

fizikai szemle



2010/4

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:

Szatómáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A 2009. évi Innovációs Nagydíj
kitüntette, a Paksi Atomerőmű Zrt.
A díjat 2010. március 26-án
az Országában Süli János
vezérigazgató vette át.

A hátsó borítón:

A Kepler szupernóva, lásd
Beleznay Ferenc írását.

©NASA/ESA/JHU/R. Sankrit & W. Blair

TARTALOM

| | |
|---|-----|
| <i>Beleznay Ferenc:</i> Fél Nobel-díj – félvezető-fizika | 109 |
| <i>Slíz Judit:</i> Helyfüggő amplitúdóval gerjesztett harmonikus oszillátor kaotikus viselkedése | 116 |
| <i>Szatómáry Zoltán:</i> Fogytán az urán a Földön? | 122 |
| <i>Berényi Dénes:</i> Aktuális kutatási témák a természettudományokban | 129 |

A FIZIKA TANÍTÁSA

| | |
|---|-----|
| <i>Radnóti Katalin:</i> Analógiák a fizikában és szerepük a fizika oktatásában | 131 |
| <i>Sándor-Keresztély Ferenc:</i> Wigner Jenő Országos Fizikai Feladatmegoldó Verseny | 137 |

ÁLFIZIKAI SZEMLÉ

| | |
|--|-----|
| <i>Pálinkás József:</i> Védnöki szavak a tudományért | 139 |
| <i>Laczik Bálint:</i> Szabadalmazott paramechanika – az inercia hajtóművek | 140 |

HÍREK – ESEMÉNYEK

| | |
|--|--|
| <i>F. Beleznay:</i> Half a Nobel prize for semiconductor physics | |
| <i>J. Slíz:</i> Chaotic behavior of a harmonic oscillator with position-dependent amplitude feeding | |
| <i>Z. Szatómáry:</i> Is uranium getting scarce on Earth? | |
| <i>D. Berényi:</i> Timely research topics in Science | |

TEACHING PHYSICS

| | |
|---|--|
| <i>K. Radnóti:</i> Analogies in physics and their role in teaching | |
| <i>F. Sándor-Keresztély:</i> The Eugene Wigner Competition in solving problems in physics | |

PSEUDO-PHYSICAL REVIEW

| | |
|--|--|
| <i>J. Pálinkás:</i> The need for scientific rigor | |
| <i>B. Laczik:</i> Patented paramechanics: inertial driving | |

EVENTS

| | |
|--|--|
| <i>F. Beleznay:</i> Halber Nobelpreis für Halbleiterphysik | |
| <i>J. Slíz:</i> Chaotisches Verhalten eines harmonischen Oszillators mit ortsabhängiger Amplituden-Anregung | |
| <i>Z. Szatómáry:</i> Sind die Uranvorräte der Erde erschöpft? | |
| <i>D. Berényi:</i> Aktuelle Forschungsthemen in den Naturwissenschaften | |

PHYSIKUNTERRICHT

| | |
|---|--|
| <i>K. Radnóti:</i> Analogien in der Physik und ihre Rolle im Physikunterricht | |
| <i>F. Sándor-Keresztély:</i> Der Eugene Wigner-Wettbewerb im Lösen von Physikaufgaben | |

ZEITSCHRIFT FÜR PSEUDO-PHYSIK

| | |
|--|--|
| <i>J. Pálinkás:</i> Die Notwendigkeit wissenschaftlicher Strenge | |
| <i>B. Laczik:</i> Patentierte Paramechanik: Trägheits-Antriebe | |

EREIGNISSE

| | |
|---|--|
| <i>Ф. Белезнаи:</i> Половина Нобелевской Премии – физике полупроводников | |
| <i>Ю. Шлиз:</i> Хаотическое поведение гармонического осциллятора питаемого с зависящими от положения амплитудами | |
| <i>З. Сат.лари:</i> Исчерпаны-ли запасы урана Земли? | |
| <i>Д. Берени:</i> Актуальные темы научных исследований в области естественный наук | |

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

| | |
|---|--|
| <i>К. Радноти:</i> Аналогии в физике и их роль в обучении физике | |
| <i>Ф. Шандор-Керестей:</i> Конкурс им. Е. Вигнера по решению физических задач | |

ОБЗОРЫ ИЗ ОБЛАСТЕЙ ПСЕВДО-ФИЗИКИ

| | |
|---|--|
| <i>Й. Паликаиш:</i> Вступительное слово на конференции т. н. скептиков о нужде в научности | |
| <i>Б. Лаик:</i> Запатентованная парамеханика – инерционные двигатели | |

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



nka
Nemzeti Kulturális Alap

mym
paksi atomerőmű

NCA
Nemzeti Civil Alaprogram



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

LX. évfolyam

4. szám

2010. április

FÉL NOBEL-DÍJ – FÉLVEZETŐ-FIZIKA

Beleznay Ferenc
MTA MFA

Minden év október eleje különös várakozással teli, hiszen a Nobel-díj Bizottság ekkortájt hozza nyilvánosságra a szakmai Nobel-díjak az évi díjazottjait. Így volt ez az elmúlt évben is. Ma már a napi sajtó gyakorlatilag egyidejűleg teszi közzé a díjazottak névsorát; a jelentősebb hírforrások gyakran a Bizottság kibővített közleményét is, esetleg a szakterület ismert tudósainak a véleményével együtt. A szakmai magazinok ritkább (heti, havi) megjelenésük miatt egy-két hónap elteltével közölnek részletesebb, értékelő ismertetőket. Így történt ez a 2009. évi fizikai Nobel-díj esetében is: folyóiratunk, a *Fizikai Szemle* novemberi számában, a Hírek-Események rovatban *Takács Sándor* ismertette a bejelentést és részletesebb indoklását.

Ezért itt most nem ezzel, hanem a díj (különösen annak „CCD része”) félvezető-fizikával kapcsolatos kérdéseivel szeretnék foglalkozni és azokkal a gondolatokkal, amelyeket bennem, aki szakmai életének javát ezen a területen töltötte, keltett. A két díj a „Fény mestereinek” szöveg, az eredeti sajtóközlemény szerint:

- *Charles K. Kaonak* „alapvető eredményeiért, amelyeket az optikai hírközlést megalapozó, szálakon történő fényterjedés megismerésében” ért el, és

- *Williard S. Boyle*-nak és *George E. Smith*-nek a „CCD-szenzor – egy félvezető képalkotó áramkör felfedezéséért”.

Még mindig a sajtóközleményből idézve: „az ez évi *fizikai Nobel-díj* olyan tudományos eredményeket tartalmaz, amelyek segítettek a mai, összecsatolt társadalmunkat megalapozni, de nemcsak új, gyakorlati felfedezésekre vezettek a mindennapi élet számára, hanem új eszközöket adtak a tudományos kutatás területén is. ... Ma már az *optikai szálak* lehetővé teszik, hogy a szélessávú internet, valamint egyéb hír- és adatforgalom szétterjedjen a világban a másodperc tört része alatt. ... Ennek a forgalomnak nagy részét éppen azok a digitális képek alkotják, ... amelyeket az első sikeres leképező eszköz, a *CCD* tett lehetővé. Ez forradalmasította a fényképezést, és a film kiváltásával megkönnyítette

te a képek feldolgozását és terjesztését is. ... A CCD-technológiát számos orvosi alkalmazásban is felhasználjuk a test belsejének a leképezésére mind diagnosztikai, mind pedig mikrosebészeti célokra. ... A digitális fényképezés a kutatás számos területén pótolhatatlan eszközzé vált, új lehetőségeket adott, hogy láthatóvá tegyünk a korábban rejtett részleteket, így kristálytisztá képeket szolgáltat Univerzumunk távoli helyeiről csakúgy, mint az óceánok mélyéről”.

A Nobel-díj honlapján található egy helyet, ahol a díjakat igyekeznek osztályozni a jellegük alapján – itt találunk, többek között díjakat a *klasszikus fizikától a kvantumfizikáig*, ide sorolják az elemirész-fizika díjazott eredményeinek egy részét is. Hasonlóan a *kondenzált anyagok* csoportban található a szupra-vezetés és félvezető alaputatás díjait. Van egy csoport, a *fizika és technológia*, ahová mindazokat a felfedezéseket sorolják, amelyeknek nagy hatása volt új technikai eszközök fejlődésére. A legutóbbi díj ebbe a csoportba kerülhet. Akit zavarna, hogy ez esetleg „nem-fizika”, nyugodjék meg, hiszen olyan jó társaságban van, mint *Gábor Dénes* holográfiája, *Ruska* elektronmikroszkópja, vagy esetleg az újabb időkből *Binnig* és *Robrer* pásztázó elektronmikroszkópja.

Ha valaki a díjra és a díjazottakra is kíváncsi, a Nobel Bizottság ma már gondoskodik arról, hogy ne csak a kiválasztottak hallgathassák meg őket élőben, hanem mi is, itt: <http://nobelprize.org/mediaplayer/index.php?id=1182>.

A CCD felfedezésének története

A Nobel-díj odaítélése után joggal gyanakodhatnánk, hogy a felfedezés részleteit részben az időbeni nagy távolság (maga a jelenség felismerése kerek negyven éve, 1969-ben történt), részben a díj (jogosan) rendkívüli hírneve némileg eltorzíthatja, ezért próbáljuk meg az eseményeket *korábbi forrásokból* felidézni.

Az egyik díjazott, George E. Smith 2001-ben, amikor a CCD mint leképező eszköz már elindult világhódító útjára, a *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* hasábjain leírta a felfedezés „intim” részleteit (*The invention of the CCD*). Ezt egy kissé színesítve, de még mindig a díjazás előtt megismételte ugyanez a szaklap 2009. április 6-i online számában (*The invention and early history of the CCD*). A történetet innen idézzük fel.

A Bell Laboratóriumok Elektronika Részlege eszközök kutatásával foglalkozott és két csoportra volt osztva; a félvezető-részleget Boyle vezette, és Smith (ittthon talán így mondanánk) osztályvezető volt ebben a részlegben. A másik részleg minden egyéb eszközzel foglalkozott, ide tartozott az abban az évben felfedezett mágneses buborékokon alapuló memória kutatása is. A teljes részleget *Jack Morton* vezette, aki szerette volna a sokat ígérő buborékmémória kutatását meggyorsítani, és tervezte, hogy a félvezető-kutatás támogatásának egy részét átcsoportosítja. Boyle-nak egy telefonbeszélgetés során azt a feladatot adta, hogy találjanak egy olyan félvezető eszközt, amely vetélytársa lehet a buborék eszköznek. Másnap, 1969. szeptember elején ebéd után Boyle szobájában a két díjazott közel egyórás gondolkodás után a CCD alapvető struktúráját felvázolta, majd az elképzelhető alkalmazások lehetőségeit is felsorolta.

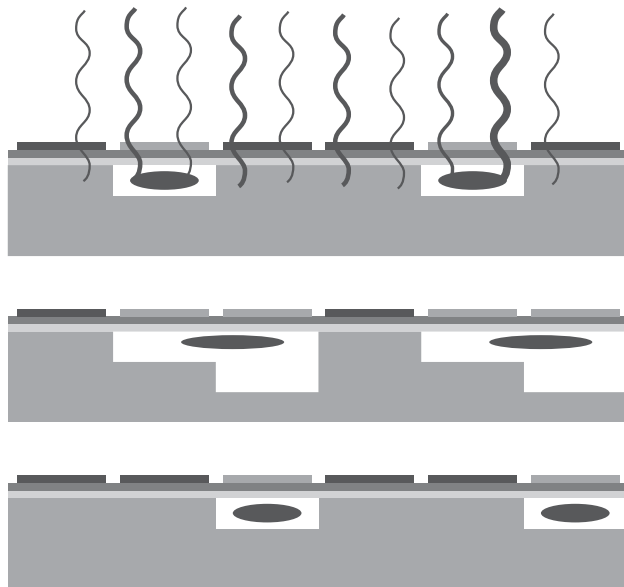
Az ötlet csaknem magától értetődő volt. A buborékmémória elve azon alapult, hogy bizonyos anyagokban parányi rendezett mágneses tartományok (domének) keletkezhetnek, és ezeket külső (mágneses) terekkel rögzített pályán „körbe” lehet mozgatni, így adott helyen a domének mágnesezettségét (a parányi mágnes irányát) meg lehet változtatni, illetőleg azt „ki is lehet olvasni”. Az akkor kizárólag különálló mágneses magokból álló számítógép-mémória hálózatokat így egy speciális mágneses anyag felületén, mozgó alkatrészek nélkül lehetett egy soros elérési parányi memóriába integrálni, és a buborék mérete miatt elvben igen nagy sűrűséget elérni. Ha mindezt félvezető eszközzel kívánjuk kiváltani, akkor a „buborékdoméneket” térben lokalizált töltéscsomagok válthatják fel, amiket parányi MOS-kapacitások őrizhetnek. Persze ha ezeket továbbítani szeretnénk, hasonló egységeket kell olyan közel elhelyezni, hogy közöttük alkalmas helyi potenciálváltozás esetén a töltések egyik helyről a másikra kerüljenek. Hogy a visszafolyást megakadályozzuk, az így sorba rendezett „tartályok”, cellák között a megfelelő feszültség-lökéseket több – a gyakorlatban három, hogy az egyes elemek között ne legyen keveredés, átfolyás – különböző fázissal valósíthatjuk meg. Ennek sematikus rajzát az 1. ábrán láthatjuk, ahol az egymás közvetlen közelében lévő szomszédos cellák között a töltéseket a megfelelő cellákra adott potenciálok nagysága segítségével tudjuk „áttölteni”. Vegyük észre, hogy csakúgy, mint a buborékmémória esetében, itt sem arról van szó, hogy áramkörü elemekkel elkülönített kapacitások között végezzük a töltések „toltogatását”, hanem az egész *egyetlen funkcionális esz-*

köz, elvben tetszőleges számú tároló egységgel. Hogy memóriaként használhassuk, csak arról kell gondoskodnunk, hogy a sor elején speciális elemmel az (első) cellát megtöltsük, majd a sor végén, ugyancsak egy speciális elemmel az adatotlogatott töltésállapotot kiolvassuk.

Miután elvben rögzítették a sematikus felépítést (ennek Smith jegyzetében található kézirásos vázlatát a Nobel Bizottság részletesebb ismertetője is tartalmazza), elhatározták, hogy egy eszközt készítenek, amelyen a fenti működési elvet igazolhatják. Kevesebb mint egy hét alatt Smith munkatársaival elkészítette a maszkokat, és az első kísérleti elemet is előállították, amely még nem tartalmazta a be- és kiíró speciális áramköröket, csak a MOS-kapacitásokat. Az első kapacitásban a töltést termikus generálással hozták létre, majd az utolsóból a szeletbe áttöltött töltést a szubsztrát áramával mérték – ez az apró modell „áramkör” pontosan igazolta az elv működését. Hamarosan egy *teljes CCD-eszközt* is készítettek, amely 8 elemet tartalmazott, és mint egy *shift regiszterrel* a teljes működést be lehetett mutatni. 1970-ben mindkét fázist leírták a *Bell System Technical Journal*-ban, és itt már a működés lényegét tartalmazó elnevezés – amit az első találkozáson találtak ki; *charge coupled device* (töltéscsatolt eszköz), innen a *CCD* – is szerepelt. Ezek az első kísérletek a CCD töltéstovábbítás demonstrálására születtek, és a buborékmémória-elv félvezető típusú megvalósíthatóságának igazolására szolgáltak.

A számítógépes fő- és háttérmémória története azonban már körvonalazódott – az egyedileg címezhető (RAM) MOS félvezető memória hamarosan elkészült, és az ilyen irányú egyéb kutatások (a buborék- és a CCD-alapú is) hamarosan tudománytörténeti érdekességgé váltak. Szerencsére a kapacitások „feltöltését” nemcsak elektromos jelekkel, de fényel is megtehetjük, így hamarosan az elv a *képalkotó rend-*

1. ábra. A töltéscsomagok mozgatása a MOS-kapacitások között.



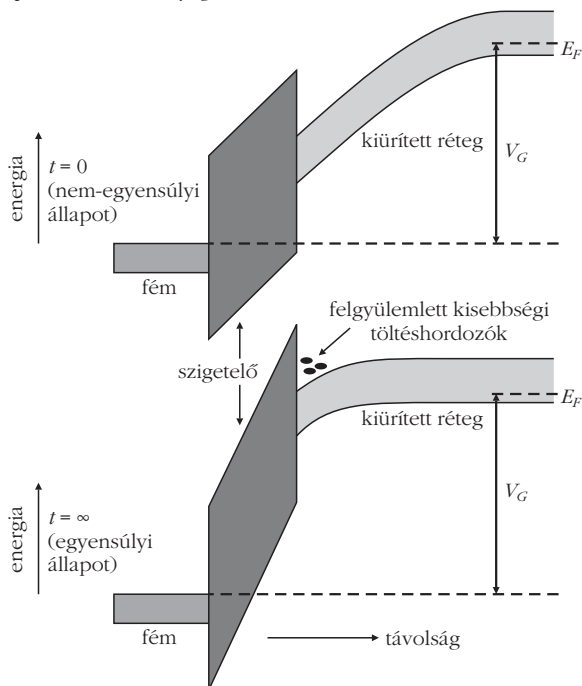
szerben élt tovább, ma már az elnevezést kizárólag ezzel azonosítjuk. Ezt bizonyítja az is, hogy az eredeti szabadalmat a CCD-eszközről, amit a díjazottak nyújtottak be 1970-ben (a tulajdonos a Bell Laboratóriumok volt), egy éven belül visszavonták és felcserélték egy 1971. novemberi új leírással, amely a képkalkotást már expliciten tartalmazza. Innen számíthatjuk a CCD-eszköz feltalálását. Még a történethez tartozik, hogy a Bellben a memóriakutatást a fenti fejlemények miatt hamarosan feladták, és a képtelevon kutatását is (és ezzel a CCD kutatását) abbahagyták. A CCD-nek még hosszabb idő kellett, hogy beérjen. A képtelevon technológiáján dolgozó Western Electric és a Bell óriásvállalat (államilag) korlátozva voltak a szellemi termékek értékesítésében, saját céljukra nem kívánták fejleszteni. Egy ideig (egyik volt munkatársuk közreműködésével) a Fairchild továbbfejlesztette, majd egy időre ott is abbahagyták. A kezdeményezés a japán félvezető cégekhez került, a Sony volt talán az első a mai értelemben vett CCD-eszköz piacra dobásában, és ma is japán, koreai és kínai cégek forgalmazzák a CCD-chipek döntő hányadát.

A CCD-elv fizikai részletei és korlátai

Hogy a ma már évente milliárd számban gyártott digitális képkalkotó áramkörti elemeket, azok korlátait és a különböző alkalmazásokra kifejlesztett speciális eseteit megérthessük, kicsit részletezzük a működés fizikai alapjait.

A CCD elemi funkcionális egysége a MOS-kapacitás, amelynek sematikus ábráját és szokásos energia-diagramját egy p-típusú félvezető anyagon a 2. ábra

2. ábra. A MOS-kapacitás sematikus ábrája és energiadiagramja egy p-típusú félvezető anyagon.



tartalmazza. Itt a kapacitás egyik vezető elektródája egy *fém* réteg, amelyet a másik vezető (*félvezető*) „kivezetéséről” egy *szigetelő* réteg választ el. Ilyen elemet legegyszerűbben egy oxidált felületű szilíciumlapkára leválasztott fémréteggel valósíthatunk meg. Ha ezt a kapacitást áramkörben képzeljük el, mivel a szigetelő rétegen keresztül áram nem folyik, egyensúlyi állapot jön létre, amelyben az elektrokémiai potenciál (Fermi-nívó) állandó. A különálló félvezető anyag és fém elektrokémiai potenciálja (Fermi-nívó) azonban a vákuumhoz rögzítve van, egymástól különböznek, és azt az anyagok felépítése szabja meg. A kapacitásban az állandó Fermi-nívó csak úgy valósulhat meg, ha a szigetelő rétegben és a félvezető határfelületén a különböző potenciálokhoz tartozó értékeket egy beépülő elektrosztatikus potenciálváltozás, elektromos tér kiegyenlíti. Ez a tér a félvezető anyag felületén olyan potenciálváltozást hoz létre, amely helyileg a rendszer állandó Fermi-nívójához képest a lehetséges energianívókat, így a vezetési és vegyértéksávok értékeit is folyamatosan változtatja. Ez a tértöltési tartomány arra vezet, hogy a felület közelében a töltéshordozók lokális koncentrációja eltér az egyébként homogén félvezető anyag belsejében mérhető koncentrációktól.

Ha erre a kapacitásra „feszültséget” adunk, akkor a többletpotenciál a két „fegyverzet” között, a szigetelő és a tértöltési tartomány között oszlik meg a sorba kapcsolt kapacitások törvényei szerint, ha ezeket a rosszabbul vezető „tértöltési” rétegeket is, mint részkapacitásokat képzeljük el. Ez végeredményben arra vezet, hogy külső potenciál alkalmazásával a félvezető határrétegben a (tömbhöz képest) többlettöltéshordozókat hozhatunk létre, és azok koncentrációját elvben tág határok között tudjuk változtatni. Ha például az ábrán látható *p-típusú* félvezető anyagot tartalmazó MOS-kapacitás „fém-kivezetésére” *pozitív feszültséget* kapcsolunk, akkor a félvezetőben lévő nagyszámú lyuk a felület közeléből a tér hatására eltávozik, és egyensúlyban itt a kisebbségi töltéshordozó elektronok lesznek többségben, *inverzió* jön létre. *Ellenkező feszültség* esetén a tér a félvezetőben lévő nagyszámú többségi töltéshordozókat vonzza a határ közelében, ott azok feldúsulnak, *feldúsulási* réteg keletkezik. Az ábrán csak az inverzió esetét ábrázoltuk, az alsó kép felel meg az egyensúlyi esetnek. Természetesen, mint a legtöbb félvezető eszköz esetében, itt is mindkét típusú félvezető anyag lehetséges, n-típusú anyag esetében a polaritások felcserélődnek.

Tudománytörténeti érdekesség, hogy 20 évvel korábban ilyen módon akarták a félvezető anyag felületére helyezett két tű segítségével a vákuumcső szilárdtest-analogonját elkészíteni, ahol is az egyik tű potenciáljával a másik tűn keresztül folyó áramot szabályozták volna. Ehelyett 1947 decemberében az *injekció jelenségét*, és a *tranzisztorhatást* fedezték fel! Talán a CCD-elv és mindaz, amiről itt szó van, meg sem született volna, ha a tranzisztorok nagy sikere elfeledtette volna az eredeti célt. Szerencsére nem így volt, a félvezetők tulajdonságainak jobb megismerése hama-

rosan tisztázta, hogy mi volt, ami megakadályozta a felületi tértöltési tartomány gyakorlati megvalósítását a germánium esetében. Túl ezen, az első germánium-tranzisztorok felületének instabilitása és a szilícium mint félvezető anyag előnyös tulajdonságai mind arra vezettek, hogy 1964–65 táján a Bell Laboratóriumokban, sikeresen tudtak készíteni olyan szilícium alapú MOS-szerkezeteket, amelyek gyakorlatilag „ideálisan” viselkedtek – és így megnyílt az út a MOS-eszközök előtt is.

Bármennyire is egyensúlyi állapot az előfeszített MOS-kapacitás, ha az előfeszítést hirtelen megváltoztatjuk, időbe telik, amíg az egyensúly létrejön, hiszen a véges vezetőképességű anyagokban a töltések átrendeződése időt vesz igénybe. Ha a feldúsulást akarjuk alkalmas feszültségűgrásslal megváltoztatni, az (új) egyensúly gyorsan helyreáll, hiszen igen nagy számban vannak lyukak a p-típusú hordozóban, és ezek a tér hatására könnyen átrendeződnek. Ha azonban az ellenkező polaritást alkalmazzuk, akkor nemcsak a lyukaknak kell eltávolozniuk, hanem az anyag belsejében igen kis számban jelenlévő elektronoknak is össze kellene gyűlniük a felület közelében. Ez nagyon hosszú időt venne igénybe, és nem is az anyag belsejéből kerülnek ki az inverziós réteg többletlyukai, hanem a félvezetőkben az elektron–lyuk-párok szakadatlan keltése és rekombinációja hatására a felület tartományából. Ez normál körülmények között igen lassú folyamat, és mint minden termikusan aktivált jelenség, exponenciálisan függ a hőmérséklettől. Ezt mutatja a 2. ábra felső képe, ahol is a félvezető anyag vezetési sávjában nincsenek töltéshordozók, gyakorlatilag olyan a tér eloszlása, mint a szigetelő oxid-tartományban.

Most már érthetjük, hogy hogyan működik a CCD: ha a MOS-kapacitást hirtelen erős inverzióba feszítjük megfelelő elektromos impulzus alkalmazásával, akkor a félvezető határfelületén lévő (kisebbségi) töltéshordozók mennyiségét csak az időben nagyon lassan összegyűlő, termikus eredetű töltések, vagy a fény hatására keletkező töltéspárok határozzák meg. A tértöltés hatására ezeknek a pároknak többségi része persze nem marad a felületen, hanem az anyag belsejébe kerül, így a kisebbségi töltéshordozók, mert nincs többségi párjuk, nem is rekombinálódnak. A CCD elemi kapacitása hosszú ideig is „gyűjtheti” a fény hatására létrejövő töltéshordozókat, és az összegyűlt töltéshordozók száma arányos lesz a helyileg beeső fény intenzitásával. Egy lapkán egymás mellett elhelyezett elemek, alkalmas optikával kiegészítve, az eredeti tárgy síkbeli képét őrzik meg, csakúgy, mint a fényérzékeny film/lemez a hagyományos fényképezőgépekben. Ha az elemi kapacitásokat sorba rendezzük, és tologatásokkal ki is olvassuk a sor végén, akkor az eredeti kép helyi intenzitását egyenként meg is őrizhetjük, célszerűen digitális formában, a sorok tartalmát alkalmasan rendezve, egy tetszés szerinti adattárolóban. Ez a digitális fényképezés alapja. Ahogy *Gróf András*, ismertebben *Andrew Grove*, az Intel ma már visszavonult igazgatója mondta, az „ada-

tok digitálisan őrizhetők, továbbíthatók, és feldolgozhatók, ezért előbb-utóbb minden digitális lesz” – ez történt a fényképezéssel is!

A félvezető anyagokban az elektron–lyuk-párok optikai keltésének természetes határa a tilos sáv szélessége (ez egy korábbi Nobel-díjas felismerés: *Einstein* fényelektromos jelensége). Ez a szilíciumban körülbelül 1 eV (elektronvolt), aminél kisebb energiájú foton nem kelt töltéshordozókat, láthatatlan – legalábbis a szilícium alapú CCD számára! Szerencsére ez éppen egybeesik a látható fény infravörös határával, a teljes látható tartomány ennél nagyobb energiájú fotonokat tartalmaz, ezért egy mai kommersziális CCD-eszköz gyakorlatilag egyformán érzékeny a teljes látható tartományban. Ez, ha úgy tetszik, a természet ajándéka. Ha a félvezető technológia egy sokkal szélesebb tilos sávú félvezető anyagra épült volna (ilyen anyagok vannak, és számos előnyük lenne például nagy teljesítmények, magas hőmérsékletű működés esetén is!), akkor ma trükkös megoldásokkal igyekeznénk a „hagyományos digitális” fényképezést – ha lenne ilyen – megoldani, mint ahogy ezt tesszük a tudományosan (és katonailag is) érdekes infravörös tartományban!

A CCD a fentiek alapján nem lát színesen, a színes fényképezést az alapszínekre bontó szűrőkkel oldhatjuk meg, ennek gyakorlati kivitelére számos eljárás született-születik, az egyes eszközgyártó cégek szakadatlanul ontják a különféle megoldásokat.

Ha a CCD állandóan „nyitva” lenne, akkor is érkeznének fotonok miközben a kép részleteit sorra kigyűjtjük, ezek a kép élességét elronthatnák. Ezt eszközszinten úgy oldják meg, hogy akár az egész képet, akár azt sorról sorra az „exponálás” befejezésével valahogy elmentjük, például az információt (a képpontok tartalmát) időlegesen nem látó elemekbe helyezzük. Ezeket – esetleg az újabb felvétel alatt – a szokásos módon kiolvashatjuk (frame transfer CCD). A ma kapható drágább, professzionális kamerák egyesítik az analóg és digitális fotózás szinte minden eredményét:

- külsőre olyanok, mint a korábbi szuper fényképezőgépek, lencserendszereik optikája cserélhető, ha lehet, még jobb minőségűek, mint néhány évvel ezelőtt, az analóg fényképezés korában volt (hiszen ez a terület is fejlődött!),
- a kép exponálását a legfejlettebb tükrös mechanika végzi el (nem kell a CCD-t magát bonyolítani),
- és a 10–30 millió képpontos CCD képét, a kéz mozgását kompenzáló elektronikus képstabilizátor (is) élesíti!

A verseny része az egyre jobb felbontás, ezt legtöbbször a képpontok számának a növelésével érik el. Ez a szám, a pixelszám, akárcsak a lóerő az autók esetében, azt sugallja, hogy ha nagyobb, akkor jobb is. Egy „rég” analóg film felbontása körülbelül 300 millió pixellel egyenértékű, ennek elérésére persze nem kell törekedünk, hiszen normál képméret esetén a szemünk sincsen erre kalibrálva! Hacsak nem akarunk igen nagy nagyítást készíteni, ennek tört része, a

10 millió képpont is tökéletesen megfelel (ne feledjük, a nagyfelbontású tévé is körülbelül 2 millió ponttal működik), a józan határt a kép felvételének sebessége, a kép tárolása és esetleg lejátszása, manipulálása határozzák meg, amely körülbelül egybeesik ezzel a közel 10 milliós értékkel.

Ha egy sorban a pixelek száma ezres nagyságrendű, az azt jelenti, hogy soronként legalább ennyi lépésben kell áttöltenünk a kép pontjait, hogy eltávolítsuk az egészet. Ahhoz, hogy a kép eleje és vége is hűséges mása legyen az eredetinek, az kell, hogy a „tologatás” közben ne sok töltéshordozó vesszen el. Ha az áttöltés hatásfoka 99,999%-os (!), akkor 1000 képpontos sor esetén a torzítás 1%-nál kisebb lesz. Ha egy („teli”) pixelben körülbelül 100 ezer elektron „fér” (ezt nyilván az egyes elemek mérete határozza meg, és nagyjából reális érték), akkor kiolvasás közben, ilyen hatásfok mellett legfeljebb, ha 1 elektron vész el! Ilyen szintű analóg „pontosság” még a félvezetőipar jelenlegi hihetetlen technológiai szintje mellett is elérhető. Ebből is láthatjuk, hogy a CCD minden valószínűség szerint egyike a valaha készített legprecízebb analóg félvezető eszközöknek. Ezért is a CCD ára talán soha sem csökken olyan mértékben, mint a szokásos digitális memória-, logikai áramköröké. Éppen ezért napjainkban – a kisebb igényű alkalmazásokban – a számítógépek félvezető alapú memória-eleméhez hasonló felépítésű CMOS képszenzorok váltják fel a CCD-elemeket.

Ezzel a CCD története a mindennapos fényképezésben gyakorlatilag véget is ér. Hogy milyen hosszú utat tettünk meg, azt talán egy gondolat kísérettel foghatjuk fel. Képzeljünk el, hogy 40 évvel ezelőtt egy előadáson azt meséltük volna, hogy hamarosan eljön az idő, amikor

- a telefonunkat a zsebünkben hordozhatjuk,
- azok kis, lapos képernyőjén a világ bármely pontjáról képeket kapunk és küldünk;
- magunk készítünk kedvűnkre filmeket;
- gyakorlatilag bármely, valaha készített festményt, képet otthon is megnézhetünk, csakúgy, mint a világ minket érdeklő, érdekes és izgalmas részeit!
- És mindez nem kerül majd többbe, mint a telefonunk költsége, vagy talán még annyiba sem!

Valószínűleg azt mondták volna, „javíthatatlan álmódoszó”!

Amiért a harang szól!

Lehet, hogy nem illik ide, de pár szót kell ejteni a Bell Laboratóriumok sorsáról. Láttuk, hogy egy új gondolat megvalósítása ebben a laboratóriumban hetek kérdése volt. Mi is elkészítettük a CCD 16 bites példányát a 70-es évek elején a Műszaki Fizikai Kutató Intézetben, és – akik közel voltunk – tudjuk, hogy mennyi időbe és fáradságba telt. Természetesen nem akarom és nem



is lehet a két intézményt összehasonlítani, de ez is figyelmeztet, hogy fontos olyan helyek létesítése, fenntartása, ahol a szakértelem és a tudás megfelelő találékonysággal párosítva „csodákra” képes. E páratlan kutatóhely – amelyben fél évszázad alatt 7 Nobel-díj született, és alig hiszem, hogy van olyan intézmény, amely többet tett volna a modern információs társadalom megszületéséért – mai tulajdonosa, az Alcatel-Lucent óriásvállalat 2008 augusztusában megszüntette a hagyományos kutató részleget. Megszüntette a teljes szilícium alapú kutatást, és csak olyan fejlesztéseket tartott meg, amelyek közvetlenül a hírközlési profiljának rövid távú fejlesztését szolgálják! Mindezt természetesen az anyavállalat profitérdekei indokolják, és még csak vitatkozni sem lehet ezzel, mert a tudományt – természetesen – elsősorban az államnak kell támogatnia. Úgy tűnik, ezt megérti és vállalja is a jelenlegi adminisztráció az Egyesült Államokban.

Természetesen a szilárdtestkutatás „nagyjai” a Bell laboratóriumok „kivégzését” tudományuk lefejezésének, és ezt a lefejezést elfogadhatatlannak tartották. Ennél is jellemzőbb, hogy a közgazdász *Paul Volcker* – aki az Amerikai Jegybank (sikerese!) elnöke volt közel tíz éven át, *Carter* és *Reagan* elnöksége idejében és jelenleg az elnök gazdasági tanácsadója – úgy gondolja (2009 nyarán), hogy:

„In the broadest terms, I think we have to move, we are moving, for an emphasis on finance toward science, toward technology, toward engineering – real engineering not the financial engineering that has failed to live up to its promise.”

Ezt az idézetet nem fordítom le, hiszen itt a CCD történetéről beszélünk, és nehogy bárki is azt higgye, hogy politizálunk és a magyar viszonyokról van szó!

CCD és a tudomány – csillagászat

A Nobel-díjat persze nem fényképezőgépek fejlesztéséért szokták adni – nézzük meg, mit tett a CCD a tudományért! Nagyon sok mindenről lehetne beszélni, ragadjunk ki egy jellemző és fontos példát, a csillagászatot. Egyszer majd alkalmat kell keríteni, hogy a CCD szerepét a kísérleti fizika, biológia, orvostudomány... területén is végigtekintsük.

Ha a fizika fejlődését végignézzük – és nagyon szerencsések vagyunk, hiszen *Simonyi Károly* megajándékozott minket a *Fizika kultúrtörténetével* – egy dolog végigvonul a közel négyezer éven, és ez a csillagászat, az asztronómia. Nem meglepő, hogy az embereket, bár különböző indíttatással, de mindig érdekelte a Világmindenség. Az mindenképpen feltűnő, hogy egy ilyen régi, és kis részleteiben leghamarabb rendezett tudományág – gondoljunk az egyiptomiak csillagászati tudására, a Naprendszer törvényeinek megismerésére és leírására immár 400 éve – mind a mai napig meglepetésekkel szolgál, és még messze vagyunk a teljes és részletes megértéstől! A fizika egyéb nagy fejezetei valamilyen értelemben zártak, köszönhetően *Newton* (mechanika), *Maxwell*

(elektrodinamika), *Bohr* és társai (kvantummechanika) munkásságának.

Mi köze mindehhez a CCD-nek? Körülbelül annyi, mint a *távcső felfedezésének*, hiszen egy olyan megfigyelő eszközt adott a kezünkbe, amelynek segítségével az összes eddigi égi adatunk sokszorosát, közte olyan új adatokat is megismerhetünk, amelyeket kétséges, hogy a szokásos eszközök segítségével valaha is elértünk volna. Az asztronómia és kozmológia területén ma tapasztalható helyzet hasonlít a klasszikus és kvantumfizika határán száz évvel ezelőtt bekövetkezett változásokra. Azonban van egy lényeges különbség: akkor csak néhány tapasztalat volt, amit nem értettünk, és az új gondolat (*Planck* kvantumhipotézise) elindított a helyes úton. Most sok mindent tudunk, szinte mérhetetlen sok adatunk van, és a kérdés az, hogy van-e olyan *egyszerű* gondolat, amely összerendezi a tapasztalatokat?

De térjünk vissza a CCD-hez! Az egyik legnagyobb tudományos adatbázisban, a ScienceDirect folyóirataiban a „CCD and astronomy” kereső szópárra 3383 eredményt találtam! Talán ez is mutatja, hogy a modern asztronómiának a CCD milyen mértékben mindennapi eszköze. Fiatalabb koromban, amikor aktívan sportoltam, és a sportot figyelemmel is kísértem, volt például a jégkorongban egy ökölszabály: ha jó csapatot akarsz építeni, találd meg a jó kapust, és ahhoz gyűjtsd össze a játékosokat. Most elolvasva az egyes földfelszíni és űrszillagászati terveket, hasonló érzésem támad: az első lépés, tervezd meg a távcsövet és a detektor CCD részét! Ez többé-kevésbé meghatározza a várható eredményeket. Néhány példán próbálom ezt igazolni, és egyúttal azt is megmutatni, hogy mit is adnak az új megfigyelések.

A *NASA Nagy Obszervatóriumok programja* négy jelentős laboratóriumot létesített az űrben. Ezek közül 3 végzett méréseket a hagyományos (röntgen, látható és infravörös) elektromágneses sugárzás tartományában. Közülük kettő használt CCD-detektort – részleteiben ezért csak ezeket soroljuk fel, a felbocsátásuk időrendjében.

Az 1990. április 24-én Föld körüli pályára állított *Hubble-űrteleszkóp* (HST) az optikai, a közeli-ultraibolya és a közeli-infravörös tartományban végez megfigyeléseket. Lényegében vele kezdődött a nagyközönség számára a modern űrszillagászat. Abban is páratlan, hogy eddig öt alkalommal látogatták meg űrhajósok, hogy javítsák, fejlesszék berendezéseit. Teljesítménye az eredetihez képest közel százszorosra nőtt (nem kis mértékben a detektorok „feljavítása” miatt!), ami nem meglepő, hiszen a tervezetten utolsó látogatás 19 évvel a felbocsátás után az elmúlt év tavaszán volt. (<http://www.nasa.gov>)

1999. július 23-án indították pályára a *Chandra-röntgen-űrteleszkópot*, amely az elektromágneses sugárzásnak az UV és a lényegesen nagyobb energiájú gamma-sugárzás közötti tartományát vizsgálja. Ezt a tartományt a Föld légköre tökéletesen elnyeli, ezért különös gonddal jártak el a detektorok kiválasztásában. (<http://chandra.harvard.edu/index.html>)

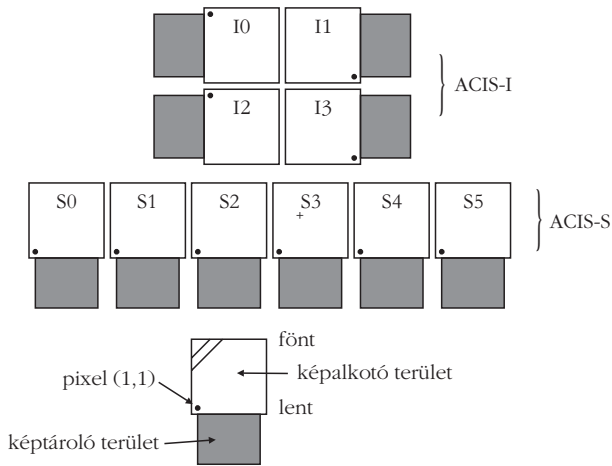
Az űr-méretekből óriás teleszkópok helyett a jövőben valószínűleg kisebb, olcsóbb és az egyes speciális feladatok ellátására szolgáló űrmissziók kerülnek előtérbe. Mi itt a CCD-alkalmazásokat szeretnénk áttekinteni, erre igen jók a fenti, reprezentatív rendszerek. Az egyes missziók honlapját azért mellékeltem, mert még az asztronómiát kívülről figyelő fizikus számára is örömet nyújthat a részletekbe (és az eredményekbe!) való betekintés.

A HST műszereiről és mérnöki felszereléséről a honlapján csodálatos interaktív grafikus információ található a technológiai címszó összefoglalójában. Mi – némi önmegtartóztatással – csak egy tudományos berendezéssel foglalkozunk, amelynek több generációja is szolgált, hiszen legtöbbjük korábbi példányát lecserélték a szervizutak során.

Az új Wide Field Camera 3 (WFC3) a HST legtöbbet használt csatornája, amely két CCD-detektort tartalmaz, egyet a látható és közeli UV tartományban 4096×4096 pixeles felbontással – ezt számos szűrő és kisebb felbontású prizma is kiegészíti, így a látható/UV detektor ésszerű felbontásban színesen lát. A másik detektor egy, a közeli infravörös tartományban érzékeny, HgCdTe félvezető elegykristályt tartalmazó CCD-elvű 1024×1024 pixelt tartalmazó eszköz. Ennek az anyagnak jóval keskenyebb a tilos sávja, mint a szilíciumé, ezért ez a detektor 1700 nm-ig érzékeny, csaknem fele akkora energiájú fotonokat is detektál, mint szilícium alapú nagytömegű. Ha a tilos sáv keskenyebb, akkor nagyobb a valószínűsége, hogy elektron–lyuk-párok keletkezzenek termikus gerjesztéssel. Hogy ezt a spontán zajt csökkentse, az ilyen (és minden egyéb) infravörös detektort hűteni kell. A legújabb detektort speciális termoelektromos berendezés hűti – így legalább ebben a nem túl távoli infravörös tartományban nincs szükség hűtőfolyadék alkalmazására. (Az infravörös tartományban látó, 2003-ban felbocsátott Spitzer-űr-távcső „szeme” 2009-ben akkor romlott le, vakult meg a távoli infravörös tartományban, amikor a He hűtőfolyadék elfogyott! <http://ssc.spitzer.caltech.edu/>)

A WFC3 és annak korábbi változatai készítették azon képek döntő többségét, amelyek a Hubble-t híressé tették, és adatai felhasználásával eddig több mint 8000 tudományos cikk született!

A Chandra két fő berendezése kiegészíti egymást, és mind a röntgensugár energiáját, mind pedig a sugárforrás helyét, képét nagy pontossággal meghatározzák. Ezekkel és az egyes (kémiai) elemek azonosításával válik lehetővé az óriás energiájú kozmikus események (szupernóvák felrobbanása, galaktikák ütközése, az intergalaktikus tér forró gázfelhőinek elemzése...) értelmezése. Az egyik képképző eszköz, a Nagyfelbontású Kamera (HRC) két mikroszatornás lemezt használ, amelyben hajszálfinom elektróda-rendszer határozza meg a röntgenfoton helyét és energiáját. A másik detektor a Chandra Advanced CCD Imaging Spectrometer (ACIS), amely, mint a neve is mutatja, a nagyobb energiájú fotonok detektálására továbbfejlesztett 10 darab CCD-elemből áll.



3. ábra. Az ACIS sematikus elrendezése.

Ezeket az 1024×1024 elemes CCD-eszközöket az MIT Lincoln Laboratóriumban készítették, és hogy a gyors eseményeket, csakúgy, mint a hosszú idejű megfigyelést lehetővé tegyék, a már korábban említett Frame Transfer elvet használják. A kép elmentésének az ideje 41 ms, jóval rövidebb, mint az átlagosan 3,24 másodperces exponálási idő. Hogy a megfigyelések speciális igényeit kielégíthessék, lehetőség van részterületek kiolvasására is, a fény okozta jelek kiszűrésére, és a nagyobb energiájú gamma-sugarak elválasztására. A nagyenergiájú sugárzás károsíthatja a CCD szerkezetét – ezt földi körülmények között termikus kezeléssel meg lehet „gyógyítani” – a Chandrán a károsodás esélyét különös gonddal kellett csökkenteni.

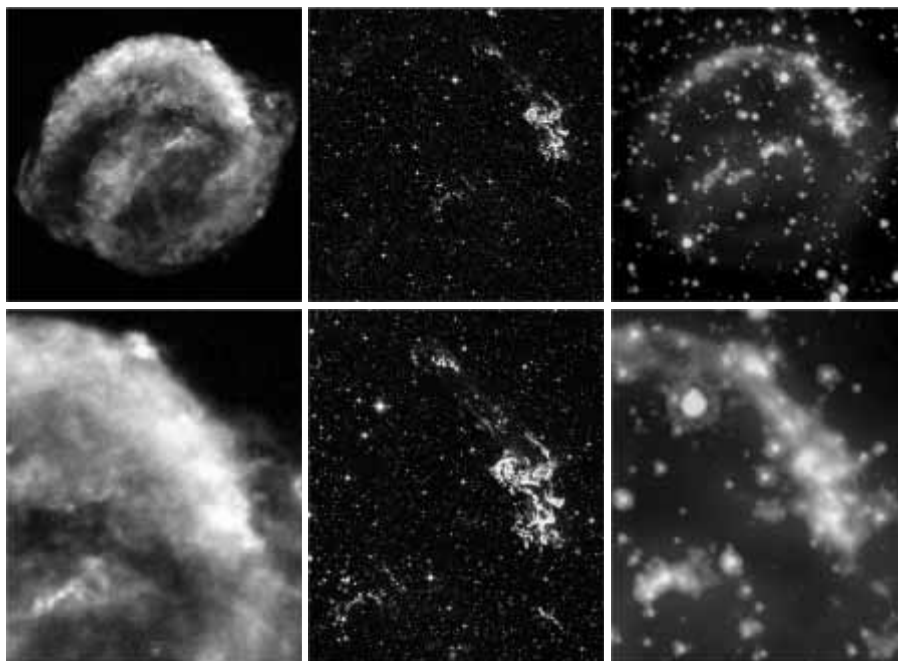
Az ACIS fejlesztése 1990 körül kezdődött, és az együttműködő intézmények (az állami ellenőrzésű Jet Propulsion Laboratory, az MIT és a Penn State Univer-

sity a megvalósításban részt vevő Texas Instrument szerződéses fejlesztővel együtt) hozták létre azt a 10 CCD-eszközt, amelyekből 4 elem a képkalkotást (ACIS-I a 3. ábrán), 6 elem pedig spektroszkópiai célokat szolgál (ACIS-S), a távcső képsíkjában a 3. ábrán látható sematikus elrendezésben.

A Hubble és a Chandra képeinek egyesítésével kapunk ma az Univerzum közeli, galaxison belüli, vagy igen távoli jelenségeinek, a Világegyetem kialakulásának megértését segítő képeket. Az interneten milliószám elérhető rejtjelmes nevű kép helyett mutassunk meg itt egy ilyen összetett képet egy olyan szupernóva-robbanásról, amelyet *Kepler* 400 éve látott, és igencsak aktuális, hiszen az elmúlt évet éppen a csillagászat évének szentelték szerte a világon a távcső csillagászatba kerülésének 400 éves jubileuma alkalmából.

Ez a szupernóva-robbanás az egyik legfiatalabb, amit ismerünk: kerek 400 évvel ezelőtt az eget fürkésző emberek, köztük Kepler is, egy új fényes „csillagot” találtak az égen – éppen a csillagászati távcső felfedezése előtt, pusztá szemmel figyelték meg. Kezdetben fényesebb volt, mint a Jupiter, néhány hét alatt azonban elhalványult. A 2006–2007. évi űrtávcsöves képek ennek a ma Kepler-féle szupernóva-maradványnak nevezett égi objektum részleteit fürkészték. Közel 9 napnyi Chandra-megfigyelés páratlan részletességgel rögzítette a szupernóva energia szerinti felbontású röntgenképét (4. ábra bal oldala). Mint a Tejútrendszer egyik legfényesebb ilyen csillagászati képződményét már több mint 3 évtizede vizsgálták a hagyományos rádió-, látható és röntgentartományban (4. ábra közepén a Hubble-űrtávcső látható fény tartományába eső, míg jobb oldalán a Spitzer-távcső

4. ábra. A Kepler szupernóva-maradvány képe három különböző űrtávcsövel, egyben három különböző energiatarományban felvéve. Balról jobbra a Chandra röntgen-, a Hubble látható tartománybeli és a Spitzer infravörös felvétele látható. Az alsó képek a felsők egy-egy részletét mutatják.



infravörös mérése), és bizonytalan volt, hogy milyen típusú szupernóva-maradványról van szó. Ma, éppen ezen megfigyelések segítségével tudjuk, hogy ez a képződmény egy „fehér törpe” termónukleáris robbanásának eredménye volt, szakszóval Ia típusú szupernóva. A szupernóva-maradványok részletes megismerése rendkívül fontos, hogy megérthessük, miként végződik a csillagok élete, és segítségével (mint megannyi standard fényforrással) tudjuk mérni a Világegyetem tágulásának részleteit is. E munka látványos képeit mutatjuk a hátsó borítón. Alul kék színnel kódolva a Chandra-űrszonda nagy, zöld színnel az alacsony energiájú gamma-teleszkópjának felvételei láthatók. Sárgával a Hubble-űrtávcső látható fény tartományába eső mérés-

seit mutatjuk, míg pirossal a Spitzer-teleszkóp infravörös felvétele látható. A még pontosabb részleteket segít megérteni a teljesebb spektrum, ezt mutatják fölül a különböző űrtávcsövek egyesített képei.

Epilógus

E látványos kitérő után egy kis összefoglalással térjünk vissza a csillagászatra. A Kaliforniai Egyetem asztronómia, asztrofizika és kozmológia részlegének bevezető csillagászati előadásában áttekintik az elmúlt évszázadok legfontosabb eredményeit, megemlítve azt is, hogy milyen felfedezés tette lehetővé ezek elérését. Röviden ismételjük meg:

- 1609 körül: nem a Föld a centrum (csillagászati távcső és *Galilei* megfigyelései),
- 1814 után: a Napot és a csillagokat hidrogéngáz alkotja, és ma már tudjuk, a fúzió fűti (spektrográf felfedezése, *Fraunhofer*),
- 1929: galaxisunk nem központja a Világegyetemnek (*Hubble* és a Mt. Wilson 2,5 méteres óriástávcsöve + nagy formátumú fotólemez),
- 1965: Big Bang (*Penzias* és *Wilson*, rádióteleszkóp – űrtávcsövek igazolják!),
- 1995-től: a bolygók gyakoriak az Univerzumban (modern CCD-detektorok, jódcella a pontos sebességmérésre),
- 1998: döntően a „sötét energia” (Dark Energy) tölti ki az Univerzumot (nagy formátumú CCD-detektorok, 10 méteres Keck-teleszkóp)...

És most már tudjuk, hogy ez csak a kezdet – ha valaki kíváncsi, mi készül az égen, olvassa el *Szatmáry Károly* és *Szabados László Űrtávcsövek* című cikkét a *Meteor csillagászati évkönyv* 2009-es kötetében, ha meg arra, hogy mi várható a földi csillagászat-

ban, olvassa el *Fűrész Gábor* cikkét a közeljövő legnagyobb tervezett távcsöveiről a *Természet Világa* 2009/1-es különszámában (*Feltárul a Világegyetem*).

Befejezésül ma azt hisszük, hogy nagy valószínűséggel tudjuk, hogy mi a Világegyetem „összetétele”:

- 4% közönséges (barionos) anyag – ez az, amit régóta és egyre inkább látunk, hála a CCD-nek is!
- 21% sötét anyag – ez az, amit indirekt módon a gravitáció segítségével „mérhetünk”, hogy mi ez az anyag, azt keressük az új CERN gyorsítóval és az elemi-rész-fizika szokásos elméleti és kísérleti eszközeivel.

- 75% sötét energia – a Világegyetem gyorsulva távolul, ezt mérte meg két csoport 1998-ban, és azóta sokan, és erre jök a nagyon régi, tízmilliárd éves szupernóvák, no meg a CCD-k! Hogy ez az „energia” mi lehet, arról sejtelmünk sincsen, alig merem leírni, de azt is gondolták, hogy a gravitációs tér vákuumenergiája talán – de a becsült energiasűrűség 120 nagyságrenddel nagyobb, mint az Einstein-egyenletekből következik!

Ha egy becslés 120 nagyságrenddel tér el attól, amit várnánk, azt nemigen lehet komolyan venni! Ezért is hiszem azt, hogy valami nagyon új úton kell elindulnunk, és ez kicsit több lehet, mint a már említett kvantumhipotézis! Arra gondolhatunk, amit a nagy perzsa filozófus, matematikus, fizikus, csillagász (szóval polihisztor és még költő is), a perzsa naptárreform bevezetője, *Omar Khajjám* több mint 900 éve mondott:

„Gondold meg: ami a világon van, az nincs.

Fontold meg: ami a világon nincs, az van.”

(*Képes Géza* fordítása)

Bízzunk a jövő évek Nobel-díjasaiban és a sok ifjú kutatóban, hogy a költő másik, közel ezer éves jóslata nem válik valóra:

„A Titkok Fátyola mögé embernek nincsen útja.

A Létnék ezt a rendszerét nincs lélek, aki tudja.”

(*Csillik Bertalan* fordítása)

HELYFÜGGŐ AMPLITÚDÓVAL GERJESZTETT HARMONIKUS OSZCILLÁTOR KAOTIKUS VISELKEDÉSE

Slíz Judit

ELTE Elméleti Fizika Tanszék

A *Fizikai Szemle* több korábbi cikke [1–5], valamint más folyóiratok [6] is foglalkoztak egy olyan mechanikai mozgásformával, amely noha gyökeresen eltér a megszokottól, előfordulása meglepő módon mégis nagyon gyakori. Ezek a szokatlan mozgások a *kaotikus jelenségek*, amelyek egészen napjainkig, a számítógépek megjelenéséig, rejtve maradtak. Az egyetemi tananyagból jól ismert, *analitikusan* megoldható, lineáris differenciálegyenletekkel leírt mozgások csak közelítései a valóságnak. A valóságos mozgásokban mindig fellép valamilyen mértékű nemlinearitás, és az ezt leíró differenciálegyenleteknek már nem léte-

zik zárt alakú megoldása. A mozgás pályáját csak *numerikusan*¹ lehet kiszámolni, ehhez pedig számítógép kell.

Ha sikeresen túlestünk a mozgásegyenletek numerikus modellezésének nehézségein, (ami kis segítséggel felsőbb évfolyamos középiskolás diákok számára is elérhető [3, 5, 7]), már ott is vagyunk a kaotikus

¹ Jelen cikkben az elsőrendű differenciálegyenlet-rendszerré alakított mozgásegyenletek numerikus megoldásához a negyedrendű Runge–Kutta-módszert [8] választottam $\Delta t = 0,01$ s (a finomabb részleteknél $\Delta t = 0,001$ s) időléptetéssel.

mozgások és a *fraktálok* csodálatos világában [9, 10], ahol lépésről lépésre haladva, újabb és újabb önálló felfedezéseket tehetünk. E cikk a mechanika egy szűk, de alapvető szeletét, a harmonikus és anharmonikus oszcillátorokat vizsgálja különféle nemlinearitások esetén. Először megnézzük, hogy mi történik, ha a *harmonikus oszcillátort* állandó, illetve helyfüggő amplitúdójú erővel gerjesztjük, majd megvizsgáljuk ugyanezt az *anharmonikus oszcillátor* esetében is. Vizsgálódásunkat kezdjük az időben periodikus erővel gerjesztett harmonikus oszcillátorral, amely mozgásegyenletének newtoni alakja [11, 12] a jól ismert

$$\begin{aligned} ma &= F_{\text{rugó}} + F_{\text{sírl}} + F_{\text{gerj}} \\ F_{\text{rugó}} &= -Dx, \\ F_{\text{sírl}} &= -c\dot{x} \end{aligned} \quad (1)$$

alakú. Itt x az oszcillátor kitérése, \dot{x} a sebessége, D és c pedig állandók. A gerjesztő erőt az

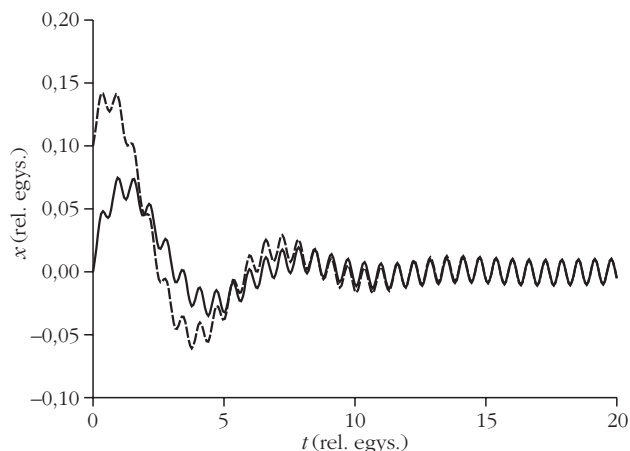
$$F_{\text{gerj}} = F(x, t) = A m f(x) \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (2)$$

alakban írjuk, ahol az A egy gyorsulás dimenziójú állandó, m a tömeg, $f(x)$ pedig a gerjesztési amplitúdó helyfüggését megadó általános, a függvényértékben dimenzióatlan függvény. A szokásos $\omega_0^2 = D/m$, $2\alpha = c/m$ jelöléseket alkalmazva mozgásegyenletünk a következő alakot ölti:

$$\ddot{x} = -\omega_0^2 x - 2\alpha\dot{x} + A f(x) \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right). \quad (3)$$

Az egyszerűbb ábrázolhatóság kedvéért, valamint tekintettel a későbbiekben fellépő bonyolultabb mozgásegyenletekre, dimenzióatlanítsuk a (3) egyenletet a $t' = t/S$ és $x' = x/L$ dimenzióatlan idő, illetve hosszúság bevezetésével. Az S , illetve L tetszőlegesen megválasztható idő-, illetve hosszúságdimenziójú meny-

1. ábra. Az $\ddot{x} = -x - 0,6\dot{x} + \cos(10t)$ mozgásegyenletű, két különböző, $x_{01} = 0,1$ (szaggatott vonal) és $x_{02} = 0$ (folytonos vonal) kezdeti dimenzióatlan kimozdulással, azonos $v_0 = 0,1$ dimenzióatlan kezdősebességgel indított harmonikus oszcillátor kitérés-idő diagramja.



nyiség, amelyek legyenek a következők: $S = 1/\omega_0$, $L = A/\omega_0^2$. A $t = t'/\omega_0$ és $x = (A\omega_0^2)x'$ értékeket behelyettesítve (3)-ba, valamint bevezetve a

$$\beta = \frac{\alpha}{\omega_0}, \quad \delta = \frac{2\pi}{T\omega_0} \quad (4)$$

jelöléseket, majd visszaállítva a független és függő változó elnevezését $t' = t$ -re és $x' = x$ -re, megkapjuk a (3) egyenlet dimenzióatlanított alakját:

$$\ddot{x} = -x - 2\beta\dot{x} + f\left(\frac{x}{\omega_0^2}\right) \cos(\delta t). \quad (5)$$

A β és a δ fizikai jelentéssel is bír, β a dimenzióatlan csillapítási együttható, δ pedig a dimenzióatlan gerjesztési frekvencia (a valódi gerjesztési frekvencia és a sajátfrekvencia hányadosa).

Helytől független erővel gerjesztett harmonikus oszcillátor

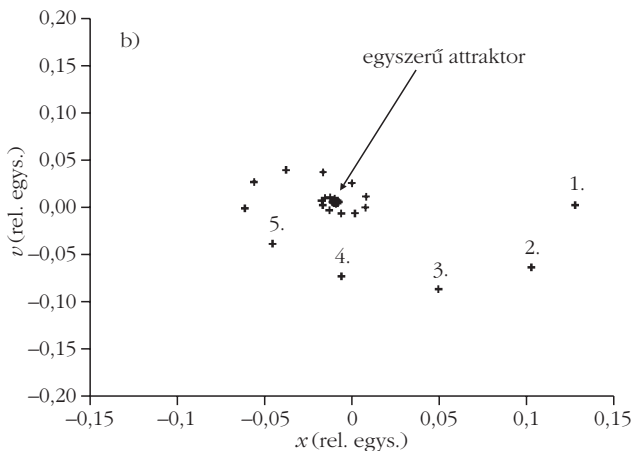
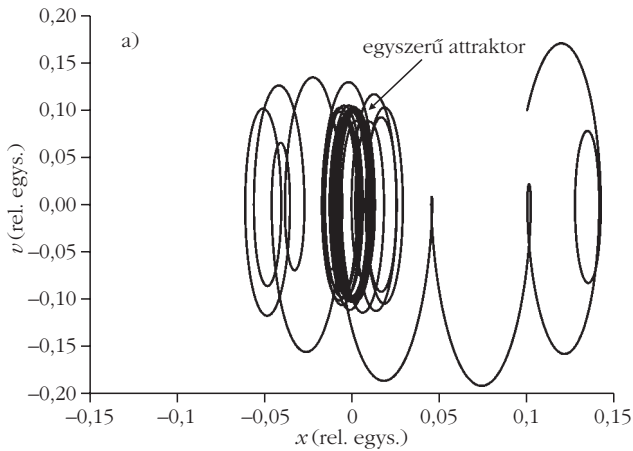
Először emlékeztetünk a jól ismert állandó amplitúdójú gerjesztés esetére, amikor is $f(x) = 1$. Ekkor az

$$\ddot{x} = -x - 2\beta\dot{x} + \cos(\delta t). \quad (6)$$

alakú dimenzióatlan mozgásegyenlet analitikusan megoldható, és a kitérés-idő megoldásfüggvény hosszú idő után a szinuszfüggvényhez tart [11, 12]. Indítsunk el különböző kezdeti feltétellel két mozgást, és hasonlítsuk össze a kitérés-idő függvényüket. Mivel tudjuk, hogy esetünkben hosszú idő után ezek mindig a szinuszfüggvényhez tartanak, elegendő csak a függvény kezdeti szakaszát vizsgálni (*1. ábra*).

Ugyanezt a mozgást a *fázistérben* (a pillanatnyi sebesség a kitérés függvényében) ábrázolva megkapjuk a *2.a ábrán* látható *trajektória* (a mozgás fázistérbeli pályája) képét. Hosszú idő után ez egy *ellipszishez* tart. Az olyan alakzatot, amelyhez hosszú idő után a mozgás trajektóriája tart, bárhonnét is indítjuk a mozgást egy bizonyos tartományon belül, *attraktor-nak* nevezzük [7]. A mi esetünkben ez egy ellipszis, ami itt *batárciklus* attraktor, az egyszerű attraktorok egyik fajtája.

A gerjesztés miatt a mozgás fázistérbeli ábrázolása már ebben az egyszerű esetben is bonyolulttá válik. Mivel a gerjesztő erő időben periodikus, célszerűnek látszik, hogy a kitérés-sebesség függvényt T periódus-időnként ábrázoljuk, amit *stroboszkopikus leképezésnek* hívunk. Ez látható a *2.b ábrán*, ahol a pontok spirálisan tartanak az állandósult állapothoz, amelynek ebben az ábrázolásban egyetlen pont felel meg, ami a leképezés attraktora (*fixpont attraktor*). E pont a *2.a ábra* ellipszisének stroboszkopikus leképezése. A stroboszkopikus leképezés előnye, hogy a térben kigyózó trajektóriából periódusidőnként mintát véve a megszokott $x-v$ síkban ábrázolhatjuk a mozgást, ami azonban már nem folytonos, hanem egy pontos-



2. ábra. Az $\ddot{x} = -x - 0,6 \dot{x} + \cos(10 t)$ mozgásegyenletű ($x_{01} = 0,1, v_{01} = 0,1$) harmonikus oszcillátor egyszerű attraktora. a) az $x-v$ síkon (ellipszis), és b) stroboszkopikus leképezéssel (pont). A b) ábrán a sor-számított kis nyilak a leképezés első néhány pontjának az attraktorhoz való közeledését jelzik, az 1. pont a kezdőpont.

rozat. (Ezért kapta a nevét a stroboszkópról, amely szaggatott megvilágítást ad.) Stroboszkopikus leképezéskor² az alakzatok dimenziója eggyel kisebb, mint a teljes fázistérben (például pont lesz ellipsziszből) [7].

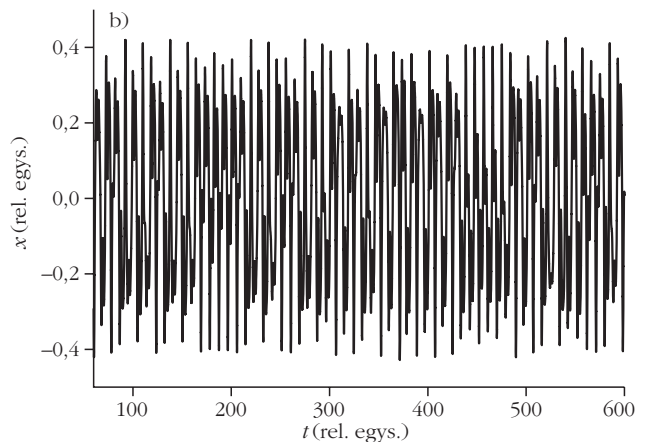
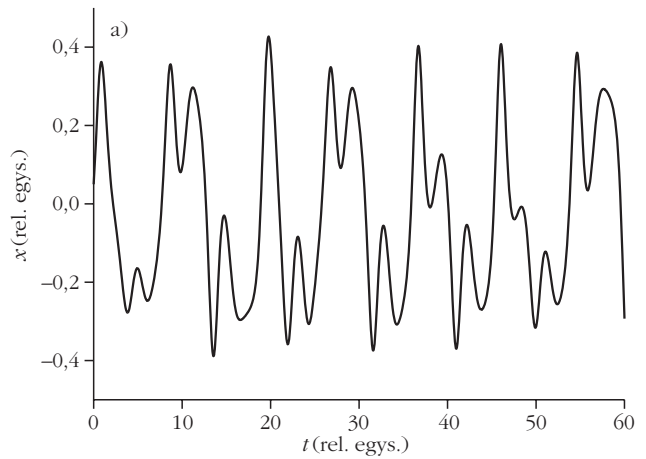
Parabolikus helyfüggő erővel gerjesztett harmonikus oszcillátor

Most pedig nézzük meg, hogyan módosulnak ezek a képlettel leírható, szabályos, periodikus görbék, valamint határciklus attraktoruk különböző nemlineáris hatásokra. Első lépésben tegyünk az állandó amplitúdó helyébe parabolikus alakot: $f(x) = (1 - v x^2)$, ahol v egy nemlinearitási paraméter. Ekkor a dimenziótlan mozgásegyenlet a következő alakú lesz:

$$\ddot{x} = -x - 2\beta \dot{x} + (1 - v x^2) \cos(\delta t). \quad (7)$$

Nézzük meg e mozgás kitérés-idő függvényét is. Arra már az első próbálkozások után rájöhettünk, hogy

² A gyakorlatban nagyon egyszerűen megkaphatjuk a stroboszkopikus leképezést, ha az időlépést a periódusidő századrésének vesszük, és csak minden századik lépést jelenítünk meg.



3. ábra. Az $\ddot{x} = -x - 0,4 \dot{x} + (1 - 16,636 x^2) \cos(0,688 t)$ mozgásegyenletű ($x_0 = 0,05, v_0 = 0,35$) harmonikus oszcillátor kitérés-idő ($x-t$) diagramja a) a $t = 0-60$, és b) a $t = 60-600$ időegység intervallumban.

míg az állandó amplitúdójú gerjesztésnél teljesen mindegy volt, melyek a rendszer paraméterei, hosszú idő után mindig szinuszfüggvényhez tartott a kitérés-idő függvény, itt a megoldás erősen függ a rendszer paramétereitől. Vizsgáljuk meg alaposabban a következő, konkrét paraméterértékekkel rendelkező oszcillátort:

$$\ddot{x} = -x - 0,4 \dot{x} + (1 - 16,636 x^2) \cos(0,688 t). \quad (8)$$

Ha ránéznünk a 3. ábrán látható kitérés-idő függvényre,³ semmilyen szabályosságot sem találunk, a mozgás tehát kaotikus.

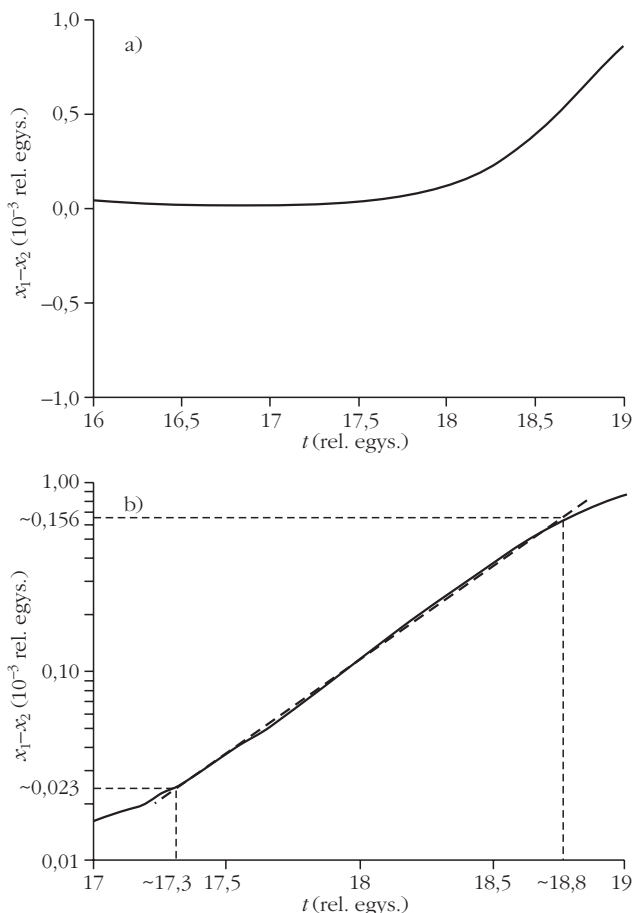
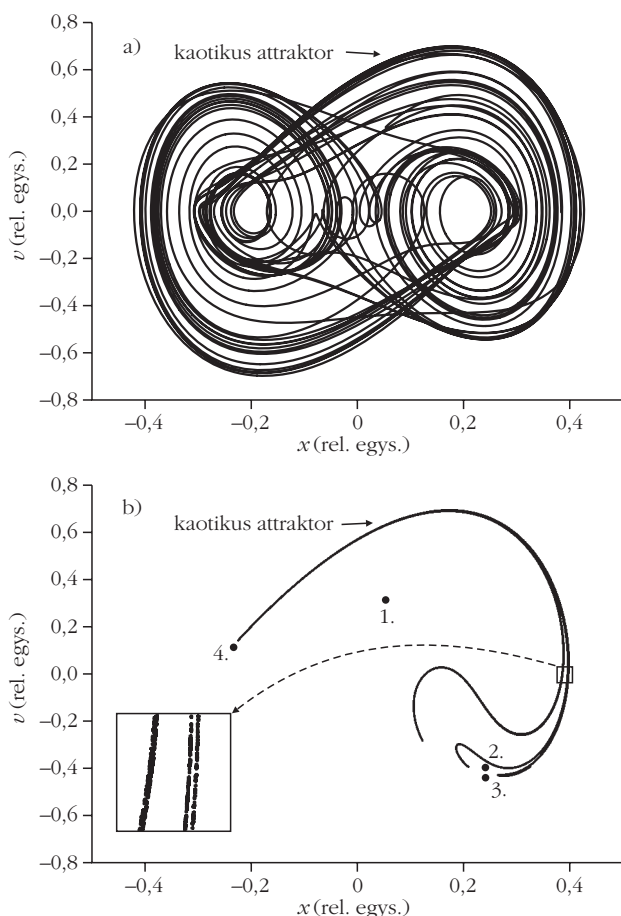
Azonban a fázistérre megnézve érdekes látvány tárul elénk: a teljesen szabálytalan kitérés-idő diagramú mozgásban nagyon is szigorú rend, szabályosság figyelhető meg. Ez már a 4.a ábrán, a trajektóriák kavargásában is jól látható, de ha a 4.b ábra stroboszkopikus leképezését nézzük, akkor végtelenül egyszerűnek tűnő görbét látunk. A kaotikusan össze-vissza kavargó, hosszú idő után a síkot teljesen besatírozó

³ Itt is, és a későbbiekben is mindenkor megadjuk a kezdőfeltételeket, de megjegyezzük, hogy kaotikus esetben ennek nincs jelentősége, mert a kaotikus attraktort elérő, de különböző helyekről induló mozgások idővel egyformán rajzolják ki az attraktor struktúráját.

trajektóriák stroboszkopikus leképezése sohasem hagyja el ezt a görbét! A trajektóriák tetszőleges pontból indítva, stroboszkopikus leképezésben e görbéhez tartanak, hasonlóan ahhoz, ahogyan az állandó amplitúdóval gerjesztett oszcillátornál egy ellipszishez. Ezért ezt is attraktornak hívjuk, de különleges tulajdonságai miatt *kaotikus* vagy *különös attraktor* a neve. A kaotikus attraktor egyik különleges tulajdonsága a *4.b ábrán* látható. Ha kinagyítjuk a „vonal” egy részletét, meglepődve tapasztaljuk, hogy további vonalakból áll. Ha ismét tovább nagyítanánk, megint csak ugyanazt az *önhasonlító*, szálas, fonalas szerkezetet kapnánk. A kaotikus attraktornak tehát *szálas fraktálszerkezete* van.

A kaotikus mozgás egy másik jellegzetessége, az *előre-jelvezhetetlenség* okát az *5. ábra* szemlélteti, ahol a könnyebb érthetőség kedvéért két nagyon közeli (1 ezrelék különbségű) pontból indított mozgás kitérésének *különbségét* ábrázoltuk. Az *5.a ábrán* jól látható, hogy közel 17 időegységig nagyjából együtt halad, majd gyorsan eltávolodik egymástól a két pálya. Ha az eltávolodásnak e kis szakaszt logaritmikus skálán ábrázoljuk (*5.b ábra*), akkor nagyjából egyenest kapunk, azaz a két kitérés logaritmikus léptékben távolodik egymástól. Az egyenes

4. ábra. Az $\ddot{x} = -x - 0,4\dot{x} + (1 - 16,636x^2)\cos(0,688t)$ mozgásegyenletű ($x_0 = 0,05$, $v_0 = 0,35$) harmonikus oszcillátor a) fázistere, és b) stroboszkopikus leképezése. A kis nyilak azokra a pontokra hívják fel a figyelmet, melyeket a trajektória átfut, mielőtt rákerül az attraktorra. A számok az időbeli haladást jelzik, az 1. kezdőponttal.

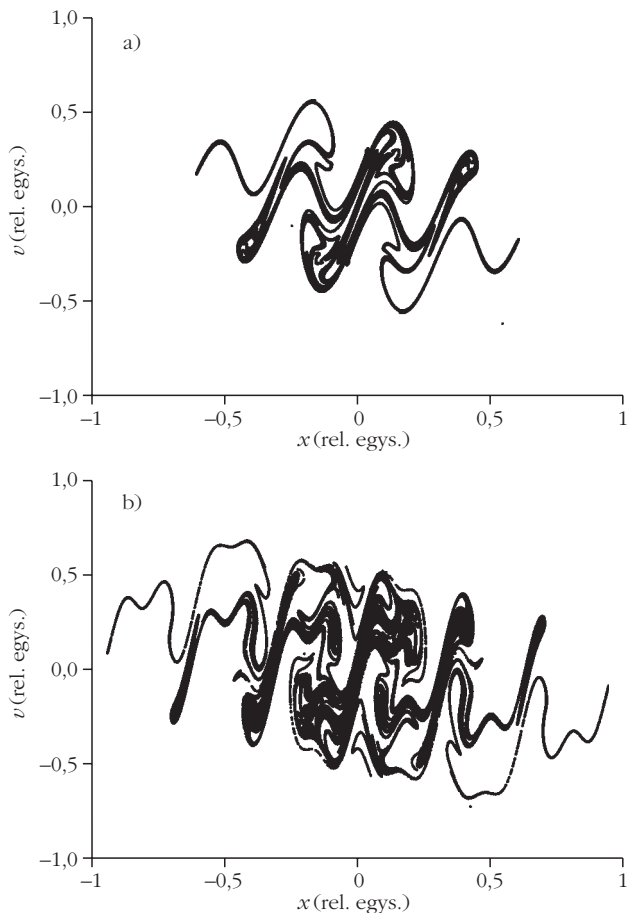


5. ábra. Az $\ddot{x} = -x - 0,4\dot{x} + (1 - 16,636x^2)\cos(0,688t)$ mozgásegyenletű harmonikus oszcillátor $x_0 = 0,05$, $v_0 = 0,35$ és $x_0 = 0,0505$, $v_0 = 0,35$ kezdőfeltételek melletti két pályája kitérésének különbsége az idő függvényében, a pályák eltávolodásának kezdetekor a) lineáris skálán, és b) logaritmikus skálán.

meredeksége, ami a trajektóriák szét tartásának mértékével egyenlő, nem más, mint az

$$x(t) = x(t_0) e^{\lambda(t-t_0)} \quad (9)$$

kifejezésben előforduló λ a *Ljapunov-exponens*, az előre-jelvezhetlenség mérőszáma. Az *5.b ábra* alapján elemi algebrai műveletekkel kiszámítható λ közelítő értéke. Illesszünk egyenest a középső görbeszakaszra, olvassuk le a végpontjai koordinátáit, és számoljuk ki az egyenes meredekségét. Az ábráról így módon leolvasható érték: $\lambda = 1,28$. Mivel a valóságban két mozgás sohasem indulhat pontosan azonos kezdőpontból (valahányadik tizedesjegyben mindig lesz különbség), ezt a kezdeti különbséget tekinthetjük a fázistérbeli állapot $\Delta x(t_0)$ meghatározási pontatlanságának is. Ha ezt a $\Delta x(t_0)$ -t összehasonlítjuk valamilyen jellegzetes távolsággal, például a mozgás fázistérbeli méretével vagy az átlagos gerjesztési amplitúdóval, akkor megkapjuk az állapot meghatározásának relatív hibáját. Egy mozgás akkor jelezhető előre, ha e relatív hiba hosszú idő után is viszonylag kicsi marad. Kaotikus mozgások esetén a $\Delta x(t)$ időben exponenciálisan nő, és ezért a relatív hiba rövid idő alatt 100%-os lesz, vagyis a mozgás *előre-jelvezhetetlenné*



6. ábra. a) Az $\ddot{x} = -x - 0,6\dot{x} + \sin(20x)\cos(4,1t)$ mozgásegyenletű ($x_0 = 1$, $v_0 = 0$) harmonikus oszcillátor stroboszkopikus leképezéssel kirajzolt kaotikus attraktora. b) A térbeli és időbeli kétszeres „frekvenciával” is gerjesztett, $x_0 = 1$ és $v_0 = 0$ kezdő feltételű, az $\ddot{x} = -x - 0,6\dot{x} + \sin(20x)\cos(4,1t) + \sin(40x)\cos(8,2t)$ mozgásegyenletű harmonikus oszcillátor stroboszkopikus leképezéssel kirajzolt kaotikus attraktora.

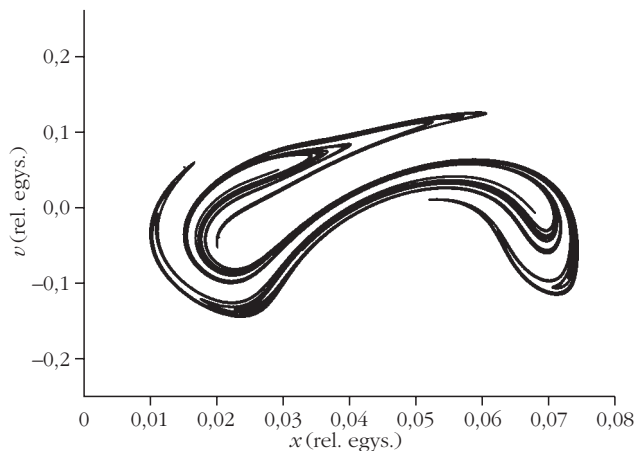
válk. Az az idő, ami alatt a relatív hiba kicsinek tekinthető és a mozgás még előre-jelvezhető, az *előrejelzési idő*, ez a Ljapunov-exponens reciprokéval arányos. Esetünkben ez $1/\lambda = 0,78$, még az 1 dimenziótlan időegységénél is kisebb. Minél nagyobb a λ értéke, annál rövidebb ideig jósolható meg előre a rendszer viselkedése [7].

Színuszos helyfüggő erővel gerjesztett harmonikus oszcillátor

Most nézzük meg, hogy mi történik, ha a parabolikus helyfüggésű amplitúdót színuszosra cseréljük. Ekkor $f(x) = \sin(\kappa x)$, ahol κ a dimenziótlan hullámszám, ami egy másik nemlinearitási paraméter. Az így kapott dimenziótlan mozgásegyenlet:

$$\ddot{x} = -x - 2\beta\dot{x} + \sin(\kappa x)\cos(\delta t). \quad (10)$$

Ha ügyesen választjuk meg az állandók értékét, akkor a 6.a ábrán látható bonyolult geometriájú, színusz-hullámra emlékeztető kaotikus attraktort kapjuk.



7. ábra. Az $\ddot{x} = -x - 2500x^3 - 0,1\dot{x} + \cos(1,04t)$ mozgásegyenletű ($x_0 = 0,1$, $v_0 = 0$) nemlineáris, állandó amplitúdóval gerjesztett oszcillátor stroboszkopikus leképezéssel kirajzolt kaotikus attraktora.

Végül nézzük meg, miként módosul az attraktor szerkezete, ha két különböző frekvenciájú és helyfüggésű erővel gerjesztjük a harmonikus oszcillátort. A térbeli és időbeli „frekvencia” legyen például a duplája az első gerjesztésének. A kaotikus attraktort a 6.b ábra mutatja. A 6.a és 6.b ábrát összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a kaotikus attraktor alakja erősen torzult a második gerjesztés hatására, vonalai kuszábbak, „reszketősebbek” lettek, és mintha megjelentek volna rajta a kétszeres frekvenciájú „felharmonikusok” is.

Anharmonikus oszcillátor: nemlinearitás a rugóerőben

Lépünk még egyet tovább, és vizsgáljunk meg egy olyan anharmonikus oszcillátort, amelynél a nemlinearitás a rugóerőben van.⁴ Tegyük fel, hogy a visszahúzó erőben megjelenik egy, a kitéréstől köbösen függő tag is. Az eredeti megoldandó dimenziós mozgásegyenlet (keményedő rugó esetén):

$$\ddot{x} = -\omega_0^2 x - \varepsilon_0 x^3 - 2\alpha\dot{x} + Af(x)\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right). \quad (11)$$

A dimenziótlanítást az előzőekhez hasonlóan elvégezve, kapunk egy újabb, a rugó nemlinearitására jellemző dimenziótlan paramétert:

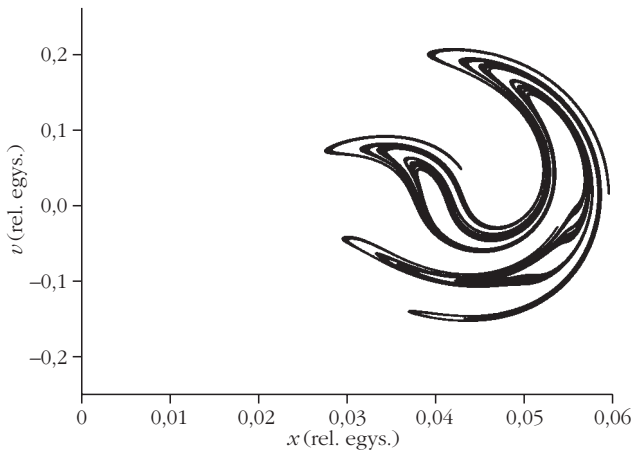
$$\mu = \frac{\varepsilon_0 A^2}{\omega_0^6}, \quad (12)$$

amivel a dimenziótlan mozgásegyenlet:

$$\ddot{x} = -x - \mu x^3 - 2\beta\dot{x} + f\left(x\frac{A}{\omega_0^2}\right)\cos(\delta t). \quad (13)$$

A 7. és 8. ábra állandó amplitúdójú gerjesztés esetén kapott kaotikus attraktorokat mutat. Ezeket és a 6.

⁴ A rugóerő ilyenkor a kitéréssel nem arányosan nő. Ez a helyzet például egy lágyló vagy keményedő rugónál.



8. ábra. Az $\ddot{x} = -x - 15625x^3 - 0,1\dot{x} + \cos t$ mozgásegyenletű ($x_0 = 0,1, u_0 = 0$), nemlineáris, állandó amplitúdóval gerjesztett oszcillátor stroboszkopikus leképezéssel kirajzolt kaotikus attraktora.

ábrán kinagyítás nélkül is jól látszik a kaotikus attraktorok szálas, fonalas fraktálszerkezete.

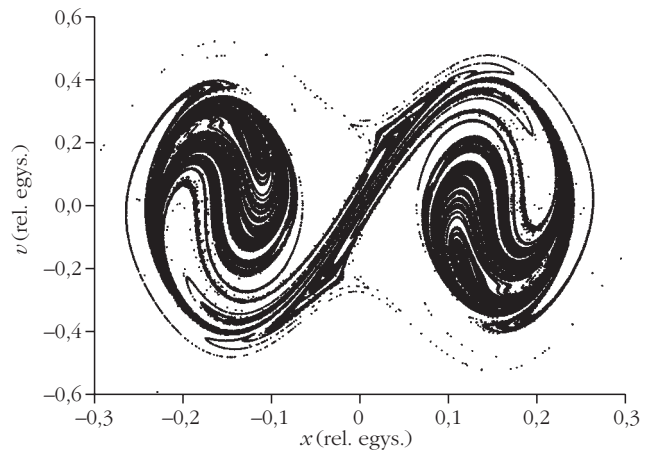
Végezetül nézzünk meg egy olyan esetet, amikor a nemlinearitás a mozgásegyenletben kétszeresen is fellép: tegyük (13)-ba most szinuszos helyfüggésű gerjesztést, ekkor a mozgás szinuszhullámot mintázó kaotikus attraktora a 9. ábrán látható.

Záró gondolatok

E cikk kereteibe már nem fér bele annak megmutatása, hogy nem mindig kaotikus viselkedésű az anharmonikus oszcillátor (és a helyfüggő amplitúdóval gerjesztett harmonikus oszcillátor sem), amely tulajdonság erősen függ a rendszer paramétereitől. Sokkal könnyebb olyan rendszerparamétereket (dimenziótlan csillapítási együttható, nemlinearitási paraméter, frekvencia) találni, amelyek mellett vonzó fixpontok vagy úgynevezett *n-es ciklusok* lépnek fel. Két fontos megállapítást tehetünk a vizsgált rendszerekre vonatkozóan:

- A harmonikus oszcillátor is kaotikusan viselkedhet, ha a gerjesztő erő amplitúdója helyfüggő.
- Mind a harmonikus, mind az anharmonikus oszcillátor esetében szinuszos helyfüggésű gerjesztési amplitúdónál sokkal könnyebb kaotikus mozgást találni, mint parabolikus helyfüggésűnél, vagy mint az állandó amplitúdóval gerjesztett anharmonikus oszcillátornál.

A vizsgált esetekben megmutatkozott a káosz valamennyi jellemzője: a szabálytalanság, az előre-jelmezhetetlenség és a hely-sebesség ábrázolásban megjelenő bonyolult geometriájú, de szabályos alakzat [7]. Az összes vizsgált esetben megfigyelhető volt, hogy a kaotikus attraktorok alakja valamilyen



9. ábra. Az $\ddot{x} = -x - x^3 - 0,1\dot{x} + \sin(20x)\cos t$ mozgásegyenletű ($x_0 = 1, u_0 = 0$), szinuszos amplitúdóú gerjesztésből és nemlineáris rugóerőből származó, azaz kétszeresen nemlinearitású oszcillátor stroboszkopikus leképezéssel kirajzolt kaotikus attraktora.

formában „emlékezik” az őket létrehozó nemlineáris $f(x)$ gerjesztő függvény alakjára.

Számomra nagy örömet és a felfedezés izgalmát jelentette ez a kis vizsgálódás a káosz világában, és kívánom, hogy sokan részesülhessenek még hasonló nemes élményben. Segítségképpen szívesen átadom az itt szereplő esetek vizsgálatához használt számítógépes program C++ forráskódját. Az eziránt érdeklődők írjanak nekem a jsliz@freemail.hu e-posta címemre.

Köszönetnyilvánítás

E cikk az ELTE TTK-n a 2009/2010 tanév őszi félévében hallgatott *Kaotikus mechanika I.* című speciális előadás 2010. januárjában megvédett vizsgadolgozatából fejlődött ki. Egyúttal köszönetemet fejezem ki a tárgy oktatóinak, *Gruiz Márton*nak és *Tél Tamás*nak.

Irodalom

1. Gruiz M., Tél T.: Káoszról kicsit bővebben. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 218–221.
2. Gruiz M., Tél T.: A káosz. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 191–193.
3. Békéssy L. I., Bustya Á.: Fizikai kettősinga vizsgálata. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 185–191.
4. Götz G.: A pillangó-effektus – a káosz felfedezése a meteorológiában. *Fizikai Szemle* 43 (1993) 487–492.
5. Biró I.: Mágneses ingák kísérleti tanulmányozása. *Fizikai Szemle* 46 (2006) 13–18.
6. Sótér A.: Lorenz modelljének kísérleti vizsgálata és a kaotikus vízikerek. *Természet Világa* 135 (2004) LXXIII–LXXIV.
7. Tél T., Gruiz M.: *Kaotikus dinamika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
8. W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling: *Numerical Recipes in Pascal*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.
9. Kecskés L.: *Egy ölnyi végtelen*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
10. J. Gleick: *Káosz*. Göncöl Kiadó, Budapest, 1999.
11. Budó Á.: *Mechanika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
12. Nagy K.: *Elméleti mechanika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.

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: Szatmáry 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)

Az utóbbi években egyre gyakrabban hallhatunk-olvashatunk arról, hogy „jó-jó, az atomerőművek segítenek a klímaváltozás korlátozásában, de – sajnos – kár ilyeneket építeni, hiszen alig van már a Földön műrevaló urán”. Példaként megemlítjük a *Népszabadság* 2010. január 8-án megjelent számát, amelyben két cikk is foglalkozik a kérdéssel (*Megatonnákból megawattok* és *Uránkeresők*). Egy külön dolgozatot lehetne írni a jelenség okairól, de ez nem illik ebbe a folyóiratba. Ide illik viszont a kérdés szakmai tárgyalása. Az említett cikkek lényege, hogy az atomenergia alkalmazásának újabban tapasztalható felélénkülése idején fennakadások lehetnek az atomerőművek fűtőelemekkel való ellátásában. Jelenleg az Egyesült Államokban a szovjet atomfegyverek egy részében található urán atomerőművi üzemanyaggá konvertálják, és amerikai reaktorokban elégetik. Erre utal a *Megatonnákból megawattok* cím. Ez az uránmennyiség is elfogy néhány éven belül. A szerző tehát levonja azt a következtetést, hogy nemcsak az eredeti uránlelőhelyek (vagyis a bányák) merülnek ki, hanem a másodlagos uránforrások is. Az idézett gondolatok sok tekintetben tévesek, és a végkövetkeztetés teljesen téves. Valójában a Földön annyi urán található, hogy az addig elegendő, ameddig szükség van rá, és itt évszázadokról, esetleg évezredekről van szó. Az persze előfordulhat, hogy átmenetileg felszökik az uránár, amint ez néhány éve bekövetkezett, de ez az alábbiak érvényét nem befolyásolja. Sok függ azonban attól, milyen technológiát alkalmazunk. Ezért az uránkészletek áttekintése után az alkalmazott, illetve alkalmazható technológiákat tekintjük át.

Uránkészletek

Az 1980-as évek elején kereken ötmillió tonnára becsülték a Földön ismert és az akkori uránáron gazdaságosan kitermelhető uránkészleteket. Lényegesen korszerűbb és részletesebb adatokat találunk *Vajda György* 2004-ben megjelent könyvében,¹ ezért az alábbiakban erre támaszkodunk. Az urán *primordiális* radioaktív anyag, amely egy, a Naprendszer kialakulása előtt lezajlott szupernóva-robbanásban keletkezett, a Föld anyagában ezért szóródott szét egyenletesen. Átlagos koncentrációja 3–4 ppm.² Jelentős mennyiség található a tengervízben, ahol a koncentráció 3,3 ppb.² Bizonyos geokémiai folyamatok következtében vannak

helyek a Földön, ahol az urán feldúsult. Például a konvenció uránszurokban az U_3O_8 koncentrációja a 60%-ot is elérte. Ilyen gazdag telepek azonban ritkák, már a 0,1–0,3% koncentrációjú helyeket is műrevalónak tekintik. A hazai uránbányában a 0,1%-nál soványabb ércet is kitermelték – ráadásul 1000 m mélységből. Sok helyen az uránt egyéb bányák (arany, réz, olajpala, foszfát stb.) melléktermékeként is kitermelik.

A kitermelhető urán mennyiségét a kitermelés fajlagos költsége szerint szokás megadni. A bevett árkategóriák 25, 40, 80, 130 és 260 USD/kg urán. Az uránkészletekre vonatkozó adatok sokáig katonai titoknak minősültek, ami lassan megszűnik, de nem teljesen. Már csak emiatt is bizonytalanok az adatok. A 40 USD/kg költséggel kitermelhető urán mennyisége 1 Mt-ra³ becsülhető, ami zömmel Kanadában, Kínában és Dél-Afrikában található. A 40 és 130 USD/kg közötti költséggel feltárható ismert uránvagyon 3–4,5 Mt. Ehhez járul a még fel nem tárt, de közvetett indikációval valószínűsíthető urán, becsült mennyisége 4–6 Mt. Végül beszélhetünk még a 130 USD/kg-nál olcsóbban kitermelhető 10–12 Mt-ra becsült reménybeli uránvagyonról. Az utóbbit illetően megjegyezzük, hogy eddig a szárazföldek felszínének mindössze 8–10%-át kutatták meg uránra. Vannak még további, nem konvencionális készletek is. A legfontosabb a foszfátokban 50–200 ppm koncentrációban található urán, amelyet a műtrágyagyártás melléktermékeként 40–90 USD/kg költséggel lehetne kitermelni. Össztömege körülbelül 22 Mt. Végül megemlítjük a tengervizet: a benne található mintegy 4000 Mt urán 340 USD/kg költséggel lenne kitermelhető.

Fizikusok körében ismert, de a rend kedvéért megemlítjük, hogy az urán mindkét izotópja felhasználható energiatermelésre.⁴ A 0,71%-ot kitevő ^{235}U tetszőleges energiájú neutronokra hasad. A túlnyomó részt kitevő ^{238}U csak 0,8 MeV-nél nagyobb energiájú neutronokra hasad, viszont neutronok hatására a jól hasadó ^{239}Pu -má alakul át. A reaktorban ez további neutronok hatására nehezebb plutóniumizotópokká alakul át. A nehéz elemek között a páros rendszámú és páratlan tömegszámú izotópokat (^{235}U , ^{239}Pu stb.) hasadó izotópoknak, a páros rendszámú és páros tömegszámú izotópokat (például ^{238}U) pedig fertilis izotópoknak szoktuk nevezni. A természetben található még egy fontos fertilis izotóp, a ^{232}Th , amely ^{233}U -ná alakítható át. Jóllehet a tórium energetikai hasznosítása a gyakorlatban még nem indult meg, megemlítjük, hogy a tórium átlagos koncentrációja a Földön 12 ppm, vagy az uránénak mintegy háromszorosa. Általában a ritka földfémekkel keveredve található. Legfontosabb érce a monacithomok. Az ismert tóriumkészletek tömege 4 Mt-ra becsülhető

¹ Vajda György: *Energiellátás ma és holnap*. MTA Társadalomkutató Központ, Budapest, 2004.

² ppm = parts per million, az urán koncentrációja $3-4 \cdot 10^{-6}$. ppb = parts per billion vagyis 10^{-9} .

³ 1 Mt = 1 millió tonna.

⁴ A természetes uránban található egy harmadik, az ^{234}U izotóp is. Energetikai jelentősége nincs, ezért figyelmen kívül hagyjuk.



1. ábra. A Ranger külszíni uránbánya Ausztráliában.

da, hogy csak olyan országok építettek ilyen dúsítóművet, amelyek elsősorban katonai célra használták azt: Egyesült Államok, Franciaország és Szovjetunió. Mikor még Kína és a Szovjetunió baráti viszonyban voltak egymással, Kína kapott egy ilyen berendezést, amit nyilván továbbfejlesztett, és maga is atomhatalommá vált. Miután ezek a hatalmak legyártották az általuk szükségesnek tartott nukleáris fegyvereket, a dúsítóberendezéseket átállították polgári célokra. A legtöbb fűtőelemgyár diffúziós dúsítóművekre alapozza termékeit. Így válik érthetővé, hogy kevés országban találunk fűtőelemgyárakat.

zömmel Amerikában, Európában és Indiában. Tekintve, hogy a tóriumot még nem kutatták meg olyan mértékben sem, mint az uránt, a reménybeli készletek ennek sokszorosát tehetik ki.

A hasadóanyag-készletek nagyságának megítéléséhez két döntő szempontot kell figyelembe vennünk: (1) milyen technológiát alkalmazunk és (2) mennyi uránt fogyasztott el a nukleáris korszak elmúlt 60 éve. A technológia dönti el, milyen mértékben hasznosítjuk az ^{238}U -ban és a ^{232}Th -ban rejlő energiát. Ha ugyanis ezt a technikailag lehetséges mértékben tesszük, akkor a jelenlegi technológiához képest százszor több energiát nyerünk ki a Földön található uránból. Mit teszünk ugyanis jelenleg? Az uránt kis mértékben, 3–4%-ra dúsítjuk, és a reaktorban moderátort (H_2O , D_2O , grafit stb.) alkalmazunk. A reaktorból kirakott *kiégett fűtőelemeket* újrafeldolgozás nélkül eltemetjük.

Az urándúsítás

A Föld uránkészleteinek tényleges mennyiségét csak úgy tudjuk felmérni, hogy meggondoljuk, mit jelent – természetesen csak témánk szempontjából – az urán dúsítása. A gyakorlatban minden ezzel kezdődik: a reaktorokba bevitt friss üzemanyag dúsított urán, vagyis a kibányászott természetes urán csak dúsítás után juthat a fűtőelemgyárba. A dúsításra több módszer is ismeretes. Történelmileg legelőször a diffúziós eljárást alkalmazták: az uránt UF_6 gázzá alakítják, majd szivacsos szerkezetű keramikus anyagokon diffundáltatják át. Mivel az ^{235}U -t tartalmazó molekula kisebb tömegénél fogva gyorsabban diffundál, a túloldalon ebben az izotópban dúsabb gázt kapunk. Mintegy *tízezer fokozat* után elérhetjük a kívánt dúsítást. Az eredmény lehet akár teljesen dúsított urán is, amelyben az ^{235}U izotóp részaránya megközelíti a 100%-ot. Ez a művelet rendkívül költséges, óriási berendezéseket igényel. Nem cso-

Vannak más technikák is. Az egyik a lézeres módszer: az UF_6 molekula ionizációs energiája függ az atommag tömegétől. Ezt az izotópeffektust kihasználva el lehet érni, hogy egy jól beállított lézergyár csak az egyik fajta molekulát ionizálja, miközben a másik semleges marad. Ezután a két izotóp elektromágneses úton szétválasztható egymástól. A közelmúltban több közép-hatalom megpróbálkozott ezzel, de nemzetközi nyomásra elálltak ettől. A másik technika a centrifugálásos eljárás: egy ultracentrifugában az ^{238}U -t tartalmazó molekula a centrifuga külső szélén, a másik a közepén dúsul fel. Több ezer centrifuga sorba kapcsolásával a kívánt dúsítás elérhető. Ezzel már a németek is megpróbálkoztak a II. világháború alatt, de napjainkban is folyhatnak ilyen próbálkozások. Bár mindegyik technika mögé konkrét országneveket tehetnénk, a súlyos politikai összefüggések miatt ettől eltekintünk.

Akármelyik módszert alkalmazzuk is, néhány általános összefüggést felállíthatunk. A dúsítóműnek két terméke van: a kívánt dúsított urán és a maradék szegényített urán. A két termék tömegének összege megegyezik az eredetileg bevitt természetes urán tömegével. Ennek alapján egyszerűen megbecsülhetjük a két termék mennyiségét. Egységnyi tömegű természetes uránból indulunk ki: 1 tonnában van 7,1 kg ^{235}U és 992,9 kg ^{238}U . Az elérendő dúsítást e -vel jelöljük.⁵ Ha a kapott dúsított urán tömege m , akkor benne a két izotóp tömege: em ^{235}U és $(1-e)m$ ^{238}U . Ugyanez a maradék szegényített uránban: $7,1-em$, illetve $992,2-(1-e)m$. Végeredményben a szegényített urán dúsítása⁶

$$e_{sz} = \frac{7,1 - em}{992,9 - (1 - e)m}$$

⁵ Az angol enrichment = dúsítás szóból.

⁶ Függetlenül attól, hogy a természetes urán 0,71%-os ^{235}U -tartalmánál dúsabb vagy szegényebb, a ^{235}U részarányát dúsításnak nevezzük.

Ez nyilván nem lehet negatív, tehát $m \leq 7,1/e$. Példaként tekintjük a paksi atomerőművet, amelyben az átlagos dúsítás 3,82%, vagyis $e = 0,0382$, azaz $m \leq 185,7$ kg. A maradék szegényített urán dúsítása általában nem zérus, hanem 0,1–0,2%, tehát a kinyerhető dúsított urán tömege kisebb. Például 0,2%-nál $m = 134,2$ kg, amint képletünkben egyszerűen kiszámíthatjuk. Témánk szempontjából fontos, hogy a maradék szegényített urán tömege 814 és 865 kg közé

esik. A kapott számokat könnyen meg is fordíthatjuk: ha 1 tonna dúsított uránt akarunk kapni, akkor – a maradék szegényített urán dúsításától függően – 5,39 és 7,45 tonna közötti tömegű természetes uránból kell kiindulnunk, vagyis a maradék urán tömege 4,39 és 6,45 tonna közé esik. Ezek a számok átvihetők a többi hasonló atomerőműre is, tehát általában kijelenthetjük, hogy a jelenlegi, kis dúsítású uránnal működő reaktorok üzemanyagának előállításakor a reaktorba bevitt urántömegnek mintegy ötszöröse keletkezik a dúsítóművekben maradék szegényített urán formájában.

A nukleáris fegyverekben vagy magasan (90%-ra vagy többre) dúsított uránt, illetve plutóniumot alkalmaznak. Az utóbbira később még visszatérünk. A fentiek mintájára megbecsüljük, hogy egy bomba gyártásához mennyi természetes uránra van szükség. Mivel most $e = 0,9$, egy tonna természetes uránból $7,1/0,9 = 7,9$ kg dúsított uránt lehet kapni. Egy bomba tömege ennek durván a kétszerese, tehát minden bomba legyártása 2 tonna természetes uránt igényel, és majdnem ugyanennyi szegényített urán marad vissza a dúsítóműben.

Az atomerőművek generációi

A ma működő atomerőművi reaktorok túlnyomó többségét a 2. generációhoz soroljuk. Az 1. generációt a prototípus és kísérleti reaktorok alkották, amelyek zömét már bezárták, miután megalapozták a sorozatban gyártott, *kereskedelmi reaktorok* technológiáját. Az előbbieket még gazdaságtalanok voltak, de az utóbbiak már versenyképesek az egyéb (szén-, olaj- stb. tüzelésű) erőművekkel. A 2. generációs erőművek túlnyomó többsége vízzel hűtött reaktorokkal működik. Legfontosabb biztonsági jellemzőjük, hogy bennük – kis valószínűséggel ugyan, de – előfordulhat súlyos baleset, ami az aktív zóna megolvadásához vezet. Ez a kis valószínűség kisebb, mint $10^{-5}/\text{év}$. Néhány reaktorban (például a szlovákiai Bohunicében, vagy a bulgáriai Kozlodujban) ez a szám nagyobb, de ezek kivételek, és már úgysem működnek sokáig. Az újabb épülő reaktorok a 3. generációhoz tartoznak,

| izotóp | friss | 1 év | 2 év | 3 év | 4 év |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ^{235}U | $8,5763 \cdot 10^{-4}$ | $6,3930 \cdot 10^{-4}$ | $4,7595 \cdot 10^{-4}$ | $3,3865 \cdot 10^{-4}$ | $2,3654 \cdot 10^{-4}$ |
| ^{238}U | $2,1299 \cdot 10^{-2}$ | $2,1147 \cdot 10^{-2}$ | $2,0984 \cdot 10^{-2}$ | $2,0792 \cdot 10^{-2}$ | $2,0590 \cdot 10^{-2}$ |
| ^{236}U | 0 | $4,2550 \cdot 10^{-5}$ | $7,3090 \cdot 10^{-5}$ | $9,6649 \cdot 10^{-5}$ | $1,1170 \cdot 10^{-4}$ |
| ^{239}Pu | 0 | $8,8890 \cdot 10^{-5}$ | $1,3343 \cdot 10^{-4}$ | $1,5874 \cdot 10^{-4}$ | $1,7106 \cdot 10^{-4}$ |
| ^{240}Pu | 0 | $1,1209 \cdot 10^{-5}$ | $2,7281 \cdot 10^{-5}$ | $4,3932 \cdot 10^{-5}$ | $5,7628 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{241}Pu | 0 | $4,5403 \cdot 10^{-6}$ | $1,6103 \cdot 10^{-5}$ | $2,9409 \cdot 10^{-5}$ | $4,0282 \cdot 10^{-5}$ |
| ^{242}Pu | 0 | $3,2233 \cdot 10^{-7}$ | $2,4516 \cdot 10^{-6}$ | $7,3480 \cdot 10^{-6}$ | $1,4133 \cdot 10^{-5}$ |

* Az izotópok magzsűrűségeit 10^{24} atom/cm³ egységekben adjuk meg.

amelyek ugyan hasonlóak a 2. generációsokhoz, de bennük gyakorlatilag kizárt a súlyos baleset. Végül a kutatás-fejlesztés fázisában vannak a 4. generációs reaktorok, amelyek teljesen új alapelveken nyugsznak. Némi szójátékkal a 3. generációt evolúciónak, a 4. generációt revolúciónak nevezhetjük. (Az eredeti francia szójáték jobban hangzik: évolutionnaire-révolutionnaire.) Vannak, akik a 4. generációt innovációs reaktoroknak nevezik. Szoktuk ezt a négy generációt a szakemberek tekintetében is emlegetni: az 1. generációt a nagyok (*Fermi, Wigner, Teller* és társaik) alkották, a 2. generáció tőlük tanulta a szakmát, de zömmel már nyugdíjban van (mint a jelen sorok írója is), a 3. generáció a derékhad az erőművekben, tervező- és kutatóintézetekben, biztonsági felügyeletknél, végül a 4. generáció doktori dolgozatát írja, vagy még egyetemi vizsgálataira készül.

Üzemanyagciklus, reprocessálás

A 4. generációra később még visszatérünk. Előbb megvizsgáljuk a ma működő, illetve épülő reaktorokat az urán hasznosítása szempontjából. A reaktorba bevitt friss fűtőelemek három-négy évet töltenek a reaktorban. Ezalatt az ^{235}U egy része elfogy: kisebb részben neutronbefogással ^{236}U -ná alakul át, nagyobb részben elhasad, és energiát termel. Az ^{238}U részben szintén hasad és energiát termel, nagyobb részben neutronbefogással ^{239}Pu -má alakul át. A plutóniumizotópok neutronbefogással egyre nehezebb izotóppokká alakulnak át, de hasadás révén energiát is termelnek. Az 1. táblázatban a paksi atomerőműre vonatkozó számításaink eredményét közöljük. A friss üzemanyag dúsítása 3,82%, a jelenlegi üzemvitel szerint négy évet tölt a reaktorban. A táblázatban évente megadjuk az egyes izotópok magzsűrűségeit.

Látjuk, hogy az ^{235}U mennyisége a negyedik év végére a kezdeti mennyiség 27,6%-ra csökkent. Az elfogyott 72,4%-ból 13,0% neutronbefogással ^{236}U -ná alakult át, a többi (59,4%) elhasadt. Témánk szempontjából fontos, hogy az ^{238}U mennyisége alig változott meg, vagyis a reaktorból kirakott, úgynevezett kiégett fűtőelemekben gyakorlatilag az eredeti urán-

mennyiség még megtalálható: az ^{238}U eredetileg bevitt atomjaiból mindössze 3,3% fogyott el. Ebből 0,1% hasadás, a többi neutronbefogás révén alakult át más atomokká. Az utóbbi rész (vagyis 3,2%) átalakult plutóniummá. Az urán energetikai hasznosítása szempontjából döntő jellemző a konverziós tényező:

$$C = \frac{\text{termelt Pu tömege}}{\text{elfogyott U tömege}}$$

Az 1. táblázat alapján ezt is könnyen kiszámíthatjuk, ha az elfogyott ^{235}U tömegével osztjuk a plutónium-izotópok össztömegét: $C = 0,4648$.⁷ A friss üzemanyagban még $C = 0,6$. A négy éves üzem alatt az ^{238}U magzsűrűsége $6,88 \cdot 10^{-4}$ -nel csökken neutronbefogás révén, viszont a plutóniumizotópok együttes magzsűrűsége mindössze $2,83 \cdot 10^{-4}$, tehát 41,1%, ami azt jelenti, hogy a keletkezett plutóniumatomok 59%-a még a kirakás előtt mindjárt el is hasadt.

A paksi atomerőmű jellegzetesnek tekinthető, tehát a fenti számokat a ma működő reaktorok mindegyikére érvényesnek vesszük. Tegyük fel, hogy a reaktorokból kirakott üzemanyagot újra feldolgozzuk (reprocesszáljuk), vagyis kivonjuk belőle a plutóniumot, azt természetes uránnal keverjük, majd az így gyártott fűtőelemeket visszavisszük a reaktorokba. Ha a Földön található urán teljes, a mai urán- és energiaárak mellett gazdaságosan kitermelhető mennyiségét M -mel jelöljük, akkor a reprocesszálás révén felhasználható M' mennyiségére felírhatjuk az $M' = M + M' C$ összefüggést,⁸ amiből

$$M' = \frac{M}{1 - C}$$

A fenti értékkel számolva ez azt jelenti, hogy a közvetlenül kibányászott hasadóanyagnak 1,87-szeresét tudjuk energiatermelésre használni. Ez nem sok, de megéri a fáradságot, hiszen majdnem egy kettes faktort nyerünk a hasznosítható urántömegben. Ezt a technológiát ma már alkalmazzák: ez a MOX⁹ fűtőelem, amely UO_2 és PuO_2 olyan arányú keverékéből áll, amely reaktorfizikai szempontból megfelel a 3,8% dúsítású uránnak. Ebben Franciaország jár az élen.

Kérdés azonban, nincs-e ennél jobb lehetőség. Persze, hogy van! Ha a víz helyett más moderátort használunk, a konverziós tényező jelentősen megnő. A hidrogén abszorpciós hatáskeresztmetszete termikus neutronokra 331 mbarn, tehát elég nagy. Ezzel szemben a ^{12}C izotópé 4 mbarn, sőt a deutériumé 1 mbarn. Emiatt a grafittal és nehézzvízzel moderált reaktorokban a kezdeti konverziós tényező 0,8, illetve 0,9. A teljes üzemanyagciklusra ezek a számok kisebbek, de még így is nyerhetünk egy hármast-négyest faktort a felhasználható hasadóanyag tekintetében. Csak mellékesen jegyezzük meg, hogy ez a nagy kon-

verziós tényező az oka annak, hogy a nukleáris fegyverekben található plutóniumot mindegyik atomhatalom grafitos reaktorokban gyártotta le.

Természetesen a legjobb lenne egy olyan technológia, amelynél a konverziós tényező 1-nél nagyobb, hiszen ezzel a teljes uránmennyiség hasadóvá tehető, és így a vizes reaktorokhoz képest 50–100-szor jobb uránhasznosítást érhetünk el. Ilyen tulajdonságú a gyors reaktor. Benne nincs moderátor, az üzemanyag dúsítása nagy, és ezért a láncreakciót nem termikus, hanem gyors neutronok tartják fenn. Az általuk kiváltott hasadásban jelentősen több másodlagos neutron keletkezik, ami végső soron lehetővé teszi, hogy $C > 1$ legyen. Egy ilyen reaktorban a természetes uránhoz 12–15% plutóniumot kevernek, és a reaktor aktív zónáját tiszta természetes uránnal veszik körül. Ezáltal eléri, hogy az aktív zónából kiszökő neutronok is plutóniumot termeljenek. Mivel nem lehet moderátor, a szokásos hűtőközegek (H_2O , D_2O) nem jönnek szóba, valami nagy tömegszámú, alacsony olvadáspontú anyagot kellett találni. Ilyen a nátrium és (újabb) az ólom. Nem mehetünk a részletekbe, de az Olvasó elképzelheti, milyen nehéz technológiáról van szó. Három országban működnek nátriumhűtésű gyors reaktorok: Franciaország, Japán és Oroszország.

E rész befejezéséül megnézzük, mennyi uránt igényel egy plutóniumbomba nyersanyaga. Az atombomba speciális összetételű plutóniumot igényel: a ^{239}Pu -hoz képest csak elhanyagolható mennyiségben tartalmazhat nagyobb tömegszámú plutóniumizotópokat, mert az utóbbiak spontán hasadása annyi neutronot termel, hogy a bomba a kellenél hamarabb robban fel, ami rontja a bomba hatóerejét. Ez a fegyvertisztaságú plutónium. Előállításához a reaktor kiegészése 700 MWnap/tonna körüli érték.¹⁰ 700 MWnap energia termelése 700 g urán hasadásával egyenértékű.¹¹ Mivel itt még nem jelentős a keletkezett plutónium hasadása, számolhatunk a grafitos reaktorok kezdeti konverziós tényezőjével, tehát $0,8 \times 700 \text{ g} = 0,56 \text{ kg}$ plutónium keletkezik. Egy bomba tömege körülbelül 15 kg, tehát egy bomba legyártásához igényelt természetes urán tömege $15/0,56 = 27$ tonna. Mikor a kirakott fűtőelemeket reprocesszálják, ezt az uránmennyiséget visszanyerik. Fentebb láttuk, hogy egy uránbomba 2 tonna természetes uránt igényel. Mivel a dúsítás maradéka szegényített urán, az már csak gyors reaktorban hasznosítható tovább. Ugyanakkor a reprocesszálás uránmaradékát gyakorlatilag természetes urán, ami még felhasználható grafitos reaktorban – természetesen további plutónium gyártására. Emiatt a létező bombák gyártásához ténylegesen felhasznált urán mennyisége nehezen becsülhető.

⁷ Az 1. táblázatban található magzsűrűségeket súlyozni kell az izotópok tömegszámával.

⁸ Itt elhanyagoljuk, hogy az urán-plutónium keverék-fűtőelemek konverziós tényezője egy kicsit más.

⁹ MOX = mixed oxide.

¹⁰ A hasadóanyag egységnyi tömegéből kinyert energiát kiégésnek nevezzük.

¹¹ Figyelembe véve, hogy a hasadásban 200 MeV energia keletkezik, könnyen levezethetjük, hogy 1 MWnap energia termeléséhez jó közelítéssel 1 g hasadóanyag elhasadása szükséges – függetlenül attól, hogy melyik hasadó izotópról van szó.

4. generációs atomerőművek

| típus | hőmérséklet | alkalmazás |
|--|-------------|---------------------------------------|
| 1 He-hűtésű gyors reaktor | 850 °C | villamos áram és hidrogén fejlesztése |
| 2 ólomhűtésű gyors reaktor | 550–800 °C | villamos áram és hidrogén fejlesztése |
| 3 sóolvadék reaktor | 700–800 °C | villamos áram és hidrogén fejlesztése |
| 4 nátriumhűtésű gyors reaktor | 550 °C | villamos áram fejlesztése |
| 5 kritikus pont feletti vízzel hűtött reaktor | 510–550 °C | villamos áram fejlesztése |
| 6 nagyon magas hőmérsékletű, gázhűtésű reaktor | 1000 °C | villamos áram és hidrogén fejlesztése |

rendelkezésünkre. Következtetés: várjunk, amíg kellően át nem gondoltuk a tennivalókat. Felszólította az államokat, hogy hasonlóan járjanak el. A németek, britek és mások „szót fogadtak”, de a már említett franciák, Japán és oroszok mentek tovább a maguk útján. Tény azonban, hogy egyik sem alkalmazza nagy léptékben a gyors reaktorokat.

Moratórium a gyors reaktorokra és a reprocesszálásra

Carter amerikai elnök 1977-ben moratóriumot rendelt el a gyors reaktorokra és a polgári célú reprocesszálásra. Ennek hosszú távon nagy hatása volt. Carter maga reaktormérnök volt, katonai korában tengeraltatójárok reaktoroperátorként szolgált, tehát jól értette, mit csinál. Korábban az Egyesült Államokban nagy léptékű fejlesztés folyt ezeken a területeken. 1951-ben például ott sikerült először villamos energiát előállítani egy gyors reaktorban (EBR-1). Cartert az atomfegyverek terjedésének veszélye aggasztotta. Mivel a gyors reaktorok üzemanyaga nagy dúsítású urán, illetve urán-plutónium keverék, fennáll a veszélye annak, hogy terroristák vagy ilyen szándékú államok törekedni fognak az üzemanyag megszerzésére. Ugyanilyen okból tekintette veszélyes helynek a reprocesszáló üzemeket is. Kijelentette: mivel ez a két technológia csak az uránhasznosítás javítása érdekében szükséges, nem sürget az idő ezek kifejlesztésére, hiszen urán bőségesen áll a

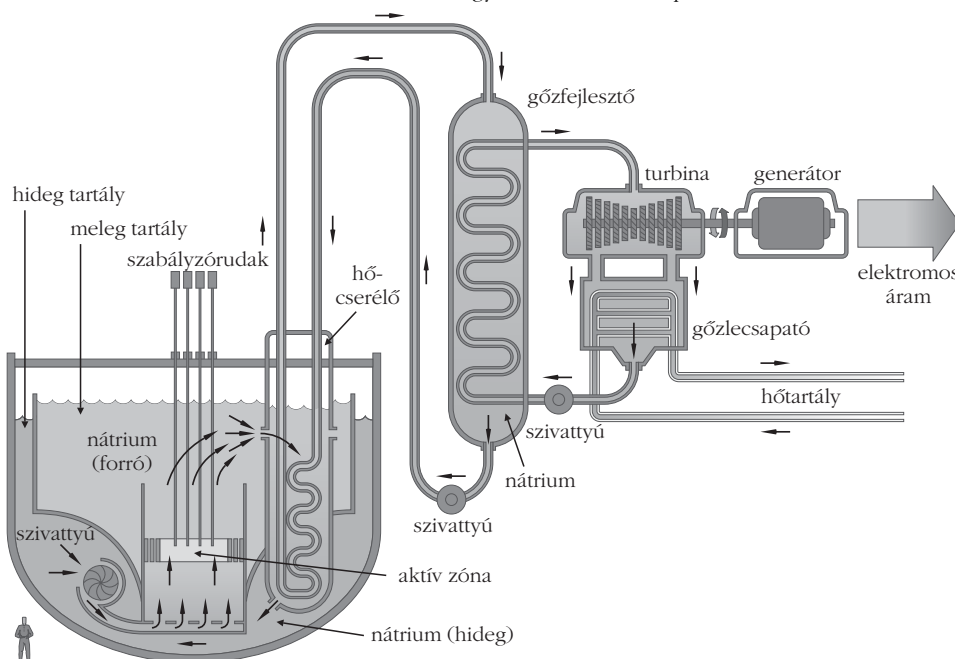
Az 1990-es években megváltozott az Egyesült Államok álláspontja. Mikor látták, hogy kezdenek lemaradni Európa és Japán mögött – amit az atomenergia területén nem tartanak a maguk számára megengedhetőnek – meghírdették a Generation IV programot a 4. generációs atomerőművek fejlesztésére. A programhoz csatlakozott néhány fejlett ország: Argentína, Brazília, Franciaország, Japán, Dél-Korea, Dél-Afrika, Kanada, Nagy-Britannia és Svájc, valamint maga az Európai Unió is.¹² A célkitűzések között hat reaktortípus kifejlesztése szerepel.

A 2. táblázatból látható, hogy közülük három típus is gyors reaktor, tehát az amerikai álláspont már több mint egy évtizede eltér a korábbi moratóriumtól. Hosszú távon fel fogják adni a polgári reprocesszálással szemben mutatott ellenséges felfogásukat is. Nem tartozik témánkhoz, ezért csak mellesleg hívjuk fel a figyelmet a hidrogén fejlesztésére. A végső cél hidrogént égető járművek bevezetése és ezzel a közlekedési eszközök CO₂-kibocsátásának csökkentése. A sóolvadék reaktorra a későbbiekben még visszatérünk. Egyelőre csak kutatás-fejlesztési munka folyik a program keretében, komoly pénztőke még nem áll a program mögött – legalábbis az Egyesült Államokban nem. Számítani lehet azonban arra, hogy a 2010-es évtized végén már épülnek kísérleti, esetleg prototípus rendszerek.

Kiegészítő fűtőelemek

A kiegészítő fűtőelemeket gyakran nagy aktivitású radioaktív hulladéknak tekintik, és eszerint bannak velük: reprocesszálás nélkül, véglegesen eltemetik valamilyen mély geológiai képződménybe. Fentebb láttuk, hogy az így elteme-

2. ábra. A nátriumhűtésű gyors reaktor elvi felépítése.



¹² Ezen keresztül tehát hazánk is részt vesz a programban.

tett fűtőelemekben még értékes anyagok találhatóak: a keletkezett plutónium, amely jó hasadóanyag, továbbá az eredetileg bevitt urán túlnyomó része, amely további plutóniummá konvertálható. Ebből következik, hogy azok az országok (több ilyen van), amelyek a kiégett fűtőelemek végleges eltemetésére rendezkednek be, óriási mennyiségű energiát hagynak veszendőbe menni. Ezért a legtöbb országban (házánk is közéjük tartozik) átmeneti tárolókat létesítenek (általában 50 évre), amivel időt kívánnak nyerni: remélhetőleg addigra általánossá válnak a gyors reaktorok és a reprocessálás, illetve egyéb technológiák fejlődnek ki, de – főleg – megváltozik a társadalmi környezet, vagyis az emberek nagy része megérti, hogy nem mondhatunk le az atomenergiáról.

A kiégett fűtőelemekben található energia kinyerésére jelenleg egyetlen kipróbált technológia létezik: a reprocessálás, majd a kinyert urán és plutónium további fűtőelemek gyártására való felhasználása. Természetesen ennek is megvannak a maga biztonsági problémái,¹³ de a gyakorlatban kipróbált, járható út. Léteznek azonban egyéb lehetőségek is, amelyeket transzmutáció néven szoktunk emlegetni. Közülük kettőt említünk meg: a sóolvadék reaktort és a gyorsítóval hajtott reaktort.

Az 1960-as években az Egyesült Államokban vizsgálták a *sóolvadék reaktort*. Ez azon alapult, hogy a LiF és BeF₂ sók olvadt keverékében oldódik a cirkónium,¹⁴ az UO₂ és a PuO₂. A kísérleti berendezés 1965-ben vált kritikusná, és másfél évig működött 7,4 MW hőteljesítményen, 650 °C-on. Az olvadékot keringették a reaktor és egy hőcserélő között, amelyben a hűtőközeg szintén LiF-BeF₂ sóolvadék volt. További hasonló berendezéseket is terveztek, de ezek végül nem épültek meg. A sóolvadék reaktor modernizált változatának rendeltetése az elhasznált nukleáris üzemanyag transzmutációja: benne a plutóniumot és a többi transzurán elemet teljesen elégetik, az uránt, cirkóniumot és a hasadási termékeket kivonják. Egy ilyen rendszer megvalósítása érdekében határozott lépések történtek. Az oroszok kísérletileg igazolták az egész folyamat megvalósíthatóságát. Mellettük különösen aktívak az EU egyes országai (különösen Franciaország), de jelentős eredményeket értek el a csehek is. Végeredményben az újrahasonosítható anyagok visszakerülnek az üzemanyagciklusba, a transzurán elemek megsemmisülnek, a radioaktív hulladékok pedig olyan anyaggá alakulnak át, hogy aktivitásuk egy-két emberöltő alatt a kiindulásul szolgáló urán aktivitásának szintjére csökken. Ezzel megvalósul a „szennyező fizet” elve, hiszen az a nemzedék tünteti el a hulladékokat, amely a termelt villamos energia hasznát élvezte (vagy bármi más módon hasznosította az uránt).

A kiégett fűtőelemek kezelésének szerényebb célja is lehet: nem kívánjuk a bennük rejlő energiát teljesen hasznosítani, de mindenképpen rövidebb felezési

idejűvé akarjuk őket átalakítani, amivel csökkenteni tudjuk a nagy aktivitású hulladék tárolási idejét. Ehhez elég belőlük egy szubkritikus reaktort összerakni, majd azt nagy neutronhozamú neutronforrással meghajtani. Ilyenek lehetnek a gyors reaktorok, de ebben a tekintetben a legígéretesebbek a *gyorsítóval hajtott reaktorok*. Az utóbbiakról ejtünk néhány szót, mivel a legtöbb neutron gyorsítóval lehet előállítani, ha néhányszor 100 MeV energiára gyorsított protonokkal nehézfém targetben (például ólomban) spallációs reakciót váltunk ki. Miután az 1980-as évek elején ez technikailag könnyen megvalósíthatóvá vált, felmerült, hogy ha a nagyaktivitású hulladékot ilyen eredetű neutronokkal besugározzuk, akkor ezek „megfiatalodnak”, vagyis újra felhasználhatóvá válnak. Sokáig – a többihez hasonlóan – ezt az ötletet sem vették komolyan. Az 1980-as évek második felében Los Alamosban készült egy megvalósíthatósági tanulmány, és ettől kezdve a dolog egyre életrevalóbbnak tűnt. A Los Alamosban kidolgozott elképzelés szerint a reaktor sokszorozási tényezője 0,95, tehát a neutronsokszorozás 20-szoros.¹⁵ Az így elérhető térfogati teljesítménysűrűségek körülbelül akkorák, mint egy atomerőműben. Ezek a feltételek alkalmasak arra, hogy a hosszú felezési idejű transzuránokat és a hasadási termékeket rövidebb felezési idejű izotópokká alakítsák át. A berendezés eközben termelhet 100 MW nagyságrendű teljesítményt is, miközben alkalmas tíz darab, egyenként 1000 MW teljesítményű atomerőmű nagyaktivitású hulladékainak a kezelésére. Természetesen az egész koncepció nem választható el az elhasznált üzemanyag reprocessálásától, ugyanis e nélkül a sokszorozási tényező kedvezőtlenül kis értékre csökkenne.

Becslés az eddig elhasznált uránra

A címben feltett kérdés megválaszolása érdekében megpróbáljuk felmérni, mennyi urán fogyhatott el a nukleáris korszak eddig eltelt 60 évében. Erre a nem kis bátorságot igénylő feladatra azért merünk vállalkozni, mert az uránkészletekre adott becslések is bizonytalanok. Alábbi becsléseink sem lesznek bizonytalanabbak. Természetesen igyekszünk az elfogyott urán tömegét felülbecsülni, nehogy az a vád érjen, hogy a valóságosnál rózsásabbra festjük a helyzetet. 2004-ben 442 erőművi reaktor működött összesen 357 GW teljesítménnyel. Biztosan felfelé tévedünk, ha abból indulunk ki, hogy az elmúlt 40 év alatt végig ekkora atomerőmű park működött.

Ismét a paksi atomerőmű példájából indulunk ki. Egy reaktor töltete 40 tonna UO₂. Mivel a reaktor villamos teljesítménye eredetileg 440 MW, újabban 500 MW, 1000 MW villamos teljesítményre (felfelé kerekítve) 100 tonna uránnal számolhatunk. Így a világon működő atomerőműpark teljes töltete 35700 tonna.

¹³ A jelenlegi technológia szerint a plutónium 5–6-nál többszöri visszatáplálása a reaktor instabilitásához vezethet. A részletek kifejtése egy újabb cikket igényelne.

¹⁴ A cirkónium a fűtőelemek burkolatának anyaga.

¹⁵ Ha egy szubkritikus reaktor sokszorozási tényezője k , akkor a reaktor a belőtt forrásneutronokat $1/(1-k)$ -szorosára sokszorozza.



3. ábra. Szovjet ellenőr vizsgál egy robbanófejtől megfosztott Tomahawk rakétát.

Egy kiszemelt fűtőelem eredetileg 3 évet töltött a reaktorban, de két évtizede a legtöbb helyen ezt 4 évre növelték. Így az elmúlt 40 évben elhasznált dúsított urán mennyisége $35\,700 \times 40/4 = 357\,000$ tonna. A dúsítás tárgyalásakor láttuk, hogy ennek mintegy 6-szorosa fogyott el a dúsításakor, vagyis a teljes elfogyott uránmennyiség 2,1 Mt-ra becsülhető. A dúsítóművekből származó maradéka 1,8 Mt szegényített urán.

Lényegesen nehezebb számba venni a nukleáris fegyverek gyártásához felhasznált mennyiséget. Tudjuk, hogy a két szuperhatalom tizenkét-tizenkét ezer nukleáris robbanófejjel rendelkezik. A további atomhatalmak (Kína, Franciaország, Nagy-Britannia stb.) fegyvereit is figyelembe véve 25–30 ezer robbanófejjel kell számolnunk. A harcászati atomfegyverek száma ezt messze harminc-negyvenezer fölé viszi. Mindegyikben 15 kg körüli hasadóanyag (urán vagy plutónium) van. Ha az egészet uránnak vesszük, akkor használhatjuk fenti becslésünket: bombánként 2 tonna uránnal a 30 ezer robbanófejre vonatkozóan 50 ezer tonnát kapunk. Plutóniumbombák esetében ez több lehet, ezért jobb, ha 100 ezer tonnával számolunk. Vannak még a harcászati fegyverek, továbbá az atomhatalmak tárolnak bizonyos mennyiségű nagy dúsítású uránt, illetve fegyvertisztaságú plutóniumot, hogy szükség esetén gyorsan legyárthassanak újabb robbanófejeket. Nyilvánvaló, hogy ennek tömege katonai titok. Aligha lehet azonban több, mint a már meglévő robbanófejekben található mennyiség. Itt jegyezzük meg, hogy a *Népszabadság* idézett cikkének megfogalmazásával szemben nem a szovjet atomfegyverekből kivett uránt égettek el amerikai reaktorokban. Arról van szó, hogy az amerikai–oroszfegyverzetkorlátozási tárgyalásokon kiderült, hogy az oroszok lényegesen több tartalék uránt halmoztak fel, mint az amerikaiak. Az egyensúly helyreállításához kellett a többletet elégetni. Az amerikaiak építettek egy külön üzemet, amelyben ezt az uránt reaktor-fűtőelemekké konvertálják, majd reaktorokban elégetik. Témánkra visszatérve levonhatjuk azt a következtetést, hogy az atomfegyverekhez aligha használhattak fel 200 ezer tonna uránnál többet. Ha ezt hozzávesszük az atomerőművek 2,1 Mt-jához, 2,3 Mt alatt maradunk. Ezt azt jelenti, hogy még a jelenlegi, az

uránnal pazarló technológia mellett is korai az uránkészletek kimerüléséről beszélni. Fent ugyanis azt láttuk, hogy a készlet legalább 10 Mt.

Még nem szóltunk a kutatóreaktorokról, amelyek nem energiatermelésre, hanem különböző (magfizikai, kémiai, szilárdtest-fizikai, anyagvizsgálati stb.) kutatások céljaira termelik a neutronokat. Számuk kezdetben nagy volt (500 felett), de az utóbbi évtizedekben egy részüket leszerelték. Erősen dúsított uránnal működnek. Mivel töltetük kicsi, uránfogyasztásuk számottevően nem módosítja a fenti becslést.

Mit tehetünk a jövőben?

A jövőben több úton járhatunk. Mindenekelőtt nyitva áll a járt út, vagyis tovább pazarolhatjuk az uránt az eddigi technológiával. Még így is el tudjuk látni az atomerőműveket üzemanyaggal addig, amikor a kőolajkészletek már gyakorlatilag kimerülnek. Ez a 21. század nagy részét jelenti. Nem lenne azonban szerencsés ezt az utat járni.

A jelenlegi atomerőművi technológia mellett a nukleáris üzemanyagnak csak elenyésző részét aknázzuk ki energiatermelésre. Az eddig elhasznált 2,3 millió tonna uránból – bármily hihetetlen – mindössze 12–14 ezer tonna urán hasadt el, vagyis a Földön talált urán még gyakorlatilag teljes egészében megvan. Milyen formában? Több millió tonna eredeti, még kibányászandó állapotban, 0,36 millió tonna kiegészítő üzemanyag formájában, a többi szegényített uránként, mint az urándúsítók maradéka. Az utóbbi túlnyomó többsége három országban található: USA, Oroszország és Franciaország. A franciák becslése szerint a náluk levő mennyiség 2000 évig lenne képes fedezni Európa teljes uránszükségletét. Fontos szempont, hogy ezt a részt már nem kell bányászni, nem kell szállítani, hiszen fűtőelemgyártásra kész állapotban tárolják. Természetesen ehhez át kell térni a gyors reaktorok technológiájára, ami már folyik, de a közeli jövőben várhatóan fel fog élénkülni. Eddig csak az uránról beszéltünk. Tudjuk, hogy a Földön háromszor annyi tórium található, mint urán, és szintén kitűnő nukleáris üzemanyag.

Ezen túlmenően – a reprocessálás mellett – nagyon üdvös lenne a kiegészítő fűtőelemek transzmutációja, mert ez egyszerűsíti a nukleáris hulladékok problémáját. Bár nem ilyen léptékben járul hozzá az energiatermeléshez, de nagyon itt lenne az ideje a felhalmozott nukleáris fegyverek részleges leszerelésének is, amivel a szuperhatalmak évtizedek óta hitegetik az emberiséget. A fegyverekben található hasadóanyagot reaktorokban minél hamarabb el kellene égetni. Tévedés azt állítani, hogy ez az urán „másodlagos” hasznosítása: mind a transzmutáció, mind a fegyverek hasadóanyagának konverziója olyan művelet, amely mindannyiunk érdekét szolgálja.

Összefoglalva: urán és tórium elegendő mennyiségben van a Földön, ezek ezeréves időtávon rendelkezésre álló energiahordozók. Az emberiség nyilván addig fog rájuk támaszkodni, ameddig szükségesnek ítéli, vagyis amíg nem talál másik, kedvezőbb energiahordozót.

AKTUÁLIS KUTATÁSI TÉMÁK A TERMÉSZETTUDOMÁNYOKBAN

Berényi Dénes
ATOMKI, Debrecen

Jól tudjuk, hogy a természettudomány megszületése óta sikereit jó részben annak köszönheti, hogy a kutatások során figyelmét bizonyos jól körülhatárolt jelenségekre irányítja – mondhatjuk – korlátozza. Ez az egyes kutatókra is érvényes. Ezt már sokan, sokféleképpen megfogalmazták. Így *Németh László* szerint: „A tudomány ... lassú, módszeres haladást kíván – a tudósnak le kell mondania a részletekért az egészlől.” A Nobel-díjas *John C. Polányi* megfogalmazása hasonló: „A tudomány sikere részben látókörének szűkítéséből ered.”

Teljesen érhető tehát, hogy korunk fizikusa is szűkebb területekre összpontosít. A fizikában nemcsak az újabb és újabb tudományterületek különülnek el, de ezeken belül is az egyes kutatók, kutatócsoportok energiájukat egy-egy jól körülhatárolt jelenség, jelenségkör tisztázása érdekében koncentrálnak. Fiatalkutatók esetében sem lenne szerencsés, ha elvesznének egy-egy széles tudományterület eredményeinek, tudásanyagának megtanulásában valamilyen jól meghatározott jelenség kreatív tanulmányozása, pontosabban: kutatása helyett.

Ugyanakkor nagyon fontos, hogy a kutatási témákat megfelelő látókörrrel válasszuk ki. Tehát időnként, a tudományos pálya egyes szakaszain érdemes „megállni” egy kicsit és „széjjelnézni”, hogy hogyan és hol is állunk a természet megismerésében, melyek a fizikában és a természettudomány egészében a megoldatlan, kutatásra váró problémák. Azt természetesen senki sem tudja megjósolni, hogy az ezekre vonatkozó kutatásokban hol és milyen „átütő”, szemléletformáló eredmények fognak születni.

Afelől manapság már nemigen lehet senkinek kétsége, hogy korunkban nem vagyunk sem „az emberi tudás csúcán”, sem a „tudomány végén”, bár ez az elképzelés szinte minden kor kísértése volt az ókortól a középkoron keresztül a legújabb korig. A neves történész *J. Barzun* írja például, hogy „...a 18. század is végtelenül biztos volt abban, hogy birtokolja a tudás teljességét”. A 20. század nyolcvanas éveiben *Stephen Hawking* gondolta úgy, hogy a fizikai kutatás a lényegyet tekintve hamarosan a végéhez ér (nem először merült fel ez a fizika történetében). Ezt a nézetét később azután visszavonta. „Csúcspontról” meg éppen nem lehet szó, *Maddox* szerint, aki hosszú időn keresztül a híres *Nature* folyóirat szerkesztője volt: „A kopernikuszi elv érvényes a felfedezések történetére is; miként is képzelhetjük, hogy a tudomány a huszadik században érte el csúcspontját.”

Kolozsváron a szerző Babeş–Bolyai Tudományegyetemen történeti tiszteletbeli doktortá avatásához kapcsolódóan fizikusok számára rendezett kerekasztal-beszélgetés bevezető előadásának magyar nyelvű, módosított változata.

Felmerülhet a kérdés, hogy a fizikusnak miért kell, vagy legalábbis érdemes messzebb, a fizika körein túl – a természettudomány egészére – néznie, a megoldatlan kérdések, az időszerű kutatási témák áttekintése során. Erre több oka is van. Annak ellenére, hogy „...a fizika szót arra tartjuk fenn ..., hogy vele a természettudomány magját jelöljük ...” (*Carl Friedrich von Weizsäcker*), a fizika törvényei az egész, így az élő természetben is érvényesek. „A tudományok ellentmondásmentes beágyazási rendszerében a fizika kétségtelenül az alap...” (*Konrad Lorenz*). Ma már nyilvánvaló, amit *Francis Crick*, a DNS szerkezetének egyik felfedezője állapított meg, „...hogy a biológia számos alapvető problémáját csupán a fizika és a kémia precíz gondolkodásának és módszereinek segítségével lehet megoldani”. Sőt, ezen túlmenően: „A modern hozzáállásnak új eleme továbbá, hogy *minden*¹ jelenség – a Világegyetem létezésé, az élet ténye a Földön, az agy működése – fizikai magyarázatot követel” (*John Maddox*).

A fenti elvi jellegű megfontolásokon túl, főleg kis országok kutatói esetében² még az is lényeges, hogy az aktuális kutatási feladatok megoldásában általában együttműködésre van szükség: nemzetközi vagy kutatási területek közötti interdiszciplináris együttműködésre – esetleg mindkettőre.

Aktuális kutatási területek a természet kutatásában

Ahogy a természettudományokat, úgy a természet kutatásában megoldásra váró feladatokat is többféleképpen lehet osztályozni. Itt azt a módszert választottuk, hogy a kutatási témákat három nagy csoportban foglaljuk össze, ezek: a mikrovilág, a makrovilág és a „köztes” jelenségek kérdéskörei. Természetesen nem lehet köztük éles határt vonni, vannak kérdések, amelyek akár egyik, akár másik csoportba is besorolhatók lennének. Másrészt a kifejezett alkalmazásokra nem térünk ki, bár természetesen nem egy területen komoly átfedés van a kifejezetten alap- és alkalmazott kutatások között. Végül megjegyezzük, hogy az egyes csoportokban lényegében csak egy listát állítottunk össze, azaz az aktuális kutatási problémák felsorolásáról van szó. Ezek mindegyikéről külön tanulmányokat lehetne írni. Mondanom sem kell, hogy a szóban

¹ Kiemelés tőlem (B.D.).

² Megjegyezzük, hogy napjainkban nemcsak a részecskefizikában vagy a fúziókutatásokban, hanem számos más kutatási területen, például a csillagászatban, az űrkutatásban, az oceanográfiában, a meteorológiában még a legnagyobb államok is „kicsiknek” tekinthetők, mert nekik is nemzetközi összefogásra van szükségük a megfelelő kutatási feladatok megoldására.

forgó felsorolások nem tartanak igényt a teljességre és természetesen bizonyos személyes vonásokat is hordozhatnak. Végül jegyezzük meg, hogy minden tájékozódás és objektivitásra törekvés mellett elkerülhetetlenül egy fizikus szempontjait tükrözik.

Mikrovilág

A szót tulajdonképpen idézőjelbe lehetne tenni, mert valójában az atomi és a szubatomi jelenségekről van szó, amelyek a „mikronnál nagyságrendekkel kisebb” tartományban játszódnak le. Íme egy csokor a kutandó problémákból:

– *A kvantummechanika értelmezési kérdései.* Ezek közel egy évszázad után sem zárultak le, folynak az erre vonatkozó kísérletek és viták a mélyreható elméleti megfontolások mellett.

– *A részecskék összekapcsolódási (entanglement) problémái.* Ha két elemi részecske egyszer kapcsolatban volt, egymástól eltávolodva is kapcsolatban marad. A jelenség részleteit máig sem sikerült még tisztázni.

– *A Higgs-bozon kimutatása.* Ezen részecske létezésének bizonyítása alapvető fontosságú a részecskefizikai Standard modell szempontjából, a többi elemi részecske tömegének megmagyarázásához elengedhetetlen.

– *A szuperszimmetrikus részecskék felfedezése.* Elméletileg meglehetősen kidolgozott terület, eddig minden kísérleti bizonyíték nélkül.

– *A kvantum-gravitáció elméletének megalkotása.* Mindaddig nem sikerült a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet összeegyeztetése, egységes elméletté formálása.

– *Az alapvető kölcsönhatások egységesítése.* Folyan az erőfeszítések a természet alapvető kölcsönhatásainak egybefoglalására.

– *A kvark-gluon plazma.* Elméleti jóslatok szerint nagy energiájú nehézion-ütközésekben várható keletkezése, de eddig kísérletileg ténylegesen nem sikerült kimutatni, csak rámutató jelzések vannak.

– *Exotikus atommagok.* Számos megvalósulásuk lehetséges, amikor egyes nukleonokat más barionokkal helyettesítünk, és kutatásuk még egyáltalán nincs kimerítve.

– *Dinamikus atomi és molekuláris fizika.* Az atomfizikának ebben az ágában az atomok és molekulák ütközése során tapasztalható viselkedésüket tanulmányozzuk.

Ha végignézzük a fenti témák sorát, nyilvánvaló, hogy mind a fizika területéhez tartoznak, annak is csak bizonyos ágaihoz.

Makrovilág

Az ide csoportosítható témák területe már sokkal szélesebb, helyet kap benne a csillagászat (annak különböző ágai), az asztrofizika, a kozmokémia, az űrkutatás.

– *Az Ősrobbanás kutatása.* Bár az Ősrobbanás ténye ma már megbízható és nagy pontosságú megfigyeléseken alapul, a részletekre vonatkozóan még sok a tisztázni való.

– *Gravitációs hullámok.* Közvetlen észlelésük eddig nem sikerült, vizsgálatuk közvetlenül az Ősrobbanás utáni Világegyetem állapotáról adhat ismeretet.

– *A Világegyetem szerkezete.* Kutatások folynak a galaxisok Univerzumon belüli elhelyezkedésének, csoportosulásainak megállapítására.

– *Sötét anyag és energia a Világmindenségben.* Az előbbit már régen kutatják, az utóbbit csak egy évtizede, de lényegében csak létezésük igazolása sikerült.

– *Exobolygók az utóbbi évtized egyik nagy felfedezését jelentik.* Föld-szerű bolygók kimutatása jelenleg a legfontosabb célkitűzés.

– *Nukleáris asztrofizika.* Az atommagjelenségek fontossága a csillagok belsejében jól ismert, de a részletekre vonatkozóan sok a tisztázni való.

– *Naprendszerünk bolygóinak kutatása* főleg űrszondákkal és automatikus kutató műszerekkel történik.

– *A fekete lyukak vizsgálata.* A rájuk vonatkozó elméleti megfontolások elég régi múltra tekintenek vissza, a megfigyelésükkel kapcsolatos problémák azonban még egyáltalán nem tekinthetők lezártaknak.

„Köztes” jelenségek

Ez az a gazdag kutatási terület, amelyik se a mikrovilághoz, se a makrovilághoz nem tartozik. Ide számíthatjuk a fizika bizonyos területeitől kezdve (pl. szilárdtestfizika, felületfizika stb.) a biológia különböző ágaival, de ide tartozónak tekintjük a Földre, az óceánokra vagy a légkörre vonatkozó kutatásokat is.

– *A Föld mélységi folyamatainak kutatása* távolról se zárult le, számos megoldandó problémát rejt (pl. földrengések kutatása).

– *A Föld felszíni jelenségeinek kutatása,* beleértve például az oceanográfiát is.

– *A klíma és klímaváltozás jelenségei* – különösen a globális felmelegedéssel kapcsolatban – az érdeklődés előterében állnak.

– *A nem-lineáris jelenségek* – beleértve a káoszt – széles körben jelen vannak a természetben, és ismereteink ezekre a jelenségekre vonatkozólag távolról sem tekinthetők lezártaknak.

– *A kollektív jelenségek* – az atomok világától a biológián keresztül a társadalmi jelenségekig – megértése további intenzív kutatást igényel.

– *A felületi jelenségek* a legkülönbözőbb területen nagy fontosságúak, és további széleskörű kutatást igényelnek.

– *A nano-szerkezetek* és egyáltalán a nano-méretben lezajló jelenségek megismerése érdekében ma különösen nagy jelentőségű kutatások folynak.

– *A kvantum-számítógépek elméleti és kísérleti kutatása,* bár a „mikrovilágban” gyökerezik, a jövő számítógép-generációinak alapját képezheti.

– *Az intelligens robotok kutatása* számos más területtel kapcsolódik össze, de elsősorban az agykutatással.

– *A molekuláris elektronikus áramkörök* az elektronika és a számítástechnika jövőbe mutató irányát képviselik.

– *A bioelektronikus jelenségek* az összekötő kapcsolatot jelentik az elektronika és a biológia között.

– *A genetika, a genomkutatás* az utóbbi egy-két évtizedben különösen előtérbe került, de még távolról sincs befejezve.

– *Az összejtudomány* mind a természet megismerése, mind a gyakorlat szempontjából kitüntetett fontosságú.

– *Az agy és az idegrendszer természete és működése* nagyarányú interdiszciplináris együttműködés keretében folyik.

– *Az emberi lények viselkedésének sokirányú kutatása* tulajdonképpen az összekötő kapocs a természet- és a társadalomtudományok között.

Következtetések

Ha végigtekintjük az aktuális témákat, tulajdonképpen csaknem mindegyiknél felfedezhetjük, hogy művelésükhöz, megvalósításukhoz sok kutató együttműködésére, bonyolult kutatási kapcsolatok kiépítésére van szükség. A nagyberendezéseket: részecskegyorsítókat, teleszkópokat stb. igénylő kutatások legtöbbször nemzetközi kooperációt, és ezen belül számos technika és szakember együttműködését igénylik.

A nem nagyberendezéssel végzendő aktuális, korszerű kutatások általában komplexitásukkal, bonyolultságukkal tűnnek ki, ami legtöbbször több tudományág együttműködését igényli.

A jövő kutatásában tehát még az eddigieknél is fontosabb szerepe lesz a tudományos együttműködéseknek, közös kutatásoknak, a tudományos kapcsolatoknak.

A jövőben ezek szerint elkerülhetetlen lesz az is, hogy ezt a szempontot a tudományos fokozatok megadásánál figyelembe vegyék.

Irodalom

Az emberiség megoldatlan rejtélyei – Hol tart a tudomány? (főszerk. Bedi A.) Reader's Digest Kiadó, Budapest, 2004.

P. Davis: *Az ötödik csoda*. Vince Kiadó, Budapest, 2000.

E. Szabó L.: *A nyitott jövő problémája*. Typotex Kiadó, Budapest, 2002.

Huszonegy tudós a 21. századról. (szerk. Erdélyi A.) Tertia Kiadó, Budapest, 1999.

A következő ötven év. (szerk. J. Brockman) Vince Kiadó, Budapest, 2003.

J. Gribbin: *A tudomány története*. Akkord Kiadó, Budapest, 2004.

J. Maddox: *Ami a tudományban felfedezésre vár*. Vince Kiadó, Budapest, 2000.

J. Maddox: A felfedezések hömpölygő folyamata. *Természet Világa* 131 (2000) 98.

Tizenkét tudós a 21. századról. (főszerk. Szemenyei I.) Tinta Kiadó, Budapest, 2009.

A FIZIKA TANÍTÁSA

ANALÓGIÁK A FIZIKÁBAN ÉS SZEREPÜK A FIZIKA OKTATÁSÁBAN

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

Írásunk első, bevezető részében általánosságban foglalkozunk az analógiával és a gondolkodásban, a megismerésben betöltött szerepével. Ezt követően bemutatunk néhány példát a fizika történetéből, majd az analógia fizika oktatásában betöltött szerepére koncentrálunk sok érdekes példa felhasználásával.

Az eredeti görög *αναλογισ* kifejezés számok közötti viszonyt, összemérhetőséget, arányt jelentett. *Eukleidész* V. könyve a viszonyok hasonlóságaként értelmezi: „az arányosság” (*αναλογια*), „az arányok hasonlósága” olvasható a definíciók közt.

Az emberi gondolkodás alapvetően analógiás típusú, minden, számára új jelenséget már ismert kognitív struktúrákkal való analógia alapján ragad meg. Ez az a gondolkodásforma, amely a legjobban áthatja a megismerés más területeit, segíti a megértést, a fogalomelsajátítást és a problémamegoldást.

Két rendszer analóg, ha megfelelő részeik világosan megfogalmazható kapcsolataikban megegyeznek. Az analógiák előfordulnak a mindennapi gondolko-

dásban, a gondolkodás és a magyarázat eszközei, segítik a problémamegoldást, az új helyzet megértését a tanulásban és a tudományos felfedezésekben.

Az analógiával való gondolkodás a meglévő tudás felelevenítéséből áll, azért, hogy megértsük a számunkra ismeretlen, új információkat. Az analógia az emberi gondolkodás alapját képező mechanizmusok egyike. Minden értelmi cselekvés analógiás gondolkodást foglal magában, az analógia a kognitív képesség alapja, és az analógiás gondolkodás az intelligencia egyik fontos jellemzője. Az analógiák segítik az információk összekapcsolását és ezzel az átfogó, integrált tudásstruktúrák kiépítését [1].

A tudományban analógiát használunk akkor, amikor új hipotéziseket alkotunk, és amikor új tudományos közléseket vitatunk meg. Az analógiáknak nagy szerepe volt több fizikai jellegű felismerés létrejöttében. Írásunk következő részében a fizika történetéből keresünk példákat az analógiák alkalmazására. A klasszikus fizika megalkotói számos példát mutattak erre.

– *Galilei* a Föld és a hajó mozgásának analógiájával magyarázta a relativitás elvét.

– *Kepler* szinte vallomásszerűen kinyilvánította, hogy „különösen szeretem a hasonlóságot, a természet titkainak legfőbb tanítóját”. Igaz, egyes analógiái ma már mosolyt fakasztanak, mint például az, hogy „a bolygók saját mozgásra képesek, mint az élőlények, tehát lelkük van”.

– *Descartes* az élőlényeket is mechanikai (gép) analógiával magyarázta (pl. az idegek kötelek, amelyek „harangot” szólaltatnak meg).

– *Newton* vizsgálatait arra a felismerésre alapozta, hogy „a természet hasonló jelenségeinek hasonló okai vannak”. Korának optikája két egymással ellentétes analógiára, a fény és a testek, illetve a fény és a hang hasonlatosságára épült.

– Gyakran használták a folyadékáramlás szemléletességét. Ennek analógiájára magyarázta *Ohm* az elektromos áramot, *Fourier* a hőáramot. A különféle „fluidumok” elmélete hosszú időn keresztül uralta a természettudományokat.

– *Maxwell* már tudatában volt a folyadékáram és az elektromos áram különbözőségének és előbbi csak az utóbbi szemléltetésére használta. Egyértelműen kijelentette, hogy „fizikai analógián két tudományterület törvényei közötti olyan részleges (!!!) hasonlóságot értek, amelynek alapján az egyik a másiknak illusztrációja lesz”.

Az utóbbi évszázad során a természettudomány minden területén alapulvált az analógiák, a különféle jelenségek közös törvényeinek kutatása. Egységes elmélettel magyarázhatók a különféle rezgések, legyen az elektromágneses hullám vagy a hang terjedése, de akár valamely gép rezgése. A statisztikus fizika módszerei alkalmazhatók különféle (nagy elemszámú, nem feltétlenül fizikai) rendszerek leírására is. Néhány éve a fizikai analógiák a biológiai evolúció modellezésében is segítenek.

A tudomány nemcsak felhasználja az analógiákat, hanem foglalkozik a jelenségek hasonlósági feltételének megfogalmazásával is.

– *Fourier* (1822) hívta fel a figyelmet arra, hogy a fizikai jelenségeket leíró egyenletek tagjai azonos dimenziójúak (dimenzionális homogenitás).

– *Bertrand* (1878) kimutatta, hogy a fizikai egyenletek dimenzionális homogenitása lehetővé teszi a fizikai változók közötti matematikai kapcsolat előállítását, a változókból alkotott dimenzió nélküli hatványszorzatok alakjában.

A modellek is az analógia egyik fajtájának tekinthetők. A tudományos modell utánozza, szimulálja a vizsgált rendszer viselkedését. A modell és a modellezett rendszer működésbeli azonossága egyszerűsítéseken, hasonlóságokon alapszik, és a modellezett bonyolult rendszer magyarázatára, valamint működésének kiszámítására, megjóslására használjuk. A tudományos elméletek lényegüket illetően mindig ilyen modellek.

A természeti *törvények*, *igazságok* az ember alkotásai, nem a külső valóság létezői, amelyek felfedezésre

várnak, hanem modellek, olyan emberi konstrukciók, amelyek működtetve képesek a természet egy korlátozott területén néhány jelenség lezajlásának korlátozott magyarázatára, jövőbeli történések bizonyos valószínűségű predikciójára, megjóslására. A modelleknek elsősorban gyakorlati hasznuk van, ez lehet egy jó hajózási térkép, vagy csupán értelmes magyarázat arról, hogy a Nap valószínűleg holnap is felkel [2].

A modell olyan gondolati struktúra, amellyel a természeti jelenségek egy jól körülhatárolt csoportját a tapasztalat segítségével úgy írjuk le – sokszor matematikailag –, hogy minden a vizsgált probléma szempontjából lényegtelen hatást elhanyagolunk. Például a *Galilei* által vizsgált szabadesésnél eltekinünk a légellenállás hatásától. A matematika nyelvén mindig csak a modellel adott természeti jelenség tárgyalható. Ebben az esetben ez a szabadesés, amely a négyzetes úttörvény egyik ismert esete, amikor $s = gt^2/2$. A természet bonyolultsága így egyetlen lépésben nem ragadható meg. A modellek finomításával, amely a legtöbb esetben a matematika egyre erősebb bevonását is jelenti, a természetleírás egyre pontosabb lesz. A kvantitatív magyarázat azonban egyúttal *jóslási* lehetőséget is ad. Ez azt jelenti, hogy a jelenséget nemcsak hogy megmagyarázzuk, hanem adott fizikai helyzetben az eredményt előre ki is tudjuk számítani. Jelen példánkban egy adott időtartam alatt megtett utat.

Érdekes az $1/r^2$ -es távolságfüggés megjelenése több esetben, amikor a testek pontszerűnek tekinthetők, mint például a *Newton* féle gravitációs törvény, a *Coulomb*-törvény, a gyertyafény intenzitásának változása stb. Az egyszerű geometriai magyarázatához, szemléltetéshez vezessünk be bármilyen erővonalrendszert, amelyeket a pontszerű forrásból indítjuk adott számban, majd különböző r távolságokban vizsgáljuk azt, hogy egységnyi felületen hány megy keresztül, amelyet a tér erősségének feleltetünk meg. Világos, hogyha például különböző sugarú, koncentrikus gömbökkel vesszük körül a pontszerűnek tekintett töltést (tömeget), amely a gömbök középpontjában van, akkor a távolság növekedésével csökken az egységnyi felületen átmenő erővonalak száma. Mivel a gömb felszíne $4\pi r^2$ alapján számolható, vagyis négyzetesen nő, tehát az egységnyi felületen átmenő erővonalak számának ilyen arányban kell csökkennie. A történet szerint *Coulomb* valójában nem is mérte ki pontosan erőtvényét, egyszerűen a fenti gondolatmenetre alapozva írta fel.

Analógiás kérdésfeltevés vezette *Becquerel* is a radioaktivitás jelenségének felfedezéséhez, amely a következő volt: vajon nem lehetséges-e, hogy napfény hatására minden fluoreszcens anyagból röntgensugárzáshoz hasonló sugárzás indul ki?

Ezért kezdte el *Becquerel* vizsgálni az uránsókat, és kitenni azokat a napra. Az már más kérdés, hogy ez nem igazolódott be, hanem egy teljesen új tudományterület kialakulásához vezetett.

Nézzünk kissé bonyolultabb esetet, amikor a mezőt kialakító mennyiségeket egy egyenes mentén rendez-

zük el, miként alakul az általuk kialakított mező, amelyet úgy kaphatunk meg, hogy a sok-sok pontszerű töltés, illetve „áramelem-vektor” által kialakított térerősséget összegezzük.

Töltött egyenes vezető által kialakított elektromos mező: vegyük körül a σ töltéssűrűségű vezetődarabot l hosszúságban és r távolságban egy hengerrel!

$$\oint E dA = \frac{1}{\epsilon} \int \sigma dV,$$

$$E 2 \pi r l = \frac{1}{\epsilon} \sigma l, \text{ ahonnan}$$

$$E = \frac{\sigma}{2 \pi \epsilon r}.$$

Áramjárta egyenes vezető mágneses tere: a vezetőkben folyó áram erőssége I , és az r távolságban a mágneses indukció értéke a gerjesztési törvény alkalmazásával:

$$\oint B ds = \mu \sum I,$$

$$B 2 \pi r = \mu I, \text{ ahonnan}$$

$$B = \frac{\mu I}{2 \pi r}.$$

Mindkét esetben $1/r$ -es távolságfüggés adódik. Az egyik esetben a sok, pontszerűnek vélt elemi töltés által kialakított elektromos mező, míg a másik esetben a sok, szintén pontszerűnek tekinthető áramelem-vektor által kialakított mágneses mező esetében azonos a távolságfüggés. A mező szerkezete természetesen más. Az elektromos erővonalak az elektromosan töltött vezetőre merőlegesek, irányításuk a töltés előjelétől függ. Ezzel szemben a mágneses indukcióvonalak körkörös szerkezetűnek képzelhetők.

Az elektromos és a hőtani jelenségek megértése közel azonos időszakban kezdődött el. Mindkét esetben valamilyen áramló fluidumot képzeltek hozzá. Ezen elképzelés maradványa az, hogy mind a töltés, mind pedig a hő jelölésére a Q betűt használjuk napjainkban is.

Valójában ennél mélyebbre is tekinthetünk. A newtoni fizika jellegzetes gondolkodásmódja alapján a hasonló jelenségek leírásához sok esetben használunk hasonló differenciálegyenleteket. Nézzünk erre példát!

Tételezzük fel, hogy egy testre az állandó nagyságú és irányú F erő mellett súrlódási erő is hat, amely legyen arányos a test sebességével. Itt konkrétan lehet gondolni egy, a levegőben vagy folyadékban eső tárgyra, vagy a fémekben feszültség hatására mozgó elektronokra, amelyet a közismert Ohm-törvény fejez ki. A mozgásegyenlet a következőképp írható fel:

$$m a = F - k v.$$

Osszuk el az egyenlet mindkét oldalát az m tömeggel és írjuk fel a gyorsulást a sebesség idő szerinti deriváltjaként, mivel a mozgásegyenletben a sebesség szerepel és a $v(t)$ függvényre vagyunk kíváncsiak:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F - k v}{m},$$

válasszuk szét a változókat és végezzük el az integrálást:

$$\int \frac{dv}{F - k v} = \int \frac{dt}{m}.$$

Az integrációs állandó meghatározásához használjuk fel a kezdeti feltételeket, nevezetesen azt, hogy $t = 0$ időpillanatban a test nulla kezdősebességgel indul. Megoldásfüggvényünk a következőképp néz ki:

$$v = \frac{F}{k} \left[1 - \exp\left(-\frac{k}{m} t\right) \right].$$

Azt láthatjuk tehát, hogy a sebesség egy darabig nő az idő függvényében, majd aszimptotikusan tart egy állandó értékhez, ami a $v \rightarrow F/k$.

Az elektromos és a mechanikai rendszerek közti analógiákról

Az elektromos és a mechanikai jelenségek hasonló tulajdonságokat mutatnak. Nemcsak a tömegek és rugók alkotnak lineáris rendszereket, amelyeket lineáris differenciálegyenletekkel lehet leírni, hanem a lineáris áramköröknek nevezett elektromos rendszerek is, amelyek teljesen analógok a mechanikai rendszerekkel.

A mechanikai rendszereknek egy másik jellegzetes tulajdonsága a tehetetlenség, amelynek szintén megvan az elektromos megfelelője. Ez akkor jelentkezik feltűnően, amikor egy áramkörben indukciós tekercs van. Ha az indukciós tekercsben egyszer már folyik az elektromos áram, akkor az a feszültség kikapcsolásakor sem akar „megállni”, bekapcsoláskor pedig nehezen indul meg az áram.

Teljesen azonos a leírás módja egy tekercs áramkörbe való bekapcsolásának. Ekkor az áramerősség növekedésékor az áramforrás U feszültségével – *Lenz* törvénye értelmében – ellentétes irányú U_i önindukciós feszültség keletkezik, amely megakadályozza az áram gyors növekedését.

$$U - L \frac{dI}{dt} = RI,$$

amely elsőrendű differenciálegyenlet a meghatározandó $I(t)$ áramerősség számára. Vegyük észre, hogy egyenletünk teljesen úgy néz ki, mint amilyent a sebességgel arányos súrlódási erő esetében oldottunk meg. Kezdeti feltételeink legyenek a $t = 0$ időpillanatban $I(0) = 0$. A megoldásfüggvény ekkor a mechanikai probléma megoldásának mintájára:

$$I = \frac{U}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right] = \frac{U}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right],$$

ahol $\tau = L/R$ az áramkör időállandója.

Az elektromos és a mechanikai rezgések analóg fogalmai

| jellemző | mechanikai tulajdonság | elektromos tulajdonság |
|----------------------|------------------------|-------------------------------|
| független változó | idő (t) | idő (t) |
| függő változó | helykoordináta (x) | töltés (q) |
| tehetetlenség | tömeg (m) | induktivitás (L) |
| ellenállás | csillapítási tényező | ellenállás |
| merevség | rugóállandó (k) | kapacitás reciproka ($1/C$) |
| rezonanciafrekvencia | $\omega^2 = k/m$ | $\omega^2 = 1/LC$ |
| periódusidő | $T = 2\pi(m/k)^{1/2}$ | $T = 2\pi(LC)^{1/2}$ |

A sorba kapcsolt ohmos ellenállás, önindukciós tekercs és kondenzátor esetét nevezzük soros RLC-körnek. Kérdésünk az lesz, hogy ha a végpontokra $U = U_0 \sin \omega t$ váltakozó feszültséget kapcsolunk, a körben mekkora áram folyik. Írjuk fel az áramkör egyes elemeire eső feszültségeket:

$$RI + L \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C} = U_0 \sin \omega t.$$

Differenciáljuk az egész egyenletet az idő szerint és használjuk fel, hogy $I = dQ/dt$:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = U_0 \omega \cos \omega t,$$

amely másodrendű differenciálegyenlet a keresett I áramerősség számára. A soros RLC-kör differenciálegyenlete teljesen analóg a kényszerrezgések esetében felírható differenciálegyenlettel. Az elektromos és a mechanikai rezgések analóg fogalmait az 1. táblázatban mutatjuk be.

Bármit is vezetünk le egyik vagy másik rendszerre vonatkozóan, az a megfelelő analogont tekintetbe véve mindkét rendszerre igaz lesz. Például egy bonyolult, nagyszámú kapcsolási elemet tartalmazó mechanikai rendszert utánozva nagyszámú ellenállást, tekercset és kondenzátort kapcsolunk össze. De mi az előnye ennek a módszernek? A matematikai feladat ugyanaz, azonban az elektromos áramkört könnyebb elkészíteni és ezen elektromos rendszer paramétereit változtatni. A módszert használják például gépkocsik tervezésénél. Tudni szeretnék, hogy a megtervezett autó valamely adott úton mennyire fog rázkódni. Elektromos áramkört építenek, amelybe indukciós tekercset tesznek, tekintetbe véve a kerekek tehetetlenségét és kondenzátorokat a kerékrugók rugóállandóinak, ellenállásokat a lökésgátlók reprezentálására stb. A rázós utat egy generátorból származó jelsorozattal lehet helyettesíteni. Ez feszültséget kapcsol az áramkörre és megmérve a töltést a megfelelő kondenzátoron, megállapítható az, hogy például a bal első kerék mennyire ugrál. A megfelelő módosítást könnyen el lehet végezni, mondjuk egy kar elforgatásával, amellyel a kondenzátor kapacitása változtatható. Vagyis nem kell ténylegesen megépíteni az autót és abban cserélni az alkatrészeket! Természetesen az autó összes jellemzője nem határozható meg ezzel a módszerrel, de akkor is jelentősen leegyszerűsíti az adott probléma vizsgálatát.

Analógiák alkalmazása a fizika oktatása során

Az analógiás gondolkodási forma nagyon jellemző az emberekre. Ez a fajta gondolkodásmód hatékonyan segíti a bárhonnan származó előzetes ismeretek és az

új ismeret közti kapcsolatok kiépítését, amely fontos folyamat a jól szervezett, sokféle szituációban előhívható, alkalmazható tudásrendszer kiépítéséhez. Ezért írásunk következő részében ezt vizsgáljuk különböző tankönyvek esetében.

Nevelési szempontból a mindennapi élet problémáinak kontextusába helyezett analógiák a legjelentősebbek. Az iskolai tanítás egyik fontos célja az ismeret, a tudás egyik területről a másikra való transzferálása képességének fejlesztése, a közöttük lévő hasonlóságok kiemelésével azért, hogy a tanulók sikeresen meg tudjanak birkózni az új szituációkkal. Ezért a kreatív gondolkodás fejlesztésének különböző formái is az analógiák alkalmazásán alapulnak.

Az analógiák mint oktatási eszközök segítik a tanulókat az új információ megszerzésében azáltal, hogy felhasználják, amit már tudnak. Az analógiák alkalmazása a tanulók körében az új tartalmak megtanulásának segítése céljából akkor hatékony, amikor egy utalás segíti, hogy a diákok leképezzék az ismerős szituációt az új szituációra. Tehát fontos, hogy a tanárok kellő figyelmet fordítsanak a már elsajátított ismeretek és az új szituáció közötti kapcsolatok tisztázására. Továbbá be kell mutatni az analógiák alkalmazásának határait, hiszen hasonlóságról, nem pedig teljes azonosságról van szó! [1]

Az oktatás során sokszor jelent nehézséget a fizikában használt modellek és a valóság kapcsolata; mikor mit hanyagolunk el, milyen közelítő leírást alkalmazhatunk egy adott probléma vizsgálata esetében. A fizika jellegzetes modelljei például az anyagi pont, merev test, nyújthatatlan fonál, sűrűdésmentes lejtő, ideális gáz, és sorolhatnánk a példákat. Valószínűleg célszerű lenne tudatosítani a diákokban a fizikának ezt a jellegzetességét!

Az alábbi két példa rendkívül fontos az analógia és a vizsgált dolgok különbözőségének szemléltetésére [3]:

1. Az atomok nem olyanok, mint a belőlük felépülő dolgok, csak kicsiben.

– A házak is téglákból állnak, mégsem tartjuk különösnek, hogy a téglák nem miniatűr házak. A bennünket körülvevő testeknek van színe, illata, méretei, de az atomok – amelyekből ezek a testek felépülnek – egyik ilyen tulajdonsággal sem rendelkeznek. Csupán egyetlen változatlan tulajdonságuk marad meg, a tömegük.

2. Atom bolygómodelljének korlátai.

– Egy szétrombolt atomi elektronszerkezet visszaállítja a struktúráját, de egy bolygó pályája sosem lesz a régi, ha egyszer egy másik kozmikus égitest abba beleavatkozik.

A tanítás során bátrabban kellene új, szemléletes analógiákat alkalmazni egy-egy jelenség tárgyalásakor. Sőt, akár a diákok is találjanak ki analógiákat. Ezek megbeszélésekor a tanár számára megmutatkozhat az is, hogy mely részeket nem értenek a gyerekek, illetve hol vannak alapvető félreértelmezések.

A diákok számára érdekes feladatot jelent az, ha a különböző összehasonlításokat kell tenniük, mint:

– Hasonlítsa össze a statikus elektromos és a mágneses mezőt választott szempontok alapján!

– Hasonlítsa össze az egyenes vonalú egyenletes mozgást és az egyenletes körmozgást végző testek mozgását! Milyen analóg fogalmakat lehet használni a mozgások leírásához? Miben hasonló és miben különböző a két mozgás?

A meglévő tudás és a problémaszituáció közötti kapcsolat felismerése és a tudástranszfer létrejötte szempontjából alapvetően fontos szerepet játszik az analógiás gondolkodás. Az analógiás transzfer alkalmazásához érdekes a következő feladat.

Mekkora sebességgel érkezett az elektron a $s_1 = 20$ cm hosszú síkkondenzátor lemezei közé, azokkal párhuzamosan, ha az $E = 10^4$ V/m térerősség hatására a kondenzátoron való áthaladás után eltérése az eredeti irányától $s_2 = 5$ cm.

Megoldás: az elektron a beérkezési sebességével megegyező egyenes vonalú egyenletes mozgást végez a kondenzátorlemezekkel párhuzamosan, míg arra merőlegesen egyenletesen gyorsul. A mozgás teljes mértékben hasonló a vízszintes hajításhoz. Az elektron addig az időtartamig, míg $s_1 = 20$ cm = 0,2 m-t megtesz, addig $s_2 = 5$ cm = 0,05 m-t egyenletesen gyorsulva tesz meg. Az elektron gyorsulása: $E \cdot e = m_e \cdot a$, innen

$$a = \frac{Ee}{m} = \frac{10^4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}} = 1,76 \cdot 10^{15} \text{ m/s}^2.$$

Az egyenletes mozgás ideje: $t = s_1/v$. A gyorsuló mozgással megtett út:

$$s_2 = \frac{a}{2} t^2 = \frac{a}{2} \frac{s_1^2}{v^2},$$

ahonnan e keresett sebesség kifejezhető:

$$v^2 = \frac{a}{2} \frac{s_1^2}{s_2} = \frac{1,76 \cdot 10^{15} \cdot 0,2^2}{2 \cdot 0,05} \approx 7 \cdot 10^{14} \text{ m}^2/\text{s}^2,$$

innen a sebesség $v = 2,6 \cdot 10^7$ m/s.

A feladat nehézsége abban áll, hogy a fizika tantárgyon belül két különböző területen – a mechanikában

2. táblázat

| A különböző kiadók tankönyveiben található analógiák száma | | | | |
|--|--------|---------|---------------|------------|
| szempont | MOZAIK | Műszaki | Tankönyvkiadó | régi kiadó |
| analógiák, bemutatott modellek száma | 10 | 36 | 8 | 12 |
| analógiás feladatok száma | 3 | 4 | – | 2 |

és az elektromosságtanban – tanult fogalmakat kell alkalmazni a feladat megoldása során. Az elektron mozgása a kondenzátorlemezben teljesen hasonló (analóg) a vízszintesen elhajított test mozgásához. Csak nem a gravitációs mező, hanem az elektromos mező gyorsítja az elektront a kondenzátor belsejében. Tehát nemcsak a szükséges mechanikai és elektromosságtani ismeretekre van szükség a megoldáshoz, hanem e két terület összekapcsolására is. Továbbá fel kell ismerni a vízszintes hajítással való analógiát, tehát képesnek kell lenni egy analógiás transzferre. Ez csak keveseknek sikerül.

2006-ban a felvett 127 fő elsőéves fizika BSc-s hallgató 25%-a tudta csak megoldani a feladatot. 17 fő megoldása volt teljesen hibátlan. (Az elsőéves BSc-re felvett hallgatók által megírt feladatlap kiértékelésével kapcsolatos részletesebb adatok honlapomon megtalálhatók.) A hallgatókkal megíratott feladatlap megoldásának többi részét kódoló adatok összevetéséből egyértelműen látható, hogy a feladatot a felvettek azon kis százaléka tudta csak jó teljesítménnyel megoldani, akik a feladatlap többi részét is jól oldták meg, tehát komoly tudással is rendelkeztek. Akik csak mechanikából voltak jók, azoknak nem ment a feladat megoldása.

Analógiák a fizika tankönyvekben

Három kiadó (Nemzeti Tankönyvkiadó, MOZAIK Oktatási Stúdió és Műszaki Kiadó) fizika tankönyvsorozatának a modern fizikával (atomfizika, magfizika, csillagászat) foglalkozó fejezeteit hasonlítottuk össze az analógiák száma szerint. Elsősorban a napjainkban, illetve a közelmúltban forgalomban lévő, és a tanítási gyakorlatban alkalmazott tankönyvek vizsgálatát tűztük ki célul, és mintegy összehasonlításként megnéztünk egy réginek mondható, több, mint 30 éves tankönyvet is (2. táblázat).

A vizsgálatba bevont tankönyvek közül kiemelkedően sok és jó analógia található a Műszaki Kiadó [4] tankönyvében. Ezek nagy mértékben segítik a tananyag megértését, amely a modern fizika alapvetően elvont jellege miatt különösen fontos. A szerzők sok olyan analóg gondolatmenetet is bemutatnak, amelyek ténylegesen elvezettek egy adott felfedezéshez, amelyek fontosak a tudományról alkotott kép, a tudósok munkájának, a fizikai megismerés módszerének bemutatásához is. Ebben a Műszaki Kiadó gondozásában megjelent tankönyv az élen jár. Sok kivá-

ló, szemléletes analógiát mutatnak be az egyébként nehezen elképzelhető jelenségek megértéséhez. Néhány, az analógiás gondolkodást elősegítő feladattal is találkozunk a könyvekben, aminek nagy szerepe van a gondolkodás fejlesztésében, de ezek száma sajnos igen csekély. Továbbá sajnálatos az, hogy a nukleáris láncreakció és a gyökös mechanizmusú kémiai láncreakciók (pl. égés, HCl szintézise stb.) közti analógiát egyik tankönyv sem alkalmazta. Pedig ez kémiából tananyag a 10. évfolyamon, továbbá tudománytörténeti jelentősége is van, hiszen *Szilárd Leó* éppen ezt az analógiát használta, amikor kigondolta, hogy érdemes a nukleáris láncreakció kutatásával foglalkozni, és ehhez éppen a kémikusok segítségét kérte és kapta meg a fent említett analógiára hivatkozva.

Írásunk befejező részében a fent említett tankönyvekből mutatunk be néhány érdekes analógiát, amelyeket ajánlunk a majdani tankönyvek írói számára is.

A *MOZAIK Kiadó* [5] tankönyvében a 112. oldalon található kis „történet” szemlélteti a modell és a valóság viszonyát, miszerint a modell soha nem lehet a valóság tökéletes mása. „Képzeljünk el olyan értelmes lényeket, akik mindig csak síkidomokkal találkoztak (kör, téglalap, trapéz stb.). Egyszer lehetőségük adódik, hogy körhengerről készítsenek felvételeket. Ugyanazt a körhengert előlről téglalapnak, felülről körnek látják.”

A 130. oldalon szemléletes hasonlatot mutatnak be a képen az atom és az atommag méretviszonyaira, miszerint ha az atommag egy stadion közepére helyezt meggy lenne, akkor az elektronpályák a stadion lelátóira esnének.

A *Műszaki Kiadó* [4] tankönyvében sok és érdekes analógia olvasható. A 105–106. oldalakon az elektronmikroszkóp működési elvét írják le, amelynek kapcsán összehasonlítják a fényt és az elektront. „A fénysugarak és az elektronpályák közötti analógia mélyebb értelmű. A geometriai optika, amelyben kiterjedten használjuk a fénysugár fogalmát, az általánosabb hullámmoddell közelítő leírásának felel meg. A fénysugarakat használó geometriai optika akkor képes megfelelően leírni a fénytani jelenségeket, ha az interferenciával járó jelenségek elhanyagolhatók. Hasonló módon azt is modellek tekinthetjük, amikor az elektront pontszerű részecskeként kezeljük, amely egy vonallal jellemezhető pályán mozog. Ez a modell akkor alkalmazható, ha az elektronok hullámtermészetével kapcsolatos hatások elhanyagolhatók.”

Majd leírják, hogy az elektronmikroszkóp esetében nincs szerepe az elektron hullámtulajdonságainak, a klasszikus newtoni mechanika törvényeit lehet alkalmazni. Szintén analógiaként bemutatják, hogy miként működik az elektrosztatikus lencse és a fénytani lencse.

A 112. oldalon négy kiváló analógiás feladat található. Azonos sebességű proton és elektron hullámhosszát, majd azonos mozgási energiájú proton és elektron hullámhosszát kell kiszámítani és összehasonlítani. Továbbá a Compton-effektust és a fény-

elektromos hatást, valamint az elektronmikroszkópot és a fénymikroszkópot kell összehasonlítani.

A 126. oldalon az elektronspin szemléltetéséhez az elektron atombeli mozgását a Föld Nap körüli mozgásával és saját tengelye körüli forgásával hasonlítják össze. De ugyanakkor bemutatják az analógia korlátait is, hiszen nem szabad elfeledkezni az elektron hullámszerű viselkedéséről sem. Kifejezetten érdekesek a 127. oldalon leírtak, miszerint az elektron saját mágneses nyomatékának viszonylagos nagy voltára nem tudnak analógiát mondani. Fontos egy ilyen tény hangsúlyozása is, amely esetünkben arra világít rá, hogy a mikrovilág más, mint a makrovilág!

Kifejezetten szellemes a 129. oldalon található hasonlat az adott tulajdonságokkal rendelkező anyagok tervezése és a ruhatervezés között.

Szintén nagyon szellemes hasonlat olvasható a 138. oldalon, ahol a szilárd kristályos anyagokban előforduló diszlokáció mozgását hasonlítják a szerzők egy szőnyegen végigfutó dudorhoz.

A 139. oldalon pedig a szilárd testek sáv szerkezeti modelljét szemléltetik, miszerint az elektron vezetési sávba jutását hasonlítják össze egy teli garázsban mozgásképtelen autóval, amely ha fel tudna ugrani a következő üres emeletre, akkor már mehetne is.

A *Nemzeti Tankönyvkiadó* [6] tankönyvéből egyetlen analógiát mutatunk be. A 93. oldalon az atomban kötött elektron leírásához kétféle modellt mutat be a szerző az *Olvasnivaló* című részben. Az egyik elképzelés szerint az elektron körpályákon mozgó részecskeként képzelhető el, a másikban állóhullámként.

Néhány nagyon érdekes összehasonlítás és analógia található a régi, *Tankönyvkiadó* által kiadott tankönyvben is [7].

A 124. oldal két feladatában, (a 2. és a 3.) összehasonlítást kérnek a tanulóktól. Az elektrolitok és a fémek vezetését, illetve a gázok és a félvezetők vezetését kell összehasonlítani.

A 260. oldal közepén az apróbetűs részben egy szilárd anyag atommagjainak egymástól való távolságát érzékeltetik a szerzők, miszerint ha az atommag gombostűfejnyi volna, akkor a szomszédos mag tőle 30 m-re lenne.

A 292. oldalon a magerőt hasonlítják össze a szerzők a Coulomb-erővel és a gravitációs erővel.

Irodalom

1. Nagy L.-né: *Az analógiás gondolkodás fejlesztése*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2006.
2. Csányi V.: A természettudományos gondolkodásról. *Magyar Tudomány* (2007/2) 132–140.
3. L. I. Ponomarjov: *A kvantum nyomában*. Kozmosz Könyvek, Kárpáti Kiadó, Budapest – Uzsgorod, 1979.
4. Tomcsányi P. (szerk.): *Fizika. Modern fizika*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2002, 6. kiadás.
5. Halász T., Jurisits J., Szűcs J.: *Fizika 11. Rezgések és hullámok, Modern fizika*. MOZAIK Kiadó, Szeged, 2004.
6. Zátanyi S., ifj. Zátanyi S.: *Fizika. Optika, modern fizika, csillagászat*. Nemzeti tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
7. Bayer I., Nagy J., Nagy J.-né: *Fizika a gimnáziumok IV. osztálya számára*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1978, 11. kiadás (Bayer I. átdolgozásában).

WIGNER JENŐ ORSZÁGOS FIZIKAI FELADATMEGOLDÓ VERSENY

Sándor-Kerestély Ferenc
Békéscsabai Evangélikus Gimnázium

2010. február 26. és 28. között immáron nyolcadik alkalommal rendezte meg a Békéscsabai Evangélikus Gimnázium, Művészeti Szakközépiskola, Kollégium és Alapfokú Művészetoktatási Intézmény az ország evangélikus iskoláinak fizikaversenyét.

A versenyen az evangélikus iskolákon kívül részt vettek a szomszéd megyék protestáns iskoláinak (Bethlen Gábor Református Gimnázium – Hódmezővásárhely, Kecskeméti Református Gimnázium, illetve a határon túlról Kárpátaljáról a Nagyberegi Református Gimnázium és a Kolozsvári Református Gimnázium) diákjai.

A verseny egyben tisztelgés is a 108 éve született Nobel-díjas tudós emléke előtt, akinek világhírét azok a jelentős felfedezések alapozták meg, amelyek a csoportelmélethez, valamint az első atommáglya, a reaktor felfedezéséhez fűződnek. És aki nyolcvanas éveiben a *Középiskolai Matematikai Lapok* feladataival tartotta karban agysejtjeit.

A háromnapos program pénteken este *Munkácsy* szülőházának meglátogatásával kezdődött, majd szombaton délelőtt került sor a dolgozatok megírására. Amíg délután a dolgozatokat javították, a versenyzők változatos tematikájú előadásokat hallgathattak:

Hetesi Zsolt (ELTE): *Híradás a Föld állapotáról*, amit *Kovács Zoltán* előadása követett, utána pedig *Tóth Pál*, a Fizibusz munkatársa mutatott be kísérleteket. Vacsora után *Zombori Ottó* csillagászati előadása következett és a résztvevők lehetőséget kaptak megfigyelésre.

Vasárnap délelőtt került sor az eredményhirdetésre és díjak kiosztására.

Válogatás a feladatokból

A feladatokat *Molnár Miklós* és *Varga Zsuzsanna*, a Szegedi Tudományegyetem tanárai állították össze. A kitűzött feladatok megoldása a mechanika, hőtan, 11. osztályos és 12. osztályosok kategóriáiban történt.

Az egyenként maximálisan 13 pontos 4 mechanika feladat közül az utolsót mutatjuk be.

Fonálinga nehezékének gyorsulása a pálya legalsó pontjában $2g$, és függőleges irányú.

a) Az inga melyik helyzetében lesz a test gyorsulása vízszintes?

b) Mekkora ez a gyorsulás?

Megoldás: a) Az alsó helyzetre fennáll, hogy

$$K_1 - mg = m a_{cp} = m \frac{v_1^2}{l}$$

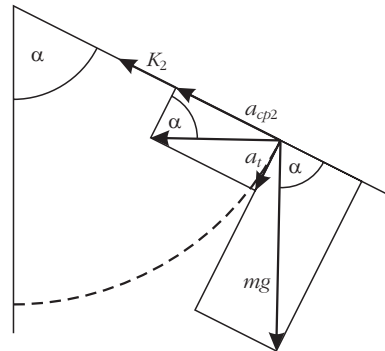
és a gyorsulás

$$a_1 = a_{cp} = 2g, \text{ azaz } 2g = \frac{v_1^2}{l}.$$

Ha a fonal a függőlegessel α szöget zár be, amikor a test gyorsulása vízszintes, akkor a mozgásegyenlet komponensei:

$$K_2 - mg \cos \alpha = m a_{cp2} = m \frac{v_2^2}{l}, \text{ illetve}$$

$$mg \sin \alpha = m a_1.$$



Az ábráról leolvasható, hogy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_{cp2}}{a_1} = \frac{v_2^2}{lg \sin \alpha}.$$

A v_2 sebességet az energia megmaradásból határozhatjuk meg:

$$\frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m v_2^2 + mg l (1 - \cos \alpha), \text{ ahonnan}$$

$$v_2^2 = 2g l \cos \alpha.$$

A vízszintes gyorsuláshoz tartozó α szög pedig:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_2^2}{lg \sin \alpha} = \frac{2g l \cos \alpha}{lg \sin \alpha} = 2 \operatorname{ctg} \alpha, \text{ azaz}$$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = 2, \text{ tehát } \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{2}, \text{ így } \alpha = 54,73^\circ.$$

b) A vízszintes a_2 gyorsulás:

$$a_2 = g \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{2} g = 14,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Az egyenként kétpontos hőtani tesztkérdések közül az 5. sorszámút választottuk ki.

Szobahőmérsékletű vascső hőmérsékletét 150 K -nel növeljük. Az alábbi megállapítások közül melyik az igaz?

a) A vascső térfogata növekszik, a cső belső átmérője csökken.

b) A vascső hossza, külső átmérője és belső átmérője is növekszik.

c) A vascső külső átmérője növekszik, belső átmérője csökken.

d) A vascső hossza csökken, belső átmérője növekszik.

A helyes válasz a c).

A 11. osztályosok tesztkérdéseit képviselje a hatodik.

Mekkora annak a két vezetéknek a belsejében az elektromos térerősség nagyságának aránya, amelynek anyaga azonos, de az elsőnek a hossza és a keresztmetszete is kétszerese a másíknak, és mindkettőt párhuzamosan ugyanazon feszültségforrásra kapcsoltuk?

a) Az elsőben kétszer akkora a térerősség.

b) Az elsőben feleakkora a térerősség.

c) A térerősségek egyenlők.

d) Az elsőben négyszer akkora a térerősség

Helyes megoldás a b).

Végül a 12. osztályosok feladatait képviselje a harmadik:

Föld körül körpályán keringő műhold pályasugara $6,7 \cdot 10^6$ m. Egy modellrepülőgép a talaj síkjával párhuzamosan 15 m sugarú körpályán mozog.

a) Mekkora a modellrepülőgép sebessége, ha azt kívánjuk, hogy a műhold és a modellrepülő centripetális gyorsulása azonos legyen?

b) Mennyi a két objektum keringési ideje?

($f = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, $M_{\text{Föld}} = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$)

Megoldás: a) A műholdra ható erő az

$$F_g = f \frac{M_{\text{Föld}} m}{R_{\text{műhold}}^2}$$

gravitációs erő, a műhold gyorsulása:

$$a_{\text{műhold}} = f \frac{M_{\text{Föld}}}{R_{\text{műhold}}^2}$$

A körmozgást végző test gyorsulása:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

A két gyorsulás egyenlőségéből:

$$f \frac{M_{\text{Föld}}}{R_{\text{műhold}}^2} = \frac{v^2}{r}$$

ahonnan a test sebessége:

$$v = \sqrt{\frac{f M_{\text{Föld}} r}{R_{\text{műhold}}^2}} = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N m}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 15 \text{ m}}{(6,7 \cdot 10^6 \text{ m})^2}} = 11,54 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) A körmozgást végző test keringési ideje:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi \cdot 15 \text{ m}}{11,54 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 8,17 \text{ s}$$

A műhold keringési ideje a gyorsulások egyenlősége alapján:

$$\frac{4\pi^2}{T_{\text{műhold}}^2} R = r \frac{4\pi^2}{T^2}, \text{ amiből}$$

$$T_{\text{műhold}} = T \sqrt{\frac{R}{r}} = 8,17 \text{ s} \cdot \sqrt{\frac{6,17 \cdot 10^6 \text{ m}}{15 \text{ m}}} = 5460 \text{ s} = 1,52 \text{ h}$$

Az egyes évfolyamok győztesei, iskolái és a felkészítő tanárok a következők:

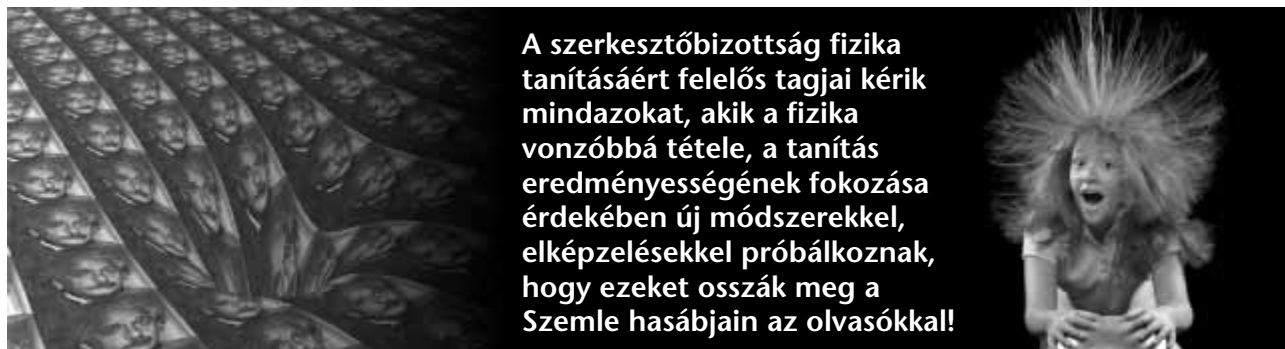
9. osztályosok versenyében 1. helyezett lett *Filep Gábor*, a debreceni Dóczy Református Gimnázium tanulója, felkészítő tanára *Tófalusi Péter*.

10. osztályosok között győzött *Ercsei Tamás* (Hódmezővásárhely, Bethlen Gábor Református Gimnázium, *Nagy Tibor*).

11. osztályosok versenyét *Köpencei Gergő* (Bonyhád, Petőfi Sándor Evangélikus Gimnázium, *Hortobágyi János*) nyerte meg.

12. osztályosok kategóriájának győztese *Varju Tamás* (Bonyhád, Petőfi Sándor Evangélikus Gimnázium, *Wiandt Péter*).

Örömmel számoltunk be erről a versenyről, hiszen a résztvevők megállapították, nagyon jó volt együtt lenni e három nap alatt. Köszönet a szervezésben, előkészítésben és lebonyolításban segítő kollégáknak és tanulóknak.



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!

VÉDNÖKI SZAVAK A TUDOMÁNYÉRT

Pálinkás József
az MTA elnöke

Idegesítenek, bosszantanak, fölháborítanak.

Elsősorban azért, mert a tudomány évezredek nagyon kemény munkájával megszerzett presztízsét kihasználva próbálnak meg olcsón, a tudomány köntösébe bújva sikerhez jutni, és nagyon gyakran ebből a sikerből pénzt csinálni. Ezeknek az áltudományos számárságoknak nagy része nemcsak azért veszélyes, mert félrevezeti az embereket – azért is –, de főképp azért mert nagyon gyakran egyszerű becsapásról van szó. Gagyit árulnak, mint időnként a piacokon. Másrészt persze lehetnek olyan esetek is, amikor pedig kifejezetten veszélyes, veszedelmes, amit tesznek. Például olyan számárságokat állítanak, hogy valakit kézrátétellel, vagy valamilyen távgyógyítással meg lehet gyógyítani. Ha valaki a tényleges betegsége kezdetén ilyen kezelésben részesül, és orvoshoz csak akkor fordul, amikor már menthetetlen, ilyenkor már egyenesen gyilkosságot követnek el ezek az emberek.

Áltudomány ellen az oktatásban – az MTA szerepe

A legfontosabb terep az iskola. Az iskolába ne engedjük bejutni ezeket a gyakran hangzatos, a gyerekeknek meg érdekesnek tűnő egyszerű magyarázatokat. A bonyolult magyarázatot az emberek általában nem szeretik, egyszerű magyarázatot szeretnének. Éppen ezt használják ki, és ezért nagyon fontos az, hogy az iskolában olyan tudományos magyarázatokat tanítsanak, amit a gyerekek képesek fölfogni, megérteni. Próbáljuk meg tehát a legfontosabbakat, az alapjelenségeket megtanítani. Ugyanakkor semmiképpen ne engedjük be az iskolába ezeket az egyszerű, hangzatosnak tűnő magyarázatokat. Világossá kell tenni azt az álláspontot, és ez az Akadémiának is fontos feladata, hogy a tudomány nem az egyik lehetséges magyarázata a dolgoknak, hanem – bármennyire sarkosnak tűnik ez a kijelentés – hanem *az adott pillanatban a magyarázat*. A tudomány úgy működik, hogy ha egyetlen megalapozott kísérlet, hangsúlyozom: egyetlen megalapozott kísérlet ellentmond egy tudományos elméletnek, akkor arról a tudományos elméletéről azt mondjuk, hogy ez valószínűleg nem a végső tudományos elmélet. Most ehhez képest az áltudományos számárságokban előállnak olyan magyarázatokkal, amely adott esetben úgy tűnhet valakinek, hogy egy konkrét dolgot megmagyaráz.

A 2010. február 28-i hetedik Budapesti Szkeptikus Konferencia eseményeiről márciusi számunkban számoltunk be. Most a konferencia védnökségét elvállaló Pálinkás József MTA elnök videó üzenetének szövegét adjuk közre.

A tanításnak egyik legnehezebb része, hogy ne vesszünk be nagyon-nagyon sok fogalmat, mert akkor elveszti a diák a fonalat, ugyanakkor tudjunk olyan képkel, magyarázatokkal, analógiákkal tanítani, hogy a megértés mégiscsak megtörténjen. Föl kell tudni kelteni az érdeklődést, tehát megvilágítani azt, hogy ez miért érdekes, és el kell tudni mondani a magyarázatot a hallgató fogalmaival, amelyeket ő ismer, amelyeket ő is jól tud. Hiába beszélek az elektromágneses hullámokról, a térerősségvektorról vagy a térerősségtenzorról – úgy fognak nézni rám, hogy biztos okosakat mond, mert olyan külföldies kifejezéseket használ. Azt, hogy a víz-hullám mit jelent, azt el tudom magyarázni, mert elmondom nekik, hogy üljenek le a Balaton partjára és nézzék szép időben, amikor a hullámok nem nagyon zavarosak, akkor milyen jól látszik, hogy mit is jelent a víz-hullám, aminek van hullámhossza, van terjedési sebessége – tessék nézni a hullám taraját, közeledik felém, ezt a közeledési sebességet hívjuk a hullám terjedési sebességének. Ilyen módon képesek vagyunk arra, hogy a diákok, vagy éppen a közönség saját fogalmaival, amit megtapasztalt, amit lát, ami ott van a fejében, ezzel magyarázzuk meg számára, és nem pedig a tudomány szakkifejezéseivel, amit nem ért.

Nekünk talán azt fontos megtenni, hogy az oktatásért felelős szervezetek, nevezetesen az Oktatási Minisztérium által működtetett elektronikus tananyagok között semmiképpen ne legyen olyan, amelyik akár csak közelébe is kerülhet ezeknek az áltudományos magyarázatoknak. A SULINET honlapján is vannak olyan számárságok, amelyeket azonnal le kellene venni onnan, amelyek földsugárzásról és nem tudom még milyen egyéb dologról szólnak. Világossá kell tenni, hogy nincs ilyen, hogy földsugárzás, ez nem létezik, ezt senki nem mérte, még nincs egyetlen jelenség, ami világosan és reprodukálhatóan ezen alapulna. Maga a szó is értelmetlen. Az, hogy egyáltalán ilyen kifejezések megjelenhetnek a hivatalos tananyagban vagy annak a környékén, az nagyon nagy baj.

Tudományok egybeolvasztása? Természetismeret – „Science”?

Ma nagyon népszerű az, hogy szüntessük meg a természettudományos oktatásban a tantárgyakat és tanítsunk valamiféle egységesnek nevezett természetismeretet. Ezzel nagyon vigyázni kell! Ilyet tud tanítani, vagy tudna tanítani, ha élne még, *Simonyi Károly*, és biztos van még néhány ember, aki képes az egész tudományos életet áttekinteni. De a többség még egy-egy tudományterület fogalomrendszerét sem képes igazán

megérteni, megtanulni. És abból nagy zagyvaság lesz ám, hogyha hallomás, vagy félig megértett elméletek alapján fognak tanítani az iskolában. Ez például óriási veszély, amit szerintem azok, akik arról beszélnek, hogy majd minden természetre vonatkozó ismeretet egyetlen tanár fog tanítani az iskolában, nem érznek. Hogyan fogja a tanár megszerezni a teljes természetismeretet, mielőtt tanítja? Nem tartom ezt jó irányznak, mert nincsenek tanárok, akik ezeket az ismereteket úgy tudnák tanítani, hogy ők maguk szilárd alapismeretekkel rendelkeznek egy-egy területen. Rendkívül nagy a veszélye, hogy éppen ezen a csatornán fog bekerülni nagyon sok áltudományos leegyszerűsített magyarázat.

A kedvenc „gagy”

Bevallom, ezek a távgyógyítások azok, amelyeket akkora, elképesztő számárságnak tartok, hogy csodálkozom rajta, egyáltalán hogyan létezhet olyan ember,

aki elhiszi: a televízió kameráján keresztül gyógyítani lehet. Miközben ő egy televízió készülék előtt ül, ami lehet akár sok ezer kilométer távolságra vagy a szomszédban – ilyen szempontból mindegy. De az, hogy valaki elhiszi, lehetséges gyógyulás anélkül, hogy bármilyen kölcsönhatás, bármilyen kapcsolat lenne a „gyógyító” személy és a gyógyítandó között – ez felfoghatatlan számomra.

Üzenet a Szkeptikusoknak

Legyenek bátrak abban, hogy föllépnek az áltudományos nézetekkel szemben, hiszen ezek képviselői nagyon gyakran meglehetősen hangosak és a tudomány képviselői általában nincsenek hozzászokva ahhoz, hogy ilyen hangos és agresszív emberekkel kell vitatkozniuk. Agresszívek ne legyenek, de legyenek bátrak abban, hogy ilyen nézetekkel szemben föllépnek!

SZABADALMAZOTT PARAMECHANIKA – AZ INERCIA-HAJTÓMŰVEK

Laczik Bálint

BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék

A hazudós katona megannyi klasszikus irodalmi mű hőse. A nagyotmondó hadfiak kacagtató lódításai között gyakran természettudományi vonatkozások is fellelhetők.

Plautus hetvenkedő katonája, *Pyrgopolinices* az indiai elefánt lábát pusztá ökölrel törte el; a mi jó *Garaynk* Hány Jánosa a világ végéről lógatta le megfáradt lábait.

Münchausen báró akár a mai médiacivilizáció népszerű alakja is lehetne. Bizarr kalandjaiban megannyi időszerű műszaki és biológiai kérdéssel rejlik. A madarak röpítette utazó a környezetbarát közlekedés egy figyelemre méltó alternatíváját villantja fel; a cseresznyemaggal fejbelőtt, majd az agancsai között takaros fácskát növesztett szarvas a szervtranszplantáció eddig nem vizsgált lehetőségeire figyelmeztet.

A mocsárból magát és paripáját a saját farkocsánál fogva kirántó hadfi aligha ismerte a belső erők egyensúlyát. Jóllehet a bizarr mutatvány pejoratív köznyelvi fordulatként közismert („a saját hajánál fogva...”), *Karl Friedrich Hieronymus* (1720–1797), alias Münchausen báró legmerészebb füllentése számos, szabadalmi védettségű találmányban ölt nyelvet a dinamika alaptörvényeire.

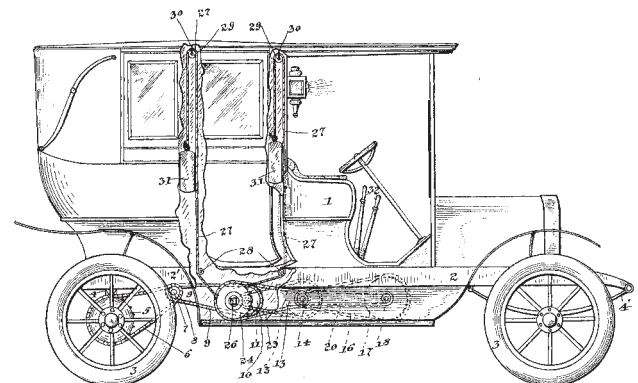
A szabadalmi hivatalok nem vizsgálják a benyújtott lelemények működőképességét, megvalósíthatóságát. Az Internet szabadalomkereső programjaival (lásd pl.

[1–3]) témérdek olyan találmányra lelhetünk, amelyek szembeszökően használhatatlanok, vagy működési alapelvük fizikai törvényeket sért.

A gravitációs meghajtású automobil (U.S. Patent No. 995,037, 1911. június 13., *1. ábra*) ötletében az apró részletek szabatos műszaki precizitása és az alapvetően félreértett fizika habos egyvelege készlet mosolyra.

Az Amerikai Egyesült Államok szabadalmi hivatalának tekintélyét aligha emeli például a 11/281.660 számon nyilvántartott lelemény. A provokatív módon primitív rajzokkal illusztrált találmány egy *nyolc éves gyerek* (!!!) mágneses örökmozgója...

1. ábra. Súlyhajtású automobil szabadalmi rajza.



UNITED STATES PATENT OFFICE.

ISAAC SEVTH, OF CHICAGO, ILLINOIS.

AUTOMOBILE.

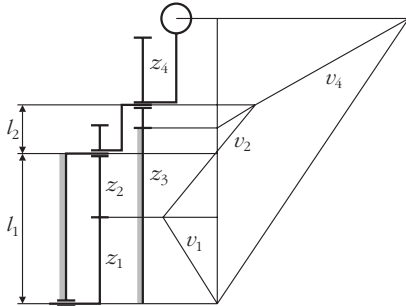
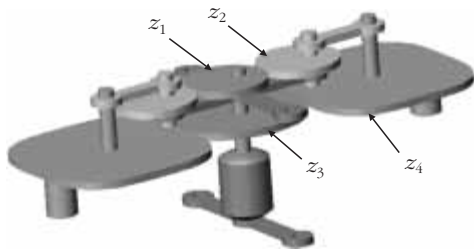
995,037.

Specification of Letters Patent. Patented June 13, 1911.

Application filed December 13, 1909. Serial No. 89,000.

My invention relates to improvements in automobiles and more particularly to a propelling means therefor, the object of the invention being the production of a machine which shall be driven by the force of gravity.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen megrendezett 7. Szkeptikus Konferencián elhangzott előadás alapján.



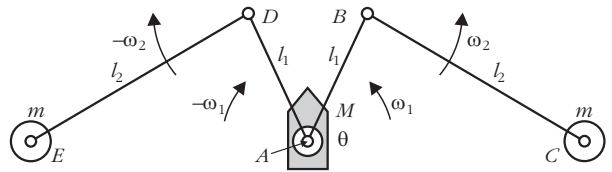
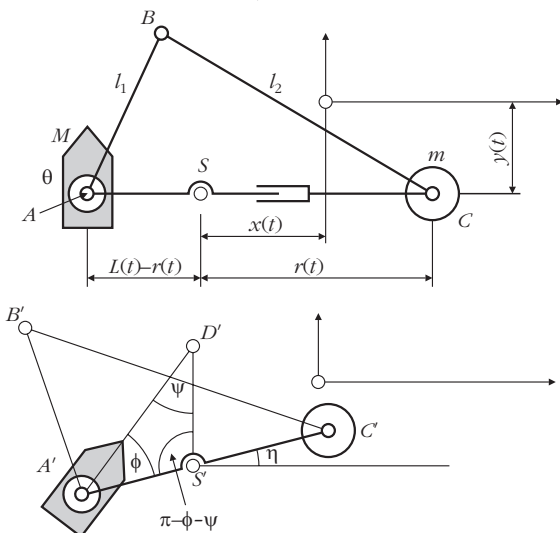
2. ábra. Az inercia-hajtómű és bolygó-fogaskerék rendszerének sebességábrája.

Az inercia-hajtóművek tervezői több tömegelem változó sebességű mozgásából remélnék egyirányú, a teljes rendszert gyorsító erőt nyerni ([4]).

A jelen cikk szerzőjét az elmúlt évek során több feltaláló kereste meg effajta szerkezetek terveivel. Az eleve sikertelen elképzelések egy makacsul félreértett mechanikai probléma megoldását az – egyébként sokoldalúan alkalmazható – változó áttételű centris mechanizmusokban remélték megvalósítani. (A bolygóművekről és a periodikusan változó áttételű fogaskerék hajtásokról lásd például a [6–8] forrásokat.)

A nagyjából hasonló konstrukciójú készülékek szerkezeti modelljét és a fogaskerékrendszer sebességtervét a 2. ábra szemlélteti. A z_1, z_2, z_3, z_4 fogszámú, nem kör alakú fogaskerekkel kialakítandó bolygómű két, egymással ellentétes forgásértelmen keringő tömeg centrifugális erőivel kívánja az egyirányú eredőt előállítani.

4. ábra. Az inercia-hajtómű geometriai viszonyai.



3. ábra. Az inercia-hajtómű dinamikai modellje.

A dinamikai elemzéshez vizsgáljuk a szerkezet egyszerűsített mechanikai modelljét (3. ábra). Az M tömegű, az A csukló tengelyére számított Θ tehetetlenségi nyomatékú hordozó elem jobb oldalán az l_1 hosszúságú AB , valamint az l_2 hosszúságú BC karokkal kapcsolódik az m tömeg. A bal oldalon szimmetrikusan helyezkednek el az AD és DE karok, valamint az m tömeg. Az AB és AD karokat az A , a BC és ED karokat a B és D csuklók körül $\pm\omega_1 = \pm\omega_1(t)$, illetve $\pm\omega_2 = \pm\omega_2(t)$, időben változó szögsebességekkel forgatva, a mechanizmus – a feltalálói elképzelések szerint – folyamatos haladó mozgást fog végezni. (A legvérmesebb reménykedő leleményét kifejezetten űrtechnikai hajtóműként kívánta alkalmazni.)

A fellépő centrifugális erők a rendszer belső erői, amelyek a karok és a hordozó elem közös tömegközéppontjának mozgását nyilván nem befolyásolják.

A tömegközéppontra vonatkozó dinamikai tétel igazolására írjuk fel például a hordozó elem és a jobb oldali karok mozgási energiáját. (Az egyszerűbb tárgyalás érdekében hanyagoljuk el a karok tömegeit és tehetetlenségi nyomatékait. A levezetések a Maple R12 programmal készültek.) A továbbiakban elemzett modell a 4. ábrán látható.

A centris mechanizmus által vezérelt, változó $AC = L(t)$ távolságú M és m tömegek S tömegközéppontjának helye

$$M[L(t) - r(t)] = m r(t), \quad (1)$$

tehát

$$r(t) = \frac{ML(t)}{M + m}.$$

Tételezzük fel, hogy az S tömegközéppont az $x = x(t)$, $y = y(t)$ időtörvény szerint mozog, és közben az AB kar az $A'B'$, a BC kar a $B'C'$ helyzetbe elfordul. Ha az $A'S'D'$ háromszög $S'D'$ oldala párhuzamos az y koordináta-tengellyel, $A'C'$ oldala pedig $\eta = \eta(t)$ szöget zár be az x tengellyel,

$$\eta(t) = \frac{\pi}{2} - \phi(t) - \psi(t). \quad (3)$$

Az η szög változását jellemző $\kappa(t)$ szögsebesség

$$\kappa(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt} - \frac{d\psi(t)}{dt}. \quad (4)$$

Az egyes elemek mozgásjellemzői:

a. Az M és m tömegek a $dx(t)/dt$ és $dy(t)/dt$ sebességösszetevőkkel pillanatnyi haladó mozgást végeznek.

b. Az M tömeg az S' pont körül az $L(t) - r(t)$ sugáron, $\kappa(t)$ szögsebességű pillanatnyi körmozgással kering.

c. Az m tömeg az S' pont körül az $r(t)$ sugáron, $\kappa(t)$ szögsebességű pillanatnyi körmozgással kering.

d. A θ tehetetlenségi nyomatékú M tömeg alap-helyzetéhez képest $\psi = \psi(t)$ szöggel, azaz a $d\psi(t)/dt$ szögsebességgel elfordul.

A rendszer teljes mozgási energiája az a.–d. elemekből tehát

$$E = (M + m) \frac{\left[\frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left[\frac{dy(t)}{dt} \right]^2}{2} + \theta \frac{\left[\frac{d\psi(t)}{dt} \right]^2}{2} + \kappa^2(t) \frac{m r^2(t) + M [L(t) - r(t)]^2}{2}. \quad (5)$$

Alkalmazva a $d\phi(t) = \omega(t)$ helyettesítést és a (2) összefüggést, valamint bevezetve a

$$\begin{aligned} \psi(t) &= q_1 \\ x(t) &= q_2 \\ y(t) &= q_3 \end{aligned} \quad (6)$$

generalizált koordinátákat, a mozgási energia (5) egyenlete

$$E = (M + m) \frac{\dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2}{2} + \theta \frac{\dot{q}_1^2}{2} - \left[\omega(t) + \dot{q}_1 \right]^2 \frac{m M^2 L^2(t) + M \left[L(t) - \frac{M L(t)}{m + M} \right]^2}{(m + M)^2}. \quad (7)$$

A Lagrange-féle

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial E}{\partial q_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

másodfajú mozgásegyenletet a generalizált koordinátákra felírva

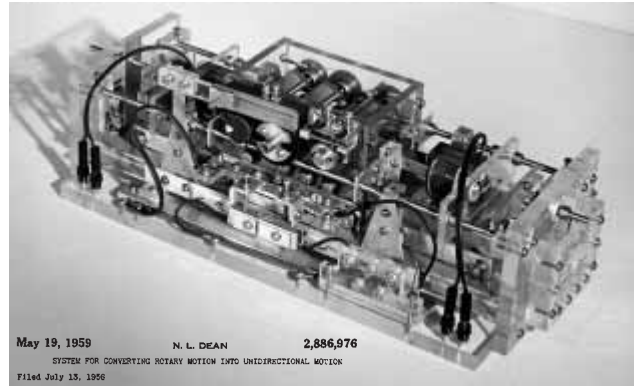
$$\begin{aligned} \frac{2 m M L(t)}{M + m} \left[\frac{d}{dt} \psi(t) + \omega(t) \right] \frac{d}{dt} L(t) + \\ + \frac{\theta M + \theta m + m M L^2(t)}{M + m} \frac{d^2}{dt^2} \psi(t) + \\ + \frac{m M L^2(t)}{M + m} \frac{d}{dt} \omega(t) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$(m + M) \frac{d^2}{dt^2} x(t) = 0 \quad (10)$$

$$(m + M) \frac{d^2}{dt^2} y(t) = 0 \quad (11)$$

A (9)–(11) differenciálegyenletek formális megoldásai a kezdeti feltételektől függő $C_1 \dots C_6$ állandókkal:

$$\psi(t) = \int \frac{-\omega(t) L^2(t) M m + C_1}{m M L^2(t) + \theta m + \theta M} dt + C_2 \quad (12)$$



5. ábra. Münchhausen báró, egy tibeti láma és egy közismert inerciahajtómű modellje.

$$x(t) = C_3 t + C_4 \quad (13)$$

$$y(t) = C_5 t + C_6 \quad (14)$$

A (10)–(11) és (13)–(14) összefüggésekkel tehát formálisan is igazolódott a józan mechanikai feltételezés: a rendszer tömegközéppontjának nincs a mechanizmus mozgásából adódó gyorsulása, vagyis a tömegközéppont vagy nyugalomban van, vagy egyenes vonalú, egyenletes mozgást végez [5]. Az esetleges haladó mozgás azonban független a mechanizmus elemeinek mozgásaitól.

Münchhausen báró aligha rántotta ki saját hajánál fogva önmagát és lovát a mocsárból. A vizsgált mechanizmus misztikus keleti analógiája, az imamalmát forgató láma levitációja dinamikailag úgyszintén kétséges. Ám efféle akadékoskodások a találmányi hivatalok szakembereit gyakran nem befolyásolják...

Irodalom

1. <http://www.google.com/patents>
2. <http://www.patents.com/>
3. <http://www.freepatentsonline.com/>
4. Egely Gy.: *Kitörés a jövőbe (Tértechnológia)*. Kornétás Kiadó, Budapest, 1995.
5. Mutnyánszky Á.: *Kinematika és kinetika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
6. Terplán Z.: *Fogaskerék bolygóművek*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
7. Laczik B.: A cometarium mechanizmus. *Fizikai Szemle* 58/2 (2008) 50–54.
8. B. Laczik: Design and Manufacturing of Non-Circular Gears by Given Transfer Function. *Proc. of ICT 2007*. Miskolc (2007) 101–109.

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2010. évi Küldöttközgyűlése

Mint előző számunkban már hírt adtunk róla, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2010. május 15-én, szombaton 10.00 órai kezdettel tartja Küldöttközgyűlését az Eötvös Egyetem Északi tömbjének É-0.81 termében.

A közgyűlési bevezető előadását *Csörgő Tamás* (MTA KFKI RMKI és Harvard Egyetem) tartja *A CERN LHC kísérleteinek helyzete – magyar szemmel, amerikai tapasztalatok fényében* címmel.

HÍREK ITTHONRÓL

Kitüntetések

A Magyar Köztársaság elnöke – a miniszterelnök előterjesztésére – nemzeti ünnepünk, március 15., az 1848–1849-es forradalom és szabadságharc kezdetének, a modern parlamentáris Magyarország megszületésének napja alkalmából a *Széchenyi-díjat* adományozta

– a kondenzált anyagok fizikája számos területén, többek között az alacsonydimenziós rendszerek, magas hőmérsékletű szupravezetők különleges elektrontranszportja és a fullerének kísérleti vizsgálatában iskolateremtő kutatásaiért, valamint a nemzetközi szintű mérnökfizikus képzés létrehozása érdekében végzett tevékenységéért *Mihály György* fizikusnak, az MTA rendes tagjának, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Fizikai Intézete tanszékvezető egyetemi tanárának;

– az enzimek stabilitása, flexibilitása és működése közötti összefüggések feltárásában végzett négy évtizedes tudományos és kutatói munkásságáért, tudományos-közéleti tevékenysége elismeréseként *Závodszky Péter* biofizikusnak, az MTA rendes tagjának, az MTA Szegedi Biológiai Központ Enzimológiai Intézet igazgatójának, kutató professzornak.

A Magyar Köztársasági Érdemrend lovagkeresztje kitüntetést kapta az iparcentrikus egyetemi innováció a nemzetközi nagyvállalatokkal való – elsősorban az optikai technológiákhoz kapcsolódó – együttműködés terén elért eredményeiért, valamint az ipar-orientált doktoranduszképzés érdekében végzett úttörő tevékenységéért *Richter Péter* fizikus, a BME Atomfizika Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára.

A Magyar Köztársasági Arany Érdemkereszt polgári tagozat kitüntetésben részesült

– *Hamvas István*, a Paksi Atomerőmű Zrt. műszaki vezérigazgató-helyettese, a Paksi Atomerőműben végzett több évtizedes eredményes műszaki-, tudományos tevékenysége elismeréseként;

– *Zoletnik Sándor*, az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet főosztályvezetője, a hazai fúziós kutatások fejlesztésében, a lítiumnyalábokkal végzett plazmafizikai kutatásokban elért kimagasló eredményiért.

Gyimesi Zoltán-díjat vehetett át *Holló Előd*, a Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet Kft. igazgatója, a nukleáris biztonság fejlesztése érdekében végzett kimagasló tevékenysége elismeréseként.

Marx Emlékelőadás 2010

Az ELTE Fizikai Intézet és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2010. évi Marx György Emlékelőadását az Ortway-kollokvium keretében 2010. május 20-án du. 3 órakor *John Carr*, a Centre de Physique des Particules de Marseille professzora tartja. Angol nyelvű előadásának címe: *Exploring the Sky from the Depths of the Sea (Neutrino Astronomy with ANTARES)*.

Az előadás előzetes tartalmi összefoglalása: A klasszikus csillagászat a látható fényt kibocsátó objek-

tumok megfigyelésére volt képes. Az elmúlt évszázadban a klasszikus csillagászat tartományát a rádióhullámoktól a gamma-sugárzásig terjedő teljes elektromágneses spektrumra kiterjesztette. A sok-hullámhosszú csillagászzal korábban ismeretlen csillagászati objektumokat fedeztek fel, amelyek legismertebbjei az aktív galaxismagok és a gamma-kitörések. A neutrínó-csillagászat célja, hogy újabb „hírhozők” révén kiterjessze a megfigyeléseket.

Az új kutatási terület húsz évvel ezelőtt a szibériai BAIKAL és az antarktisi AMANDA kísérletekkel indult. A közelmúltban épült meg és kezdte meg megfigyeléseit a Földközi-tengerben az ANTARES neutrínó-teleszkóp. Az előadás az ANTARES első megfigyeléseit mu-

tatja be. Emellett a mélytengeri környezet vizsgálatának néhány egyedülálló eredményét is bemutatja, amelyet a berendezés különleges elhelyezése tett lehetővé.

Az előadás helye az ELTE TTK Ortway-terme (XI. Pázmány Péter sétány 1/A, 0.81 terem).

Pályázat kísérleti fizikából

A Szegedi Tudományegyetem TTK Kísérleti Fizikai Tanszéke az ELFT Csongrád megyei Csoportja támogatásával 2010 őszén rendezi meg kísérletes versenyét *Építsünk hőerőgépet, hőszivattyút vagy hűtőgépet* tárgykörben, Szegeden. Középiskolás diákok pályázhatnak (1 vagy 2 fő) olyan dolgozattal, amelyben leírják a bemutatandó kísérlet lényegét, az alkalmazott módszereket, méréseik eredményeit. A dolgozat maximális terjedelme 10 oldal (ábrákkal és referenciák-

kal együtt). A beküldési határidő 2010. október 15. (SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék, 6720 Szeged, Dóm tér 9., *Szatmári Sándor* egyetemi tanár címére). A legjobb pályamunkák készítői meghívást kapnak a novemberi kísérletes bemutatóra a SZTE Kísérleti Fizikai Tanszékére. A nyertesek könyvtalványt és könyvjutalmat kapnak. Érdeklődni *Bobus János* egyetemi tanársegéd címén lehet, e-mail: jbohus@physx.u-szeged.hu, telefon: 62/544-046.

Hazai kutatóműhelyekből

Az MTA KFKI-RMKI csillebérci épületében működik Magyarország legerősebb tudományos célra használt csúcserendezése.

– Az emberi génállomány első szekvenálása 13 évet vett igénybe, és 3 milliárd dollárba került. Ma 7 nap alatt készülnek el a feladattal, és a felhasznált gép ára sem haladja meg a 10 000 dollárt. Sőt, szolgáltatásként 1500 dollárért ma bárki elkészítheti saját géntérképét. Ennek köszönhetően a biológusok elképesztő adatmennyiséghez jutottak. A tárolás már megoldott, de az eredmények feldolgozása a világ szuperszámítógépei által biztosított kapacitás 20–30 százalékát emészt fel. A jelenlegi módszerekkel mégis csupán tizedannyi génösszefüggést sikerült feltárnunk, mint amennyit a vizsgálatok száma alapján várhattunk volna. A számítástechnikával támogatott genomika előtt tehát még komoly kihívások állnak – mondta *Szalai Csaba*, a Csertex Kft. és az MTA-SE Molekuláris Immunológiai Kutató-csoportjának tudományos főmunkatársa az új szuperszámítógépet bemutató sajtótájékoztatón.

– A gének szekvenálásával nyert adatok önmagukban nem sokat érnek, annyi következtetést vonhatunk le belőlük, mint egy könyv esetén az abban előforduló betűk gyakoriságáról készült statisztikából. A betegségekre való hajlamot, a gyógyszerek által okozott mellékhatásokat és az ember fizikai megjelenésének részleteit egyszerre több száz vagy ezer gén befolyásolja. Azért van szükségünk hatalmas számítási teljesítményre, hogy párhuzamosan több óriási adathalmazt tudjunk összevetni, és feltárjuk az adott betegséget okozó gének hálózatát. Tulajdonképpen egyfajta fordítás a feladatunk: a fehérjék nyelvének megértése – magyarázta az mta.hu-nak *Falus András* biológus, az MTA rendes tagja.

Az MTA KFKI RMKI csillebérci épületében jelenleg is működik egy nagyteljesítményű számítógépes hálózat, azaz grid, amelynek legfőbb feladata a CERN-beli

Nagy Hadronütköztetőből érkező adatok feldolgozása. A már meglévő szaktudás is szerepet játszott abban, hogy ide, a csillebérci épületbe került az új szuperszámítógép. Az SGI több mint százmillió forintot érő ALTIX ICE nevű eszközt jelenleg is a világ több vezető kutatóintézetében használják. Több mint száz, a magyarországi géphez hasonló berendezést használnak a NASA-ban is.

A gardrób szekrény méretű számítógépházban 64 darab blade, az asztali számítógép alaplapjához hasonló eszköz található, mindegyikben két darab 3 GHz órajelű, négymagos Intel Xeon 5365-ös processzorral. A számítógép akkora hőtermel, hogy a hűtéshez használt víz cseréjéhez egy, az eszköznél lényegesen nagyobb kültéri szivattyútelepre volt szükség. A másfél tonnás eszköz teljesítménye, amely másodpercenként 6500 milliárd 64 bites pontosságú műveletet jelent, nemcsak a nagysebességű processzoroknak és az egy terabájt memóriának, hanem a számítási egységek közötti kommunikáció megnövelt sebességének is köszönhető.

A GENAGRID konzorcium munkája nem állt meg az eszköz beüzemelésével, egy 20 fős, biológusokból és számítástechnikusokból álló szakértői csoport koordinálja és segíti a számítógépet használó tudósok munkáját. Az eszköz iránt nagy az érdeklődés külső kutatócsoportok és a piac szereplői részéről is, a velük való együttműködésért az erre a célra létrehozott Abiomics Europe Kft. a felelős. „Munkánk során két, egymástól távol eső tudományterület találkozását kell zökkenőmentessé tennünk. Segítenünk kell abban, hogy a számítógép azt a választ adja a kérdésekre, amelyre a biológusoknak szüksége van, és olyan formában, hogy azt értelmezni is tudják” – mondta az mta.hu-nak az Abiomics Kft.-től *Temesi Gergely*.

(<http://www.mta.hu/>)

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

A hosszútávú döntéseket hivatott segíteni az MTA újonnan felállított Stratégiai Tanácsadó Testülete

„A Magyar Tudományos Akadémia kulcsszerepet játszik abban, hogy Magyarország megtarthassa és visszahozhassa a fiatal tehetségeket.” (*Bogsch Erik*)

„Az MTA felelőssége különösen nagy a jelenlegi, nehéz időszakban, amikor a szűkös forrásokat kell az ország tudományos fejlődése szempontjából a lehető leghasznosabban felhasználni.” (*Krausz Ferenc*)

„Az elnök informált és befolyásos kívülállókat keresett az MTA stratégiai feladatairól való együttgondolkodáshoz.” (*Szelényi Iván*)

Íme néhány azon gondolatok közül, amelyeket a Magyar Tudományos Akadémia Stratégiai Tanácsadó Testületének tagjai fogalmaztak meg azután, hogy *Pálinkás József* elnök felkérte őket: vegyenek részt az MTA újonnan felállított testületének munkájában. A szakmájukban kiemelkedő elismertségű, jelentős nemzetközi tapasztalatokkal is rendelkező szakértői csapat tagjai az MTA tevékenységét alapjaiban meghatározó, hosszú távú döntések meghozatalában segítenek. A tudósokból és üzletemberekből álló hattagú testület a tervek szerint évente két alkalommal ül össze, hogy iránymutatásaival közvetlenül is hozzájáruljon az Akadémia elnökének döntéseihez, értékelje a köztestület munkáját, és nemzetközi tapasztalatok alapján véleményt mondjon a kutatási irányokról. A Stratégiai Tanácsadó Testület felállításáról a módosított akadémiai törvény alapján a legutóbbi közgyűlésen elfogadott új Alapszabály rendelkezik.

Az MTA alapszabálya szerint a testület tagja egy matematikus-természettudós, egy élettudományokban nemzetközi érdemeket szerzett kutató, egy kiemelkedő társadalomtudós, két vezető az iparban jelentős kutatás-fejlesztési tevékenységet végző vállalat élén és egy elismert pénzügyi-közgazdasági szakember.

Ezen grémium az Akadémia működését alapjaiban meghatározó, hosszú távra ható döntésekben segíti az elnök munkáját figyelemmel a tudományos kiválóságot biztosító érdekmentes, ugyanakkor a hitelesség és eredményesség mellett elkötelezett szemlélet érvényesítésére – indokolta a Stratégiai Tanácsadó Testület létrehozását *Pálinkás József*, az MTA elnöke. A Testület tagjainak felkérése a kinevező elnök mandátumának időtartamára szól, munkájukért külön díjazásban nem részesülnek. Az MTA Stratégiai Tanácsadó Testületének tagjai:

Bogsch Erik, a Richter Gedeon Nyrt. vezérigazgatója; *Bojár Gábor*, a Graphisoft Visual Building Solutions elnöke; *Kopits György*, a Költségvetési Tanács elnöke; *Kúnos György* professzor, az amerikai National Institutes of Health intézetvezetője; *Krausz Ferenc* professzor, a németországi Max Planck Intézet-hálózat intézetigazgatója; *Szelényi Iván*, a Yale Egyetem professzora, az Amerikai Művészeti és Tudományos Akadémia tagja.

(<http://www.mta.hu/>)

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Az űrállomás 2028-ig képes lesz működni

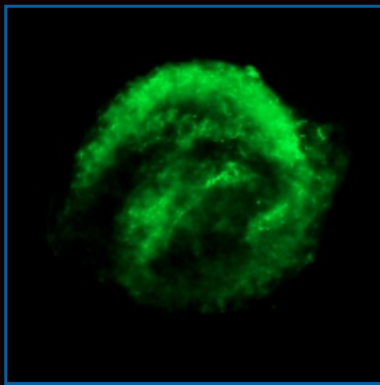
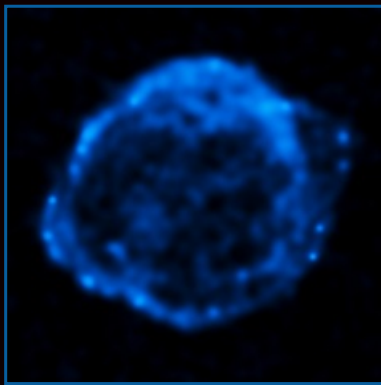
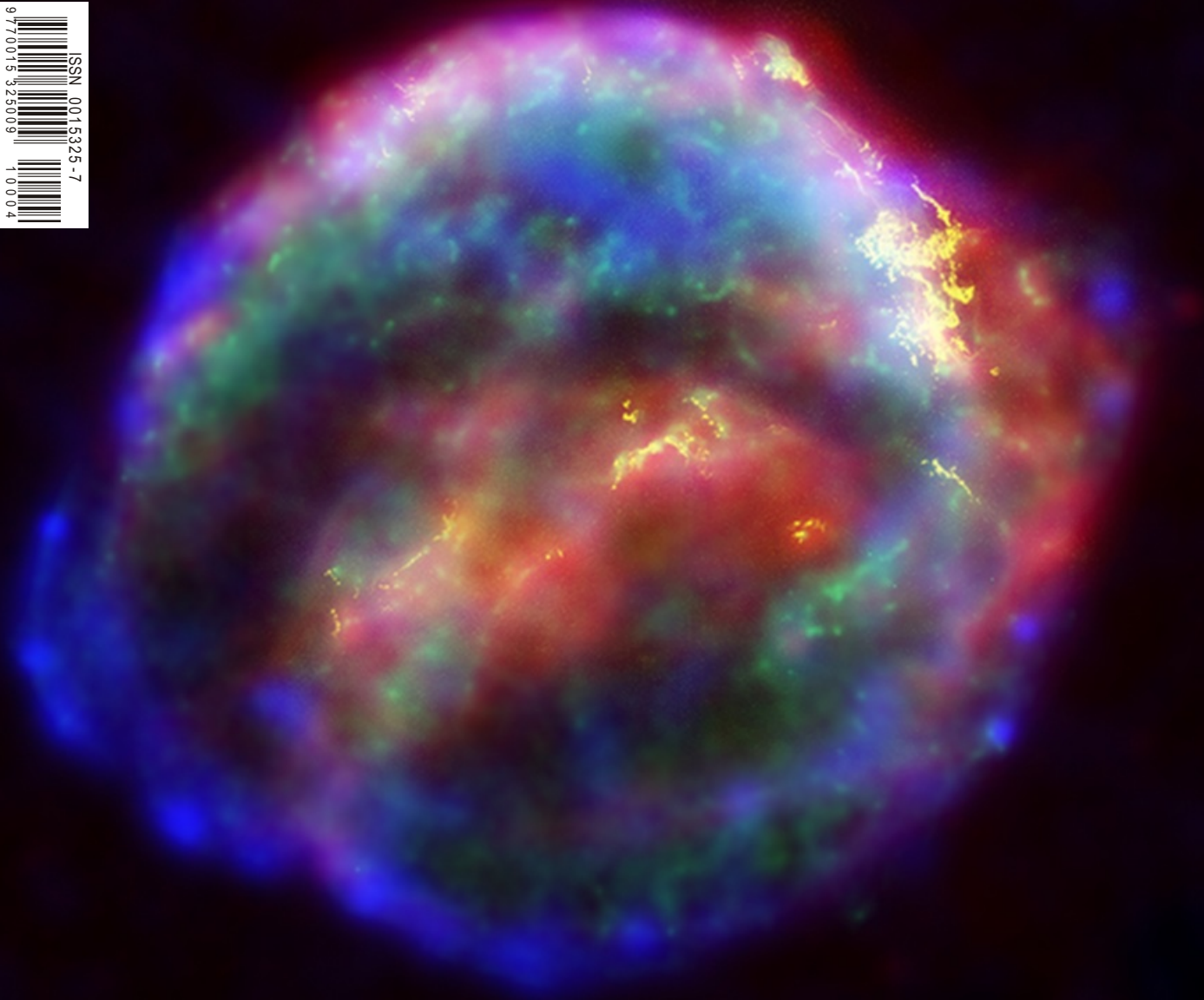
A Nemzetközi Űrállomást (International Space Station, ISS) építő ügynökségek azt vizsgálják, hogy az állomás képes-e 2028-ig működni – jelentette be az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA). Az ISS-partnerek tokiói ülése után kiadott sajtótájékoztató szerint nincs műszaki akadály annak, hogy az űrállomás a tervezett 2015-ös időpont után is működőképes legyen, és jelenleg azon dolgoznak, hogy a határidőt 2028-ig kiterjesszék.

A tokiói találkozón az Egyesült Államok, Kanada, Japán és Oroszország, valamint az ESA űrügynökségeinek vezetői vettek részt. A mintegy 100 milliárd dollár tervezett összköltségű ISS-tervet költségvetési csökkentések, valamint két amerikai űrsikló elvesztése hátráltatta, ez utóbbiaknak különféle alkatrészeket kellett volna alacsony Föld körüli pályára juttatni.

12 éves erőfeszítés után az állomás ebben az évben fog elkészülni, 2015 utáni jövőjét azonban beárnyékolja a NASA költségvetésének esetleges csökkentése, és az ESA attól tart, hogy a sokéves befektetés csak kevés tudományos eredményhez fog vezetni mielőtt az állomást leállítják.

Obama elnök a 2011. évi költségvetés tervezésénél ígéretet tett arra, hogy az ISS amerikai támogatását 2020-ig vagy még azon túl is folytatja – jelentette be a NASA februárban. *Obama* azt is megerősítette, hogy az űrsiklóflotta ez évi működésével kapcsolatban támogatja az embereket szállító kereskedelmi űrmissziókat és leállítja az elődje, *George W. Bush* által 2004-ben bejelentett úgynevezett Constellation programot, miszerint amerikaiak 2020-ig vissza fognak térni a Holdra.

(<http://blogs.physicstoday.org/>)



Chandra-űrtávcső felvételei nagy energiájú (kék, balra) és alacsony energiájú (zöld, jobbra) röntgentartományban

Hubble-űrteleszkóp látható fény tartományában, (sárga, balra) és a Spitzer-űrtávcső infravörös-tartományban (piros, jobbra) készült felvételei

