

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.

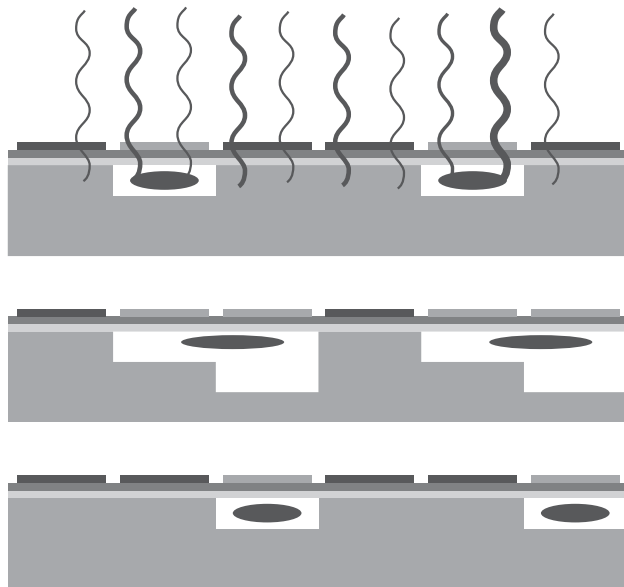
Az ötlet csaknem magától értetődő volt. A buborékmémória elve azon alapult, hogy bizonyos anyagokban parányi rendezett mágneses tartományok (domének) keletkezhetnek, és ezeket külső (mágneses) terekkel rögzített pályán „körbe” lehet mozgatni, így adott helyen a domének mágnesezettségét (a parányi mágnes 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 áramkörti elemekkel elkülönített kapacitások között végezzük a töltések „töltését”, 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.



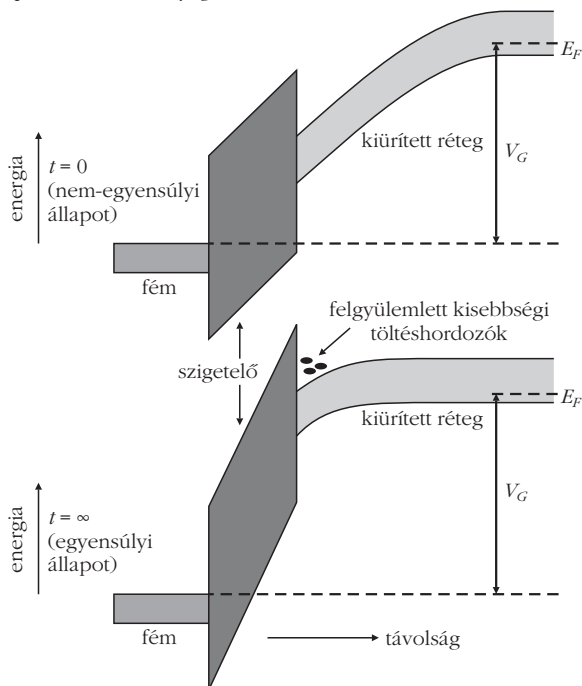
szerben élt tovább, ma már az elnevezést kizárólag ezzel azonosítjuk. Ezt bizonyítja az is, hogy az eredeti szabadalmat a CCD-eszközről, amit a díjazottak nyújtottak be 1970-ben (a tulajdonos a Bell Laboratóriumok volt), egy éven belül visszavonták és felcserélték egy 1971. novemberi új leírással, amely 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 áramköri 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 kommerciális 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 eltároljuk 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 határfoka 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 határfok 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. Képzeljük 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 talákonysággal 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 elolvastva 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 – részletebben 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 gondokkal jártak el a detektorok kiválasztásában. (<http://chandra.harvard.edu/index.html>)

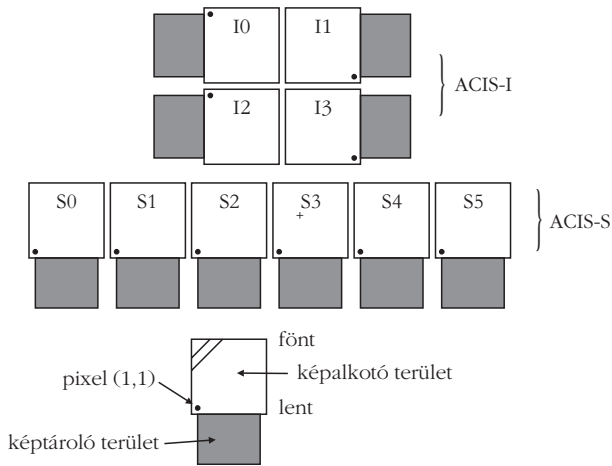
Az űr-méretekből óriás teleszkópok helyett a jövőben valószínűleg kisebb, olcsóbb és az egyes speciális feladatok ellátására szolgáló űrmissziók kerülnek előtérbe. Mi itt a CCD-alkalmazásokat szeretnénk áttekinteni, erre igen jók a fenti, reprezentatív rendszerek. Az egyes missziók honlapját azért mellékeltem, 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 nagytestvére. Ha a tilos sáv keskenyebb, akkor nagyobb a valószínűsége, hogy elektron–lyuk-párok keletkezzenek termikus gerjesztéssel. Hogy ezt a spontán zajt csökkentsék, 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 képalkotó 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.

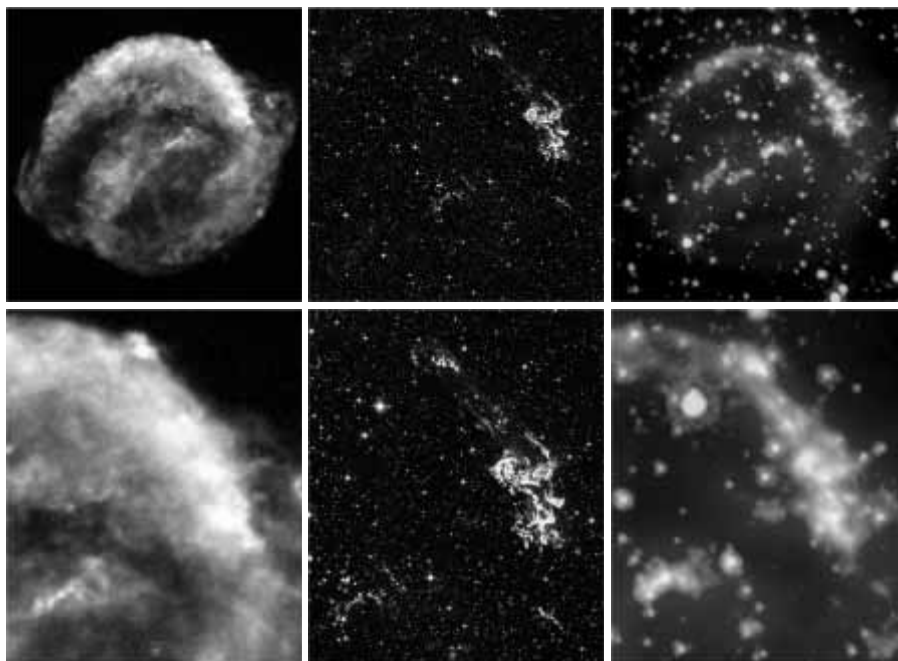
Az ACIS fejlesztése 1990 körül kezdődött, és az együttműködő intézmények (az állami ellenőrzésű Jet Propulsion Laboratory, az MIT és a Penn State Univer-

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 őr távcsövek 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 – őr távcsövek 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 Őrtávcsövek* 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 (*Feltáru a Világegyetemet*).

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 jők 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 becsült 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.