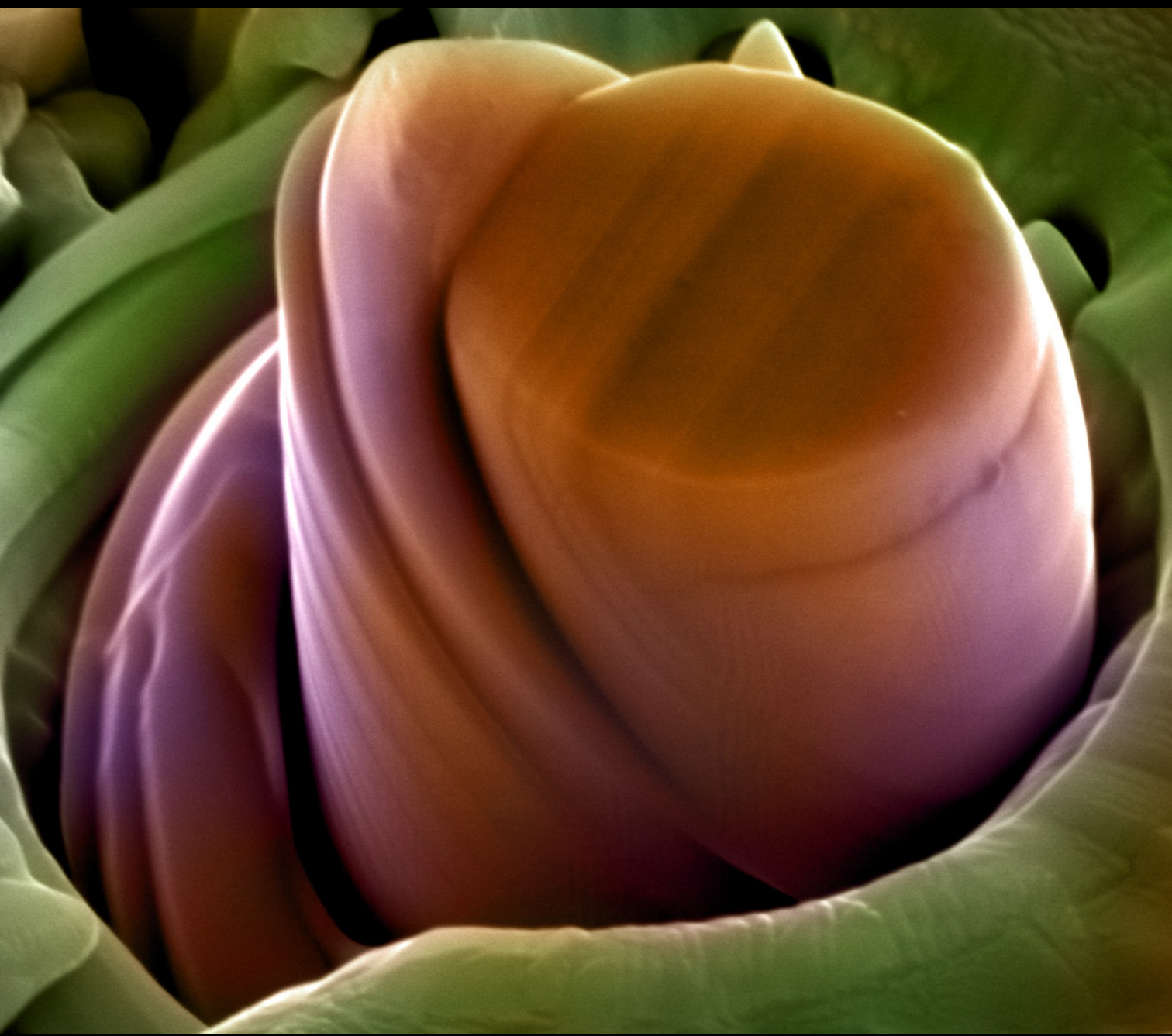
# fizikai szemle



2012/3

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

*Főszerkesztő:*

**Szatmáry Zoltán**

*Szerkesztőbizottság:*

**Bencze Gyula, Czitrovszky 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:*

**Összenyomott mikropillár, a kép teljes szélessége 6 µm-nek felel meg. A mintát készítette Hegyi Ádám, ELTE TTK MSc fizikushallgató, a mikroszkópi képet készítette Ratter Kitti, ELTE TTK MSc fizikushallgató, a képet színezte Kaufmann Balázs, ELTE ITK informatikushallgató.**

## TARTALOM

*Elter József, Eiler János:* Célzott biztonsági felülvizsgálat a paksi atomerőműben 2/2 73

*Hegyi Ádám, Ratter Kitti, Ispánovity Péter Dusán, Groma István:* Mikroméretű minták deformációinak vizsgálata 77

*Martinás Katalin, Huller Ágoston:* Ébredj, mert jön a fekete entrópia! 83

**A FIZIKA TANÍTÁSA**

*Bokor Nándor:* Az ikerparadoxon és a gyorsulás 90

*Jendrék Miklós:* Látható hangok, hallható fények 96

*Kis Dániel Péter, Sükösd Csaba:* XIV. Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Verseny – beszámoló 1. rész 101

*Härtlein Károly:* Kísérletezzünk otthon! 106

Nem mindennapi látogatás a CERN-ben (*Kollányi Nikolett, Balassy Zsombor*) 107

**HÍREK – ESEMÉNYEK** 108

*J. Elter, J. Eiler:* Aimed security control at Paks Nuclear Power Plant 2/2

*Á. Hegyi, K. Ratter, P. D. Ispánovity, I. Groma:* Investigation on deformations of micro size patterns

*K. Martinás, Á. Huller:* Wake up! Black entropy is coming

**TEACHING PHYSICS**

*N. Bokor:* Paradoxon of twins and acceleration

*M. Jendrék:* Visible sound, light which may be heard

*D. P. Kis, Cs. Sükösd:* Report on the XIV. Leo Szilárd Contest in nuclear physics – Part I.

*K. Härtlein:* Physical experiments to be performed at home

**EVENTS**

*J. Elter, J. Eiler:* Gezielte Sicherheitskontrolle am Kernkraftwerk Paks 2/2

*Á. Hegyi, K. Ratter, P. D. Ispánovity, I. Groma:* Untersuchungen an Deformationen von Mustern mikroskopischer Größenordnung

*K. Martinás, Á. Huller:* Wache auf! Die schwarze Entropie kommt

**PHYSIKUNTERRICHT**

*N. Bokor:* Das Paradoxon der Zwillinge und die Beschleunigung

*M. Jendrék:* Sichtbare Töne, hörbares Licht

*D. P. Kis, Cs. Sükösd:* Bericht über den XIV. Leo-Szilárd-Wettbewerb in Kernphysik. Teil I.

*K. Härtlein:* Zu Hause ausgeführte Experimente

**EREIGNISSE**

*Й. Эльтер, Й. Эйлер:* Направленный контроль безопасности на ядерной электростанции Пакш 2/2

*А. Хеди, К. Раттер, П. Д. Ишпановить, И. Грома:* Исследование деформаций узоров микроскопического порядка величин

*К. Мартинаш, А. Гуллер:* Проснись! Чёрная энтропия прибудет

**ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ**

*Н. Бокор:* Парадокс близнецов и ускорение

*М. Ендрек:* Видимый звук, слышний свет

*Д. П. Киш, Ч. Шюкёшд:* Отчет о XIV. студентском конкурсе им. Л. Силарда по ядерной физике. Часть первая

*К. Гэртлейн:* Эксперименты для выполнения дома

**ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ**

**Fizikai Szemle**
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:

paksi atomerőmű

Nemzeti Kulturális Alap

Nemzeti Civil Alapprogram

A FIZIKA BARÁTAI

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
A Mathematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Mathematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította
LXII. évfolyam 3. szám 2012. március

# CÉLZOTT BIZTONSÁGI FELÜLVIZSGÁLAT A PAKSI ATOMERŐMŰBEN 2/2

Elter József, Eiler János
Paksi Atomerőmű Zrt.

A japán fukusimai atomerőmű balesetét követően az Európai Unió összes atomerőművében, így a paksi atomerőműben is a reaktorbaleset tanulságain alapuló biztonsági felülvizsgálatot hajtottak végre. Ezt a célirányos biztonsági felülvizsgálatot közkeletű szóval stressz-tesztnek nevezték. A felülvizsgálat igazolta, hogy a paksi atomerőmű blokkjai teljesítik a tervezési alaphoz tartozó követelményeket, beleértve a belső és külső hatásokkal szembeni védettség kritériumait. Az atomerőmű védettsége a fukusimaihoz hasonló, vizsgált kulcseseményekkel szemben is jó.

Az első részben bemutattuk a célzott biztonsági felülvizsgálat során alkalmazott módszert, értékeltük az atomerőmű földrengésbiztonságát, valamint a külső elárasztásokkal szembeni védettségét. A cikk jelenlegi, második részében sor kerül az atomerőmű ellenálló-képességének vizsgálatára olyan eseményekkel szemben, mint a villamos betáplálás és végső hőelnyelő funkció tartós (több napos) elvesztése, valamint súlyos baleset miatt jelentős radioaktív kibocsátás vagy extrém intenzitású sugárzási tér kialakulása.

## A villamosenergia-betáplálás elvesztése

Az erőmű – a mélységi védelem elvének messzemenő alkalmazásával – felkészült arra, hogy a villamos betáplálás belső okból származó megszűnésének következményeit kezelje, és így eleget tesz a hazai nukleáris biztonsági szabályzatokban előírt megbízhatósági követelményeknek.

A mélységi védelem első szintjeként a külső villamosenergia-hálózat zavara vagy elvesztése esetén a blokk szigetüzemre kapcsoló automatikája leválasztja a blokkokat az országos hálózatról és csökkentett, háziüzemi teljesítményre szabályozza azokat. Akár egyetlen blokk csökkentett teljesítményű üzeme is képes mind a négy blokk háziüzemi fogyasztóit ellátni megfelelő mennyiségű villamos energiával.

További biztonságot jelent, hogy dedikált betáplálási lehetőséget alakítottunk ki a százhalombattai és a litéri erőmű egyik gázturbinájától az atomerőmű teljes feszültség-kimaradásának elhárítására.

Amennyiben a fenti lehetőségek ellenére sem külső forrásból, sem másik blokkról nem lenne villamos energia nyerhető, akkor a blokki biztonsági dízelgenerátorok automatikus indítása biztosítja a villamosenergia-betáplálást a hűtéshez és hűtve tartáshoz. A földrengésálló épületben elhelyezett dízelgenerátorok blokkonként három azonos felépítésű, egymástól teljesen független ágat képeznek. Az alkalmazott hármas redundancia és a redundáns ágak függetlensége együttesen biztosítja a rendszertől megkövetelt funkciók nagy megbízhatósággal történő ellátását és az egyszeres meghibásodások elleni védettséget. A dízelgenerátorok számára tárolt üzemanyag mennyisége legalább 120 órai üzemeléshez elégséges. Az *1. ábra* mutatja a II. kiépítés dízel gépegységét.

A normál betáplálás kiesése esetén a szünetmentes betáplálást akkumulátortelepek biztosítják. Ezek tervezetten 3,5 órán át képesek a méréseket táplálni és a

*1. ábra*. A II. kiépítés biztonsági dízelgenerátora.

szükséges beavatkozások elvégzéséhez energiát biztosítani. Az ezen időtartam alatt üzembe lépő dízelgenerátorok a továbbiakban az akkumulátortelepek töltését is végzik.

Amennyiben bármilyen okból a biztonsági dízelgenerátorok nem indulnának el vagy működésképtelenné válnának, akkor teljes feszültségvesztés alakulna ki, aminek hatására a blokkon az összes váltóáramú fogyasztó leállna, de egyidejűleg automatikus védelmi működéssel a láncreakció is leállna. Villamos betáplálás hiányában sem a hőhordozó felbórozására, sem a blokk üzemszerű lehűtésére nincsen lehetőség. Az üzemzavar-elhárítási utasítás megfelelő alkalmazásával a szekunderköri nyomás az atmoszférába redukáló szelepek nyitásával stabilizálható, csökkenthető.

Névleges teljesítményről induló üzemzavarok esetén villamos betáplálás teljes hiányában mintegy négy és fél órával a feszültségkiesés után a gőzfejlesztők kiürülnek, megszűnik a hőelvitel. Ilyenkor már csak alternatív betáplálási útvonalon és alacsonyabb nyomáson biztosítható a gőzfejlesztők megtáplálása. Ennek sikertelensége esetén a primer körben a nyomás és a hőmérséklet emelkedni kezd. A primer kör lefúvató és biztonsági szelepei korlátozzák a nyomás növekedését, de a lefúvatás hatására a primerköri vízkészlet fogy, az aktív zóna szárazra kerül, megkezdődik a fűtőelem-kazetták túlhevülése. Az aktív zóna sérülése 10 órával a feszültségkiesés után várható.

Villamos betáplálás hiányában a pihentető medence hűtővizének keringtetése is megszűnik. A medencében az intenzív forrás legkorábban 4 óra elteltével indulhat meg. A forrás következtében a vízszint csökken, a kazetták teteje szárazra kerül. Kezdetben üzemi szintet feltételezve a tárolt fűtőelem-kazetták burkolatának sérülése konzervatív elemzés szerint mintegy 19 óra múlva kezdődik meg. A leálláskor szokásos magasabb átrakási szint esetében a sérülés mintegy 25 óra elteltével várható.

A teljes villamos betáplálás elvesztése esetén a beavatkozások sikere, a súlyos-baleseti folyamatok kialakulásának megelőzése azon múlik, hogy a megfelelő intézkedéseket időben végre lehet-e hajtani. A fentebb megadott időtartamok alatt kell a kezelőknek helyreállítani a villamos betáplálást vagy alternatív áramforrást biztosítani a folyamat súlyos balesetté fejlődésének megakadályozására.

A felülvizsgálat céljának megfelelően a rendelkezésre álló kezelési utasítások, rendszertechnikai ismeretek és egyéb üzemeltetői tapasztalatok alapján felmértük és értékeltük mindazokat a preventív balesetkezelési lehetőségeket, amelyeket a külső és belső villamos betáplálás tartós kiesése esetén a paksi atomerőműben alkalmazni lehet.

A telephelyen rendelkezésre álló, blokkok közötti villamos kapcsolatok tekintetében megállapítható, hogy megfelelő átkapcsolási lehetőségek állnak rendelkezésre, amennyiben valamely blokk háziüzemi energiaellátást biztosít a külső hálózattól függetlenül, vagy bármely blokk biztonsági dízelgenerátorainak legalább egyike üzemel.

Felmértük a mobil és tartalék dízelgenerátorok alkalmazásának lehetőségét. A telephelyen kisebb dízel aggregátok rendelkezésre állnak, de ezek csak lokális áramellátási feladatokra használhatók. Megállapítottuk, hogy a blokkonként rendelkezésre álló 1-1 baleseti mobil dízelgenerátor teljes feszültségvesztés esetén képes ellátni azokat a mérő, ellenőrző és beavatkozó rendszereket, amelyekkel a súlyos balesetet megelőző, következményeit csökkentő beavatkozások elvégezhetők. Ezek a dízel aggregátok biztonsági betápláló rendszerek, hűtővízszivattyúk megtáplálására nem alkalmasak, ezért a baleseti helyzetek kezelésére további, független, nagyobb teljesítményű, védett helyen telepített, az atomerőmű egyéb szolgáltatásaitól függetlenül üzemeltethető, léghűtéses baleseti dízelgenerátor létesítését irányozzuk elő a javító intézkedések között.

## A hűtés lehetőségének elvesztése

A végső hőelnyelő elvesztésének megelőzésében kulcsszerepet játszó biztonsági rendszerek kialakításánál is megfelelően alkalmazták a biztonsági filozófia alapvető elvét, a mélységi védelem koncepcióját.

Ezek a rendszerek eleget tesznek a hazai nukleáris biztonsági szabályzatokban előírt megbízhatósági követelményeknek, ugyanis kiépítésük kellő redundanciával történt, egyes alrendszereik függetlenek egymástól, így mind az egyszeres, mind a közös okú meghibásodás ellen megfelelő védettséggel rendelkeznek.

A végső hőelnyelő elvesztése esetén a zóna hűtése a telepített rendszerek közül csak a *2. ábrá*n is látható, ikerblokkonként 3-3 darab, az udvartéren elhelyezett földrengésálló tartályokban tárolt sótalanvíz-készlettel biztosítható bizonyos ideig. A jelenlegi előírások alapján tárolt készlet több napra elegendő a hűtés ellátásához.

Amennyiben valamilyen külső oknál fogva megszűnik a vízkivétel a Dunából leágazó hidegvíz csatornából, a rendszerek vízellátása megszűnik. A biztonsági hűtővízellátás megszűnése miatt a blokkok leállnak, leállnak a primerköri szivattyúk, így a primer kör hűtése természetes cirkulációs üzemmódban történik. A hűtővíz elvesztése egyben azt is jelenti, hogy

*2. ábra*. A II. kiépítés sótalanvíz-rendszerének tartályai.

*3. ábra.* A mobil vízvételi rendszer telepítése.

a gőzfejlesztőkben keletkező gőz elvitele csak a korábban már leírt módon az atmoszférába történhet, így a rendszerben lévő vízkészlet folyamatosan fogy, de értékelésünk szerint így is több mint 3 napig biztosítható a blokkok hűtése.

A legfontosabb alternatív biztonsági hűtővíz-betáplálás a tűzivíz-rendszer felől nyerhető. Ennek elsődleges vízforrása a parti szűrésű kúttelep, amely 810 $m^3/h$ vízmennyiséget képes szolgáltatni 8 bar nyomáson. Ezen kívül rendelkezésre áll a földrengésálló kivitelű dízel szivattyúkból álló tűzivíz-szivattyútelep 4000 $m^3$ vízkészlettel, amelynek forrása az 1–2. blokki melegvízcsatorna. A tűzivíz-rendszer a villamos betáplálás biztosításával időkorlát nélkül képes a gőzfejlesztők hűtését ellátni alacsony nyomáson.

Tekintve, hogy a végső hőelnyelő elvesztése miatt megszűnő biztonsági hűtővíz-ellátás szükséges a biztonsági villamos betáplálás dízelgenerátorainak üzemehez, ezért ilyen esetekben a folyamat a villamos betáplálás teljes elvesztésére is vezethet. A végső hőelnyelő és a teljes villamos betáplálás együttes elvesztése esetén a beavatkozások sikere, a súlyos-baleseti folyamatok kialakulásának megelőzése azon múlik, hogy a megfelelő intézkedéseket és a lehűtés feltételét képező felbórozást időben végre lehet-e hajtani. A fentebb hivatkozott pontban szereplő időtartamok alatt kell a kezelőknek végrehajtani mindazokat a beavatkozásokat, amelyekkel az alább részletezett alternatív hűtési vagy hűtővíz-betáplálási lehetőségeket biztosíthatják.

Az aktív zóna hűtését szolgáló gőzfejlesztők táplálásának végső forrását a sótalanvíz-készlet képezi. A sótalanvíz-tartályok leürülését követően a személyzet a rendelkezésre álló üzemzavar-elhárítási utasítások szerint jár el, tevékenységének célja folyamatos alternatív betáplálás biztosítása a gőzfejlesztőkbe. Ennek egyetlen lehetősége egy független külső csatlakozáson keresztül az ikerblokk mindkét blokki kiegészítő üzemzavari tápvízrendszerének megtáplálása. Ez a csatlakozás a kiegészítő üzemzavari tápvízrendszer nyomóági kollektorán jelenleg is megtalálható.

A felülvizsgálat céljának megfelelően a rendelkezésre álló kezelési utasítások, rendszertechnikai ismeretek és egyéb üzemeltetői tapasztalatok alapján felmértük és értékeltük mindazokat a preventív baleset-kezelési lehetőségeket, amelyeket a végső hőelnyelő tartós elvesztése esetén, elsősorban a zónasérülés, a pihentető medencében tárolt üzemanyag sérülésének elkerülése, vagy a kiterjedt zónaolvadási folyamat megállítása és a konténmentsérülés elkerülése érdekében a paksi atomerőműben alkalmazni lehet.

A villamos betáplálás elvesztésével kombinált esetben a tűzivíz-rendszer csak korlátozottan alkalmas a hőelvitel megvalósítására elsősorban azért, mert a parti szűrésű szivattyútelep villamos betáplálás nélkül nem működik. Ezért a feszültségvesztés és a végső hőelnyelő egyszerre történő elvesztésének esetére javító intézkedéseket fogalmaztunk meg. Megoldjuk a parti szűrésű kúttelep búvárszivattyúinak villamos megtáplálását baleseti helyzetekre, megfelelő védettségű telepített, vagy mobil dízelgenerátor segítségével.

Szintén megfelelő és jelenleg is rendelkezésre álló megoldás mobil vízkivétel megvalósítása a Dunából, vagy az erőmű mellett található halastavakból. Ezt a feladatot a balesetelhárítási szervezet a felülvizsgálat során gyakorolta, amit a *3. ábra* mutat. A létesítményi tűzoltóság a telephelyen rendelkezésre álló eszközökkel mintegy 40 perc alatt mobil szivattyúkból álló kaszkáddal kiépítette a Dunától a közel 1 km-es vízbetáplálási útvonalat.

A pihentető medencék jelenleg nem rendelkeznek külső, független vízbetáplálási lehetőséggel. Az üzemzavar-elhárítási utasítás szerint a vízpótlás külső energiaforrás nélkül a lokalizációs torony felső tálcáinak gravitációs leürítésével biztosítható. Amennyiben egy időben a reaktoron is baleseti folyamat zajlik, a lokalizációs torony tálcáin tárolt vízkészlet más célra is szükséges lehet. Ezenkívül a leürítési útvonalon található armatúrák kézi működtetése a kialakuló dózisviszonyok függvénye. A pihentető medence kívülről történő vízpótlásának biztosításához földrengésre, külső veszélyekre megfelelően méretezett, udvartéri flexibilis csatlakozású betápláló vezetéket kell a későbbiekben kiépíteni.

## Súlyosbaleset-kezelési lehetőségek

A reaktorban lejátszódó súlyos baleseti folyamatok tekintetében a korábbi vizsgálatok teljes körűek voltak (beleértve a leállított reaktorban bekövetkező baleseteket). A kockázat mértéke elfogadható, megfelel a hazai és nemzetközi elvárásoknak. A baleseti folyamatok a VVER-440 reaktorokra jellemzően viszonylag hosszú idő alatt játszódnak le. A kockázat mértékét jelentősen csökkenti a közelmúltban bevezetett súlyosbaleset-kezelés, amely dedikált rendszerek beépítésével és megfelelő utasításrendszerrel segíti a baleset következményeinek csökkentését.

A paksi atomerőműben a közelmúltban elvégzett súlyosbaleset-kezelési átalakítások célja volt, hogy egy feltételezett súlyos baleset után várható folyamatok nagy eséllyel megállíthatóak legyenek, a blokk biztonságos, lehűtött állapotba kerüljön. A súlyos balesetek kezelésének stratégiáját a valószínűségi

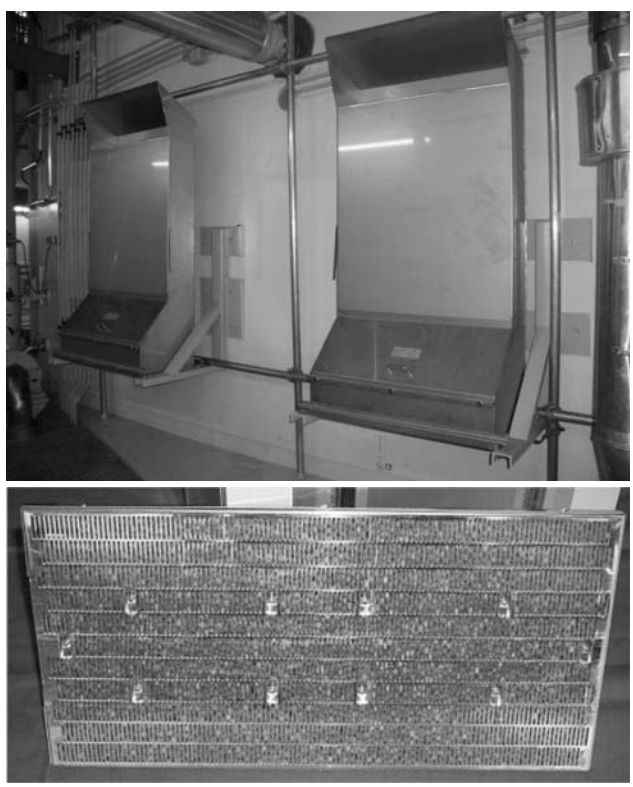
biztonsági elemzések alapján határoztuk meg. Olyan intézkedéseket, átalakításokat hajtottunk végre, amelyek a súlyos baleset bekövetkezése után nagy valószínűséggel fellépő, a radioaktív kibocsátás mértékét jelentősen növelő folyamatok megelőzését és/vagy azok következményeinek csökkentését eredményezik. A súlyosbaleset-kezelés blokkfüggetlen, így négy reaktortartályban egyszerre bekövetkező fűtőelemsérülés esetén is alkalmazható.

A súlyosbaleset-kezelés két kulcseleme a Súlyosbaleset-kezelési Útmutatók bevezetése és az alábbi műszaki átalakítások kivitelezése:

– a reaktortartály külső hűtésének lehetővé tétele,
– hidrogénkezelés passzív autokatalitikus rekombinátorok beépítésével,
– pihentető medence csőtörésből adódó hűtőközeg vesztésének megakadályozása,
– súlyos-baleseti dízelgenerátor telepítése kijelölt berendezések energiaellátásához,
– súlyosbaleset-kezelési mérőrendszer kiépítése.

A különböző súlyos balesetek során a felhevülő fűtőelem burkolatát alkotó cirkónium 30–50%-a a vízgőz közegben oxidálódik, az ebből a folyamatból felszabaduló hidrogén mennyiségét meghatároztuk. A konténmenten belüli nagy hidrogénkoncentráció kialakulásának megelőzése érdekében balesetkezelési intézkedésként passzív rekombinátorokat építettünk be a blokkokba, figyelembe véve a várható hidrogéneloszlásra vonatkozó korábbi elemzéseket. A *4. ábrá*n látható 30 darab nagyteljesítményű, passzív autokatalitikus rekombinátorpár segítségével biztosítható, hogy a súlyosbaleseti folyamatban esetleg felszabaduló hidrogén mennyisége folyamatosan csökkenthető legyen, és ne alakulhassanak ki olyan robbanásszerűen lejátszódó folyamatok, amelyek a nagy nyomás miatt a hermetikus tér épségét veszélyeztetnék. Bizonyos esetekben a lokális turbulens égés nem kizárható, de az ezek által okozott nyomások maximális értékei a konténment tervezési nyomása alatt vannak és jelentősebb biztonsági tartalék van a számított égési nyomások és a konténment sérülésére vezető nyomásérték között.

*4. ábra.* Egy rekombinátorpár a beépítési helyén a hermetikus térben, valamint a rekombinátorban elhelyezett egyik palládium-kazetta.



A reaktorcsarnokban kialakuló hidrogén-koncentrációt korábban csak egy nyitott reaktor balesetére vizsgáltuk. Ilyenkor a felgyülemlő hidrogén koncentrációja a reaktorcsarnokban semmiképpen sem éri el a gyulladáshoz szükséges értéket. A célzott biztonsági felülvizsgálat keretében azt az esetet is elemeztük, amelynél egy-egy kiépítésen két pihentető medencében, egy átrakás alatt lévő nyitott, valamint egy zárt reaktorban egy időben alakul ki súlyos-baleseti folyamat. A konzervatív elemzési eredmények szerint ebben az esetben a reaktorcsarnokban a közeg gyúlékony lehet mintegy 2 óra időtartamban, a térfogat 40%-ában. Részletesebb, kevésbé konzervatív elemzéseket kell végezni a javító intézkedések megalapozásához.

A pihentető medence súlyos balesetéhez vezető folyamatokat is meghatároztuk. Tekintettel arra, hogy a pihentető medence a konténmenten kívül helyezkedik el, súlyos balesete esetén az esetleges kibocsátás mértéke igen jelentős a konzervatív feltételek mellett végzett számítások szerint. A bekövetkezés gyakoriságát a nemrégiben bevezetett preventív intézkedésekkel kellően alacsonyra csökkentettük. A kulcsesemények bekövetkezése esetén is késleltethető a fűtőelemek sérülése a lokalizációs torony vizének gravitációs leürítésével. További balesetkezelési lehetőséget jelent az említett, kívülről történő vízpótlást célzó javító intézkedés.

Az elvégzett vizsgálatok szerint a radioaktív hulladékok tároló rendszereinek meghibásodása, sérülése nem járna nagy radioaktív kibocsátással.

A reaktortartály külső hűtésével – amelyre vonatkozóan az átalakításokat a blokkok egy részén már végrehajtottuk, a többinél a következő években elvégezzük – a zónaolvadék a reaktortartályon belül tartható, és így sem gőzrobbanás, sem a zóna-beton kölcsönhatás okozta alaplemez-átégés nem következhet be.

A súlyos baleset késői szakaszában a konténmenten belüli nyomás növekedhet. A konténment szivárgásának függvényében a nyomás 3–8 nap alatt meghaladja a 3,35 bar értéket, amelynél a konténment sérülése 5% valószínűséggel várható. Amennyiben addig nem történik valamilyen nyomáscsökkentés, akkor a konténment megsérülhet és nagy mennyiségű radioaktív anyag kerülhet a környezetbe. Erre vonatkozóan balesetkezelő intézkedést dolgozunk ki.

A súlyosbaleset-kezelés bevezetésével a nagy radioaktív kibocsátás esélye jelentősen csökken, várhatóan nem haladja meg az új építésű blokkokra vonatkozó szigorúbb elvárásokat sem.

## A telephelyi veszélyhelyzet-kezelés

Az atomerőmű alapvetően rendelkezik a veszélyhelyzetek (nukleáris és hagyományos) kezeléséhez szükséges személyi és tárgyi feltételekkel és erőforrásokkal.

A felülvizsgálat megállapította, hogy a veszélyhelyzeti és a súlyosbaleset-beavatkozási képesség a nemzetközi ajánlások és a nemzeti szabályozások követelményei alapján épül fel. A felkészülés időszakában készenléti rendszer és eszközök, illetve riasztással aktiválható szervezet biztosítja a beavatkozó képességet. A felkészültség biztosításának irányelvei és a konkrét tervezési alapjai a nukleáris baleseti események mellett egyéb veszélyhelyzetek felszámolására is biztosítottak. Normál időszakban kötelező ellenőrzési, képzési és gyakorlási rendszer eredményezi a beavatkozási képesség fenntartását.

A paksi atomerőműben működő balesetelhárítási szervezet jelenlegi formájában nem teljesen alkalmas a tervezési alapján túli esetek, azaz a több blokkon egyidejűleg bekövetkező balesetek kezelésére. Több-blokkos súlyos baleset esetén a jelenlegi szervezet még több váltást figyelembe véve sem tudja biztosítani a folyamatos tevékenységet, az elhárítási feladatokra rendelkezésre álló állomány létszáma elhúzódó időtartamú tevékenység esetén nem elegendő. Ilyenkor a balesetelhárítási szervezet külső erők bevonásával tudja kezelni a helyzetet. Bizonyos tervezésen túli külső események olyan mértékű személyi és anyagi kárt okozhatnak, hogy a helyzet kezelése mindenképpen az országos hatáskörű szervezetek közreműködését igényli.

A balesetelhárítási tevékenységeket úgynevezett védett vezetési pontról lehet irányítani, annak elvesztésekor az irányítási feladatokat a tartalék vezetési pontról kell végrehajtani, ahol az irányítási és kommunikációs feltételek jelenleg nem teljes értékűek. Ezért a védelmi követelményeknek (földrengés, sugárzás, környezeti hőmérséklet stb.) megfelelő, az irányítás és a kommunikáció eszközeit tekintve a védett vezetési ponttal egyenértékű tartalék vezetési pont létesítését határoztuk el.

✧

A paksi atomerőműben végrehajtott célzott biztonsági felülvizsgálat igazolta, hogy az erőmű blokkjai teljesítik a tervezési alaphoz tartozó követelményeket, beleértve a belső és külső hatásokkal szembeni védettség kritériumait. Az atomerőmű védettsége a vizsgált kulcseseményekkel szemben is jó.

A vizsgálatok alapján rögzíthető volt, hogy a fukusimai tapasztalatok feldolgozása és a célzott biztonsági felülvizsgálat eredményei azonnali beavatkozásokat nem tesznek szükségessé.

A felülvizsgálat emellett arra is rámutatott, hogy több lehetőség kínálkozik a tartalékok növelésére a kis valószínűségű, de a tervezési alapon túli terheléseket eredményező hatásokkal vagy azok következményeivel szemben.

A célzott biztonsági felülvizsgálat során különböző javító intézkedések lehetőségeit tártuk fel. A javító intézkedések négy különböző kategóriába sorolhatóak:

– külső hatásokkal (földrengés, elárasztás) szembeni védettség fokozása,
– kezelési utasítások módosítása, újak készítése,
– meglévő és alternatív villamos betáplálási vagy hűtési lehetőségek biztosítása és
– súlyos balesetek következményének csökkentése.

A javító intézkedések végrehajtását követően a villamos betáplálás és a végső hőelnyelő, valamint a pihentető medencék hűtésének tartós elvesztése csaknem lehetetlenné válik. Ezért a súlyos balesetek bekövetkezésének valószínűsége az eddigi alacsony értékhez képest is radikálisan csökken. Az extrém külső események ugyan továbbra is okozhatnak károkat a telephelyen, de e károk biztonsági hatása jelentősen csökken. A több-blokkos balesetek esélye még a jelenlegi rendkívül kis értékhez képest is elhanyagolhatóvá válik.

# MIKROMÉRETŰ MINTÁK DEFORMÁCIÓINAK VIZSGÁLATA

Hegyi Ádám, Ratter Kitti, Ispánovity Péter Dusán, Groma István
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Anyagfizikai Tanszék

A kristályos anyagok képlékeny alakváltozását mikroszkopikus alapon leíró elmélet a 20. század elején jött létre, amikor 1934-ben *Orován, Polányi* és *Taylor* bevezette a diszlokáció fogalmát és sikeresen alkalmazta azt a képlékeny alakítás kvantitatív vizsgálatára. A diszlokáció vonalszerű rácshiba, amely sok tekintetben hasonlít a folyadékok áramlásakor kialakuló örvényekhez. Alapvető különbség azonban, hogy amíg a folyadékörvény egy vektortér (nevezetesen a sebességtér) örvényessége, addig a diszlokáció egy tenzortér (az elasztikus disztorzió) örvényessége. Ezért tulajdonságai lényegesen bonyolultabbak. Ezekre még a későbbiekben részletesebben kitérünk.

Az évek során sikerült a diszlokációk feszültségterét és kölcsönhatásukat is meghatározni, ezáltal lehetővé vált a kristályos anyagok deformáció közben történő mozgásának leírása. Minél több diszlokációt tartalmaz az anyag, annál „keményebb", hiszen a diszlokációk akadályozzák egymást mozgásukban, így ugyanakkora plasztikus (maradandó) deformáció csak nagyobb

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg (a támogatás száma TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003).

külső kényszer hatására tud kialakulni. Azt mondhatjuk, hogy az egyedi diszlokációk elmélete jól kidolgozott, és képes számot adni nagyon sok hétköznapi jelenségre, például arra, hogy a deformáció hatására az anyag keményebb lesz, illetve hogy az ötvözetek (acél, bronz) sokkal keményebbek, mint a tiszta anyagok. Ugyanakkor, még ha jól kilágyított anyagot veszünk is, ami azt jelenti, hogy kevés benne a diszlokáció, a keresztmetszet 1 $cm^2$-nyi felületét akkor is ~$10^6$ diszlokáció döfi át. Ez az érték a deformáció hatására 4 nagyságrenddel is növekedhet. A vonalhibák ilyen nagy száma ad okot arra, hogy mozgásukat a termodinamikához hasonlóan statisztikus fizikai eszközökkel vizsgáljuk. Ez a megközelítés az utóbbi 15 évben ugrásszerű fejlődésen ment keresztül, amelyben az ELTE Anyagfizikai Tanszékén működő kutatócsoport [1] aktív szerepet játszott [2–5]. Döntő jelentőségű, hogy az elméleti kutatások mellett lehetőségünk van a deformációs folyamat különböző skálákon (atomi, mezoszkopikus, makroszkopikus) történő számítógépes modellezésére. Érdemes megemlíteni, hogy sok ezer processzort tartalmazó szuperszámítógépek használatával képesek vagyunk néhány 100 nm élhosszúságú kockában levő atomok (~1 milliárd atom) mozgását deformáció közben követni, képet kapva a diszlokációk atomi szinten történő mozgásáról. Mezoszkopikus szinten, két nagyságrenddel nagyobb kockában a mai számítógépekkel lehetőség van a diszlokációk, mint kölcsönható vonalhibák kollektív mozgásának követésére (diszkrét diszlokációdinamika). A mai kutatások legnagyobb kihívása a különböző hosszúságskálák összekapcsolása (multiscale modelling of materials).

A transzmissziós elektronmikroszkópok és a legújabb technológiájú kétsugaras pásztázó elektronmikroszkóp/fókuszált ionsugaras eszközök (SEM/FIB) elterjedésével lehetőség nyílik az anyag nanométeres nagyságrendű megfigyelésére és megmunkálására. Más anyagfizikai kísérleti eszközök is léteznek (például nanokeménységmérő, nanoindenter), amelyek hasonló mérettartományban képesek fizikai vizsgálatokat végezni.

Mint azt a fentiekből láthatjuk, az anyagfizikai kutatásokban a 21. század elejének egyik nagyon fontos fejleménye, hogy a kísérleti és szimulációs méretek összeértek. A szimulációk az elméleti megfontolások alapján készülnek, tehát lehetőség nyílt arra, hogy elméleteinket közvetlenül kísérleti úton ellenőrizzük, alátámasszuk.

A cikk megírásának apropóját egy, a közelmúltban mikron méretű oszlopokon (mikropillár) elvégzett deformációs kísérlet adta, amely nem várt eredményt hozott és ezért szükségessé teszi a plasztikus deformációról alkotott eddigi képünk jelentős felülvizsgálatát. Kiderült ugyanis, hogy a makroszkopikus méretű mintákkal ellentétben a mikron méretű minták esetében a feszültség-deformáció görbe nem sima, hanem a diszlokációk kollektív, lavinaszerű mozgása következtében véletlen lépcsőket tartalmaz. A lépcsők helye és hossza mintáról mintára változik. Így tehát ebben a mérettartományban az anyag tulajdonságairól csak valószínűségi kijelentéseket tudunk tenni. A jelenség leírása a statisztikus fizika egy új kihívása.

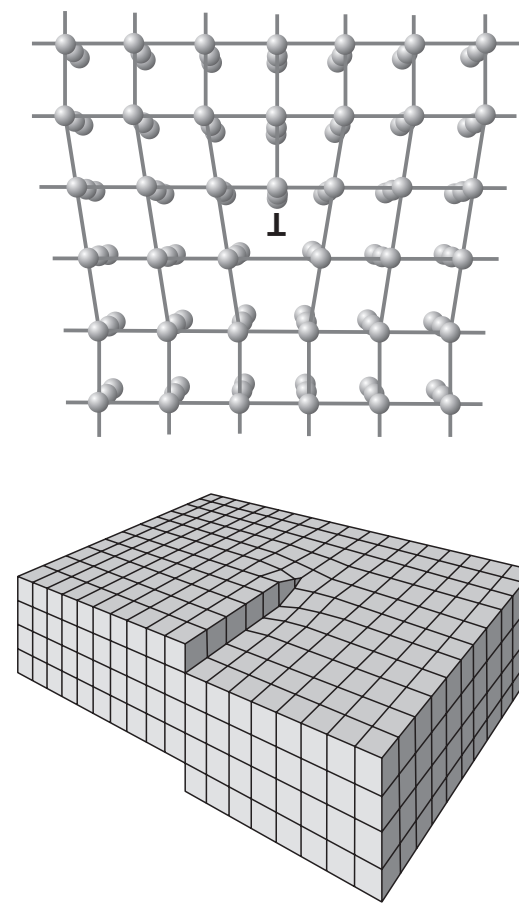
## Diszlokációk [6]

Mivel a fentiekben ismertetett jelenségért a diszlokációk együttes mozgása felelős, ezért először röviden ismertetjük a diszlokációk néhány fontos egyéni tulajdonságát.

Kristályos anyagokban különböző típusú rácshibák alakulnak ki, amelyeket kiterjedésük alapján csoportosíthatunk. Nulla dimenziós hibák a vakanciák és intersticiális atomok, amelyeket ponthibáknak is hívunk. Habár ezek jelentősen befolyásolhatják az anyagok plasztikus tulajdonságait, a cikkben vizsgált problémakör szempontjából nincs jelentőségük.

A diszlokációk egydimenziós vonalhibák. Szerkezetüket legegyszerűbben *Andrade* modelljével szemléltethetjük. Az egyes atomsorokat merev hengerként képzeljük el. Vegyünk két hengersort egymás alatt, amelyek egy fél hengerátmérőnyivel el vannak tolva egymáshoz képest. A hengersorban a hengerek (azaz atomsorok) közti erőt úgy képzelhetjük el, mint rugalmas gumiszalagokat. Próbáljuk meg a két hengersort eltolni egymáson. Ha egyszerre az összes hengert szeretnénk elmozdítani, ahhoz nagyon nagy erő kellene. Azonban, ha nem egyszerre, hanem szakaszosan mozdítjuk el egymáshoz képest a két hengersort, akkor a gumiszalagok megfeszülésével az elmozdulás hullámként megy végig a hengereken, és mire a hullám végig ér, az egész sor elmozdul egy hengernyit. Másik példa

*1. ábra.* Él- (fölül), illetve csavardiszlokáció (alul) modellje.



lehet egy hosszú, nagyon nehéz szőnyeg. Hogyan tegyük arrébb? Ha az egészet próbáljuk elhúzni nem fog sikerülni, azonban csináljunk a végén egy felgyűrődést, és toljuk végig azt a szőnyegen. Amikor a felgyűrődés a másik végére ér az egész szőnyeg elmozdult. A diszlokáció a kristályos anyagban egy ilyen könnyen mozgó lokalizált deformációs állapot, amelyet a véges rácsállandó stabilizál. A deformációk ilyen leírását a kísérletek igazolják, hiszen a maradandó deformációhoz tartozó csúsztatófeszültség-érték közel két nagyságrenddel kisebb annál, mint amit a teljes atomsor elmozdításához létre kellene hozni.

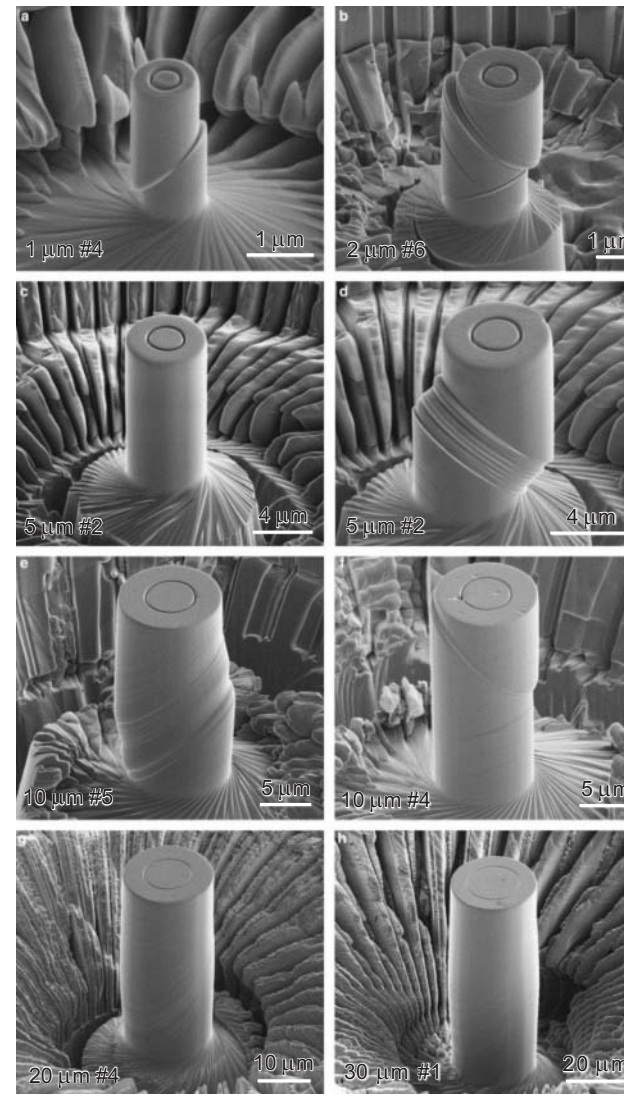
A diszlokációkat legegyszerűbben úgy képzelhetjük el, hogy veszünk egy tömbi anyagot, majd félig bevágjuk egyik atomsíkja mentén, ide beteszünk egy extra atomokból álló félsíkot, végül „összeragasztjuk" és az atomokat engedjük rugalmasan relaxálni (*1. ábra*). Mivel a félsík behelyezéséhez az atomokat a vonalra merőlegesen kell elmozdítani, az ilyen típusú vonalhibát éldiszlokációnak hívjuk. Fontos megjegyezni, hogy alacsony hőmérsékleten az éldiszlokáció csak a betoldott félsíkra merőlegesen tud mozogni. Ez annak a következménye, hogy a betoldott sík irányában történő mozgáshoz atomok „eltüntetése", illetve „keltése" szükséges. Egészen pontosan a diszlokációvonalon levő atomoknak a felületre kell kijutniuk, illetve onnan a vonalhoz kell eljutniuk. Ez csak diffúzióval valósulhat meg, amely csak magas hőmérsékleten számottevő.

Egy másik típust kapunk, ha veszünk egy hengert és egy alkotójával párhuzamosan bevágjuk egy sugara mentén a középpontjáig, ezután a két részt a vágás mentén a henger tengelyével párhuzamosan eltoljuk, majd újra összeragasztjuk (*1. ábra*). Az ilyen vonalhibát csavardiszlokációnak hívjuk. Természetesen a fenti leírások csak két, de nagyon fontos, speciális esetet jelentenek. A valóságban leggyakrabban a kettő keveréke fordul elő.

Fontos foglalkozni a diszlokációk kölcsönhatásával. Megmutatható, hogy egy mechanikai feszültségtér hatására a diszlokációra a feszültséggel arányos erő hat. Mivel a diszlokáció maga körül is létrehoz feszültséget, ha ebbe a térbe egy másik diszlokációt helyezünk, akkor erre erő hat. A kölcsönhatás sokban hasonlít az áramok közötti kölcsönhatásra, amennyiben a távolsággal fordítottan arányos, azaz hosszú hatótávolságú. Ugyanakkor a diszlokáció létrehozásából adódóan (egy adott irányból félsíkot tolunk be) erősen anizotróp.

## Nanoméretű deformációs kísérletek

A mechanikai tulajdonságok vizsgálatának gerincét a 21. században is azok a mérési módszerek adják, amelyeket a tudományág megszületésének hajnalán alkalmaztak. Ezek egyszerű nyújtó, összenyomó és csavaró vizsgálatok. A különbség az alkalmazható mintaméret jelentős csökkenésében, és a mérési érzékenység növekedésében mutatkozik.



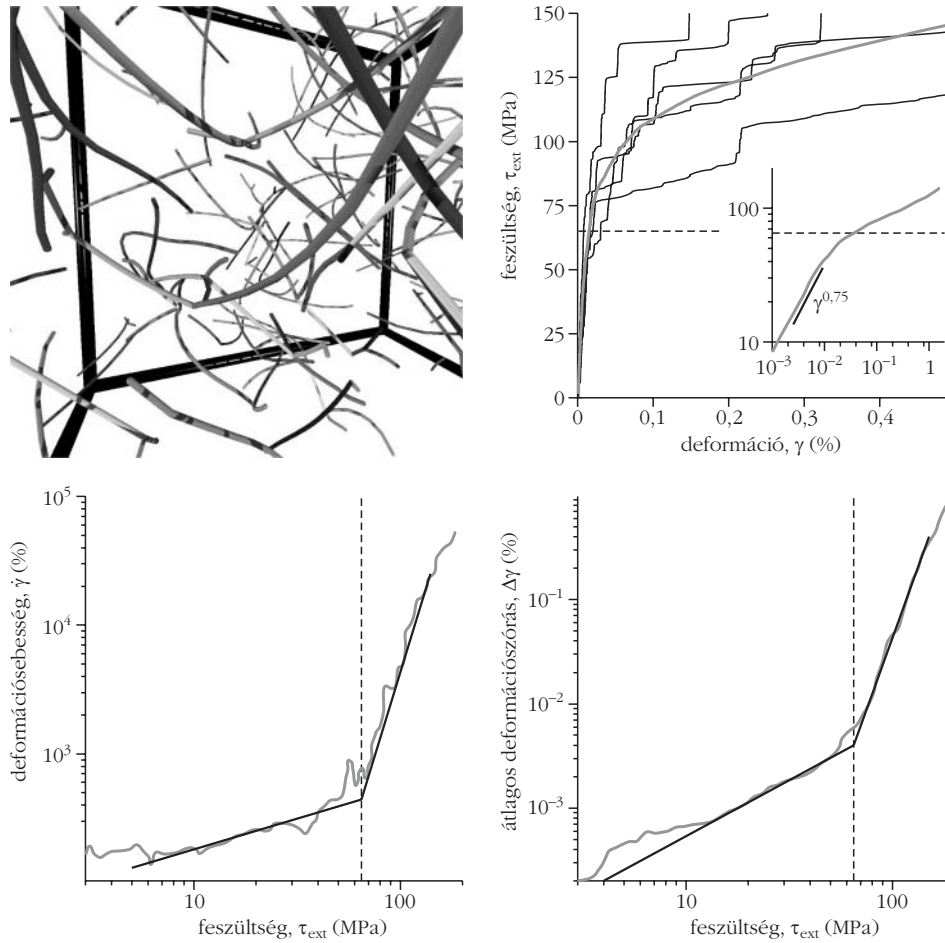

*2. ábra.* Különböző méretű mikropillárok és a deformációs lépcsők [7].

2006-ban a *Science* folyóirat *Sample dimension influence strength and crystal plasticity* [7] címmel közölt egy cikket, amely hengeres alakú, néhány mikrométer átmérőjű minták (mikropillárok) egytengelyű összenyomással történő vizsgálatával foglalkozik. Amint már a bevezetésben is utaltunk rá, különösen érdekes új jelenségre bukkantak. A mintán az állandó sebességgel történő összenyomáshoz szükséges erőt mérték a benyomódás függvényében, és a kapott görbén lépcsőket találtak. SEM-vizsgálatok tanulsága szerint a minták oldalán megfigyelhetők a lépcsőszerű deformáció nyomai (*2. ábra*). A cikk megjelenése óta a problémakör intenzív kutatások tárgya.

A megfigyelt lépcsőket a diszlokációk kollektív, lavinaszerű mozgása okozza, amely makroszkopikus mintákban is lejátszódik. Azonban csak akkor jelenik meg a minta külső deformációs kényszerre adott makroszkopikus válaszán (mint például a feszültség-deformációs görbe), ha a minta méreteit néhány mikron alá csökkentjük. A vizsgálatok szerint a jelenség okát a diszlokáció-diszlokáció kölcsönhatás hosszú hatótávolsága adja.

Ez a jelenség számtalan technikai alkalmazásban, de különösen a mikroelektronikában fontos. Az alkalmazás szempontjából újonnan felmerülő problémákat egy egyszerű példával illusztráljuk.

Ismeretes, hogy a különböző anyagok egy jól definiált feszültség elérése (folyásfeszültség) után kezdenek plasztikusan deformálódni. A folyáshatár mérnöki definíciója a 0,2%-os plasztikus deformációhoz tartozó feszültség. A folyáshatár több külső körülménytől (hőmérséklet, anyagi minőség), és számos belső jellemzőtől (diszlokációeloszlás különböző paraméterei) függ. A folyáshatár egyszerűen mérhető például egytengelyű nyújtással. Azonban, ha mikronos méretű mintán kívánjuk ezt elvégezni, amelyet mikromechanikai és mikroelektronikai alkalmazások tehetnek szükségessé, az előbbiekben leírt véletlen deformációs ugrások következtében az anyag nem egy jól meghatározott ponton kezd el „folyni", hanem a folyáshatár értéke mintáról mintára változhat. Így tehát a folyáshatár szokásos mérnöki definíciója nem használható. Az anyag „szilárdságára" új statisztikus definíciót kell adni.

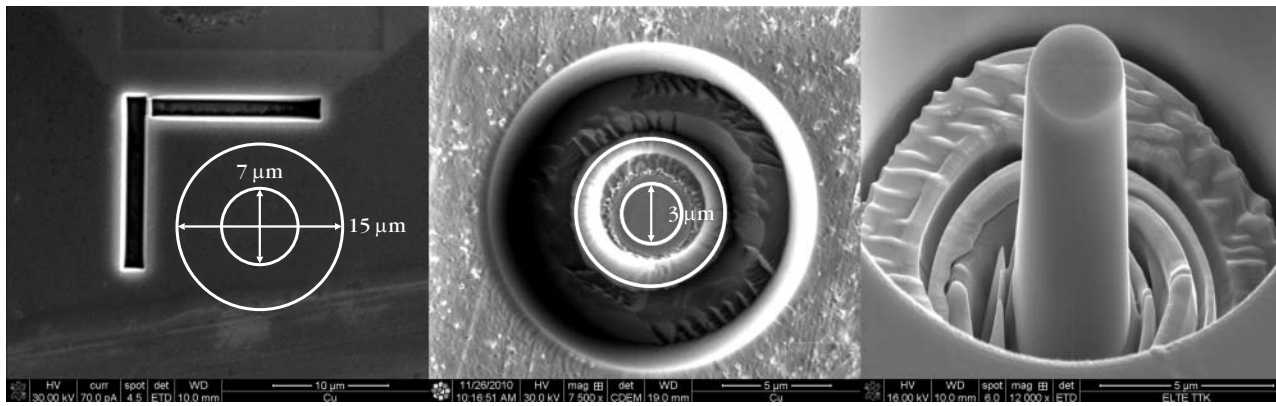



*3. ábra.* 3D szimulációval kapott tipikus diszlokációeloszlás (bal fölső ábra). (A különböző árnyalatok – eredetileg színek – különböző típusú diszlokációkat jelölnek.) Különböző kezdeti konfigurációhoz tartozó feszültség-deformáció görbék, illetve azok átlaga (jobb fölső ábra). Átlagos deformációsebesség-feszültség görbe (bal alsó ábra). A deformáció átlagos szórása a feszültség függvényében (jobb alsó ábra).

Az Eötvös Egyetem Anyagfizikai Tanszékén hosszú évek óta folynak elméleti, illetve számítógépes kutatások, valamint röntgen vonalprofil vizsgálatok a diszlokációk mozgásának statisztikus fizikai módszerekkel történő leírása céljából [2–5]. Vizsgálataink során két úton is szeretnénk megismerni a diszlokációlavinák létrejöttét és eloszlásukat, valamint a feszültség-deformáció görbék statisztikus tulajdonságait. Az egyik a diszkrét diszlokációdinamikai szimuláció, amellyel összenyomás közben követjük a diszlokációk mozgását egy 0,5 μm élhosszúságú kockában. A másik pedig az, hogy ionsugaras megmunkálóval „kifaragunk" viszonylag nagyobb számú, néhány mikron átmérőjű mikropillárt, majd azokat egy megfelelően átalakított nanoindenterrel összenyomva megmérjük a minták erő-elmozdulás görbéit. Mivel a szimulációs és a kísérleti vizsgálatok közel ugyanakkora mintán történnek, lehetőség van a két módszer eredményeinek közvetlen, kvalitatív összehasonlítására.

## Diszkrét diszlokációdinamikai szimuláció

A diszlokációk mozgását a mai több tízezer processzort tartalmazó szuperszámítógépekkel atomi szinten is lehetőség van egy 200 nm élhosszúságú kockában (~1 milliárd atom) vizsgálni. Az ilyen vizsgálatok nagyban hozzájárulhatnak a diszlokációs folyamatok jobb megértéséhez, de a szimulációk – jelentős időigényük miatt – nyilván csak igen korlátozott számban kivitelezhetők. Ezért komplex diszlokációs folyamatok vizsgálatára nagyobb hosszúságskálán történő megközelítést, az úgynevezett diszkrét diszlokációdinamikát alkalmazzák. Ez azt jelenti, hogy a diszlokációvonalak fent említett kölcsönhatását figyelembe véve követjük a vonalak mozgását. Mivel a vonalak mozgása atomi szinten sok atom együttes mozgásával valósul meg, a diszlokáció mozgása során rácsrezgéseket kelt. Ez energiaveszteséggel jár. Ezért a diszlokáció mozgása nem konzervatív folyamat és a mozgás során az energiaveszteséget súrlódási erő bevezetésével figyelembe kell venni. Ez az erő általában jól közelíthető egy, a diszlokáció sebességével arányos kifejezéssel. Mivel a diszlokációk gyorsulása a legtöbb esetben kicsi, a diszlokációk mozgásegyenletében a gyorsulást tartalmazó inerciatagot elhanyagoljuk a




*4. ábra*. Mikropillár kifaragásának lépései.

súrlódási erő mellett. Így tehát a diszlokáció sebességéről feltételezzük, hogy arányos a rá ható erővel (túlcsillapított dinamika). A diszlokációdinamikai szimulációban a vonalak kis szegmenseire ható erő kiszámítása után a szegmenst az erővel arányosan a diszlokáció csúszósíkjában elmozdítjuk. Ezután gondoskodunk arról, hogy a diszlokációvonal összefüggő maradjon, és ha ellenkező előjelű diszlokációk találkoznak, akkor azok megsemmisüljenek. A fent leírt módszer a diszlokációk hosszú távú kölcsönhatása, illetve a bonyolult topológia következtében rendkívül nagy számítógépkapacitást igényel. A szimulációk a fent említett mintaméret és realisztikus diszlokációsűrűség ($10^{14}$ $m^{-2}$) mellett is több napos futási időket igényelnek. A szimulációs kódok kifejlesztése sok éves csapatmunkát tesz szükségessé. A világban mindössze három ilyen programot fejlesztettek ki. Ezek közül kettőben az Anyagfizikai Tanszék fiatal kutatói is részt vettek.

A pillárokban a deformáció során lejátszódó diszlokációfolyamatok tanulmányozására egy 0,5 μm élhosszúságú Al-kockában, időben lineárisan növekvő külső feszültség alkalmazása mellett követtük a diszlokációk mozgását, és meghatároztuk a minta deformációját az alkalmazott feszültség (idő) függvényében nagyszámú kiindulási diszlokációkonfiguráció esetén. Egy tipikus diszlokációkonfiguráció, valamint néhány tipikus feszültség-deformáció görbe látható a *3. ábrá*n [8]. Látható, hogy a kísérleti eredményekhez hasonlóan a görbék véletlen lépcsőket tartalmaznak, és erősen függnek a kiindulási diszlokáció-elrendezéstől.

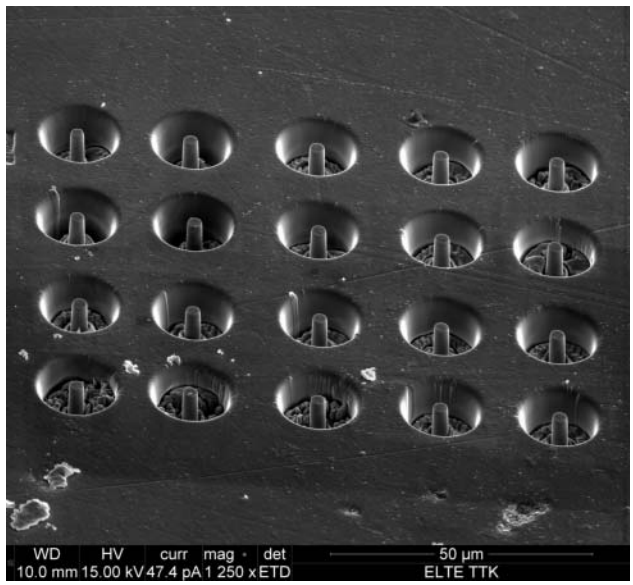
Annak érdekében, hogy a különböző diszlokációelrendeződéshez tartozó feszültség-deformációs görbék statisztikus tulajdonságairól mondani tudjunk valamit, meghatároztuk azok adott feszültséghez tartozó átlagát, illetve szórását, valamint az átlagos deformációsebességet (*3. ábra*). Fontos új eredmény, hogy mindegyik görbe tanulsága szerint a deformációs folyamat két jól elkülöníthető szakaszra osztható.

## Fókuszált ionsugaras megmunkálás

A mikropilláros kísérletek szempontjából fontos előfeltétel, hogy nagyszámú, azonos paraméterekkel rendelkező mikropillárt lehessen készíteni. Számunkra ezt az tette lehetővé, hogy az ELTE TTK az *Európai léptékkel a tudásért, ELTE* elnevezésű TÁMOP pályázat keretében beszerzett egy FEI Quanta 3D FEG kétsugaras pásztázó elektronmikroszkópot. A két sugár azt jelenti, hogy nemcsak elektronforrással, hanem ionforrással is rendelkezik (a berendezés részleteit lásd [9]-ben). Mindkét nyaláb alkalmas mikroszkópi kép készítésére, és emellett a fókuszált ionnyalábbal (focused ion beam = FIB) a minta felülete néhány nanométeres pontossággal megmunkálható.

A fókuszált ionnyaláb (FIB) működési elve hasonló, mint a pásztázó elektronmikroszkópé [9]. A galliumionokat elektromos tér gyorsítja a kiválasztott energiára, és mágneses lencsék pásztázzák a minta felülete mentén. Az ionok előállítása a következőképpen történik: volfrám anyagú galliumtartályhoz vékony volfrámtű csatlakozik. A felmelegített, folyékony gallium nedvesíti a volfrámtűt, ahol kihúzófeszültség ionizálja a tű hegyén összegyűlt galliumatomokat, így $Ga^+$ keletkezik. Az ionoszlopban a kiválasztott gyorsító feszültség (2–30 kV) a kívánt energiára gyorsítja az ionokat, amelyek a mintába becsapódva különböző termékeket keltenek. Keletkeznek szekunder elektronok, amelyek mikroszkópi kép készítésére használhatóak. Ezen kívül szekunder ionok is keletkeznek, amelyek a minta anyagából kiütött ionizált részecskék. Elég nagy energiát és áramerősséget választva a minta anyaga hatékonyan és szabályozott módon porlasztható. Ez teszi lehetővé a minta felületén nanométeres skálájú struktúrák kialakítását.

A mérésekhez a mikropillárokat FIB-es megmunkálással készítettük. Réz egykristályt porlasztottunk körgyűrű alakú maszkon keresztül. Ehhez egy, az irodalomban ismertetett eljárásoktól némileg különböző módszert fejlesztettünk ki. A porlasztást több lépésben kellett végezni, mivel minél nagyobb áramerősséget használunk, annál inkább széttartó a nyaláb, és ezért a körgyűrűmaszkon kívül is porlaszt, így nem alakítható ki a szabályos hengeralak, ezzel roncsolva a pillárt. Ugyanakkor csökkenő áramerősséggel a porlasztás ideje lényegesen növekszik. Mivel a deformáció statisztikus tulajdonságainak vizsgálatához nagyszámú pillárra volt szükség, a gyártási idő igen lényeges. Ezért egyre szűkülő körgyűrűmaszkokat használtunk. A folyamat néhány kiragadott mozzanata látható a *4. ábrá*n. Az el-




*5. ábra*. 20 darab egymás melletti pillár.

ső képen a pillár számára kijelölt terület látható, illetve a körgyűrű maszk. A külső átmérő 15 µm, a belső 7 µm. A mélységet, azaz a pillár magasságát úgy választottuk, hogy ne haladja meg a pillár átmérőjének négyszeresét. 3 µm átmérőjű pillárokat készítettünk, így a mélység maximum 12 µm lehetett.

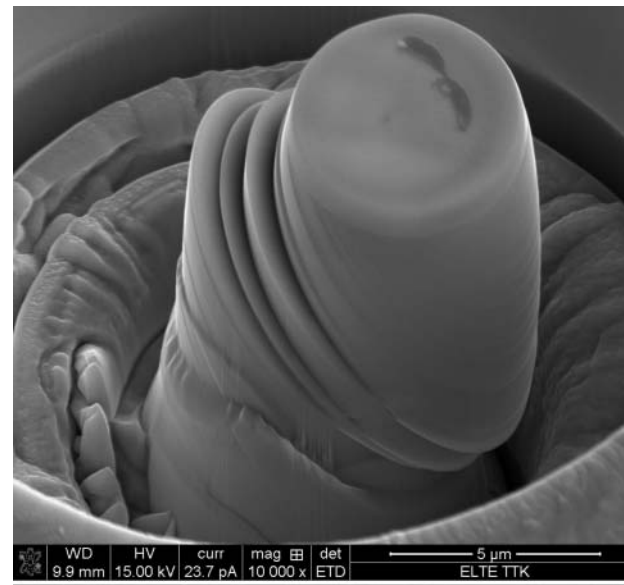
A második, felülnézeti ábrán látható, hogy a nagyobb áramerősséggel végzett porlasztás után a pillár formája nem henger, hanem kissé kúpos. Utolsó lépésben ezért lényegesen kisebb áramerősséget kellett választani, és a két körgyűrű átmérőjét egyre csökkenteni, amíg a jobb oldali ábrán látható 3 µm átmérőjű, henger alakú pillár el nem készült.

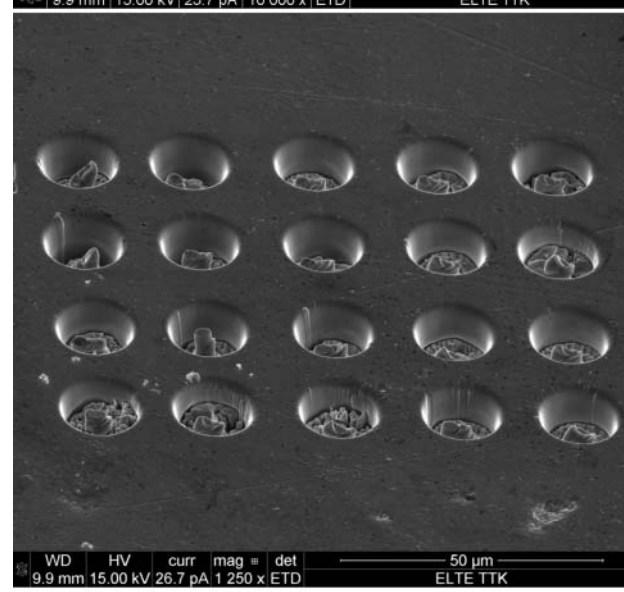
Ezzel a módszerrel sikerült nagyobb számú, néhány százalék pontosságig azonos geometriájú pillárt egymás mellett kifaragni (*5. ábra*).

## Nanoindentációs kísérlet

Miután mintegy 40 pillárt sikerült kifaragnunk, a következő lépés a minták állandó deformációsebességgel történő összenyomása mellett a feszültség-deformáció görbék felvétele. Ehhez az ELTE-n található UMIS típusú nanoindentert használjuk. Ez a műszer szervomotoros és piezoelektromos mozgatókkal van felszerelve a mintatartó tálca mozgatásához. A tálcát két bázispont között tudjuk mozgatni. Az egyik neve „Indenter" a másiké „CCD". A „CCD" álláshoz egy 5 megapixeles digitális CCD-kamera tartozik. A kamera koaxiális megvilágítással egy százszoros nagyítású objektívlencsével készít képet a mintáról. Ezzel a mikroszkóppal keressük meg a pillárokat. A kamera felbontása az optikailag lehetséges legjobb felbontást súrolja (100 nm/pixel), így éppen elegendő ahhoz, hogy a pillárokat lássuk.

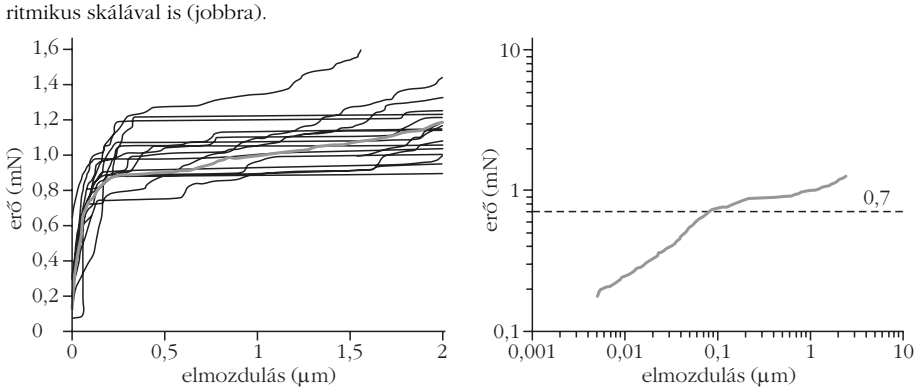
Az „Indenter" állásban található a gyémánt összenyomó fej, amely csonkakúp ala-




*7. ábra*. Összenyomott mikropillárok.

*6. ábra*. Különböző pillárokon mért erő-elmozdulás görbék, valamint azok átlaga (balra), logaritmikus skálával is (jobbra).



kú 4 μm végátmérővel. Az összenyomás közben az alkalmazott erőt tudjuk vezérelni. Az összenyomófej alá a CCD-kamerával beállított pillárokkal számos kísérletet kellett elvégeztünk mire hosszan tartó tökéletesítések után az első sikeres összenyomást el tudtuk végezni. Az így kapott görbéken jól definiált lépcsőket sikerült megfigyelni. Tipikus erő-összenyomódás görbék láthatók a *6. ábrá*n.

A *7. ábra* fölül egy tipikus összenyomott pillárt mutat. Jól látható, hogy a felületen lépcsők jelentek meg. A *7. ábra* alul az *5. ábrá*n látható pillárok összenyomás utáni képeit mutatja. Annak megfelelően, hogy az erő-deformáció görbék lényegesen különböznek, a pillárok deformáció utáni alakja is nagyon eltér.

Több kísérletet elvégezve, majd kiszámítva az azonos erőhöz tartozó deformációk átlagát már sima görbét kapunk (*6. ábra*). Ez azt mutatja, hogy a lépcsők valóban véletlenszerűen jelennek meg. A szimulációs eredményekhez hasonlóan (*3. ábra*) itt is megfigyelhető egy viszonylag jól definiált töréspont az átlagos görbén, amely a deformációs folyamatot két szakaszra osztja.

## Összefoglalás

Megállapítható, hogy mind a számítógépes diszkrét diszlokációdinamikai szimulációk, mind a kísérleti eredmények azt mutatják, hogy statisztikus értelemben a mikronos méretű mintákon is definiálható egy karakterisztikus feszültségérték, amely a makroszkopikus mintákon mérhető folyáshatárral rokon mennyiség. Fontos azonban kiemelni, hogy ez a karakterisztikus feszültség nem azt jelenti, hogy ennél kisebb feszültségnél semmilyen mintán nem jelenhet meg nagy maradandó alakváltozás. Ugyanakkor a feszültség értéke az adott mintasorozat „szilárdságát méri". Ahhoz tehát, hogy a mikron méretű objektumok mechanikai tulajdonságait jellemezni tudjuk egyetlen mérés nem elegendő, mivel csak mintasokaságra érvényes statisztikus tulajdonságok állapíthatók meg. Ez a felismerés paradigmaváltást jelent a kristályos anyagok deformációs tulajdonságainak vizsgálatában. A számítógépek által vizsgált tartomány és a kísérleti méretek egyre nagyobb átfedésével új kutatási terület nyílik a mikro- és nanomechanika, valamint a nanoelektronika felé, amely már a jelen és még inkább a jövő technológiája.

Irodalom


1. http://dislocation.elte.hu
2. I. Groma: Link between the microscopic and mesoscopic length-scale description of the collective behavior of dislocations. *Phys. Rev. B 56* (1997) 5807–5813.
3. I. Groma. F. F. Csikor, M. Zaiser: Spatial correlations and higher-order gradient terms in a continuum description of dislocation dynamics. *Acta Mater. 51* (2003) 1271–1281.
4. I. Groma, G. Györgyi, B. Kocsis: Debye Screening of dislocations. *Phys. Rev. Lett. 96* (2006) 165503.
5. P. D. Ispánovity, I. Groma, G. Györgyi, P. Szabó, W. Hoffelner: Criticality of Relaxation in Dislocation Systems. *Phys. Rev. Lett. 107* (2011) 085506.
6. Kovács István, Zsoldos Lehel: *Diszlokációk és képlékeny alakváltozás*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
7. D. M. Dimiduk, C. Woodward, R. LeSar, M. D. Uchic: Scale-free intermittent flow in crystal plasticity. *Science 312* (2006) 1188–1190.
8. P. D. Ispanovity, I. Groma, G. Györgyi, F. F. Csikor, D. Weygand: Submicron Plasticity: Yield Stress, Dislocation Avalanches, and Velocity Distribution. *Phys. Rev. Lett. 105* (2010) 085503.
9. Havancsák K., Lendvai J.: Nagyfelbontású pásztázó elektronmikroszkóp az Eötvös Egyetemen. *Fizikai Szemle 61/10* (2011) 339–343.


# ÉBREDJ, MERT JÖN A FEKETE ENTRÓPIA!


Martinás Katalin, ELTE TTK Fizikai Intézet
Huller Ágoston festőművész


*Fizikus:* Műtermedben, az ajtóval szemközti fal bal sarkában található pasztell képnek azt a címet adtad, hogy *Ébredj, mert jön a fekete entrópia!* Nem tartod különösnek, ha művész a természettudományok fogalomtárából kölcsönöz címnek valót? Egyáltalán, mi indított az említett kép címadására?

*Festő:* Beszélgetéseink e témáról. Ahogyan Te bővíted az ismereteidet a művészeti élményeiddel, hasonlóképp fordulok jómagam a természettudományok felé. Persze nem mint szakember, hanem csak mint érdeklődő. Egy idő elteltével rá kell döbbenni, hogy Te is, Én is ugyanannak a problémának vagyunk rabjai, a világ megismerhetőségének. Amiben különbözünk az a megfogalmazás nyelvezete.

Bevallom, hogy számomra az entrópiatörvény nagyon pesszimista. A természet egyirányúsága a romlás szinonimája. Az entrópia növekedése is azt jelenti, hogy életminőségünk egyre rosszabb lesz?

*Fizikus:* Nem.

*Festő:* Lehetne részletesebben?

*Fizikus:* Kezdjük az elején. Örülök, hogy érdeklődsz az entrópia iránt.

Már mintegy ötven éve, hogy *Snow A két kultúrá*ban azt írta, hogy a termodinamika II. főtétele legalább annyira az emberi kultúra fontos eleme, mint *Shakespeare*. Ugyanakkor nem tekinthető civilizált embernek az, aki nem ismeri Shakespeare-t. Viszont az entrópiát, a termodinamika II. főtételét csak kevesen ismerik (azóta is). Hogy érezzük a hasonlat mélységét, tudomásul kell vennünk, hogy Shakespeare az örök emberi tapasztalatokat összegzi műveiben. És a második főtétel? Ugyanezt teszi, képlettel elbeszélve. Shakespeare-t sokan ismerik. De azért ma már sokan ismerik – ha csak közvetetten is – az *entrópia* szót is. Generációnk – a hatvannyolcasok – amerikai irodalmában az entrópia a hanyatlás, a romlás szinonimája.

A posztmodern írók, mint *Pynchon, Barthelme* vagy *Vonnegut* és mások gondolatvilágának meghatározó eleme.

*Festő:* Igen, náluk is megfogalmazódik, hogy az entrópia növekedése a rend eltűnése, a rendetlenség növekedése. Az entrópia a hanyatlás, a romlás. Ez valós tapasztalat!

*Fizikus:* Gondold végig mit is állítottál. A rendetlenség olyan cselekvéssorok következménye amelyeket naponta átélünk és gondolnád-e, hogy a rendetlenség a rend fogalmából következik? A könyveidet a polcon meghatározott rend szerint csoportosítod. Mégis előfordul, hogy egy elővett könyvet a renddel nem törődve rakod vissza más helyre. Több az olyan lehetőség, amely a rendetlenség forrása, de csak egy az olyan, amely a rendé. A mi rend-rendetlenség megkülönböztetésünk a természet számára közömbös.

*Festő:* Beszéltél a rend fogalmáról és arról, hogy e fogalom mit fed le. Tehát létezik lehetőség a rendnek a szubjektumtól független jellemzésére, ha jól szeretném sejteni: mérésére. Ez az entrópia?

*Fizikus:* Nem.

*Festő:* Ha nem a rendetlenség mértéke, akkor mi az entrópia? Először maga a szó jelentése kell. Entrópia? Megnéztem a görög szótárt, nincs benne.

*Fizikus: Clausius* kreálta a szót. εν+τροπι, ami annyit jelent, hogy belső és változás. Az entrópianövekedést *Farkas Gyula,* Kolozsvárott dolgozó fizikus a 19. század végén a változások mértékének nevezte magyarul.

*Festő:* Az entrópia a megtörtént változásokat méri, ezért mindig nő. Minden változás növeli az entrópiát. Eddig értem, csak azt nem értem, hogy mi az entrópia.

*Fizikus:* Köszönöm a kérdést! Diák éveid alatt vajon hányszor hallottad ezt a mondatot: *a hő nem megy magától melegebb helyre?*

*Festő:* Sokszor…

*Fizikus:* Ez a termodinamika II. főtétele. A jelentése világos?

*Festő:* Ha a hűtőszekrényemre nézek, akkor arra kell gondolnom, hogy amikor megfogalmazták a II. főtételt ebben a formában, akkor még nem volt hűtőszekrény. Clausius még nem ismerhette.

*Fizikus:* Magától hűt a hűtőszekrény?

*Festő:* Bekapcsolom, és utána automatikusan. Azaz magától szabályozza a hőmérsékletet.

*Fizikus:* Csakhogy ott a hő nem magától megy a hidegebb helyről a melegebb felé, hanem az elektromos áram munkavégzése révén. Jegyezzük meg, hogy a II. főtétel csak az olyan hűtőszekrényt tiltja le, amely önmagától működik…

*Festő:* …mint a perpetuum mobile. A perpetuum mobile lehetetlensége az áram nélkül üzemelő hűtőszekrény lehetetlensége. Értem, de hogy lesz ebből entrópia?

*Fizikus:* Hogyan lett, talán ez a helyesebb megfogalmazás. *Galilei* elkészítette az első hőmérőt 1600-ban, ettől kezdve nagyon sok tudós hozzájárulása kellett a törvény matematikai megfogalmazásához. *Newton, Black, Lavoisier, Carnot, Joule, Helmholtz, Kelvin* és Clausius hogy csak néhány nevet említsek. Clausius vezette be az entrópia fogalmát és megmutatta, hogy a II. főtétel és az entrópia növekedése ugyanannak a jelenségnek különböző megfogalmazása. Az entropikus megfogalmazás pedig azért jó, mert segítségével mérhető összefüggésekhez jutunk.

*Festő:* Ez magyarázat volt?

*Fizikus:* Részben! De folytatom. Clausius eredménye az volt, hogy minden reálisan létező dologhoz (rendszerhez) objektíven hozzárendelhetünk egy számot (amelynek mértékegysége Joule/Kelvin). A fizika megadja azokat a szabályokat, amelyekkel ez a szám konkrét rendszerre kiszámítható.

*Festő:* Az én entrópiám is meghatározható? Mennyi?

*Fizikus:* Elvileg pontosan is meghatározható, de hiányoznak hozzá az adatok, és túl sok munka kellene hozzá.

*Festő:* És ahogy öregszem, úgy nő az entrópiám?

*Fizikus:* Az entrópiád állandóan nő, de állandóan csökken is. Amikor hőt adsz le, vagy izzadsz, akkor csökkented az entrópiádat.

*Festő:* Akkor mi a jelentése az entrópiámnak? Hogyan van bennem?

*Fizikus:* Mint a szépség a képben. Az egészre jellemző.

*Festő:* Mint a hőmérséklet is. Amelynek mértékegységeit hosszú, kísérleti tapasztalatok alapján állapították meg.

*Fizikus:* Ami a *hőmérsékletet* illeti, a hőmérsékleti skálát annak figyelembevételével határozták meg, hogy a magasabb hőmérsékletű test ad át hőt az alacsonyabb hőmérsékletű testnek. A *hő* pedig az a mennyiség, amely átmegy a magasabb hőmérsékletű testről az alacsonyabb hőmérsékletű testre.

*Festő:* Ez a definíció már tartalmazza a II. főtételt és ez tautológia! A II. főtétel triviálisan igaz, ha már a hőmérséklet mérésében benne van.

*Fizikus:* Igazad van! A posztulátum lényegében azt mondja ki, hogy lehet hőmérőt készíteni. Ha nem lenne igaz, akkor értelmetlen lenne a definíció. Maga a hőmérő létezése és a definíció értelmessége következik a természeti folyamatok egyirányúságából.

*Festő: Hérakleitosz*ra gondolsz, aki szerint kétszer nem léphetsz ugyanabba a folyóba? Neki ezt a tapasztalat súgta. Ezért, ahogy most pontosítottad a II. főtételt, az tényleg nagyon igaz. A világ nem mehet vissza ugyanabba az állapotba. Ez a törvény tehát azt jelenti, hogy minden különbség eltűnik…?

*Fizikus:* Igen!

*Festő:* De ez csak a fizikában igaz. A képeim folyamatos változásokon mennek át az elkészülésükig. A világunkra is a folyamatos változás a jellemző. A biológiai evolúció, a gazdasági fejlődés azt mutatják, hogy újabb és újabb struktúrák alakulnak ki és eközben a különbségek is nőnek.

*Fizikus: A posztulátum nem így igaz a fizikában sem*. A különbségek csak izolált (mindentől elzárt) rendszerben tűnnek el. Például, ha a hűtőszekrény működik, a hő a hidegebb helyről (a hűtőszekrényből) megy a melegebb helyre (a konyhába).

Huller Ágoston: Ébredj, mert jön a fekete entrópia!

A posztulátum csak az *izolált* rendszerekre mondja ki a különbség eltűnését. A nyílt rendszerek változása a külső és a belső feltételektől függ. A hetvenes évektől kezdve óriási változáson ment át a struktúrák kialakulásának, önszerveződésének a vizsgálata. *Prigogine* munkássága óta már felismertük, hogy a *II. főtétel a nyílt, egyensúlytól távoli rendszerekben nem tiltja, hanem megköveteli a struktúrák kialakulását, létezését*. Egyszerűbb modellrendszerekben már értjük is a szerveződés megjelenését.

*Festő:* Jelen beszélgetésünk keretei között kevésnek érezhetem a posztulátumot, ha *csak* a hőmérséklet-különbség nem nőhet, hiszen például eltűnik a nyomáskülönbség és a feszültségkülönbség is.

*Fizikus:* Valóban! És ez a II. főtételből következik. Gondolatkísérlettel könnyen igazolhatjuk, hogy a nyomáskülönbség spontán megjelenése esetén szerkeszthetnénk egy olyan gépet, amelynek az lenne a jellemzője, hogy a hő a hidegebb helyről a melegebb helyre megy. De ha a hő nem mehet magától a melegebb helyre, akkor a nyomáskülönbség sem nőhet magától.

*Festő:* De mégsem tetszik a II. főtétel megfogalmazása. Nem úgy hangzik, mint egy komoly természettörvény! Ezzel az erővel posztulálhatnánk azt is, hogy „Lefelé folyik a Tisza, nem folyik az többé vissza", vagy hogy a nehéz testek leesnek, pedig a lefelé való mozgás a gravitáció következménye.

A kérdésem pedig arra vonatkozik, hogy két hasonló tapasztalat megfogalmazása közben két teljesen különböző fizikai kép keletkezik? Az egyiket az entrópia növekedésével társítjátok, a másikat pedig a gravitáció törvényével? Ezek szerint minden új jelenséghez új fizika járul!

*Fizikus:* A kérdés jó, a válasz nem! Ugyanazt a jelenséget többféle fizikai elmélettel is tárgyalhatjuk. Ha csak a mechanikai mozgásra vagyok kíváncsi, akkor azt a gravitációval írom le. Elhanyagoljuk vagy apránként építjük be a súrlódást, a közegellenállást, a felhajtó erőt. Viszont a másik leírásban ezeket mindig jelenlevőknek és fontosnak tekintjük. Történelmi (tudománytörténeti) oka van annak, hogy a II. főtétel kimondása a hő tulajdonságaival történt. Talán azért, mert a hőt nem lehetett és nem lehet a mechanikai szemlélettel teljesen értelmezni.

*Festő:* A II. főtételt nem levezetjük, hanem a korlátozott tapasztalataink alapján mondjuk ki. Soha eddig nem tapasztaltuk azt, hogy hő magától menne alacsonyabb hőmérsékletről magasabb hőmérsékletre, de kimondhatjuk-e, hogy ilyen sohasem történhet meg.

A történelem során gyakran megtörtént, hogy kimondtunk törvényeket amelyekről később kiderült,

hogy nem is azok. Tudásom szerint a francia Akadémia mondta ki a perpetuum mobile lehetetlenségét, a több neves akadémia tagságával rendelkező *Newcomb* állította, hogy a levegőnél nehezebb tárgy nem emelkedhet a levegőbe. Ennek alapján nem jelenthető-e ki, hogy az ember előtt nincs lehetetlen? Ha a repülőgép felemelkedhet a földről akkor egy zseniális felfedező vajon megépítheti majd a perpetuum mobilét is…

*Fizikus:* …amely az ember örök vágyálma. Sajnos azt kell mondanom, hogy a perpetuum mobile építők nem túl sokat, hanem túl keveset tudnak. Általában kihagynak valamit a számításból, vagy rosszul tudják az elméletet.

*Festő:* Igen, ez a konzervatív tudósok véleménye.

*Fizikus:* Igen, egy számítás csak hibás lehet, ha a végeredmény sérti az alapelvet, amelyen a számítás alapszik. Rengeteg perpetuum mobilével találkoztam, és mindegyik számítási hiba eredménye volt.

De térjünk vissza a II. főtételhez, amely nemcsak egy egyszerű törvény, hanem világunk kormányzó elve. Rendezi a folyamatokat, megadja az irányokat.

Ennél a gondolatnál érdemes megpihenni, elábrándozni egy olyan világról, amelyben nem létezik a II. főtétel. Ahol, ha vacsorát készítenék, nem kellene használnom a gáztűzhelyt, mert magától is megfőhet az étel, de főznöm sem kellene, hisz a szervezetem reverzibilisen működne és emiatt a táplálékban rejlő energiára sem lenne szükségem. Ha pedig nem kell ennem, az talán az elképzelhető mennyország, de sajnos… idegen a földi világunktól, amely határokat szab az álmodozásunknak.

*Festő:* Álmodozni a művész, a költő álmodozhat.

*Fizikus:* A természettörvények nem az álmok eredményei. A triviálisan igaz megfigyelésből azáltal lesz természettörvény, hogy a meg nem vizsgált esetekre is érvényesnek mondjuk ki. Például az irreverzibilitás posztulálása nem banalitás, hanem egy új, nem-newtoni fizikai elmélet megalkotása. Univerzális elvként lehet és kell a különbségek csökkenését elfogadni. Ez Clausius posztulátumának tartalma, amely ellentétben áll a newtoni fizika reverzibilitásával.

De félreértés ne essék! A termodinamika nincs ellentmondásban a mechanikával, csak a mechanikailag lehetséges folyamatok közül kizárja azokat, amelyekben a különbségek nőnének. A termodinamika ezért a mechanikától eltérően nem normatív, hanem regulatív, nem prediktív vagy deskriptív, hanem restriktív tudomány. Csak a *lehetetlent* tiltja le. A főtételeknek van olyan megfogalmazásuk is, amelyekben mindegyik úgy kezdődik, hogy „lehetetlen". A posztulátum tartalma az, hogy a mechanikában elképzelhető folyamatok durván két csoportra oszthatók: valóságos (lehetséges vagy más néven természetes) folyamatokra és lehetetlen (természetellenes, nem létező) folyamatokra. A lehetetlen folyamatokat az jellemezné, hogy általuk például a hőmérséklet-különbségek maguktól nőnének. A hétköznapi tapasztalatunk az, hogy ilyen folyamatok nem léteznek. Ezen tapasztalatok összefoglalása a posztulátum, és kimondására a matematikai keretek kidolgozása miatt van szükség.

*Festő:* Ezt értelmezzem úgy, hogy a clausiusi posztulátum egy *pesszimista* posztulátum? Ha a hőmérséklet-különbség egy magára hagyott rendszerben mindig csökken, akkor egy idő múlva minden különbség eltűnik? Hogyan is mondjam… meghal a rendszer?

*Fizikus:* Valóban! És ezt a végső állapotot nevezik *hőhalál*nak. Csakhogy a Földünk nem magára hagyott rendszer. A Nap és a világűr között helyezkedik el. Tehát a változások állandóak. A Földön, amíg süti a Nap, nem kell tartanunk a hőhaláltól. A hőmérséklet-különbségek pedig állandóan keletkeznek és eltűnnek.

*Festő:* Miért jó az számunkra, ha elfogadjuk általános természettörvénynek a hőmérséklet-kiegyenlítődést? Származik-e ebből hasznunk? Igaz-e, hogy aki ezt nem tudja, az fontos dolgot nem tud? Ténylegesen értékelni lehet vele a természeti korlátokat?

*Fizikus:* Ez a legrobusztusabb természettörvényünk, minden cselekedetünket meghatározza, mert megszabja a változások, folyamatok irányát és lehetőségét. Vegyük számításba, hogy *az emberi tevékenységnek mindig van egy termodinamikai aspektusa is. Egy fenntartható társadalomban a jövő generáció számára is biztosítani kell az erőforrások elérhetőségét és az ökoszféra produkciós, valamint asszimilációs kapacitását.* Eközben sem a teljes természeti tőkét, sem annak változását nem tudjuk pontosan meghatározni. A különböző fizikai jellemzők aggregálható mérőszámokat adnak, amelyek a természeti tőkének, illetve változásának csak egy-egy aspektusát jellemezhetik. A posztulátum kimondása teszi lehetővé az irreverzibilis jelenségek megértését és matematikai elméletének kidolgozását, ami egyszerűsíti annak tárgyalását, illetőleg mérhetővé – számszerűsíthetővé – teszi a természeti korlátokat.

*Festő:* Ez jó, de nem válasz a kérdésemre. Eszembe jutott, egy versrészlet: József Attila-i gyöngyszem 1925-ből, (*Keserű*).

„Kár, kár miértünk is.
de éljenek a köszörűs inasok, akik fütyörésznek
és nem tudják, hogy az égbolt fejünk fölül
elvitorlázott a pénztárcánkba."

Régebben számomra ez a vers az eltékozolhatót vagy a már eltékozolt hiányát énekelte meg. Most újraolvasva nem tudok szabadulni az ózonlyuk és a klímaváltozás asszociációtól. Szükséges rossz a környezetünk tönkretétele? Az entrópiatörvény még mindig ezt sugallja nekem. Meg kellene megszabadulni az entrópiától?

*Fizikus:* Nem az entrópiától kell megszabadulni. Az magától megtörténik. Ahogy te hőként leadod a termelt entrópiádat, a Föld is lead állandóan entrópiát. A kisugárzott hő viszi magával.

Az entrópia nem anyag, inkább formai jellemző, a már végbement változásokat méri.

*Festő:* Most már három kérdésem is van. Miért hívod termodinamikának ezt a fizikai diszciplínát, hiszen nem csak a név által sugallt hővel, hanem tulajdonképpen minden természeti jelenséggel foglalkozik.

A másik, ha az entrópia számértéke nem határozható meg, és nem is jelent semmit önmagában, akkor miért is beszélünk róla?

Az ember számára a változások lehetősége a fontos, miért nem azt méri a fizika?

*Fizikus:* A termodinamika szónak történelmi magyarázata van. A technikai fejlődés csúcsát a 18. század végén a 19. század elején a gőzgép jelentette. A termodinamika kialakulásában alapvető fontossága volt a termikus jelenségek magyarázatának. Helytelen azonban hőtannak fordítani. A termodinamika nemcsak a termikus folyamatokkal foglalkozik. Helyesebbnek tűnik az irreverzibilis folyamatok megközelítés. Az eltűnő különbségek irreverzibilitást jelentenek, hiszen az ellenkező folyamat, a növekvő különbségek megjelenése magától nem mehet végbe. A valóságos, emberléptékű folyamatok mind irreverzibilisek. Csak a gondolatkísérletek lehetnek reverzibilisek.

A második kérdésre az a válasz, hogy a szaktudományokban (fizika, kémia) nagyon hatékony fogalom, és van, amikor kiszámítható. A kémiai szakkönyvekben megtalálod az egyes anyagok entrópiáját.

A harmadik kérdésedre a válaszom: az entrópiafogalom úgy született, hogy Clausius egy matematikai formulának nevet adott. Kérdésed lényegében azt firtatja, hogy ez az egyetlen olyan matematikai formula, ami használható.

Tényleg nincs egy jobban érthető, használható megfogalmazás? Ha Clausius rendelte az entrópiát jellemzőként a rendszerekhez, nem lehet más jellemzőt találni?

*Festő:* Igen, ez az.

*Fizikus:* Egy másik 19. századi termodinamikus, Kelvin másik megfogalmazást javasolt.

*Festő:* A Kelvin-skála névadója?

*Fizikus:* Igen.

*Festő:* Mit javasolt?

*Fizikus:* Nehéz lenne röviden elmondani, mert a termodinamikai fogalmak akkoriban alakultak ki, ezért most mást jelentenek a szavak, mint akkor. Részletesebb leírását a honlapomra (martinas.web.elte.hu) is feltettem. A mai nyelven megfogalmazva a lényege az, hogy az entrópia helyett más mennyiség is használható, például az extrópia, amely a lehetséges változások mértéke.

*Festő:* Mi az extrópia?

*Fizikus:* Először izolált rendszerre mondom el. Az izolált rendszer entrópiája legyen $S$, és az egyensúlyi állapotában az entrópia legyen $S_0$!

A természet törvénye szerint $S$ nő, egész addig, amíg el nem érjük az egyensúlyi állapotot.

Legyen $\Pi$ az extrópia, a két entrópia különbsége: $\Pi = S_0 - S$! Ez is egy jól definiált mennyiség, de a jelentése más.

Míg az entrópia az elmúlt, a már végbement változásokat méri, addig az extrópia a jövőbeni változásokat, a lehetőségeket. Ha egy rendszer egyensúlyban van, akkor extrópiája zérus. Minél nagyobb az eltérés, a nem-egyensúlyiság, a lehetőség a változásra, annál nagyobb az extrópia.

*Festő:* Korábban azt mondtad, hogy az entrópia számértékét nem érdemes meghatározni, mert annyi adat kell hozzá, hogy szinte lehetetlen. Most megkétszerezted a nehézséget.

*Fizikus:* Igazad van és izolált rendszerekre valóban nem érdemes az extrópiát használni, de a nyílt rendszereknek nagy részénél már igen.

*Festő:* Nyílt rendszer az, ami mással is kölcsönhathat.

*Fizikus:* A földi rendszerek mind nyílt rendszerek, izolált rendszerek csak a tankönyvekben léteznek. Most egy trükköt alkalmazunk: a valódi környezetet gondolatban szétosztjuk egy *tartályra* (reservoirra) *és rendszerekre*. Például, ha az asztalon lévő pohár vizet nézem, akkor a szobát egy állandó hőmérsékletű, állandó nyomású tartályként jellemzem, és az eltéréseket pedig rendszerként tekintem. A pohár vizet először úgy írom le, hogy csak a szoba, mint tartály lesz a környezete. Később, természetesen a kölcsönhatások is tárgyalhatók lesznek.

*Festő:* A pohár víz és a szoba-tartály most viszont egy izolált rendszer.

*Fizikus:* Erre az izolált rendszerre írjuk fel most az extrópiát.

*Festő:* Most már négy ismeretlen entrópiánk lesz? Meddig folytatod?

*Fizikus:* Szerencsére itt megállhatunk, és a számérték meghatározásához nem kell kiszámítani az entrópiákat. Közvetlenül mérhető mennyiségekből meghatározható.

*Festő:* Mondanál egy példát?

*Fizikus:* Miért nem érdemes villannyal fűteni?

*Festő:* Mert drága!

*Fizikus:* És a fizika alá is támasztja, hogy jogosan drága!

−10 Celsius fokos külső hőmérséklet mellett 263 J villamos energia 1 J/K extrópiát jelent.

Ha −10 fokos külső hőmérséklet mellett 263 J hőt adunk a 16 fokos szobának, akkor a szoba extrópiája 0,1 J/K-nel nő. Ugyanannyi energiát adunk a szobának, de más mennyiségű extrópiát.

*Festő:* Az energia megmarad, amivel gazdálkodni kell, az az extrópia. Tényleg kellemes mennyiség az extrópia.

*Fizikus:* Ha egy rendszer egyensúlyban van a környezetével, tehát nem különbözik tőle, akkor az extrópiája zérus. Minél nagyobb az eltérés, annál nagyobb az extrópia. A II. főtétel tartalma az is, hogy ha nem a lehetőségeinkkel élünk, akkor az extrópia magától is eltűnik, hisz Gaia csak egy bizonyos mennyiségű extrópiát bocsát rendelkezésünkre. Ha nem használjuk fel mind, akkor szegényebbek leszünk annál, mint amit lehetőségeink biztosítanak, ha pedig többet használunk fel – de ez csak rövid távon lehetséges – akkor a jövőnket fogyasztjuk, tehát a jövőben leszünk majd szegényebbek.

Amiről pedig most, a végén beszélek az nem ördöngösség, és ha néhány képlet tartalmát is elsajátítod, nem fogod megbánni, hogy eddigi ismereteidet újabb megvilágítással egészítheted ki.

Egy rendszer extrópiáját csak a bejövő áramokkal növelheti, és ez más – extrópiával rendelkező – rendszerből származhat. A termodinamika II. főtételéből átfogalmazható: *egy rendszer csak befogad, megsemmisít vagy átalakít extrópiát. Egy rendszer nem képes spontán módon extrópiát termelni.* Az extrópiaáramot egy másik rendszer biztosítja.

*Festő:* Azt mondtad, hogy az extrópia a rendszereket jellemzi, és meg tudjuk mondani, hogy például egy pohár víznek mennyi az extrópiája. Nem értem viszont, hogy mi az extrópiaáram. Olyan, mint egy anyag, ami átmehet az egyik rendszerből a másikba?

*Fizikus:* Az első fele jó annak, amit mondtál, de a második nem. Ha a vizet beöntöd a kancsóba, akkor a víz beáramlik és magával viszi az extrópiáját. Hosszadalmas lenne mindig elmondani, hogy egy rendszer extrópiája csak úgy nőhet, hogy az anyag- és energiaáramok hatására a rendszer távolodik az egyensúlytól és így megnő az extrópiája.

Ez lehet „adomány", amikor az input egy másik rendszer outputja. Például a Föld extrópiaáramát a Naptól kapja. Az élőlények jellemzője viszont, hogy „megszerzik" a bemenetet, „megdolgoznak" érte. A farkas megszerzi az ennivalóját, extrópiaáramát. Az emberi lét feltétele az állandó extrópia-input, és ezért a bemenetért meg kell dolgozni.

*Festő:* Hogyan változik a Föld extrópiája és ennek milyen következményei vannak? Növekszik vagy csökken a Föld extrópiája az emberi tevékenység hatására?

*Fizikus:* Hajlamosak vagyunk arra, hogy a pesszimista jövőképünket a Föld entrópiájának növekedésével támasszuk alá. A Föld alatt most természetesen csak a Földnek az ember által hozzáférhető részét tekintjük.

A Föld felszíne másodpercenként és négyzetméterenként 240 (±20) W energiát sugároz ki hosszú hullámon, ez az az energia, ami a Földi folyamatokat hajtja, A Nap sugárzási hőmérséklete 5704 K. A légkör sugárzási hőmérséklete 287 K.

*Festő:* Azt mondtad, hogy az extrópiát egy egyensúlyi környezetben számolod. Hol van a Földnek egy egyensúlyi környezete?

*Fizikus:* A világűr. Nekünk most csak a hőmérséklete kell, ami 2,7 K.

A Napból ténylegesen átlagosan 342 W teljesítmény jön négyzetméterenként, ami így

$$\Pi = 342\left(\frac{1}{2{,}7} - \frac{1}{5700}\right) = 130\ \mathrm{W/m^2K}$$

extrópiabehozatalt jelent, de a sugárzás egy részét a Föld reflektálja (102 W/m$^2$-t), így a ténylegesen bejövő extrópiaáram

$$\Pi = 240\left(\frac{1}{2{,}7} - \frac{1}{5700}\right) = 89\ \mathrm{W/m^2K}.$$

*Festő:* Ennyit kapunk, azaz ennyit fogyaszthatunk el?

*Fizikus:* Nem, a sugárzással bejövő energiától meg kell szabadulni, ezért a Földnek ki kell sugároznia, és a kisugárzott energia másodpercenként 240 W/m$^2$ kell, hogy legyen. Ez a kisugárzás 287 K hőmérsékleten történik, ezért az extrópiája

$$\Pi = 240\left(\frac{1}{2{,}7} - \frac{1}{287}\right) = 88\ \mathrm{W/m^2K}.$$

A különbséget, ami 1 W/m$^2$K a Föld kapja.

A Föld a napsugárzás hatására másodpercenként ennyivel távolodna el az egyensúlyi állapottól, ha nem lennének kiegyenlítődési folyamatok. Állandósult állapotban el kell fogyasztani a bejövő extrópiát. Ennek zömét a víz körforgása viszi el. A bioszféra 200 mW/m$^2$ energiát használ fel, ami 1 mW/m$^2$K extrópiafelhasználást – az ezred részt – jelent.

*Festő:* Mi történik, ha nem használjuk fel?

*Fizikus:* Gaia, avagy a természet biztosítja, hogy az extrópiaáramlás és -felhasználás megegyezzen. Ha kevesebbet használna fel a Föld, akkor extrópiája nőne, ez viszont az extrópiafelhasználás növekedését jelenti, és fordítva is igaz.

*Festő:* Térjünk vissza a fizikához. Mi történik, ha a Földön nem termelődik elég entrópia?

*Fizikus:* Ha $\Sigma < \Pi_{\text{eredő}}$, azaz az entrópiaprodukció kisebb, mint az extrópiaáram, akkor a teljes földi extrópia nő. Az extrópia növekedéssel együtt jár az entrópiaprodukció növekedése. Az extrópia növekedése addig tart, amíg el nem érjük a $\Sigma = \Pi_{\text{eredő}}$ egyenlőséget. Amikor $\Sigma > \Pi_{\text{eredő}}$, akkor az entrópiaprodukció nagyobb, mint az extrópiaáram. A teljes földi extrópia csökkenni fog. Az extrópiacsökkenéssel együtt jár az entrópiaprodukció csökkenése. Az extrópia fogyása addig tart, amíg újra el nem érjük a $\Sigma = \Pi_{\text{eredő}}$ egyenlőséget. Más szavakkal *extrópia nélkül, nem-egyensúlyi szerkezet hiányában nem lehetséges a Föld stacioner állapotban*. Gaia biztosítja az állandó entrópiaprodukciót, s így egy extrópiaértéket is. (A gondolatmenet természetesen csakis az állandó extrópiaáram mellett érvényes!) Gaia azért hozta létre a nem-egyensúlyi rendszereket a Földön, hogy azok termeljék az entrópiát, és mindig biztosítja a megfelelő extrópiát. Ebben a vonatkoztatásban az emberiség feladata az, hogy entrópiát termeljen. De nem mindegy, hogy miből, mennyit és hogyan. Gaia számára nem vagyunk fontosak, emberiség, gazdaság nélkül is kialakul az entrópia termelését biztosító extrópia. Gaia lehetővé tette (és lehetővé teszi), hogy ezen entrópiatermelés-lehetőség egy részével mi gazdálkodjunk. Ki kell lesni Gaia titkát, milyen lehetőséget biztosít számunkra. Meg kell ismernünk, hogy Gaia mennyi extrópiát ad számunkra. Ha kevesebbet használunk fel, akkor szegényebbek leszünk annál, mint amilyenek lehetőségeink alapján lehetnénk. Ha többet, akkor a jövőnket esszük meg. A jövő generáció lehetőségeit csökkentjük.

*Festő:* De most nem tudod megmondani a számokat.

*Fizikus:* Az elmúlt évtizedben már nagyon sok adat összegyűlt, de még kevés.

*Festő:* Az emberi tevékenység hatását nem vetted figyelembe!

*Fizikus:* Igazad van, az elfogadott becslések alapján ezek 40 mW/m$^2$ nagyságrendben vannak.

*Festő:* Megnyugtattál, a zöldenergia még hosszú időre biztosíthatja az energiaigényünket. Továbbá még reménykedhetünk a fúziós energiában is. Növekedhetünk, hiszen a teljes energiának vagy extrópiának csupán körülbelül 2 tízezred részét használjuk.

*Fizikus:* Nem ilyen korlátlan a lehetőségünk, az emberi energiafelhasználás végülis a felszínt melegíti, és ha a felszínre jutó energia megnő körülbelül 100 mW/m$^2$-rel, akkor ez körülbelül 0,1 fokos globális hőmérséklet-emelkedést okoz.

*Festő:* A 40 mW/m$^2$ mennyire megbízható?

*Fizikus:* Nem tudom, lehet hogy ez is olyan, mint a GDP-számítás, csak a piacképes dolgokat veszi figyelembe.

*Festő:* A negyven a százhoz képest nem is olyan kicsiny.

*Fizikus:* Az energiával tényleg takarékoskodni kell, de szerintem a környezetszennyezés nagyobb probléma.

*Festő:* Mi a veszélyes hulladék? Tudsz-e erre mondani valamit? Igaz, vagy naiv álom, amit az ipari ökológia mond, hogy lehet hulladékmentesen termelni.

*Fizikus:* A hulladékmentesség nem azt jelenti, hogy nincs kimenő anyag- és energiaáram. Azt jelenti csak, hogy a hulladék extrópiája zérus. Ez akkor történik meg, amikor a kibocsátott anyag a környezettel egyensúlyban van.

Minél nagyobb a szemét extrópiája, annál veszélyesebb. Érdekes, hogy minél nagyobb az extrópia, annál hasznosabb lehet a gazdaságban, ha fel tudjuk használni. A szemét tehát a tudatlanság és a rossz gazdálkodás eredménye.

*Festő:* Ez nekem nagyon leegyszerűsített gondolatmenet. Ahol gyalulnak, ott hullik a forgács.

*Fizikus:* Kiskoromban egy faluban laktam, ahol nem volt szemét. A hulladék nem fizikai, hanem gazdasági fogalom. Az extrópia szempontjából a felbontás önkényes, mint ahogy ezt a technikai fejlődés is mutatja. Amikor petróleumot használtak világításra, akkor a benzin egy felesleges melléktermék volt!

Mégis, természettörvénynek érezzük, hogy a termelés mindig hulladéktermeléssel jár együtt. Nem lehet elérni, hogy a bemenet (alapanyagok) összetétele pontosan megegyezzen a hasznos kimenetével (termékkel), így a hulladék mindig megjelenik. A hulladék mennyiségét a gyártási folyamat, a technológia rögzíti. Azonban a hulladék extrópiája tetszőlegesen kicsiny lehet. A minimális érték zérus. Ez akkor következik be, amikor a környezetnek leadott energia és anyag a környezettel egyensúlyi állapotban van. Ekkor a hulladék-output entrópiája maximális. $\Pi_{sz} = 0$ azt jelenti, hogy a hulladék megkülönböztethetetlen a környezettől. A maximális entrópiájú hulladék egyensúlyban van a környezettel! Ez a hulladék nem szemét! Nem lehet ártalmas, nem változtatja a környezetet. A hulladék-output akkor lesz szemét, akkor lesz veszélyes a környezetre, amikor más lesz, mint a környezet. Nem az a baj a szeméttel, hogy nagy az entrópiája. Ellenkezőleg, minél kisebb az entrópia, annál ártalmasabb a szemét. (Egységnyi anyagmennyiségre vonatkoztatva!) Minél kisebb az entrópia, annál nagyobb az extrópia – annál több változást indukálhat, annál ártalmasabb a szemét. Természetesen a termodinamika értékmentes. A termodinamika elveiből nem következik, hogy a hulladék extrópia-outputja által indukált változások hátrányosak az embernek. Csak annyit mondhatunk, hogy a hulladék a természetben változásokat indukál. Ennek mértéke az extrópia. A hulladék-extrópia méri azokat a fizikai, kémiai változásokat, amelyeket a szemét a környezetben indukálhat. Így a környezetet módosító hatás mérőszámát adja. De tudjuk, hogy ami elromolhat, az el is romlik. A hulladék extrópiája a környezeti hatások termodinamikai mértékének tekinthető.

A környezetet visszavonhatatlanul módosítja a $\Pi$ nem megújuló felhasználása és a hulladék kibocsátása. Ezek tényleg csökkentik a jövőbeli esélyeinket! A termodinamika azonban nem tiltja, hogy ezek zérus értékűek legyenek. Az élővilág megoldotta, hogy jó közelítéssel zárt ciklusok alakuljanak ki. Az effektív bemenet a napsugárzás $\Pi$-je, míg a kimenet a 287 K sugárzás extrópiája. Ezért létezhet az élet ilyen régóta. A termelésnél csak a tudatlanság és a rosszul értelmezett gazdaságosság tiltja. Gazdasági irányító, szabályzó rendszerünk az ipari forradalom terméke. Ekkor a nem megújuló energia korlátlannak tűnt, és hasonlóan nem éreztük a Föld asszimilációs kapacitásának végességét. A hulladék magától eltűnt. Egyetlen korlátos termelési tényező volt, a munkaerő. Természetesen a tőke mellett. Gazdasági irányításunk a munkaerővel takarékoskodik – eredmény a munkanélküliség, a környezetszennyezés és a környezet kizsákmányolása.

*Festő:* A kukánk tartalma tehát a butaságunkkal arányos.

*Fizikus:* És persze a kiszolgáltatottságunkkal, hiszen egy jelentős részét kéretlenül dobják be a postaládánkba.

*Festő:* Ébredj, mert jön a fekete entrópia?

*Fizikus:* Látod, nem is olyan bonyolult kérdések ezek, ezért hasznos lenne, ha mind többen értenék meg a figyelmeztetést, hogy ébresztő, mert valóban jöhet *a fekete entrópia!*

Szerkesztőség: 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29–33., 31. épület, II.emelet, 315. szoba, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682
A Társulat Internet honlapja http://www.elft.hu, e-postacíme: mail.elft@gmail.com
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 Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.
Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.
Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.
**HU ISSN 0015–3257** (nyomtatott) és **HU ISSN 1588–0540** (online)

# AZ IKERPARADOXON ÉS A GYORSULÁS

Bokor Nándor
BME Fizika Tanszék

A speciális relativitáselméletnek a mindennapi szemléletünk számára meglepő következményeit sok gondolatkísérlet illusztrálja. Az egyik fogalmi újítás az időtartam abszolút voltának elvetése. Ehhez kapcsolódik az ikerparadoxon, amely többek között drámai megfogalmazásának – ikertestvérek életkora különbözhet, ha két találkozás között egymástól eltérő mozgást végeztek – köszönheti népszerűségét.[1] A különböző életpályájú ikrek eltérő öregedése, mint problémafelvetés azonnal felkelti a diákok érdeklődését. A paradoxon feloldása egyértelmű, matematikailag egyszerű, sok diák azonban joggal valami többet, szemléletesebbet vár a formulák felírásánál. Mi *okozza* (fizikailag) az eltérő öregedést? Ennek szemléletessé tételére az egyes fizikakönyvek már többféle magyarázattal próbálkoznak, ezek némelyike inkább a zavart fokozza az olvasóban, mintsem a megértést segíti. Sajnos a magyar mérnökhallgatók által legszélesebb körben használt egyetemi tankönyvek [1, 2] éppen ilyenek. A jelen cikknek kettős célja van: (1) rámutatni az ikerparadoxon-magyarázatok némelyikének félreérthetőségére; (2) bemutatni a paradoxonnak néhány olyan változatát, amelyekben a látszólagos ellentmondás még élesebben mutatkozik meg, és így végső soron mélyebbé tehetik a diákok számára az effektus megértését.

A magyar mérnökhallgatók által legszélesebb körben használt fizikatankönyv [1] így fogalmaz:

„Nem lehet az ikertestvérek közül bármelyiket mozgónak vagy nyugvónak tekinteni, és így a helyzetet szimmetrikusnak felfogni? Nem bizony! Mert az utazó testvérnek valamiképpen gyorsulnia kell, hogy a visszatéréshez megváltoztassa a sebességét, a gyorsulás pedig csak az utazó iker vonatkoztatási rendszerével kapcsolatos! A gyorsulás abszolút, nem pedig relatív dolog, ezért az esemény nem szimmetrikus."

Bár a könyv általában ügyel a pontos fogalmazásra, a diák a fenti részletet olvasva joggal érezheti úgy, hogy végre megértette az utazó iker lassabb öregedésének *fizikai hátterét:* az effektust valamiképp a gyorsulás *okozza*. Igaz, hogy a könyv siet a további magyarázatokkal: előbb lábjegyzetben említi, hogy „Kísérletileg (…) bebizonyították, hogy gyorsulások egészen a $10^{16}$ g értékig nem befolyásolják az órák járását. Csak a relatív sebességek teszik ezt." Majd később leszögezi: „A [fordulópontnál jelentkező] gyorsulás ugyan nem változtatja meg az órák járásának ütemét, de drámaian megváltoztatja az egyidejűség skáláját az *S′* [az utazó iker nyugalmi rendszere] számára." Ezek a kiegészítések azonban – összevetve az elsőnek leírt magyarázattal – inkább csak zavarosabbá teszik, mintsem tisztáznák az olvasóban a kérdést, hogy a gyorsulásnak végül is van-e szerepe, vagy nincs.[2]

Még rosszabb a helyzet egy másik, széles körben alkalmazott tankönyvvel [2], amely egyszerűen így fogalmazza meg a két iker nem szimmetrikus mozgását:

„Speedo, az űrutazó kénytelen egy sor gyorsulási szakaszt átélni utazása alatt, hiszen be kell kapcsolnia a rakétáit, hogy előbb lelassítsa az űrhajóját, majd visszainduljon a Föld felé. Így sebessége nem lesz végig állandó, következésképpen nem inerciarendszerben utazik."

A könyv magyarázata itt gyakorlatilag abba is marad. Az olvasóban tehát ismét könnyen kialakul az a tévkép, hogy az effektusnak *dinamikai* oka van. Mintha az utazó iker attól öregedne kevésbé, hogy mozgása során erőlökéseknek van kitéve (és ez fiziológiai változásokat okoz a szervezetében).[3]

Az alapprobléma valószínűleg az, hogy a tankönyvek ikerparadoxon-változata szinte mindig egy *gyorsulásmentesen* (egyenes világvonal mentén) és egy *gyorsulva* (megtört vagy görbült világvonal mentén) mozgó iker életútját veti össze. Érthető persze ez a választás, hiszen ennek feltűnő aszimmetriáját (gyorsul – nem gyorsul) a diákok hamar átlátják. Másfelől éppen ez a feltűnő aszimmetria sodorja – még félrevezető magyarázatok nélkül is – szinte elkerülhetetlenül abba a képzetbe az olvasót, hogy a jelenségben a gyorsulás valamilyen fontos szerepet játszik.

Van olyan tankönyv [3], amely ugyan szintén a szokásos „gyorsul – nem gyorsul" ikerparadoxon-változatot tárgyalja, viszont – mivel tisztában van az így előálló csapdahelyzettel – hosszú, precíz magyarázattal tereli az olvasót a helyes fizikai kép felé:

„(…) szó sincs szimmetriáról: az ikerpár egyik tagja végig zavartalan sorsú, »szerencsétlen« testvére viszont mindenféle »zaklatásban« részesül. (…) Ugyanakkor arról sincs szó, hogy a kevésbé öregedésnek a »zaklatás« (gyorsulás) lenne az *oka*. A »szerencsétlen« sorsú testvérrel (…) csupán egyetlen egyszer történik valami »megrázó« (…), de nyilván nem ekkor és ettől »fiatalo-

[1] Nem csupán gondolatkísérletről van szó, gyakorlati kimutatása azonban a makrovilágban nem könnyű, mivel a szokásos – *c*-nél sokkal kisebb – sebességeknél az effektus az „ikrek" (a kísérletben atomórák) sajátidejének csak nagyon kicsi eltéréséhez vezet.

[2] Az utolsó mondat például, bár tagadja a gyorsulás szerepét az órák eltérő járásában, valamiképp mégis azt mondja, hogy a visszafordulóskor – a gyorsuláskor – *történik* valami lényeges.

[3] Ezzel kapcsolatban jó, ha a diákok előtt már az elején kihangsúlyozzuk, hogy az ikerparadoxon ténylegesen végigszámolt esetei mind *ideális órákra* vonatkoznak, amelyeknek a szerkezetét nem lehet mechanikai igénybevétellel (például ütés) tönkretenni, és amelyek egy-egy ilyen igénybevétel után ugyanolyan pontos ütemben járnak, mint előtte.

dott meg« hirtelen. Arról sincs szó, hogy az egyik testvér lassabban öregedne, mint a másik. (…) a két testvér nem különböző ütemben, hanem a téridő különböző *irányában* kezd öregedni. (…) Az eltérő időtartamoknak globális, téridő-geometriai oka van. (…) Az ikerparadoxon lényege tehát fizikai szempontból a következő: a téridő két eseménye között különböző világvonalakon mérve különböző (saját)időtartamok telnek el, méghozzá úgy, hogy a két eseményt egyenes világvonallal összekötve telik el a legtöbb idő."

A fenti magyarázat szemléletes és – a matematikai részletek elkerülése mellett is – teljesen precíz. Az eltérő öregedésért tehát nem a gyorsulás a felelős. Mégis, az olvasóban tovább motoszkálhat a kérdés: ha egyszer az ikrek sorsa feltűnő módon mégiscsak abban tér el, hogy az egyiket „zaklatják", a másikat „zavartalanul hagyják", akkor ez a különbség *miben* nyilvánul meg? Van-e a gyorsulásnak *bármilyen* szerepe az eltérő öregedéssel kapcsolatban, vagy teljesen kihagyható a diszkusszióból?

1912-ben *von Laue* a következőket írta [4]: a gyorsulás az effektusban egyáltalán nem játszhat szerepet, hiszen az oda-vissza utazó iker világvonalán „az egyenletes mozgás szakaszainak időtartamát tetszőlegesen nagyobbra választhatjuk, mint a gyorsulási szakaszokét". Ez a mondat azonban önmagában még nem meggyőző, hiszen – adott sebességváltozás mellett – minél kisebbre választjuk a gyorsulási szakasz *időtartamát,* annál nagyobbá válik a gyorsulás *számértéke*. Egyáltalán nem magától értetődő tehát, hogy ezzel a trükkel kiküszöböltük a gyorsulás szerepét a problémából.

Végül megemlítek egy olyan tankönyvet [5], amely az ikerparadoxon tömör megfogalmazását adja, úgy, hogy a gyorsulás szó használatát teljesen elkerüli:

„A trajektória $t_1 \le t \le t_2$ szakaszám eltelt sajátidőt az alábbi integrál adja meg:

$$\Delta\tau = \int_{t_1}^{t_2} dt \sqrt{1 - \frac{v(t)^2}{c^2}} < t_2 - t_1 . \qquad (1)$$

Ez a képlet írja le az *ikerparadoxon* néven ismert jelenséget. Tekintsünk két különböző tömegpontot, *a*-t és *b*-t, mindegyiket a saját órájával (…). Tegyük fel, hogy a $t_1$ és a $t_2$ ($>t_1$) pillanatokban találkoznak egymással. (…) Ha [a fenti képlet] segítségével mindkettőre kiszámítjuk a két találkozás között eltelt sajátidőt, a $v_a(t)$ és a $v_b(t)$ függvények különbözősége miatt általában két különböző $\Delta\tau_a$, $\Delta\tau_b$ értéket kapunk."

Az (1) képlet azt is mutatja, hogy – összhangban von Laue fenti érvelésével – egy gyorsulási szakasz *időtartamát* nullához közelítve, bár a gyorsulás *számértéke* korlátlanul nő, a gyorsulási szakasz alatti sajátidő-járulék zérushoz tart:

$$\Delta\tau_{gy} = \lim_{\varepsilon \to 0} \int_{t}^{t+\varepsilon} dt \sqrt{1 - \frac{v(t)^2}{c^2}} = 0, \qquad (2)$$

hiszen az integrálandó függvény korlátos (1-nél kisebb).

Az ár, amit a fenti pontos, kvantitatív tárgyalásért fizetünk, a szemléletes geometriai kép hiánya. Néhány példával és geometriai analógiával azonban még egyértelműbbé és érthetőbbé lehet tenni, hogy a gyorsulás az ikerparadoxonban valóban *nem* játszik szerepet. A legmeggyőzőbbek ebből a szempontból az olyan példák, amelyekben az ikrek (1) *ugyanúgy* gyorsulnak, mégis *eltérően* öregednek, vagy (2) *különbözőképpen* gyorsulnak, mégis *ugyanúgy* öregednek. Az alábbiakban ilyen ikerparadoxon-változatokat vizsgálok.

## Az ikrek azonos gyorsulásokat élnek át, mégis eltérően öregednek

*1. példa*

Az alábbi változat szövege részletesen beszél az ikrek által átélt gyorsulásokról. Mivel a gyorsulások teljesen szimmetrikusak, a szövegből nehéz tetten érni, mi vezethet az eltérő öregedéshez:

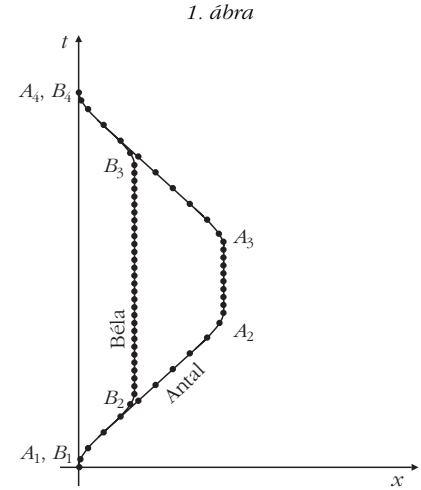
„Antal és Béla egy ikerpár, egy űrállomáson élnek. Mindketten beülnek űrhajójukba, és egyszerre elindulva *a* gyorsulással *v* sebességet érnek el. Hamarosan $-a$ lassulással megállnak. Végül $-a$ gyorsulással visszaindulnak (a végsebességük ezúttal $-v$), majd az űrállomás közelébe egyszerre érve *a* lassulással megállnak. Béla sokkal többet öregedett, mint Antal. Hogyan lehetséges ez?"

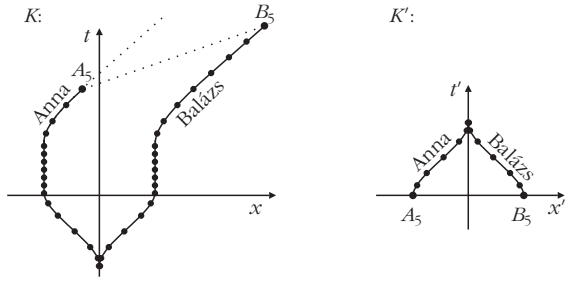
Az *1. ábra* mutatja az egyszerű magyarázatot. A két iker világvonala feltűnően különbözik, így az eltérő öregedésben nincs semmi meglepő, holott az $A_1$, $A_2$, $A_3$, $A_4$, illetve a $B_1$, $B_2$, $B_3$, $B_4$ gyorsulási-lassulási szakaszok – így az ikreket ért erőlökések is – teljesen megegyeznek.

Az ikrek öregedését kiszámíthatjuk, ha az (1) képletet alkalmazzuk először az egyik, majd a másik világvonalra (a kvalitatív szemléltetéshez elég, ha – mint az *1. ábrá*n – a világvonalakra rajzolt pontokkal jelezzük az egyenlő sajátidő-tartamokat, például hónapokban mérve).

A feladat megszövegezésében a „csalást" nyilvánvalóan ott követtem el, hogy hallgattam arról: az ikrek visszafordulását eredményező fékezési, illetve gyorsulási manőverek az ikreknek nem ugyanannyi idős korában történtek.

*1. ábra*






*2. ábra*

*2. példa*

Lássunk egy másik, hasonló példát ([6] nyomán), ahol a szöveg többször kitér arra is, hogy a gyorsulási szakaszok *mikor* zajlottak (sajátidőben mérve), így talán még nehezebb észrevenni, hol jelenik meg a mozgás aszimmetriája:

„Két ikertestvér, Anna és Balázs, egy űrbázis közepén élnek. Az űrbázis mérete 1 fényév.[4] 20. születésnapjuk előtt egy nappal beülnek űrhajójukba, és elindulnak ellentétes irányban az űrbázis két széle felé: Anna balra indul, Balázs jobbra. A két űrhajó tökéletesen ugyanolyan, és a két iker vezetési stílusa is megegyezik, azaz a két mozgás tökéletesen szimmetrikus. Olyan gyorsan haladnak, hogy a 0,5-0,5 fényévnyi távolságot az űrbázis két széléig 1 nap alatt megteszik (saját órájukon mérve). Mindketten tehát 20. születésnapjukon érnek az űrbázis két szélére: Anna a bal, Balázs a jobb szélére. Még aznap elindulnak egy hosszú űrutazásra, mindketten jobbra. Ráérősen gyorsulnak fel; űrhajóik ismét pontosan ugyanúgy viselkednek, ezért Anna és Balázs mindig pontosan ugyanannyi idős korukban érnek el egy-egy adott sebességértéket. Éppen 30. születésnapjuk előtt egy nappal, amikor pontosan $v$ = 0,999 $c$ a sebességük, mindketten egy másik űrbázis mellé érnek. Ezen űrbázis sebessége is éppen 0,999 $c$, azaz hozzájuk képest nyugalomban van. Ki lehet szállni a száguldó űrhajóból, és egyszerűen lelépni a „száguldó” űrbázisra. Ezt mindketten meg is teszik még aznap, 30. születésnapjuk előtt egy nappal. Kiderül, hogy ez az űrbázis éppen olyan hosszú, hogy Anna a bal szélére, Balázs a jobb szélére lépett le. Az űrbázis közepén, félúton van egy étterem. Az ikerpár ott akar találkozni, hogy élményeiket megbeszéljék. El is indulnak egymás felé, mégpedig egyszerre (azaz olyan módon időzítve az indulást, hogy – azonos sebességű űrhajóikon egymás felé haladva – éppen egyszerre érjenek el az űrbázis közepén levő étteremhez). Annyira nagy sebességgel utaznak, hogy az út az űrbázis közepéig mindkettejük óráján csak 1-1 napot vesz igénybe. Anna tehát pontosan 30 éves, amikor az étteremhez egyszerre odaérnek. Meglepve látja, hogy egy sokkal idősebb férfi siet feléje: Balázs 52 éves!”

Az ikrek által átélt gyorsulási szakaszok, „rázkódások” ismét pontosan ugyanolyanok. Az egyetlen aszimmetria ott jelent meg, hogy jobbra indultak útnak, nem pedig balra (akkor Anna öregedett volna többet).

[4] Néhány számérték irrealitásától vonatkoztassunk el.

Az aszimmetriát mutatja, és a kvalitatív tárgyalásban segít a *2. ábra* ($K$ a kiindulási űrbázis nyugalmi rendszere, $K'$ a végállomás nyugalmi rendszere, és $A_5$ és $B_5$ jelzi azt a két eseményt, amikor Anna, illetve Balázs egyszerre elindult az űrbázis közepén levő étteremhez). A feladat végigszámolását az olvasóra bízom.

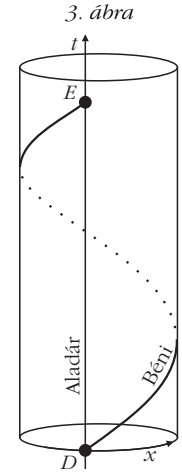
*3. példa*

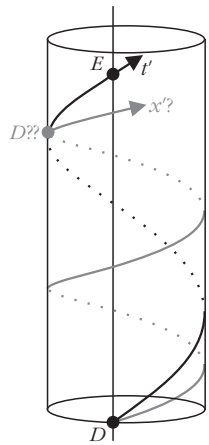
Mennyire *tartozik hozzá* egyáltalán a gyorsulás az ikerparadoxonhoz? Lehet-e olyan példát konstruálni, amikor *egyik iker sem gyorsul, mégis eltérően öregednek?* Ez első látásra (legalábbis sík téridőben) képtelenségnek tűnik, hiszen még ha az egyik iker gyorsulásmentesen mozog (vagy helyben marad) is, a másiknak el kell távolodnia, majd vissza kell fordulnia, hogy ismét találkozhassanak. Ez a kifogás azonban az alábbi ötlettel [7] kicselezhető: legyen a téridő továbbra is *sík* (ahol a speciális relativitáselmélet uralkodik), de *zárt,* ahogy a *3. ábra* mutatja. A két iker – Aladár és Béni – *eltérő* világvonalakon jut el a $D$ eseményből az $E$ eseménybe, úgy hogy közben mindketten végig *állandó sebességgel* mozognak.

Tekintsük Aladár nézőpontját, pontosabban megfogalmazva azt a *globális inerciarendszert* – nevezzük ezt $K_A$-nak; ($x, t$) koordinátatengelyeit feltüntettem a *3. ábrá*n –, amelyben Aladár nyugalomban van. A jelenséget ebben az inerciarendszerben leírva Béni állandó $v$ sebességgel jobbra halad, majd egyszercsak – mivel a téridő zárt – Aladár bal oldala felől visszajut a kiinduló pontba. Mivel inerciarendszerről van szó, alkalmazhatjuk az időtágulás képletét, amelyből kiderül: az $E$-ben való találkozáskor *Aladár idősebb, mint Béni.*

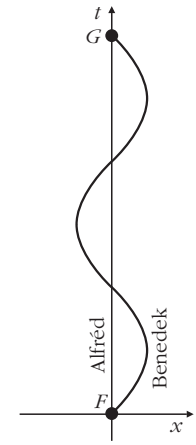
A helyzet azonban most *valóban* szimmetrikusnak tűnik, hiszen egyik iker sem gyorsul! Ha Béni végig állandó sebességgel mozgott, akkor miért ne írhatnánk le ugyanígy a jelenséget abban az globális inerciarendszerben – nevezzük ezt $K_B$-nek –, amelyben *Béni van nyugalomban,* és amelyből nézve Aladár „tesz egy kört”, $v$ sebességgel *balra* indulva? Világos, hogy $K_B$-ben – mivel globális inerciarendszer – az időtágulás képlete *éppúgy alkalmazható,* mint $K_A$-ban. Csakhogy a képlet most az ellenkező eredményt adja: a találkozáskor *Béni lesz idősebb, mint Aladár!*

*3. ábra*






*4. ábra*




*5. ábra*

Hol az aszimmetria, amely a paradoxon feloldását lehetővé teszi? A válasz megtalálásához tekintsük a *4. ábrá*t, amelyre a $K_B$ globális inerciarendszer $(x', t')$ koordinátatengelyeit próbáltam berajzolni. A $t'$-tengely megegyezik a $K_B$ origójában nyugvó Béni világvonalával; az $x'$-tengely pedig ezzel szimmetrikusan helyezkedik el, ahol a szimmetriatengely egy $D$-ből jobbra indított fényjel világvonala. Több – egymással összefüggő – súlyos gond van azonban ezzel a konstrukcióval:

(1) Mint az ábrából is látható, a két koordinátatengely *végtelen sokszor metszi egymást*. Ez megengedhetetlen, hiszen azt jelentené, hogy téridőnek végtelen sok „origója van" (Béni az útja során periodikus időközönként a $D$ indulási eseménybe jutna).

(2) $K_B$-ben az órák fényjelekkel való szinkronizálása megoldhatatlan, mert – mint az ábrába könnyen berajzolható – ha Béni egyszerre küld jobbra és balra egy-egy fényjelet, a jobbra küldött fény előbb érkezik vissza hozzá, mint a balra küldött (aminek alapján – ha elfogadná nagy távolságokra is helyes hosszmérési eljárásnak ezt a módszert – Béni kénytelen lenne megállapítani, hogy zárt univerzumának kerülete balra mérve nagyobb, mint jobbra mérve!).

A hibát ott követtük el, hogy automatikusan feltételeztük: a *3. ábrá*n szereplő zárt téridő lefedhető olyan globális inerciarendszerrel (ezt neveztük $K_B$-nek), amelyben Béni nyugalomban van. Most láthatjuk, hogy ilyen *globális* inerciarendszer nem létezhet. Ebben a téridőben – bár sík! – van egy *abszolút, kitüntetett* nyugalmi rendszer; $K_A$ az egyetlen Minkowski-koordinátarendszer, amely a *teljes* téridőt lefedheti. A $K_A$-beli leírás helyes, a viszontlátáskor valóban Aladár lesz az öregebb. A $K_A$-hoz képest – akár állandó sebességgel – mozgó megfigyelők nem tudják megkonstruálni a méterrudak és szinkronizált órák olyan rendszerét, amely a teljes téridőt lefedi, és amely az időtágulás képletének tetszőlegesen nagy téridőtartományra kiterjedő használatát jogossá tehetné.[5]

Szoros geometriai analógia: egy hengerfelület geometriai értelemben sík ugyan – hiszen egy sík lap torzításmentesen felcsavarható hengerré –, mégis fontos különbség van egy kiterített sík lap és egy hengerfelület között. A kiterített sík lap végtelen sok, egymáshoz képest elforgatott, derékszögű koordinátarendszerrel globálisan lefedhető, ez azonban a hengerre már nem igaz. Ha egy négyzetrácsos papírlapot feltekerünk hengerré, a négyzetrácsok csak akkor adnak értelmes koordinátavonalakat a hengeren is, ha a sík lapot „egyenesen", a koordinátavonalak mentén tekertük fel.

## Csak az egyik iker gyorsul, mégis azonos mértékben öregednek

Ebben a példában az ikerpár egyik tagja, Alfréd, nyugalomban van, a másikuk, Benedek viszont – Alfréd nyugalmi rendszeréből nézve – szinuszosan ide-oda mozog az $x$-tengely mentén [8], ahogy az *5. ábra* mutatja. Az írásom elején idézett, félreérthető ikerparadoxon-magyarázatok olvasói ezúttal azt mondhatják: Benedek, mivel folytonosan erőlökéseknek van kitéve, kevésbé öregszik mint Alfréd. De valóban így van-e ez?

Benedek kitérése, sebessége és gyorsulása az idő függvényében (Alfréd inerciarendszeréből nézve):

$$x_B(t) = \frac{v_{B\max}}{\omega} \sin \omega t, \tag{3}$$

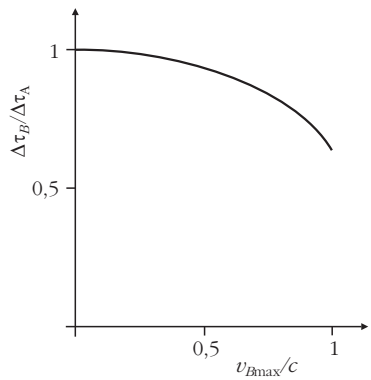
$$v_B(t) = v_{B\max} \cos \omega t, \tag{4}$$

$$a_B(t) = -\omega\, v_{B\max} \sin \omega t = -a_{B\max} \sin \omega t, \tag{5}$$

ahol $\omega$ Benedek mozgásának körfrekvenciája, $v_{B\max}$ és $a_{B\max}$ pedig sebességének, illetve gyorsulásának a csúcsértéke a nyugvó rendszerben mérve.[6]

[5] A precízebb tárgyalás külön foglalkozna azzal, hogy $K_A$-ban az események $x$-koordinátáját periodikus változó írja le, ez azonban teljesen hasonló az $(r, \varphi)$ síkbeli polárkoordinátarendszer $\varphi$ koordinátájának viselkedéséhez, és semmiféle problémát nem okoz.

[6] Megjegyzés: a Benedek által *átélt* gyorsulásnak, azaz *saját* gyorsulásának maximális értékét – mivel a maximális gyorsulás pillanataiban Benedek pillanatnyi nyugalmi rendszere éppen az $(x, t)$ rendszer – szintén $a_{B\max}$ adja meg.




*6. ábra*

Tegyük fel, hogy az *F* eseménytől a *G* eseményig Benedek *n* félperiódust tesz meg jobbra, illetve balra. Alfréd öregedése egyenlő a két esemény között eltelt koordinátaidő-tartammal:

$$\Delta\tau_A = n\frac{\pi}{\omega}, \tag{6}$$

míg Benedek öregedése az (1) időtágulási képlet alapján írható fel:

$$\Delta\tau_B = n\int_0^{\pi/\omega} dt\sqrt{1-\left(\frac{v_{B\max}}{c}\right)^2\cos^2\omega t}. \tag{7}$$

A (7) integrált $\theta = \omega t$ új változóval átírva, és (7)-et (6)-tal elosztva a két testvér öregedésének arányára a következő összefüggést kapjuk:

$$\frac{\Delta\tau_B}{\Delta\tau_A} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} d\theta\sqrt{1-\left(\frac{v_{B\max}}{c}\right)^2\cos^2\theta}, \tag{8}$$

amely $v_{B\max}/c$ függvényében a *6. ábrá*n látható.

A (8) képlet és a *6. ábra* legfontosabb tanulsága, hogy az öregedések aránya független az ω-tól. Ez viszont, mivel $a_{B\max} = \omega v_{B\max}$, azt jelenti, hogy $v_{B\max}$-ot kellően kicsinek választva a két testvér öregedésének arányát tetszőlegesen közel tarthatjuk 1-hez, miközben Bertalan maximális gyorsulását, ω-t alkalmasan nagyra állítva, tetszőlegesen naggyá tehetjük!

Összefoglalva: ebben a példában tehát a két iker közül az egyik nyugalomban van, a másik pedig tetszőlegesen nagy mértékben gyorsulhat, mégis – legalábbis határesetben – azonos mértékben öregednek.

## Záró megjegyzések és geometriai analógiák

Az összes eddigi példa illusztrálja, hogy nem az átélt gyorsulás (vagy annak hiánya) az ikerparadoxon megoldásának kulcsa.

Tekintsünk ugyanakkor egy olyan helyzetet, amikor az indulási és érkezési események között nem csak két iker, hanem *tetszőlegesen nagyszámú* megfigyelő utazik. Az ilyen probléma tárgyalásában a gyorsulás fogalma ismét felbukkanni látszik. A maximális öregedés elvének [9] szokásos megfogalmazása szerint ugyanis a két esemény között azon utazó számára telik el a *leg*több sajátidő, aki szabadon, *gyorsulásmentesen* mozgott.

Hogyan illik bele ez az eddig elmondottakba? Van-e szerepe legalább a *leg*többet öregedő iker kiválasztásában a gyorsulásnak (illetve a hiányának)? A fenti *5.* és *6. ábra* példája azt mutatja, hogy végső soron *nincs*. Ebben a körmönfont példában láthattuk, hogy nem csak a gyorsulásmentesen mozgó Alfréd, hanem a szinuszosan ide-oda mozgó, gyorsulásokat átélő Benedek is a *lehető legtöbbet* öregedik az *F* és *G* események között. Világvonalukat végső soron nem a gyorsulás megléte vagy hiánya teszi különlegessé, hanem az, hogy mindkettő *egyenes* (illetve Benedek esetében tetszőleges pontossággal közelíti azt).

Jól megvilágítja ezt az alábbi geometriai analógia:

*1. Sík papírlap*[7]

Két pont között húzunk egy vonalat, majd ugyanazt a két pontot egy másik vonallal is összekötjük. Az egyik vonal rövidebbre sikerült. Melyik?

(1) „Amelyikben kevesebb a »kunkor«, a görbület." Ez nyilvánvalóan rossz válasz (a fentiek alapján az olvasó könnyen kigondolhat, és lerajzolhat ellenpéldákat).

(2) Ha előzőleg négyzethálóval bekoordinátáztuk a papírlapot, és a két végpont egyaránt az *y*-tengelyre esik, akkor esetleg kísértésbe eshetünk, hogy így fogalmazzuk meg a választ:

„Amelyik vonal szorosabban halad az *y*-tengelyhez." Ez azonban félrevezető állítás, hiszen egy speciális koordinátarendszert választ ki, holott a helyes válasznak koordinátarendszer-függetlennek kell lennie. (Elforgatott $(x', y')$ tengelyek esetén például a két pont már nem kerül rá az $y'$-tengelyre, és a fenti magyarázat nem lesz igaz.)

(3) Sajnos a legjobb válasz, amit találhatunk, ez: „Amelyik vonal $s = \int_1^2 ds$ összhossza kisebb." Ez persze triviális válasz. Szerencsére azonban alkothatunk egy olyan geometriai fogalmat, az *egyenesség* fogalmát, amely – ha megfelelőképpen definiáljuk – szemléletesebb választ is lehetővé tesz a kérdésre. Mi legyen az egyenesség *mértékének* definíciója? Milyen értelemben nevezzük egyenes*ebb*nek egy vonalat egy másiknál? Az biztos, hogy nem elég, ha egy vonal egyenesnek *néz ki* (gondoljunk például arra a nevezetes álbizonyításra, amely egy derékszögű háromszög befogóit – feltördelve, de a hosszukat változatlanul hagyva – levetíti az átfogóra, és mivel a rengeteg darabra feltördelt vonal láthatóan „rásimul" az átfogóra, kijelenti, hogy $a + b = c$).

*Az egyenesség mértékének definíciója: két pont között az a vonal az egyenesebb, amelyre s kisebb szám.*

A sík lefedhető globális Descartes-koordinátarendszerrel („négyzethálóval"). Ilyen koordinátarendszert használva, az adott görbe $y(x)$ alakját ismerve a következő képlet alkalmazható *s kiszámítására:*

[7] „Igazi síklapról" van szó, a hengerré felcsavart lap esetét most nem tekintjük.

$$s = \int_{x_1}^{x_2} dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \left[ = \int_{x'_1}^{x'_2} dx' \sqrt{1 + \left(\frac{dy'}{dx'}\right)^2} \right]. \quad (9)$$

A (9) képlet szögletes zárójeles kiegészítése arra hívja fel a figyelmet, hogy a kiszámított számérték koordinátarendszer-független. Pontosabban: ha a sík adott tartományát – amely elég nagy ahhoz, hogy a végpontokat és a két görbét magában foglalja – az $(x, y)$ négyzethálóhoz képest elforgatott $(x', y')$ négyzethálóval fedjük le, az új koordinátarendszerben felírva az adott görbe $y'(x')$ alakját, ismét *pontosan ugyanolyan alakú* képlet alkalmazható $s$ kiszámítására. Az, hogy globális Descartes-koordinátarendszerek használhatók, amelyekben a koordinátakülönbségek (9)-es képletbeli kombinációja invariáns (ugyanaz a vesszőtlen és a vesszős koordinátarendszerben), az euklideszi sík legfontosabb sajátossága.[8]

*2. Sík téridő*[9]

Két esemény között halad két részecske, két különböző világvonalon. Az egyik részecske öregedése nagyobb. Melyiké?

(1) „Amelyikben kevesebb lesz a »kunkor«, a gyorsulási szakasz." Ez nyilvánvalóan rossz válasz (lásd a cikkben szereplő példákat).

(2) Ha előzőleg úgy választottunk koordinátarendszert, hogy a két esemény egyaránt a $t$-tengelyre esik (azaz ugyanazon a helyen, a térbeli origóban játszódik), akkor esetleg kísértésbe eshetünk, hogy így fogalmazzuk meg a választ:

„Amelyik világvonal közelebb halad a $t$-tengelyhez." Azaz: amelyik világvonal „összességében" kisebb sebességű mozgást képvisel; ezt a konklúziót látszólag az (1) egyenlet is megerősíti: minél kisebb $v(t)$, annál nagyobb az integrál értéke. Ez azonban félrevezető állítás, hiszen egy speciális koordinátarendszert választ ki, holott a helyes válasznak koordinátarendszer-függetlennek kell lennie. (Ha egy állandó sebességű űrhajó megfigyelője – amelynek az $(x', t')$ tengelyei a téridőnek más irányába állnak, mint az $(x, t)$ tengelyek – számolja ki az időtartamokat, a fenti magyarázat a $t'$-tengelyhez való közelségről és a kis sebességről már nem lesz igaz.)

(3) Sajnos a legjobb válasz, amit találhatunk ismét a triviális válasz: „Amelyik világvonal mentén eltelt $\tau = \int_1^2 d\tau$ sajátidőtartam nagyobb." Szerencsére itt is alkalmazhatjuk a világvonal *egyenességének* szemléletes geometriai fogalmát, feltéve hogy itt is gondosan definiáljuk ezt a fogalmat. Milyen értelemben tekintsünk egyenesebbnek egy világvonalat egy másiknál? Az ismét nem elég, ha egy világvonal egyenesnek *néz ki*. (Gondoljunk például egy olyan, az *5. ábrá*hoz hasonló esetre, amikor a szinuszos mozgás helyett egy fénysugár pattog jobbra-balra az origó közelében, és így jut el az $F$ eseményből a $G$ eseménybe. A fordulók számának növelésével a fény töredezett világvonala tetszőlegesen „belesimítható" a $t$-tengelybe. A fénysugár számára eltelt sajátidő – a világvonal hossza – mégis *drasztikusan* különbözik Alfréd és Benedek világvonalainak hosszától: az utóbbiak megegyeznek, és a leghosszabb sajátidőt képviselik, a fény sajátideje viszont a lehető legrövidebb, tudniillik zérus.)

*Az egyenesség mértékének definíciója: két esemény között az a világvonal az egyenesebb, amelyre* $\tau$ *nagyobb szám.*

A sík téridő lefedhető globális Minkowski-koordinátarendszerrel. Ilyen koordinátarendszert használva, az adott világvonal $x(t)$ alakját ismerve a következő képlet alkalmazhatót $\tau$ kiszámítására:

$$\tau = \int_{t_1}^{t_2} dt \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \left[ = \int_{t'_1}^{t'_2} dt' \sqrt{1 - \left(\frac{v'}{c}\right)^2} \right]. \quad (10)$$

A (10) képlet szögletes zárójeles kiegészítése arra hívja fel a figyelmet, hogy a kiszámított számérték koordinátarendszer-független. Pontosabban: ha a téridő adott tartományát – amely elég nagy ahhoz, hogy a két szélső eseményt és a két világvonalat magában foglalja – az $(x, t)$ inerciarendszerhez képest mozgó $(x', t')$ inerciarendszerben írjuk le, az új koordinátarendszerben felírva az adott világvonal $x'(t')$ alakját, ismét pontosan ugyanolyan alakú képlet alkalmazható $\tau$ kiszámítására. Az, hogy globális Minkowski-koordinátarendszerek használhatók, amelyekben a (10)-es képletalak invariáns – ugyanaz a vesszőtlen és a vesszős koordinátarendszerben – *a sík téridő legfontosabb (tisztán geometriai) sajátossága*.[10]

Irodalom


1. A. Hudson, R. Nelson: *Útban a modern fizikához*. Inok Kft., 2005.
2. R. A. Serway: *Physics for Scientists and Engineers*. 4th ed., Saunders College Publishing, 1996.
3. Erostyák J., Kürti J., Raics P., Sükösd Cs.: *Fizika III*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2006.
4. M. von Laue: Zwei Einwände gegen die Relativitätstheorie and ihre Widerlegung. *Phys. Z. 13* (1912) 118–120.
5. Hraskó P.: *Relativitáselmélet*. Typotex, 2002.
6. S. P. Boughn: The case of the identically accelerated twins. *Am. J. Phys. 57/9* (1989) 791–793.
7. C. H. Brans, D. R. Stewart: Unaccelerated-returning-twin paradox in flat spacetime. *Phys. Rev. D 8/6* (1973) 1662–1666.
8. R. P. Gruber, R. H. Price: Zero time dilation in an accelerating rocket. *Am. J. Phys. 65/10* (1997) 979–980.
9. E. F. Taylor, J. A. Wheeler: *Exploring Black Holes*. Addison Wesley Longman, 2000.


[8] Vigyázat: *henger* esetén a „ferdén feltekert" négyzetháló – mint fent említettem – nem ad értelmes koordinátavonalakat a teljes felületen, ezért az ilyen $(x', y')$ „koordinátákkal" felírt (9) képlet csak olyan kis tartományokban alkalmazható egy görbedarab hosszának kiszámításához, amelyben az $(x', y')$ értékek egyértelműen értelmezhetők.

[9] „Igazi" sík téridőről van szó, a *3.* és *4. ábra* zárt téridejének esetét egyelőre nem tekintjük.

[10] Vigyázat: a *3.* és *4. ábra* zárt *térideje* esetén Béni mozgó $(x', t')$ „rendszere" – mint fent szerepelt – nem ad értelmes koordinátarendszert a teljes téridőben. Ezért Béni *nem alkalmazhatja* a (10)-es képletet olyan, a téridő nagy tartományát lefedő világvonalak sajátidejének kiszámítására, mint például Aladáré.

# LÁTHATÓ HANGOK, HALLHATÓ FÉNYEK

Jendrék Miklós
Boronkay György Műszaki
Középiskola és Gimnázium, Vác

Milyen hangja van egy hagyományos vagy kompakt égőnek? Vagy a monitornak, távirányítónak vagy telefonkijelzőnek? Egyszerű, házilag is könnyen elkészíthető optocsatoló-modell segítségével választ kaphatunk ezekre a kérdésekre. Sőt, az ismertetésre kerülő eszközök segítségével további, közel 20 érdekes kísérlet végezhető el.

Az optocsatoló egy közös tokban elhelyezett fénykibocsátó és fényérzékelő eszköz. A fénykibocsátó szerepet leggyakrabban LED tölti be, fényérzékelőként leginkább fototranzisztort használnak. Ilyen módon fényjel által jön létre csatolás a bemenet és a kimenet között. A fénycsatolók 10 MHz-ig alkalmazhatók olyan áramköri megoldásoknál, ahol két áramköri részt egymástól galvanikusan szét akarnak választani [1]. A fizikatanítás szempontjából az információ fénnyel történő továbbítása lényegesen több lehetőséget rejt magában, mint amennyit találunk a témával foglalkozó ötletadó irodalomban [2, 3].

Az optocsatoló-modell segítségével elvégezhető kísérletek egy része konkrét tananyaghoz köthető, míg vannak olyanok, amelyeket az érdeklődés felkeltése, a fizika megszerettetése céljából érdemes bemutatni.

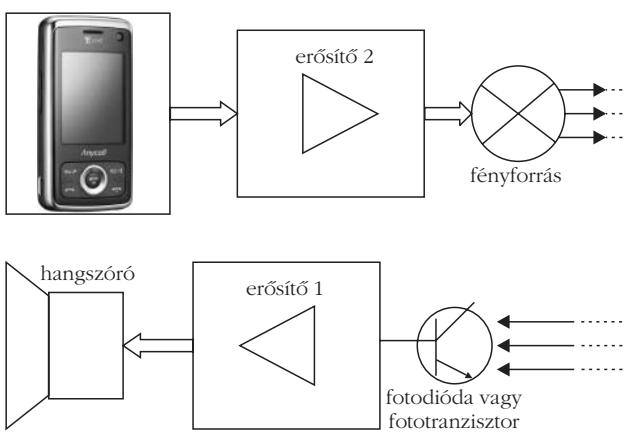
## Az eszköz leírása

A bemenő és kimenő egységekkel kiegészített kísérleti modell vázlata a *1. ábrá*n látható. A berendezés egy adó- és vevőegységből áll. Az adó lehet bármilyen modulálható fényforrás. A vevő alapja egy fényérzékelő detektor (fotodióda, fototranzisztor), amelynek jeleit erősítés után hangszóróval tesszük hallhatóvá.

### A vevő

A fényjeleket detektáló eszközként legegyszerűbb esetben napelemet használhatunk, ami kiszerelhető, például egy kerti lámpából (*2. ábra*). A napelem kivezetéseit kapcsoljuk egy hangfrekvenciás erősítő bemenetére (aktív hangfal), és kezdhetünk kísérletezni.

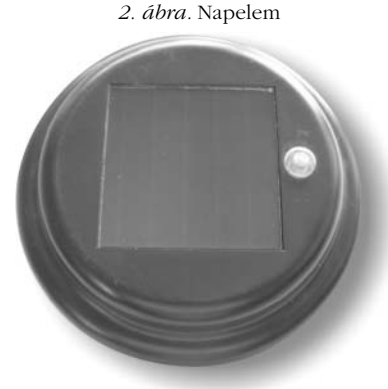
*1. ábra*. A kísérleti berendezés vázlata.



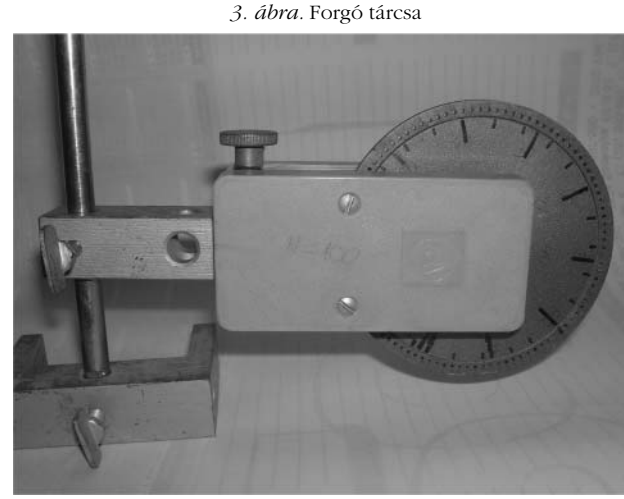

Az eszközzel a következő bevezető kísérletek mutathatók be:

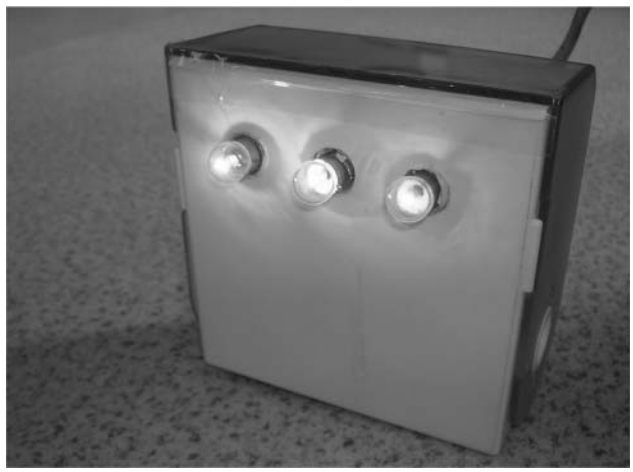
- a fényképészeti vaku fénye kattanást idéz elő a hangszóróban;
- villogó üzemmódba kapcsolt kerékpárlámpa metronómmá alakítja a berendezésünket;
- stroboszkóppal nemcsak kattogásokat, hanem folytonos hangot is elő tudunk állítani a villogási frekvenciától függően;
- világítsuk meg a fényérzékelőt lézerrel, izzóval vagy más, folyamatos fénykibocsátást biztosító fényforrással! Szakítsuk meg a fénysugarat kezünkkel, ujjainkkal vagy a fésű fogaival! Érdekes hangeffektusokat kapunk;
- helyezzünk el és mozgassunk egy darab – a fény útjába helyezett – szúnyoghálót! A fénysugarat megszakító nyílások vagy lyukak hangkeltést eredményeznek. Apró lyukú háló esetén jól láthatóvá tehető a fénynyaláb;

*2. ábra*. Napelem



*3. ábra*. Forgó tárcsa





*4. ábra.* Fekete doboz

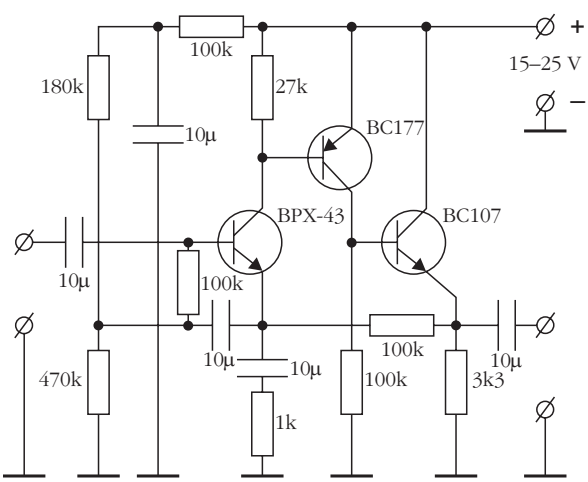
• helyezzünk a fény útjába nyílásokkal ellátott tengelyezett forgó korongot! Az előző kísérlethez hasonlóan hang keletkezik. A frekvencia a fordulatszámmal változtatható (*3. ábra*);

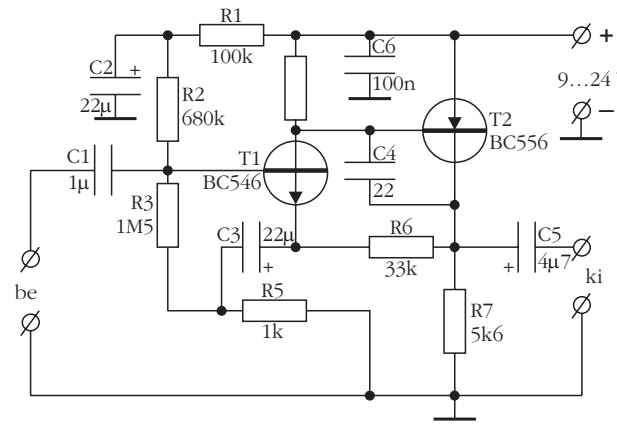
• különböző frekvenciájú árammal táplált izzók fényingadozásait hanggá tudjuk alakítani. Az *4. ábrá*n látható „fekete doboz" három izzót tartalmaz. Ránézésre nem látunk izzásukban semmi különbséget. Más a helyzet, ha meghallgatjuk őket. Az első hajvágóhoz, a második fűnyíróhoz hasonlít, míg a harmadik valamilyen ufó-tevékenységre „emlékeztet". Nézzük meg a fényből átalakított elektromos jel alakját oszcilloszkóp segítségével. Kiderül, hogy az első két izzó hálózati feszültségről táplált, azzal a különbséggel, hogy a másodiknál egy sorba kötött dióda miatt, 100 Hz helyett csak 50 Hz-es a fényingadozás frekvenciája. A harmadik egy hanggenerátorhoz, úgynevezett astabil multivibrátorhoz van kötve, amely négyszögjelet állít elő. Ettől van ilyen jellegzetes, felharmonikusokban gazdag hangja.

A felsorolt kísérletek leginkább a hangtannál használhatók, de a fotoeffektus tárgyalásánál színesebbé tehetjük velük a kvantumfizika tanítását is.

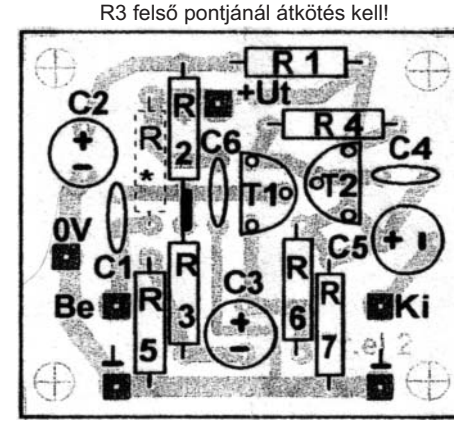
Berendezésünk túl egyszerű ahhoz, hogy univerzális legyen, ezért nem lehetnek vele szemben túlzott elvá-

*6. ábra.* Az átalakított mikrofonerősítő




R3 felső pontjánál átkötés kell!

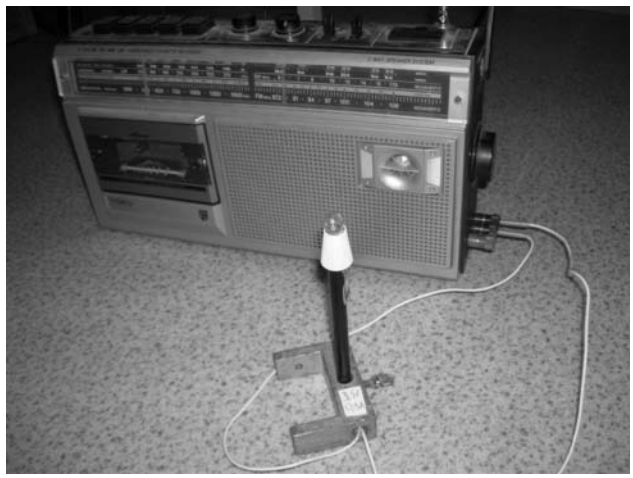



*5. ábra.* Tranzisztoros előerősítő

rásaink. Legnagyobb hiányossága a kis érzékenység, valamint, hogy infravörös-tartományban már nem érzékeli a fényt. (Ez az utóbbi tény viszont kimondottan hasznos is lehet, ha a fotoeffektus szemléltetése a cél.) Mindkét probléma megoldható egy egyszerű erősítőfokozatba beépített fototranzisztor segítségével.

De hogyan tegyünk szert ilyen eszközre? Különböző kapcsolásokkal próbálkoztam, és a legegyszerűbb recept a következő: látogassunk el egy hobbyelektronika szaküzletbe, és kérjünk (pár száz forintért) egy „szereld magad" kiszerelésű tranzisztoros előerősítőt (*5. ábra*). Egy forrasztópáka, néhány alapvető kéziszerszám és a beültetési rajz alapján egy (lyukas) óra alatt kényelmesen elkészíthetjük a kísérletek főszereplőjét: a vevőkészüléket. A helyesen összeállított kapcsolás nem igényel utólagos beállítást vagy hangolást. Célszerű 9 voltos teleppel biztosítani a tápot, a bemenetre kössünk egy fotodiódát vagy tranzisztort, a kimenetet kapcsoljuk aktív hangfalra.

Hasonlóan jó eredmény érhető el a *6. ábrá*n látható mikrofonerősítővel [4]. Az eredeti kapcsoláson annyit változtattam, hogy a T1 tranzisztort egy BPX-43 típusú fototranzisztorra cseréltem. Ilyen tranzisztor található a hagyományos görgős egérben is. Annyi lehet csak vele a gond, hogy a báziskivezetése le van vágva, erre pedig szükségünk van, toldása nehézségeket okozhat. De bármelyik hasonló típusú alkatrész olcsón (100 Ft) beszerezhető elektronikai boltokban. Fontos, hogy ne „kétlábú" fototranzisztort vegyünk.



*7. ábra.* A legegyszerűbb fény-adó

Mivel az említett fototranzisztor nemcsak a látható, hanem a közeli infravörös (1100 nm-ig terjedő) tartományt is érzékeli [5], ezért kiválóan alkalmas az olyan IV-sugarakat kibocsátó eszközök vizsgálatára, mint például a távirányító.

• Ha a tv, videó vagy egyéb eszköz távirányítóját a fényérzékelő irányába helyezzük és megnyomjuk valamelyik gombját – a kettős modulációnak köszönhetően – egy alaphangot és egy jellegzetes szaggatott hangot fogunk hallani. A távirányítók hangja eltér egymástól, ami több példány esetén akár egy zenekar létrehozását is lehetővé teszi [8].

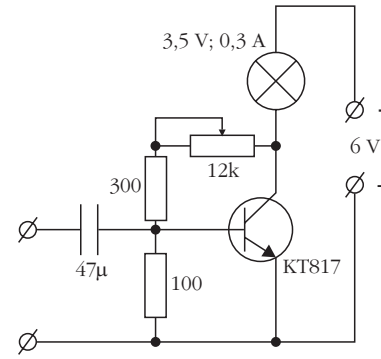
• A fototranzisztoros fénydetektor elég érzékeny ahhoz, hogy a környezetünkben található körszerű fénykibocsátó eszközök közül nemcsak monitor, tv-képernyő, kerékpárlámpa vagy projektor, hanem mobiltelefon, illetve kamera kijelzőjének „hangját” is meghallgathassuk.

## Hangból fényt

A további kísérleteinkhez vegyünk egy elektronikus „hangkibocsátó eszközt” (rádiókészüléket), és kapcsoljunk a kimenetére a hangszóró helyett egy zseblámpaizzót (*7. ábra*). Fontos, hogy a kimeneti teljesítmény elérje az 1-2 wattot. Sajnos ezen elvárásoknak többnyire csak a régebbi rádiókészülékek felelnek meg. Ugyanakkor ezek átalakításának kilátásba helyezése, illetve engedélyezése feltételezhetően nem okoz a családon belül komolyabb konfliktusokat. Mire jó az összeállítás?

• A megfelelő hangerő hatására az izzó fénye villogni kezd az amplitúdó és a frekvencia függvényében (amplitúdómoduláció). Láthatóvá tettük a hangot, ráadásul kezünkben van a „zenehallgatás”, bár nem a legélvezetesebb, de mindenképp a legbékésebb, környezetbarát módja.

• A modulált fényjelet visszaalakíthatjuk hanggá. Ezért közelítsük a fényforrást a vevő fényérzékelőjéhez! Megszólal a hangszóró, habár a hang minősége nem a legjobb. Ennek két fő oka van. Az egyik az, hogy az izzószálnak nagy a hőtehetetlensége, nem




*8. ábra.* Az adó

képes követni az áram ingadozásait. Ez leginkább a magasabb frekvenciákat érinti, a mély hangokat erőteljesen kiemeli. A másik ok a karakterisztika nemlineáris voltára vezethető vissza.

## Univerzális adó

Ha nemcsak az aktuálisan sugárzott adást szeretnénk továbbítani fény segítségével, hanem bármilyen lejátszó kimeneti jelét kívánjuk fénnyé alakítani, érdemes egy egyszerű, egytranzisztoros hangfrekvenciás végfokot építeni. Ennek több előnye is van: drága lejátszónkat nem tesszük ki az esetleges túlterhelés okozta károsodás kockázatának, másrészt az izzón kívül másfajta fényforrásokat is rákötheténk, például lézert, LED-et, infra LED-et (*8. ábra*).

Az erősítőfokozat gyakorlati kivitelezése rendkívül egyszerű: a meglévő tápegységtől (feszültség nagyságától) és a tranzisztor típusától függően kell az ellenállásértékeket megválasztani úgy, hogy az izzó (vagy más fényforrás) megfelelő fénnyel világítson. Az erősítőt több változatban is elkészítettem. A legkényelmesebb megoldás az, ha egy régebbi, használaton kívüli mobiltelefon töltőjét használjuk fel tápegységként.

Végezzük el a következő kísérleteket:

• Fénykibocsátó dióda alkalmazása (*9. ábra*) izzó helyett sokkal jobb hangminőséget eredményez. Itt a fényingadozások szemmel nem láthatóak, de a fényje-

*9. ábra.* LED-es lámpa

*10. ábra.* Infra LED

lek torzításmentesen viszonylag nagy távolságra közvetítik a hangot. Ráadásul – a nagy fényerő miatt – használhatjuk a napelemes vevőt is.

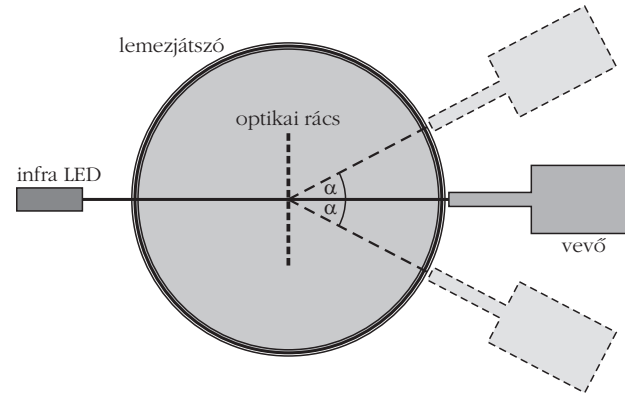
• Ha lézerpointert vagy más félvezető lézert használunk lámpa helyett, a hatótávolság – a sugarak kis széttartása miatt – lényegesen megnövelhető, viszont nagy távolságról nehéz pontosan eltalálni az érzékelőt és a zajszint is jelentősen emelkedik. Ugyanakkor, ha túl közel helyezzük a lézert a vevőhöz, a nagy intenzitás miatt torzul el a hang.

• Kedvencem az infra LED, amit egy használaton kívüli távirányítóból szereltem ki (*10. ábra*). A jel jó minőségű, elég nagy távolságra terjed. Ha már olyan messze vagyunk a forrástól, hogy egyáltalán nem, vagy csak alig hallható a hang, egy lencsével az érzékelőre fókuszálva a láthatatlan sugarakat, a hang jelentős felerősödését tapasztaljuk. Gyűjtőlencse lehet hagyományos domború vagy Fresnel-lencse.

• Egy fényes fémlemezzel bemutatható az infrasugarak tükrös visszaverődése. Enyhén meghajlított lemezzel fókuszálhatók a sugarak. A lemez ütemes mozgatásával a jel kézi modulálása érhető el.

• Optikai kábellel tetszőleges pályán továbbítható az információt szállító láthatatlan fény.

• Az ismertetett eszközök lehetőséget nyújtanak egy zenehallgatással egybekötött hullámhosszmérésre is. Az eljárás lényege: optikai ráccsal előállított színkép (erősítési helyek) kimutatására használjuk a fényérzékelővel ellátott vevőt. A fényforrás (lézer, LED) fényét moduláljuk. A diffrakció ilyen módon történő megfigyelése nem igényel sötétítést, és infra LED esetén is alkalmazható. A méréshez szükséges összeállítás vázlata a *11. ábrá*n, gyakorlati megvalósítása a *12. ábrá*n látható.

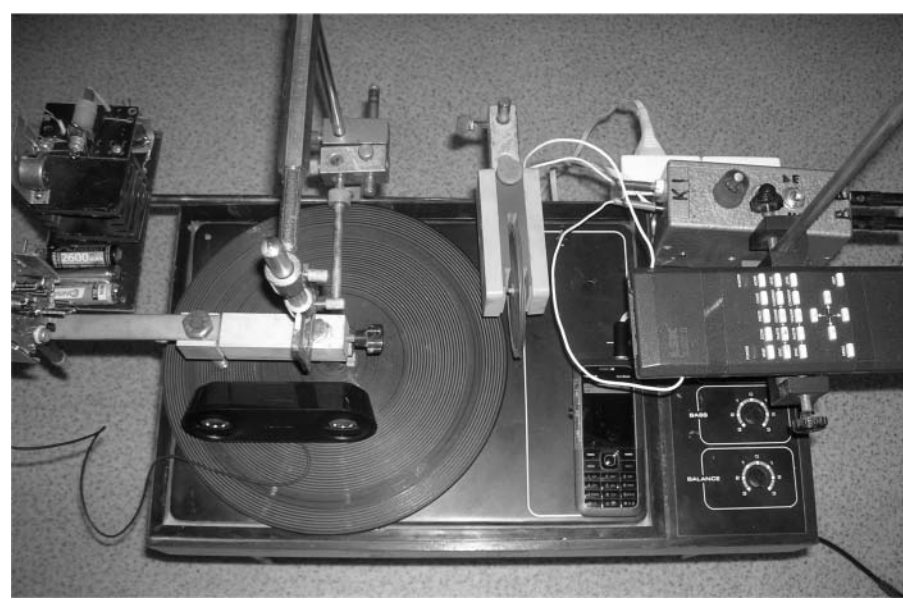



*11. ábra.* Infrasugarak hullámhosszának mérése.

Az optikai rácsot meg az érzékelőt egy egykori lemezjátszó dobozán, illetve korongján helyeztem el. A korong jó szolgálatot tesz az eltérülési szögek mérésében, a detektor könnyű, akadálytalan mozgatásában.

Az infravörös fény viszonylag kis széttartása lehetővé teszi, hogy az elhajlást Fraunhofer-diffrakciónak tekintsük. Az elsőrendű erősítési helyek, azaz az eltérülési szög függ a rácsállandótól és hullámhossztól. A szöget az lemezjátszó korongjával együtt elfordítható érzékelő segítségével mérjük le. Először bejelöljük a korongnak azt a helyzetét, amikor a fényérzékelő szemben van a forrással (nulladik erősítési hely). Lassan elforgatva a korongot, a jel gyengülését, majd újra felerősödését tapasztaljuk. Ismét bejelöljük a korong helyzetét. A szögmérést a korong mindkét irányba történő elforgatásával ellenőrizhetjük. A jól ismert $d \sin\alpha = k\lambda$ összefüggés alapján, ahol $d$ a rácsállandó, $k = 1$ (elsőrendű maximumok), meghatározzuk a hullámhosszt.

*12. ábra.* A mérőberendezés



*13. ábra.* A „hangszóró” tekercse

*14. ábra.* A rezonátor

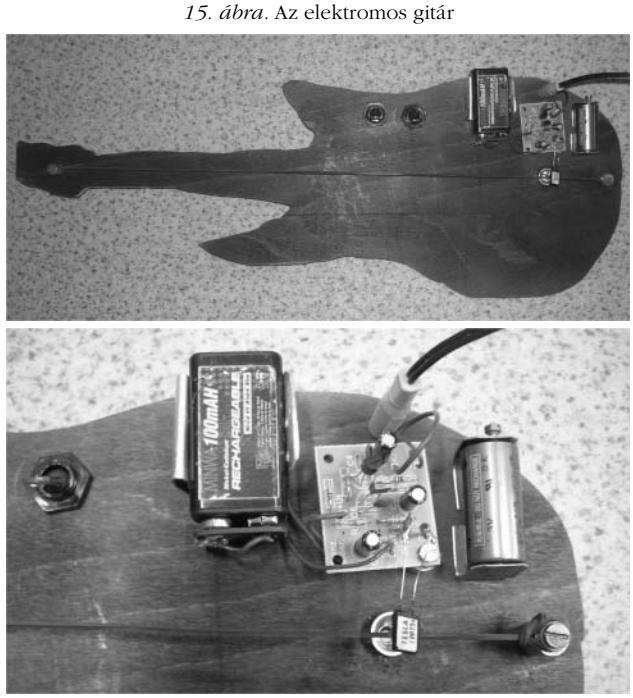
Az általam végzett mérés (becslés) eredményei az alábbi táblázatban találhatók.

| rácsállandó (mm) | eltérülési szög $\alpha$ (°) | mért érték (nm) | irodalmi érték (nm) |
|---|---|---|---|
| 1/500 | 27,6 | 927±40 | 940 |

Mint látható, a kapott eredmény jó egyezést mutat az irodalmi értékkel (940 nm). Ráadásul a mérés elvégzéséhez nem szükséges a helyiséget besötétíteni, az elhajlást követő interferenciakép vizsgálata közben ki-ki saját kedvenc zeneszámát hallgathatja. Érdemes megjegyezni, hogy az ajánlott módszernek van még egy nagy előnye: a nulladik és elsőrendű erősítési helyek „keresése” a gyengénlátók számára is teljesíthető feladat. Ráadásul hallásra jól érzékelhető, hogy a különböző erősítési helyekre jutó fény intenzitása erősen eltérő.

Az adó erősítőfokozata 1-2 W teljesítményű. Ez már alkalmassá teszi a népszerű teáskanna-hangszórós kísérlet bemutatására. Ehhez az erősítő kimenetére egy tekercset kapcsolunk (*13. ábra*). Ilyenkor a benne folyó áram mágneses mezőt kelt, amely a kannába helyezett mágnessel kölcsönhatásba lép. A kanna mint rezonátor (*14. ábra*) felerősíti a gyenge mechanikai rezgéseket. A tekercset egy egykori antenna keretére csévéltem fel. Az eredeti 60 menetet 200-ra cseréltem. Az alkalmazott rézhuzal keresztmetszete 0,4 mm$^2$. A legjobb eredményt úgy sikerült elérnem, hogy a mágnest a kannába helyeztem el.

*15. ábra.* Az elektromos gitár




- Ha az antennatekercs közelében egy másik tekercset helyezünk el, amelyet a vevő bemenetére kötünk, újra megszólal a hangszóró, csak most nem a fény, hanem az alacsonyfrekvenciás elektromágneses mező továbbítja a jeleket.
- Optocsatoló kiválóan alkalmas elektromos hangszerek működtetésére. Olyan gitárt készítettem (*15. ábra*), amelynek ugyan csak egy húrja van, de rezgései fény segítségével alakíthatók át elektromos jelekké. Igazi húr helyett gumizsinórt használtam, mivel ez sokkal nagyobb amplitúdóval rezeg, mint a fémhúr.

## Összegzés

A fizika népszerűsítését, jobb megértését szolgáló kísérletek elvégzésére nem feltétlenül szükségesek drága, bonyolult műszerek. Környezetünkben (fizikaszertárban) fellelhető egyszerű, hagyományos eszközök is lehetővé teszik egy sor – különböző témakörhöz tartozó – érdekes jelenség bemutatását. Az ismertetett eszközök nemcsak demonstrációs, hanem tanulói kísérletek elvégzésére is kiválóan alkalmasak.

A leírt kísérletekről készült néhány videó az Interneten is megtekinthető [6–8].

Irodalom

1. http://hu.metapedia.org/wiki/Optocsatol %C3 %B3
2. Fénytelefon. *Ezermester* (1970/9) 6–7.
3. Kóbor Macskák kísérletei. *Fizikai Szemle* (1993) 236–238.
4. http://erosito.club.hu/
5. http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/90/124847_DS.pdf
6. http://www.youtube.com/watch?v=nCKJX-37wdw
7. http://www.youtube.com/watch?v=v7LbcyJTo9U
8. http://www.youtube.com/watch?v=2cNuCyL2j98

# XIV. SZILÁRD LEÓ NUKLEÁRIS TANULMÁNYI VERSENY

## Beszámoló, I. rész

Kis Dániel Péter, Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technika Tanszék

*Szilárd Leó* születésének centenáriuma alkalmából, *Marx György* professzor kezdeményezésére 1998-ban került először megrendezésre a Szilárd Leó Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny. Azóta a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat minden évben megrendezi a versenyt. 2006 óta határon túli magyar anyanyelvű iskolák tanulói is részt vehetnek. Sajnos idén jóval kevesebben éltek ezzel a lehetőséggel, mint a tavalyi évben. A János Zsigmond Unitárius Kollégium (Kolozsvár) és a Nagykárolyi Elméleti Líceum (Nagykároly) összesen 3 első kategóriás (11–12. osztályos) tanulót nevezett be a versenybe, szemben a tavalyi, összesen 20 határon túli tanulóval. Sajnos, Szerbiából és Horvátországból, a Felvidékről és Kárpátaljáról 2011-ben nem kaptunk nevezéseket. A tavalyi 251-gyel szemben összesen 239 első kategóriás – a már említett határon túliakon kívül 169 (tavaly 177) vidéki és 67 (tavaly 54) budapesti – valamint 113 (tavaly 140) junior kategóriás – vidékről 93 (tavaly 118), Budapestről 20 (tavaly 22) – nevezés érkezett.

A 2011. február 21-én megtartott első forduló (válogató verseny) tíz feladatát az iskolákban lehetett megoldani három óra alatt. A verseny fordulóin (mobiltelefon és Internet kivételével) bármilyen segédeszköz használható volt. Kijavítás után a tanárok azokat a megoldásokat küldték be a BME Nukleáris Technika Tanszékére, ahol a 9–10. osztályos (junior) versenyzők legalább 40%-os, a 11–12. osztályos (I. kategóriás) versenyzők legalább 60%-os eredményt értek el.

Az alábbiakban ismertetjük a válogató verseny – a 2. részben pedig a döntő – feladatait és röviden a megoldásokat. Valamennyi feladatra 5 pontot lehetett kapni.

## A válogató verseny (I. forduló) feladatai és megoldásuk

*1. feladat*

1 liter vízben elkevertek 1 gramm jódot, amelyet 11 100 Bq aktivitású, 8,04 napos felezési idejű, 131-es jód izotóppal nyomjeleztek. Négy nap elteltével a szilárd jódot nem tartalmazó oldatból 1 dl mintát vettek, és ennek aktivitását 185 Bq-nek találták.

a) A jód hány százaléka oldódott fel a vízben?

b) Mennyi a jód oldékonysága mg/liter egységben?

*Megoldás*

Ha 1 dl víz aktivitása 185 Bq, akkor egy liter víz aktivitása 1850 Bq lenne. Négy nap alatt a bevitt jód aktivitása csökkent:

$$A = 11\,100 \cdot 2^{-\frac{4}{8,04}} = 7872 \text{ Bq}.$$

Ebből: 1850/7872 = 0,235, azaz a jód 23,5%-a oldódott bele a vízbe.

b) Mivel a jód teljes mennyisége 1 gramm volt, ennek a 23,5%-a 235 mg. A jód oldékonysága tehát 235 mg/liter.

*2. feladat*

Egy kritikus állapotban lévő atomreaktorba állandó intenzitású külső neutronforrást helyezünk. Hogyan változik időben a neutronok száma? Indokoljuk meg a választ!

*Megoldás*

A magyarázathoz vegyünk egy egyszerű gondolatmenetet. Kritikus állapotban a reaktorban lévő neutronok száma legyen $n$. Mivel a reaktor kritikus állapotban van, a neutronok száma időben állandó, *függetlenül attól, hogy éppen mekkora az n*. Ha tehát egy ilyen rendszerbe egy plusz neutront juttatunk, akkor a reaktorban lévő összes neutron száma immáron $n$+1 lesz. Ez meg is marad, mivel a reaktor továbbra is kritikus állapotban lesz, azaz a neutronszám időben állandó. Ha ezután újabb neutron kerül a rendszerbe, akkor az állandó neutronszám $n$+2 lesz. Ha időben állandó ritmusban juttatunk neutronokat a reaktorba, akkor a fentiekből következően a neutronszám időben egyenletesen (az idővel lineárisan) nő.

*3. feladat*

a) A paksi 500 MW villamos teljesítményű, 34%-os hatásfokú blokkok kazettái 3,82%-os átlagos $^{235}$U dúsítású üzemanyagot tartalmaznak. Mekkora tömegű üzemanyag tartalmaz annyi $^{235}$U-t, amennyit egy blokk egy óra alatt elhasznál?

b) Mennyi 10 MJ/kg fűtőértékű barnaszenet használ fel óránként egy 30%-os hatásfokú szénerőmű 500 MW villamos teljesítmény eléréséhez?

*Megoldás*

Az összes teljesítmény

$$P_ö = \frac{P_b}{\eta} = \frac{500 \text{ MW}}{0,34} = 1471 \text{ MW}.$$

a) Egy óra alatt megtermelt energia:

$$E = P_ö t = 1471 \cdot 10^6 \text{ [W]} \cdot 3600 \text{ [s]} = 5,30 \cdot 10^{12} \text{ J}.$$

1 atommag hasadásakor $32 \cdot 10^{-12}$ J szabadul fel. Ezért a megtermelt energia

$$n = \frac{5,30 \cdot 10^{12} \text{ [J]}}{32 \cdot 10^{-12} \text{ [J]}} = 1,66 \cdot 10^{23} \text{ db}$$

atommag hasadásából származik. A hasadások $^{235}$U-ból termelik az energiát. Ezért ennyi atommag tömege

$$\frac{1,66 \cdot 10^{23}}{6 \cdot 10^{23}} \cdot 235 \text{ [g]} = 65,0 \text{ g } ^{235}\text{U}.$$

Ez viszont csak az üzemanyag 3,82%-át teszi ki, tehát ennyi $^{235}$U-t:

$$m = \frac{65{,}0}{3{,}82} \cdot 100\ [\mathrm{g}] = 1700\ [\mathrm{g}] = 1{,}70\ \mathrm{kg}$$

átlagos dúsítású üzemanyag tartalmaz.

b) A barnaszén átlagos fűtőértéke 10 MJ/kg. A szénerőmű hőteljesítménye:

$$P_{\ddot{o}} = \frac{500 \cdot 10^6 \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}\right]}{0{,}3} = 1{,}67 \cdot 10^9\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}.$$

Egy óra alatt megtermelt teljes energia

$$Q = P_{\ddot{o}}\, t = 1{,}67 \cdot 10^9 \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}\right] \cdot 3600\ [\mathrm{s}] = 6 \cdot 10^{12}\ \mathrm{J}.$$

Az 1 óra alatt felhasznált szén mennyisége

$$m = \frac{6 \cdot 10^{12}\ [\mathrm{J}]}{10^7 \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]} = 6 \cdot 10^5\ \mathrm{kg} = 600\ \text{tonna}.$$

*4. feladat*

A *Népszabadság* 2010. április 27-i számában egy érdekes híradás jelent meg *Koronczay Dávid* írásában, amelyből részleteket közlünk:

„Időszámításunk előtt 50 körül indult utolsó útjára a hispániai Carthago Nova városából Itáliába az a kereskedelmi gálya, amely rakományként különféle típusú amforák mellett közel hetventonnányi ólmot szállított.

A történetünkben szereplő hajó azonban sohasem érte el úti célját: a szardíniai partoktól mindössze egy kilométerre, a mai Oristano mellett elsüllyedt. A roncs számára eseménytelenül telt el az elkövetkezendő kétezer év. Ezután azonban felgyorsultak az események. A leletekről szóló híradás megjelent az újságokban, és azt egy nukleáris fizikával foglalkozó milánói kutató, *Ettore Fiorini* is olvasta. Azonnal felcsillant a szeme, amikor megtudta, mi volt az ókori hajó rakománya. Gyorsan elutazott Cagliariba, a sziget fővárosába, és felajánlotta az INFN, az olasz nukleáris fizikai kutatóintézet segítségét az archeológiai főfelügyeletnek. A pénzügyi támogatásért cserébe azt kérte, hogy hadd kapják meg a fizikusok az ólomtéglák egy részét, miután a régészek alaposan kielemezték azokat. A megegyezést nyélbe ütötték, és a kétezer téglából meg is kaptak százhúsz darabot. Mindez több mint húsz évvel ezelőtt történt. Most, áprilisban azonban további százötven ólomtégla érkezik Cagliari múzeumából az Appenninek alatt megbúvó, föld alatti Gran Sasso Nemzeti Laboratóriumba, ahol új feladatot kapnak.

Az ólomöntvényekbe előállításuk során elkerülhetetlenül belekerülnek természetes eredetű radioaktív ólomizotópok is."

a) Milyen célra használják a nukleáris és a részecskefizikusok az ólmot?

b) Milyen természetes eredetű radioaktív ólomizotópról lehet szó az utolsó mondatban?

c) Melyik magyar Nobel-díjas tudós foglalkozott ezzel az izotóppal?

d) Melyik bomlási sor tagja ez az ólomizotóp?

e) Miért jobb az ókori ólom a mainál?

*Megoldás*

Létezik egy sor magfizikai és részecskefizikai kísérlet, amelyek sikere azon múlik, hogy a detektorokat megfelelően le tudják árnyékolni a környezetben található leggyengébb radioaktív sugárzásoktól is. Az ólom, mint nagy rendszámú elem, kiváló és széles körben használt *árnyékoló anyag*. Azonban az öntvényekbe előállításuk során elkerülhetetlenül belekerülő természetes eredetű radioaktív izotópok bomlása, bármilyen kicsiny mennyiségről van is szó, tönkreteheti a méréseket.

A kérdéses radioaktív izotóp az ólom *22 éves felezési idejű 210-es izotópja,* amelyet *Hevesy György vizsgált*. Ez az izotóp a *238-as urán bomlási sorában* található.

A kétezer évvel ezelőtt előállított ólomtéglákban viszont ez az izotóp mára már *tökéletesen elbomlott*. Az antik ólom ezért számít ideális árnyékoló, keresett anyagnak.

*5. feladat*

Az 1910-es évek elején a kutatók azt a furcsaságot vették észre a bomlástermékeitől megtisztított természetes urán bomlásának vizsgálatakor, hogy az átalakulások során $\alpha$-részecske kibocsátása közben kétféle felezési idejű anyag (ahogy akkor nevezték UX és UY) keletkezik.

*Róna Erzsébet* meg is jegyezte 1914-ben megjelent cikkének végén: „Ezen sorozaton szokatlannak tűnik fel, hogy az urán mindkét elágazása $\alpha$-átalakulás eredménye. Eddig ilyen esetet nem ismertünk és azt hittük, hogy elágazások csak úgy jöhetnek létre, hogy az atomok egy része $\alpha$-részt, a másika $\beta$-részt lövell ki."

a) Mi lehet a probléma megoldása?

b) Milyen termékek keletkeznek?

*Megoldás*

A probléma megoldása az, hogy a bomlástermékeitől megtisztított természetes uránban két izotóp van: a $^{238}$U és a $^{235}$U. Ezt akkor még nem tudhatták, hiszen a $^{235}$U-t csak 1935-ben fedezték fel. Mindkét izotóp alfa-bomló, de az alfa-bomlást követően természetesen különböző tömegszámú tórium-izotópok keletkeznek, amelyeknek különböző a felezési ideje. Az egyik a $^{234}$Th, amelynek 24,1 nap felezési ideje van, míg a másik a $^{231}$Th, amelynek a felezési ideje 25,6 óra.

*6. feladat*

Legalább mekkora sebességgel kell haladnia vízben egy elektronnak, hogy Cserenkov-sugárzás keletkezzen? Alkalmazható-e a klasszikus közelítés? Mekkora feszültséggel lehet az elektront ekkora sebességre felgyorsítani?

*Megoldás*

Egy $n$ törésmutatójú közegben a Cserenkov-sugárzás keltéséhez szükséges minimális sebesség

$$v = \frac{c}{n}, \quad \text{azaz} \quad \frac{v}{c} = \frac{1}{n}.$$

Az elektron relativisztikus mozgási energiája tehát:

$$E = m c^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) =$$

$$= m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} - 1 \right).$$

A víz törésmutatója $n = 1{,}337$, az elektron nyugalmi energiája pedig 0,511 MeV, ezeket behelyettesítve kapjuk:

$$E = 0{,}511 \text{ MeV} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{1{,}337^2}}} - 1 \right) = 0{,}259 \text{ MeV}.$$

A tömegnövekedés aránya:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{0{,}259 \text{ MeV}}{0{,}511 \text{ MeV}} \approx 0{,}5.$$

Ez már kicsit relativisztikus, ezért kellett így számolni a mozgási energiát.

A gyorsításkor nyert energia $E = eU$, ebből következően $U = 259\,000$ V feszültség lenne szükséges a Cserenkov-sugárzás keltéséhez.

*7. feladat*

Nátrium fémből készült 1 mm$^2$ keresztmetszetű vezetéken (petróleum alatt) 16 mA áramot hajtunk át.

a) Mekkora sebességgel haladnak az áramvezetést biztosító elektronok?

b) Hogyan értelmezhető az, hogy az elektromos jel a fémhuzalokban fénysebességhez közeli sebességgel halad?

Adatok: a nátrium móltömege 23 g/mol, sűrűsége 970 kg/m$^3$.

*Megoldás:*

a) 16 mA áram azt jelenti, hogy a vezető keresztmetszetén másodpercenként 16 mC töltés halad át. Ez az érték

$$N = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-2}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 10^{17}$$

darab elektron áthaladását jelenti másodpercenként. A nátriumban a legkülső, egyetlen elektron vesz részt a vezetésben, ezért az elektronok sűrűsége megegyezik az atomok sűrűségével. Az atomok térfogati sűrűsége pedig:

$$\rho = 6 \cdot 10^{23} \cdot \frac{0{,}97}{23} = 2{,}5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}.$$

Ezért $10^{17}$ atom

$$V = \frac{10^{17}}{2{,}5 \cdot 10^{22}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3$$

nátriumban van. Ekkora térfogata egy

$$L = \frac{4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3}{1 \text{ mm}^2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

hosszú, 1 mm$^2$ keresztmetszetű vezetékdarabnak van.

Ahhoz tehát, hogy a vezeték keresztmetszetén másodpercenként 16 mC töltés haladjon át, ebből a vezetékdarabból kell az elektronokat áthajtani. Az elektronok sebessége tehát $v = 4 \cdot 10^{-6}$ m/s.

b) Az elektromos jel sebessége nem az elektronok sebességével kapcsolatos, hanem azzal, hogy a vezeték különböző helyein lévő elektronok mozgásállapot-változása között mennyi idő telik el. Hasonló ez egy kereszteződésben álló autósorhoz. Amikor az első elindul, a mögötte levő észreveszi, és elindul; amikor a második indul el, a harmadik veszi észre stb. Az „indulási információ” sokkal gyorsabban terjed a sor mentén, mint az autók tényleges sebessége.

Vagyis a vezeték mentén az elektromos tér (mező) halad nagyon gyorsan (fénysebességhez közeli sebességgel). A mező gyorsan megjelenő hatására indul el mindenütt a nagyon nagy térfogati sűrűségben jelenlevő elektronok lassú „vánszorgása”. A nagy elektronsűrűségnek köszönhető, hogy a lassú vánszorgás jelenthet nagy áramerősséget is.

*8. feladat*

Milyen lenne a világ, ha

a) …a Planck-állandó kisebb lenne?

b)..ha nulla lenne?

c) …ha jóval nagyobb (mondjuk 1 Js) lenne az értéke?

*Megoldás*

a) Ha kisebb lenne, akkor kisebbek lennének az atomok. Például a H-atom sugara a Bohr-modellben:

$$r = \frac{\hbar^2}{\left( \frac{1}{4 \pi \varepsilon_0} \right) e^2 m_e}.$$

b) Ha zérus lenne, akkor nem is léteznének atomok. A klasszikus fizika létezne csak, de abban nem jöhetnének létre állandó struktúrájú atomokból felépülő makroszkopikus objektumok sem.

c) Ha nagyobb lenne, akkor makroszkopikus méretűek lennének az atomok és a kvantumeffektusok.

*9. feladat*

100 évvel ezelőtt 1911-ben publikálta *Ernest Rutherford* munkatársaival (*Marsden* és *Geiger*) az atommag felfedezéséhez vezető híres szórási kísérle-

tét. Rutherfordék vékony aranyfüstlemezt bombáztak alfa-részekkel. Azt találták, hogy a 0,5 mikron vastagságú lemezre bocsátott alfa-részek túlnyomó többsége szinte akadálytalanuk haladt át a vékony anyagrétegen, de körülbelül minden 100 000-dik alfa-rész úgymond „visszapattant" a lemezről. Ezt a jelenséget nevezte Rutherford tudományos tevékenysége legmeglepőbb eseményének.

a) A megfigyelt visszapattanási arányból becsüljük meg a szórócentrumok méretét!

b) Miért használtak vékony aranylemezt?

c) A becslésnél milyen pontatlanságot követtünk el?

Útmutatás: az aranyatomok méretének becslésénél használjuk fel az arany $A = 197$ relatív atomtömegét és 19,3 g/cm$^3$ nagyságú sűrűségét!

*Megoldás*

a) A becsléshez olyan modellt használunk, amelyben az atommagokat nagy tömegű, kis, kemény, kör keresztmetszetű részecskéknek képzeljük, amelyekről egy alfa-részecske visszapattan, ha eltalálja. Ha az alfa-részecske nem talál el egy ilyen atommagot sem, akkor továbbhalad. Az atommagok az aranyatomokat tartalmazó térfogatok közepén helyezkednek el. Ha egyrétegű lenne az aranyfólia, akkor a „találati arányt" az atommag keresztmetszetének és az aranyatom keresztmetszetének aránya adná meg. A fóliában azonban több rétegben ($k$) helyezkednek el az aranyatomok. Feltesszük, hogy az atomi rétegek véletlenszerű elrendezése miatt az atommagok nincsenek „fedésben", ezért egy aranyatomra jutó keresztmetszetnek megfelelő „csőben" mind a $k$ atommagon szóródhatnak az alfa-részek.

A visszapattanási arány megegyezik a hatásos felületek arányával:

$$\frac{1}{10^5} = \frac{k R_{mag}^2 \pi}{F_{atom}}.$$

Ahhoz, hogy a mag sugarát meg tudjuk határozni, meg kell határozni mind a $k$, mind az $F_{atom}$ mennyiségeket.

Az atomokat kis kockákba helyezett gömböknek képzeljük, és ezek a kockák sűrűn kitöltik a teret. A kockák élhossza nyilván $d = 2R_{atom}$, a kockák „keresztmetszete" pedig $F_{atom} = d^2$. A kockák méretét a következőképpen határozhatjuk meg: mólnyi mennyiségű, azaz 197 g arany térfogata:

$$V = \frac{197}{19{,}3} = 10{,}2 \text{ cm}^3.$$

Ebben $6 \cdot 10^{23}$ aranyatom van, így egy aranyatomra jutó térfogat

$$V_a = \frac{10{,}2}{0{,}6} \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3.$$

Ezért a kocka oldalhossza

$$d = \sqrt[3]{\frac{10{,}2}{0{,}6}} \cdot 10^{-8} \text{ cm} = 2{,}57 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

Eszerint $F_{atom} = 6{,}6 \cdot 10^{-20}$ m$^2$. Az aranyfólia vastagsága $L = 5 \cdot 10^{-7}$ m, ezért abban

$$k = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{2{,}57 \cdot 10^{-10}} = 1994 \approx 2000$$

atomréteg van. Most már visszahelyettesíthetünk a fenti kifejezésbe:

$$\frac{1}{10^5} = \frac{k R_{mag}^2 \pi}{F_{atom}}.$$

Ebből

$$R_{mag} = \sqrt{\frac{F_{atom}}{10^5 k \pi}} =$$

$$= \sqrt{\frac{6{,}6 \cdot 10^{-20}}{6{,}264 \cdot 10^8}} = 1{,}02 \cdot 10^{-14} \approx 10{,}2 \cdot 10^{-15} \text{ m}.$$

b) Azért használtak aranyat, mert az aranyból lehetett a lehető legvékonyabb fóliát előállítani. A fólia vékonysága viszont fontos volt, mert egy vastagabb fólia elnyeli az alfa-részeket.

c) Elhanyagolások:

1. Az egyik elhanyagolás abból a feltevésből adódik, hogy az egymás mögötti atomrétegek atommagjai nem „fedik" egymást. Ha a rétegek véletlenszerűen helyezkednek el egymás mögött, akkor ez jó közelítés, mint az már a visszapattanási arányból is következik. Kristályrácsnál – amilyen az arany fémrácsa is – ez a feltételezés nem magától értetődő.

2. A valóságban nincs egyértelmű „visszapattanás", csak nagy szögben szóródott részecskék. Meg kellene mondani azt, hogy mekkora szögtől kezdve tekintjük „visszapattantnak" a részecskét. Ezt a szögtartományt változtatva más és más visszapattanási arányt, és ennek következtében más és más „hatásos" atommagkeresztmetszetet kapnánk.

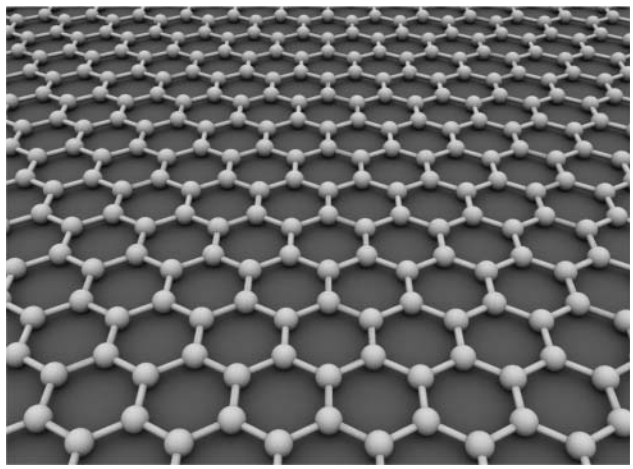
3. Az atomok méretének becslésekor nem vettük figyelembe azt, hogy az atomok nem mint „kockákban lévő gömbök" helyezkednek el, hanem megfelelő kristálystruktúra mentén. Ezért a térkitöltés más, mint amit mi egyszerűen feltételeztünk.

*10. feladat*

2010-ben két orosz származású fiatal tudós – *Andre Geim* (született 1958-ban) és *Konstantin Novoselov* (született 1974-ben) – nyerte el a fizikai Nobel-díjat a grafének felfedezéséért.

A grafén kétdimenziós – egy atomi rétegű – grafit kristályrács, ahol a szénatomok szabályos hatszögek csúcsaiban helyezkednek el.

„A szén grafén nevű formája egészen új kutatási irány az anyagtudományban, az elmúlt pár évben lett felkapott anyag a nanotechnológiában. Az biztos, hogy a grafénmegoldások területe a következő évtizedekben nagyot fog robbanni, akár már tíz éven belül megjelenhetnek az első termékek, amelyekben grafén



A grafén modellje.

van." – A Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet kutatócsoport-vezetője, *Biró László Péter* nyilatkozata.

a) Becsüljük meg, hogy egy 1 cm élhosszúságú grafitkockából maximálisan mekkora területű grafénlemez készíthető?

b) Hányszor kisebb a grafénlemez fajlagos tömege egy A4-es másolópapír 80 g/m$^2$ fajlagos tömegénél?

Adatok: A grafit sűrűsége 2,26 g/cm$^3$. A hatszögrács állandója: 0,14 nm. A szén moláris tömege: 12 g/mol, az Avogadro-állandó: $6 \cdot 10^{23}$ 1/mol.

*Megoldás*

a) A kockában lévő szénatomok száma:

$$N = \frac{2{,}26\ \text{g}}{12\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6 \cdot 10^{23}\ \frac{1}{\text{mol}} = 1{,}13 \cdot 10^{23}.$$

Mivel minden hatszöghöz 6 szénatom tartozik, ugyanakkor egy szénatomhoz 3 hatszög, ezért a hatszögek száma:

$$N_b = \frac{N}{2} = 5{,}65 \cdot 10^{22}.$$

Egy hatszög területe:

$$t_b = \frac{3\sqrt{3}}{2} d^2 = 5{,}09 \cdot 10^{-20}\ \text{m}^2.$$

Így a grafénlemez területe:

$$T = N_b t_b = 5{,}65 \cdot 10^{22} \cdot 5{,}09 \cdot 10^{-20}\ \text{m}^2 \approx 2876\ \text{m}^2.$$

b) A grafénlemez fajlagos tömege:

$$\mu = \frac{2{,}26\ \text{g}}{2876\ \text{m}^2} = 7{,}86 \cdot 10^{-4}\ \frac{\text{g}}{\text{m}^2}.$$

Ez körülbelül 100 ezerszer kisebb, mint a másoló papírlap fajlagos tömege.

Megjegyzés: ebből arra is következtethetünk, hogy a grafénlap vastagsága is (vagyis az atomok átmérője) körülbelül 100 ezred része a papírlap 0,05 mm vastagságának.

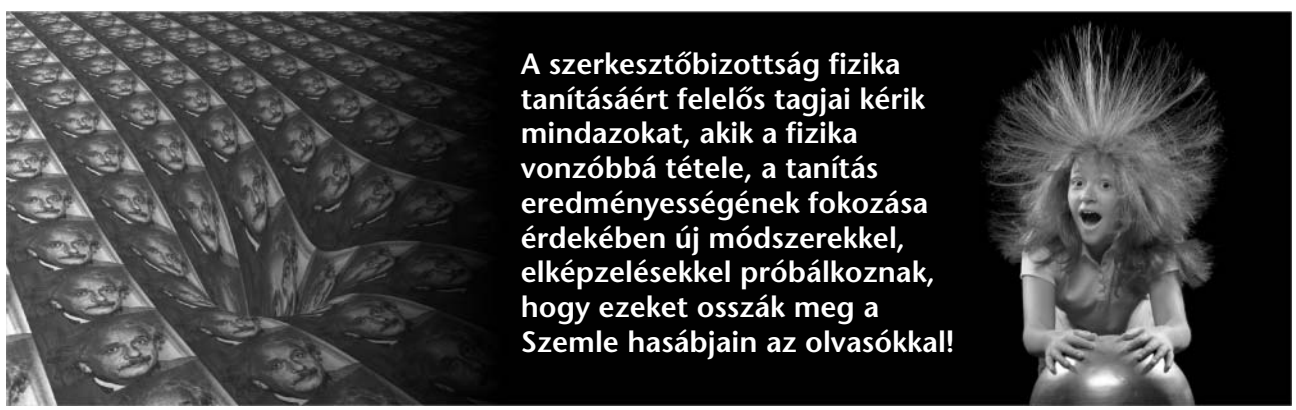
## Az elődöntő eredményei

Az elődöntő feladatait 46 fő I. kategóriás – Budapestről 11-en, vidékről 35-en – és 18 fő junior versenyző – 1 budapesti, 17 vidéki – teljesítette olyan szinten, hogy dolgozataikat a javító tanárok tovább tudták küldeni a BME Nukleáris Technika Tanszékére további rangsorolás végett. Határon túli iskolából sajnos nem érkezett ilyen szintű megoldás.

A beküldött dolgozatokat ellenőrizve egy egyetemi oktatókból álló bírálóbizottság a legjobb 10 junior versenyzőt és a legjobb 20 első kategóriás versenyzőt hívta be a paksi Energetikai Szakközépiskolában 2011. április 9-én megrendezett döntőre. A kiértesítést követően a kaposvári Táncsics Mihály Gimnáziumból értesítették a Versenybizottságot, hogy döntőbe jutott két tanulójuk lemondta a versenyt a kémia OKTV-vel való ütközés miatt. A Versenybizottság úgy döntött, hogy helyettük a pontszámuk alapján soron következő két tanulót hívja be a döntőbe. Röviddel a döntő előtt még egy diák lemondta a versenyt, így végül 19 fő I. kategóriás és 10 fő második (Junior) kategóriás diák versenyzett.

Az idén csak két lány jutott be a verseny döntőjébe: *Takács Hajna* (Budapest, ELTE Trefort Ágoston Gimnázium) az I. kategóriában és *Garami Anna* (Pécs, Leöwey Klára Gimnázium) a juniorok között.

(Folytatás a következő számban.)



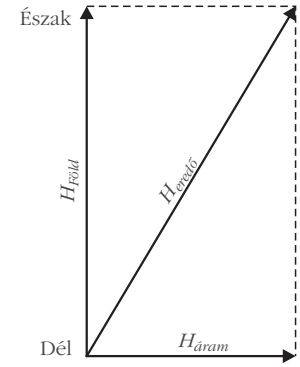
# KÍSÉRLETEZZÜNK OTTHON!

Härtlein Károly
BME Fizikai Intézet

## 7. Egy érzékeny árammérő készítése házilag

Elkészíteni egy működő mérőeszközt meghatározó élményt jelenthet. Ha sikerül és működik, akkor – tapasztalataim szerint – nagy valószínűséggel egy újabb diákot üdvözölhetünk a fizikát szeretők táborában. Ezen eszköz elkészítése olyan egyszerű, hogy akár az általános iskolák technikaóráin elkészíthetnék a tanulók.

1820-ban egy dán fizikus, *Hans Christian Oersted* észrevette, hogy az árammal átjárt vezető közelében elhelyezett iránytű az áram hatására elfordul. *Johann Schweigger*nek támadt az az ötlete, hogy ha ugyanazt az áramot többször egymás után vezeti el a mágnestű mellett, akkor az áram mágneses hatását megsokszorozhatja. Egy négyszögletes fakeretre szigetelt huzalt csévélt fel, így egy sokmenetű tekercset kapott, amely belsejében összegződött az egyes menetek mágneses tere. Ezzel az eszközzel sokkal kisebb áramerősség is elegendő volt az iránytű azonos elfordulásához. Az árammal átjárt vezetőkeret mágneses tere merőleges a keret síkjára, tehát a legjobban akkor fejtheti ki hatását az iránytűre, ha mágneses tere merőleges a Föld mágneses terére. Az áram bekapcsolásakor a tekercs belsejében a mágneses tér a Föld mágneses terének és az áram mágneses terének vektori összege lesz (*1. ábra*).




*1. ábra*. A Föld és az áram átjárta vezető mágneses tere.

*Szükséges anyagok:*

– családi gyufásdoboz (71×53×25 mm), illetve alkalmas méretű papír- vagy műanyagdoboz,

– néhány méter könnyen hajlítható, lakk- vagy műanyag-szigetelésű vezeték,

– iránytű (ha nincs, akkor azt is elkészíthetjük házilag, lásd később).

*Az elkészítés menete:*

A gyufásdoboz tetejének középső harmadát a *2. ábrá*n látható módon ki kell vágni. A vezetéket a kivágás két oldalára kell feltekerni. A menetek felét a gyufásdoboz egyik felére, a másik felét a másik felére. A tekercselést úgy érdemes kezdeni, hogy a vezeték közepét a doboz aljának közepéhez ragasztjuk. A jobb és a baloldali meneteket azonos irányban kell csévélni (minden menet mágneses mezeje azonos irányú legyen). A vezetéket több helyen pillanatragasztóval rögzítsük a dobozhoz! A vezeték végeire szereljünk banándugót, vagy krokodilcsipeszt, hogy könnyen lehessen áramkörbe kapcsolni.

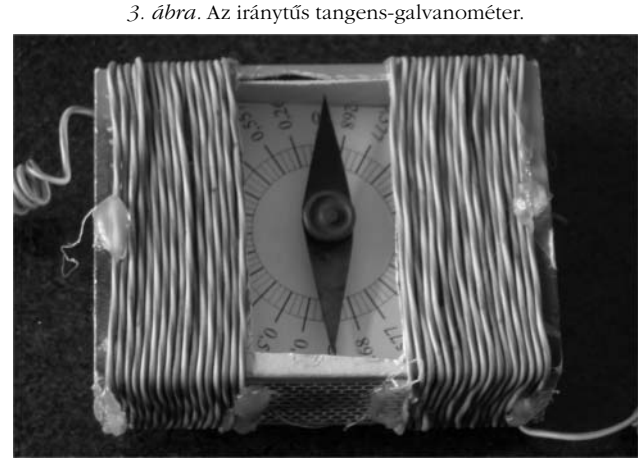
*Használat:*

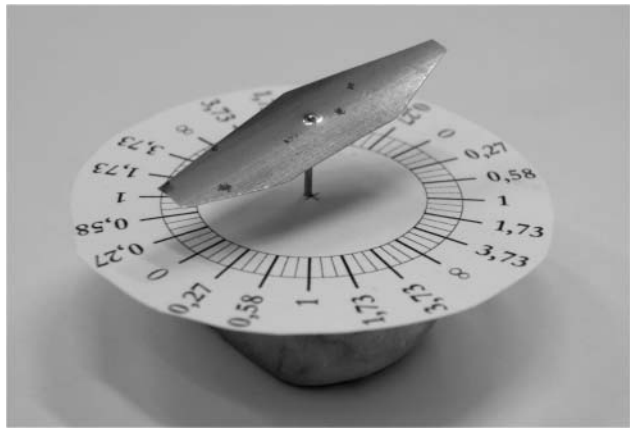
A gyufásdobozra felcsavart huzallal egy Helmholtz-tekercset készítettünk. Ennek közepébe tegyük az iránytűt és úgy helyezzük el az asztalon, hogy a mutató a tekercsekkel derékszöget zárjon be, vagyis árammentes állapotban merőleges legyen a gyufásdoboz hosszabbik tengelyére és az északinak jelölt hegye mutasson észak felé! Így a vezetéken átfolyó áram által létrehozott mágneses mező ekkor éppen merőleges lesz a Föld mágneses mezejére. E két mágneses tér eredőjének irányába fog mutatni az iránytű.

Budapesten a Föld mágneses terének vízszintes komponense $H_{Föld}$ = 16 A/m, mérésünk során ezt hasonlítjuk össze az áram mágneses terével. A menetszám növelése esetén növekszik a műszer érzékenysége. A *3. ábrá*n látható tangensgalvanométerre 50 menetet csévéltem, ezzel közel 45 fokos elfordulást értem el, ha egy 0,2 W teljesítményű, 4,5 V-os zseblámpaizzó áramát mértem (0,04 A).

*2. ábra*. Helmholtz-tekercs a gyufásdobozon.

*3. ábra*. Az iránytűs tangens-galvanométer.

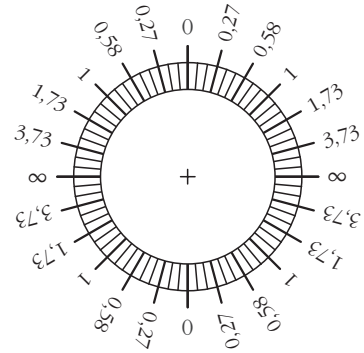





*4. ábra*. A házilag készített iránytű és a tangensskála.

A műszert, mint az árammérőket, sorosan kell bekötni az áramkörbe. Egy ismert áramerősség segítségével kalibrálhatjuk műszerünket, és utána már konkrét áramerősség olvasható le a skáláról. Végezhetünk összehasonlító mérést – a két áram erőssége úgy aránylik egymáshoz, mint az általuk okozott elfordulások szögének tangensei.

Ha eldöntöttük, hogy magunk készítünk iránytűt, akkor radírra, gombostűre, egy kör alakúra kivágott papírra (ez lesz a skála), és egy rombusz alakú acéllemezre lesz szükségünk. Szúrjunk a radírba a gombostűt, gondosan ügyelve arra, hogy függőlegesen helyezkedjen el! Az iránytű mutatóját könnyen elkészíthetjük egy megunt, vagy eltört acél mérőszalagból. Ezek az acélszalagok nagy mágneses remanenciával rendelkeznek, így kiváló iránytű készíthető belőlük. Alakjuk is megfelel célunknak, mert – íveltségüknek köszönhetően – a tűre helyezve stabilan fognak állni. Elsőként egy akkora darabot vágjunk le belőle, amely még elfordulhat a doboz belsejében. A közepére egy vékony szeggel vagy pontozóval üssünk egy mélyedést! Vigyázzunk arra, hogy ne lyukasszuk át, hiszen ekkor nem fog lecsúszni a tűről. Majd szimmetrikusan vágjuk rombusz alakúra. Helyezzük a lemezt egy tűre úgy, hogy a mélyedés felfelé domborodjon és a tű hegye a domborulat belsejében támassza alá a lemezt, így ellenőrizhetjük, hogy a lemezt jól vágtuk-e ki. A helyesen kivágott lemez vízszintesen fog állni. Csak ezután mágnesezzük fel a lemezt! Egy mágnes északi végét a lemez közepétől a végéig többször húzzuk végig, majd fordítsuk meg a lemezt és a mágnest is, és most a déli végét húzzuk többször a közepétől a végéig. Ne csodálkozzunk azon, hogy a lemez a mágnesezés után már nem fog vízszintesen állni (*4. ábra*)! Ennek oka az, hogy a Föld mágneses tere nem vízszintes. Ezt a szögeltérést nevezik inklinációnak. Akit zavar ez a ferdeség, az a lelógó vég rövidítésével megpróbálhatja vízszintesbe hozni. Az iránytű még elkészítendő része a skála. Ha könnyen szeretnénk meghatározni az áram értékét, érdemes a fokbeosztás helyett rögtön a szög tangensével feliratozni a körlapot (a már említett családi gyufába való méretűt mutat az *5. ábra*), mert úgyis ezzel az értékkel kell majd számolni.




*5. ábra*. Családi gyufába való méretű skála.

*Néhány megjegyzés és tanács a mérésekhez:*

Ez a „műszer” nagyon érzékeny a közelében lévő mágnesekre, mágnesezhető tárgyakra. Éppen ezért mérés előtt legyünk figyelemmel, milyen tárgyak vannak a közelben. Ennek főleg akkor van nagy szerepe, ha már „hitelesített” a műszer. Az eszköz egy másik, szinte páratlan tulajdonsága, hogy igen nagy áramok sem tudják tönkretenni. A leolvasás pontosságát növelhetjük, ha mindig az iránytűre merőlegesen olvassuk le a mutatott értéket (parallaxis-hiba!).

Kapcsolódó oldalak:
http://fizipedia.bme.hu/index.php/Áram_mágneses_tere,_Oersted_kísérlet
http://fizipedia.phy.bme.hu/index.php/Tangens-galvanométer
további skálák: http://goliat.eik.bme.hu/~hartlein/scale.pdf

# NEM MINDENNAPI LÁTOGATÁS A CERN-BEN

Nagyenergiájú részecskefizika, hadronütköztető, sötét anyag, kvarkok – ezekkel a nem mindennapos kifejezésekkel pár éve találkoztunk, amikor *Lévai Péter* fizikus egy babitsos diáknapon előadást tartott a téma iránt érdeklődő diákoknak.

2012 januárjától azonban néhányunk számára már nem idegenek ezek a kifejezések, mivel 2012. január 9. és 12. között ellátogathattunk a világ legnagyobb részecskegyorsítójába. Húsz középiskolai diák, valamint két kísérőtanárunk élhetett a lehetőséggel, hogy egy tanulmányi kirándulás keretében meglátogassa a Genf mellett található CERN-t.

Új gyorsító, Higgs-bozon keresése, Pb-proton és proton-proton ütköztetés… Ha valaki egy kicsit érdeklődő, akkor sokat olvashat erről az interneten is. Ez azonban nem érhet fel azzal az élménnyel, amivel mi gazdagodhattunk. Két nap tömény program a fizikai kutatás olyan helyszínén, ahol 80 nemzet 500 egyete-

méről és kutatóintézetéből a világ részecskefizikai közösségének mintegy fele dolgozik. Az egyik érdekes kutatási témájuk a Higgs-bozonra irányul. 1960-ban *Peter Higgs* angol fizikus jósolta meg az „isteni részecske" meglétét, azonban ezt még 2011-ben sem tudták minden kétséget kizáróan bizonyítani.

A CERN-ben Lévai Péter és *Molnár Levente* (MTA Wigner Intézet kutatói) valamint *Szillási Zoltán* és *Béni Noémi* (MTA ATOMKI) voltak a házigazdáink. Rajtuk kívül megismerkedhettünk több magyar fizikussal is, akik a genfi kutatóintézetben dolgoznak, kutatnak. Körbevezettek minket a különböző helyszíneken: láttuk, hol hozták létre a mindannyiunk által használt webet, megtekinthettük az intézetbe látogató vendégek számára készített kiállításokat, amelyek a CERN történetéről és az ott folyó kutatómunkákról szólnak. Az ATLASZ, a CMS és az ALICE kísérletek helyszíneinek meglátogatása során sok minden közt megtudtuk hogyan gyorsítanak részecskéket fénysebességre, majd ezután hogyan ütköztetik egymással őket, milyen problémákkal kell szembenézni a kísérlet elvégzése közben (például kiderült, a vákuum is teli van anyaggal), illetve annak kiértékelésénél. Láttuk a „gyorsító" és „hajlító" berendezéseket, és elmagyarázták, hogy milyen technikai fejlődésen mentek keresztül ezek a berendezések és milyen változásoknak kell megfelelniük a jövőben. Többek között ezekről a témákról kaptunk átfogó képet az ötvenes évek óta működő CERN-ben.

A kint dolgozó magyar fizikusokkal alkalmunk volt beszélgetni, segítségükkel közelebbről is megismerhettük a kutatói munka szépségeit, a külföldön való munkavállalás nehézségeit.

Kényelmes EasyJet-en repültünk oda-vissza, atombunkerben aludtunk, megnéztük Genf esti fényeit, megkóstoltuk a svájci csokit… – nagyon gyorsan elrepült a két teljes nap!

Köszönjük a szervezőknek ezt a nem mindennapi programot, kísérő tanáraink segítségét, valamint támogatóink hozzájárulását költségeink fedezéséhez.

*Kollányi Nikolett, Balassy Zsombor*
Babits Mihály Gimnázium 12. évf. tanulók

## HÍREK – ESEMÉNYEK

# A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

## Felhívás javaslattételre

A korábbi évekhez hasonlóan az idén is szándékunkban áll kiosztani az Eötvös Loránd Fizikai Társulat érmeit és díjait. Ezúton is kérem a Társulat szakcsoportjait, területi szervezeteit és a Társulat valamennyi tagját, hogy a Társulat díjainak odaítélésére vonatkozó javaslataikat (pályázatukat) *2012. április 10-ig* szíveskedjenek eljuttatni a Társulat titkárságára (1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29–33., 31. épület, II. emelet, 315. szoba).

A díjak odaítélésével kapcsolatban az Alapszabály vonatkozó rendelkezései az irányadóak, a díjak kiosztására az előreláthatóan 2012. május 19-én megrendezendő Küldöttközgyűlés keretében kerül sor.

### Az Eötvös Társulat kitüntetései és díjai

#### Tudományos díjak

A Eötvös Loránd Fizikai Társulat az alábbi tudományos díjakat adományozhatja:

- *Bródy Imre-díj*at annak a személynek, aki a fizika alkalmazásának területén,
- *Budó Ágoston-díj*at annak a személynek, aki az optika, molekulafizika vagy a kísérleti fizika területén,
- *Detre László-díj*at annak a személynek, aki a csillagászatban, valamint bolygónkkal és annak kozmikus környezetével foglalkozó fizikai kutatások területén,
- *Gombás Pál-díj*at annak a személynek, aki az alkalmazott kvantumelmélet kutatása területén,
- *Gyulai Zoltán-díj*at annak a személynek, aki a szilárdtestfizika területén,
- *Jánossy Lajos-díj*at annak a személynek, aki az elméleti és kísérleti kutatások területén,
- *Novobátzky Károly-díj*at annak a személynek, aki az elméleti fizikai kutatások területén,
- *Schmid Rezső-díj*at annak a személynek, aki az anyag szerkezetének kutatása területén,
- *Selényi Pál-díj*at annak a személynek, aki a kísérleti kutatás területén,

• *Szalay Sándor-díj*at annak a személynek, aki az atom- vagy atommag-fizikában, illetve ezek interdiszciplináris alkalmazási területén,
• *Szigeti György-díj*at annak a személynek, aki a lumineszcencia- és félvezető-kutatások gyakorlati alkalmazásában,
• *Bozóky László-díj*at annak a személynek, aki a sugárfizika és a környezettudomány területén,
• *Felsőoktatási Díj*at annak a személynek, aki a felsőoktatás területén kimagasló eredmény ért el.

### Társulati díjak

• *Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érem* a Társulat azon tagjának adható, aki a fizika területén hosszú időn keresztül folytatott kutatási, alkalmazási vagy oktatási tevékenységével és a Társulatban kifejtett munkásságával kiemelkedően hozzájárult a fizika hazai fejlődéséhez.
• A Társulat *Prometheusz érem*mel – „A fizikai gondolkodás terjesztéséért" – tüntetheti ki azt, aki a fizikai műveltség fokozásához országos hatással hozzájárult.
• A Társulat *Eötvös Plakett* emléktárgya annak a tagnak/személynek ítélhető oda, aki rendkívüli mértékben nyújt segítséget a Társulat célkitűzéseinek megvalósításához, továbbá neves külföldi vendégnek a Társulat valamely rendezvényén tartott előadása alkalmából.

A Társulat díjaira az Alapszabály szerint a Társulat szakcsoportjai és területi szervezetei, valamint a Társulat tagjai tehetnek javaslatot, de minden társulati tag maga is pályázhat a díjakra. A díjak elnyerésének a társulati tagság nem feltétele. A javaslatokat és a pályázatokat az illetékes szakcsoportok véleményével együtt a www.elft.hu weblapról letölthető, vagy a titkárságon beszerezhető űrlap felhasználásával kell a Társulat titkárságára eljuttatni.

A díjazottak személyéről a Díjbizottság javaslatára a Társulat Elnöksége dönt.

*Kürti Jenő* főtitkár

# Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2012. évi Küldöttközgyűlése

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat *2012. május 19-én,* szombaton 10.00 órai kezdettel tartja Küldöttközgyűlését az Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai épületében (Budapest, XI. Pázmány Péter sétány 1/A).

A Küldöttközgyűlés nyilvános, azon bárki részt vehet. A Küldöttközgyűlésen a Társulat bármely tagja felszólalhat, de a szavazásban csak a területi és szakcsoportok által megválasztott és küldöttigazolvánnyal rendelkező küldöttek vehetnek részt. Ezért kérjük, hogy a küldöttek küldöttigazolványukat feltétlenül hozzák magukkal, és azt a regisztrációnál mutassák be.

Amennyiben a Küldöttközgyűlés a meghirdetett időpontban nem határozatképes, akkor munkáját 10.30-kor, vagy a napirend előtti előadás után kezdi meg. Az ily módon megismételt Küldöttközgyűlés a megjelent küldöttek számára való tekintet nélkül határozatképes, de a jelen értesítésben szereplő tárgysorozatot nem módosíthatja.

A hagyományos napirend előtti előadás (kezdete 10 óra) szerzőjét és címét a szokásos hírközlési csatornákon (posta, *FIZINFO, Fizikai Szemle*) később közöljük.

Az Elnökség a Küldöttközgyűlésnek a következő tárgysorozatot javasolja:

1. Elnöki megnyitó; 2. A Szavazatszámláló bizottság felkérése; 3. Főtitkári beszámoló, 3.1 A Társulat 2011. évi közhasznúsági jelentése, 3.2 A Társulat 2012. évi költségvetése, 3.3 Határozati javaslat; 4. A Felügyelő Bizottság jelentése; 5. Vita és szavazás a napirend 3.–4. pontjaival kapcsolatban; 6. A jelölőbizottság előterjesztése új alelnök megválasztására; 7. Vita és választás; 8. A Társulat díjainak kiosztása; 9. Zárszó.

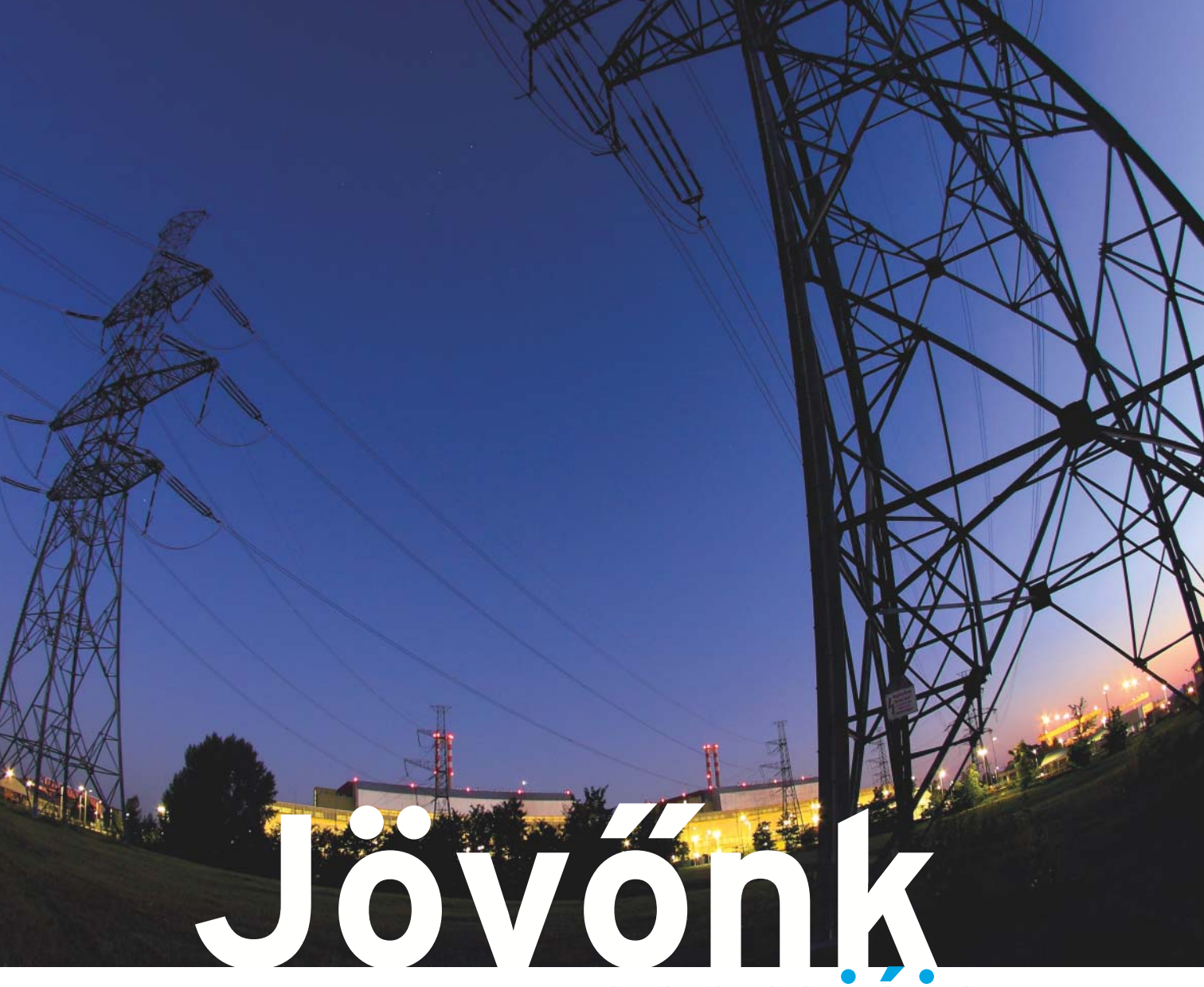
# Húsz év

Jó érzés, ha egy folyóiratot már a külseje, rendezettsége, képeinek minősége, professzionális tipográfusok által is elismert harmóniája miatt hónapról-hónapra örömmel vehetünk kézbe. Amennyiben mindez elmondható a *Fizikai Szemlé*ről, az immár 20, azaz húsz éve *Kármán Tamás* érdeme.

A szakszerűség fizikusi végzettségének és a fizika értő szeretetének köszönhető, a többi szorgalomnak, érzéknek, a fotóművész tehetségének eredménye. Mi olvasók pedig örülhetünk az elmúlt húsz év szép lappéldányainak és hogy az odaadással végzett munka nem nyűtte el az évei szerint is fiatal műszaki szerkesztőnket.

Egyúttal kérjük Tamást, közismert szerénysége ellenére látható helyre illessze ezeket a köszönő-köszöntő sorokat!

*Szerkesztőbizottság*



# Jövőnk energiája

mvm

# paksi atomerőmű

ISSN 0015325-7