 2001-ben levelező, 2007-ben rendes tagjává választotta. A fizikus közélet egyik legaktívabb szereplője. Különösen sokat foglalkoztatja a fizika, illetve a természettudományok helye a közoktatásban. Az MTA Közoktatási Elnöki Bizottság állandó meghívottja. Két cikluson keresztül, 2005 és 2007, illetve 2015 és 2017 között az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöke volt.

### *Kürti Jenő – az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érme*

Kürti Jenő fizikusi pályáját az ELTE Atomfizika Tanszékén kezdte 1978-ban, ahol 20 éven keresztül dolgozott. 1998-ban az akkor megalakult Biológiai Fizika Tanszékre ment át, ott lett 2000-ben egyetemi tanár. 2006 és 2015 között a tanszék vezetője, 2008 és 2011 között pedig az ELTE Fizikai Intézet vezetője volt. Közben több külföldi egyetemen is dolgozott. Tudományos munkásságában a kísérletektől az elmélet felé fordult, de szoros kapcsolatban maradt a kísérleti kollégákkal. A szerves kvázi-egydimenziós vezetők és hasonló szerkezetű anyagok viselkedésének értelmezése állt és áll munkái középpontjában. Így jutott el különleges anyagcsaládok, a fullerének, a szén nanocsövek és a grafén vizsgálatához. Tudományos cikkeire 2000-et meghaladó számú független hivatkozást kapott. Egyetemi oktatói és kutatói munkáján túl aktív részese a fizikus közéletnek. Tagja az MTA Doktori Tanácsának, két cikluson át elnöke volt a Fizikai Tudományok Osztálya Atom- és Molekulafizikai Bizottságának. 2011 és 2015 között az ELFT főtktáraként is tevékenykedett. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érmét a Társulat érdekében végzett áldozatos munkája elismeréseként kapta.

### *Vannay László – ELFT Prométheusz-érem*

A Prométheusz-éremmel a Társulat Vannay László kiemelkedő középiskolásoknak szóló tehetséggondozási, egyetemi oktatói és tudományos közéleti tevékenységét kívánja elismerni. Vannay László az egyetemi diploma megszerzése után az Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetem Kísérleti Fizika Tanszékén,

Zárszó előtti felszólalásokban *Ujvári Sándor* tájékoztatta a küldöttgyűlést, hogy a Fizikatanári Anketét helyszínei még kérdésesek a jövő években. Kérte a megyei csoportok segítségét olyan helyszínek ajánlásában, ahol biztosítani tudnak közel 180 fő részére nagy előadótermet, szállást, étkezést. Az oktatási szakcsoportok várják a javaslatokat. *Sükösd Csaba* bejelentette, hogy 2018. október 5–7. között ismét megszervezik a *Science on Stage Fesztivált*, Szegeden a Szent-Györgyi Albert Agórában. Már az idei Anketén felhívták a résztvevő tanárok figyelmét a rendezvényre.

Pántyáné Kuzder Mária levezető elnök zárszavában megköszönte a küldöttek aktív részvételét és a bizottságok munkáját. Véleménye szerint hatékony, jó hangulatú küldöttgyűlés volt. Alelnök asszony megköszönte a jelenlevőknek a küldöttközgyűlésen való megjelenést, végül bezárta az ülést.

majd a BME Kísérleti Fizika tanszékén dolgozott. 1989-től nyugdíjba vonulásáig a BME Kísérleti Fizika Tanszék tanszékvezető-helyettese volt. A kristálynövesztés és kristályok technikai alkalmazása területén folytatott kutatásokat, amelyekből 35 tudományos közlemény és 7 szabadalom született. Számos TDK-dolgozat, diplomamunka, doktori dolgozat és K+F projekt témavezetője volt. Az oktatás területén alapvető szerepet vállalt az 1991-ben indult mérnök-fizikus képzésben a fizikaboratórium tárgyak megszervezésében és vezetésében. Vannay László 1994 óta minden évben szervezője és felelőse a fizika OKTV kísérleti fordulójának, aminek keretében mintegy 30 mérési feladatot és kísérleti eszközt állított össze. 2004-es nyugdíjazása óta is töretlen lelkesedéssel és odaadással végzi ezt a munkát. Ezen mérési feladatokra építve 2000-ben középiskolás diákok számára tehetőséggondozó mérési szakkört indított, amelyen minden évben mintegy 30 középiskolás végezhet el számos korábbi OKTV mérési feladatot. 2008/09 és 2009/10 évben kutató diákok programot szervezett. Az OKTV kísérleti feladatokat számos ízben a *Fizikai Szemle*ben publikálta. Projektvezetőként 14 pályázatot nyert el, amelyek komoly anyagi támogatást nyújtottak a BME Természettudományi Kar tehetséggondozó programjaihoz. 1993–96-ig, majd 1999–2004-ig az ELFT Kristályfizikai Szakcsoportjának elnöke volt.

### *Juhász András – Marx György Felsőoktatási Díj*

Juhász András, az ELTE Anyagfizikai Tanszék nyugalmazott egyetemi docense a díjat a fizika művelésében, oktatásában és támogatásában több évtizeden keresztül kifejtett magas színvonalú tevékenységének elismeréseként nyerte el. Különösen kiemelendő, hogy a fizikatanár-képzés színvonalának emelése érdekében évtizedeken keresztül állhatatosan, jelentős szellemi erőfeszítést befektetve dolgozott, új képzésformák kidolgozásában, így egyebek között a tanárok részére indított PhD-képzés létrehozásában oroszlánrészt vállalt és szellemi háttérrel biztosított. Munkája eredményeként a képzések népszerűsége és eredményessége egyaránt nőtt. 160 külföldi és magyar publikációja közül kiemelkedik a hiánypótló szerepet betöltő, a fizikaoktatást és a kísérletezést sikerrel népszerűsítő két könyve és a fizika középiskolai oktatásáról szóló jegyzetei.

### *Derzsi Aranka – Schmid Rezső-díj*

Derzsi Aranka, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézete tudományos munkatársa a molekuláris gázokban létrehozott rádiófrekvenciás gerjesztésű alacsony hőmérsékletű plazmák kutatásában ért el nemzetközileg is elismert eredményeket. Eredményeinek nagyobb része részecskealapú kinetikus plazma-szimulációkból született, amelyek felépítésében meghatározó szerepet játszott. Emellett aktívan részt vett



A megjelent kitüntettek (balról jobbra): Kürti Jenő (Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érme), Tapasztó Levente (Gyulai Zoltán-díj), Vannay László (ELFT Prométheusz-érem), Derzsi Aranka (Schmid Rezső-díj), Kiss Csaba (Detre László-díj), Kóspál Ágnes (Detre László-díj), Nyitrai Gábor (Fizikai Szemle Nívódíj), Opitz Andrea (Jánossy Lajos-díj), Juhász András (Marx György Felsőoktatási Díj), Gróf Andrea (Fizikai Szemle Nívódíj).

a kapcsolódó, nemzetközi együttműködésben folyó kísérleti kutatásokban is, amelyek alapot adnak az atomfizikai plazma-modellek hitelesítésére és megbízhatóvá teszik az azok alapján számolt jellemzőket.

#### *Kiss Csaba – Detre László-díj*

Kiss Csaba, az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete tudományos főmunkatársa 13 éven át volt a Herschel infravörös űrtávcső magyarországi kalibrációs csoportja vezetője, és meghatározó mértékben hozzájárult a külső Naprendszer, a Neptunuszon túli Kuiper-öv égitestjeinek infravörös megfigyeléséhez, méretük és albedójuk meghatározásához. Elsőként figyelte meg az Eris törpebolygó Dysnomia nevű holdjának termikus emisszióját, és részt vett a Haumea törpebolygó körüli gyűrű felfedezésében (*Nature*, 2017). Felfedezte a 2007 OR10 törpebolygó holdját, amelynek eredményeképpen minden 1000 km-nél nagyobb Kuiper-öv égitestnek van már ismert kísérője. A nevéhez köthető a Kuiper-öv, illetve a Naprendszer kis égitestjeiből származó termikus emisszió kutatásának meghonosítása a magyar csillagászatban. Eredményei elismeréseként az IAU róla nevezte el a 24532. számú kisbolygót.

#### *Kóspál Ágnes – Detre László-díj*

Kóspál Ágnes, az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete tudományos főmunkatársa a világ legnagyobb teljesítményű optikai, infravörös és rádiótávcsöveivel ért el meghatározó új eredményeket a születő csillagok kitorréseivel, azoknak a csillag- és bolygókeletkezésben betöltött szerepével kapcsolatban. Számos, kitorrés mutató fiatal csillag környezetét feltérképezte, és megállapította, hogy a kitorrések fontos szerepet játszanak a csillagközi burkok szétesésében. Az utóbbi nyolc évben felfedezett kitorrések többségére meghatározta a központi objektum nyugalmi, kitorrés előtti tulajdonságait, új területet nyitva ezzel a kitorrés fizikai eredetének kutatásában. A V346 Normae eruptív csillag esetében felfedezte, hogy az anyagbehullási ráta a burokról a korongra nagyobb, mint a korongról a csillagra, amely az első közvetlen mérési bizonyíték arra, hogy a kitorréshez vezetők a korongban felgyülemlő anyag.

#### *Opitz Andrea – Jánossy Lajos-díj*

Opitz Andrea úrfizikus, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézete tudományos főmunkatársa szakterülete a napszélstruktúrák időbeli fejlődésének és térbeli változásainak űrszondás megfigyelése és vizsgálata. Több nemzetközi űrkutatási kísérletben vett részt, eredményei a napszél változékonyságáról fontos alapját képezik az űridőjárás-előrejelző modelleknek. Elsősorban a Vénusz és a Mars űridőjárásának, ezen bolygók magnetoszférájának és a változó napszél kölcsönhatásának vizsgálatában ért el fontos eredményeket. Hozzájárult űstökösök magnetoszférájának, folytonos gázkisugárzásának és a napszél kölcsönhatásának jobb megismeréséhez.

#### *Tapasztó Levente – Gyulai Zoltán-díj*

Tapasztó Levente, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézete osztályvezetője jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó eredményeket ért el a grafén és más kétdimenziós anyagok kutatásában. Megmutatta, hogy pásztázó alagútmikroszkóp segítségével atomi pontossággal lehet a grafént megmunkálni. A kétdimenziós anyagok nanomegmunkálására kifejlesztett módszerekkel új mechanikai és mágneses tulajdonságokkal rendelkező nanoanyagokat hozott létre. Rangos, nagy idézettséget felmutató publikációs tevékenysége mellett pályázati eredményessége és intézetén belüli vezető, tudományos szervező tevékenysége is kiemelkedő.

A Fizikai Szemle Nívódíjban részesültek a 2017-ben megjelent cikkek alapján: *Oláh László, Balogh Szabolcs József, Hamar Gergő, Varga Dezső, Gera Ádám László, Nyitrai Gábor, Pázmándi Zsolt Péter* és *Surányi Gergely Képpalkotás kozmikus részecskék nyomkövetésével* című cikkükért; a *Fizika Tanítása* rovatban megjelent írárok szerzői közül *Gróf Andrea Honnan fúj a szél, avagy okosabb-e egy ötödikes, mint Sylvester Stallone?* című írásáért.

Gratulálunk a díjazottaknak.



# myDAQ-pályázat a 2018–2019. tanévre

Az ELFT és az NI Hungary Kft. az idén is meghirdeti pályázatát fizikatanároknak.

A pályázat célja, hogy tanórákon, szakkörökön minél több iskolai kísérlet legyen elvégezhető a myDAQ eszköz használatával is.

A pályázati kiírás, a pályázat témája, a pályázati határidők és a jelentkezés feltételei megtalálhatók a <http://sukjaro.eu/ELFT-NI-palyazat> weblapon.

## A pályázati regisztráció határideje:

2018. szeptember 16., 24:00 óra.

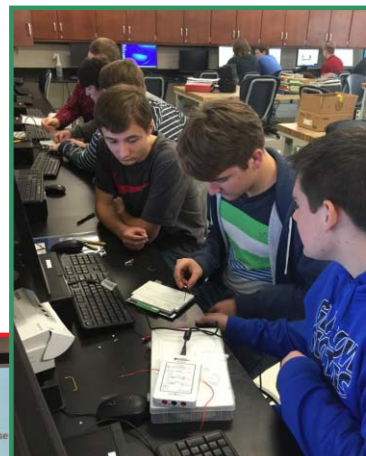
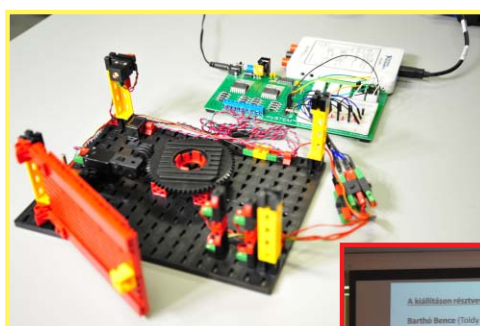
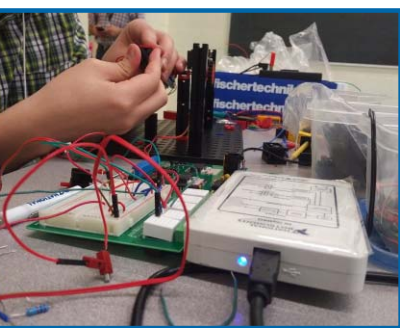
## Az elkészült pályamunkák leadási határideje:

2019. január 25., 24:00 óra.

Az idei pályázatban a korábbi évekhez képest változás, hogy a 10 tárgyjutalmat a következőképpen osztják meg a szervezők:

- 5 tárgyjutalmat az öt legjobb **először induló** pályázó kapja,
- a fennmaradó 5 tárgyjutalmat pedig a már **tapasztaltabb**, legalább második éve induló pályázók.

A szervezők fenntartják a jogot, hogy egy 11. helyezettet is díjazzanak, aki a legjobb, **általános iskolásokkal** induló pályázó lesz (amennyiben lesz ilyen induló).



[www.ni.com](http://www.ni.com)

