

# fizikai szemle

2009/4



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat  
havonta megjelenő folyóirata.  
Támogatók: A Magyar Tudományos  
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,  
az Oktatási és Kulturális Minisztérium,  
a Magyar Biofizikai Társaság,  
a Magyar Nukleáris Társaság  
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztő bizottság:

Bencze Gyula, Czitrovsky Aladár,  
Faigel Gyula, Gyulai József,  
Horváth Gábor, Horváth Dezső,  
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Lendvai János,  
Németh Judit, Ormos Pál, Papp Katalin,  
Simon Péter, Sükösd Csaba,  
Szabados László, Szabó Gábor,  
Trócsányi Zoltán, Turiné Frank Zsuzsa,  
Ujvári Sándor

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A jól felszerelt űrhajó a Star Trek  
abbahagyhatatlan történetéből

## TARTALOM

|  |     |
|--|-----|
| <i>Szabó Róbert:</i> Bolygóáradat és asztroszeizmológia  | 121 |
| <i>Vető Balázs:</i> Az elektromos kölcsönhatás a speciális relativitáselmélet szemszögéből           | 127 |
| <i>Hraskó Péter:</i> Biztos-e, hogy az energia megmarad?   | 131 |
| <i>Ódor Géza:</i> Univerzalitási osztályok és fázisátalakulások komplex, nemegyensúlyi rendszerekben | 136 |
| <i>Horváth Gábor:</i> Hogyan mozoghattak a dinoszauruszok?   | 141 |
| <b>A FIZIKA TANÍTÁSA</b>   |     |
| <i>Baranyai Klára:</i> Földrajzi helymeghatározás a Nap segítségével                                 | 147 |
| Kétszer 125 év ( <i>Füstöss László</i> )   | 150 |
| <b>DISZKUSSZIÓ</b>   |     |
| Az antropológus elvről – 58. évf. 321–322. ( <i>Szabó M. Gyula, Hraskó Péter</i> )                   | 152 |
| <b>KÖNYVESPOLC</b>   |     |
| <b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>   |     |

*R. Szabó:* A lot of "new" planets and astroseismology

*B. Vető:* Electrical interaction as presented in the special theory of relativity

*P. Hraskó:* Are we sure that energy is conserved?

*G. Ódor:* Universality classes and phase transitions in complex non-equilibrium systems

*G. Horváth:* How dynosauri might have moved

### TEACHING PHYSICS

*K. Baranyai:* Geographic localization using the Sun

Two 125-years jubilees: K. Novobátzky and P. Selényi (*L. Füstöss*)

### DISCUSSION

Concerning the anthropic principle – 58. pp. 321–322. (*G. M. Szabó, P. Hraskó*)

### BOOKS, EVENTS

*R. Szabó:* Eine Menge „neuer“ Planeten und die Astroseismologie

*B. Vető:* Elektrische Wechselwirkungen, wie die spezielle Relativitätstheorie sie sieht

*P. Hraskó:* Ist es sicher, daß die Energie erhalten bleibt?

*G. Ódor:* Universalitätsklassen und Phasenübergänge in komplexen, nicht im Gleichgewicht befindlichen Systemen

*G. Horváth:* Wie können sich Dinosaurier bewegt haben?

### PHYSIKUNTERRICHT

*K. Baranyai:* Geographische Ortsbestimmung mit der Sonne

Zwei 125-Jahres-Jubilare: K. Novobátzky und P. Selényi (*L. Füstöss*)

### DISKUSSION

Zum anthropischen Prinzip – 58. S. 321–322. (*G. M. Szabó, P. Hraskó*)

### BÜCHER, EREIGNISSE

*P. Сабо:* Куча «новых» планет и астросейсмология

*Б. Ветё:* Электрическое взаимодействие, как его трактуют в специальной теории относительности

*П. Храшко:* Правда ли, что энергия сохраняется?

*Г. Одор:* Классы универсальности и фазовые переходы в комплексных неравновесных системах

*Г. Хорват:* Как по нашему мнению диносауры двигались

### ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

*К. Бараньяи:* Определение географического места с помощью Солнца

Два 125-летнего юбилея: К. Новобатцкий и П. Шелени (*Л. Фюштесс*)

### ДИСКУССИИ

Об антропическом принципе – 58, 321–322. (*М. Д. Сабо и П. Храшко*)

### КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Szerkesztőség: 1027 Budapest, II. Fő utca 68. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

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

Nyomdai előkészítés: Kármán Tamás, 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 egyzámlán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 780.- Ft + postaköltség.

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

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LIX. évfolyam

4. szám

2009. április

## BOLYGÓÁRADAT ÉS ASZTROSZEIZMOLÓGIA

### Elindult a Kepler-űrtávcső

Szabó Róbert

MTA Konkoly Thege Miklós  
Csillagászati Kutatóintézete

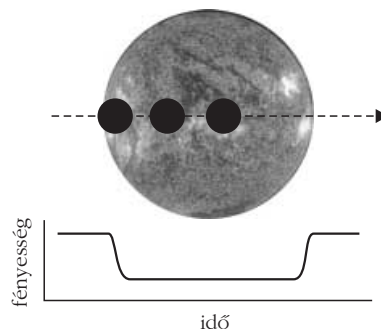
A *Csillagászat Nemzetközi Évében*, 2009. március 7-én hajnalban indult útjára a Kepler-űrtávcső a floridai Cape Canaveralból. Kézenfekvő volt, hogy a NASA bolygókereső műszerét éppen a „prágai” csillagászról nevezék el, hiszen a bolygók mozgására vonatkozó, általa felfedezett törvények közül az első kettőt éppen 400 éve, 1609-ben tette közzé *Astronomia Nova* című munkájában. Akkoriban még csak a szabad szemmel is látható öt bolygót ismerték. Az elmúlt évtizedek rohamos technikai fejlődésének köszönhetően ma már a távoli naprendszerekben talált 342 exobolygóra is alkalmazhatóak a Kepler-törvények. Ráadásul *Kepler* alapvető jelentőségű munkát végzett az optika és a távcső működésének magyarázata terén is. Éppen ezért az űrtávcső startja méltó tisztelgés a híres tudós emlékének. Írásunkban áttekintjük a bolygókereső misszió és a hozzá kapcsolódó csillagszeizmológiai program céljait, jellegzetességeit és a várható tudományos eredményeket.



– a projekt tudományos vezetője – már 1984-ben javasolta [2], a megvalósításra éppen negyed századot kellett várni. A földfelszínről már korábban elkezdődött a módszer alkalmazása (lásd pl. a magyar vonatkozású, rendkívül sikeres HATNet-programot 11 bejelentett exobolygóval), míg a hasonló tudományos programmal tervezett francia vezetésű COROT (CONvection, ROTation and planetary Transits) műholdat 2006 decemberében bocsátották fel, s eddig 7 szubstelláris tömegű objektumot talált.

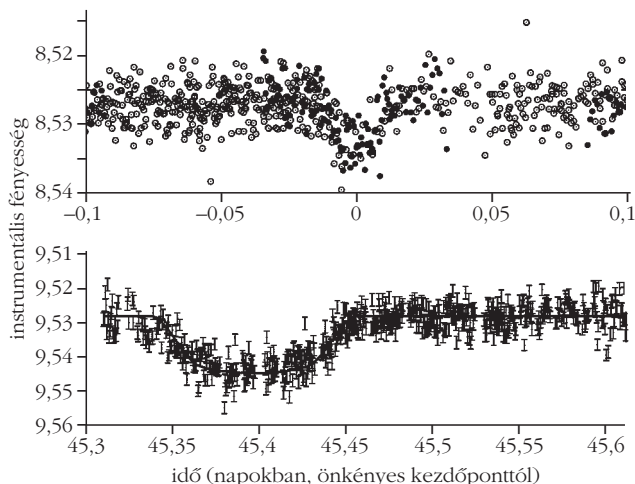
A bolygónk felszínéről végzett tranzitkeresések (HATNet, WASP, TrES stb.) közös jellemzője, hogy leginkább a nagy és központi csillagukhoz közel keringő bolygókra, az úgynevezett forró Jupiterekre érzékenyek (2. ábra). Ezek létezéséről a '90-es évek közepéig – az első néhány exobolygó felfedezéséig – nem is volt tudomásunk, ma pedig (legalábbis a Kepler indításáig) ez a leggyakrabban felfedezett bolygó-típus. Az elhalványodás mértéke a csillag és a bolygó

1. ábra. Egy bolygótranzit és a csillag fényességében bekövetkező csökkenés



### Exobolygók a földfelszínről és az űrből

A 2001-ben zöld utat kapott misszió célja extraszoláris bolygók felfedezése fősorozati csillagok körül, tranzit módszerrel. Ennek lényege, hogy a bolygó áthaladása központi csillaga előtt periodikus csökkenést okoz a csillag fényességében, amely pontos fotometriával kimutatható (1. ábra). Bár a technika űrbeli alkalmazását *William Borucki* (NASA Ames Research Center)



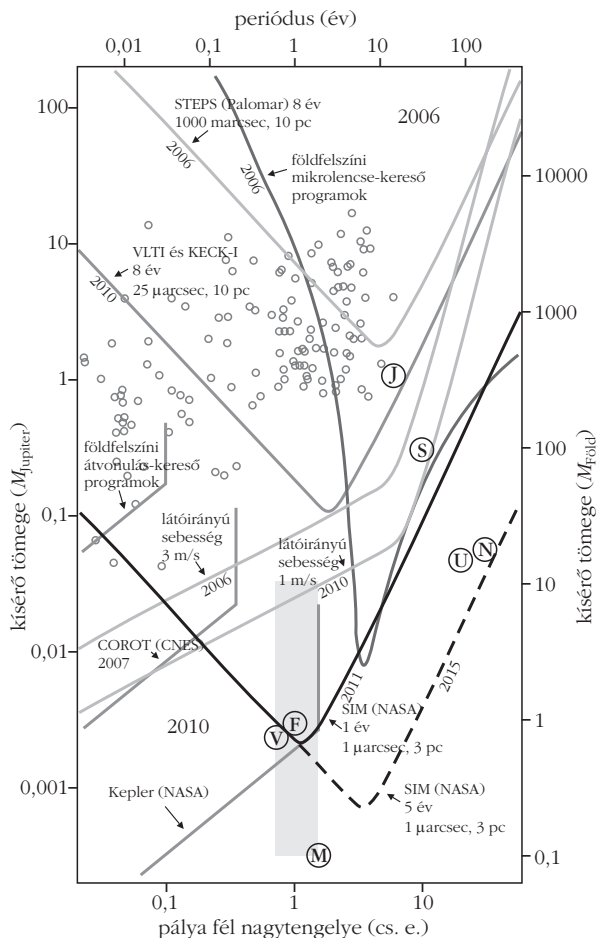
2. ábra. Felül a HAT-P-1b jelű exobolygó öt tranzitja a felfedező fénygörbén (11 cm-es távcsövekkel), fázis szerint összetekerve, alul egy megerősítő mérés a piszkéstartói 60/90 cm-es Schmidt-teleszkóppal [1].

méretéből kapható meg. Míg egy Nap típusú csillag esetén egy Jupiter méretű égitest  $10^{-2}$ , addig Föld-szerű társa  $10^{-4}$  nagyságrendű fényességcsökkenést produkál tranzit esetén. Az előző könnyen detektálható a földfelszínről; a Földhöz hasonló bolygók nagyszámú, biztos megfigyeléséhez már űreszközre van szükség a légkör zavaró hatásai miatt (3. ábra). A módszer hátránya, hogy csak kedvező geometriai elrendezés esetén figyelhetünk meg tranzitot. Így a forró Jupiterek körülbelül 10%-a fedi el központi égitestjét; egy 1 csillagászati egységre (átlagos Nap–Föld-távolság) keringő Föld-szerű bolygó viszont csak 0,47% eséllyel fog látóirányunkba kerülni. Utólérhetetlen előny viszont, hogy a módszer szolgáltatja a bolygó méretét is, ami a tömeget ismerve már a sűrűsége, ezáltal a bolygó összetételére utalhat.

A másik nagyon fontos módszer, amely idáig a legtöbb exobolygó-felfedezést szolgáltatta, a radiális (látóirányú) sebesség mérésén alapszik. Ez szintén a nagyobb tömegű és rövid keringési idejű exobolygókat preferálja, bár a közeli jövőben itt is várhatók a kisebb és a csillaguktól távolabb keringő bolygótrófeák. Ilyenkor a bolygó hatására a csillag színképében az abszorpciós vonalak periodikus eltolódását figyelhetjük meg a Doppler-effektus miatt. A kisebb bolygók esetén akár 1 m/s (!) pontosságú spektroszkópiai megfigyelésekre is szükség lehet, ezeket a legnagyobb földi teleszkópok szolgáltatják. A radiális sebesség módszerével Kepler harmadik törvényét felhasználva a planéta tömegére következtethetünk:

$$\frac{K^3 P}{2 \pi G} = \frac{m^3 \sin^3 i}{(M + m)^2},$$

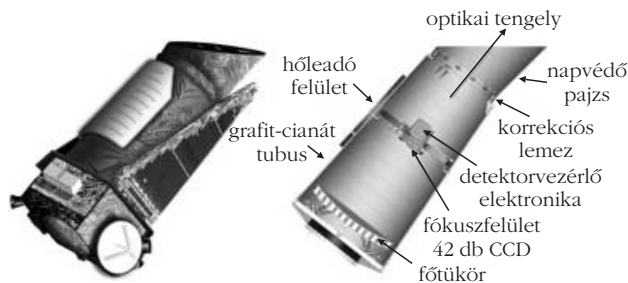
ahol  $K$  a bolygó radiálissebesség-változásának amplitúdója,  $P$  a keringési periódus,  $M$  a csillag,  $m$  a bolygó tömege,  $G$  a gravitációs állandó,  $i$  pedig a látóirány és a pályasík normálisa által bezárt szög, ami jó közelítéssel  $90^\circ$ , és a tranzit modellezésével pontosan számolható. Minthogy tranzit-hoz hasonló fényességcsök-



3. ábra. Néhány bolygókereső módszer érzékenysége. A Naprendszer bolygóit nagy kezdőbetűjűkkel, néhány exobolygót pedig kis korongokkal jelöltünk. A kísérő tömeget Jupiter- (bal), illetve Föld-tömeg (jobb) egységben is feltüntettük. A bal alsó sarokban jól látható, hogy a Kepler milyen mértékben fogja kiterjeszteni a Föld típusú bolygók megtalálásának esélyeit. A függőleges sátrózás a tervezett TPF misszió vizsgálati tartományát mutatja. (A NASA/JPL-Caltech engedélyével.)

kenést sokféle egzotikus konfiguráció okozhat (kettőscsillag kis tömegű másodkomponenssel, fedési kettőscsillag egy fényes előtér- vagy háttércsillagra vetülve, sűrű fedés normál fedési kettőscsillag esetén stb.), a spektroszkópiai megerősítésre a tranzit-módszer esetén is szükség van az égitest mibenlétének pontos megállapításához.

Az 591 millió dolláros űreszköz azokat a Föld-szerű bolygókat fogja keresni, amelyek a lakhatósági zónákban – vagyis ahol a hőmérsékleti viszonyok megengednek a folyékony víz jelenlétét – helyezkednek el. Az ilyen objektumokat az asztronómusok Szent Grálként keresik, és napjainkban fő hajtóerejét adják a csillagászati kutatásoknak, fejlesztéseknek. Ezen égitestek megtalálása és későbbi behatóbb vizsgálata (pl. atmoszférájuk spektroszkópiai elemzése) révén remélhetjük, hogy esetleg bioszférára utaló nyomokra bukkanhatunk a távoli planéták légkörében. A biomarkerek (metán, vízgőz, ózon stb.) kimutatására mind az ESA (Darwin), mind a NASA (TPF: Terrestrial Planet Finder) űrinterferometriai eszközök tervezésével készül.



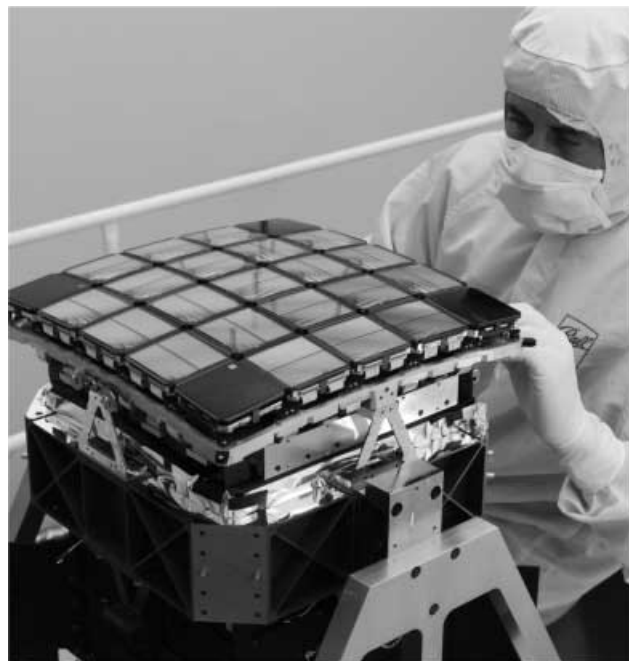
4. ábra. A Kepler-űrtávcső szerkezete

## 95 millió pixel – „összetett szem” az űrben

A Kepler főműszere nem más, mint egy hatalmas fotométer (4. ábra). Érdekes, hogy optikai elrendezését tekintve megegyezik az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete által üzemeltetett piszkés-tetői Schmidt-teleszkóppal. Az egyszerűen elkészíthető gömbfelület alakú főtükör leképezési hibáit a tubus elején elhelyezett korrekciós lemez mérsékli elfogadható mértékűre. Ezeket a műszereket eredetileg nagylátómezejű fotografikus égboltfelmérésekhez tervezték. Azóta természetesen digitális képérzékelők (CCD-k) váltották fel az emulziókat.

Így a Kepler-műszer tubusának közepén, a görbült fókuszfelületen is 42 darab,  $2200 \times 1024$  pixeles CCD-chip helyezkedik el (5. ábra). A műszer egyetlen, széles hullámhossztartományban (400–850 nm) érzékeli a beérkező fényt. A csillagok képeit enyhén defokuszálják, hogy a több begyűjtött foton révén minél magasabb jel/zaj viszonyt érhessenek el. A teljes látómező mintegy 105 négyzetfok lesz. Ezt folyamatosan, 3,5 évig

5. ábra. A Kepler-űrtávcső görbült fókuszfelületére illeszkedő detektorrendszer a laboratóriumban



figyeli a berendezés (sikeres működés esetén a kutatók további 2 év hosszabbítással kalkulálnak). A  $-85^\circ\text{C}$ -ra hűtött kamera a folyamatosan gyűjtött fotonokat alapesetben 30 perces időintervallumokban integrálja (közben 6 másodpercenként kiolvassa a jelet, a túlcsoordulás elkerülésére), és így továbbítódik a földi fogadóállomások felé havonta. Ismert, vagy újonnan talált tranzit és egyéb rövid periódusú jelenségek, így csillagszeizmológiai célpontok esetén azonban lehetőség van 1 perces integrációra is.

Az elvárt pontosság érzékeltetésére álljon itt egy példa. Egy 12 magnitúdós, Nap típusú csillag esetén 6,5 óra integrációs idővel a fotometriai pontosság 20 ppm (part per million) lesz, a csillagból eredő 10 ppm zaj mellett. Egy földszerű bolygó tranzitja 84 ppm fényességváltozást okoz, s ez az esemény 13 óráig tart, ha a planéta a csillagkorong középpontján halad keresztül.

A tranzitok kimutatásához a műszer kezdetben mintegy 170 000 csillagot fog folyamatosan megfigyelni a 9–15 magnitúdó fényességtartományban: főként a Naphoz hasonló, illetve kisebb tömegű főorozati csillagokat. Itt ugyanis a méretarányokból következően nagyobb mértékű fényességcsökkenés várható a tranzit során, mint a főorozatról elfejlődött csillagok esetén. Ezt később 100 000 objektumra csökkentik, elhagyva a túl zajos fénygörbéjű (aktív, változó stb.) csillagokat. A távcső a Tejút sávjához közel, az Orionspirálkar mentén, a Cygnus–Lyra irányba fog nézni, és zömében 600–3000 fényév távolságú csillagok lesznek a célpontjai. A megfigyelendő objektumoknak csupán 1%-a 600 fényévnél közelebbi.

Az „űrfotométert” egy Delta-II hordozórakéta állította heliocentrikus (a Földéhez hasonló) pályára, amelyen a keringési periódus 371 nap. Az űreszköz így évről évre mind jobban eltávolodik bolygónktól, ami korlátozza az adatkommunikációra fordítható sávzélességet. Ez a másik ok, amiért majd csökkenti kell a folyamatosan megfigyelt objektumok számát. A Nap körüli pálya és az ekliptikától távol választott égtérület biztosítja a Kepler-mező folyamatos megfigyelését.

## Milyen gyakoriak a Föld típusú, lakható bolygók?

A tranzitmódszer alkalmas a kis és közepes méretű bolygók tömeges felfedezésére, de ennek feltétele sok ( $\sim 10^5$ ) csillag fényességének nagy pontosságú fotometriája. A Kepler stratégiája is ezen alapszik, hisz küldetésének fő célja a Földhöz hasonló méretű és bolygónk pályájához hasonló keringési periódusú bolygók kimutatása. A nagy fénygyűjtőképességű (1,4 méteres főtükörű) távcső a fényességmérés rendkívüli pontosságát biztosítja, így minden eddiginél kisebb bolygók tömeges felfedezése várható. A hosszú keringési periódusú bolygók kimutatásának lehetősége pedig a Kepler-fotométer folyamatos, több év hosszúságú adatsoraiban rejlik. Összehasonlításképpen: a

COROT – Föld körüli pályája miatt – legfeljebb 150 napig tud folyamatosan figyelni egy bizonyos területet, és teleszkópja csak 27 cm-es átmérőjű.

A Föld típusú és nagyobb exobolygók gyakoriságának meghatározása a lakhatósági zónához közel, különféle típusú csillagok körül, nemcsak tudományos, hanem filozófiai jelentőséggel is bír. Ez az eredmény annak a kérdésnek a megválaszolásához visz minket közelebb, hogy hány potenciálisan lakható bolygó létezik Galaxisunkban. Ha az ilyen bolygók gyakoriak, akkor a most indított NASA-eszköz több százat is találhat belőlük. A megfigyelt csillagok nagy számát tekintve statisztikailag az is megalapozott állításra vezetne, ha a felfedezett bolygók száma elmaradna a várakozásoktól. Ennek a forgatókönyvnek azonban a legtöbb kutató jelenleg kevés esélyt ad.

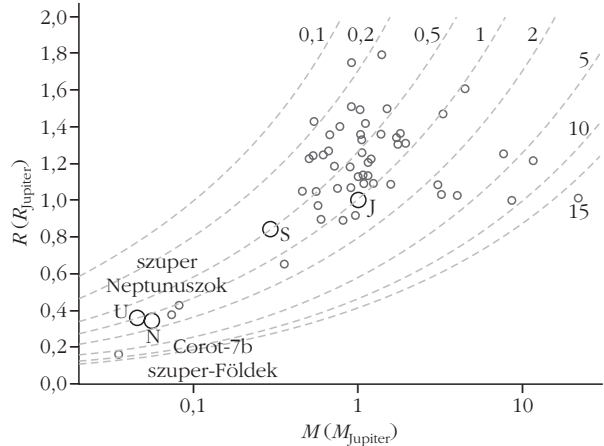
A fenti bolygóminta méret- és pályasugár-eloszlásának meghatározása a következő feladat. A bolygók mérete a fényességcsökkenés mértékéből adódik, de ehhez a szülőcsillagok méretét is ismerni kell. A tranzitok között eltelt idő és a csillag tömege Kepler harmadik törvényének felhasználásával adja a pályaméretet:

$$a = \sqrt[3]{\frac{G P^2 M^3}{4\pi (M + m)^2}}$$

Fontos a stabil bolygópályák lehetőségének vizsgálata a többszörös csillagrendszerekben is. Ezen kívül további űreszközökkel és földi spektroszkópiával a kisméretű, tranzitot mutató bolygók nagyobb méretű testvéreit is sikerülhet kimutatni ugyanazon bolygórendszerben.

A már említett rövid periódusú, forró óriásbolygókól is remek mintát fognak kapni a kutatók, ráadásul már a küldetés első néhány hónapja után. Ezen bolygók fizikai paramétereinek (pályaméret, albedó, méret, tömeg) meghatározása is a projekt célja. A kőzet- és óriásbolygókat is beleszámítva a Kepler összesen több ezer bolygót találhat, persze a pontos szám egyelőre bizonytalan, de nagyban befolyásolja majd a bolygókeletkezési és -fejlődési elméleteket. A bolygók szülőcsillagainak tulajdonságai meghatározóak az eredmények értelmezésében. Egyetlen példát említve megjegyezzük, hogy az eddig talált forró Jupiterek szülőcsillagainak többsége nehéz elemekben (csillagászati zsargonon fémekben) gazdagnak mutatkozott. Jelenleg úgy tűnik, hogy ezek a rendszerek eleve nagyobb fémtartalmúak, és ez a tulajdonság növeli a bolygóképződési hajlandóságot, tehát nem arról van szó, hogy a csillag utólag „szennyeződött be” a bolygókeletkezés során megmaradt, gázban szegény, porban és ezáltal nehéz elemekben feldúsult anyaggal. Mostanra az is valószínűsíthető, hogy a kisebb tömegű bolygók nem követik ezt a trendet, és hasonló valószínűséggel megtalálhatók a kisebb fémtartalmú csillagok körül is [4].

A talált bolygók csillagainak spektráltípusa és fémtartalma a Földről is mérhető. A Kepler-adatokból a csillag forgási sebessége, aktivitása, folttevékenysége



6. ábra. Az ismert fedési exobolygók tömeg-sugár diagramja (mindkettő Jupiter-egységben kifejezve). A szaggatott vonalak állandó sűrűségnek megfelelő görbék, a kis számok a sűrűséget jelzik, a Jupiterhez sűrűségéhez (1,326 g/cm<sup>3</sup>) mint egységhez viszonyítva. A Naprendszerbeli négy óriásbolygót nagy korong jelöli. Forrás: <http://exoplanet.eu> [5]

is megállapítható lesz. A csillagparamétereket az asztroszeizmológia segítségével kapott pontos kor- és tömegmeghatározás fogja kiegészíteni, ezáltal nyújtva teljes képet a bolygórendszerek tulajdonságairól.

Az eddig megismert exobolygók olyan elképesztő változatosságot mutatnak, amilyenre addig nem számíthattunk, ameddig csak a Naprendszert ismertük. A listán képviseltetik magukat a nagyon kis átlagsűrűségű, felfűvödött, forró Jupiterek, az elméleti számítások által megjósolt, nagy sűrűségű szubsztelláris égitestek, a Szaturnusz és a Neptunusz távoli ikertestvérei, és egy, a COROT által talált kétszeres földátmérőjű, de forró (talán kőzet-) bolygó, a Corot-7b (6. ábra). Semmi kétség, a Föld távoli megfelelői között is akadnak majd a képzelőerőt megmozgató, sci-fibe illő világok: vastag óceán, jég, sűrű légkör vagy éppen láva borította földek, lemeztectonikát mutató planéták, holdakkal, gyűrűkkel körülvett, lakható bolygók. Az átmenet valószínűleg folytonos a kis tömegű csillagoktól az óriás gázbolygókon keresztül a kőzetbolygókig.

A Kepler tehát az „exobolygó-kirakó” fontos darabjainak megtalálására vállalkozik. Közvetlen utódai az amerikai TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) és az európai PLATO (Planetary Transits and Oscillations of stars) lesznek. A TESS 2012-ben indulna, és az egész égboltot figyelné tranzitok után kutatva a közeli és fényes csillagok körül keringő Neptunuszok és szuper-Földek felfedezésének reményében. A PLATO is a Kepler koncepciójának továbbfejlesztése, azzal a különbséggel, hogy szintén nagyobb területet (több mint 900 négyzetfokot) tervez megfigyelni, 28 kisebb távcsővel a fedélzetén. Hasonlóan a most induló NASA-űrtávcsőhöz, a tranzitmérések mellé asztroszeizmológiai vizsgálatok is csatlakoznak a tervek szerint 2018-ban startoló ESA-programban.

A szóban forgó tudományos program eredményei fontos szerepet játszanak a távolabbi jövő bolygókutató misszióiban is. Így az extraszoláris bolygók köz-

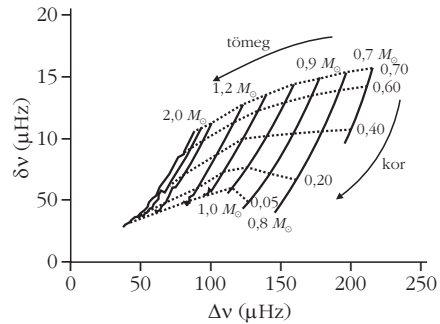
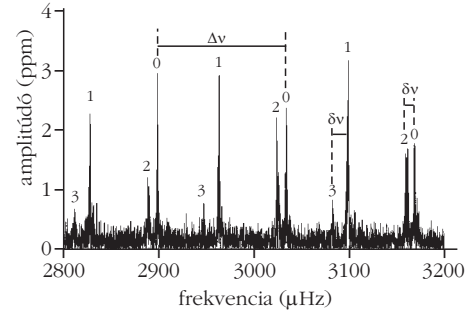
vetlen kimutatására és légkörük spektroszkópiai vizsgálatára tervezett eszközök is profitalni fognak a Kepler-örökségből. Nemcsak a már felfedezett bolygók közvetlen megfigyelése révén, de a szülőcsillagok fizikai paramétereiben talált törvényszerűségek és trendek is befolyásolni fogják a jövő űreszközait tervező kutatók munkáját.

## Asztroszeizmológia

A Föld típusú bolygók tranzitjainak detektálásához szükséges fotometriai pontosság lehetővé teszi a csillagok Nap típusú oszcillációinak kimutatását is. Ezt a szerencsés körülményt kihasználva asztroszeizmológiai vizsgálatokra létrehozott tudományos csoport is kapcsolódik a Keplerhez (KASC – Kepler Asteroseismic Science Consortium). A tranzitkutatás és az asztroszeizmológia házasítása bevált módszer a COROT hold működtetésénél is. A csoportnak kettős feladata van. Egyrészt a csillagszeizmológia révén pontos információkhoz jutunk a bolygók szülőcsillagainak fizikai tulajdonságairól, koráról; ez pedig a bolygórendszerek kialakulásának megértését fogja segíteni. Másrészt, a pulzáló változócsillagok (és persze egyéb változócsillagok is, pl. a fedési kettőscsillagok, foltos aktív csillagok) olyan pontosságú és hosszúságú folyamatos megfigyelését fogja szolgáltatni a Kepler, amilyenről az asztrofizikusok idáig csak álmodhattak.

A csillagszeizmológia a '70-es években született és azóta páratlan sikereket elért napszeizmológia logikus kiterjesztése a távolabbi csillagokra. A Napban a felszínhez közeli konvektív réteg sztochasztikusan gerjeszti az 5 perchez közeli periódusú oszcillációkat. Központi csillagunk esetén az egyedi rezgési módusok száma hatalmas, tízmilliós nagyságrendű. Az egyes módusok hatását a luminozitás változásában (néhány ppm) vagy a felszín radiális sebességének mérésével (20 cm/s) érhetjük tetten. A rezgési módusok különböző mélységig hatolnak a Nap belsejébe, ezáltal megteremtve annak lehetőségét, hogy valódi szeizmológiát műveljünk, azaz letapogassuk életadó csillagunk belső szerkezetét. Ehhez elegendő a frekvenciákat mérni, és azonosítani őket a megfelelő módusokkal. A frekvenciák összehasonlíthatatlanul pontosabban mérhetők, mint bármely más fizikai jellemző. A megfigyelt módusok nagy száma arra is lehetőséget ad, hogy közvetlen módon, inverz módszerekkel rekonstruáljuk a hangsebesség és a sűrűség radiális lefutását, teszteljük a különféle állapotegyenleteket a Nap magjában, a forgási sebesség változását a mélységgel, a héliumtartalmat a konvekciós zónában, valamint a konvekciós zóna mélységét.

Az  $(r, \theta, \varphi)$  koordinátákkal jellemzett háromdimenziós gázgömb sajátmódusai három egész számmal jellemezhetők:  $n$  a radiális sajátfüggvényt jellemzi,  $l$  és  $m$  pedig a felszíni struktúrát jellemző szférikus harmonikus  $(Y_l^m(\theta, \varphi))$  leírására szolgálnak. A kitérés radiális komponense ezen módusok szuperpozícióként írható:



7. ábra. Részlet a Nap frekvenciaspektrumából, mely a SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) VIRGO műszerével kapott adatokból készült. A számok az  $l$  értékeket mutatják. Leolvashatók a nagy és kis szeparációk. b) Különböző tömegű csillagok fejlődését mutatja a jobb oldali diagram. A nagy  $(\Delta v)$  és kis frekvenciaszeparáció  $(\delta v)$  a korrall, illetve a tömeggel korrelál. A csillagok tömegét nap-tömegben tüntettük fel (vastag vonalak), a szaggatott vonalak konstans centrális hidrogéntartalmat jelölnek, ami a csillag korával csökken.

$$\xi_r = \sum_{n, l, m} \xi_{r, nl}(r) Y_l^m(\theta, \varphi) \exp(2\pi i v_{n, l} t).$$

Megmutatható, hogy az  $n \gg l$  esetben a közeli módusokra jellemző frekvenciákból az alábbi módon képzett különbségek, vagyis az úgynevezett nagy szeparáció  $\Delta v = v_{n, l} - v_{n-1, l}$  és a kis szeparáció:  $\delta v = v_{n, l} - v_{n-1, l+2}$  jó közelítéssel állandóak, és fontos diagnosztikus szerepet töltenek be. Míg az előbbi a csillag sűrűségére jellemző, addig az utóbbi a magban mérhető átlagos molekulatömeggel van szoros kapcsolatban, ez pedig a kort jellemzi egyértelmű módon (7. ábra).

A csillagok legtöbbje tömegétől és fejlődési állapotától függetlenül mutat a Naphoz hasonló oszcillációkat. A megfigyelhető frekvencia a csillagbelsőre jellemző hangsebesség és sűrűségstruktúra függvénye, ezt módosíthatja a csillag forgása és mágneses tere. Az amplitúdókat és a fázisokat a felszínhez közeli rétegek befolyásolják, ideértve a turbulens konvekciót is. A csillagaktivitás is hatással van a módusok jellemzőire (amplitúdó, frekvencia, élettartam), egyedülálló lehetőséget biztosítva a Napéhoz hasonló aktivitási ciklusok kimutatására. Az utóbbi egy-másfél évtizedben földfelszíni fotometriával és spektroszkópiai idősorokból távoli csillagoknál is sikerült kimutatni a Nap típusú oszcillációt.

A „precíziós űrfotometria” minden bizonnyal új fejezetet nyit a csillagszeizmológia területén is. A Kepler által kínált pontosság és a vizsgált objektumok száma nagyságrendi ugrást jelent. A küldetés első

kilenc hónapja folyamán a szeizmológiai program keretében több mint 5000 csillag fényét rögzítik a detektorok. Az előzetes eredmények alapján az űrtávcső mintegy 1100 csillagot fog a misszió teljes időtartama alatt figyelni. A Kepler-idősorok asztroszeizmológiai alkalmazásával a csillagok sugara 2–3% pontossággal, koruk 5–10 százalékos hibával kapható meg. A több éves megfigyelés végére ezekről a csillagokról jó parallaxis (távolság) is rendelkezésre fog állni; ez pedig a luminozitásuk bizonytalanságát 2%-ra csökkenti, ami a csillagmodellekkel való összevetésből 1%-nál pontosabb sugarat eredményez [3].

A Kepler-adatok hatalmas előrelépést jelenthetnek a csillagfejlődés megértése terén is. A szóban forgó teleszkóp a csillagok oszcillációit olyan fantasztikus pontossággal képes detektálni, hogy közvetlenül láthatjuk majd a csillagok szerkezetében a csillagfejlődés miatt bekövetkező változásokat. Tovább növeli az asztroszeizmológia alkalmazhatóságát, ha csillag-halmazbeli objektumok a célpontok. A Kepler látómezőjében 5 fényesebb nyílthalmaz van, s az egyes halmazok tagjai egyenlő távolságra vannak tőlünk, kémiai összetételük és koruk első közelítésben azonos. Ezek a megkötések fontos segítséget adnak az elméleti vizsgálatoknak, és leszűkítik a lehetséges modellek körét.

Egy sor olyan kérdés megválaszolásához is közelebb kerülhetünk, amelyek vizsgálatát eddig a kellő pontosság hiánya sok szempontból hátráltatta. Ilyen problémák a száz éve ismert, de máig nem értett amplitúdó- és fázismoduláció az RR Lyrae csillagokban (Blazsko-effektus), a nemradiális és strange módusok jelenléte a klasszikusan radiális módusokban pulzáló változócsillagokban (ilyenek a cefeidák és az RR Lyrae csillagok), a hosszú periódusú változások oka félszabályos változóknál. Hasonlóan fontos kérdések a gerjesztési és módusszelekciós hatások fősorozathoz közeli, nemradiális pulzációt végző (delta Scuti és gamma Doradus típusú) csillagoknál, a mag konvektív túllövése és a forgási sebesség a nagy tömegű fősorozati (pl. béta Cephei típusú) csillagok belsejében, a konvektív granulációs szerkezet a vörös óriás csillagokban, a pulzáció, rotáció és a mágneses tér kölcsönhatása (ami jól vizsgálható pl. a gyorsan oszcilláló Ap csillagokban), relativisztikus és mikrolencsehatások kettőscsillagokban. Itt csak néhány példát említettünk, de a pontosságnak ezen a szintjén számtalan új jelenség okozhat meglepetést a kutatóknak.

Az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet munkatársai is aktívan részt vesznek a KASC munkájában: az adatok elemzésével, modellszámításokkal és földi megfigyelésekkel járulnak hozzá a projekt sikeréhez. A magyar tudósok főként a pulzáló változócsillagokra fognak koncentrálni. Az előkészítő munka során mintegy 100 ilyen csillagot javasoltak, amelyek bekerültek a Kepler programjába. A KASC tudományos programja 14 munkacsoportban folyik. Ezek közül a cefeida változócsillag-típushoz kapcsolódó munkacsoport vezetésével jelen cikk szerzőjét bízták meg.

## A Kepler várható hatása

A tudományban – így a csillagászatban is – a mérési pontosság kiterjesztése, az új mérési eszközök, technikák alkalmazásai is inspirálják az új gondolatokat, eredményeket. Gondolhatunk *Eötvös* precíziós ingájára, de éppúgy *Tycho Brahe* távcső nélkül végzett rendkívül pontos csillagászati pozícióméréseire, amelyek lehetővé tették Johannes Keplernek, hogy felismerje a bolygómozgás törvényeit. Forradalmi volt *Galilei* 400 évvel ezelőtti mozdulata is, amellyel távcsövét az égbolt felé fordította: az eszköz fénygyűjtőképessége kitágította tudásunkat az Univerzumról. Ehhez hasonló momentum talán csak a Hubble-űrtávcső felbocsátása volt. Legutóbb pedig a COROT-műholddal indult el egy „mikromagnitúdós forradalom” a csillagászati űrfotometriában. A Kepler a méltó folytatás záloga: a pontosságban még egy nagyságrenddel továbblépve, új típusú objektumok felfedezésével és vizsgálatával vívhat ki elismerést az exobolygó-kutatásban, ugyanakkor a napszeizmológia kiterjesztése a távoli csillagokra szintén mérőföldkönek bizonyulhat.

A küldetés vezetői ügyelnek arra, hogy a „Kepler-hatás” a szakmai körökön kívül is minél nagyobb legyen: az űrprogram költségvetésének jelentős hányada jut a tudományos munka mellett ismeretterjesztő, népszerűsítő tevékenységre. Szinte minden korosztálynak kínálnak programokat, előadásokat, oktatóanyagokat a csillagászat és az exobolygók témakörében. Továbbá bárki elküldhette nevét és 500 szavas üzenetét, ezeket összegyűjtve egy DVD-lemezen a Kepler fedélzetére erősítették, ezáltal is szoros kapcsolatot alakítottak ki a nagyközönséggel. Ennek is köszönhető, hogy az első eredményeket a kutatók mellett az érdeklődő közönség is türelmetlenül várja itthon és külföldön egyaránt.

## Köszönetnyilvánítás

Az MTA KTM CSKI munkatársainak a Kepler asztroszeizmológiai programjában való részvételét és az Intézetben folyó előkészítő munkákat a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium a magyar űrkutatás fejlesztésének támogatására kiírt, K-36-08-00031K számú pályázata támogatja.

## Linkgyűjtemény

Kepler: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html)  
COROT: <http://smc.cnes.fr/COROT/>  
HATNet: <http://www.cfa.harvard.edu/~gbakos/HAT/>  
Exobolygó enciklopédia: <http://exoplanet.eu/>

## Irodalom

1. Bakos, G. Á., Noyes, R. W., Kovács, G., *Astrophysical Journal* 656 (2007) 552.
2. Borucki, W. J., Summers, A. L.: *Icarus* 58 (1984) 121.
3. Stello, D., Kjeldsen, H., Bedding, T. R., *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* 366 (2007) 247.
4. Sousa S. G., Santos, N. C., Mayor, M. és mtsai: *Astronomy and Astrophysics* 487 (2008) 373.
5. Torres, G., Winn, J. N., Holman, M. J., *Astrophysical Journal* 677 (2008) 1324.



# AZ ELEKTROMOS KÖLCSÖNHATÁS A SPECIÁLIS RELATIVITÁSELMÉLET SZEMSZÖGÉBŐL

Vető Balázs  
ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék

Ha eltekintünk a mozgó töltések mágneses kölcsönhatásától és a mozgó töltések Coulomb-kölcsönhatását a speciális relativitáselmélet keretében írjuk le, akkor arra a megállapításra jutunk, hogy a Coulomb-kölcsönhatás nem Lorentz-invariáns jelenség. Ez azt jelenti, hogy két különböző inerciarendszerben elhelyezett megfigyelő más eredménnyel írja le ugyanazt a természeti jelenséget. A Coulomb-kölcsönhatás csak a Lorentz-erővel együtt tesz eleget a speciális relativitáselmélet „előírásainak”. A Coulomb- és a Lorentz-erőnek itt bemutatott tulajdonsága azoknak, a speciális relativitáselméletben gyökerező, mélyebb kapcsolatára utal. A speciális relativitáselmélet szerint az elektromos és a mágneses kölcsönhatás egyazon jelenség két eleme; a mágnesség a Coulomb-kölcsönhatás elválaszthatatlan része, mintegy „relativisztikus járuléka”.

## Bevezető gondolatok

Vajon hogyan ismerte volna meg a tudomány a mágneses kölcsönhatást, ha a természet nem alkotott volna ferromágneses anyagokat? A ferromágneses fémkristályok speciális anyagszerkezeti tulajdonságuknak köszönhetően olyan intenzív mágnességet mutatnak, hogy már az ókori görögök is felfedezték a magnetit nevű vasérc mágneses tulajdonságát. Ez a vasércfajta magához vonzza a kisebb vashól készült testeket, illetve vonzza, vagy taszítja a másik magnetitdarabot – innen a jelenség elnevezése.

Ha nem léteznének a természetben ferromágneses anyagok, akkor nem készült volna iránytű a 15. század hajósai számára, és Oersted mágnesűje sem fordult volna el az áramjárta vezető közelében 1820-ban. Ha – Oersted a mágnesség és elektromosság kapcsolatát bizonyító kísérlete hiányában – a természettudomány nem vette volna észre két áramjárta vezető közti mágneses kölcsönhatást, valószínűleg Faraday sem fedezi fel az elektromágneses indukció jelenségét, és az 1860-as években nem készült volna dinamó és elektromos motor. Nehéz elképzelni, hogyan alakult volna az elektromosság tudománya, például az elektromágneses hullámok felfedezése, a mágnesség ismerete és a Maxwell-egyenletek nélkül. A tudomány – minden bizonynyal – a mágnesség ismerete nélkül is felfedezte volna a relativitás elvét. A Maxwell-féle elmélet hiányában, például a negatív eredménnyel zárult Michelson–Morley interferenciakísérlet is lehetőséget kínált volna a speciális relativitáselmélet felismerésére. A speciális relativitáselmélet pedig natív módon kapcsolja a mágnességet a Coulomb-kölcsönhatáshoz, esélyt adva a mágneses kölcsönhatás elméleti felfedezésére.

L. Page 1912-ben, hét évvel a speciális relativitáselmélet megjelenése után, megállapította, hogy az elektrodinamika alapvető egyenletei levezethetők az elektrosztatika törvényei és a relativitáselmélet alapján. Ez a felismerés akkoriban jelentősen megerősítette a támadások keresztüzében álló relativitáselmélet hitelét.

Az alábbiakban egyszerű példán ismertetem, hogy a Gauss-tétel és a speciális relativitáselmélet érvényességéből levezethető a mágneses kölcsönhatás léte, mint a Coulomb-kölcsönhatás „relativisztikus járuléka”. A mágneses kölcsönhatás tehát, mint a relativitáselmélet következménye, elméleti módon is kimutatható.

A példa bemutatása előtt szükséges áttekinteni az elektromos kölcsönhatás relativisztikus leírásának alapjait, mert ezeket fel kell használni a mágneses kölcsönhatás kimutatása során.

## A Coulomb-kölcsönhatás relativisztikus leírásának módszere

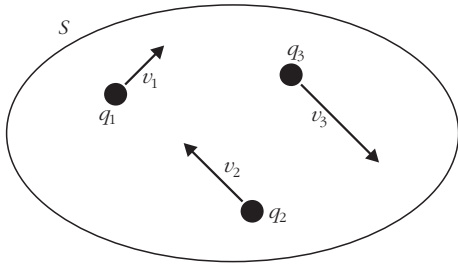
A jelenség leírását az alábbi posztulátumokra építjük:

- Elfogadjuk a speciális relativitáselmélet érvényét, amely kimondja az inerciarendszerek egyenértékűségét; az egymáshoz képest egyenletes sebességgel mozgó (inercia) vonatkoztatási rendszerekben a fizikai jelenségek azonos törvények szerint játszódnak le.
- Érvényes a két pontszerű töltés kölcsönhatását leíró Coulomb-törvény és az elektrosztatikából ismert szuperpozíció elve.
- A mágnesség jelenségét nem ismerjük.
- Elfogadjuk a tapasztalati tényt, hogy a Gauss-tétel egy zárt felületen belül nem csak a nyugvó, hanem az ott egyenletesen mozgó töltésekre is igaz.
- A kölcsönhatás leírása során használni kell a relativisztikus dinamika törvényeit, a Lorentz-transzformációt.

## Gauss-tétel mozgó töltések esetén

A 20. században mérések sora egyre nagyobb pontossággal igazolta, hogy az elektromos töltés Lorentz-invariáns, vagyis a mozgó elektromos töltés mérőszáma megegyezik annak nyugalmi mérőszámával.

A töltésinvarianciát alkalmazva az 1. ábrán látható elrendezésen, az  $S$  zárt felületre vonatkozó Gauss-tétel a zárt felületen belül egyenletes,  $v_i$  sebességgel mozgó  $q_i$  töltésekre is igaz, mivel a „töltésekből kiinduló erővonalak száma” nem függ a töltések sebességétől.



1. ábra. Zárt felületen belül mozgó töltések Gauss-tétele

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i.$$

A Gauss-tétel mozgó töltésekre vonatkozó érvényessége azt is jelenti, hogy egy vonatkoztatási rendszerben akár nyugvó, akár egyenletesen mozgó, azonos töltéseket magában foglaló zárt felületre felírt felületi integrál ugyanazt az eredményt adja.

A 2. ábrán  $S$ , illetve  $S'$  a  $K$  inerciarendszerben felvett zárt felületek,  $S$  nyugvó és  $S'$  állandó  $\mathbf{v}$  sebességgel mozog  $S$ -hez képest, a rájuk felírt Gauss-tétel azonos eredményt ad.

Az elektromos töltések Lorentz-invarianciájából következik, hogy ha  $K'$  az  $S'$  felület saját rendszere, akkor az  $S$  és  $S'$  felületekre a  $K'$  rendszerben felírt integrálok is azonos eredményt adnak. Az azonosság annak ellenére fennáll, hogy ha  $K'$ -ben nyugvó megfigyelő ábrázolná az  $S$  és  $S'$  felületeket, akkor a 2. ábrához képest – amely  $K$ -hoz rögzített fényképezőgéppel készült –  $S'$  kicsit megnyúlna,  $S$  pedig összehúzódna a sebességvektor egyenesé mentén. A két zárt felület felszínének mérőszáma eltérő a  $K$  és  $K'$  rendszerekben, de az integrálok értékét ez nem befolyásolja! Ennek alapján a Gauss-tételt tetszőleges inerciarendszerben használhatjuk az elektromos tér meghatározására, azaz

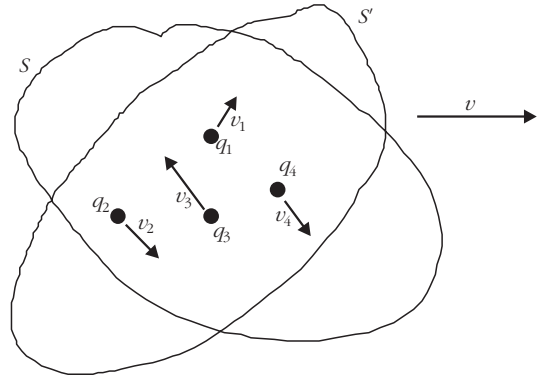
$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \oint_{S'} \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{A}' = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i.$$

## Mozgó töltés elektromos tere

Vizsgáljuk meg egy töltött síkkondenzátor homogén elektromos terét két különböző inerciarendszerből nézve. Tekintsük a 3. ábrát! A kondenzátorhoz vegyünk fel egy együttmozgó  $K$  vonatkoztatási rendszert! A feltöltött kondenzátor téglalap alakú,  $a$  és  $b$  élhosszúságú fegyverzetek ellentétes előjelű, azonos,  $\eta$  felületi töltéssűrűséggel helyezkedik el töltés. A kondenzátor töltése  $Q = a \cdot b \cdot \eta$ .

A kondenzátorfegyverzetek oldalai az  $x$ , illetve az  $y$  tengellyel legyenek párhuzamosak, így a  $z$  tengely merőleges a fegyverzetek síkjára!

Vegyünk fel továbbá egy  $K'$  vonatkoztatási rendszert, amelynek tengelyei párhuzamosak a  $K$  rendszer tengelyeivel és a  $K'$ ,  $K$ -hoz képest  $v$  sebességgel mozog az  $x$  tengely mentén pozitív irányban.



2. ábra. Két relatíve mozgó, zárt felület ugyanazt a Gauss-integrált eredményezi

A  $K$  laboratóriumi rendszerben a kondenzátoron kívül az elektromos térerősség zérus, a kondenzátorlemezek között kialakult  $\mathbf{E}$  elektromos tér  $z$  irányú és homogén.  $E$  mérőszámának meghatározásához alkalmazzuk a Gauss-tételt! Zárt felületnek vegyünk fel egy  $S$  egyenes hasábot, amelynek alaplappjai párhuzamosak a kondenzátor fegyverzeteivel és a hasáb tartalmazza az alsó fegyverzetet. A Gauss-integrál ebben az esetben csak a fegyverzet felülete fölött ad járulékot:

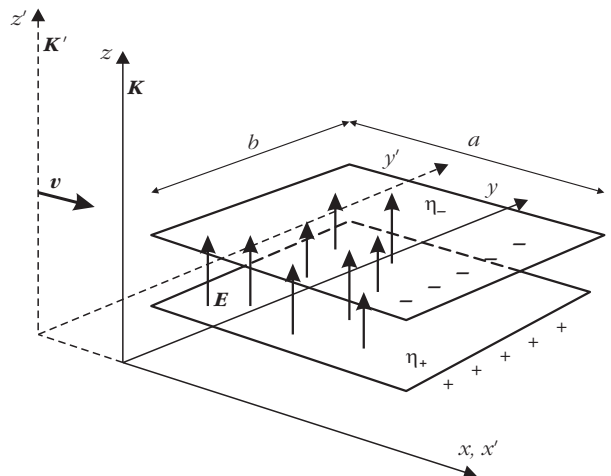
$$E \cdot a b = \frac{Q}{\epsilon_0}.$$

Ha bevezetjük az  $\eta = Q/ab$  felületi töltéssűrűséget, akkor  $E = \eta/\epsilon_0$ .

Nézzük meg, mit tapasztal az  $\mathbf{E}$  térre merőleges irányban mozgó,  $K'$ -beli megfigyelő!  $K'$ -ből nézve az  $S$  hasáb mozog, de ettől még alkalmazhatjuk rá a Gauss-tételt. Mivel  $K'$ -ben rendszerben a kondenzátor az  $x'$  tengely mentén  $-\mathbf{v}$  sebességgel mozog, az  $a$ ,  $b$  oldalú téglalap  $x'$  tengellyel párhuzamos,  $a$  oldala kontrakciót szenved, és  $K'$ -beli hossza

$$a' = a \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

3. ábra. Töltött síkkondenzátor elektromos tere a  $K$  és  $K'$  vonatkoztatási rendszerekből



értéket vesz fel. Mivel a kondenzátorlemezekon lévő töltés mennyisége invariáns, és a kondenzátorlemezek területe  $K'$ -ben kisebb, mint  $K$ -ban – ezért a  $K'$ -ben ugyanaz a töltés kisebb felületen oszlik el. A  $K'$ -beli töltéssűrűség;

$$\eta' = \frac{\eta}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

tehát nagyobb, mint a  $K$  rendszerben mérhető. A továbbiakban alkalmazzuk a

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

jelölést. A  $K'$ -beli elektromos térerősség – a Gauss-tétel alapján – tehát;

$$E_{\perp}' = \frac{\eta'}{\epsilon_0} = \gamma E_{\perp}.$$

A  $\perp$  jel arra utal, hogy a vizsgált elektromos tér iránya merőleges a  $v$  sebességre. Mivel  $\gamma > 1$ , a  $K'$ -ben erősebb elektromos teret tapasztalunk, mint a  $K$ -ban,

$$E_{\perp}' > E_{\perp}.$$

Ha a  $K'$  rendszer a  $z$  tengely mentén mozog  $K$  rendszerhez képest, akkor az elektromos tér és a sebesség vektorai párhuzamosak. Ebben az esetben a kondenzátorfegyverzetek  $a$  és  $b$  oldalai merőlegesek a sebesség irányára. A sebességre merőleges oldalak nem szenvednek Lorentz-kontrakciót. Ennek következtében mind a  $K$  és  $K'$ -beli töltéssűrűség, mind az elektromos térerősség megegyezik. Vagyis;

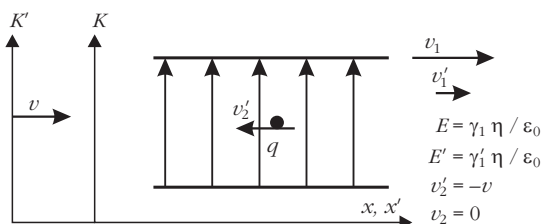
$$E_{\parallel} = E_{\parallel}'.$$

Általában elmondható, ha  $K$  egy  $q$  elektromos töltés, vagy töltésrendszer sajátrendszere, és a  $q$  töltés terét  $K$ -ban  $\mathbf{E}_0$ -val jelöljük, akkor egy  $K$ -hoz képest  $v$  sebességgel mozgó  $K'$  rendszerből nézve a  $q$  töltés  $\mathbf{E}'$  elektromos terének a  $v$  sebességre merőleges, illetve párhuzamos komponense az alábbi módon fejezhető ki  $\mathbf{E}_0$ -val:

$$\begin{aligned} E_{\perp}' &= \gamma \cdot E_{0\perp}, \\ E_{\parallel}' &= E_{0\parallel}. \end{aligned} \quad (1)$$

A levezetett összefüggés nem más, mint az elektromos tér Lorentz-transzformációja. A  $K'$  rendszerben,

4. ábra Kondenzátor és ponttöltés kölcsönhatása a  $K$  és a mozgó  $K'$  vonatkoztatási rendszerben



a mozgó töltés keltette mágneses teret most figyelmen kívül hagyjuk, hiszen annak létét szeretnénk a későbbiekben bizonyítani.

## Az erő Lorentz-transzformációja

Az elektrosztatikából ismert, hogy egy  $\mathbf{E}$  elektromos térben nyugalomban lévő  $q$  töltésre  $\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$  Coulomb-erő hat. Mekkora ez az erő, ha a  $q$  töltés mozog az  $\mathbf{E}$  térben? A kérdésre – helyettünk – választ ad a speciális relativitáselmélet. Az inerciarendszerek egyenértékűsége azt jelenti, mindegy, hogy akár a töltés saját rendszerében írjuk le a Coulomb-kölcsönhatás jelenségét, akár egy olyan rendszerben, ahol a töltés  $v$  sebességgel mozog; a leírás ugyanarra az eredményre vezet.

Vizsgáljuk meg a relativitáselmélet válaszát kicsit részletesebben! Írjuk fel két különböző inerciarendszerben a  $q$  töltésre ható Coulomb-erőt és hasonlítsuk össze a két erőt. Kisebbs nehézséget jelent mindössze, hogy az erő nem Lorentz-invariáns mennyiség. Emiatt nem hasonlíthatjuk össze közvetlenül a  $q$  töltésre ható, két különböző inerciarendszerben tapasztalt erő mérőszámát. Azokat előbb azonos rendszerbe kell transzformálni. Ez nem okoz gondot, mert a relativisztikus dinamika ismeri az erő Lorentz-transzformációját, amely a következő szabályt követi:

Ha a  $K$  rendszer egy test saját rendszere, és  $K$ -ban  $\mathbf{F}$  erő hat a testre, akkor egy  $K$ -hoz képest  $v$  sebességgel mozgó  $K'$  rendszerben a testre ható  $\mathbf{F}'$  erő a  $v$  sebességre merőleges, illetve párhuzamos komponense az alábbi módon fejezhető ki  $\mathbf{F}$ -fel:

$$\begin{aligned} F_{\perp}' &= F_{\perp}/\gamma, \\ F_{\parallel}' &= F_{\parallel}. \end{aligned} \quad (2)$$

Ha egy  $K$  és egy  $K'$  inerciarendszerben a (2) egyenletet kielégítő  $\mathbf{F}$  és  $\mathbf{F}'$  erőket tapasztaljuk, akkor a kölcsönhatás a két rendszerben azonos.

## Mozgó töltések Coulomb-kölcsönhatása

A *Mozgó töltés elektromos tere* fejezetben bemutatott példánál maradva, tekintsük ismét egy töltött síkkondenzátor és a belsejében elhelyezkedő ponttöltés kölcsönhatását. Most egy olyan  $K'$  vonatkoztatási rendszert választunk, amely egyik töltésnek sem saját rendszere. Írjuk fel ebben a  $K'$  rendszerben a kondenzátor terében lévő  $q$  töltésre ható Coulomb-erőt!

A töltött kondenzátor, amelynek felületi töltéssűrűsége saját rendszerében  $\eta$ , illetve a  $q$  ponttöltés a  $K'$  vonatkoztatási rendszerben  $v_1'$ , illetve  $v_2'$  sebességgel az  $x'$  tengely mentén mozognak (4. ábra). A  $K$  vonatkoztatási rendszerben a kondenzátor  $v_1$ , a ponttöltés az egyszerűség kedvéért  $v_2 = 0$  sebességgel mozog az  $x$  tengely mentén.  $K$  tehát a  $q$  töltés nyugalmi rendszere.

A  $q$  töltésre a  $K$ -ban  $v_1$  sebességgel mozgó kondenzátor elektromos tere hat

$$F = E \cdot q$$

erővel, a  $K'$  rendszerben a  $q$  töltés mozog, az ott ható  $F'$  erőt pedig keressük

$$F' = E' \cdot q + F'_{RC}$$

alakban. Itt  $F'_{RC}$  egy esetleges „relativisztikus Coulomb-erőt” szimbolizál.

Az  $F'$  erőt nem ismerjük, de tudjuk, hogy  $F'$ -t a  $K$  rendszerbe transzformálva, annak meg kell egyeznie az ott tapasztalt  $F$  erővel. Ha a Coulomb-kölcsönhatás Lorentz-invariáns, akkor az  $F'_{RC}$  tag zérus lesz és a Coulomb-erő minden rendszerben a rendszerben tapasztalt elektromos térerősség és a töltés szorzata;  $F = E \cdot q$  alakú.

Hogy összehasonlíthassuk  $F$ , illetve  $F'$  mérőszámait, transzformáljuk  $F'$ -t a  $K$  rendszerbe, a  $q$  töltés nyugalmi rendszerébe! A transzformált erő a (2) egyenlet alapján

$$\gamma \cdot F' = q \cdot \gamma \cdot E' + \gamma \cdot F'_{RC}$$

A speciális relativitáselmélet értelmében  $a$  transzformált erőnek egyenlőnek kell lenni  $F$ -fel, tehát:

$$E \cdot q = \gamma \cdot (E' \cdot q + F'_{RC})$$

Fejezzük ki ebből az önkényesen felvett  $F'_{RC}$  tagot:

$$F'_{RC} = \frac{E \cdot q}{\gamma} - E' \cdot q$$

Állítsuk elő az  $E$  és  $E'$  térerősségeket a kondenzátor nyugalmi rendszerében vett töltéssűrűségével! Mivel a kondenzátor mind  $K$ , mind  $K'$  rendszerben a tér irányára merőlegesen mozog, az  $F$  és az  $F'$  erő kifejezésében szereplő térerősségek a megfelelő rendszerben:

$$E = \gamma_1 \cdot \eta / \epsilon_0,$$

$$E' = \gamma'_1 \cdot \eta / \epsilon_0.$$

A különböző indexekkel jelzett  $\gamma$ -k a bennük szereplő sebességek indexét viselik.

$$F'_{RC} = \frac{q \cdot \eta}{\epsilon_0} \left( \frac{\gamma_1}{\gamma} - \gamma'_1 \right).$$

A jobb oldalon  $E'$ -t kiemelve;

$$F'_{RC} = E' \cdot q \left( \frac{\gamma_1}{\gamma \cdot \gamma'_1} - 1 \right). \quad (4)$$

Általában,  $\gamma_1 \neq \gamma \cdot \gamma'_1$ , ezért  $F'_{RC} \neq 0$ . A kapott eredmény azt jelzi, hogy a Coulomb-kölcsönhatás nem Lorentz-invariáns.

Felhasználva  $\gamma$  definícióját és a sebesség Lorentz-transzformációját:

$$v_1 = \frac{v'_1 + v}{1 + \frac{v'_1 \cdot v}{c^2}},$$

kiejtjük  $v_1$ -et, majd további algebrai átalakítások után a (4) egyenlet jobb oldalán álló tényező új alakjára

$$\left( \frac{\gamma_1}{\gamma \cdot \gamma'_1} - 1 \right) = \frac{v'_1 \cdot v}{c^2}$$

eredményt kapjuk. Tehát,

$$F'_{RC} = E' \cdot q \frac{v'_1 \cdot v}{c^2}.$$

Használjuk ki, hogy az általunk vizsgált elrendezésben (4. ábra)  $v'_2 = -v$ . Ezzel,

$$F'_{RC} = -E' \cdot q \frac{v'_1 \cdot v'_2}{c^2}.$$

Ezzel  $F'_{RC}$  relativisztikus Coulomb-erőt vesszős mennyiségekkel fejeztük ki, azaz a  $K'$  rendszerhez definiáltuk. Mivel  $v'_1$  és  $v'_2$  a kölcsönható töltések  $K'$ -beli sebességét jelentik, látható, hogy  $F'_{RC}$  bármely kölcsönható töltés saját rendszerében zérus. Csak mozgó töltések között lép fel!

Mivel  $F'$ -t  $F' = E' \cdot q + F'_{RC}$  alakban vettük fel, felírhatjuk a  $K'$  rendszerben a speciális relativitáselmélet alapján, saját példánkban meghatározott értékét:

$$F' = E' \cdot q \left( 1 - \frac{v'_1 \cdot v'_2}{c^2} \right).$$

Látható, hogy  $F'_{RC} E' \cdot q$ -val ellentétes irányú, és hozzá képest relativisztikusan kis mennyiség. Laboratóriumi viszonyok között, ahol  $v'_1$  és  $v'_2 \ll c$ , az  $F'_{RC}$  elhanyagolható az  $E' \cdot q$  Coulomb-erő mellett.

## Diszkusszió

Vizsgáljuk meg és elemezzük az  $F'_{RC}$  relativisztikus Coulomb-erő jelentését a töltött kondenzátor és a ponttöltés példáján.

Ne feledjük, hogy a vizsgált  $K'$  rendszerben a  $v'_1$  és  $v'_2$  sebességvektorok párhuzamosak egymással, és merőlegesek az  $E'$  elektromos térerősségvektorra. Ebben az esetben a vektoriális szorzás szabályai szerint a

$$-E' \cdot v'_1 \cdot v'_2 = v'_2 \times (v'_1 \times E').$$

Ekkor az  $F'_{RC}$  erő vektori alakja

$$F'_{RC} = q \frac{v'_2 \times (v'_1 \times E')}{c^2}.$$

Vezessük be a

$$B' = \frac{v'_1 \times E'}{c^2}$$

jelölést! Ekkor a „Coulomb-erő relativisztikus járuléka” a:

$$\mathbf{F}'_{RC} = q \cdot \mathbf{v}'_2 \times \mathbf{B}'$$

alakba írható. Mindenki felismeri, hogy ez nem más, mint a  $v'_2$  sebességgel, a  $B'$  indukciós térben mozgó,  $q$  ponttöltésre ható Lorentz-erő.

Eljutottunk a kitűzött célhoz. Beláttuk, hogy a Coulomb-kölcsönhatás akkor Lorentz-invariáns, ha a mozgó töltések Coulomb-kölcsönhatásakor fellép egy relativisztikus erő, ami nem más, mint a  $K'$ -ben  $v'_2$  sebességgel mozgó  $q$  ponttöltésre ható Lorentz-erő.

Az  $F'_{RC}$ -erő tehát a jól ismert valóság, a mozgó töltések között fellépő, mágneses kölcsönhatás, vagy Lorentz-erő. A speciális relativitáselmélet szintézist teremt az elektromos és mágneses kölcsönhatás között. Eszerint a mágneses kölcsönhatás a Coulomb-kölcsönhatás része, a mozgó töltések között fellépő, rela-

tivisztikus erő, amely biztosítja az elektromos töltések együttes (Coulomb–Lorentz-) kölcsönhatásának vonatkoztatási rendszertől való függetlenségét!

Másképp fogalmazva, a Coulomb-törvényből és a speciális relativitáselméletből levezethető a mozgó töltések mágneses kölcsönhatása.

Az itt bemutatott speciális töltéskonfigurációt megvalósító példával azonos eredményre vezetnek az általánosan, két ponttöltés Coulomb-kölcsönhatására végzett számítások. A *Landau–Lifsic Elméleti Fizika*, II. kötetben felírt, két ponttöltés Coulomb-kölcsönhatására vonatkozó Lagrange-függvényből a Lorentz-erő a fenti példával hasonló módon adódik.

Irodalom:

E. M. Purcell: *Electricity and Magnetism*. Berkeley Physics Course, vol. 2. 1985. ISBN 0-07-004908-4

L. Page, *American Journal of Science* XXXIV (1912) 57.

L. D. Landau, E. M. Lifsic: *Elméleti Fizika*. II. kötet, p. 222. Tankönyvkiadó, Budapest, 1976.

## BIZTOS-E, HOGY AZ ENERGIA MEGMARAD?

HRASKÓ PÉTER

PTE Elméleti Fizika Tanszék

Mielőtt megpróbálnánk válaszolni, pontosítsuk a kérdést: elegendő-e az empirikus tények (megfigyelések) ahhoz, hogy teljes bizonyossággal levonhassuk belőlük az energia megmaradását. Ha ebben a szellemenben értjük valaminek a bizonyosságát (nevezzük ezt *empirikus bizonyosságnak*), a kérdésünkre csak tagadó választ adhatunk, mert elszigetelt, egyedi tényekből sohasem lehet általános érvényű következtetést levonni. A bizonyosságnak ilyen szigorúan aszkéttikus értelmezéséhez tartva magunkat csak megtörtént egyedi tényeket tekinthetnénk biztosnak. *Elengettem ezt a krétadarabot és leesett a földre*. Biztos, hogy leesett? Erre válaszolhatjuk, hogy biztos, mert mindannyian láttuk, tapasztaltuk. De most nézzük ezt a kijelentést: *Ha a földön állva elengedek egy krétadarabot, biztos, hogy le fog esni*. A mindennapok gyakorlatában és a tudományos praxisban is ezt természetesen szintén igaz állításnak tekintjük, de ezzel túllépünk az empirikus bizonyosság szabta korlátokon, hiszen abból, hogy egy elengedett tárgy eddig mindig leesett, logikai alapon nem következtethető ki, hogy ezentúl is mindig le fog esni.

Ez az egyszerű példa mutatja, hogy ítéleteinket, viselkedésünket, elvárásainkat a bizonyosságnak valójában tágabb fogalmára alapozzuk, mint az empirikus bizonyosság, mert bizonyosnak tekintjük, hogy ami eddig már nagyon sokszor kivétel nélkül mindig bekövetkezett, ezután is be fog következni. Ha tehát tekintettel akarunk lenni az emberi gyakorlat követelményeire is, a bizonyosságnak az empirikusnál általánosabb fogalmával kell operálnunk.

Nevezzük ezt a tágabb jelentésű bizonyosságot *induktív bizonyosságnak*, mert azt a fajta érvelést, amely az egyedi esetekből az általános törvényszerűségekre következtet, induktívnak szokás hívni, és térjünk újra vissza a címben feltett kérdésünkre: biztos-e, hogy az energia megmarad. Az induktív bizonyosságot tartva szem előtt azt kell mondanunk, ha igaz az, hogy nagyszámú eddigi tapasztalatunk szerint az energia kivétel nélkül mindig megmaradt, akkor az energiamegmaradást biztosnak tekinthetjük. De amikor az energiamegmaradást a szabadesés előbb tárgyalt példájával összehasonlítjuk, tárgyilagosan el kell ismernünk, hogy *a két eset között óriási fokozatbeli különbség van*: az elejtett tárgyak zuhanását nap mint nap folyamatosan megfigyeljük, míg az energiamegmaradás nagy pontosságú ellenőrzése speciálisan megtervezett kísérletet igényel.<sup>1</sup> Magának az energiának a fogalmával is csak az iskolában ismerkedünk meg, nem tapad hozzá olyan érzékletes tapasztalatunk, mind a szabadeséshez. Az energiamegmaradást igazoló kísérleteknél továbbá elkerülhetetlenül előjön a mérési pontosság kérdése is, és olyan megfigyelés biztosan nem létezik, amely az energiamegmaradást abszolút pontossággal (mérési hiba nélkül) igazolta volna.

Arra a következtetésre jutunk tehát, hogy amikor a fizikusok azt állítják, hogy az energiamegmaradás az egyik legjobban megalapozott természeti törvény, ezen *nem az induktív bizonyosságot* értik. A természettudo-

<sup>1</sup> A legismertebb J. P. Joule kísérletsorozata, amelyben a hő mechanikai egyenértékét határozta meg.

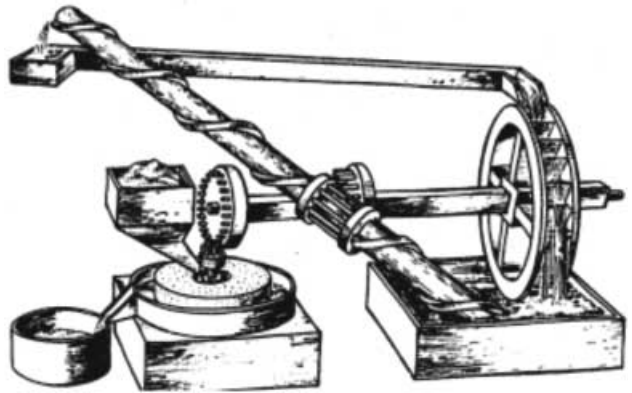
mánynak abból az életszerű gyakorlatából indulnak ki, amely a természettörvényekre vonatkozóan a bizonyosság helyett a *plauzibilitás* (híhetőség, elfogadhatóság) fogalmával operál, és felismeri, hogy a plauzibilitásnak fokozatai vannak: egy fizikai törvény lehet rendkívül plauzibilis, közepesen vagy kevéssé plauzibilis. A beszédmódot világosabbá tehetjük, ha a plauzibilitás mértékét a (0,1) intervallumba eső számmal fejezzük ki úgy, hogy az 1-et a biztos érvényességhez, a 0-t a biztos érvénytelenséghez rendeljük. A feladatunk tehát az, hogy megvizsgáljuk, milyen alapon minősítik a fizikusok az energiamegmaradást egészen különlegesen plauzibilis törvénynek, vagyis miért rendelnek hozzá az 1-től alig különböző plauzibilitás értéket.

Az energiamegmaradás mellett szóló érveket öt csoportra lehet osztani:

- Minden eddig tervezett és elkészített örökmozgó működésképtelen volt;
- A tétel előre nem látott kritikus szituációkban is a megoldás kulcsának bizonyult;
- Egy sor atomfizikai kísérlet alapul az energiamegmaradás nagyon pontos teljesülésén;
- Az elvnek kulcsszerepe van fontos technikai alkalmazásokban;
- Az energiamegmaradás a mechanikában és az elektrodinamikában levezethető a Newton-egyenletről és a Maxwell-egyenletekből, sőt elméletileg sikerült megmutatni, hogy ez a törvény mindig érvényes, amikor a körülmények időben nem változnak.

A továbbiakban ezeket az érveket vizsgáljuk meg. A negyedike azonban nem térünk ki külön, mert a példák (hőerőgépek, robbanó motorok, elektromos hálózatok és berendezések stb.) közismertek. Ezek a példák külön-külön talán nem tekinthetők az energiamegmaradás nagypontosságú igazolásának (mert a pontatlanul kontrollált veszteségek miatt csak azt bizonyítják, hogy az energia magától *nem nő*), összességükben mégis nagyon erős érveket szolgáltatnak mellette.

Tudomásom szerint perpetuum mobiléről először egy i. sz. 5. századi szanszkrit kéziratban történik említés. A kézirat leírja, hogy ha egy nagy kerék peremén megfelelően kialakított zárt kamrákat higannyal töltünk meg és a kereket forgásba hozzuk, akkor örök időnkig forogni fog (a kéziratban nincs rajz). Az örökmozgók fénykora azonban ezer évvel később, a reneszánszban jött el. Rengeteg terv maradt ránk, a legismertebb talán *Robert Fludd* szerkezete 1618-ból (1. ábra), amely az archimedesi csavar vízfelemelő képességén alapul. De az éleselméjű szerkezetekkel párhuzamosan erősödik az a meggyőződés is, hogy ezek „csak papíron” működnek, a valóságban nem. *John Wilkins* püspök (1614–1672), aki a Royal Society egyik alapítója volt, meg is konstruált néhányat a javasolt örökmozgó szerkezetek közül. Megállapította, hogy egyik sem működik és arra a határozott következtetésre jutott, hogy örökmozgó nem létezhet. Száz év múlva a tudományos világ ezt már annyira biztosnak tekintette, hogy a Francia Tudományos Akadémia 1775-ben elhatározta, többet nem foglalkozik perpetuum mobilét tartalmazó beadványokkal. Az USA Sza-



1. ábra. Robert Fludd örökmozgó malma (1618)

badalmi Hivatala a 20. század elején ennél valamivel engedékenyebb volt: hajlandó volt foglalkozni örökmozgóra vonatkozó tervekkel, de csak azzal a feltétellel, ha azok zárt helyiségben legalább egy éven keresztül működtek. Mindeddig egyetlen ilyen találmányt sem nyújtottak be.

A sok sikertelen próbálkozás hatására a természetkutatókban és a feltalálókban fokozatosan kialakult az az *intuíció*, hogy ha a szerkezetet külső forrás (szél, vízáram, tűz) nem táplálja, akkor hamarosan leáll, mint ha valami „elfogyna” belőle. Ez a valami, ami „elfogy”, az energia első homályos, kvalitatív fogalma.

Elsőként a mechanikában sikerült tisztázni az energia pontos mibenlétét. De ehhez először precízen meg kellett fogalmazni, hogy mit értünk „munkán”. Ez a 19. század elejére tisztázódott: Az *út×erő* szorzatra a „munka” nevet először *J. V. Poncelet* használta 1826-ban. Az is kiderült, hogyan lehet egy mechanikai rendszerről „ránézésre”, a paramétereinek pillanatnyi értéke (vagyis a rendszer *állapota*) alapján megmondani, mennyi energia van benne. A rendszer energiája az egyes elemek mozgási és helyzeti energiájának az összegével egyenlő, és ezek kiszámítására konkrét képletek állnak rendelkezésünkre. Kiderült tehát, hogy az energia (*E*) a rendszer állapotának meghatározott függvénye,<sup>2</sup> és a rendszeren végzett munka (*A*) arányában nő, a rendszer által végzett munka arányában pedig csökken. Ha a rendszeren végzett munkát pozitívnak, a rendszer által végzett munkát pedig negatívnak tekintjük, ez a két állítás a következő kép-letben foglalható össze:

$$\Delta E = A. \quad (1)$$

A munkagép csak akkor működhet folyamatosan, ha valamilyen külső ágens a rendszer állapotát<sup>3</sup> (és ezzel az energiáját) állandóan fenntartja.

<sup>2</sup> Az energia tehát nem valamiféle láthatatlan, súlytalan „fluidum”, hanem a rendszert jellemző mennyiségekből egy meghatározott képlettel kiszámítható szám. A köztudatban azonban sokkal inkább fluidumként él. Sokan például úgy képzelik, hogy az élőlényeket a „bioenergia” úgy veszi körül, mint valami finom közeg.

<sup>3</sup> A munkagépek többnyire periodikus mozgást végeznek, ezért a külső ágensnek periodikusan kell visszaállítania ugyanazt az állapotot.

Első látásra ez a képlet *nem* azt fejezi ki, hogy az energia megmarad, hanem azt, hogy vagy lecsökken ( $A < 0$ , ha egy munkagép energiájáról van szó), vagy megnő ( $A > 0$ , ha a munka tárgyára vonatkoztatjuk). Azonban a munkavégzésben mindkét résztvevő egyaránt jelen van, és ha mindkettőt figyelembe vesszük, a képletből leolvashatjuk, hogy az energia megmarad, csak éppen átkerül a munkagépről a munka tárgyára. A munkagépből és a munka tárgyából álló *teljes rendszer*  $\mathcal{E}$  energiája tehát megmarad:

$$\mathcal{E} = \text{konstans.} \quad (2)$$

Az energiamegmaradásnak ez a teljesen explicit formája kevésbé részletező, mint (1), de sok esetben éppen emiatt hatékonyabb: akkor is alkalmazható, amikor nem ismerjük azt a mechanizmust, amelynek révén az energia a rendszer egyik részéből átadódik a másikba.

Szigorúan véve a perpetuum mobile lehetetlenségéből is csak annyi következik, hogy az energia „magától” sohase nő, de azzal még összeférhetne, hogy folyamatosan csökken. A mechanika newtoni axiómái alapján azonban *bebizonyítható*, hogy a mechanikai jelenségek körében *megmarad*. Hosszú tévelygések után csak a 20. század elején vált általánosan elfogadottá, hogy az atomisztika alapján ez a kép a gázokra, folyadékokra és a szilárd közegekre is alkalmazható és ezek energiája szintén kiszámítható az állapotuk alapján, amelyet most a hőmérsékletük is jellemez. Egy mólnyi egyatomos ideális gáz energiáját például az

$$E = \frac{3}{2} k T$$

képlet határozza meg. Világossá vált, hogy a rendszer állapotát nemcsak a munka, hanem a hőátadás ( $Q$ ) is megváltoztatja.<sup>4</sup> Ha a rendszer által felvett hőt tekintjük pozitívnak, az (1) képletet így általánosíthatjuk:

$$\Delta E = Q + A. \quad (3)$$

A 20. század elejére általánosan elfogadottá vált, hogy a fizika akkor ismert ágaiban (a mechanikában, a termodinamikában, az elektrodinamikában, sőt az élő szervezet anyagcseréjében is<sup>5</sup>) az energia megmarad. Ennek ellenére, a század első harmadában mégis

<sup>4</sup> Ez a kép megmagyarázza, hogy a *hővesztés* csak a hasznos munkavégzés szempontjából jelent tényleg veszteséget, az energia szempontjából nem. Ez a felismerés vezetett el a *hatásfok* fogalmához. De az, hogy a hőátadás egyben energiaátadás is, megcsillantotta a *másodfajúnak* nevezett perpetuum mobile lehetőségét is, amely úgy működhetne, hogy közben az energia megmarad. Ha sikerülne mondjuk a tenger belső energiájának egy részét arra felhasználni, hogy hőátadással fenn lehessen belőle tartani egy munkagép állapotát, praktikusán korlátlan mennyiségű munkát lehetne a géppel végeztetni. Ma már tudjuk, hogy az entrópiánövekedés törvénye következtében másodfajú perpetuum mobilét sem lehet készíteni.

<sup>5</sup> R. Mayer éppen ezen a példán ismerte fel, hogy az energiamegmaradás törvénye nem korlátozódik a mechanikára, hanem általánosan érvényű.

bekövetkezett három olyan kritikus pillanat, amelyben ez a hit megingott, mert úgy tűnt, hogy bizonyos tapasztalati tényeket lehetetlen összhangba hozni az energiamegmaradással.

## A radioaktív hő eredete – az $E = mc^2$ képlet

1903-ban *Pierre Curie* kimutatta, hogy egy rádium minta minden grammja óránként annyi hőenergiát ad le, amennyi 140 gramm víz hőfokát 1 fokkal tudja megemelni. Ez kerekén 600 J, amely 60 kg tömeg 1 méter magasra történő felemeléséhez elég. Akkoriban már sejtették, hogy a radioaktivitás az atomok átalakulásával jár együtt, és néhány évvel később már tudták, hogy bomlás sémája  ${}_{88}\text{Ra}^{226} \rightarrow {}_{86}\text{Rn}^{222} + \alpha$ . A minta állapota tehát változik, de a probléma az volt, hogy az energia akkor ismert képletei között nem akadt olyan, amely ehhez az állapotváltozáshoz tartozott volna. Komolyan latolgatták azt a lehetőséget, hogy a radioaktivitás akkor még szinte teljesen ismeretlen világában az energia nem marad meg.

1905 szeptemberében publikált cikkében *Einstein* a relativitáselméletből kiindulva levezette az  $E = mc^2$  képletet és ezzel megmutatta, hogy a tömeg az energia egy formája. A cikke legvégén pedig megjegyezte, hogy a radioaktív bomlásban keletkező hő ezzel magyarázatot nyer, mert az  $E$ -be bele kell érteni a tömegben rejlő energiát is.<sup>6</sup>

Ebben az esetben célszerű az energiamegmaradás (2) formájából kiindulni. Az adott esetben ez azt fejezi ki, hogy a nyugvó rádium atom  $m_{\text{Ra}}c^2$  energiája egyenlő a bomlástermékek tömegében rejlő energiának és mozgási energiájuknak az összegével:

$$m_{\text{Ra}}c^2 = \text{mozgási energia} + (m_{\text{Rn}} + m_{\alpha})c^2. \quad (4)$$

A bomlástermékek tehát  $(m_{\text{Ra}} - m_{\text{Rn}} - m_{\alpha})c^2$  nagyságú mozgási energiával rendelkeznek, és ennek jelentős része hővé alakul, miközben lefékeződnek. A radioaktív bomlás során kiváló hő tehát nem azt bizonyítja, hogy az energiamegmaradás sérül, hanem – éppen ellenkezőleg – annak következménye, hogy az energia még ebben a vadonatúj jelenségkörben is megmarad.

## Az atomok és a fény kölcsönhatása

A fotonhipotézis története különös élességgel világít rá az energiamegmaradás univerzalitására és jelentőségére.

Einstein 1905-ben posztulálta a fénykvantumok létezését. Észrevette, hogy a fotoeffektus paradoxálisnak látszó törvényei könnyen megmagyarázhatók az energiamegmaradás alapján, ha feltételezi, hogy a

<sup>6</sup> A fosszilis tüzelőanyagokból is az  $E = mc^2$  képlettel összhangban termelődik energia, mert az égéstermékek tömege kisebb a tüzelőanyag és a felhasznált oxigén össztömegénél. A tömegváltozás azonban a  $c^2$  tényező nagysága miatt megfigyelhetetlenül kicsi.

fénysugárban az energia  $h\nu$  nagyságú kvantumokban terjed. Ekkor a kilépő elektron  $E$  energiáját az

$$E = h\nu + A$$

képlet határozza meg, amelyben  $A$  a kilépési munka, ez a képlet pedig számot ad arról a váratlan empirikus tényről, hogy a kilépő elektronok energiája nem a beeső fény intenzitásával, hanem frekvenciájával arányos.

Ezt az elképzelést azonban az elkövetkező húsz évben rajta kívül senki se fogadta el. Ha ugyanis a fény részecskékből állna, nem lehetne érteni az interferencia jelenségét. Einstein maga se tudta összeegyeztetni a fénykvantumokat az interferenciával, de azon az állásponton volt, hogy az energiamegmaradás a fontosabb, és majd ezen az alapon is sikerülni fog az interferenciát megérteni. Ebben igazra is lett, mert a kvantum-elektrodinamikában megszűnik az ellentét a fényenergia kvantáltsága és a fény interferenciaképessége között.

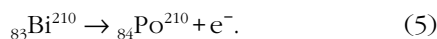
De a kvantum-elektrodinamikára még negyed századot kellett várni. Közben megszületett az atom Bohr-modellje, amely szerint az atom kvantumokban bocsátja ki vagy nyeli el a fényt, miközben egyik kvantumállapotból a másikba ugrik át. Ez tökéletesen összefér Einstein elgondolásával, hogy a fény is kvantumokból áll, de akkor ezt senki, még maga *Bohr* sem tartotta elképzelhetőnek.

A Bohr-modellt azonban valahogy mégis össze kellett egyeztetni az elektromágneses sugárzás elméletével (Maxwell elektrodinamikájával), és – mivel a fénykvantumokat sehogy se akarták elfogadni, – Bohr, *Kramers* és *Slater* (a kvantumelmélet hőskorának három nagy alakja) 1924-ben arra a következtetésre kényszerült, hogy az energiamegmaradás (az impulzus és a perdület megmaradásával együtt) *csak átlagban* teljesül, az egyedi atomi folyamatokban nem.

Ezt az elképzelést azonban már néhány hónap múlva megcáfolták, mert sikerült kísérletileg meggyőzően kimutatni, hogy az energia és az impulzus minden egyes elemi atomi folyamatban külön megmarad – az ilyen típusú megfigyelések azóta is az energiamegmaradás egyre pontosabb bizonyítékául szolgálnak.

## A béta-bomlás spektruma

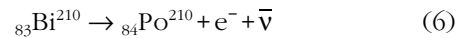
A múlt század húszas éveiben már jól tudták, hogy a béta-bomlásban a bomló atom elektron kibocsátással alakul át. Úgy gondolták, hogy például a 210-es bizmut-izotóp (régiesen rádium-E) bomlását a következő képlet fejezi ki:



Az  $E = mc^2$  képlet alapján a felszabaduló energia  $(m_{\text{Bi}} - m_{\text{Po}} - m_e)c^2$ -tel egyenlő. Ez az impulzusmegmaradásnak megfelelően megoszlik a két bomlástermék között, de – mivel  $m_{\text{Po}} \gg m_e$  – gyakorlatilag az elektron energiájával egyenlő.

A kilépő elektronnak tehát meghatározott energiával kellene rendelkeznie, de a tapasztalat szerint az energiája bizonyos valószínűséggel minden lehetséges értéket felvesz a nulla és a  $(m_{\text{Bi}} - m_{\text{Po}} - m_e)c^2$  között (vagyis a spektrum ebben az intervallumban folytonos).

A béta-bomlás elmélete abban az időben még nem létezett, és sokan gondolták azt, hogy ebben a folyamatban az energiamegmaradás tétele nem teljesül és az energia egy része elvész. Ebben azonban nem mindenki törődött bele. 1930-ban *W. Pauli* azzal a hipotézissel állt elő, hogy az energia a béta-bomlásban is megmarad, és a látszólag hiányzó energiát egy még ismeretlen részecske, a *neutrínó* viszi el, amelyet nagyon nehéz észrevenni, mert elektromosan semleges.<sup>7</sup> A bomlás helyes képlete tehát (5) helyett a következő:



Néhány évvel később *E. Fermi* ennek a feltevésnek az alapján részletesen kidolgozta a béta-bomlás (mai nevén gyenge kölcsönhatás) elméletét, amely egyebek között az elektronspektrum pontos alakját is megmagyarázza. Az elemi részek ma elfogadott klasszifikációja szerint az elektront kísérő részecskét a neutrínó antirészecskéjének tekintik és antineutrínónak hívják, ezért jelöltük  $\bar{\nu}$  helyett  $\bar{\nu}$ -vel.

A 20. század első harmadának ezek az eseményei végképp meggyőzték a fizikusokat arról, hogy az energiamegmaradást tapasztalatilag nagyon jól megalapozott természeti törvénynek tartásák. De ugyanebben a periódusban tisztán elméleti oldalról is fontos áttörés történt: *E. Noether* 1917-ben bebizonyította, hogy egy tetszőleges fizikai rendszer paramétereiből mindig képezhető egy olyan mennyiség, amely megmarad, ha a rendszert érő külső hatások időben változatlanok, és az ismert esetekben ez a mennyiség a rendszer energiájával egyenlő.<sup>8</sup> Egy zárt (izolált) rendszer energiája tehát mindig megmarad, mert ez a rendszer a zártság fogalmából következően időben változatlan körülmények között van.<sup>9</sup>

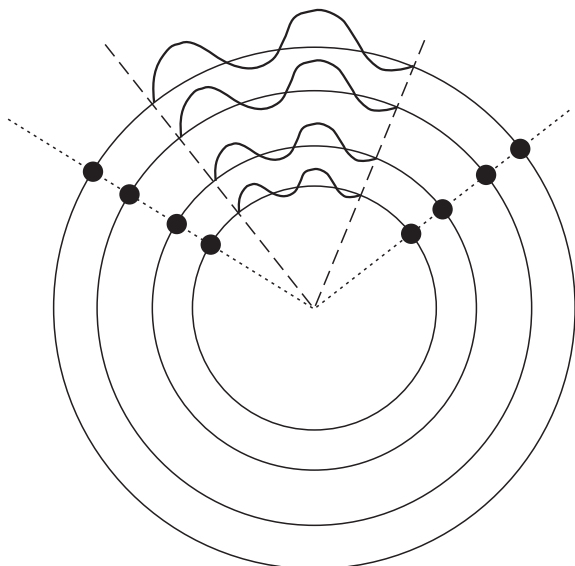
Ezzel befejeztük azoknak az érveknek a vázlatos ismertetését, amelyek alapján a fizikusok az energiamegmaradás tételét különlegesen jól megalapozottnak tekintik. A fizika újkori története arra tanít, hogy

<sup>7</sup> A neutrínót csak évtizedekkel később sikerült közvetlenül megfigyelni.

<sup>8</sup> Egy matematikai bizonyítás természetesen mindig valamilyen keretek között érvényes. Noether tétele azokra a klasszikus rendszerekre vonatkozott, amelyeknek a dinamikája megfogalmazható Lagrange-függvény segítségével. A tétel a kvantumelméletben is igaz marad, és minden eddig ismert fizikai rendszerre alkalmazható.

<sup>9</sup> Nagyon egyszerű példa a következő. Az asztalon meglékünk egy tárgyat, amely egy ideig csúszik, azután megáll. Ha az asztal lapja vízszintes, a potenciális energiája állandó, de a mozgási energiája lassan elfogy. A körülmények azonban nem tekinthetők állandónak, mert az asztal is, a tárgy is felmelegszik, tehát figyelembe kell venni a hőenergiát is, és – hogy a rendszert zártá tegyük – az asztalt is a rendszer részének kell tekinteni. Ebben a kiegészített rendszerben a mechanikai és a hőenergia összege állandó, vagyis a tárgy kezdeti mozgási energiája egyenlő a hő formájában megjelenő súrlódási energiával.





2. ábra. A körök az egyre nagyobb Világegyetemet szimbolizálják. A fényhullám hullámhossza, valamint a pontokkal jelzett két galaxis egymástól való távolsága a Világegyetem sugarával arányosan változik.

az ilyen jól megalapozott fizikai törvényekről nem szokott kiderülni, hogy mégis tévesek. De az rendszeresen bekövetkezik, hogy ha kilépünk a jelenségeknek abból a köréből, amelyben a tételt igaznak találtuk, számíthatunk rá, hogy módosításra szorul. Mint láttuk, az energiamegmaradás tétele túlélte legalább három ilyen kritikus periódust: azt, amelyben a klasszikus mechanikáról a termodinamikára, majd pedig a kvantumfizikára és a részecskefizikára terjesztették ki. Mindhárom esetben diadalmasan került ki a megpróbáltatásokból. De *kozmológiai méretekben* – úgy látszik – megkérdőjelezhető az érvényessége.

Ezt a következtetést a *kozmológiai vöröseltolódásból* lehet levonni, amely annak következménye, hogy minél hosszabb ideig utazik hozzánk a fénysugár (minél távolabbi galaxisból jön), annál nagyobbra nő a hullámhossza (annál inkább eltolódik a színe a vörös felé). Ha figyelembe vesszük, hogy a fény fotonokból áll, amelyeknek az energiáját az  $E = h\nu = hc/\lambda$  képlet határozza meg,<sup>10</sup> akkor nyilvánvaló, hogy a fénysugár energiája a terjedés közben fokozatosan csökken.

Az általános relativitáselmélet egyértelmű magyarázatot ad erre a jelenségre: az energiacsökkenés (hullámhossz-növekedés) oka a Világegyetem tágulása (2. ábra). Matematika nélkül ezt így lehet szemléltetni: ha a geometriai teret háromdimenziós helyett kétdimenziósnak tekintjük, akkor a táguló Világegyetemet egy felfúvódó léggömbhöz hasonlíthatjuk.<sup>11</sup> A léggömbre rajzolt pontok a galaxisok, közülük az egyik a mi Tejútunk, amelyben kétdimenziós laposlényekként éldegélünk. A többi galaxisról a fénysugár a gömb

felületén haladva<sup>12</sup> érkezik el hozzánk, és ahogy a gömb lassan felfúvódik, a sugarával arányosan nő a hullámhossza. Ugyanilyen arányban távolodnak a galaxisok is egymástól.

Ez a jelenség teljesen összefér a Noether-tétellel: a fény nyilvánvalóan időben változó körülmények között terjed, és ezért nem is kell, hogy az energiája megmaradjon. A tér-léggömb analógia alapján logikus arra gondolni, hogy a felfúvódásnál magának a geometriai térnek (a léggömbnek) az energiája is változhat és esetleg pont annyival nő, amennyi a fénysugár energiájából elvesz. De gondoljuk meg jobban, tényleg indokolt-e ez a várakozás. A Noether-tételből következik, hogy egy zárt (izolált) rendszer energiája megmarad, mert – mint mondtuk – ez a rendszer a zártság fogalmából következően időben változatlan külső körülmények között van. De a Világegyetemenek, mint egésznek, nyilván nincsenek „külső körülményei”, a Noether-tételnek ez a következménye tehát aligha alkalmazható rá. Ezért arra a kérdésre, hogy a fénysugárban és a geometriai tér görbületében tárolt teljes energia valóban megmarad-e, csak az általános relativitáselmélet konkrét egyenleteinek alapján lehet válaszolni. Az derül ki, hogy a geometriai teret (pontosabban téridőt) jellemző paramétereiből valóban képezhető egy olyan mennyiség, amely nagyon emlékeztet az energiára, és nagysága éppen annyival nő, amennyi energiát a fénysugár elveszít. Azonban ennek a mennyiségnek a tulajdonságai *nem minden szempontból* olyanok, mint amit az energiától elvárhatunk, ezért nem is energiának, hanem pszeudoenergiának hívják. Indokolt tehát az az óvatos megfogalmazás, hogy valóban kozmikus méretekben az energiamegmaradás érvényessége megkérdőjelezhető.

De baj ez? Csak akkor okozna gondot, ha ez a körülmény kétségessé tenné, amit az energiamegmaradásról korábban megállapítottunk, hogy ez a legjobban megalapozott természeti törvények egyike. Erről azonban szó sincs. Tegyük fel ugyanis, hogy földi viszonyok között az energiamegmaradás ugyanolyan mértékben sérül, mint a kozmológiai vöröseltolódásban. Ebben a jelenségben a hullámhossz időegységre jutó relatív csökkenését a *Hubble-konstans* határozza meg, amelynek hozzávetőleges tapasztalati értéke  $H \approx 10^{-10} \text{ év}^{-1}$ -nel egyenlő,<sup>13</sup> vagyis a kozmológiai vöröseltolódásban a hullámhossz egy év alatt körülbelül 10 milliárdod részével csökken. Ilyen arányban sérülhetne az energiamegmaradás törvénye, ha mértéke a kozmológiai vöröseltolódásnak felelne meg. Ez rendkívül kismértékű sérülés, de az elméleti megfontolások abba az irányba mutatnak, hogy a Világegyetem tágulása a lokális jelenségeket még ennyire se befolyásolja, sőt az is lehet, hogy egyáltalán nincs rájuk hatással.

<sup>10</sup> A  $\nu$  a frekvencia, a  $\lambda$  pedig a hullámhossz. A két mennyiség és a fénysebesség között a  $\nu\lambda = c$  képlet létesít kapcsolatot.

<sup>11</sup> Mai tudásunk szerint a Világegyetem valószínűleg nem zárt gömbhöz, hanem végtelen síkhoz hasonlít. De ez is tágul, ezért a léggömbhöz hasonlatból levont következtetések rá is ugyanúgy érvényesek.

<sup>12</sup> A gömb belseje ugyanis valójában nem létezik, a gömb felszíne az egész geometriai térünk kétdimenziós analógója.

<sup>13</sup> A Hubble-állandót többnyire vegyes dimenzióban írják fel, ekkor  $H \approx 71 \text{ km/s}$  megaparsecenként.

Az érvelésünk végére értünk, a címben feltett kérdésre válaszoltunk. Azt találtuk, hogy az energiamegmaradás törvénye se empirikus, se induktív értelemben sem tekinthető bizonyosnak, de rendkívül jól megalapozott törvény, amelynek plauzibilitását az 1-hez nagyon közeli értékkel fejezhetjük ki. De azért marad egy praktikus probléma. Mit válaszoljunk annak, aki felteszi nekünk a címbeli kérdést, azonban *nincs módunk* arra, hogy olyan viszonylag részletes választ adjunk rá, mint ebben a cikkben. Ez gyakran megtörténhet a legkülönbözőbb okokból: nincs elég időnk, a kérdezőt nem érdekli a kérdés annyira, hogy türelmesen végighallgasson egy hosszú fejtegetést, vagy ehhez nincsenek még meg a szükséges előismeretei. Ez utóbbi vonatkozik a középiskolára, még ab-

ban az esetben is, amikor a kérdést egy kifejezetten érdeklődő tanuló teszi fel a tanárának. Szerintem ilyen szituációban, amikor csak rövid választ adhatunk, amely elkerülhetetlenül leegyszerűsítő, azt kell válaszolnunk, hogy igen, az energia biztosan megmarad. Ezzel csak egészen minimális mértékben vezetjük félre a kérdezőt, míg ha azt válaszolnánk, hogy az energia nem marad meg biztosan, tökéletesen helytelen irányba indíthatnánk el a gondolkodását. A cél azonban tagadhatatlanul az, hogy már az iskolában olyan felfogásban tanítsuk az energiamegmaradást, amely a lehető legjobban megfelel a plauzibilitáson alapuló történeti értékelésnek. A képletekkel való számolás gyakorlása az *általános oktatásban* csak akkor indokolt, ha ennek a célnak a szolgálatában áll.

## UNIVERZALITÁSI OSZTÁLYOK ÉS FÁZISÁTALAKULÁSOK KOMPLEX, NEMEGYENSÚLYI RENDSZEREKBEN

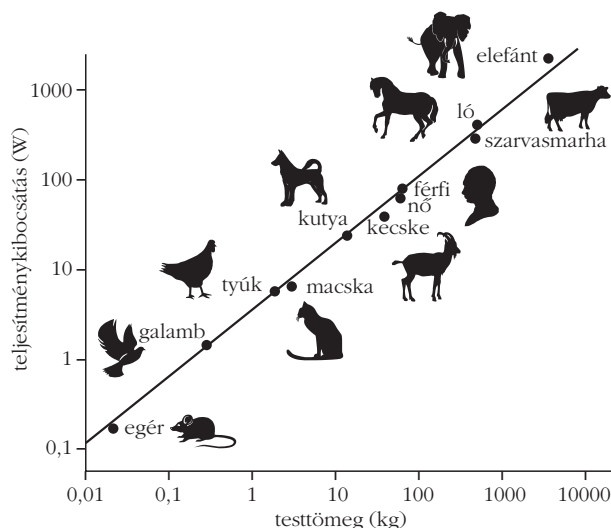
Ódor Géza

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

### Skálainvariancia és univerzalitások

Skálainvariancia a világ jelenségei között gyakran megfigyelhető, nemcsak a fizikában, hanem más természettudományokban, sőt a társadalmi jelenségeknél is. Erre egyszerű példa az emlős állatok fajlagos teljesítményleadásának testtömegtől való  $1/4$  hatványkitevős függése, amely 5 nagyságrenden keresztül teljesül (1. ábra). Ezt egyszerű geometriai átskálázással nem lehet megmagyarázni. Feltéve ugyanis, hogy a testfelszín (amely a disszipált energiá-

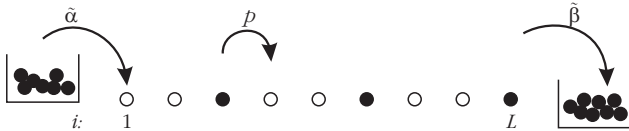
1. ábra. Az emlős állatok megfigyelt teljesítménykibocsátása a testtömeg függvényében nemtriviális, „egyedegvedes” skálatörvényre írható le.



val arányos) a mérettel  $L^2$ -esen, a tömeg pedig  $M \sim L^3$  módon növekszik, a fajlagos disszipált teljesítménynek  $M^{2/3}/M = M^{-1/3}$ , egyharmados kitevőjű skálázást kellene követnie. Azonban az élőlények nem struktúra nélküli szabályos geometriai alakzatok, így az  $M^{1/4}$ -es skálafüggvényt az önhasonló, elágazó, fraktál jellegű belső keringési rendszerekkel lehet megmagyarázni. Megjegyezzük, hogy önhasonló (skálamentes) hálózatokat sok más helyen fedeztek fel az utóbbi években és ezáltal nemtriviális hatványfüggvényviselkedések leírása valósulhatott meg (például az internetes adatforgalomban).

Az átskálázási invariancia természetes módon jelenik meg másodrendű fázisátalakulásoknál, mert ilyenkor a korrelációs hossz divergenciája miatt a mikroszkopikus részletek (kölsönhatások) nem tudják befolyásolni a globális viselkedést. Ilyenkor a vizsgált anyag ugyanazt a tulajdonságot mutatja különböző skálákon (nagyításokon).<sup>1</sup> Ezért a skálainvarianciát először az egyensúlyi rendszerek kritikus pontjai környékén sikerült jól leírni a statisztikus fizika módszereivel, elsősorban a renormalizációs csoport elmélettel. Az átskálázási invariancia esetén a sok szabadságfokú egyensúlyi rendszerek (illetve az ezeket leíró modellek) pusztán a kollektív viselkedés alapján univerzalitási osztályokba sorolhatóak. Az osztályok jellemezhetőek (vagy definiálhatóak) például a skálafüggvények exponensei által, amelyek között a szimmetriák bizonyos skálatörvényeket rögz-

<sup>1</sup> Legalábbis egy bizonyos skálatartományban, a mikroszkopikus egység (pl. rácállandó) és a rendszerméret között.



2. ábra. Az egydimenziós ASEP-modell. Bal szélről részecskéket injektálunk  $\alpha$  valószínűséggel, amelyek  $p$  valószínűséggel ugrálnak jobbra, ha üres szomszédot találnak. Ezek  $\beta$  valószínűséggel hagyatják el a rendszert, ha elérik az  $L$ -edik helyet.

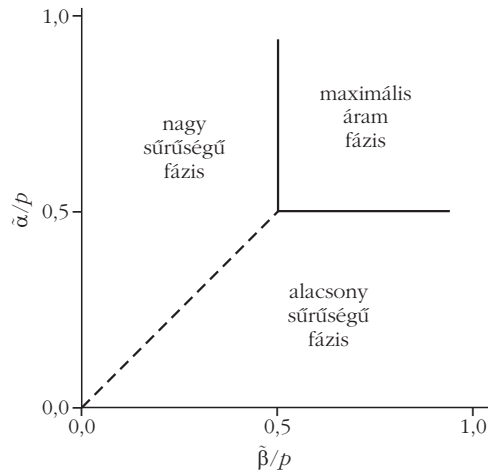
zítanak. Ezáltal a skálázó mennyiségek exponenseinek egy jelentős része nem független.<sup>2</sup>

Mitöb, a kétdimenziós átskálázható modellek egy része még általánosabb, lokális skálainvarianciát is mutat; a komplex analitikus függvények konformális leképezése szerint. Ez annyira erős szimmetria, hogy a konform invariáns modellek összes  $n$ -pont korrelációs függvényét rögzíti. A sikereken felbuzdulva remény volt ezen elvek nemegyensúlyra való kiterjesztésére, azonban hamar kiderült, hogy itt más tényezők is fontos szerephez jutnak. Ennek illusztrálására néhány olyan példát említek, amelynek kutatásában személyesen is részt vettem.

## Nemegyensúlyi rendszerek

Az egyensúlyi rendszerek statisztikus fizikájában megtanultuk, hogy az univerzalitási osztályokat olyan globális tulajdonságok határozzák meg, mint a térbeli dimenziók vagy a szimmetriák. A való élet jelenségei azonban többnyire nemegyensúlyiak, ugyanakkor skálaviselkedést gyakran mutatnak. Ezért felmerült a renormalizációs csoport és univerzalitások elméletének kiterjesztése. Kezdetben egyensúlyból kibillentett egyszerű modellek dinamikáit vizsgálták. Ilyen például az egyensúlyi Ising-modell, amelyben a fel ( $\uparrow$ ) vagy le ( $\downarrow$ ) állapotot felvevő klasszikus „spin”-változók legközelebbi szomszéd vonzó kölcsönhatással bírnak. Ez egy erősen anizotróp mágnest ír le, amelyben a hőmérséklet változtatva folytonos fázisátmenet jön létre egy rendezetlen (paramágneses) és egy rendezett (ferromágneses) állapot között. A modell különböző dinamikákkal való kiterjesztései a kinetikus Ising-modellek. Ez alatt azt értjük, hogy nemcsak az egyensúlyi állapotban levő rendszerrel foglalkozunk, hanem annak időfejlődését is vizsgáljuk azáltal, hogy előírjuk, hogy milyen módon történjen a spinek változtatása. Például ha a mágnesezettség megmaradását nem várjuk el, akkor lehet egyszerű spin-flipp ( $\uparrow \leftrightarrow \downarrow$ ) Glauber-dinamikánk, vagy a megmaradó esetben spincserés ( $\uparrow \downarrow \leftrightarrow \downarrow \uparrow$ ) Kawasaki-dinamikánk. A különböző dinamikák különböző relaxációs időket okoznak, amellyel a rendszerek valamilyen egyensúlyi vagy stacionárius állapot felé fejlődnek.

Később külső terekkel hajtott, teljesen nemegyensúlyi modelleket kezdtek el kutatni. Ilyen rendszerek-



3. ábra. Az ASEP-modell fázisdiagramja. A szaggatott vonal elsőrendű, a folytonos vonal folytonos fázisátalakulást jelöl.

ben áramlások jönnek létre, és még egy stacionárius állapot sem biztosított. Az egydimenziós modellek, mint például az anizotróp kizárási folyamat (ASEP), amelyben részecskék ( $A$ ) anizotróp diffúziós mozgást végeznek úgy, hogy egy helyen legfeljebb egy lehet ( $A\emptyset \rightarrow \emptyset A$ ) gyakran analitikusan is kezelhetőek (lásd 2. ábra). Ilyen típusú modellekben a határfeltételek változtatásával különböző skálaviselkedéseket mutató fázisok jönnek létre, amelynek generikus fázisdiagramját a 3. ábra mutatja.

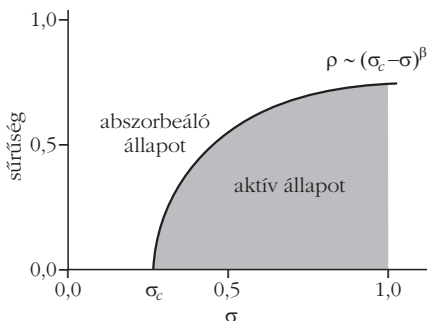
Ezzel szemben több térbeli dimenzió esetén, mint például az úgynevezett hajtott rácsgázokban, napjainkig sem tisztázott problémák merültek fel. Ezek a modellek a spin-cserés ( $\uparrow \downarrow \leftrightarrow \downarrow \uparrow$ ) kinetikus Ising-modell olyan anizotróp változatai, amelyekben egy külső, például elektromos tér (spin) áramokat és nemegyensúlyi viselkedést generál. Az alapvető probléma abból ered, hogy a tér-idő anizotrópiája mellett a tér különböző irányai is másként skálázódnak (anizotrópok) ilyen modellekben.

Valamivel egyszerűbb és jobban megértett az „abszorbeáló” rendezett állapottal rendelkező nemegyensúlyi rendszerek viselkedése. Ilyen például a kontakt folyamat, amely az immunizáció nélküli betegségterjedés legegyszerűbb modellje. Kémiai jelöléssel leírva ez a következő. Egy beteg egyed ( $A$ )  $\sigma$  valószínűséggel meg tudja fertőzni a szomszédját:  $A \xrightarrow{\sigma} 2A$ , aki viszont spontán meg tud gyógyulni:  $A \xrightarrow{\lambda} \emptyset$ . Ha  $\sigma$  nagy, akkor a beteg egyedek koncentrációja ( $\rho_A$ ) véges („aktív” állapot). Ellenkező esetben  $\rho_A = 0$  és az összes beteg el tud tűnni a rendszerből („abszorbeáló” állapot). Az aktív és abszorbeáló állapotok fázisátmeneti határán  $\sigma$ -t csökkentve  $\rho_A$  folytonosan tűnik el (lásd 4. ábra), a korrelációs hossz divergál, és kritikus, úgynevezett irányított perkolációs univerzalitású skálaviselkedést tapasztalhatunk.

Egyszeres maximális helybetöltöttség esetén a részecskesűrűségre felírhatjuk a dinamikus átlagter egyenletet

$$\frac{d\rho}{dt} = \sigma\rho(1 - \rho) - \lambda\rho. \quad (1)$$

<sup>2</sup> Egyszerű egyensúlyi modellek esetében 2 független kritikus exponens rendelhető egy univerzalitási osztályhoz. A nemegyensúlyi modelleknél az időtükrözési szimmetria sértése miatt ennél többre van szükség.



4. ábra. Aktív-abszorbeáló folytonos fázisátalakulás

amelynek stacionárius megoldása

$$\rho(\infty) = \begin{cases} \frac{\sigma - \lambda}{\sigma} & \text{ha: } \sigma > \lambda, \\ 0 & \text{ha: } \sigma \leq \lambda. \end{cases} \quad (2)$$

$\sigma_c = \lambda$  esetén folytonos fázisátalakulást mutat és a kritikus pont környékén  $\rho(\sigma)$  lineáris vezető rendű szingularitással tűnik el. Tehát a rendparaméter exponense átlagtér közelítésben

$$\beta_{MF} = 1. \quad (3)$$

A kritikus ponthoz közel az  $O(\rho)$  tag domináns, így a sűrűség exponenciálisan közelíti az állandósult állapotot. Azonban a kritikus pontban  $\sigma_c = \lambda$ , így a megmaradó  $O(\rho^2)$  tag  $\rho \propto t^{-1}$  hatványfüggvényszerű bomlást okoz, ami

$$\alpha_{MF} = 1. \quad (4)$$

kritikus átlagtér rendparaméter bomlási exponensét jelent. Az átmenet további kritikus exponensei is hasonlóan egyszerűen meghatározhatóak (lásd [1]).

Fázisátalakuláskor a hosszútávú korrelációk miatt a fluktuációk is fel tudnak erősödni és alacsonyabb dimenziókban relevánsá tudnak válni. Ez azt jelenti, hogy egy átlagtér jellegű, hagyományos differenciálegyenlet nem tudja leírni az ilyen rendszer viselkedését. A kontakt folyamatnál ez már egydimenzióban is nemtriviális viselkedést okoz, amelynek kritikus exponensei például sorfejtési technikákkal közelítve ismertek:  $\beta = 0,276486(8)$ , illetve  $\alpha = 0,159464(6)$ . A fluktuációk leírására térelméletet és renormalizációs csoport módszereket vetnek be, amelynek további részleteit a cikk kiterjesztett változatában,<sup>3</sup> illetve az [1] könyvben tekinthetjük meg.

Azt a küszöbdimenziót, ami felett a fluktuációk már nem tudják befolyásolni a skálaviselkedést, felső kritikus dimenzióknak ( $d_c$ ) nevezzük. Kontakt folyamatnál ez például  $d_c = 4$ . Míg az átlagtér megoldás általában egzaktul megadható, a  $d_c$  alatti rendszerek skálaviselkedése dimenziófüggő és sokkal változatosabb. Ugyanakkor a  $d_c$  alatti rendszerek analitikus megoldása sokkal nehezebb, gyakran csak valamilyen numerikus közelítés, vagy szimulációs eredmény ismert.

<sup>3</sup> <http://www.mfa.kfki.hu/odor/pub/fizszemcikk.pdf>

Az ilyen numerikus problémák a számítógépeknek is kihívást jelentenek, mert a relaxációs idő (a korrelációs hosszhoz hasonlóan) hatványfüggvényszerűen divergál a kritikus pont környékén. Ezekhez a problémákhoz kiterjedt processzorklasztereket, illetve nemzeteken átnyúló GRID-hálózatokat is igénybe vesznek a kutatók.<sup>4</sup>

## Új univerzalitási elvek

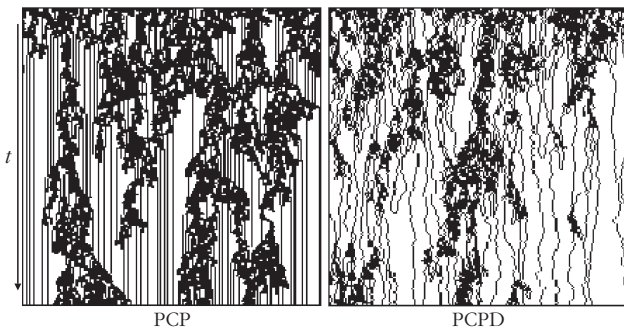
Tekintsük az úgynevezett diffúzív pár kontakt folyamat (PCPD) problémáját. Ez egy olyan modell, amelyben a reakciókhoz legalább 2 részecske találkozása szükséges. Ilyenkor ezek vagy új részecskét hoznak létre ( $2A \rightarrow 3A$ ), vagy részecskék tűnhetnek el ( $2A \rightarrow \emptyset$ ). A reakcióvalószínűségeket változtatva a rendszerben vagy (aktív) véges  $c_A$  koncentrációjú állapot alakul ki, vagy teljesen el is tűnhet az összes részecske (abszorbeáló állapot). Egy diszkrét, véges rácspont betöltöttségű modellben ezen állapotok között olyan fázisátalakulás van, amelynél a  $c_A$  koncentráció folytonosan tűnik el, ha  $\sigma$ -t csökkentjük. Ha a részecskék önmagukban még mocorogni (diffundálni) sem tudnak, akkor tekinthetjük a párokat mint önálló entitásokat ( $B = 2A$ ) és ezek:  $B \rightarrow 2B$ ,  $B \rightarrow \emptyset$  (pár)kontakt folyamatot (PCP) valósítanak meg. Ha azonban a magányos részecskék spontán diffúziós mozgása megengedett ( $A\emptyset \leftrightarrow \emptyset A$ ), akkor egy másfajta folytonos fázisátalakulást figyeltek meg. Miután a diffúzív és a nem diffúzív rendszer között semmilyen szimmetriabeli különbséget nem találunk, ez a modell évek óta sok fejtörést és számos egymásnak ellentmondó publikációs eredményt generált.

A PCPD-modell tér-idő fejlődési képe is más, mint a PCP-é. A magányos részecskék vándorlása mellett időnként kompakt klaszterek tűnnek fel, vagy semmisülnek meg (5. ábra). A (pár)kontakt folyamatnál az ilyen (tetszőleges nagyra nőhető) spontán kialakuló kompakt klaszterek nem fordulnak elő. Ráadásul a PCPD univerzalitási osztály a részecske paritás szimmetriára is érzéktelen, ellentétben a kontakt folyamattal, valamint itt  $d_c = 2$ .

## Topologikus effektusok

Létezik egy másik küszöb, az alsó kritikus dimenzió ( $d^-$ ) is, ami alatt már nem tud fázisátalakulás (és kritikus jelenség) létrejönni, a rendszer a paraméterek minden értéke mellett rendezetlen állapotban van. Egyensúlyi, rövid kölcsönhatáshosszú rendszerekben ez:  $d^- = 2$  diszkrét, illetve  $d^- = 3$  folytonos szimmetriájú modellek esetén. Nemegyensúlyi rendszerekben a részletes egyensúly hiányában a  $p(\alpha)$  eloszlás kevésbé van megszorítva és már 2-nél alacsonyabb térbeli dimenzióban is lehetséges a fázisátalakulás.

<sup>4</sup> Lásd például Klasztergrid (<http://www.clustergrid.niif.hu>), Hungrid (<http://www.grid.kfki.hu/hungrid>), Desktopgrid (<http://szdg.lpd.sztaki.hu/szdg/>).



5. ábra. Részecskék tér-idő fejlődése az 1+1 dimenziós pár kontakt folyamat és a diffúziós pár kontakt folyamat (PCPD) esetén. Függetlenes tengely: idő, vízszintes tengely: az egydimenziós rendszer pillanatnyi állapota (fekete pötty: részecske, fehér pötty: lyuk).

Ilyen alacsony dimenziók esetén azonban a tér topológiája további befolyásoló tényező lehet. Kiderült például, hogy a többkomponensű, keménymag kölcsönhatások esetén a skálaviselkedéseket (és a fázisátmenet tulajdonságát) nem azok a szimmetriák határozzák meg, amelyeket a folytonos, bozonikus térelméleti leírás alapján várnánk, hanem a részecske kizárási, blokkolási effektusok válnak releváns tényezőkké. Ennek legegyszerűbb példája az egydimenziós  $AB \rightarrow \emptyset$  modell, amelynek a (bozonikus) térelméleti leírása teljes kudarcot vallott. Ebben a modellben a megegyező típusú részecskék felhalmozódása akadályozza a reakciót (amely csak különbözők között lehetséges) és így a koncentráció sokkal lassabb hatványfüggvény szerint csökken, mint amit a bozonikus térelmélet jósol.

Ha a többkomponensű rendszerben keltési reakciók is lehetnek, akkor ezek valószínűségét növelve véges koncentrációjú, állandósult állapotok is létrejöhhetnek folytonos fázisátalakulással. Az ilyen átalakulás körüli skálaviselkedések arra lesznek érzékenyek, hogy reakció által keltett részecskék tudnak-e újra reagálni, vagy elválasztódnak egymástól (pl.:  $A \rightarrow ABA$  vagy  $A \rightarrow AAB$ ). Ez az érzékenység felülírja a globális megmaradásokat is. Más szóval ezen rendszerek kritikus univerzalitási osztályait a mikroszkopikus kölcsönhatások szimmetriái és nem a globális szimmetriák/megmaradások határozzák meg.

## Alkalmazások

Mint a bevezetőben említettem a nemegyensúlyi rendszerek igen gyakoriak a természetben, így a fent említett egyszerű modelleken alapuló bonyolultabb rendszerek feltűnése és az ezekhez kapcsolódó univerzális skálaviselkedések megfigyelése várható lenne. Valójában kiderült, hogy a legrobosztusabbnak vélt irányított perkolációs skálázást eddig csak helyel-közzel sikerült kísérletileg kimutatni. Helyette mindenféle más skálaviselkedéseket találtak. Ennek alapvető oka, hogy ezek a rendszerek rendezetlenségre igen érzékenyek lehetnek. A rendezetlenséget teljesen eltüntetni pedig igen nehéz, még laboratóriumi körülmények között is. Kivétel talán a 2-részecske annihiláló típusú egyszerű rendszerek osztálya ( $2A \rightarrow \emptyset$ ), amelyet kémiai reakciókban

meg lehetett figyelni. Hasonlóan esélyes lehet még a részecske paritásörző modellek ( $2A \rightarrow \emptyset$ ,  $A \rightarrow 3A$ ) fázisátalakulási univerzalitása, amelyre a szimulációk (időben rögzített) rendezetlenség érzéktelenséget mutattak ki [2]. Ez a viselkedés  $T = 0$  hőmérsékletű Glauber- és véges hőmérsékletű Kawasaki-dinamikák keverésével jöhet létre Ising-típusú rendszerekben.

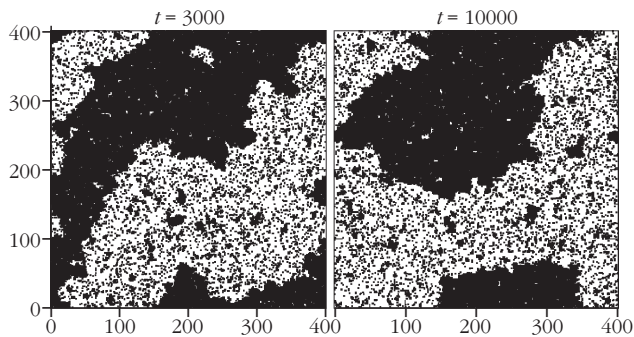
Mindazonáltal egyáltalán nem haszontalan az alapvető modellek tulajdonságainak felderítése még akkor sem, ha közvetlen alkalmazást egyelőre nem lehet látni. Ha lemondanánk ezek megértéséről, az olyasmira lenne, mintha a múlt századokban lemondtunk volna az atomok kutatásáról és a hétköznapi életben előforduló anyagok viselkedését anélkül próbálnánk megérteni, hogy ismernénk ezek nehezen megfigyelhető alkotórészeit. Az ilyen modellek szinte áttekinthetetlenül elszaporodtak az irodalomban, ezért róluk, illetve az alapvető, nemegyensúlyi univerzalitási osztályokról egy hosszú cikkben és egy könyvben [1, 3] foglaltam össze ismereteinket.

Az alapmodellek univerzalitási osztályainak megfigyelésével kapcsolatos negatív tapasztalatok ellenére az utóbbi évtizedekben hódított a skálaviselkedések kísérleti, fenomenologikus leírása. A földrengésérség statisztikáktól kezdődően, a biológiai rendszeren át a közgazdaságtanban, vagy a pénzügyi statisztikákban is megfigyelték ezeket. A 80-as években megszületett az önszerveződő kritikus rendszerek elmélete. Ennek célja azt volt, hogy megmagyarázzák, hogy miért fordulnak elő a természetben olyan gyakran hatványfüggvény eloszlású mennyiségek, statisztikák, szemben a fázisátalakulási kritikussághoz szükséges finomhangolásokkal. Ezek generikus leírására a homokdomb modelleket [4] vezették be, amelyekben a hatványfüggvény eloszlású lavinajelenségek automatikusan jelennek meg. Később kiderült, hogy ezek a modellek nem függetlenek a hagyományos abszorbeáló fázisátalakulási jelenségektől, csak egy önhangoló mechanizmus mindig a kritikus pont körül tartja őket (pl. a homokdomb esetén a lassú homokcsepegtetés és a gyors aktivitás redistribúció). Ezért aztán az önszerveződő kritikus rendszerek skálaviselkedései is leírhatóak az alapmodellek kritikus univerzalitási osztályaival.

Az új évezred a hálózati kutatások felvirágzásával indult a statisztikus fizikában. A hálózatkutató eredmények egy része hamar a köztudatba került, és újabban skálamentes hálózatokon definiált skálamentes viselkedést generáló modellek sokaságát kutatják. Ezeknél azonban az univerzalitási osztályok nem annyira tipikusak, a hosszú kölcsönhatási hosszal eredményező kapcsolatok topológiai alapvetően befolyásolják a skálatulajdonságokat.

## Szociofizika

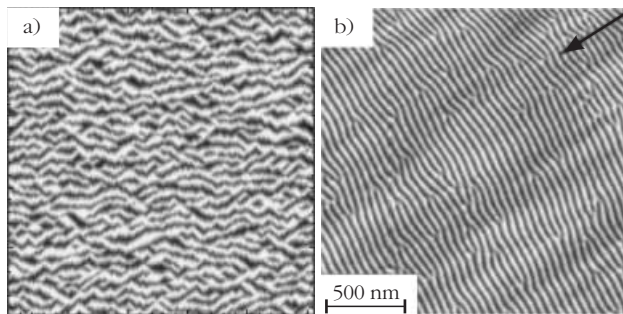
A nemegyensúlyi rendszerek a skálaviselkedések mellett más érdekes tulajdonságokat is mutatnak. Ezek interdiszciplináris alkalmazásokban merültek fel, mint például a szociofizikában, amely a statisztikus fizikai



6. ábra. Klaszterhatárok egy két-hőmérsékletű önszerveződő Ising-Schelling-modellben. A fekete pöttyök az egyik, fehér a másik csoport egyedeit reprezentálják egy  $400 \times 400$ -as rácson. A szimulációban a klaszterek túlélnek a második kis külső hőmérsékletű „zajt”  $t = 10\,000$  időlépés után [6].

módszerek újszerű alkalmazása a társadalomtudományokban (lásd pl. Szabó György *Fizikai Szemle* cikkét [5]). Ennek demonstrálására az alábbi, napjainkban igen aktuális példát említem. Az emberi szegregáció földrajzi eloszlásait figyelve megállapították, hogy az etnikai összecsapásoknak ott van nagyobb valószínűsége, ahol a különböző régiókat elválasztó határfelület elmosódott, fraktál jellegű. Ezt figyelembe véve meg lehet jósolni, hogy hol várható a legnagyobb valószínűséggel konfliktus kirobbanás. A volt Jugoszlávia, illetve India/Pakisztán területén ez egybe is esik a tapasztalatokkal.<sup>5</sup> Ezek alapján például egy határozott fallal való elválasztás konfliktusmegelőzőnek tűnhet, de ez nem mindig járható út (pl. egy országon belül), és a probléma konzerválásához is vezet. Nem-egyensúlyi modellek fázishatárait vizsgálva azonban más megoldások is eszünkbe juthatnak. Az emberi szegregáció Ising-Schelling-modelljében (amelyben a két különböző csoport egyedeit spin fel/le állapotokkal egyszerűsítjük) hasonló fraktálszerű fázishatárok jelennek meg, ha az emberi toleranciát lokális, változó hőmérséklettel modellezzük. Egy második, erős külső hőmérsékleti tér hozzáadásával – amely mondjuk az emberek lakásváltoztatási szokásait írja le –, vagy áramlások bevezetésével a fraktális határvonalak, amelyek az erős fluktuációk miatt vannak jelen az ilyen modellekben, elmoshatóak (lásd [6] és az ottani hivatkozásokat).

<sup>5</sup> <http://www.sciencenews.org/view/generic/id/8930>



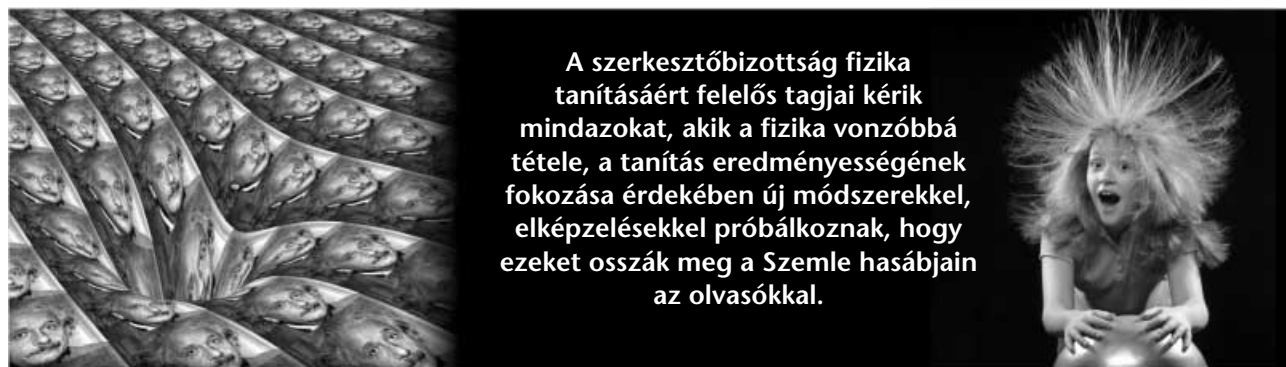
7. ábra. Szimulált felületi hullámok magasságkontúrjai versengő durvító anizotróp felületi diffúzió és simító depozíciós reakciók esetén. a) Ezt a mintázatot kinetikus Ising-szerű hajtott rácsgáz-moddal generáltuk [8]. b) Kíséreti fodrozódási minta szilíciumban kripton ion-sugár bombázás hatására ( $E_{ion} = 1200$  eV, szög =  $15^\circ$ , fluxus =  $2,24 \cdot 10^{18}$   $\text{cm}^{-2}$ ).

## Mintázatképződés

Egy másik fontos kérdés, hogy komplex rendszerekben miért alakulnak ki mintázatok. Egy viszonylag homogen légkörben mitől jelennek meg felhőfodrok, vagy a sivatagi homok mitől hullámos. Ezek elméleti megértése mellett a mikro/nano technológiákban a felületi mintázatképződés egyszerű kontrollálása nagy gyakorlati jelentőséggel bírna. Ezt jelenleg több nagy projekt tűzte ki célul. Egyszerű felületnövekedési modelleknél a részletes egyensúlyt sértő reakcióknál találtak ilyen barázdált állapotokat legelőször [7]. Különböző erősségű simító és durvító reakciók versengése esetén láthatunk ilyen felületi pötty- vagy fodornövekedést (7. ábra). Ezek a felületi mintázatok metastabil, kvantum-pöttyök vagy nanovezetékek növesztésére nyitnak a litográfiához képest alternatív lehetőségeket. Miután bizonyos felületek rácsgáz modellekre is leképezhetőek, az ezeknél leírt rendeződési, fázisátalakulási kutatási eredmények is segítenek a fenti célok elérésében.

## Irodalom

1. G. Ódor: *Universality In Nonequilibrium Lattice Systems*. World Scientific, 2008.
2. N. Menyhárd, G. Ódor, *Phys. Rev. E* 73 (2006) 036130.
3. G. Ódor, *Rev. Mod. Phys.* 76 (2004) 663.
4. P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld, *Phys. Rev. Lett.* 59 (1987) 381.
5. Szabó Gy., *Fizikai Szemle* 59 (2009) 109.
6. G. Ódor, *Int. J. of Mod. Phys. C* 19 (2008) 393.
7. Z. Rácz, M. Siegert, D. Liu, M. Plischke, *Phys. Rev. A* 43 (1991) 5275.
8. G. Ódor, B. Liedke, K.-H. Heinig, *Phys. Rev. E* 79 (2009) 021125.



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

# HOGYAN MOZOGHATTAK A DINOSZAURUSZOK?

## Ősállatok mozgásának paleo-biomechanikai rekonstrukciója

Horváth Gábor

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

Az elefántok köztudottan nem képesek gazellák módjára szökdecselni. Vajon miként mozogtak a sokszor még az elefántnál is jóval nehezebb szárazföldi őssállatok, mint például a nagytestű dinoszauruszok? Az egyik elképzelés szerint túl gyengék lehettek a lábaik ahhoz, hogy roppant súlyukat megtartsák, így a tavakban élhettek, és a testüket a víz fölhajtóereje lebegtette. Mivel ezen őssállatok már réges-régen kihaltak, nem tehetünk mást, mint hogy a mozgásukat a csontmaradványaik és nyomfossziliáik alapján próbáljuk meg rekonstruálni a

1. ábra. Néhány ismertebb dinoszauruszfaj a) *Velociraptor*, b) *Spinosaurus*, c) *Stegosaurus*, d) *Brachiosaurus*, e) *Tyrannosaurus* csontváza, illetve makettje (<http://www.1-800-fossils.com>).



ma élő állatok csontjainak és mozgásának vizsgálatával, a biomechanika alkalmazásával [1–6]. A biomechanika által föltárt tényeket összevetve a fosszilis csontokból és lábnyomokból kiolvasható adatokkal, kirajzolódik a válasz az őssállatok mozgékonyágának kérdésére. Megbecsülhetjük például, hogy a négylábú növényevő *Triceratops* vágázhatott-e, vagy csak cammoghatott, és hogy a kétlábú ragadozó *Tyrannosaurus* képes volt-e utolérni egy menekülő *Triceratops*-ot.

### A dinoszauruszok tömegének becslése

A dinoszauruszoknak többnyire csak a csontváza ismert (1. ábra bal oldala), amiből a hajdani magasságuk, hosszúságuk és megközelítő alakjuk határozható meg. A dinoszauruszok élő-tömegének legnagyobb részét a bőrük, izmaik és belső szerveik tették ki, amelyek mára már régen elporladtak. Ezért a testtömegüket csak becsülni lehet, amihez arányosan kicsinyített dinoszaurusz-maketteket használnak a paleontológusok. E makettek olyanok, amilyenek a paleontológusok a kutatásaik eredményeiként a dinoszauruszokat elképzelik (1. ábra jobb oldala). A természettudományi múzeumokban és játékboltokban kapható dinoszaurusz-modellek is e rekonstruált alakok alapján készülnek.

A kicsinyített dinomakettek térfogatát az általuk kiszorított víz térfogatából határozzák meg. Az így kapott értéket megszorozva a kicsinyítési tényező reciprokának köbével,<sup>1</sup> megkapják a vizsgált dinoszaurusz hajdani hozzávetőleges térfogatát. E térfogatot megszorozva a ma élő hullók testének  $1000 \text{ kg/m}^3$  átlagsűrűségével, a dinoszauruszok testtömegének közelítő értékéhez jutnak. Ilyen becslések arra vezettek [3, 4], hogy például a húsevő *Tyrannosaurus* kifejlett tömege 7 tonnánál is nagyobb lehetett (egy felnőtt jegesmedve tízszerese), egy felnőtt növényevő *Brachiosaurus* pedig akár 50 tonnát is nyomhatott (tízszer akkorát, mint egy afrikai elefántbika vagy közel akkorát, mint egy ámbráscet).

### A testméret és a csontok terhelhetőségének skálázása

A nagytestű szárazföldi állatok mérete, testi ereje és vázszerkezete közti kapcsolat mechanikai problémáját elsőnek Galilei vetette föl az 1600-as évek elején. Ha

<sup>1</sup> A kicsinyítési tényező a test lineáris, egydimenziós kiterjedésére vonatkozik, a térfogat pedig e lineáris méret köbével arányos: ha például a makett 1:20 arányú kicsinyítéssel készült, akkor a makett térfogatát  $20^3 = 8000$ -rel kell megszorozni, hogy megkapjuk a valós térfogatot.

két mértanilag hasonló, azaz egy megfelelő mértékű  $N$  kicsinyítéssel/nagyítással egymásba vihető alakú állat lineáris méretei különbözőek, és lineáris kiterjedésük (pl. lábhosszuk) aránya  $L'/L = N$ , akkor a csontjaik keresztmetszetének aránya  $N^2 = A'/A$ , míg a súlyuké  $N^3 = G'/G$ . Ez azt jelenti, hogy az  $L' = N \cdot L$  lineáris méret  $N$  szorzótényezőjének növekedésével a csontokban ébredő  $\sigma' = G'/A' = (N^3 \cdot G)/(N^2 \cdot A) = N \cdot G/A = N\sigma$  feszültség  $N$ -nel lineárisan nő. Ha tehát egy állat például  $N = 2$ -szer magasabb, szélesebb és hosszabb egy hozzá mértanilag hasonló másikinál, akkor 4-szer erősebb (azaz 4-szer nagyobb keresztmetszetű) lábakkal kell 8-szor nagyobb testsúlyt hordozniuk. Galilei ebből arra következtetett, hogy ha egy állat alak hasonlóan növekedne, akkor egy kritikus lineáris méret meghaladása után a saját súlyát már nem tudná megtartani, mert csontjai eltörnének, mikor a csontokban ébredő  $\sigma' = N\sigma$  feszültség nagyobb a  $\sigma^*$  törési (összeroppanási) feszültségnél. E megfontoláshoz fontos tudni, hogy a  $\sigma^*$  értéke független a testmérettől, vagyis az  $N$ -szer nagyobb állat csontjai is ugyanakkora kritikus  $\sigma^*$  feszültségnél törnek el, mint a kisebb állatéi.

## A dinamikai hasonlóság és a Froude-féle szám

Ha egy állat mozgási sebessége  $u$ , lábhossza  $L$ , a földi nehézségi gyorsulás pedig  $g$ , akkor az állat Froude-száma  $f = u^2/(gL)$ , amit William Froude<sup>2</sup> (2. ábra) angol hajómérnökről neveztek el. Mint ahogyan a mértani hasonlóság esetén a két test alakja a hossz, szélesség és magasság azonos léptékű ( $N$ -szeres) megváltoztatásával egymásba képezhető le, úgy két különböző test mozgása akkor hasonló dinamikailag, ha a Froude-számuk azonos. Ekkor az egyik test lineáris méreteinek és az általa megtett útnak azonos léptékű ( $N$ -szeres) megváltozása mellett létrejövő mozgás előidézéséhez szükséges erő a két mozgás Froude-számának megegyezéséből határozható meg, s az ilyen mozgások egymásba dinamikailag átvihetőek. Nézzünk erre egy



2. ábra. William Froude (1810–1879) angol hajómérnök portréja ([http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Williams\\_Froude.jpeg](http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Williams_Froude.jpeg))

<sup>2</sup> William Froude (1810–1879) angol hajómérnök hajómakettek használatával azt vizsgálta, hogy mekkora tolóerejű motor szükséges egy újonnan tervezett hajó meghajtásához. A víz hajóra kifejtett ellenállása legnagyobb részét a hajóorr előtt tolt víz hullámtól származik. Froude megmutatta, hogy a hajómakettek és a valódi hajókon mért közegellenállási erők átszámításakor a később róla elnevezett Froude-szám játszik fontos szerepet: egy makettet úgy kell megépíteni, hogy Froude-száma megegyezzen a készítenő hajóéval, mert csak ekkor teljesül a dinamikai hasonlóság a makett és a fölépített hajó mozgása között. Ekkor persze  $L$  a hajó, illetve a makettjének a hossza.

egyszerű példát: a  $g$  nehézségi gyorsulású földi gravitációs térben gyorsítsunk függőlegesen fölfelé egy  $R$  sugarú, homogén  $\rho$  sűrűségű,  $m = 4\pi\rho R^3/3$  tömegű gömböt. Az ehhez szükséges erő

$$F = m \cdot (g + a), \quad (1)$$

ahol  $a$  a test fölfelé mutató gyorsulása. Ha a test kezdősebessége nulla, akkor az általa megtett  $s$  út és az  $u$  sebesség közti összefüggés

$$s = \frac{u^2}{2a}, \quad (2)$$

a test Froude-száma pedig

$$f = \frac{u^2}{gR}. \quad (3)$$

A (1), (2) és (3) fölhasználásával kapjuk:

$$F = mg \cdot \left(1 + \frac{Rf}{2s}\right). \quad (4)$$

Ha ezek után egy ugyancsak  $\rho$  sűrűségű, de  $N$ -szer nagyobb sugarú másik gömb dinamikailag hasonló mozgását tekintjük, akkor a gömb  $R'$  sugara,  $m'$  tömege és az általa megtett  $s'$  út a lineáris méretek  $N$ -szeres skálázása miatt

$$\begin{aligned} R' &= N \cdot R, \\ m' &= N^3 \cdot m, \\ s' &= N \cdot s \end{aligned} \quad (5)$$

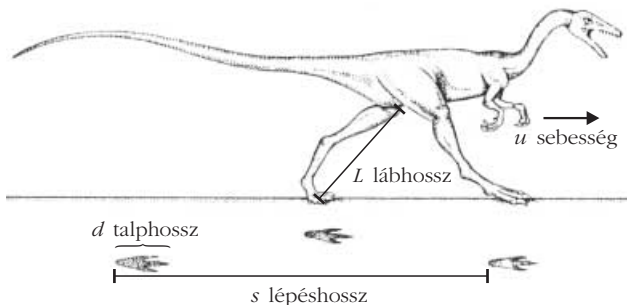
lesz, az ehhez szükséges erő pedig

$$\begin{aligned} F' &= m' g \cdot \left(1 + \frac{R' f'}{2s'}\right) = N^3 m g \cdot \left(1 + \frac{NRf'}{2Ns}\right) = \\ &= N^3 m g \cdot \left(1 + \frac{Rf}{2s}\right) = N^3 F. \end{aligned} \quad (6)$$

Mivel a dinamikai hasonlóság miatt a két mozgás Froude-száma egyenlő:  $f' = f$ . Tehát ha a szóban forgó függőlegesen gyorsuló gömb és annak mozgása lineáris méreteit  $N$ -szeresére növeljük, akkor a két mozgás akkor lesz egymáshoz dinamikailag hasonló, ha a gyorsításhoz szükséges, fölfelé irányuló erő  $N^3$ -szeresére nő. Annak idején Froude hasonló, bár ennél bonyolultabb számításokkal határozta meg, hogy mennyivel kell szorozni a hajómakettjein mért tolóerőket, hogy megkapja a valódi méretű hajók valós mozgásaihoz szükséges tolóerőket.

Visszatérve az állatokhoz, két állat mozgása csak akkor lehet dinamikailag hasonló, ha az  $m$  tömegű,  $u$  átlagsebességű és  $L$  hosszúságú lábaik  $mu^2/2$  mozgási és  $mgL/2$  helyzeti energiájának  $u^2/(gL)$  hányadosa azonos, ami nem más, mint éppen az  $f$  Froude-szám. Ennek megfelelően két eltérő méretű állat mozgása akkor hasonló dinamikailag, ha a Froude-számuk





3. ábra. A tyúkméretű, kétlábon járó, ragadozó *Compsognathus* dinoszaurusz így járhatott a paleontológusok rekonstrukciói szerint ([4] 68. o. ábrája alapján).

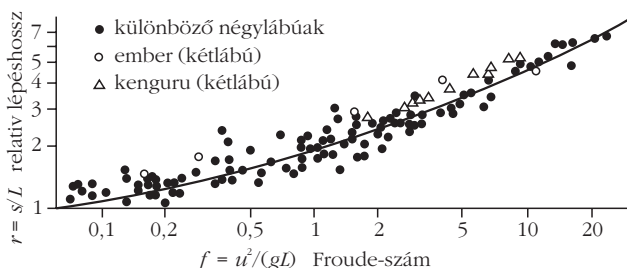
megegyezik. Alexander [2–4] vetette föl először, hogy a különböző méretű állatok járásmódja, mozgása dinamikailag közel hasonló, ha a mozgásuk Froude-számai azonosak. Teljes dinamikai hasonlóság azért nem teljesülhet, mert az eltérő méretű állatok általában alakjukban is különböznek egymástól. Teljes dinamikai hasonlóság csak szigorú geometriai hasonlóság esetén állhat fenn.

### Állati mozgások dinamikai hasonlósága a Froude-szám tükrében

Alexander [2–4] elmélete szerint az egyforma Froude-számú, de különböző méretű állatok hasonló módon járnak vagy futnak. Például az  $L_{\text{menyét}} = 9$  cm csípőmagasságú menyét  $u_{\text{menyét}} = 1,5$  m/s sebességnél vált át ügetésből gyors futásba, mikor is a Froude-száma  $f_{\text{menyét}} = 2,55$ , míg az  $L_{\text{orrszarvú}} = 1,2$  m csípőmagasságú orrszarvú  $u_{\text{orrszarvú}} = 5,5$  m/s sebességnél vált poroskálásból ügetésbe, mikor a Froude-száma  $f_{\text{orrszarvú}} = 2,57$ . Látható, hogy  $f_{\text{menyét}} \approx f_{\text{orrszarvú}}$ .

Az elmélet a lépéshosszra, azaz egyazon láb két egymást követő nyomának  $s$  távolságára is érvényes (3. ábra). Minél gyorsabban halad egy állat, annál hosszabbakat lép. A különböző méretű, de azonos Froude-számú állatok  $s$  lépéshossza és  $L$  lábhossza a dinamikai hasonlóság folytán hasonlóképpen aránylik egymáshoz. Ebből következően, ha az  $r = s/L$  relatív lépéshosszat az  $f$  Froude-szám függvényében ábrázoljuk különféle két- és négylábú állat esetén, akkor mindig ugyanazt a függvényt kapjuk. Ezt szemlélteti a

4. ábra. A házimacskánál nem kisebb méretű mozgó állatokon mért  $r = s/L$  relatív lépéshossz az  $f = u^2/(gL)$  Froude-szám függvényében, ahol  $s$  a lépéshossz,  $L$  a lábhossz,  $g$  pedig a földi gravitációs gyorsulás. A folytonos vonal a pontokra illesztett függvényt mutatja ([4] 68. o. ábrája alapján).



4. ábra, ahol az  $(r, f)$  paraméterpár számos állaton mért értékei vannak föltüntetve. Látható, hogy az  $(r, f)$  koordinátájú pontok halmaza jó közelítéssel ugyanazt az  $r(f)$  függvényt követi.

Mindez azonban csak a házimacskánál nem kisebb méretű állatokra érvényes, mivel a kisebb állatok (pl. az egerek, pockok és patkányok) sajátosan a földhöz lapulva mozognak. Érdekes módon azonban az elmélet érvényes mind a kétlábú, mind a négylábú állatok mozgására. Ez nem is olyan meglepő, ha meggondoljuk, hogy egy négylábú állat lényegében egy mellső és egy hátsó lábpárból és a kettőt összekötő vízszintes törzsből épül föl, amely végtagok megfelelően szinkronizálva, bizonyos fáziskéséssel, de ugyanúgy mozognak, legalábbis a szimmetrikus járásmódok esetében.

### Dinoszauruszok sebességének rekonstrukciója a Froude-számtól függő relatív lépéshossz és a megkövült lábnyomok alapján

Az Alexander [2–4] által a ma élő két- és négylábú állatokon tapasztalatilag megállapított  $r(f)$  függvény (4. ábra) lehetőséget ad arra, hogy megbecsülhető legyen a réges-régen kihalt dinoszauruszok mozgássebessége a megkövült lábnyomaik alapján. Igen sok dinoszaurusz-lábnyom maradt fenn fosszilizált iszaplenyomatok formájában (5. ábra) [1, 5]. E lábnyomok

5. ábra. Megkövült lábnyomok, amelyeket dinoszauruszok hagytak puha és nedves iszapban (<http://www.unb.br/ig/sigep/sitio026/sitio026english.htm>).



szerint járás közben a dinoszauruszok lába a testüket folyamatosan a magasban tartotta a ma élő emlősök-höz és madarakhoz hasonlóan, s nem úgy, mint a mai hullóknél, amelyek lába oldalra nyúlik ki, miáltal törzsük többnyire a földhöz ér. Föltételezve, hogy a mai emlősökre és madarakra megállapított  $r(f)$  függvény (4. ábra) érvényes a hozzájuk hasonlóan járó dinoszauruszokra, az utóbbiak mozgássebessége a következő módon becsülhető meg: Alexander [2–4] ugyancsak empirikus úton jutott arra az összefüggésre, hogy az állatok lábának  $L$  hossza a talpnyomatuk  $d$  átmérőjének közel 4-szerese:  $L \approx 4d$ . A dinoszauruszok megkövült járásnyomából (5. ábra) egyértelműen meghatározható a lábnyomuk  $d$  átmérője és lépésük  $s$  hossza (4. ábra), innen pedig az  $L \approx 4d$  összefüggésből az  $L$  lábhossz is. Az így adódó  $r = s/L \approx s/(4d)$  relatív lépéshossz ismeretében az  $r(f)$  függvény inverzéből megkapjuk az  $f[r \approx s/(4d)] = u^2/(gL) \approx u^2/(4gd)$  Froude-számot, ahonnan végül az

$$u \approx \sqrt{4g \cdot d \cdot f \left( r \approx \frac{s}{4d} \right)} \quad (7)$$

becsült mozgássebességhez jutunk.

Alexander [2–4] ilyen rekonstrukciói szerint a nagytű dinoszauruszok meglehetősen lassan jártak, amikor lábnyomaikat az iszapban hagyták. A négy lábon járó hatalmas szauropodák összes ismert lábnyoma 1 m/s körüli mozgássebességre utal, ami az ember gyaloglás közbeni sebessége. A két lábon járó nagy dinoszauruszok mozgássebessége sem lehetett nagyobb, mint 2,2 m/s, ami az ember szaporázó járásának felel meg. A kistű dinoszauruszok viszont gyorsabban közlekedtek: a legnagyobb sebességet, 12 m/s-ot egy kétlábon járó dinoszaurusz hagyta az iszapban. Ez már gyorsabb mozgás, mint amit a legjobb gyorsfutó emberek el tudnak érni, akik 10 m/s maximális sebességre képesek.

A mozgássebesség megkövült iszaplábnyomok alapján rekonstruált értéke azonban alulbecsüli azt a legnagyobb sebességet, amelynek elérésére a dinoszauruszok képesek lehetnek. Ennek az az oka, hogy a nedves, puha, csuszamlós iszapban nyilván csak kisebb sebességgel közlekedhetnek az állatok, mint a kemény, nem csúszós szárazföldön. Ezért a dinoszauruszok nagyobb sebességű mozgásának vizsgálatához a Froude-számra és a fosszilizálódott lábnyomokra alapuló módszertől eltérő rekonstrukcióhoz kell folyamodni.

## A dinoszauruszok mozgásának rekonstrukciója a fosszilis csontjaik erőindikátora alapján

Minél nagyobb sebességgel mozog egy állat, annál nagyobb erőt fejt ki lábával a talajra, ami annál nagyobb erővel hat vissza a lábra. A nagyobb sebesség eléréséhez tehát erősebb lábak szükségesek. A sebesség növekedésével a lábak a teljes lépésidő egyre kisebb részében érintik a talajt. A lépés kiegyensúlyozottsága és a testsúly megtartása érdekében ezen rövid idő alatt a lábaknak nagy erőt kell kifejteniük. Azt

a legnagyobb erőhatást, amely a lábnak a talajjal való érintkezése közben föllép, csúcserőhatásnak nevezik. Az emberi lábon mérhető csúcserőhatás például lassú járás közben megközelítőleg a testsúllyal egyenlő, vágótázkor azonban a testsúllynak akár 3,5-szerese is lehet. A gyors futás tehát erősebb csontozatot igényel.

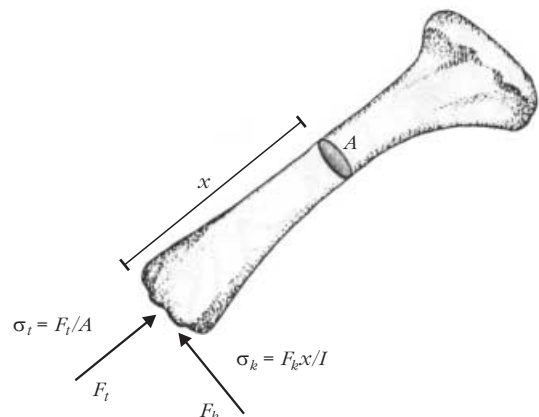
Alexander [2–4] különféle állatok (pl. kutya, birka, ember, kenguru) eltérő mozgásformája (pl. gyaloglás, futás, szökellés) esetén laboratóriumi kísérletekben (miközben az állatok a padlóba ágyazott nyomásérzékítő lemezen mozogtak) meghatározta a lábcsontokban ébredő erőket. A csont két végén, az ízületeknél föllépő erők mechanikai feszültséget keltenek a csontban. Ezen erők két összetevőre bonthatók: a csont hossz tengelyének irányában, a végektől a középpont felé mutató  $F_t$  tengelyirányú erőre és az erre merőleges,  $F_k$  keresztirányú erőre a 6. ábra szerinti módon. Az  $F_t$  erőkomponens a csont  $A$  keresztmetszetén  $\sigma_t = F_t/A$  nyomófeszültséget hoz létre. Az  $F_k$  összetevő a csontvégtől  $x$  távolságban  $\sigma_k = F_k \cdot x/I$  keresztirányú feszültséget kelt, ahol  $I$  a csont keresztmetszetének másodrendű nyomatéka, más néven felületi tehetetlenségi nyomatéka.

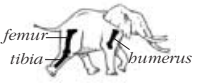

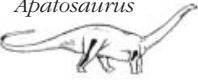



Túláságosan nagy mechanikai feszültségek hatására a csont eltörik, megped. Futó és ugró mozgás közben  $\sigma_t \ll \sigma_k$ . Tehát mozgás közben a keresztirányú erők a csontokra sokkal veszélyesebbek a tengelyirányúaknál. Ezért a további becslések során csak a  $\sigma_k$  feszültséggel számolunk. A különböző méretű, de dinamikailag hasonló módon futó állatok esetében a csontokra ható erők a  $G$  testsúllyal arányosak, hiszen az állat testsúlyát mozgás közben a csontoknak kell megtartaniuk. A szóban forgó  $x$  távolság nyilván nem lehet nagyobb, mint a csont  $L$  hossza. Tehát  $\sigma_k \leq \sigma_k^* \sim aGL/I$ , ahol az  $a$  tényező azt fejezi ki, hogy a testsúly hányad része jut az adott lábparra. Az

$$\varepsilon \approx \frac{1}{\sigma_k^*} = \frac{I}{aGL} \quad (8)$$

mennyiséget erőindikátornak nevezzük. Alexander [2–4] elmélete szerint, minél nagyobb egy állat csont-

6. ábra. A végétől  $x$  távolságra  $A$  keresztmetszetű csont végén mozgás közben ébredő  $F_t$  tengelyirányú és  $F_k$  keresztirányú összetevője ([4] 71. o. ábrája alapján)

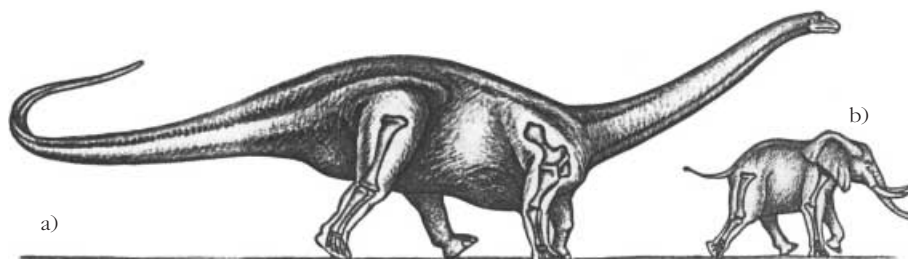


|   | <i>m</i> (tonna)<br>testtömeg | $\epsilon$ erőindikátor |              |                |
|---|-------------------------------|-------------------------|--------------|----------------|
|   |                               | <i>femur</i>            | <i>tibia</i> | <i>humerus</i> |
| afrikai elefánt<br>      | 2,5                           | 7                       | 9            | 11             |
| kafferbivaly<br>         | 0,5                           | 22                      | 27           | 21             |
| <i>Apatosaurus</i><br>   | 34                            | 9                       | 6            | 14             |
| <i>Diplodocus</i><br>    | 12–19                         | 3–5                     | ?            | ?              |
| <i>Triceratops</i><br>   | 6–9                           | 13–19                   | ?            | 14–22          |
| <i>Tyrannosaurus</i><br> | 7,5                           | 9                       | ?            | ?              |

7. ábra. Két ma élő nagytestű négylábú (afrikai elefánt és kafferbivaly) és néhány kihalt nagytestű négy-, illetve kétlábú dinoszaurusz *m* testtömege, valamint a *femur*, *tibia* és *humerus* lábcsontjainak  $\epsilon$  erőindikátora. A rendelkezésre nem álló adatokat ? jelöli (Alexander, [4] 70. o. ábrája alapján).

jainak  $\epsilon$  erőindikátora, annál mozgékonyabb az állat, vagyis annál nagyobb sebességekre képes, röviden, annál „atlétikusabb” mozgású. Ez azzal magyarázható, hogy egy adott csont  $\epsilon$  erőindikátora akkor nagy, ha az *I* felületi tehetetlenségi nyomatéka nagy és/vagy az *L* hossza kicsi és/vagy a viselendő *aG* súly kicsi. Márpedig egy csont annál jobban ellenáll a mozgás közbeni erőhatásoknak, minél nagyobb az *I*-je. Továbbá minél rövidebb egy csont és minél kisebb erőhatás éri (súly terheli), annál kevésbé hajlik meg. Az ilyen csontokkal rendelkező állatok ezért nagyobb sebességgel, dinamikusabban mozoghatnak, mert csontjaik még az ekkor föllépő nagyobb mechanikai terheléseket is törés nélkül tudják elviselni. Alexander [2–4] meghatározta számos ma élő állat hosszú lábcsontjainak  $\epsilon$  erőindikátorát és vizsgálta a különféle mozgásformáikat is, és arra a következtetésre jutott, hogy a

8. ábra. A növényevő *Apatosaurus* (a) és az afrikai elefánt (b) lábcsontjai közel egyforma nagyságú  $\epsilon$  erőindikátorral rendelkeznek, amely biomechanikai hasonlóság arra utal, hogy az *Apatosaurus* az elefánthoz hasonlóan mozoghatott ([4] 71. o. ábrája alapján).



hasonló erőindikátorú csontozattal bíró állatok hasonló mozgásformákra képesek. Ezek után meghatározta a dinoszauruszok fő lábcsontjainak erőindikátorát is. Néhány eredményt a 7. ábra mutat.

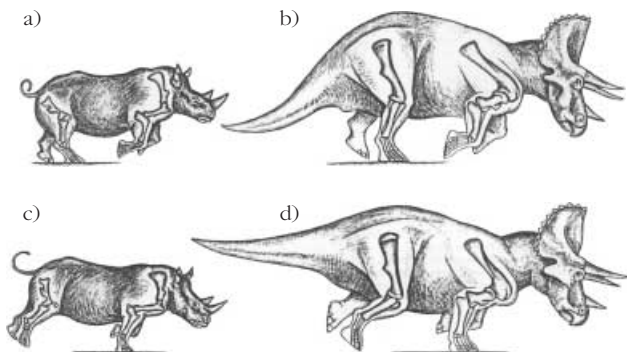
Mindezek alapján – föltéve, hogy a dinoszauruszok csontjai is ugyanakkora mechanikai feszültség elviselésére voltak képesek, mint a mai állatokéi – biomechanikailag alátámasztott becslések tehetők a dinoszauruszok mozgástípusairól. Ehhez persze még föl kell tételni, hogy az evolúció során a különféle állatok csontjaiba ugyanakkora biztonsági faktor épült be. A biztonsági faktor a csont összeroppantásához szükséges erő és a csont rendeltetésszerű használata során föllépő maximális erő hányadosa. A mérnöki gyakorlatban 2-nél nem kisebb biztonsági faktort szokás használni.

Alexander [2–4] megbecsülte különféle dinoszauruszfajokra az *a* paraméter értékét is, vagyis a testsúly mellső és hátsó lábpárok közti megoszlásának mértékét. Ehhez megint a korábban már említett műanyag dinomaketteket használta: a makettekbe a ma élő állatok anatómiája alapján becsült térfogatú tüdő helyén eltávolította a műanyagot (mialtal a helyét levegő töltötte ki), majd cérnára való fölfüggesztésekkel<sup>3</sup> meghatározta az így preparált makettek tömegközéppontjának helyét, aminek ismeretében arányos osztással megkapta az *a* paraméter értékét.

Ilyen vizsgálatokkal derült fény például arra, hogy a hatalmas testű növényevő *Apatosaurus* lábcsontjainak  $\epsilon_{\text{Apatosaurus}}$  = 6–14 erőindikátora közel esik a jóval kisebb afrikai elefánt lábcsontjainak  $\epsilon_{\text{elefánt}}$  = 7–11 erőindikátorához. Következésképpen, a nagyobb testméret ellenére is az *Apatosaurus* mozgékonyasága az elefántéhoz lehetett hasonló (8. ábra). Az elefánt lassú futásra még képes, de vágtni vagy ugrani már nem tud. Valószínűleg ugyanez volt a helyzet az *Apatosaurus* esetében is. Ahhoz, hogy az elefántnál hosszabb lábú *Apatosaurus* mozgása egy 5 m/s sebességgel haladó elefántéval azonos Froude-számú legyen, az *Apatosaurus*-nak 7 m/s-mal kellett volna haladnia.

Az is kiderült, hogy habár a *Diplodocus* száropoda nem lehetett túl mozgékony állat, mégsem szorult rá a víz fölhajtóerejére, és képes lehetett a szárazföldön is közlekedni, de futni valószínűleg már nem tudott. A *Triceratops* erőindikátor-értékei az elefántéi és a nála is mozgékonyabb kafferbivalyéi közé esnek, ezért a *Triceratops* mozgékonyabb lehetett az elefántnál, valószínűleg képes volt vágtni is, akár a kafferbivaly vagy az orrszarvú (9. ábra). A két lábon járó *Tyrannosaurus* combcsontjának

<sup>3</sup> Ha egy makettet két különböző felületi pontjában (például az orránál és a hátánál fogva) cérnára függesztjük és lefénképezzük, akkor a földi nehézségi térben függőleges cernaszálak egyenesének metszéspontja megadja a tömegközéppont helyét.



9. ábra. A *Triceratops* (b, d) hasonlóan mozoghatott a ma élő fehér orrszarvúhoz (a, c), mivel mindkét négy lábú lábcsonthajának közel egyforma az  $\epsilon$  erőindikátora. Az ábrán az orrszarvú 7 m/s sebességgel üget. A *Triceratops*nak 9 m/s sebességgel kellett volna ügetnie ahhoz, hogy a Froude-száma megegyezzen a 7 m/s-mal ügető orrszarvúéval (l4) 72. o. ábrája alapján).

(*femur*)  $\epsilon$  erőindikátora kicsi volt, körülbelül az elefánténak felelt meg (7. ábra), következésképpen csak olyan lassan és úgy mozoghatott, mint az elefánt.

Habár a dinoszauruszok mozgásának és mozgékonyágának fönt vázolt paleo-biomechanikai rekonstrukciója becsles jelleget, azt mégis világossá teszi, hogy a dinoszauruszok általában lassan közlekedtek, de néhányuk meglehetősen gyorsan is tudott futni, és egyiküknek sem volt szüksége arra, hogy kihasználja a víz fölhajtóerejét. A dinoszauruszok megkövült lábnyomai-ból úgy tűnik, hogy ha mi emberek már éltünk volna a dinoszauruszok korában, és ha lett volna hozzá bátorságunk, akkor akár sétálgathattunk is volna a mozgó *Apatosaurus*ok vagy *Tyrannosaurus*ok mellett, minden nehézség nélkül lépést is tarthattunk volna velük, sőt futva könnyen el is tudtunk volna menekülni előlük, mivel e nagytetű őshüllők legfölbjebb csak olyan mozgékonyak lehettek, mint az afrikai elefántok.

## A *Jurassic park* című, dinoszauruszokról szóló filmtrilógia paleo-biomechanikai elemzése

Steven Spielberg<sup>4</sup> *Jurassic park* című híres tudományos fantasztikus filmtrilógiájában számos dinoszaurusz mozgásának számítógépes animációja és szimulációja is látható. E filmekben talán a legizgalmasabbak azok a jelenetek, mikor a főhősöket egy *Tyrannosaurus rex* üldözi. A film szerint a *Tyrannosaurus* még arra is képes, hogy üldözzön és utolérjen egy gyorsuló terepjárót vagy egy viszonylag gyorsan haladó nagyvárosi buszt, arról nem is beszélve, hogy simán el tudja kapni az előle futva menekülő embereket (10.a ábra). Az ebben a fejezetben tárgyalt paleo-biomechanikai tények és rekonstrukciók alapján azonban nyilvánvaló a mozgó *Tyrannosaurus* ilyen ábrázolásának pontatlansága: a *Tyrannosaurus* nemhogy egy nagy sebességű buszt vagy terepjárót nem lett volna képes utolérni, de még az ember is könnyen el tudott volna futni előle. Ha

viszont a filmben így ábrázolták volna e nagytetű, vérengző ragadozó őshüllőket, nyilván nem lett volna a film olyan borzongató.

Hasonlóan hibás például a *Jurassic park II.* azon jelenete is, mikor egy, a kölykét féltő feldühödött *Apatosaurus* utolér egy előle futó embert, aki csak egy korhadt, kidőlt fatörzsbe bújva lel menedéket. Ugyancsak hibás például a *Jurassic park III.* film azon jelenete, amelyben egy *Spinosaurus* egy előle menekülő embercsoportot üldöz (10.b ábra). Az *Apatosaurus* és a *Spinosaurus* a *Tyrannosaurus*hoz hasonlóan nem volt képes még olyan gyorsan sem futni, mint egy rohanó ember.

Habár a *Jurassic park* filmekbeli dinoszauruszok mozgásának tudományos hűsége kívánnivalót hagy maga után, ezt részben kompenzálhatja, hogy e dinoszauruszok számítógépes szimulátorai jónéhány tudományos, részben mozgásmechanikai tényt is fölhasználtak, amelyek zömét Alexander és kollégái tárták föl.

## Irodalom

1. Mossman, D. J., Sarjeant, W. A. S.: The footprints of extinct animals. *Scientific American* 248/1 (1983) 64–74.
2. Alexander, R. M.: *Dynamics of Dinosaurs and Other Extinct Giants*. Columbia University Press, 1989.
3. Alexander, R. M.: How dinosaurs ran? *Scientific American* 254/4 (1991) 62–68.
4. Alexander, R. M.: Mozgékony dinoszauruszok. *Tudomány* 1991 június (1991) 66–72.
5. Thulborn, T.: *Dinosaur Tracks*. Chapman and Hall, 1990.
6. Horváth G.: *A mechanika biológiai alkalmazása: biomechanika*. (3., bővített kiadás) Egyetemi tankönyv, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2009.

10. ábra. Steven Spielberg *Jurassic park I.*, illetve *Jurassic park III.* című filmjének egy-egy képe, amelyen egy *Tyrannosaurus* a) , illetve *Spinosaurus* b) üldöz embereket ([http://www.solarnavigator.net/films\\_movies\\_actors/steven\\_spielberg.htm](http://www.solarnavigator.net/films_movies_actors/steven_spielberg.htm))



<sup>4</sup> Steven Spielberg (1946–) amerikai filmrendező. Ő volt a *Jurassic park I, II, III* című filmek rendezője, illetve producere 1993, 1997, illetve 2001-ben.

# FÖLDRAJZI HELYMEGHATÁROZÁS A NAP SEGÍTSÉGÉVEL

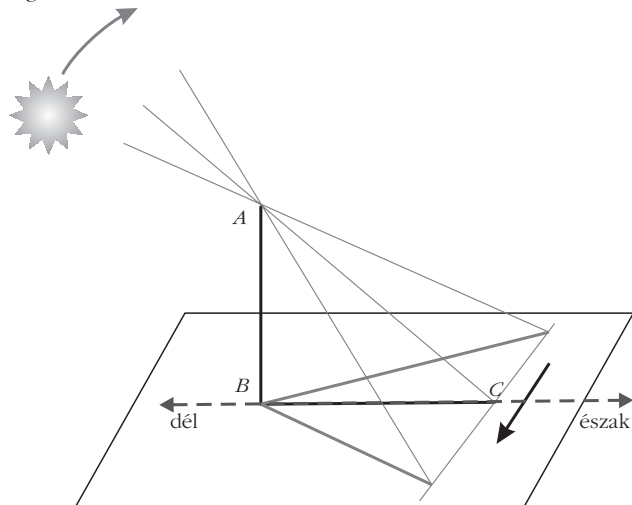
Baranyai Klára  
Berzsenyi Dániel Gimnázium, Budapest

Azon szerencsések közé tartoztam, akik 2008-ban részt vehettek a magyar fizikatanárok csoportjának szervezett egyhetes továbbképzésen a CERN-ben. A kutatóintézetben szerzett élményeken túl utazás közben és a helyszínen is különböző méréseket végeztünk. A mérési feladatokat *Sükösd Csaba*, az utazás szervezője találta ki. Ő alakította ki a csoportokat is, és munkájukat szakmai tanácsokkal segítette. E cikk megírásához is sok értékes tanácsot adott. A mi csoportunk (tagjai: *Holányiné Seres M Ildikó, Honyek Gyula, Illés Dániel* és jómagam) feladata az volt, hogy földrajzi helyzetünket a Nap járásának segítségével határozza meg. Így ismerkedtem meg ezzel a méréssel.

Szinte automatikusan felvetődik a kérdés, hogy ma, a GPS (Globális Helymeghatározó Rendszer) korában, amikor kényelmesen, egy kis készülékkel bármikor egy gombnyomásra (ezred szögmásodperc pontossággal!) megtudhatjuk a helykoordinátáinkat, miért érdemes régi, bonyodalmasabb és pontatlanabb eljárással kísérletezni?

Ha tényleg csak a végeredmény érdekelne bennünket, nem lenne érdemes ezt a módszert választani. De ha a Föld mozgásáról, és ezzel összefüggésben a Nap járásáról szeretnénk többet megérteni, érdemes elmélyedni a módszerben, és megtapasztalni, hogy műholdak nélkül, egyetlen függőleges pálca árnyékát figyelve is egészen pontos eredményeket kaphatunk. Ezért érdemes ezt a mérést az iskolában is elvégezni a gyerekekkel.

1. ábra. A gnomón, a Nap árnyéka deleléskor, észak-dél irányban a legrövidebb.



## A mérés elve

A földrajzi szélességi és hosszúsági koordináták meghatározásához egy órát, valamint egy függőleges pálcat használunk, amely árnyékát egy vízszintes lapra veti. Ez az úgynevezett gnomon. Az árnyék iránya és hossza a Nap járásával együtt változik.

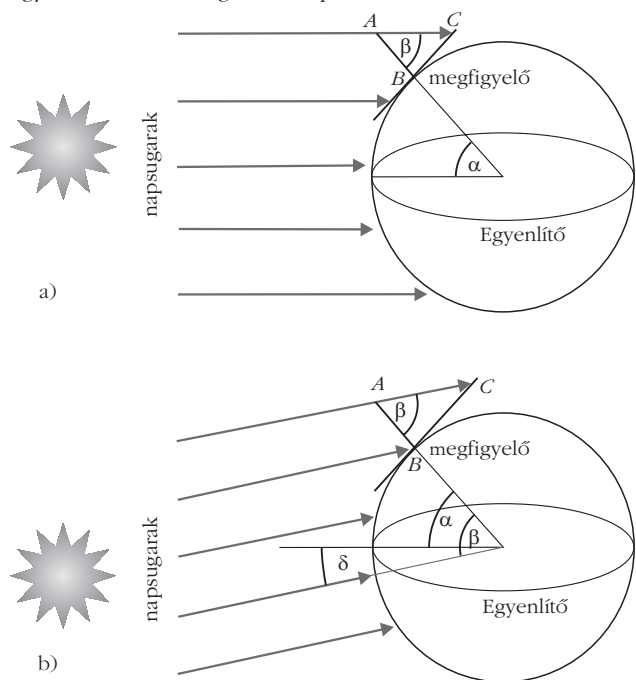
A gnomon árnyéka a Nap delelésekor lesz a legrövidebb. Ilyenkor az árnyék éppen észak-déli irányú (1. ábra).

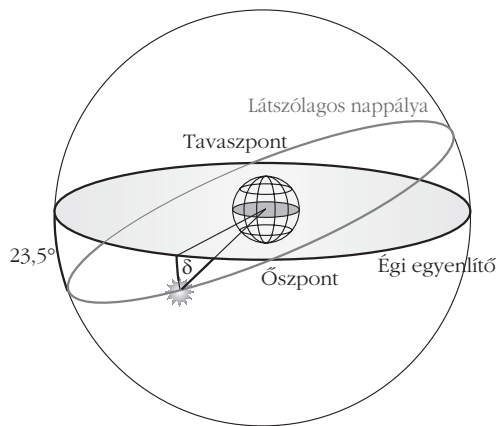
## A földrajzi szélesség meghatározása

A földrajzi szélesség az a szög (lásd a 2. ábrán lévő  $\alpha$  szöget), amit az Egyenlítő síkja és a megfigyelőt a Föld középpontjával összekötő szakasz (a Föld sugara) bezár.

Először tekintsünk el a Föld tengelyének ferdeségétől, azaz tegyük fel, hogy a Nap az Egyenlítő irányából süt. A földrajzi szélesség meghatározásához a Nap delelésekor keletkező (a torz méretarányú 2. ábrán és az 1. ábrán is látható)  $ABC$  derékszögű háromszög megfigyelése szükséges. Ennek  $AB$  oldala

2. ábra. a) A földrajzi szélesség meghatározása napéjegyenlőség idején. b) Azonban a Föld tengelyferdesége miatt általában *nem* az Egyenlítőre süt merőlegesen a Nap délben.





3. ábra. A Nap delelési pályája a Földről nézve egy év során.

maga a pálcá,  $BC$  oldala pedig az árnyék. Az oldalak hosszának ismeretében a háromszög szögei meghatározhatók. A háromszög megszerkesztése után méréssel, vagy szögfüggvények segítségével:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{BC}{AB}.$$

Ha tavaszi vagy őszi napéjegyenlőség idején végezzük el a mérést (2.a ábra), a Nap éppen az Egyenlítő fölött delel, tehát a Nap sugarai az Egyenlítő síkjával párhuzamosan érik a Földet. Ilyenkor az  $ABC$  háromszög  $\beta$  szöge megegyezik a megfigyelő helyzetét jellemző  $\alpha$  szöggel, hiszen váltószögek.

Igy napéjegyenlőség idején az  $ABC$  háromszög  $\beta$  szöge éppen a földrajzi szélesség értékét adja meg.

Ha nem napéjegyenlőség idején mérünk, a Föld tengelyferdeségéből adódóan a napsugarak nem az Egyenlítő síkjával párhuzamosan érik a Földet. A 2.b ábra jelöléseit használva ilyenkor  $\alpha = \beta - \delta$ , ahol  $\alpha$  a keresett földrajzi szélesség,  $\beta$  az  $ABC$  háromszögből általunk meghatározott szög,  $\delta$  pedig az a szög, amit a napsugarak az egyenlítő síkjával bezárnak.

Ez a szög az úgynevezett deklináció, ami az év során napról napra változik (3. ábra). Legnagyobb a nyári és a téli napforduló idején, amikor  $\delta = \pm 23,5^\circ$ .

A mérés napjára érvényes  $\delta$ -értéket táblázatból kereshetjük ki (például a *Csillagászati Évkönyvből*), vagy leolvashatjuk az úgynevezett analemmáról is (lásd később).

## A földrajzi hosszúság meghatározása

Az egyszerűség kedvéért először tekintsük úgy, mint ha a Föld a Nap körül körpályán, tehát állandó sebességgel haladna.

Megegyezés szerint Greenwichen megy át a 0. hosszúsági kör. A megfigyelő hosszúsági koordinátája az a  $\varphi$  szög, amit a megfigyelő helyén átmenő hosszúsági kör és a greenwichi 0. hosszúsági kör síkja alkot (4. ábra). Ennek a szögnek a meghatározására meg kell mérnünk, hogy mikor delelt a nap (vagyis az árnyék mikor volt a legrövidebb, mikor volt éppen észak-déli irányú).

Greenwichben pontosan 12 óra 0 perckor delel a Nap. A megfigyelő helyén korábban vagy később delel, éppen annyi idővel, amennyi idő alatt a Föld  $\varphi$  szöggel fordul el.

A Földön deleléstől delelésig átlagosan egy nap, azaz 24 óra telik el. Ennyi idő alatt a Föld valamivel több, mint  $360^\circ$ -ot fordul, vagyis 1 óra alatt hozzávetőlegesen  $15^\circ$ -ot. Ezért a Földön kijelölt időzónák elvileg  $15^\circ$ -onként követnék egymást, ha az országhatárokat nem lennének figyelemmel.

Az is kiszámítható, hogy a Földnek  $1^\circ$ -os elforduláshoz lényegében 4 percre van szüksége. Az időzónákat úgy jelölték ki, hogy a nyugati határukön 12 óra 0 perckor, a keleti határukön pedig 11 óra 0 perckor deleljen a Nap.

Ha mi a GMT+1 időzónában vagyunk, akkor földrajzi hosszúságunk a  $15^\circ$  és a  $30^\circ$  közé esik. A Nap pedig valamikor 11 óra  $x$  perckor fog delelni (4. ábra). (A nyári időszámítás szerint ehhez még egy órát hozzá kell adnunk, vagyis nyáron a delelés 12 óra  $x$  percre várható!)

Ez azt jelenti, hogy a 30. hosszúsági körtől  $x/4$  fokkal vagyunk nyugatabbra, tehát a földrajzi hosszúságunk fokban kifejezve:

$$\varphi = 30 - \frac{x}{4}.$$

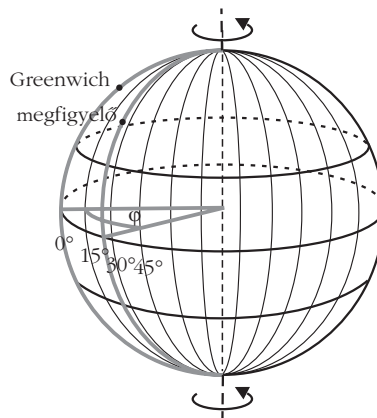
Ha a delelés időpontját meghatároztuk, akkor a földrajzi hosszúságot is megkaphatjuk a fenti képlet segítségével. (Nyilván a GMT+2, +3, ... időzónák esetén a  $30^\circ$  helyett  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , ... írandó.)

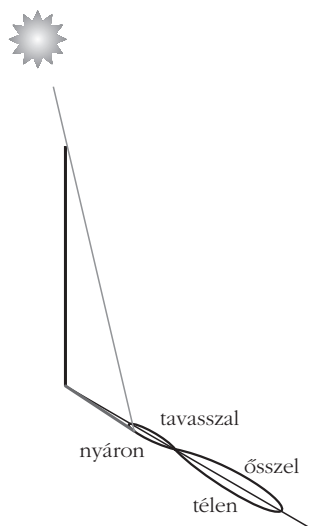
## Korrekcó

A kapott eredmény azonban még nem pontos. Tegyük föl, hogy a földrajzi helyzetünknel fogva nálunk a Napnak 11 óra  $x$  perckor kellene delelnie. Ha egy éven át minden nap megfigyeljük a gnomón árnyékát 11 óra  $x$  perckor, azt látjuk, hogy az nem esik észak-déli irányba, vagyis a Nap 11 óra  $x$  perckor még vagy már nem delel (5. ábra).

A delelés hol előbb, hol később következik be. Ennek oka az, hogy a Föld a Nap körüli pályáján az

4. ábra. A földrajzi hosszúság definíciója





5. ábra. A gnomón árnyékának változása a középido szerinti délben egy év során.

év során hol gyorsabban, hol lassabban halad. Így a Nap két delelése között nem pontosan 24 óra, hanem ennél egy kicsivel több vagy kevesebb telik el.

Az évnek csak négy olyan napja van, amikor a delelés éppen 11 óra  $x$  perckor, az úgynevezett középido szerinti délben következnek be: április 16-án, június 14-én, szeptember 1-jén és december 25-én. A többi napon korrekcióra van szükség, ez az időkiegyenlítés. A korrekció értékét táblázatból kereshetjük ki, vagy leolvashatjuk az úgynevezett analemmagörbéről.

A korrekció értéke maximálisan 16 perc sietés, vagy 14 perc késés. Ha a korrekciós táblázat szerint a mérés idején a Nap  $z$  perccel a középido szerinti dél előtt delel, és az órák szerint 11 óra  $y$  perckor volt a delelés, akkor a földrajzi hosszúságot fokokban a

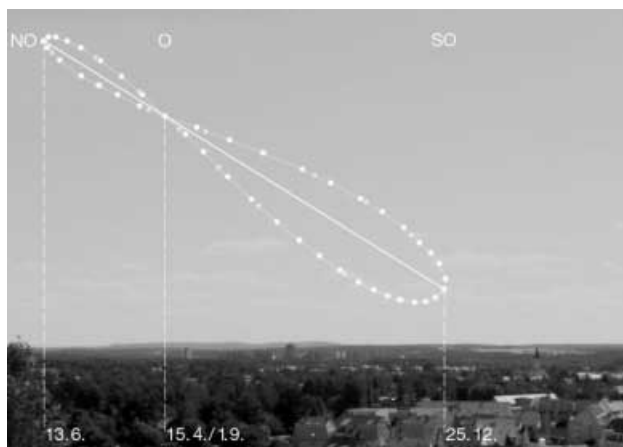
$$\varphi = 30 - \frac{y + z}{4}.$$

képlet határozza meg.

## Az analemma

Az analemmagörbe kirajzolódik, ha minden nap a középido szerinti délben (11 óra  $x$  perckor) megjelöljük a gnomón árnyékának végét (5. ábra). Ekkor egy elnyújtott nyolcas alakú görbét kapunk. Ugyanígy megkapjuk az analemmát, ha a középido szerinti délben lefényképezzük a Napot úgy, hogy mindig ugyanarra a filmre exponálunk egy éven keresztül (6. ábra).

Az analemma grafikonjának (7. ábra) függőleges tengelyén a Nap deklinációja, vízszintes tengelyén az időkiegyenlítés értéke szerepel. A grafikonon így szintén az előzőekben megismert nyolcas alakú görbe látható. Minthogy ez az évek során alig-alig változik, még azt is fel lehet rajta tüntetni, hogy a grafikon egyes pontjai az évnek melyik napjához tartoznak. A grafikonnak ez a fajtája jól használható deklinációs táblázatként is.

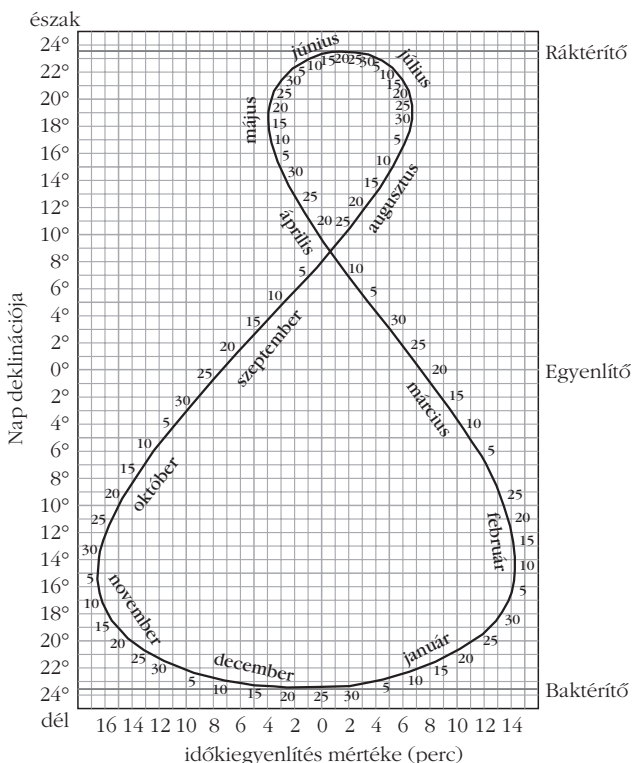


6. ábra. A Nap delelési pontja a középido szerinti délben egy év során (forrás: Wikipédia analemma oldala).

## Gyakorlati tapasztalatok

A mérés során gnomónként jól használható bármilyen függőleges pálca, például egy vízszintezővel beállított Bunsen-állvány rúdja is. Nehézséget jelent az észak-déli irány pontos meghatározása. A mágneses iránytűket zavarhatják helyi tényezők (vagy a Bunsen-állványban lévő vas), és sokszor több iránytűvel próbálkozva eltérő irányokat kaphat a megfigyelő. A probléma kiküszöbölésére jó módszer, ha a pálca árnyékát hosszan figyeljük, a várható delelés előtt és után. A vízszintes lapon egy-két percenként megjelöljük a

7. ábra. Az analemma. A függőleges koordináta a Nap delelési szögének korrekciója (deklináció), a vízszintes koordináta pedig a Nap delelésének a középidohoz képesti „sietése”, illetve „késése” (forrás <http://www.ipgp.jussieu.fr/~tarantola/Icons/Analemma/index.html>).



pálca végpontjának helyét, följegyezzük mellé az észlelés időpontját is. Tapasztalhatjuk, hogy ilyenkor az árnyék vége közelítőleg egyenes mentén mozog. A gnomón talppontjából merőlegest állítva az egyenesre megkaphatjuk a legrövidebb árnyékot. A feljegyzett adatok segítségével elég pontosan megbecsülhetjük, hogy mikor volt a delelés.

Egy másik, érdekesebb, ám egy egész napos megfigyelést igénylő módszer az úgynevezett indiai kör, amivel az észak-déli irány nagyon pontosan meghatározható. Tapasztalataink szerint a mérés bizonytalansága mind a szélesség mind a hosszúság meghatározásakor  $\pm 1^\circ$ . Itt jó referencia egy GPS-készülék.

## A mérés a középiskolában

A gyerekek a földrajzórakon megismerkednek a földrajzi koordinátákkal. Sok osztályban még a deklináció fogalmát is tanítják nekik. Természetesen tudják, hogy a Nap fölkel, delel, majd lenyugszik, és még azt is megtanulták, hogy nyáron magasabban jár, mint télen. De ezt, különösen egy nagyvárosban, sosem tapasztalják meg, ez a tudás a legjobb esetben is csak elméleti tudás marad. (Az általam megkérdezett gimnazista gyerekek

egy része úgy tudta, hogy délben az árnyékunk teljesen eltűnik, mert a Nap a fejünk fölött delel, ha télen talán nem is, de nyáron mindenképpen.)

Tulajdonképpen ez a mérés a földrajzóra tartozna. Ám a földrajzórák száma, ahogyan a fizikáé is, csökken. Ezért a földrajztanárok időhiány és bátortalanság miatt efféle mérésre nemigen kaphatóak. Maga a mérés mégiscsak leginkább a fizikához áll közel, az elmélete pedig geometriai képzelőerőt igényel. A legjobb megoldás a fizika- és a földrajztanár összefogása (nem is említve itt a divatos trendeket...).

A mi iskolánkban a mérést először a matematika iránt fogékony gyerekek tehetséggondozó táborában végeztük el. Itt az elméleti előkészítés közösen zajlott, majd minden gyerek kézhez kapott egy rövid, szemléletes leírást a teendőkről. Ezután a gyerekek négyfős csoportokban mértek.

A mérés megszervezésének korlátja, hogy csak a negyedik vagy ötödik órákban, (nyári időszámításakor az ötödik vagy hatodik órában) a delelés idején, és csak napsütéses (lehetőleg meleg) időben lehet mérni.

De mindenképpen különleges és emlékezetes, sőt remélhetőleg tanulságos és élvezetes is a gyerekeknek. Ajánlani tudom a kollégáknak, hogy akár fizikaórán, akár osztálykiránduláson iktassák be a programba.

## KÉTSZER 125 ÉV

Két jelentős magyar fizikus született 125 évvel ezelőtt. Noha mindketten a budapesti Királyi Magyar Tudományegyetem Bölcsészeti Karának matematika-fizika szakán szereztek tanári oklevelet, majd mintegy fél-száz évvel később ugyanezen az egyetemen tanítottak, pályájuk mégis nagyon eltérő. Ami közös, az a magyar történelem azonos korszaka, ám ezen belül igen különböző módon alkottak jelentőset.

### Novobátczy Károly

Temesvár, 1884. március 3. –  
Budapest, 1967. december 20.

Középiskolai tanári működését Máramaroszigeten kezdte meg. Az I. világháború után került Budapestre, a Kölcsey Gimnáziumban tanított 1919-től negyedszázadon át. Idővel szakfelügyelő lett.

1945-ben, amikor a Tudományegyetem elméleti fizikai tanszékén a tanszékvezetői állás *Ortvay Rudolf* halálával megüresedett, az akkor 61 éves Novobátczy Károlyt hívták meg erre a posztra. Ekkor lett a több tanszékét magába foglaló Fizikai Intézet vezetője is a Tudományegyetemen, amely 1950-től kezdve *Eötvös Loránd* nevét viseli.

Az egyetemen az elméleti fizika modern szemléletű oktatásának megvalósításában a döntő lépés az ő ne-

véhez fűződik, akár saját előadásai, akár a maga köré gyűjtött munkatársak irányítása révén. Ortvay Rudolfnak köszönhetően a kvantummechanika már szerepelt a tanárjelöltek tanrendjében, mégis Novobátczyé az érdem, hogy a 20. század közepén az egyetemi tanrend tárgyait a kor szelleméhez igazította. Rendszeres, kötelező tárgyként szerepeltette a kvantummechanikát, a relativitáselméletet és az atommagfizikát is.

Kristálytisza logikájú egyetemi előadásait idős korában is mindig fejből tartotta. Nagy ritkán vette elő a tárcájából apró papírra vetett „emlékeztetőjét”, hogy a számadatok pontosságát ellenőrizze. Előadásai egyszerű, jól érthető magyar nyelven hangzottak el. Fizikus egyetemi hallgatók, matematika-fizika szakos tanárjelöltek nemzedékei nevelkedtek előadásain, jegyzetein és tankönyvein. Amikor 1950 táján megindult a rendszeres magyar egyetemi tankönyvkiadás, az első kötetek között jelent meg az ő elektrodinamika, majd relativitáselmélet tankönyve.

A tanszék fiatal munkatársait az úgynevezett tanulószemináriumok rendszeres munkájába szervezte. Ám hamarosan ezek a szemináriumok olyan fórumokká váltak, amelyeken a friss kutatási eredmények első bemutatása és szakmai vitája zajlott. Csakhamar fogalommal váltak ezek a szerdai ülések, a „Puskin utcai szemináriumok”, amelyeken gyakran szerepeltek külföldi vendégek – az Ortvay Rudolf rendezte tanszéki



tudományos ülések mintájára – és rendszeresen jelen voltak, előadásokat tartottak kollégák az ország más kutatóhelyeiről is.

Novobátzky Károly tudományos tevékenységét alapvetően motiválta *Planck* termodinamikai és *Maxwell* elektrodinamikai szemlélete. Mély benyomást gyakorolt rá az elektromágneses erőterről összegyűjtött tapasztalati tények Maxwell, majd *Hertz* által elvégzett fogalmi rendszerezése. Ismeretes, hogy a modern fizika forradalmának egyik ága, a relativisztikus fizika, éppen az elektromágneses erőter elméletének kiépítése során pattant ki. Az első világháború után, Eötvös Loránd és *Zemplén Győző* halálával a középiskolai fizikatanár Novobátzky volt az egyetlen szakember, aki alkotói szinten ismerte a relativitáselméletet. Nem csoda, hogy miután Budapestre került, a Kölcsey Gimnáziumba, felkérték az Eötvös Kollégium tanárának, ahol a relativitáselméletbe vezette be tanítványait.

Nevének nemzetközi elismerést a kvantum-elektrodinamika – vagyis az elektromágneses erőter kvantumelmélete – kialakulásának folyamán 1938-ban publikált dolgozatával vívott ki, amelynek eredményére a mai napig hivatkoznak.

Kutatói hitvallásában csakúgy, mint a tanított tárgy szellemének átplántálására irányuló oktatói felfogásában, a tapasztalati és fogalmi megismerés egyenjogú egymásra utaltságába vetett hit vezérelte. Ritkán előforduló önmegtartóztató álláspont egy elméleti fizikus részéről, aki olyan irányban vizsgálódik, mint például az egységes térelméletek az általános relativitáselméletben.

Az elméleti fizika számára módszertani eszközül a tenzorkalkulust és a variációszámítást becsülte legtöbbre, az előbbit azért, mert automatikusan kifejezi a természet-törvények vonatkoztatási rendszertől független voltát, e tekintetben tehát a fizikus számára „objektív” tartalmát, az utóbbit azért, mert „páratlan összefoglaló képességű kalkulus”, amely a kutatásban is igen hatékony eszköz.

Elismerésben nem szenvedett hiányt. A Magyar Tudományos Akadémia 1947-ben levelező, 1949-ben rendes tagjává választotta, 1958 és 1967 között az alelnöki tisztelet is betöltötte. Két alkalommal kapta meg a Kossuth-díj arany fokozatát. Politikai szerepet is vállalt az akkoriban ideológiai szempontból gyanús elméleti fizikai témák zavartalan kutathatósága érdekében. Ennek a szerepnek a hatásosságát a Novobátzky-iskola eredményei mutatják napjainkig.

Novobátzky Károly a fizikusok és fizikatanárok továbbképzését fontos feladatként támogatta. Jelentős szerepet játszott az Eötvös Loránd Fizikai Társulat (ELFT) II. világháború utáni újjászervezésében. Az ELFT-nek előbb elnöke volt, majd tiszteletbeli elnökké választották. Halála után, 1969-ben az ELFT az emlékének ápolására *Novobátzky-díj*at alapított, amelyvel évente azokat a kutatókat jutalmazza, akik az elméleti fizika terén jelentős eredményt értek el.

Magánéletében puritán egyszerűség jellemezte. Objektív történelemszemlélete, hajlíthatatlan következetességű becsületessége példamutató volt tanítványai és munkatársai számára. Úgy szólván élete utolsó pillanatáig tanított és részt vett a kutatómunkában.

## Selényi Pál

Dunaadony, 1884. november 17. –  
Budapest, 1954. március 21.

1902-ben beiratkozott a budapesti Királyi Magyar Tudományegyetem Bölcsészeti Karának matematika-fizika szakára. Tanári gyakorló évét a Trefort utcai Minta-gimnáziumban töltötte. 1907-től 1918-ig a II. számú fizikai intézetben dolgozott, mint *Klupatby Jenő* tanársegéde. 1909-ben publikálta alapvető fontosságúnak bizonyult nagyszögű interferenciakísérletéről beszámoló dolgozatát. 1910-ben summa cum laude minősítéssel doktorált, az 1912–13-as tanévet Berlinben és Göttingenben töltötte. 1915 és 1918 között a harctéren szolgált, a tüzérségnél hangfigyelés volt a feladata.

A Tanácsköztársaság idején vállalt tisztségei miatt elbocsátották az egyetemről. Rövid ideig a Posta Kísérleti Állomáson dolgozott, majd magánvállalathoz, az Erdélyi és Szabó laboratóriumi felszerelés és precíziós mérleget gyártó céghez került.

Amikor *Pfeifer Ignác* 1921-ben megszervezte az Egyesült Izzó Kutatólaboratóriumát, Selényit az elsők között vette oda. Selényi a tudományos és az ipari célú kutatás között soha nem látott ellentétet. Ő maga is mind az alapkutatás, mind az alkalmazott kutatás területén kiváló alkotott. Nagyszögű interferenciakísérlete egy olyan kérdésre adott választ, amiről akkoriban igen sok vita folyt.

A Tungstam kutatólaboratóriumában igen sok ötlettel és szabadalmával segítette az izzólámpa-fejlesztést. Az üveg hőtágulásának mérésére *Patai Imrével* együtt szerkesztett egyszerű berendezést. Módszert dolgozott ki a lezárt lámpában maradt gáz nyomásának meghatározására, másik módszert a lámpa izzószálaban lévő tórium kimutatására. Sokat foglalkozott a fotocellákkal és a fényelemekkel. A maga idejében sem volt ismert a közvélemény előtt, hogy ő dolgozta ki azokat a fényelemeket, amelyek széles körű alkalmazásra találtak a fényképezőgépek megvilágításmérőjében. A fényelemek több alkalmazását is kidolgozta, így készüléket szerkesztett a megvilágítás erősségének mérésére, továbbá a paprika színének meghatározására.

Ma már látjuk, hogy Selényi legjelentősebb ipari fizikai felfedezése a fénymásolás, a xerográfia volt. Ennek jelentőségét ő felismerte, sokat írt róla, itthon és külföldön is szabadalmaztatta, azonban sem a gyár, sem kollégái nem álltak ki mellette. Kézzel forgatott hengerre feszített viaszos papírlapon jó minőségű képeket állított elő, sőt kidolgozta a módszernek televíziós kép megjelenítésére alkalmas változatát is – a támogatás hiánya miatt ezzel azonban nem kísérletezhetett. Ugyanezen az elven oszcillográfot is szerkesztett, aminek az volt az előnye, hogy a képet rögzítette.

A zsidókat korlátozó 1939. IV. törvénycikk nyomán 1940. január elsejével nyugdíjazták. Ezután, kilenc éven át egy magáncégnél, *Székelly Miklós* villamossági vállalatánál dolgozott. Feladata a szelén egyenirányító tökéletesítése volt.

1945-ben nagy lelkesedéssel kapcsolódott be az újjáéledő tudományos életbe. Előadásokat tartott a Magyar

Természettudományi Társulatban, az Elektrotechnikai Egyesületben, és beszámolóinak rendszeresen fóruma volt a Magyar Kémikusok Egyesülete. 1948-ban ugyan az MTA levelező tagjává választotta, azonban 1949-ig Székely Miklós magáncégénél dolgozott tovább. Végre 1950-ben magántanári címet kapott és az Eötvös Loránd Tudományegyetem kísérleti fizikai tanszékére került. „Egyetemi tanári címet kapott, kutatócsoportot vezetett” olvashattuk több róla szóló írásban. Ez, sajnos nem így volt. 1950-ben egy negyedéves hallgató, majd egy frissen végzett tanár mint tanársegéd volt a segítsége.

Kiváló előadónak ismerték, részt vett a tanárok továbbképzésében, az ő kezdeményezésére újította fel az Eötvös Loránd Fizikai Társulat a középiskolai fizikai tanulmányi versenyt és nevezte el Eötvös-versenynek. Arra, hogy tanszéket kapjon akkor, amikor szó szerint elfogytak az oktatók a tanszékekről – ki tudja miért – nem kerülhetett sor. Halálának tízéves évfordulóján alapított róla elnevezett díjat az Eötvös Loránd Fizikai Társulat.

Fontosabb eredményei a következőkben összegezhetők: a fizikai alap kutatás körébe tartozik nagyszögű interferenciakísérlete. Erről így ír életrajzában: „...máig is legkülönb munkám, melyet a szakirodalom számtalanszor idézett, és melynek eredménye, hogy a fényforrások elemi sugárzása pontosan úgy viselkedik, mint egy Herz-féle dipólusból kiinduló, minden irányban koherens gömbhullám.”

Képrögzítési kísérletei (amelyeknek a jelentőségét senki sem ismerte fel) azt bizonyították, hogy egy alkalmas szigetelőkör (láthatatlan) töltéskép hozható létre, és ez a kép beporzással megjeleníthető. E munkának három alkalmazására is rámutatott: katódsugárcső ernyőjén kialakult kép rögzítése; képmásolás; képátvitel, ami a xerográfia őse, az előbbi alkalmazása televíziós kép kivetítésére.

Ő dolgozta ki azt a fényelemet, amely alapját képezte a fényképezőgépek megvilágításmérőjének. A szelén egyenirányító működésére vonatkozó vizsgálati nyomán sikerült jó minőségű egyenirányítókat gyártani, amik azután évtizednél hosszabb ideig igen széles körű alkalmazást találtak.

Halála alkalmából a *Fizikai Szemle* 95 írásáról közölt jegyzéket, amit felesége 13 évvel később további 8 tétellel egészített ki. Nincsenek feldolgozva a Tungsram laboratóriumában írt belső jelentések, valamint szabadalmi sem. Több tucat ismeretterjesztő publikációt készített.

Sajátságosan alakult az elektrográfia tárgyú publikációinak és szabadalmainak sorsa. Az oszcilloszkóp ernyőn való képrögzítési eljárásra 1929. január 18-án jelentett be USA szabadalmat (US-Patent 1, 818, 760 aug. 11., 1931.). Itt bukkan fel tehát először az elv, amit később az elektrográfia (mai szóval: xerográfia) technikánál is alkalmazott. Az elektrográfia elvét – lényegében egy időben – német és angol nyelven is publikálta. Sem az *Elektrotechnische Zeitschrift*-ben 1935-ben, sem az *Electronics*-ban 1936-ban megjelent írása nem szerepel az Akadémia Kiadónál megjelent összes műveiben! A *Wireless Engineer*-ben 1938-ban napvilágot látott írása már nem maradt hatás nélkül – igaz, ebben nem volt köszönet. Egy *C. Carlson* nevű szabadalmi ügyvivő az USA-ban olvasta a cikket, aminek nyomán elkészítette a berendezést. Így született meg a xerox eljárás 1938-ban, az USA-ban. *C. Carlson: Electron Photography*, US-Patent 2, 221, 776, a benyújtás dátuma: 1938. szeptember 8.



Az ugyanazon évben született két jelentős fizikus életútjának összehasonlítása kevés általános tanulsággal szolgál. Az utókor 125 évvel a születés után mind feleletesebben hálás, noha még élnek az egykori munkatársak, tanítványok közül néhányan. Már léteznek visszaemlékező, értékelő írások, még vannak élő tanúk – minden érdeklődő olvasó kialakíthatja a tanulságokat a maga számára.

Füstöss László

#### Irodalom

Nagy Károly: Novobátczy Károly, a tudós tanár. *Magyar Tudomány*. 1984/6. 458.

Nagy Károly: Novobátczy Károly. *Fizikai Szemle* 54 (2004) 200.

Varga Péter: Selényi Pál nagyszögű interferenciakísérletéről. *Fizikai Szemle* 35 (1985) 86.

Tar Domokos: Selényi Pál és a xerográfia. *Fizikai Szemle* 47 (1997) 5.

## DISZKUSSZIÓ

### Hraskó Péter: AZ ANTROPIKUS ELVRŐL

(58. évfolyam, 10. szám, 321–322. oldal)

Tisztelt Szerkesztőség!

Érdeklődéssel követem az antropikus elvekről folytatott vitát a *Fizikai Szemlé*-ben. Ezzel kapcsolatban lenne két megjegyzésem, egy strukturális jellegű és egy kicsit csillagászatibb.

1. Rendkívül elegánsnak tartom a levezetést, amely szerint az ugyanolyan **B**-t okozó **H<sub>0</sub>** és **H<sub>1</sub>** hipotézisek közül, **B** megfigyelése után, csak a szubjektív valószínűségnek megfelelő mértékben, lényegében a priori föltevésünk szerinti valószínűséggel választhatunk.

Általában a fizika hipotézisei valamilyen mértékben különböző  $B_1$ ,  $B_2$  stb. jósolatokkal élnek, amelyeket természetesen a megfigyelés hibáival terhelten, de lényegében el tudunk egymástól mérésrel különíteni. (Persze csak optimális esetben létezik az említett elkülöníthetőség; most nem beszéltem arról az esetről, amikor a helyes hipotézis sem nem  $H_0$ , sem nem  $H_1$ , és úgy járunk, mint *Arisztarkhosztól* és *Ptolemaiosztól* kezdve *Tycho Brachéig* mindenki. Ekkor az elkülönítés nyilván további problémákhoz vezet...)

Mindenesetre, a fenti értelemben az antropikus elvek „nem fizikai elméletek”. Esetükben a szubjektív valószínűség „túléli” tehát a kísérletet, ami gyakorlatilag azt jelenti, hogy a kísérletből nem tanultunk, felesleges volt elvégezni.

Az intelligens tervezés elmélete nyilvánvalóan ugyanarra a  $B$  hipotézisre vonatkozik, mégpedig definíciószerűen, mint a teljes fizikai arzenál maga is. A közölt levezetésből látható, ami egyébként is plauzibilisnek tűnik, hogy ilyen esetben  $B$  megfigyelése nem szolgál tanulsággal, a világ megfigyelése alapján nem dönthetünk sem jobban, sem kevésbé az intelligens tervezés mellett, vagy ellene, mint a világ megfigyelése nélkül. Ilyen szempontból az intelligens tervezettséget besorolhatjuk azok közé az ideologikus, vallási jellegű természetfilozófiák közé, mint amilyenekre nem egy példa adódik a tudománytörténetben, például az újplatonikus kozmogóniában vagy a késői skolasztikában.

2. Ugyanakkor fontosnak tartom, hogy elhatároljuk az intelligens tervezettséget az antropikus elvektől általában. Antropikus elvből egy tucat különböző változat létezik, az intelligens tervezés a fundamentalista változatok közé sorolható. A gyenge és erős antropikus elvek, amelyeket általában ki szoktak mondani, ennél kevesebbet és tudományosabbat állítanak: ezek szerint a természeti állandók a priori nem egyformán valószínűek, hanem figyelembe kell venni, hogy A) nincsenek ellentétben az élet kialakulásával (gyenge változat), vagy, B) hogy létezésük az Univerzum történetének egy szakaszában megfigyelők létrejöttével jár (erős változat). Az erős változat sem annyira fundamentalista, mint az intelligens tervezés, hiszen nem tételez fel semmilyen tervezőt. Én magam a gyenge antropikus elvet úgy tekintem, mint a kozmológiai hipotézisek lehetséges (és fontos) cenzorát: bizonyosan rossz az a kozmológiai elmélet, amely ellentétben áll az élet kialakulásának lehetőségével.

A finomhangolás lehetséges magyarázataira talán *Paul Davies* hipotézisei a legátfogóbbak. Szerinte a finomhangolás miatt az alábbiak egyike áll fenn:

1. A Világegyetem finomhangolása tiszta véletlen.
2. Egy egyelőre ismeretlen, Nagy Általános Természeti Törvényből levezethető az egész fizika, amely a finomhangoltságot is természetes módon tartalmazza.
3. Multiverzumok vannak, a miénk épp olyan, hogy kialakulhatott benne élet, de van egy csomó más milyén is.
4. Intelligens tervezés.

5. Az élet kifejlődése a Világegyetemben természeti törvény.

6. A megfigyelők hozzák létre a Világegyetemet.

7. Egy virtuális szimulációban élünk.

Érdemes lenne megvizsgálni, hogy a gyöngye, vagy erős antropikus elv, illetve Paul Davies scenáriói megvizsgálhatóak-e valamilyen fizikai elmélet keretei közt. Tartok tőle, hogy nem, hiszen mindegyik ugyanazt a  $B$ -t jósolja, és a matematika, láttuk, ilyen esetben nem engedi meg, hogy  $B$  megfigyeléséből tanuljunk. Mindenesetre én magam, tisztán „érzelmi” szinten, fel tudok állítani egy sorrendet ezekhez a lehetséges magyarázatokhoz: a virtuális szimulációnál szubjektíve valószínűbbnek tartom a teljesen véletlenül bekövetkező finomhangolást, de ezzel is kevésbé tudok „szimpatizálni”, mint a multiverzum hipotézissel, vagy a Nagy Elmélettel. Ezeknek az előfeltevéseknek a személyben való kialakulása ismét egy olyan téma lehet, amely megérné a részletes analízist, ám ezen a ponton valószínűleg inkább a filozófia, mint a matematika eszközeivel.

Tisztelettel,

Szabó M. Gyula  
csillagász, PhD

Tisztelt Szerkesztő úr!

Csupán egyetlen pontban lehet vitám Szabó Gyulával – abban, hogy komolyan veszi az úgynevezett „finomhangolást”, amelyen ebben az összefüggésben azt értik, hogy ha a természeti állandók értéke csak egy kicsit is más volna, mint ami, akkor már nem lenne lehetséges élet és nem létezhetnénk mi emberek sem. Ahhoz azonban, hogy valamennyire is megalapozottan levonhassuk ezt a következtetést, az összes alternatív lehetőség figyelembe vételére lenne szükség, ami szinte természetfölötti képességeket igényelne. Paul Davies hét pontján ezért csak mosolyogni lehet.

A kozmológiában gyakran egy egészen más problémát hívnak finomhangolásnak. A kozmológiai elv, amelyet ma általánosan elfogadnak, azt mondja ki, hogy a Világegyetemben nem vagyunk kitüntetett helyzetben, mert a térben minden pont (és minden irány) egyenértékű. Ha ebből az elvből indulunk ki, akkor az általános relativitáselmélet szerint a geometriai tér nagyléptékű szerkezete csupán háromféle lehet: vagy a gömbhöz, vagy a Bolyai-síkhöz, vagy az euklideszi síkhöz hasonlít. Nyomós érvek szólnak amellel, hogy történetének korai szakaszában az Univerzum az euklideszi síkhöz hasonlított legjobban, de az ettől való kis eltérések fölerősödése miatt a geometriája ma lehetne a három közül bármelyik. A megfigyelések azonban egyre határozottabban mutatnak abba az irányba, hogy a Kozmosz nagyléptékű geometriája ma is euklideszi. A korai állapotnak ezért nagyon „finoman hangoltnak” kellett lennie ahhoz, hogy az euklideszi jelleg máig fennmaradjon. Ez valódi fizikai probléma, a modern kozmológia sokat vitatott fontos kérdése.

Hraskó Péter

# AZ ISMERETTERJESZTÉS ÖTLETES ÚTJA

Lawrence M. Krauss: A STAR TREK FIZIKÁJA

Cartaphilus Könyvkiadó, Budapest, 2008, 244 oldal

A Star Trek kifejezés hat, összesen 726 részes tudományos-fantasztikus (sci-fi) filmsorozat, tíz egész estés mozifilm és több száz regény, videojáték stb. gyűjtőneve. E történetek közös eleme, hogy mind a *Gene Roddenberry* által az 1960-as években kitalált világban játszódnak. Az amerikai televíziós képernyőkön 1966-ban jelent meg az első sorozat, a moziban a legfrissebb változat idén májusra várható.

A már-már mítosszá emelkedett kitalált univerzum a távoli (néhány száz évvel későbbi) jövőben játszódik, és optimista, már-már utopisztikus képet fest a Föld jövőjéről: az emberiség kinőtte a betegségek, a szegénység és a különbözőség elfogadásának képtelensége jelentette problémákat, és egy nagy föderációban, a Bolygók Egyesült Föderációjában egyesítve él más intelligens fajokkal. A főszereplők e Föderáció haderejében, a Csillagflottánál teljesítenek szolgálatot, és céljuk új életformák, új civilizációk felkutatása, bemutatva útjuk során a főbb emberi értékeket (megértés, együttérzés stb.) az idegen fajoknak. (A *Wikipédia* nyomán)

A Star Trek az egyik legismertebb név a tudományos-fantasztikus televíziózás történetében.

*Lawrence Krauss*, aki a fizika, elsősorban a kozmológia nagy hírű professzora, továbbá közéleti személyiség, legutóbb *Obama* kampányának tudománypolitikai bizottságában is tevékenykedett. Ezen kívül folyamatosan szakított időt a Star Trek több mint negyven éves történetének követésére, aminek egyik bizonyítéka a Star Trek fizikájának megjelenése 1995-ben (ennek lefordítása 12 nyelvre már mások dolga volt). A most vizsgált könyv alapja a 2007-es második kiadás, amely az észrevételek és a vizsgálat tárgyának továbbfejlődése miatt jelentősen bővült. Ennek az új kiadásnak az előszavában írja a szerző: „Leginkább abban reménykedtem, hogy a kiadás után nem lincsel meg a feldühödött rajongók hada, és fizikus kollégáim továbbra is szóba állnak majd velem.” Krauss mindkét reménye teljesült, ami nem meglepő, hiszen elfogadta a fantázia-szülte alapmotívumokat, azaz csatlakozott a rajongókhoz, ám alkalmanként használta fizikusi felkészültségét, és például kiszámolta, hogy a filmben gyakori és néhány másodperc alatt megvalósuló teleportáció mennyibe kerül és mik a valóságos esélyei.

A Star Trek űrhajói közel fénysebességgel haladók sokemeletes luxusszállodák, tehát nem érdemes a megvalósítás részleteiben elmerülni. A rajongók, de a kitartó nézők is, egy folytatásos történet egyes fejeze-

teire kíváncsiak, miközben technikai nehézségek annyiban léteznek, amennyiben a szerzők ilyet felvetnek. Krauss belemegy ebbe a játékba, és csak olyan problémákat vet fel, amelyek meggondolását fizikai szempontból tanulságosnak gondolja.

Az első példa a fénysebesség felét nagy gyorsulással megközelítő űrhajóban eltorzuló arc elemzése: „Lassan elveszti eszméletét és meghal.... A Star Trek zseniális írói, akikben megbízok, még nem fedezték fel a tehetlenségcsillapítókat, melyeket majd a sorozat egy későbbi részében vezetnek be. Önt ezúttal egy fölöttébb hétköznapi dolog, *Isaac Newton* mozgásra vonatkozó törvénye döntötte le a lábáról – azaz az első tétel, amit az ember a középiskolai fizikából elfelejt.” A következő három oldalon a szerző okosan, egyszerűen elmagyarázza a tehetlenséget, a reakcióerőket, hogy mit kell megoldania a tehetlenségcsillapítónak. Ám „...mint a Star Trek világában létező technológiák nagy részénél, itt is sokkal egyszerűbb leírni azt a problémát, amit a lengéscsillapítók megoldanak, mint megmagyarázni, hogy ezt pontosan hogyan is teszik... Egy Star Trek-es megoldásnak nemcsak egy bizonyos fizikai problémát kell megkerülnie, hanem a teljes, e problémával kapcsolatos fizikai tudást.”

A klasszikus mechanika után jön a speciális relativitáselmélet. A Galaxisban kószáló űrhajók számára a fénysebesség elviselhetetlen korlát, amin az antianyaggal fűtő térhajtómű segít. Az antianyag előállítás nehézségeinek megvitátását későbbre halasztva, a fénysebesség felének elérésére tervezett kémiai rakétatípusú impulzushajtómű energiaszükségletét számítja ki a szerző egyetlen gyorsítás-lassítás ciklusra. Az űrhajó négymillió tonnás tömegét figyelembe véve az eredmény jelenlegi civilizációnk összteljesítményének milliárdszorosa.

A nehézségek elkerülésére az általános relativitáselmélet szolgál, ott ugyanis a négydimenziós görbült téridőben bolyongani sok meglepetéssel kecsegtet és triviális hibák elkövetése sem fenyeget, hiszen ebben az elméletben semmi sem triviális. Csinos féregjáratokat lehet építeni és bennük a múlt vagy a jövő felé kalandozni. A fekete lyukak pedig különösen jó lehetőséget adnak a bátorság bemutatására. Elsősorban a szerzők bátorságára, hiszen a fekete lyuk belsejében nem érvényesek a fizikai törvények. Krauss azonban tudja, hogy az eseményhorizonton „...nem létezhet *repedés*, amely szükséges volt a Voyager legénységének ahhoz, hogy csodával határos módon megmene-

küljenek a fekete lyuk belsejéből. (Sőt, ez az ötlet olyan abszurd, hogy felkerült a tíz legdurvább Star Trek-bakít tartalmazó listámra...)”

A galaktikus távolságok áthidalása szubtérsébséggű eszközzel úgy érhető el a téridő görbítése révén, hogy az az űrhajó mögött táguljon, előtte összehúzódjon. Az űrhajó nem fog gyorsabban haladni a fénynél, mivel a fényt magát is viszi a tér táguló hulláma. Ezzel az eljárással az Enterprise-D űrhajó számára normálisan elérhető legnagyobb sebesség a fény sebességének 1909-szerese.

Nos, ezek voltak a jó hírek... olvashatjuk a *Kozmikus pókerjáték* című fejezet vége felé. – „A Nap felszínén lévő gravitációs mező a fénysugarakat 1/1000 fokkal képes hajlítani. Képzeld el, hogy milyen extrém gravitációs mezőt kéne egy űrhajó közelében generálni, hogy a közeledő fénysugarat 90°-kal hajlítsa el.” Mindeközben egy, a fénysugár útjának görbítésére szolgáló, űrhajó méretű fekete lyuk létrehozása több energiát igényel, mint amennyit a Nap eddigi működése során összesen kibocsátott.

A második részben „...az olvasó közelebből is megismerkedik a transzportersugarakkal, a térhajtóművel, a dilithiumkristályokkal, az anyag-antianyag meghajtóval és a holofedélzettel”, vagyis a Star Trek epizódok világának berendezésével. A *hipp-hopp, ott legyek, ahol akarok* népmesei motívumát ebben a világban a transzporter valósítja meg. Elég a megfelelő helyre állni, és annyit mondani: Sugározz fel! és már célba is értünk. Az Új nemzedék technikai leírása részletesen ismerteti a folyamatot: „Először is a transzporter célba veszi az objektumot. Utána beszkenne a transzportálni kívánt képet, *dematerializálja*, majd egy időre a *mintázattárolóban* tartja, utána egy *gyűrűs szigetelő sugár* segítségével *anyaghullámot* küld a célállomás felé.” Persze a test és lélek problémája miatt néha *neutrális energia* bolyong a testek között, de a technika itt háttérbe szorítja a spiritualizmust.

Gond nélkül is akad bőven. Amennyiben csak információt továbbítunk, akkor másolni egyszerűbb, mint transzportálni, mert ekkor az eredeti példányt nem kell megsemmisíteni. Ez persze számos etikai gonddal jár. Ha atomokat akarunk közel fénysebességgel transzportálni, felhevíthetjük azokat arra a hőmérsékletre, ahol a részecskék sugárzássá alakulnak, mintegy  $10^{12}$  K hőmérsékletre, ami néhány száz egy megatonnás hidrogénbomba energiájának felel meg. Amennyiben megelégszünk a protonok és neutronok közel fénysebességgel történő transzportjával, akkor az  $mc^2$  energia az előbbi tízszeresére adódik – cserébe a test felépítése egyszerűbb feladat. Egyszerűbb, de nem egyszerű:  $10^{28}$  atom állapotának leírásához legalább ennyi kilobyte információ tárolására, majd lehívására van szükség. A könyvben ennek a számítástechnikai feladatnak a részletezése is megtörténik. És megtörténik a kvantum-teleportáció lehetőségének kizárása is olyan bonyolult rendszerekre, mint egy emberi test.

A következő fejezetben az anyag-antianyag meghajtás esetén elkerülhetetlen antianyag begyűjtési

nehézségekről esik szó. Minthogy az antirészecskék előállítására több energia kell, mint amennyi fotonná alakulásuk során felszabadul, valami radikálisan egyszerű megoldásra lenne szükség. A Star Trekben alkalmazott „kvantumtöltés fordító berendezések” egyszerűen megváltoztatják az anyagi részecskék töltését, így a kiindulási protonok és neutronok helyett anti-protonokat és antineutronokat kapunk. Az eljárás vonzóan egyszerű, ám pusztán blöff, semmi ilyesmire nincs lehetőség.

A holofedélzetről szóló fejezetben a hologramokból megalkotott világ veszélyéről, a holofüggőségről van szó, azaz a szerző közérthetően elmagyarázza a holográfia elvét és működését. A holografikus orvost azonban nem ajánlja gyógyításra.

A harmadik rész három fejezete közül az első a földön kívüli civilizációk lehetőségének és megtalálásuk valószínűségének kérdésével foglalkozik. A kapcsolat a Star Trekkal nyilvánvaló, „hiszen az Enterprise űrhajó *folyamatos küldetése* nem a fizika törvényeinek vizsgálata, hanem a különös új világok, új életformák és új civilizációk felkutatása”.

A következő fejezet a Star Trek sorozat által használt fizikai ötletek legemlékezetesebbjei ürügyén szó esik az Univerzum méretéről, a sötét anyagról, a neutroncsillagokról, hűrelméletről, kvantummérésekről, szolitonokról, kvazárokról. Ahány címszó, annyi érdekes eszmefuttatás.

Az utolsó fejezetben található a kiemelkedő bakik, amikor a Star Trek írói „...áthágták az *erős ködösítés*, a *nebezen elképzelt* valamint a *teljesen lehetetlen* határait”. Krausst a gondatlanság balesetei csak szórakoztatják, de a halandzsa kipukkadását törvényszerűnek érzi: „Miközben a Voyager hazafelé igyekszik, és egy helyi érdekű járat rendszerességével utazik az időben, a modern fizika tárgykörébe tartozó összes műszó előkerül. A fizikai kifejezések azonban többnyire jelentenek is valamit, így amennyiben csak a történet kedvéért használják őket, valószínű, hogy előbb-utóbb zátonyra futnak. Az eseményhorizonton jelentkező »repedés« a fizikusok számára különösen nagy örülségnek hangzik. A »repedés« megjelenése az eseményhorizonton olyasmi, mintha eltávolítanánk egy kör egyik végét, vagy mintha csak egy kicsit volnánk terhesek.”

A halandzsa kívül esik Krauss jóhiszeműségének határain. De könyvében azt a stratégiát követi, hogy elfogadja a népszerű Star Trek naiv alapvetését, és a szereplők, a történetek közismertségére építve mond el sok mindent a fizikából, amire így talán oda is figyelnek az olvasók. Azt írja könyve utolsó bekezdésében: „A Star Trek azáltal, hogy hangsúlyozza, a tudomány milyen fontos szerepet játszhat az emberiség fejlődésében, szellemesen illusztrálja a tudomány és a kultúra közötti kapcsolat szoros voltát. Annak ellenére, hogy néha azt állítottam, a huszonharmadik század tudománya talán nagyon kevésbé hasonlít majd arra, amit a Star Trek írói elképzelték, úgy gondolom, hogy [az] a tudomány sokkal lenyűgözőbb lesz.”

Füstöss László

## HÍREK ITTHONRÓL

### Kitüntetések március 15-e alkalmából

A Magyar Köztársaság elnöke – a miniszterelnök előterjesztésére – 2009. március 15-én, nemzeti ünnepünkön *Széchenyi-díjat* adományozott JÁNOSSY ANDRÁS-nak, az MTA rendes tagjának, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fizikai Intézet tanszékvezető egyetemi tanárának a kondenzált anyagok fizikája számos területén végzett, határainkon túl is elismert kutatásaiért, valamint a nemzetközi szintű mérnökfizikus-képzés létrehozása érdekében végzett meghatározó tevékenységéért.



*Hiller István* oktatási és kulturális miniszter a Magyar Köztársaság elnöke megbízásából március 15-e alkalmából, a *Magyar Köztársasági Érdemrend Tisztikeresztje* kitüntetést adta át SZABÓ GÁBOR akadémikusnak, a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék egyetemi tanárának eredményes kutatói és oktatói munkájáért, a fizikai ismeretek népszerűsítéséért, valamint az egyetemi és országos szintű tudományos testületekben végzett szakmai-közéleti tevékenységéért elismeréseként.

*Vadai Ágnes* honvédelmi államtitkár a Magyar Köztársaság elnöke megbízásából nemzeti ünnepünk, március 15-e alkalmából beosztásában huzamos időn át végzett kiemelkedő munkássága elismeréseként, a *Magyar Köztársasági Érdemrend Tisztikeresztje* katonai tagozatát adományozta SOLYMOSI JÓZSEF ny. mk. ezredesnek, hadtudomány doktorának, a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Bolyai János Katonai Műszaki Kar, Katasztrófavédelmi Tanszék, egyetemi tanárának.

*Hiller István* oktatási és kulturális miniszter a Magyar Köztársaság elnöke megbízásából március 15-e alkalmából, kimagasló színvonalú munkája elismeréseként a *Magyar Köztársasági Érdemrend Lovagkeresztje* kitüntetést adta át SÜKÖSD CSABÁ-nak, a fizikai tudomány kandidátusának, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Kar Nukleáris Technikai Intézet tanszékvezető egyetemi docensének a nukleáris fizika oktatása terén végzett eredményes és sokoldalú munkássága, szakmai-közéleti tevékenységéért elismeréseként.

A Magyar Tudományos Akadémia elnökének előterjesztésére, a *Sólyom László* köztársasági elnök által adományozott *Magyar Köztársasági Érdemrend* és *Magyar Köztársasági Érdemkereszt* kitüntetések átadására került sor 2008. március 13-án, az MTA Roosevelt téri székházának Kistermében.

A kitüntetéseket *Pálinkás József*, az MTA elnöke adta át.

A március 15-e alkalmából tartott ünnepi megemlékezésen, a kitüntetések átadását megelőzően *Pálinkás József* köszöntőjében kiemelte, hogy az első felelős kormány tagjai között hat akadémikus is volt, *Széchenyi István* közmunka- és közlekedésügyi miniszter, *Deák Ferenc* igazságügy-miniszter, *Eötvös József* vallás- és közoktatási miniszter, *Mészáros László* hadügyminiszter, *Szemere Bertalan* belügyminiszter, *Trefort Ágoston* földművelési, ipari és kereskedelmi államtitkár. A Magyar Tudós Társaság első nemzedékei személyes felelősségvállalással mutattak példát abban, hogy legjobb tudásuk szerint cselekedtek és az áldozatoktól sem riadtak vissza a nemzet függetlensége és újjászületése érdekében. Ránk ma az a feladat vár – hangsúlyozta az MTA elnöke, hogy hitet tegyünk egy jobb jövő lehetősége és realitása mellett, s az ehhez szükséges tudással álljunk a Haza rendelkezésére.

A fizika területén az alábbiak részesültek kitüntetésben:

A *Magyar Köztársasági Arany Érdemkereszt* kitüntetést SOMOGYI ISTVÁNNÉ, az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet gazdasági igazgatója és VIDOVSZKY ISTVÁN, az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet tudományos igazgatóhelyettese kaptak; *Magyar Köztársasági Ezüst Érdemkereszt* kitüntetést kapott TŐZSÉR SÁNDOR, az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet Reaktor Üzem vezetője.

Somogyi Istvánné, az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet gazdasági igazgatója a Kutatóintézet kutatási eredményeinek spin-off, illetve start-up cégek alapításában, licencátadással történő hasznosításában való közreműködéséért, továbbá gazdasági igazgatóként végzett kiemelkedő munkájáért kapta a kitüntetést.

Vidovszky István, az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet tudományos igazgatóhelyettese és Tőzsér Sándor, az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet Reaktor Üzemének vezetője a Budapesti Kutatóreaktor kiégett fűtőelemeinek elszállítása előkészítésében és végrehajtásában végzett kiemelkedő munkájáért részesült elismerésben.

# HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

## A világháló születésének huszadik évfordulója

2009. március 13-án a genfi Európai Magkutató Központ (CERN) Globe nevű épületében ünnepségre gyűltek össze mérnökök, fizikusok és újságírók. 20 évvel ezelőtt, márciusban *Tim Berners-Lee* átadott a főnökének, *Mike Sendall*nak, egy *Information Management: a Proposal* című dokumentumot, amelyre Sendall azzal a megjegyzéssel bólintott rá, hogy „kissé homályos, de izgalmas”. A következő évben megszületett a világháló, a World Wide Web, amely drámai változásokat eredményezett a tudományban és a társadalom életében egyaránt. Berners-Lee egy böngésző-szerkesztő programot hozott létre azzal a céllal, hogy a Web olyan kreatív környezet legyen, amely megosztja és szerkeszti az információt, miközben egy közös hypertextet épít fel. A rendszer elnevezésére több javaslat is született, lehetett volna Információbánya, Információs Hálózat, végül 1990-ben megegyeztek a World Wide Web névben.

„A Web még korántsem befejezett; csupán a jéghegy csúcsa. Az új eredmények további változásokat eredményeznek. Amint új adatok kerülnek fel a hálóra, olyan változásokhoz vezetnek, amelyek megvál-



Az első webservice a CERN múzeumában

toztatják a világot, főleg ha az adatokat egyre nagyobb teljesítményű számítógépekkel dolgozzuk fel” – mondta Berners-Lee ünnepi beszédében sok száz fős hallgatóság előtt.

(<http://public.web.cern.ch/>)

## A Fermilab új kísérletei korlátot szabnak a Higgs-bozon tömegének

A Higgs-részecske kulcsszerepet tölt be a részecskék és kölcsönhatásaik úgynevezett Standard Modelljében. A Standard Modell szerint a Higgs-bozon magyarázza meg, hogy egyes részecskéknek miért van, másoknak pedig miért nincs tömegük.

Ez ideig a Higgs-részecskét nem sikerült közvetlenül megfigyelni. A genfi CERN LEP (Large Electron Positron Collider) gyorsítójával végzett kísérletekből azt sikerült megállapítani, hogy a Higgs-bozon tömegének nagyobbnak kell lennie mint  $114 \text{ GeV}/c^2$ . Az elméleti megfontolások alapján pedig a tömeg felső határa  $185 \text{ GeV}/c^2$ .

Az amerikai Fermilabban végzett legújabb kísérletek a lehetséges tömegtartományt tovább szűkítik: a Laboratórium CDF és DZero gyorsító kísérleteinek analízise szerint a tömegnek a  $160$  és  $170 \text{ GeV}/c^2$  közötti tartományban kell lennie.

„A Fermilab Tevatron gyorsítóberendezése másodpercenként körülbelül tízmillió ütközést produkál. A Standard Modell alapján kiszámítható, hogy a mi detektorunkban évente hány Higgs-bozont figyelhetünk meg. Az analízis technikájának finomításával, vala-



A Fermilab gyorsító

mint több adat gyűjtésével a Higgs-bozonok jelenlétét előbb-utóbb észlelni fogjuk.” – jelentette ki *Darien Wood*, a Northeastern University kutatója, a DZero kísérlet szóvivője.

A Higgs-részecske megfigyelése szintén egyike a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél (Large Hadron Collider, LHC) végzett kísérletek fő céljainak. A tervek szerint még az év vége előtt megslesznek az első kísérleti adatok.

(<http://www.fnal.gov>)

**Fizikai Szemle**  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



**nka**  
Nemzeti Kulturális Alap



**paksi atomerőmű**

**NCA**  
Nemzeti Civil Alapprogram



A FIZIKA BARÁTAI



## Automatizált mágnesszalag-tároló a CERN számítógépközpontjában

A gyorsan változó adatfeldolgozásban a hosszútávú tárolás technológiájának alapja a sokszor kipróbált és ellenőrzött mágnesszalag. Ezt a robusztus technológiát fogják alkalmazni az LHC teljes adatmennyiségének tárolására. Innen az adatok egy részét könnyen elérhető gyorstárolóba másolják. A mágnesszalag-kazetták kezelése teljesen automatizált, szállításukat tárolóhelyük és a szalagvezérlők között a 15 m/s sebességgel mozgó robotkarokkal oldják meg (fotó: Kármán Tamás).

