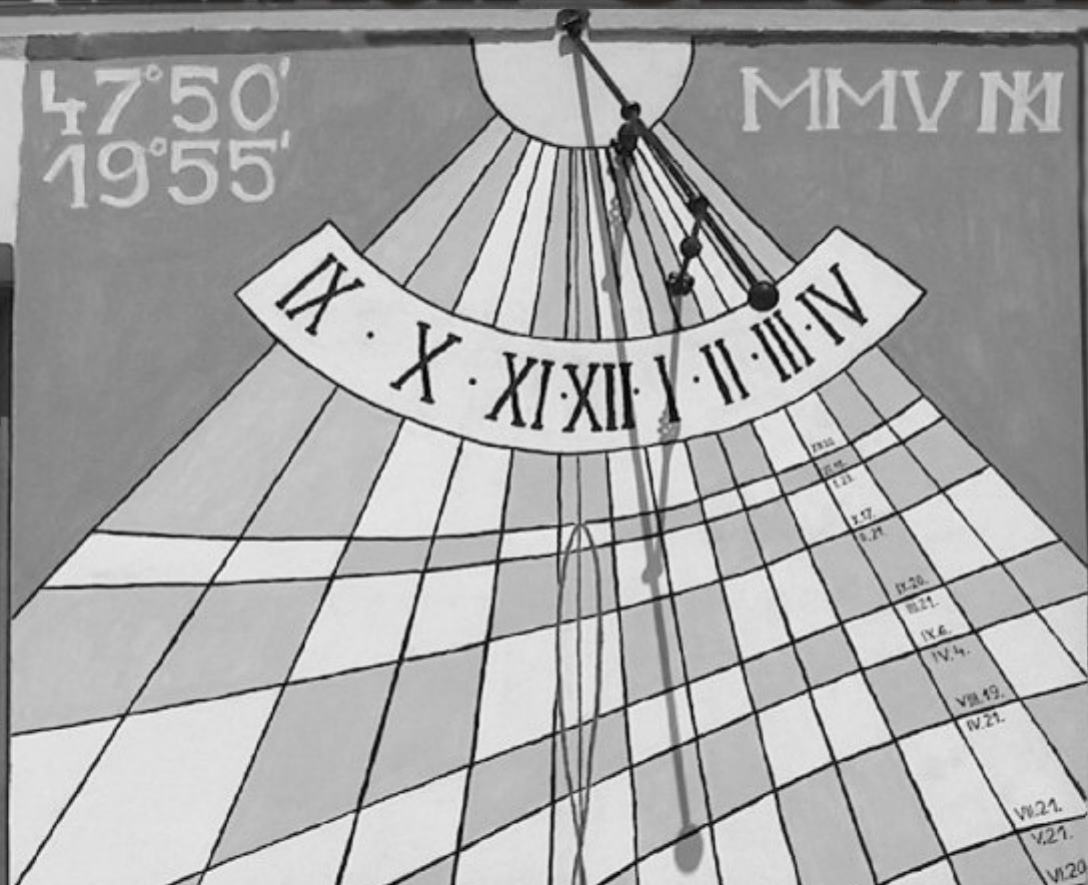


fizikai szemle



2006/4

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

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

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

Megbízott szerkesztő:

Szabados László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

Napóra a gyöngyösi Berze Nagy János
Gimnázium falán. (Fotó: Kiss Miklós)

TARTALOM

<i>Pozsgai Imre:</i> Szupravezető röntgendetektorok	109
<i>Aszódi Attila:</i> Csernobil 20 éve	114
<i>Bujtás Tibor, Nényei Árpád:</i> Az üzemzavar helyreállításának sugárvédelmi kérdései	119
<i>Éber Nándor:</i> Folyadékkristály-televíziók – a 21. század képernyői	123
<i>Füstöss László:</i> Arcképvázlat Gombás Pálról	127
Száz éve született Detre László (<i>Szabados László</i>)	131
Ribár Béla, 1930–2006 (<i>Berényi Dénes</i>)	132

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Kiss Miklós:</i> Készítsünk napórát!	132
Fórumok az új rendszerű fizika-érettségi tapasztalatairól	139

NÉGYSZÖGLETES KERÉK

PÁLYÁZATOK	141
------------	-----

DOKUMENTUM

HÍREK – ESEMÉNYEK	143
-------------------	-----

KÖNYVESPOLC

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	144
--------------------------	-----

A napenergia modern felhasználási lehetőségei (<i>Horváth Ákos</i>)	144
---	-----

I. Pozsgai: Superconductive X-ray detectors

A. Aszódi: Two decades since Chernobyl

T. Bujtás, Á. Nényei: Radiation protection aspects of the repair work at Paks Nuclear Power Plant

N. Éber: LCD screens for our century's TV sets

L. Füstöss: Academician Pál Gombás – an eminent scientist's portrait

L. Detre, astronomer. Centenary (*L. Szabados*)

Béla Ribár, 1930–2006 (*D. Berényi*)

TEACHING PHYSICS

M. Kiss: Build your own sundial!

Committees' observations concerning the recently revised physics examination procedures
at secondary schools

PROBLEMS, TENDERS, DOCUMENTS, EVENTS, BOOKS

SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

Solar energy (*Á. Horváth*)

I. Pozsgai: Supraleiter-Detektoren von Röntgenstrahlungen

A. Aszódi: Zwei Jahrzehnte nach Tschernobyl

T. Bujtás, Á. Nényei: Strahlenschutzprobleme bei Reparaturarbeiten am Kernkraftwerk Paks

N. Éber: LCD Bildschirme an den Fernsehgeräten unseres Jahrhunderts

L. Füstöss: Akademiemitglied Pál Gombás – die Persönlichkeit eines hervorragenden Wissenschaftlers

L. Detre, Astronom. Hundertjahrfeier (*L. Szabados*)

Béla Ribár, 1930–2006 (*D. Berényi*)

PHYSIKUNTERRICHT

M. Kiss: Selbstgebaute Sonnenuhr

Kommissionsberichte über Erfahrungen mit der neuen Prüfungsordnung (Physik) an Mittelschulen

PROBLEME UND AUFGABEN, AUSSCHREIBUNGEN

DOKUMENTE, EREIGNISSE, BÜCHER

WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Sonnenenergie (*Á. Horváth*)

II. Пожгаи: Сверхпроводящие детекторы рентгеновского излучения

A. Asódi: Два десятилетия после Чернобыльской аварии

T. Буйташ, А. Нэней: Проблемы радиационной защиты в курсе ремонтных работ
у АЭС Пакш

N. Éber: Жидко-кристалльные ТВ-экраны нашего столетия

Академик П. Гомбаш: портрет крупного ученого (*Л. Фюштэши*)

Столетие со дня рождения выдающего венгерского астронома, Л. Дэтре (*Л. Сабадош*)

Бела Рыбар, 1930–2006 (*Д. Берени*)

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

M. Kiss: Самодельные солнечные часы

Итоги комиссий об опытах с новым порядком окончательных экзаменов
средних школ по физике

ПРОБЛЕМЫ И УПРАЖНЕНИЯ, ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ

ДОКУМЕНТЫ, КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Солнечная энергия (*А. Хорвати*)

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVI. évfolyam

4. szám

2006. április

SZUPRAVEZETŐ RÖNTGENDETEKTOROK

Pozsgai Imre
Richter Gedeon Rt.

Berényi Dénesnek ajánlva

A *Fizikai Szemle* 1967-es évfolyamának első száma a *Szupravezetés nébány alkalmazása* címmel cikket közölt Pozsgai Imre fizikus hallgató tollából. A rövid cikk még nem is utalt rá, hogy a tollat Berényi Dénes szemináriumvezető mozgatta. A kéziratot sokszor át kellett írnom, és Dénes nagy türelemmel és megértéssel segített munkámban.

A szupravezetés mint kapocs készítetett arra, hogy jelen cikkem megírjam, és utólag köszönetet mondjak Berényi Dénes akadémikusnak, egykori szemináriumvezetőmnek, aki mély nyomokat hagyott bennem és kis csoportunk valamennyi tagjában. Nehéz helyzetekben, amikor a szakmához és a tudományhoz való ragaszkodás volt a tét, az ő szavai jutottak mindig eszünkbe.

Az élet úgy hozta, hogy elektronmikroszkópiával, elektronsugaras mikroanalízissel és röntgenfluoreszcens analízissel foglalkoztam, illetve foglalkozom. Az, hogy a szupravezető mágneses lencsék alkalmazása előnyös lehet az elektronmikroszkópokban, már 1967-ben, az említett cikk írásakor is világos volt. Annak viszont még a gondolata sem merült fel, hogy a szupravezetés a röntgendetektálás területén is fontos szerepet tölthet be.

Hullámhosszdiszperzív (WDS) és energiadiszperzív (EDS) spektrometria

A szupravezetésen alapuló röntgendetektorok jelentőségét akkor látjuk kellő megvilágításban, ha megnézzük, hogy a fejlődés ezen fokát milyen konstrukciók előzték meg, és azok milyen teljesítményre voltak képesek.

Az első röntgenspektrométerrel ellátott pásztázó elektronmikroszkópot (vagy terminológiailag pontosabban, mikroszondát) R. Castaing alkotta meg PhD-munkája keretében 1951-ben. A munka elméletileg és gyakorlatilag oly teljes volt, hogy az utókornak keveset hagyott csiszolásra, finomításra. Ez a mikroszonda hullámhosszdiszperzív röntgenspektrométerrel volt felszerelve, amelyben egy analizátor kristály a Bragg-törvénynek megfelelően ($n\lambda = 2d\sin\Theta$) szelektálja a különböző hullámhosszúságú (λ) röntgensugarakat. Detektorként proporcionális szám-

lálót alkalmazott. Ebben az elrendezésben követelmény, hogy az analizálandó minta, az analizátor kristály és a detektor, a proporcionális számláló egyetlen körön, a fókuszálókörön foglaljon helyet.

A mikroszonda manapság is fontos eszköz, mert hullámhossz- (vagy energia-)felbontása olyan jó, hogy például a geológiában – ahol nagyon sok mintakomponens egyidejű jelenlétével kell számolni – is ideális megoldásnak bizonyul. Az elektrongerjesztésen alapuló röntgenemissziós analitikai módszer elektronsugaras mikroanalízis néven vált ismertté a magyar szakirodalomban, míg a röntngerjesztésen alapuló röntgenemissziós analitikát röntgenfluoreszcens analízisnek nevezzük.

Az elektronsugaras mikroanalízis roncsolásmentességével, kiváló abszolút detektálási határaival (10^{-14} – 10^{-15} g) és nagy laterális felbontásával (1–10 μm) tűnik ki, a röntgenfluoreszcens analízist a roncsolásmentességen kívül a nagyon jó relatív detektálási határok (1–100 ppm) jellemzik. A Bragg-törvényen alapuló hullámhossz-szelekciót mindkét módszerben egyaránt sikeresen alkalmazzák.

A hullámhosszdiszperzív detektálásnak van egy hátránya: az analízis szekvenciális, egy időpontban egyetlen elemet tud csak detektálni, ezért időigényes. Az egymást követő elemek detektálásához az analizátorkristály helyzetét meg kell változtatni. A kvantitatív analízishez minden egyes elemre mérni kell a röntgenintenzitást a csúcspozícióban és két háttérpontban. Ráadásul ugyanezeket a méréseket az etalonokon is el kell végezni. A geológiában egy nyolckomponensű minta nem számít ritkaságnak, a fent vázoltak szerint az ilyen minta kvantitatív analíziséhez 48 mérést kell elvégezni.

Ezért a törekvés a szimultán detektálás irányában nagyon is kézenfekvő volt. A 60-as, 70-es években kerültek alkalmazásra a lítium adalékolásával készült (Li driftelt) szilícium (Si(Li)) detektorok, amelyek a szóban forgó igényt elégítették ki. A nátriumtól az uránig valamennyi elem egyidejűleg detektálhatóvá vált. Egy újabb fejlesztés a detektorablak konstrukciójában azt eredményezte, hogy a detektálható legkisebb rendszámú elem a nátrium helyett a bór lett. Mozgó alkatrészek nem lévén, a mérések

reprodukálhatósága annyira jó, hogy etalon nélküli eljárással is lehet kvantitatív analízist végezni, ami szintén az időmegtakarítás irányába hat.

A Si(Li) detektor egy p–i–n szerkezetet tartalmaz, amelyben az *saját vezetésű* (intrinsic) tartományt lítium driftelésével hozzák létre. Minthogy elektromos tér hatására a lítium a detektorban szobahőmérsékleten nem maradna helyén, a detektor cseppfolyós nitrogénnel való hűtése vált szükségessé.

A *saját vezetésű* tartomány úgy viselkedik, mint egy ionizációs kamra, csak akkor képződik benne töltés, ha oda ionizáló sugárzás jut be. A beérkező röntgenkvantum annyi elektron–lyuk párt hoz létre, ahányszor nagyobb a sugárzás energiája, mint a detektoranyag tiltotsáv-szélessége. ($\Delta E_{\text{Si}} = 1,1 \text{ eV}$. Ha a folyamat statisztikus jellegét is figyelembe vesszük, akkor egy elektron–lyuk pár keltéséhez szükséges átlagos energia szilíciumban nem 1,1 eV, hanem 3,6 eV). A röntgenfotonok energiájának meghatározása így elvileg elektronáram-mérésre vezethető vissza.

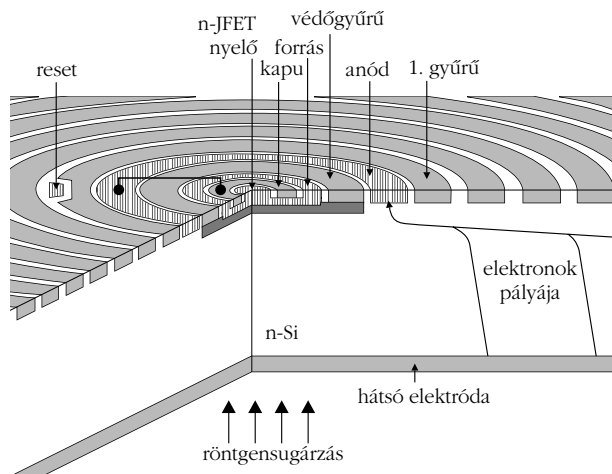
Bár ez az energiadiszperzív spektrometria (EDS) további előnyöket is hozott a hullámhosszdiszperzív detektáláshoz képest, például a detektálás nagy hatásfoka miatt kisebb besugárzó elektronáramokkal lehetett dolgozni, mint WDS-sel, ami végső soron a minta hőterhelésének a csökkentéséhez vezetett. Az öröm mégsem volt teljes, mert az EDS-detektálás energia-felbontóképessége 120–130 eV (a $\text{MnK}\alpha$ sugárzás 5,9 keV-es vonalánál mérve) sokkal rosszabb, mint a WDS 1–10 eV-os energiafelbontása. A nagytisztaságú germániumból készült detektorok valamit javítottak a helyzeten, de elvileg 90 eV-os felbontásnál jobbra nem lehet számítani a félvezető detektoroknál.

Az EDS rosszabb energiafelbontása gyakoribb csúcsátlapolásokat eredményezett, mint a WDS-nél és ezért természetesen volt a törekvés olyan röntgendetektor kifejlesztésére, amely párhuzamosan detektál, ezért olyan gyors, mint az EDS, de energiafelbontása olyan jó, mint a WDS-é. Ez az, amit meg lehet valósítani a modern szupravezető detektorokkal!

Mielőtt ilyen nagyot ugranánk az időben, említsük meg a szilícium saját vezetésű tartományát hasznosító másik két detektortípust, a PIN diódát és a szilícium drift diódát (SDD). Ezek abban az értelemben képezik a fejlődés újabb lépcsőfokát, hogy sikerült olyan nagy tisztaságú saját vezetésű szilíciumréteget készíteni, hogy lítium-driftelésre már nem volt szükség, és a cseppfolyós nitrogénnel való hűtéstől meg lehetett szabadulni.

Si-PIN dióda detektorok

A Si-PIN diódák detektálási mechanizmusa lényegében megegyezik a Si(Li) detektorokéval. A beérkező sugárzás (α , β , γ vagy röntgensugárzás) töltéshordozó párokat hoz létre 3,6 eV átlagos gerjesztési energia révén. A PIN diódák saját vezetésű tartományában nincs lítium, hanem egy nagy ellenállású 8000–12000 Ωcm -es réteg képezi az i-típusú (szigetelő) részt. A tartomány teljes kiürülését 50 V-os záró irányú feszültséggel szokták elősegíteni. Cseppfolyós nitrogénnel való hűtésre nincs szükség, a Peltier-efektussal elért $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ elég. Bár a PIN diódák energiafel-



1. ábra. A szilícium drift dióda vázlat

bontása valamivel rosszabb, mint a Si(Li) detektoré, a hűtés egyszerűsége számos alkalmazásban előnyösebbé teszi azokat a Si(Li) detektoroknál.

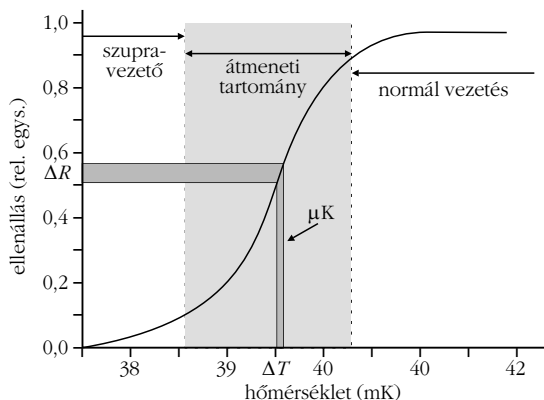
Szilícium drift dióda detektorok

A szilícium drift dióda sémáját az 1. ábra mutatja. Körkörös szerkezetével kedvező töltéshordozó begyűjtést érnek el. (A szilícium drift diódák XFlash védjeggyel ellátott termékek.) Energiafelbontásuk jobb, mint a PIN detektoroké, és a Si(Li) detektorokétól is kevésbé marad el. Versenyképességüket az biztosítja a Si(Li) detektorokkal szemben, hogy cseppfolyós nitrogénhűtésre nincs szükség, a Peltier-hűtő elégnek bizonyul.

Nagy előnye, hogy a téreffektus-tranzisztoros erősítő (JFET, Junction Field Effect Transistor) a detektor felületére lehet integrálni, ezáltal alacsony az anódkapacitás, ezért nagy a detektálási sebességük (10^6 imp/s nagyságrendű). A FET-nek az SDD-re való integrálása alacsony zajt is biztosít. Ha a fenti sémától eltérő módon nem középen, hanem aszimmetrikusan helyezik el az anódot, további javulást érnek el az energiafelbontásban. (133 eV 1000 imp/s bemeneti sebességnél.) Ezt a konstrukciót „szilícium drift droplet” detektoroknak nevezik és SD^3 -mal jelölik. Mind a PIN diódáknak, mind pedig a SDD-knek megvannak a Si(Li)-től eltérő speciális alkalmazási területeik, például a PIN diódák asztali röntgenfluoreszcens spektrométerekben, az SSD-k pedig kiválóan alkalmasak gyors térképezésre a pásztázó elektronmikroszkópban.

Szupravezetésen alapuló röntgendetektorok

A szupravezetésen alapuló röntgenspektrométerek kifejlesztését az a törekvés vezérelte, hogy legyenek gyorsak, mint a Si(Li) detektorral működő spektrométerek, de energiafelbontásuk legyen olyan jó, mint a hullámhosszdiszperzív spektrométereké. Az új típusú röntgendetektorok közül kettőt tárgyalunk itt részletesebben: az első a mikro-kaloriméter, a másik a szupravezető alagúteffektuson alapuló STJ spektrométer (STJ – superconducting tunnel junction).



2. ábra. A szupravezető hőmérő (TES) ellenállásának hőmérsékletfüggése, arany-íridium példáján

Mikro-kaloriméter detektor

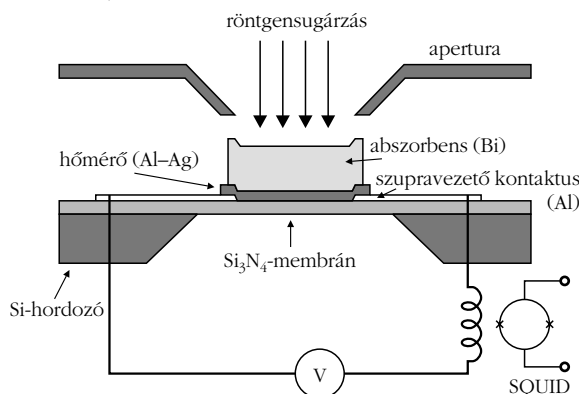
A mikro-kaloriméter (Transition Edge Sensor, TES) egy detektor abszorbensből és egy nagyon érzékeny hőmérőből áll. A beérkező (röntgen)sugárzás energiája hővé alakul át az abszorbensben, és a hőmérő méri ezt a hőmérséklet-változást. Szükség van egy olyan („yenge”) kapcsolatra a környezettel, amely biztosítja, hogy a hő kifelé ne távozzon el, és az abszorbensből és hőmérőből álló rendszer a lehető leggyorsabban visszatérjen alapállapotába, hogy képes legyen a következő röntgenkvantum detektálására.

1996-ben *K.D. Irwin* és munkatársai az amerikai National Institute for Standards and Technologyban kidolgoztak egy olyan nagy energiafelbontású röntgendetektort, amely mikro-kaloriméter elven működik.

A detektor legkritikusabb része az igen érzékeny hőmérő, amely a normál elektromos vezetés és szupravezetés közötti átmenet (transition edge) (2. ábra) kihasználásán alapszik. A szupravezető állapotból a normál állapotban való átmenet akkora ellenállás-változást okoz, hogy mikrokelvin hőmérséklet-változások mérését is lehetővé teszi. Ezért vonult be az irodalomba Transition Edge Sensor néven ez a mikro-kaloriméter.

A mérőelrendezést, illetve annak a sémáját a 3. ábra mutatja. A beérkező röntgensugarak energiájukat a (néhány mikrométer vastag) normál állapotú bizmut abszorbens rétegben adják le. A bizmutban bekövetkező hőmérő

3. ábra. Irwin és munkatársainak szupravezető röntgendetektora (mikro-kaloriméter)



séklet-növekedést érzékeli a szupravezető Al és normál vezetőségű Ag kettős rétegből álló hőmérő. Röntgenbesugárzás hatására a hőmérő áramkörében ellenállás-növekedés és impulzusszerű áramcsökkenés jelentkezik a szupravezető kvantuminterferencia-berendezés (SQUID – Superconducting Quantum Interference Device) bemenetén.

Az elrendezés előnye, hogy a normál vezetés és szupravezetés közötti átmenet nagyon meredekké tehető, ezáltal a hőmérő nagyon érzékenyvé válik. A detektor energiafelbontása 4,5 keV-en 14 eV. (Két másik berendezésben 1 keV-en 2,6 eV és 4 eV-nál 0,2 eV felbontást mértek.) Összehasonlításképpen a konvencionális félvezető EDS-ek energiája kedvező esetben 120 eV (5,9 keV-nél).

Kulcsfontosságú paraméterek az

- abszorbens hővezető-képessége és
- a hőmérő hőkapacitása.

Az abszorbens jó hővezető-képessége biztosítja, hogy a röntgenfoton elnyelése és energiájának termikus energiává való átalakítása után az abszorbens mielőbb visszatérhessen abba az alapállapotába, amelyhez viszonyítjuk a hőmérséklet-emelkedést. A jobb hővezetés miatt a fém abszorbensek segítségével elérhető időállandók kisebbek (1 μ s), mint a félvezető abszorbensekkel (1 ms). Az abszorbens vastagsága is hangolási paraméter: vékonyabb abszorbens rétegekkel jobb energiafelbontást lehet elérni, a vastagabb rétegek viszont szélesebb röntgenenergia-tartományban használhatók.

A hőmérő hőkapacitása abból a szempontból fontos, hogy minél kisebb röntgenkvantum-energiát, minél nagyobb hőmérséklet-változással lehessen átalakítani. Az E_x energiájú röntgenfoton Q_x hőmennyiséggé való átalakulásakor a ΔT hőmérséklet-változást a hőmérő C hőkapacitása határozza meg:

$$\Delta T = \frac{Q_x}{C} = \frac{Q_x}{c m}, \quad (1)$$

ahol c -vel a fajhőt, azaz az egységnyi tömegre vonatkoztatott hőkapacitást jelöljük.

Míg a különböző anyagok fajhője a szobahőmérséklet környezetében függetlennek tekinthető a hőmérséklettől, addig alacsony hőmérsékleten a fajhő T^3 -al arányosan csökken. A 0,1 K körüli hőmérsékleten működő mikro-kaloriméter szupravezető hőmérőjének hőkapacitása rendkívül kicsi, ezért a hőmérséklet-konverzió érzékenysége nagyon jó.

Irwin és munkatársai a bizmut abszorbenshez hőmérőként ezüst-alumínium kettősréteget használtak. E kettősrétegben a rétegek egymáshoz viszonyított relatív vastagságát változtatva olyan hőmérők voltak előállíthatók, amelyben a normál vezető – szupravezető átmenet nagyon meredek (100 μ K széles) és a kritikus hőmérséklet (amelynél szupravezető állapotba megy át) az 50–100 mK közti hőmérséklet-tartományba esett (jóllehet a szupravezető komponens a tiszta alumínium kritikus hőmérséklete 1 K körül van).

Az árammérő SQUID a Josephson-effektuson alapul: vékony szigetelővel elválasztott két szupravezető között alagúteffektus révén áram tud folyni a szigetelőn keresztül anélkül, hogy feszültséget alkalmaznának. Az alagút-

áram rendkívül érzékeny a külső mágneses tér megváltozására, és ezt a jelenséget használják fel a SQUID-ben mágneses térérő (illetve az ezt létrehozó elektromos áram) változásainak mérésére.

Höbne és munkatársai mikro-kaloriméterükben arany abszorbenst és irídium–arany kettősréteget használtak hőmérőként (lásd az 1. ábrát, ebben a kombinációban az irídium a szupravezető). Ők nem TES-nek, hanem SPT-nek (Superconducting Phase-Transition Thermometer) nevezték detektorukat, de lényegét tekintve mindkét rendszer a normál fémes vezetésből a szupravezető állapotba, illetve az onnan való „visszabillenést” használja ki.

Szupravezető alagút detektorok

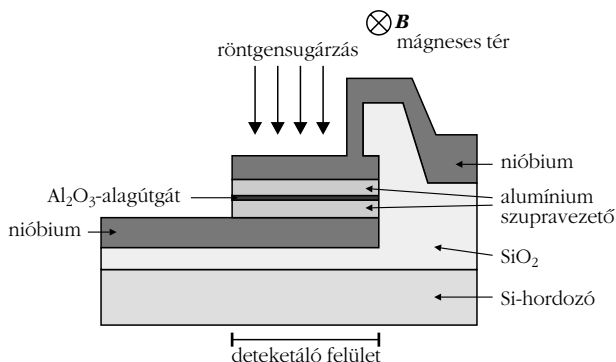
A szupravezető alagútátmenet (Superconducting Tunnel Junction, STJ) egy hordozóra párologtatott két (50–50 nm vastag) szupravezető alumíniumrétegből áll (3. ábra), amelyek között vékony (0,2 nm) szigetelő Al_2O_3 réteg van. A szóban forgó munkában nióbbium elektródokat alkalmaztak, és az elrendezést 500 mK hőmérsékletre hűtötték le. Maga a detektorfelület kicsi, $141 \times 141 \mu\text{m}^2$. Ha a szigetelő réteg elég vékony, akkor Cooper-párok tudnak áthaladni az egyik szupravezetőből a másikba kvantummechanikai alagúteffektus révén (Josephson-áram). A szigetelőre merőleges irányban kis előfeszítést ($\sim 0,4$ mV) és a szigetelővel párhuzamosan külső mágneses teret ($B \sim 100$ gauss) alkalmaznak, hogy a Josephson-áramot megszüntessék.

A detektor működési elve a következő: a mérendő röntgensugárzás energiája a Cooper-párokat kvázirészecskékre (két különálló elektronra) bontja szét, és ezek az elektronok alagúteffektus révén átjutnak a szigetelőn, és a körben áramot hoznak létre. A létrejött áram arányos a sugárzás energiájával.

A mikro-kaloriméterektől eltérően itt külső mágneses teret is kell alkalmazni. A detektáló rétegek vékonyak, a berendezés gyorsabb, mint a mikro-kaloriméterek: 10^4 impulzus/s sebességet is el lehetett érni. Az energiafelbontás viszont valamelyest gyengébb: 6–15 eV energiafelbontást értek el a 180–1100 eV energiatarományban.

A rétegek vékonyságával függ össze, hogy az 1 keV alatti energiatarományban, bór, szén, oxigén és fluor K-vonalainak és az átmeneti fémek L-vonalainak analízis-szor értéke el vele kimagasló eredményeket.

4. ábra. A szupravezető alagúteffektuson alapuló röntgendetektor (STJ) vázlatja



Egy másik munkában szintén szupravezető alagútátmenettel ($\text{Al} / \text{Al}_x\text{O}_y / \text{Al}$), de vastagabb Al rétegekkel (290 nm) 12 eV felbontást értek el a $\text{Mn K}\alpha$ vonal 5,9 keV-es vonalára vonatkoztatva.

Tekintettel arra, hogy a röntgendetektor felülete kicsi, üvegkapillárisokból álló lencsével (Kumakov-lencse) fókuszálják a röntgensugarakat a detektor felületére.

Energiafelbontás

Felmerül a kérdés, hogy mi teszi lehetővé azt, hogy a szupravezetővel működő röntgendetektorok energiafelbontó-képessége sokkal jobb, mint a hagyományos félvezető Si(Li) és Ge detektoroké.

A félvezető detektorokban a röntgenkvantumok energiája elektron–lyuk párok létesítésére fordítódik, amelyek számát úgy kapjuk meg, hogy a röntgenkvantum energiáját elosztjuk az egy elektron–lyuk pár létrehozásához szükséges átlagos energiával.

A szupravezető detektoroknál viszont olyan gerjesztési folyamat megy végbe (lásd alább), amelyhez szükséges energia sokkal kisebb, következésképpen a gerjesztések száma nagyságrendekkel nagyobb, mint a félvezető detektoroknál, természetesen ugyanazon energiájú röntgenfotonok detektálására vonatkoztatva.

A detektorok energiafelbontására (ΔE érvényes a következő összefüggés:

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (2)$$

ahol N a detektálási folyamat alapját képező gerjesztések száma.

A BCS-elmélet (*Bardeen, Cooper, Schrieffer*) szerint szupravezeték az elektronokból Cooper-párok alakulnak ki, melyek egymástól viszonylag nagy távolságra (μm) lévő, egymáshoz lazán kötött elektronpárokat jelentenek.

Hőközléssel, bizonyos aktivációs energiával a Cooper-párokat kvázirészecskékké (két elektronná) alakíthatjuk át. A BCS-elmélet megjósolta azt a minimális energiát (Δ), amellyel a T_c kritikus hőmérsékletű rendelkező szupravezetőre ez a bontás véghez vihető:

$$\Delta = 1,76 k T_c, \quad (3)$$

ahol a k Boltzman-állandó értéke $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

Figyelembe véve, hogy $1 \text{ eV} = 1,9 \times 10^{-19}$ J, akkor a Δ -ra (vagy más néven sávparaméterre) 10^{-3} – 10^{-5} eV körüli értékeket kapunk.

Mint ahogy a konvencionális félvezető detektoroknál eV, a szupravezető detektoroknál meV nagyságrendű gerjesztési energiát kell befektetnünk, ezért a (2) képlet szerint elméletileg $\sqrt{1000}$ -szer, azaz körülbelül 30-szor jobb energiafelbontást érhetünk el egy adott besugárzó energiára vonatkozóan szupravezető detektorral, mint hagyományos félvezető detektorral.

A valóságban a konvencionális EDS 120 eV felbontó-képességet ér el a $\text{Mn K}\alpha$ 5,9 keV-es vonalára vonatkozóan, míg a szupravezető detektor felbontása ugyanerre az energiára vonatkoztatva jobb, mint 6 eV.

1. táblázat		
Energiadisziperzív röntgendetektlások energiafelbontásai és elérhető impulzussebességei		
	energiafelbontás (eV)	maximális impulzussebesség (imp/s)
Si(Li)	120–140	10^5
mikro-kaloriméter	3–7	$5 \times 10^2 - 10^3$
alagútátmenet	4–15	10^4

Az 1. táblázat összehasonlítja az eddig ismertett háromféle energiadiszperzív röntgendetektlás energiafelbontását és az elérhető impulzussebességeket. A táblázat szerint a mikro-kaloriméter energiafelbontása valamelyest jobb, mint a szupravezető alagútátmeneté, viszont az alagútátmenet révén több mint egy nagyságrenddel nagyobb impulzussebességet lehet elérni.

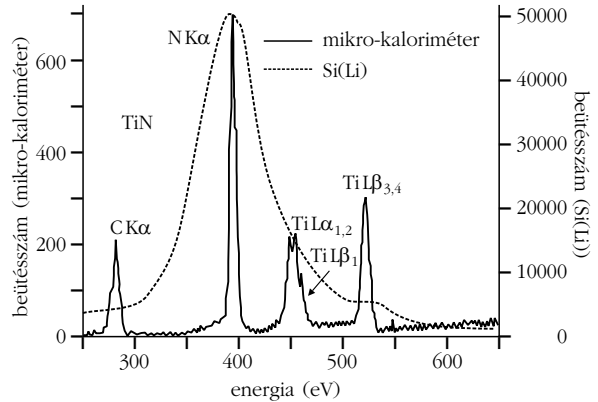
Az alacsony hőmérséklet előállítása

A cseppfolyós nitrogén és hélium alkalmazásának szükségessége megnehezítené az ilyen detektorok elterjedését, ezért a CPS nevű német cég olyan detektort fejlesztett ki, amelyben a 4 K hőmérsékletet cseppfolyós hűtőközeg nélkül, tisztán mechanikai úton való hűtéssel érik el. A hűtés utolsó lépéseként a 0,1 K felé ekkor is az adiabatikus demagnetizáció marad. A 0,1 K-en működő detektorok hűtőtartálya hasonló méretű, mint a korábbi, konvencionális félvezető energiadiszperzív röntgendetektoroké, és a pásztázó elektronmikroszkópra ugyanúgy felszerelhető. A hűtő egy kompresszorból és egy rotációs szelepből áll, amely a detektortól távolabb van elhelyezve és rugalmas cső köti össze a hűtő másik részével, amely a detektort is tartalmazza. A rugalmas csőre azért van szükség, hogy a hűtő mechanikai részének rezgéseit ne vigyék át a detektorra és az ahhoz csatolt elektronmikroszkópra. A 0,1 K hőmérséklet elérése adiabatikus demagnetizációval 60–80 percet vesz igénybe, és akkor ez az állapot akár 8–30 órán át is fenntartható, attól függően, hogy mekkora a rendszer hőterhelése és egy vagy két paramágneses sötét használnak a hűtőben. A demagnetizációs hűtést az említett 8–30 óra eltelté után meg kell ismétlni. Az irodalomban leírt hűtőberendezés 30 mK-nél alacsonyabb hőmérsékletet is képes előállítani.

Alkalmazások

A konvencionális Si(Li) detektorban a TiL vonalai átlapolnak a NK α vonalával. A mikro-kaloriméterrel nagyon sokat javul a helyzet, mint azt az 5. ábra mutatja.

A szupravezetően alapuló röntgendetektorok (kriodetektor néven is szokás említeni) előnye a konvencionális félvezető detektorokéhoz képest a könnyű elemek tartományában mutatkozik meg leginkább. A kis energiájú sugárzások tartományában a csúcsok megsokasodnak: a könnyű elemek K vonalai átlapolnak a közepes rendszámú elemek L vonalaival. A jó energiafelbontásra itt nagyobb szükség van, mint a nagyobb energiájú tartományokban.



5. ábra. TiN röntgenspektruma kétféle energiadiszperzív röntgendetektorttal: konvencionális Si(Li) detektor és szupravezető mikro-kaloriméter

Fontos alkalmazási terület a nagy laterális felbontású analízis, különösen a félvezetőiparban, ahol az integrált áramkörök vonalszélessége 0,1 μm alatt van (45 nm 2006 elején). Az elektronsugaras mikroanalízis laterális felbontóképességét úgy is javíthatjuk, hogy például K vonal helyett L vonalat analizálunk, mert az utóbbi kisebb gyorsítófeszültség alkalmazását engedi meg.

Hasonlóan fontos az úgynevezett kémiai eltolódás mérése. A röntgenanalízis általában eleminformációt és nem vegyületinformációt ad. Kivétel a könnyű elemek tartománya, ahol a spektrumok alakja, a csúcsok torzulása fontos információt tartalmaz a kémiai kötésiállapotról. Ezt a tulajdonságot eddig is kihasználták, de csak a hullámhosszdisperzív spektrométer volt elég jó ilyen célokra. A kriodetektorok ezen a területen is nagy jelentőségre tehetnek azért a nagy energiafelbontásuk révén.

A kiváló energiafelbontás miatt a kriodetektorok számos egyéb területen nagyon ígéretesek, mint például a sötét anyag kutatása, neutrínófizika, röntgencsillagászat [1], szinkrotronsugárzás stb.

Összefoglalás

A proporcionális számlálókat követő félvezető alapú röntgendetektorok (Si(Li) és Ge) szimultán detektálásuk és az ebből következő gyorsaságuk révén kerültek kedvező pozícióba. A PIN diódák és a szilícium drift diódák a cseppfolyós nitrogén, mint hűtőközeg nélkülözhetőségét és nagy detektálási sebességet hoztak magukkal előnyként, energiafelbontásban közel állnak a Si(Li) detektorokhoz.

A szupravezetően alapuló kriodetektorok két fajtája a mikro-kaloriméter típusú és a szupravezető alagúteffektuson alapuló STJ csillantják fel a reményt a teljesen új megoldás irányába, ahol nagy energiafelbontást és szimultán detektálást egyidejűleg lehet elérni. Ezek a detektorok a szokásos röntgenanalitikai alkalmazásokon túlmenően várhatóan az elemi részecskék fizikájában és a röntgencsillagászatban is fontos mérőeszközök lesznek hamarosan.

Irodalom

1. X-ray Astrophysics, http://wisp11.physics.wisc.edu/xray/xr_microcalorimeters.htm

Két évtizeddel a csernobili baleset után talán nem túlzás azt állítani, hogy mára mindent tudunk, amit tudni lehet a baleset okaival, lefolyásával és következményeivel kapcsolatban. A tudomány nem várja, hogy jelentősen új ismeretek merülnek fel a jövőben. A baleset huszadik évfordulója sok szakembert és szakmai szervezetet sarkallt arra, hogy összegezzék ismereteiket. Ennek szellemében 2005 szeptemberében a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség és szakosított szervezetei nemzetközi Csernobil-konferenciát rendeztek Bécsben, ahol publikálták az elmúlt húsz év műszaki, sugárvédelmi, orvosi és biológiai kutatásainak eredményeit [1, 2]. 2005 májusában egy magyar tudományos expedíció végzett méréseket a csernobili lezárt zónában [3], és 2005 végén magyar nyelven egy könyv is megjelent, ami az expedíció tapasztalatai mellett igyekszik összegezni mindazt, amit ma tudni érdemes Csernobilról [4]. Jelen cikk a rendelkezésre álló friss publikációk alapján rövid összefoglalót ad a baleset okairól, következményeiről és a csernobili lezárt zónában ma tapasztalható helyzetről.

A csernobili 4. reaktor balesete

Csernobilban 1986. április 26-án a 4. blokkon egy rosszul megtervezett és még több hibával végrehajtott üzemviteli kísérlet során az öngerjesztő tulajdonságokkal bíró reaktort olyan üzemállapotba manőverezték, melyben a – reaktor felépítéséből adódó – pozitív visszacsatolások felerősödtek. A blokk operátorai több fontos védelmi rendszert kikapcsoltak, és az írott üzemviteli utasításokat, biztonsági előírásokat is többszörösen megsértették. Ennek és a reaktor konstrukciós hibáiból adódó kedvezőtlen fizikai tulajdonságok következményeként 1986. április 26., szombat hajnali 1 óra 23 perckor a reaktor megszaladt, vagyis abban a láncreakció ellenőrizhetetlené, szabályozhatatlanná vált, és néhány másodperc alatt a reaktorban megtermelt hőteljesítmény a névleges 7%-áról a névleges 10000%-ára (százszorosára) ugrott fel.

A nagy teljesítményugrás következtében létrejött gőzrobbanás felhasította a hűtőcsatornák csöveinek falát, és forró víz áramolhatott a grafit moderátorra. Ez robbanóképes gázok keletkezéséhez vezetett, ami két másodperccel a gőzrobbanás után egy újabb robbanást okozott. A két robbanás erejét jól jellemzi, hogy a reaktor hűtőcsatornái fölött elhelyezkedő hatalmas, 3000 tonna súlyú reaktorfedél körülbelül 50 méter magasra repült, a reaktorcsarnok tetejébe ütközött – kiszakítva a tetőszerkezetet –, majd oldalára fordulva visszazuhant a reaktorba (a szarkofággal kapcsolatban lásd még később az erről szóló fejezetet és a 3. ábrát).

A csernobili atomerőműben alkalmazott RBMK reaktortípus felépítését és működését tekintve alapvetően különbözik a Pakson vagy Nyugat-Európában alkalmazott nyomottvízes reaktortípustól. A csernobili típus meghatározó eleme az a hatalmas méretű, mintegy 800 köbméteres grafitömb, amelyben csatornákon belül fémcsö-

vekben helyezkednek el az üzemanyag-kazetták. A reaktor hűtővíze ezekben a fémcsövekben áramlik, és a kétszer 3,5 m (összesen 7 m) hosszú üzemanyag-kazetták is a hűtőcsöveken belül foglalnak helyet. A grafit (neutronlassító) és a hűtővíz együttes jelenléte a csernobili reaktorban több hátránnyal is jár:

1. A reaktor bizonyos üzemállapotokban nem stabil, abban a pozitív reaktorfizikai visszacsatolások miatt öngerjesztő folyamatok indulhatnak be. Ez a tulajdonsága vezetett az 1986-os balesetben az első robbanáshoz, a gőzrobbanáshoz, és a reaktor ezen fizikai tulajdonsága (vagyis a hibás konstrukció) a baleset alapvető oka.

2. A nagyméretű grafitömböt nem vették körül nagy nyomásra méretezett reaktortartállyal, és a reaktor köré nem építettek megfelelően méretezett hermetikus védőépületet sem, így a robbanás hatására a reaktor üzemanyagából kikerülő radioaktivitás közvetlenül a környezetbe jutott.

3. A grafit és a víz együttes jelenléte további veszéllyel jár: ha a hűtőcsatornák sérülése miatt víz áramlik a forró grafitra, az úgynevezett városigáz-reakció játszódik le, amelyben hidrogén és szén-monoxid keletkezik. Ez a levegő oxigénjével robbanógázt képez, ami Csernobilban a második robbanást okozta.

4. A grafit a robbanások hatására meggyulladt, ami tíz napig magas hőmérsékletű grafitűzshöz vezetett, és jelentősen növelte a környezetbe kikerülő radioaktivitás mennyiségét.

A nyomottvízes reaktorokra nem jellemzőek a fenti hátrányos tulajdonságok: a nyomottvízes reaktorokban nincs grafit, alapkövetelmény, hogy abban öngerjesztő folyamatok ne tudjanak kialakulni (a negatív visszacsatolás alapvető tervezési követelmény, ami belső biztonságot ad a nyomottvízes reaktoroknak). Ha nincs grafit, nyilvánvalóan grafitűz sem tud kiütni. Ezen túl a nyomottvízes reaktoroknál a hasadóanyagot tartalmazó aktív zónát egy nagy nyomásra méretezett reaktortartály veszi körül, és a blokkok primer körét megfelelően méretezett hermetikus védőépületben helyezik el. Így tulajdonképpen két mérnöki géppel több van a nyomottvízes reaktorokban, emiatt környezetük sokkal nagyobb biztonságban van, mint a csernobili típusú blokk esetében.

A csernobili baleset környezeti hatásai

A robbanások és az azokat követő grafitűz a reaktor üzemanyagának körülbelül 3,5–4%-át szórta szét a környezetben. Kikerült a környezetbe a nemesgázok 100%-a, az illékony izotópok (jóde, tellúr, cézium) körülbelül 20%-a és a kevésbé mozgékony izotópok (stroncium, cirkónium) 3,5%-a. A nagy radioaktív kibocsátáshoz az is jelentős mértékben hozzájárult, hogy a hűtés nélkül maradt nukleáris üzemanyag megolvadt, így az urán-dioxid keramikuss üzemanyag-mátrix nem tudta magában tartani a radioizotópokat. A megrongálódott reaktorépü-

letből a tűz és a hasadási termékek bomláshőjének hatására felmelegedett levegő nagy magasságba emelte a kiszabadult radioaktivitást.

A kibocsátást a tűzoltók és az úgynevezett likvidátorok áldozatos munkájával körülbelül egy hónap alatt tudták megszüntetni. Az oltási munkálatokban, a szarkofág építésében, az erőmű és a környezete megtisztításában összesen mintegy 800 000 ember vett részt.

A környezet szennyeződése szeszélyes tér- és időbeli eloszlást mutatott a meteorológiai viszonyok, azon belül is elsősorban a csapadékviszonyok által meghatározott kihullás következtében. A legszennyezettebb területek az erőmű közvetlen környezetében, valamint Oroszország, Fehéroroszország és Ukrajna egyes régióiban találhatók. Jelentős mértékben több mint 30 000 négyzetkilométer terület szennyeződött radioaktív izotópokkal. Ebből körülbelül 4000 négyzetkilométer tartozik az erőmű körüli ellenőrzött területhez (ez ma lezárt zóna, ahol a szennyeződés a legnagyobb volt). A lezárt zóna területéről 116 000 embert kellett kitelepíteni, a három érintett állam jelentős mértékben szennyezett területeiről kitelepített lakosok száma összesen körülbelül 350 000 fő.

Az erőmű közvetlen közelében a legszennyezettebb területeken extrém nagy szennyeződés, ennek következtében pedig extrém nagy dózisintenzitások jöttek létre. Ezek a területeken az első időszakban a növények és állatok dózisterhelésének 90%-át béta-sugárzás, 10%-át pedig gamma-sugárzás adta.

A kihullott radionuklidok sugárzása következtében a baleset évében az élővilágban az akut sugárártalom különböző jeleit lehetett tapasztalni az erőmű néhány tíz kilométeres körzetében, a 0,3 Gy feletti dózist elsenvedett növények és állatok között. A csernobili balesetre adott környezeti válasz nagyban függött az elsenvedett sugárdózistól, a dózis intenzitásától, valamint az adott élőlények sugárérzékenységétől. Az akut tünetek között a túlevelűek, gerinctelen és emlősállatok elpusztulása, a reprodukciós képesség romlása és krónikus sugárbetegségi tünetek fordultak elő. Néhány év elteltével az érintett élővilág regenerálódott.

A sugárterhelés az erőműhöz közeli, attól 1,5–2 km-re nyugatra elterülő fenyőerdőben érezte leginkább hatását. Az erdőt alkotó, több mint 80 Gy dózist elsenvedett erdei fenyő (*Pinus silvestris*) populáció a balesetet követő 2–3 héten belül mutatta a sugársérülés tüneteit: a tűlevelek elsárgultak és elpusztultak. 1986 nyarán a fák sérülésének területe az erőműtől 5 km-re északnyugatra terjedt ki [2]. Az elpusztult faállomány színe alapján ezt az erdőterületet ma Vörös-erdőnek nevezik.

1987-ben már láthatóvá vált a túlélő faállomány regenerálódása. Az elpusztult erdő helyén az elvégzett talajjavító intézkedéseknek köszönhetően új fák hajtottak ki. A Vörös-erdőben a növekvő fák esetében a normálistól eltérő fejlődést lehetett megfigyelni: ilyenek például a törzs szokatlan elágazásai, a virágzat duplázódása, hajtáspamacsok kialakulása, a levelek és virágok szokatlan színe és mérete [2]. Hangsúlyozni kell, hogy ezek a genetikai eredetű elváltozások csak az erőmű közvetlen közelében, a legextrémebb szennyezést elsenvedett szűk területen voltak megfigyelhetőek.

Noha a legtöbb haszonállatot a balesetet követően evakuálták, néhány száz szarvasmarha a legszennyezettebb területen maradt 2–4 hónapig. Ezen állatok egy része 1986 őszére elpusztult, és a túlélők között is immunrendszeri károsodások, alacsony testhőmérséklet, valamint szív- és érrendszeri károsodások voltak tapasztalhatók [2]. Az állatok között 1989-ig kimutatható volt a pajzsmirigy csökkent működése, ami 180 Gy-nél magasabb pajzsmirigydózist elsenvedett állatoknál a megfigyelt szaporodási problémák oka lehetett. A nagy sugárterhelésnek kitett szarvasmarhák utódai közt csökkent súlyt, illetve csökkent súlygyarapodást, és a törpenövés jeleit lehetett felfedezni. A szarvasmarhák reprodukciója 1989 tavaszára visszatért a normális kerékvágásba.

Számos sajtóhír számolt be a 0,05 Gy/év alatti dózisintenzitásnak kitett szarvasmarhák és disznók között gyakran előforduló születési rendellenességről, ezt azonban a tudományos bizonyítékok, és a haszonállat-populációk vizsgálata nem támasztják alá. Nagy publicitást kapott egy, a szennyezett területen született hatlábú borjú fényképe. A borjú valójában 1986 júniusában született, így a sugárzásnak tulajdonított fejlődési rendellenességnek már a balesetet megelőzően ki kellett alakulnia az anyaállat méhében, így ez az eset nem hozható összefüggésbe a csernobili baleset radioaktív kibocsátásával [2].

A növény és állatvilág mára kiheverte a baleset utáni nagy dózisok hatását, és ma talán még jobb helyzetben is van, mint a környező területeken, mivel a zóna gyakorlatilag lakatlan és az emberi tevékenység nem háborgatja az élővilágot.

A lezárt zónában elszaporodtak a nagyvadak is, nyomukban pedig megjelentek a farkasok. Ugyanakkor szembeűnő a zavarásra különösen érzékeny sasok visszatelepülése a lezárt zónába. A baleset idején Ukrajnában csupán 40–50 pár rétisas fészkel, ami a hatalmas területhez képest nagyon kevés. Csernobil környékén nagyon ritka volt ez a faj, ma pedig több új család is megjelent a lezárt zónában. Ennek az az oka, hogy a rétisas nagyon korán kezd költeni, amikor még hideg az idő. Ha megközelítik a fészket, hamar hátrahagyja a tojásokat, amelyek a hideg idő miatt gyorsan kihűlnek és életképtelenné válnak. A lezárt zónában zavartalanul költhetnek, így jobban szaporodnak. Leginkább ők örülnek annak, hogy az ember nagy területekről eltűnt. Számukra kedvező változás az is, hogy a Csernobil környéki tavak és a mocsaras területek bővelkednek halakban, mivel halászni, horgászni a lezárt zónában nem szabad.

A baleset egészségügyi hatásai

Likvidátorok

A baleset közvetlen következtében 3 ember vesztette életét (két embert a robbanás ölt meg, míg a harmadikkal szívroham végzett), a baleset utáni 3 hónap során további 28 ember vesztette életét akut sugárbetegség következtében. A tűz oltásán és a baleset elhárításán dolgozók közül a közvetlen áldozatok száma a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség adatai szerint – beleszámítva a nagy dózissal visszavezethető betegségben azóta elhunyt likvi-

dátorokat is – nem haladja meg az 50-et. A közvetett áldozatok száma ennél természetesen (és sajnálatosan) jóval magasabb.

Az erőmű kezdeti megtisztításában mintegy 200 000 ember vett részt, 1990-ig azonban mintegy 800 000 ember – ők a likvidátorok – vett részt az elhárítási, dekontaminálási munkálatokban. A likvidátorok átlagdózisa 100 mSv (millisievert) körüli érték. Néhány százalékuk dózisa az 500 mSv-et is meghaladta, néhány tucat likvidátor pedig több sievertnyi dózist is elszenvedett [4]. Az átlagdózisok alapján elvégzett becslések szerint a likvidátorok között mintegy 2200 többlet rákos megbetegedés miatti halálest várható, amelyek közül körülbelül 200 leukémiás megbetegedés lesz. Az orosz adatok szerint a legmagasabb dózist kapott likvidátorok között 1992–1995 között megduplázódott a leukémia gyakorisága (az össz-esetszám azonban alacsony, néhány tíz megbetegedés évente).

A likvidátoroknak jelenleg körülbelül egyharmada rokkant, az okok között idegrendszeri, vérkeringési és mentális problémák találhatók. A nagy gyakoriság a vizsgálatok szerint nincs összefüggésben a kapott dózissal, a mentális leépülés azonban kapcsolatba hozható a „csernobili rokkanttá” nyilvánítással. A likvidátorok között az átlagnál gyakoribb az öngyilkosságok száma is.

Lakosság a volt Szovjetunió területén

A hosszú távú egészségügyi hatások közül a volt Szovjetunió területén a számottevő többletdózist elszenvedett gyermekek körében mutatható ki szignifikánsan a baleset hatása: 4000 gyermeknél diagnosztizáltak pajzsmirigyrákot. A korai diagnózis, valamint a pajzsmirigydaganat 99% fölötti arányú gyógyíthatóságának köszönhetően közülük 9-en veszítették életüket.

A 200 000 legerheltebb likvidátor, a legszennyezettebb területekről kitelepített 116 000 ember, valamint a mai is számottevő szennyezett területen élő körülbelül 300 000 ember között mindösszesen körülbelül 4000 többlet rákos halálest várható a baleset miatti sugárdózis következtében. (Az előbb említett mintegy 600 000 ember 25%-a – vagyis 150 000 ember – Csernobil nélkül is daganatos megbetegedés miatt veszíti el életét, hiszen Ukrajnában és Magyarországon is ekkora a rák miatti elhalálozás gyakorisága.)

Az erőmű körüli lezárt zónába körülbelül 400, zömmel idős személy önkényesen visszaköltözött. Az ő éves dózisuk a természetes háttérből eredő dózis két-háromszoros lehet azon szennyezettélmérések alapján, amit a magyar tudományos expedíció (lásd a következő fejezetet) a zónában mért.

A nemzetközi elemzések [1] szerint a likvidátorok egy szűk köre és a lakosság egy kis csoportja kivételével a csernobili baleset egy alacsony többletdózist okozó esemény volt, a baleset miatti, sugárdózissal összefüggésbe hozható halálesetek száma a balesetet követő 70 évben a fent említett 4000 fő körül van. A baleset által okozott stressznek, a sugárzástól való félelemnek, a kitelepítés lelki hatásának, az édesanyák születési rendellenességektől való félelmének nagyobb hatása, és valószínűleg több áldozata volt (és van), mint magának a sugárzásnak. A

nemzetközi közösség a 2005. szeptemberi bécsi Nemzetközi Csernobil Konferencián azt javasolta az érintett három ország kormányának, hogy segíelyek, „csernobili rokkantnyugdíj” kifizetése helyett a gazdaság fejlesztésére, a normális, megszokott élethez szükséges munkahelyek megteremtésére, a gazdaság fejlesztésére fordítsák a központi forrásokat, mert ennek több hasznos hatása lenne az emberek életére, mint a kis többletdózis elleni védekezésnek vagy a szociális segíelyezésnek [1]. Az elmúlt 20 évben bebizonyosodott: az emberek nem akarnak elköltözni a közepesen vagy gyengén érintett területekről, az életkörülményeik, egészségügyi állapotuk pedig elsősorban nem az elviselhető mértékű szennyezettségtől, hanem szociális és gazdasági helyzetüktől, munkahelyük lététől és az egészségügyi rendszer megfelelő színvonalától fog függeni.

Magyar lakosság

A magyar lakosság csernobili eredetű többletdózisa tekintetében nincs szükség a már ismert adatok korrekciójára. Magyarország szennyezettsége az európai átlag alatti, a lakosok átlagos többletdózisa pedig 1 mSv alatt van a balesetet követő 70 évre vonatkozóan, melyből a dózis körülbelül felét a lakosság a balesetet követő első évben szenvedte el. Ennek az éves természetes háttér (2,5 mSv/év) töredékét kitevő dózissal nem lehet, és nincs is kimutatható egészségügyi hatása a magyar lakosság körében.

Magyar tudományos expedíció Csernobilban

A Magyar Nukleáris Társaság, és annak fiatal szakcsoportja, a FINE szervezésében 2005. május 28. és június 4. között tudományos expedíció járt Csernobilban. Az útnak több célja is volt:

Saját, közvetlen tapasztalatokat akartunk szerezni a csernobili atomerőmű és környezete jelenlegi állapotával, valamint a környezet szennyezettségével és a dózisviszonyokkal kapcsolatban. Információkat akartunk gyűjteni a 2000-ben végleg leállított erőmű és a 4. blokk köré épített szarkofág állapotáról. A különleges helyszín rendkívül jó lehetőséget teremtett arra, hogy fiatal nukleáris szakembereket tovább képezzünk a terepi mérések szennyezett helyszínen történő végrehajtásával kapcsolatban. Az előbb említetteken túl hiteles méréseket, fénykép- és videoanyagokat akartunk készíteni a kinti helyzetről, a vizsgálatainkról és a terepi mérések megvalósításáról. Az expedíció tagjai között voltak hivatásos fotósok és egy televíziós stáb is, így nagyon gazdag fénykép- és videoanyag áll rendelkezésünkre az útról: hatezer darab jó minőségű fénykép és közel 12 órányi filmanyag készült.

A hatékonyabb munka érdekében a résztvevőket csoportokra osztottuk: külön csoport foglalkozott a résztvevők személyi dozimetriájával, a terepi mintagyűjtéssel, az ökológiai hatás felmérésével, a környezeti dózisteljesítmény mérésével, helyszíni gamma-spektrometriai mérésekkel, a szarkofág és az erőmű állapotának értékelésével, valamint a munka jegyzőkönyvi, fényképes és filmes dokumentálásával. A következő kollégák irányították a csoportokat: *Apáthy István* (termolumineszcens dozimet-



1. ábra. Csapatmunka az akkreditált terepi mérőhelyen (fotó: Dombó Szabolcs)

ria), *Vajda Nóra* (terepi mintagyűjtés), *Tarján Sándor* (ökológiai hatásfelmérés), *Sági László* (személyi dozimetria), *Zombori Péter* (helyszíni gamma-spektrometria és számítógépre archivált folyamatos dózisteljesítmény-mérés), *Hadnagy Lajos* (épített környezet állapotfelmérés), *Aszódi Attila* (dokumentálás és az expedíció vezetése).

Sugárvédelmi ellenőrzés, dózisviszonyok

Az út előkészítése és lebonyolítása során végig szem előtt tartottuk, hogy a résztvevők külső és belső dózisterhelését pontosan ellenőrizni lehessen. Ennek érdekében az út előtt és után minden résztvevő egészségteszt-számláláson esett át (az esetleges belső terhelés ellenőrzésére). A külső dozimetriai viszonyok folyamatos követésére nagyszámú műszer állt az expedíció tagjainak rendelkezésére. A mérések alapján megállapítható, hogy a lezárt zónában eltöltött napok során az expedíció tagjait összesen körülbelül akkora többletdózis érte, mint amekkora egy 10 órás repülőút vagy egy mellkasi röntgenátvilágítás szokásos dózisa (az átlagos többletdózis 20 mikroSv volt).

A környezeti dózisintenzitás a különböző területek szennyezettségének függvényében természetesen jelentős eltéréseket mutatott az erőmű környékén. Csernobil városban – ami körülbelül 20 km-re délre található az erőműtől, és kisebb mértékű szennyeződés érte a baleset után – a dózisteljesítmény ugyanakkora volt (100 nanoSv/h), mint Budapesten az elinduláskor. A reaktorbaleset hatása az

2. ábra. Munka a Vörös-erdő peremén (fotó: Dombó Szabolcs)



erőmű 30 km-es környezetében jól mérhető, de a legtöbb helyen csak olyan mértékű, amely mellett a területen – sugárvédelmi ellenőrzéssel – nyugodtan lehet dolgozni. Magában az atomerőműben magasabb volt a dózisintenzitás, mint amekkorát a magyar nukleáris létesítményekben megszoktunk, de azokon a helyeken, ahol mi jártunk, nem lépte túl a megengedett értékeket.

Nagyon részletes mérési programot sikerült végrehajtani egy akkreditált terepi mérőhelyen (1. ábra), ahol a baleset után nem cserélték le a talajt és a lezárt zónára jellemző átlagos szennyezettség tapasztalható. Itt jól kimutatható volt, hogy mára a külső dózisterhelés praktikusán 100%-a a cézium-137 izotóptól származik, annak ellenére, hogy mellette további radioizotópok (elsősorban Co-60, Cs-134, Eu-154, Am-241) is jól mérhetőek. Ezen a terepi mérőhelyen 387 kBq/m² Cs-137 felületi szennyezettséget mértünk, ami jó egyezésben volt az ukrán szakemberek által bizonylatolt 10,5 Ci/km² (ami 388,5 kBq/m²-nek felel meg) adattal. Ennek a felületi szennyezettségnek a dózisteljesítmény-járuléka 390 nanoSv/h. A természetes háttérsugárzással (60–110 nanoSv/h) együtt 450–500 nanoSv/h számítható, ami jól egyezett a hitelesített műszerekkel mért dózisteljesítménnyel.

A sugárzási viszonyok szempontjából kétségtelenül az úgynevezett Vörös-erdő és Pripjaty városa volt a legérdekesebb. Az 1986-os robbanásból a legnagyobb szennyeződés a közeli Vörös-erdőt érte (ez 2–4 km-re, nyugatra található a 4. bloktól, ebbe az irányba haladt a baleset utáni első fő kibocsátás csóvája). Ott a baleset után 1986-ban több Gy/h dózisintenzitás volt mérhető, így akkoriban egy-két órányi erdei séta elég lett volna a halálos dózishoz. A helyreállítási munkák során ezen a területen friss, tiszta talajt hordtak a szennyezett fölé, a kipusztult növényzet helyén pedig mára minden visszaállt a régi kerékvágásba. Ezt az is mutatja, hogy a növényzet ép, minden él és virul, és az állatok – tekintve, hogy kevés ember jár arra – zavartalanabb életet élnek, mint más, ember által intenzíven használt területen.

Ezen a területen csak a sugárveszélyt jelző táblák és a műszerek mutatják, hogy magasabb a dózisintenzitás, mint a máshol megszokott, egyéb jelek erre nem utalnak. Ezen a területen védőruhában dolgoztunk (2. ábra), hogy elkerüljük a ruházatunk vagy a testfelületünk esetleges szennyeződését. Sok értékes mintát sikerült gyűjtenünk, és itt mértük a legmagasabb dózisteljesítményt is: 50 mikroSv/h (50 000 nanoSv/h) értéket. Ez az itthon megszokott háttérsugárzás intenzitásának az 500-szorosa. Munkavégzés céljából egy ilyen szennyezettségű helyen – természetesen a megfelelő sugárvédelmi rendszabályok betartásával – lehet tartózkodni, de ezeken a területeken a lezárás fenntartása hosszú távon is indokolt.

A terepen gyűjtött minták közül a következőket érdemes kiemelni: a legnagyobb aktivitáskoncentráció egy Pripjaty városban gyűjtött mohamintában volt mérhető: 2,5 MBq/kg cézium-137 és 150 kBq/kg amerícium-241. A Vörös-erdőnél gyűjtött egyik fűmintában 640 kBq/kg, míg a szintén ezen a helyszínen talált szarvasürülékben 115 kBq/kg cézium-137 aktivitáskoncentrációt mértünk. A talajminták elemzése szerint azokon a területeken, ahol nem mozgatták meg, nem forgatták át a talajt, a szennye-

ződés az eltelt 20 év ellenére nem jutott 8–10 cm-nél mélyebbre. A dozimetriai szempontból meghatározó cézium-137 jól kötődik a talajhoz.

A szarkofág

Az utóbbi időben mind a sajtóban, mind pedig szakmai körökben sokat lehet hallani a 4. blokk fölé felépített szarkofág állapotával kapcsolatos problémákról. Tudnunk kell, hogy 1986-ban a baleset során nagyon rossz körülmények között igen gyorsan kellett felépíteni a szarkofágot, és nem volt, nem lehetett cél egy hermetikus védőépület elkészítése. Szakmai körökben köztudott, hogy az évszázok során jelentkező nagy hőmérséklet-változások okozta hőtágulás elviselése érdekében a szarkofág tetején és oldalfalain mindig is voltak rések. Ezen kívül a belső és külső hatások (hőmérséklet-változás, sugárzás) következtében a beton állapota is romlott a szarkofág közel két évtizedes fennállása alatt.

A nemrégiben elvégzett biztonsági elemzések azt mutatják, hogy egy nagyobb földrengés vagy külső behatás következtében a szarkofág fala esetleg megsérülhetne, vagy a szarkofágon belül egyes betonelemek elmozdulhatnának. (A 3. ábrán, a szarkofág makettjét mutató fotón jól látszik, hogy a balesetben a reaktorépület fő falai is jelentősen sérültek, amit a nagy dózisteljesítmény és az idő szorítása miatt 1986-ban nem lehetett kijavítani.) A szarkofágon belüli falak esetleges leomlása esetén egyetlen veszélyforrással kellene számolni: az épületen belüli, radioaktivitást tartalmazó nehéz porok felkeveredhetnének és kijuthatnának a szabadba. Ezt megakadályozandó az ukrán szakértők 2004-ben egy speciális befecskendező-rendszeren keresztül műanyagoldatot szórtak a szarkofágon belülré, hogy a port megkössék.

A biztonsági elemzések szerint az épület sérülése esetén a bent lévő porok nem juthatnának az erőmű körüli 30 km-es zónán túl, így ez Magyarországot nem veszélyeztetné. Érdemes megjegyezni, hogy az 1986-os csernobili baleset idején a balesetet szenvedett 4. reaktor működött, így az üzemanyagában nagy mennyiségben voltak rövid élettartamú, illékony radioaktív izotópok. A balesetet követően nagyon magas hőmérséklet – helyenként közel 6000 °C – alakult ki a sérült reaktorban, és több napig égett a reaktorban lévő grafit is, melynek hatására a kiszabadult aktivitás nagy légköri magasságokba jutott fel. Így volt lehetséges, hogy a szennyezés egy része Európa távolabbi helyeire is elkerült. Ma, húsz évvel a baleset után a 4. reaktorban uralkodó hőmérséklet gyakorlatilag azonos a környezeti hőmérséklettel, és a rövid felezési idejű, illékony izotópok is lebomlottak már. Az erőmű másik három blokkját is leállították azóta. Így olyan jellegű esemény, ami hatásait tekintve megközelítene az 1986-ost, ma már nem lehetséges Csernobilban.



3. ábra. A szarkofág makettje (fotó: Aszódi Attila). Középen a reaktor, rajta a hatalmas, ferdén álló reaktorfedél. Jól látható, hogy a mentési munkálatok során betöltött anyagok és a robbanásban keletkezett törmelékek hogyan töltik ki az egyes helyiségeket.

Az ukrán állam külföldi segítséget kért (elsősorban a legfejlettebb ipari államoktól), és egy erre a célra létrehozott pénzügyi alapba összegyűjtöttek annyi pénzt, amiből egy új, hermetikus védőépületet lehet építeni a meglévő fölé. Az új védőépület felépítéséhez szükséges műszaki tervek kidolgozása a hivatalos közlések szerint hamarosan megindulhat. Az új szarkofágot a mostani mellett tervezik felépíteni, és egy sínrendszeren tolnák a jelenlegi szarkofág fölé. Az új szarkofágot száz évre méretezik, hermetikusnak kell lennie, mert benne egy hatalmas híd-daru fog működni, melynek segítségével le akarják bontani a mostani szarkofág tetejét és oldalfalait, valamint az épületen belüli instabil falakat is, hogy hosszú távra stabilizálhassák a helyzetet. Ez a munka minden bizonnyal továbbra is a figyelem középpontjában fog maradni.

A csernobili expedíció célkitűzéseinek sikeres teljesítéséhez, valamint az itt is közölt eredmények eléréséhez minden résztvevő lelkes és szakértő munkájára szükség volt. Minden résztvevő (felsorolásukat lásd [4] 163. oldalán) segítségét ezúton is köszönöm.

Irodalom

1. *Csernobil öröksége: egészségügyi, környezeti és társadalmi-gazdasági hatások és Ajánlások Fejéroroszország, az Orosz Föderáció és Ukrajna kormánya részére* – Csernobil Fórum, Nemzetközi Atomenergia Ügynökség, Bécs, 2005. szeptember, IAEA/PI/A.87/05-28601; angolul az interneten: <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf>
2. *A csernobili baleset környezeti hatásai és a következmények enyhítése: húsz év tapasztalata* – ENSZ Nemzetközi Csernobil Fórum „Környezet” szakértői csoport jelentése, 2005. augusztus; angolul az interneten: http://www.iaea.org/NewsCenter/Focus/Chernobyl/pdfs/EGE_Report.pdf
3. ASZÓDI A.: *Csernobil ma; Magyar tudományos expedíció Csernobilba* – 49. Országos Középiskolai Fizikatanári Ankét, Paks, 2006. április 1., interneten: <http://www.reak.bme.hu/aszodi/eloadasok.htm>
4. SZATMÁRY Z., ASZÓDI A.: *Csernobil / Tények, okok, biedelmek* – Typotex, Budapest, 2005. ISBN: 963 9548 68 5, (lásd még e számunk *Könyvespolc* rovatát – a szerk.)

AZ ÜZEMZAVAR HELYREÁLLÍTÁSÁNAK SUGÁRVÉDELMI KÉRDÉSEI

Bujtás Tibor, Nényei Árpád
Paksi Atomerőmű Zrt., Sugárvédelmi Osztály

A Paksi Atomerőműben 2003. április 10-én súlyos üzemi zavar következett be.

Az 1. számú szerelőaknában, víz alatt elhelyezett fűtőelem-tisztító berendezésben a 2. blokk reaktorából kirakott kazettákat tisztították.

A tisztítótartályban láncreakció már nem játszódott le, de a fűtőelemekben a korábbi reaktorban töltött üzemidejük során felhalmozódott radioaktív hasadványtermékek még mindig jelentős hőmennyiséget termeltek. A tisztítóberendezés nem megfelelő hűtése miatt a kazetták néhány óra alatt túlmelegedtek, és a tisztítótartály felnyitáskor beáramló hideg víz által okozott hősokk az üzemanyag-kazetták jelentős sérüléséhez vezetett. Az esemény hatására a fűtőelemek burkolata felnyílt, és a bennük lévő urán-dioxid pasztillák is megsérültek.

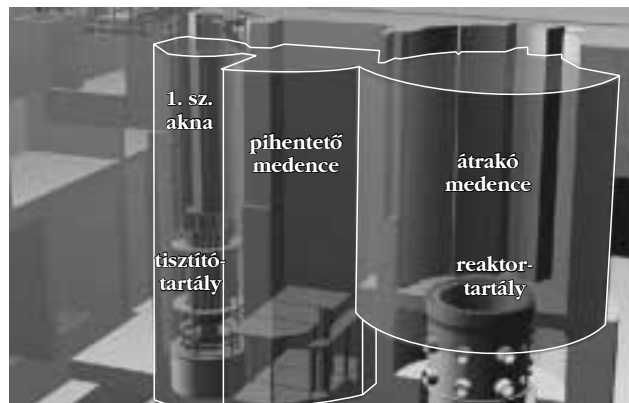
A sérült kazetták és a szabaddá vált törmelék nukleáris üzemanyag eltávolítását és biztonságos elhelyezését meg kell oldani. E feladatok a műszaki nehézségek mellett komoly sugárvédelmi problémákat is felvetnek, melyek megoldása a munkát végző személyzet sugárterhelésének csökkentéséért és a környezetbe jutó radioaktív anyagok mennyiségének minimalizálásáért is elengedhetetlen.

A jelenlegi állapot

A Paksi Atomerőműben minden reaktorhoz három vízzel feltölthető akna tartozik (1. ábra).

A legnagyobb a reaktortartály feletti átrakó medence, amely a reaktorzóna átrakására szolgál, a másodikban (a pihentető medencében) a reaktorból kirakott kiegészített fűtőelemeket tárolják 3–5 évig, míg maradék hőtermelésük és radioaktivitásuk lecsökken olyan mértékig, hogy kiszállíthatóak legyenek az erőműből. A legkisebb (az 1. számú akna) a kazetták ki- és beszállítására, valamint karbantartási műveletek végrehajtására szolgál. Ebben az aknában helyezték el a fűtőelem-tisztító berendezés tisztítótartályát is, ami a sérült fűtőelemekkel együtt jelenleg is ott van.

1. ábra. A reaktor és a hozzá kapcsolódó aknák térbeli helyzetkedése



Ezek a medencék zsilipeken keresztül érintkeznek egymással, hogy a kazetták az egyikből a másikba víz alatt átszállíthatók legyenek. A víz alatti mozgatás során a víz egyrészt árnyékolja a kazetták sugárzását, másrészt elvezeti a bennük képződő hőt.

Az üzemi zavart követően elsődleges feladat volt a sérült fűtőelemek állapotának felmérése a szükséges intézkedések tervezése céljából. Ez elsősorban kritikussági, sugárvédelmi és vizuális vizsgálatokat jelentett.

Ezek eredményeképpen nyilvánvalóvá vált, hogy a tisztítótartályban lévő üzemanyag jelentős részének megszünt a hermetikussága és geometriai épsége, emiatt egyedi intézkedésekkel kell biztosítani a szubkritikusságot, az üzemanyag hűtését és a radioaktív anyagok kibocsátásának korlátozását a sérült kazetták eltávolításáig, ami számos kiegészítő rendszer kialakítását igényelte:

Neutronfluxus-mérés és vérszűrő rendszer

Mivel a fűtőelemek jelentős mennyiségű hasadóanyagot tartalmaznak, ezért meg kellett vizsgálni egy esetleges láncreakció bekövetkezésének lehetőségét is. Az elméleti számítások kizárták ugyan egy ilyen esemény bekövetkezését, de fel kellett készülni a rendszer sokszorozási tényezőjét befolyásoló hatások (hőmérséklet, bórsavtartalom változása stb.) bekövetkezésére. Ezért egy újonnan kiépített rendszer folyamatosan méri a fűtőelemek környezetében a neutronfluxus változását a nukleáris stabilitás monitorozása céljából. A rendszerhez tartozik még egy bórsavdagoló berendezés is, amely szükség esetén automatikusan nagy koncentrációjú bórsavat juttat az 1. számú akna vizébe.

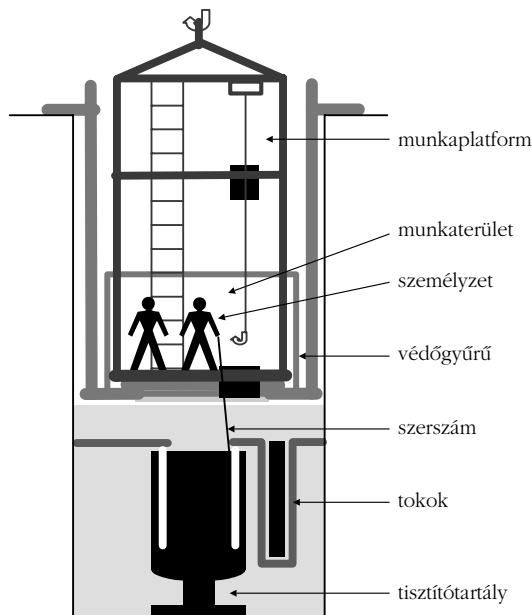
Autonóm hűtőrendszer

Az üzemi zavart követően meg kellett oldani a sérült fűtőelemek hermetikus elválasztását az erőmű többi üzemelő rendszerétől. Ezt csak az 1. számú akna teljes leválasztásával lehetett biztonságosan megoldani. Mivel az aknának és a pihentető medencének közös hűtőrendszerre volt, a leválasztás előtt ki kellett építeni az akna számára egy önálló hűtőrendszert, amely a fűtőelemekben a radioaktív bomlásból keletkező hőt elvezeti.

Sugárvédelmi mérőrendszer

Az üzemi zavar során a fűtőelemek hermetikus burkolata is megsérült, így a bennük tabletták formájában elhelyezett UO_2 közvetlenül érintkezik az akna bórsavas vízzel. Bár a pasztillák mechanikai és kémiai ellenálló képessége igen nagy, mégis oldódnak ki belőlük hasadóanyagok és hasadványtermékek.

A víztisztító rendszerek ioncserélői ugyan folyamatosan vonják ki ezen anyagokat az akna vízből, azonban a vízben még így is jelentős a radioaktív izotópok aktivitáskoncentrációja, ami az 1. számú akna környezetében viszonylag magas dózisteret alakít ki. Ezért több ponton történik a



2. ábra. A munkaplatform és a tisztítótartály elhelyezkedése az 1. számú aknában

gammadózis-teljesítmény monitorozása, az ott végzendő munkák megfelelő sugárbiztonsága érdekében.

További kockázatot jelent az üzemanyag-kazettákban lévő gáz halmazállapotú ^{85}Kr nuklid, amely az akna vízen keresztüljutva a levegőbe kerül. A víz párolgásával együtt kis mennyiségben, a levegő aeroszolrészecskéihez tapadva, egyéb radionuklidok is a levegőbe juthatnak. Ezek mennyisége nem számottevő ugyan, és az akna fölé telepített elszívóval ellátott sátor a kijutásukat megakadályozza, de sugárbiztonsági szempontból elengedhetetlen a csarnok levegőjében az aktivitáskoncentráció állandó mérése is.

Az autonóm hűtőrendszer csővezetékére egy folyamatos, összgammaaktivitás-koncentrációt mérő berendezés került az 1. számú aknavíz radionuklid-koncentrációjának monitorozása céljából.

A teljes sugárvédelmi ellenőrzőrendszer folyamatosan mért eredményei a helyszínen és a vezénylőkben egyaránt megjelennek. A rendszerben minden egyes méréshez két riasztási szint van beállítva, melyek túllépésekor a rendszer fény- és hangjelzéssel is figyelmezteti a dolgozókat a normál viszonyoktól való eltérésre. Figyelmeztető

szint elérése esetén a rendszer csak felhívja a figyelmet az értékek megnövekedésére, de a munka tovább folytatható. Vészsztint túllépése esetén viszont csak a legfontosabb tevékenységek befejezése lehetséges, és a munkaterületet minél előbb el kell hagyni.

Egyéb mérőrendszerek

Az előbb említett rendszereken kívül további mérőrendszerek is létesültek (pl. hőmérséklet-, szintmérés stb.), amelyek a normális értékektől történő eltérés esetén szintén hasonló jelzéseket generálnak.

Az eltávolítás megvalósítása

Az eltávolítás az atomerőműben alkalmazott normál technológiákkal nem valósítható meg, ezért új módszerek kidolgozására volt szükség. E szerint az 1. számú aknában annyira lecsökkentik a vízszintet, hogy manipulátorokkal elérhetőek legyenek a sérült fűtőelemek, majd behelyeznek egy hengeres platformot, ami védi a dolgozókat a külső gamma-sugárzástól és megátolja a radioizotópok bejutását a munkaterületre (2. ábra).

Ebbe kerül bele a munkaplatform, ahonnan a személyzet végzi az eltávolítást. Ez a munkaplatform a külső platformon belül elforgatható, így biztosítva azt, hogy a szerszámok leengedésére szolgáló nyílások és nézőablakok mindig a megfelelő pozícióba állíthatók legyenek.

Leengedett szerszámok segítségével megbontják a tisztítótartályon belül a fűtőelemeket tartó tálcákat és szükség szerint a kazetták tokozását, majd átrakják őket a tisztítótartály köré előzőleg elhelyezett tárolótokokba. A megtelt tokokat lezárják, kiemelik a platformot, és a tokokat átmenetileg a pihentető medencébe, majd a folyamat ismétlődik, míg a tartályból mindent el nem távolítanak.

Dózisjelzőkészítmény-számítások a munkaterületen

Az eltávolítási munkák tervezésekor sugárvédelmi követelmény, hogy az egyéni dózisterhelés nem haladhatja meg a teljes munkavégzés alatt a 20 mSv értéket. Ebből 15 mSv a külső és 5 mSv a belső dózis ellenőrzési szint.

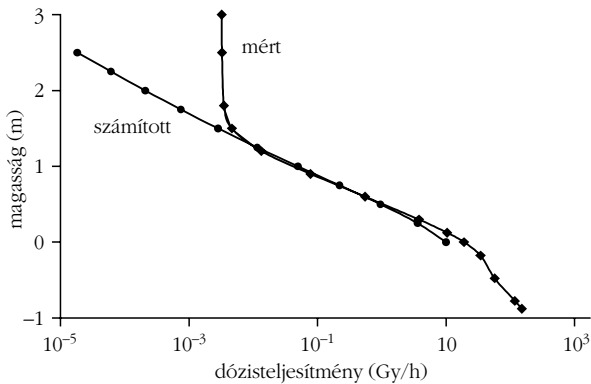
A szükséges vízréteg vastagságának számítása

A sugárvédelem tervezéséhez először a fűtőelemek sugárzásának meghatározása volt a fő feladat. A kazettákban felhalmozódott különböző radionuklidok aktivitását a reaktorban eltöltött idő és a kiegészüket befolyásoló egyéb paraméterek ismeretében határozták meg (1. táblázat).

Az aktivitások ismeretében, az anyagi és geometriai jellemzők alapján számítható a fűtőelemek sugárzási tere, aminek alapján el lehetett végezni a sugárvédelmi árnyékolások tervezését.

A modellszámítások megbízhatóságának ellenőrzésére méréseket is végeztünk. Gázionizációs detektorral a tisztítótartályon belül több ponton is mértük a gammadózis-teljesítményt. A 3. ábrán a tartály körül mért és számított értékek láthatók. A maximális dózisjelzőkészítmény ≈ 10 Gy/h

1. táblázat	
A gamma-sugárzó radionuklidok aktivitása	
radionuklid	30 fűtőelem aktivitása (Bq)
Kr-85	$6,2 \cdot 10^{14}$
Zr-95	$4,3 \cdot 10^{14}$
Nb-95	$9,2 \cdot 10^{14}$
Ru-106 + Rh-106	$2,2 \cdot 10^{16}$
Cs-134	$6,8 \cdot 10^{15}$
Cs-137 + Ba-137m	$1,4 \cdot 10^{16}$
Ce-144 + Pr-144	$6,0 \cdot 10^{16}$
Eu-154	$2,1 \cdot 10^{14}$
összesen	$1,0 \cdot 10^{17}$



3. ábra. A dózisteljesítmény változása – mért és számított értékek – a magassággal a tisztítótartály közepvonalában, 2004 novemberében

volt, ami a víz árnyékoló hatása miatt a magassággal jelentősen csökken. A csökkenés tartály peremétől mért körülbelül 1,5 m-es magasságig tart, eddig a számított és a mért eredmények jó egyezést mutatnak. E felett azonban a fűtőelemből származó sugárzás intenzitása már töredékére csökken, és hatása összevethető lesz a vízben oldott radioizotópokból származó dózisteljesítménnyel, amit a számítások szándékosan nem vettek figyelembe.

Mind az elvégzett modellszámítások, mind a mérések azt mutatták, hogy 2–2,5 m vízoszlop magasság felett a dózisteljesítmény értékét gyakorlatilag a víz szennyezettsége határozza meg, így a munkavégzés során nem érdemes 2,5 m-nél magasabb vízszintet alkalmazni. Ezért lett a 2,5 m-es vízrétegvastagság a platform és a szerszámok méretezésének egyik tervezési alapja.

A platform padlójának és a platformhoz tartozó védőgyűrű vastagságának számítása

Vízből származó sugárterhelés csökkentésére a legkézenfekvőbb módszer annak tisztítása. A fűtőelemekből folyamatosan oldódó radioaktív szennyezők miatt a víztisztító folyamatos üzemeltetésével is csak egy bizonyos szintre lehet csökkenteni az aktivitáskoncentrációt. A kioldódás sebessége pedig éppen a munkavégzés során emelkedhet meg jelentősen, mivel a kazetták mozgásával eddig még zárt részek is felnyílhatnak. Továbbá a rendszer szubkritikusságának biztosítása érdekében a helyreállítás során a víz borsavtartalmát meg kell emelni, ami tovább növeli az üzemanyag oldódási sebességét.

Optimális vízkémiai körülményeket kell biztosítani, azonban így is 10^6 Bq/dm³ (¹³⁷Cs-re vonatkoztatott) aktivitáskoncentrációval kellett számolni a tervezés során, ami az egyes munkafolyamatok hatására időszakosan 10^7 Bq/dm³-re emelkedhet. Ez az aktivitáskoncentráció a víz felett 0,1–1 mSv/h dózisteljesítményt eredményez, amelyben nem lehet huzamosabb ideig munkát végezni, ezért további árnyékolásról kell gondoskodni.

A munkaplatform 100 mm vastag acél padlózata 30-ad részére csökkenti a γ -sugárzás intenzitását (0,661 MeV energiánál), ami biztosítja az 1. számú akna szennyezett vizének és a tisztítótartályban levő sérült fűtőelemeknek a szükséges árnyékolását.

A műveletek végrehajtásához a munkaterület padlójában az ólomüveg-nézőablakok mellett egy 1245×400 mm méretű technológiai nyílás készült, amely (szükség sze-

rint) részben, vagy teljesen védőfedelelkel zárható le (4. ábra). Néhány művelet végrehajtása során a munkavégzés teljesen, vagy részlegesen nyitott technológiai nyílás mellett történik. Nyitott technológiai nyílás mellett az akna vizétől származó γ -sugárzás dózisteljesítménye a számítások alapján a munkaplatform alja felett 1 m magasságban 10^6 Bq/dm³ aktivitáskoncentráció esetén $3,4 \mu\text{Sv/h}$. A tisztítótartályban lévő 30 db sérült üzemanyag kazetta gamma-sugárzásától származó dózisteljesítménye $12 \mu\text{Sv/h}$, a neutronsugárzás hatása elhanyagolható.

A személyzet védelmét biztosítani kell az 1. számú akna szennyezett falaitól származó γ -sugárzással szemben is. Ennek leárnyékolására a munkaterület köré egy acél védőgyűrű kerül. A felületi szennyezettség mért értékeit és a dekontaminálás várható hatását figyelembe véve a védőgyűrű falát a munkaterület padlószintjétől 2,2 m magasságig 45 mm vastag, a felette lévő részt 8 mm vastag acélból kell elkészíteni. Így az akna falainak dekontaminálás után maradó szennyezettségétől származó külső sugárterhelés a tervezett árnyékolás hatására $1 \mu\text{Sv/h}$.

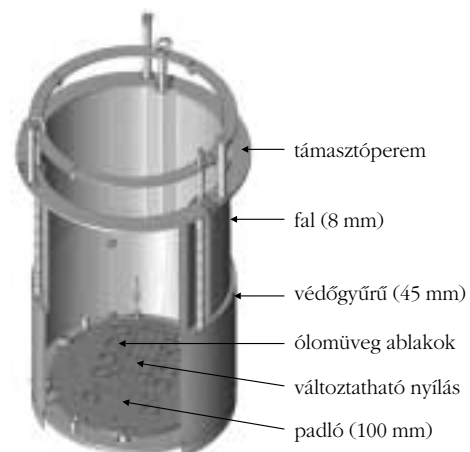
Az aknát kiszolgáló rendszerek csővezetékeiben is az aknából származó radioaktív izotópokkal szennyezett víz van, aminek sugárzásától szintén meg kell védeni a dolgozókat. Az ólomlemezekkel árnyékolott csővezetékéből származó dózisteljesítmény járuléka az elvégzett modellszámítások alapján további $1 \mu\text{Sv/h}$.

A fenti sugárzási útvonalakat összegezve, az átlagosan várható dózisteljesítmény $\approx 18 \mu\text{Sv/h}$. A 4 órás műszakokra tervezett munkavégzés alatt a személyenkénti dózis körülbelül $70 \mu\text{Sv}$. Az elhárítás teljes időtartamára egy dolgozó tervezett dózisa (90 műszak alatt) $6,3$ mSv, tehát az eltávolítás feladatai a tervezett körülmények között biztonsággal végrehajthatók, ugyanis az éves korlát (5 év átlagában) 20 mSv effektív dózis.

A sugárzási helyzet számítása a tokok pihentető medencébe szállítása közben

Eltávolításkor a sérült fűtőelemek darabjait először az 1. számú aknában tokokba helyezik, majd átszállítják a pihentető medencébe. Ezen technológia szerint a tokokat (a platform eltávolítása után) az átrakógép megfogja, kiemeli

4. ábra. A munkaplatformot körülvevő sugárvédelmi árnyékolás



a vízből és a két medencét összekötő zsilipen keresztül a pihentető medencébe viszi a végleges helye fölé és ott víz alá engedi. Ez a félnedves átszállítás azért szükséges, hogy meggátoljuk az 1. számú akna szennyezett vizének bekeveredését a pihentető medence tiszta vizébe, aminek tisztasága az ott tárolt üzemanyag-kazetták megfelelő állapotban tartásához elengedhetetlen.

Az átszállításnak ez a módszere sugárvédelmi szempontból nagyobb körültekintést igényel, mivel az átszállítás során a tokok víz fölé kerülnek és sugárzásuk az egész reaktorcsarnokban és még a szomszédos helyiségekben is megemeli a dózisteljesítmény értékét. A vizsgálatok során először egy elemzés készült, amivel meghatározható volt az a térrész, ahová a tok direkt sugárzása eljuthat. Ugyanis az 1. számú akna és a pihentető medence betonfalai a sugárzást szinte teljesen leárnyékolják, így a sugárzás csak felfelé juthat ki az átszállítás során. Ezt követte a falakon, a reaktorcsarnok szerkezeti elemein és a levegőben szóródó sugárzás hatásának meghatározása.

A szórt sugárzás hatását a C-95 jelű programrendszer alkalmazásával hajtották végre, amely a γ -fotonok háromdimenziós rendszerben való együttes mozgásával járó feladatok megoldására szolgál. A szoftver bemenő adataiként a tokok izotópleltárán túl szükség volt a geometriai adatokra és az anyagminőségekre, amelyek a műszaki tervekől és az építészeti adatbázisokból származtak.

A szimulációs számítások során először egy előzetes dinamikai elemzés készült, amivel megállapítható volt, hogy a tok átszállítási útvonala során melyik pozícióban okozza a maximális dózisteljesítményt. A részletes számításokhoz ez a pozíció szolgált kiindulásként. Az eredményeket három időpontra is kiszámítottuk, mivel az eltávolítás végleges időpontja még nem biztos, és a radioaktív bomlás miatt a forrás aktivitása folyamatosan csökken, ezért a különböző időpontokban egyes helyeken esetleg más-más sugárvédelmi intézkedésekre lehet szükség.

A legfontosabb helyiségekre ilyen módon kapott dózisteljesítmény-értékek a 2. táblázatban láthatók.

A számítások eredményei alapul szolgáltak a dózistérkép elkészítéséhez, illetve a sugárvédelem biztosítására szolgáló intézkedések megtervezéséhez. A dózisteljesítmény-értékek alapján megállapítható, hogy a reaktorcsarnokot le kell zárni az átszállítások időtartamára, és az átrakógépet távvezérléssel kell irányítani. A környező helyiségekben azonban alacsony dózisteljesítmény várható, ezért külön korlátozásokra ott nincs szükség. Természetesen a számítások eredményeit az első átszállítás során helyszíni mérésekkel kell ellenőrizni.

A személyzet belső sugárterhelése

A dolgozók belső sugárterhelését a munkaterületen végzett tevékenységek során az akna vizének párolgásával a levegőbe kerülő radioaktív szennyezők, illetve az akna falának szennyezett felületéről származó radioaktív részecskék belélegzése okozhatja.

A belső sugárterhelés dózisének becslésekor kiindulási adatként a munkaterület légterében az aeroszolok aktivitáskoncentrációjára vonatkozó megengedett értékeket

2. táblázat

A 2. blokki reaktorcsarnokban és szomszédos helyiségekben várható dózisteljesítmények értékei három időpontban ($\mu\text{Sv/h}$)

	2006. 07. 01.	2007. 01. 01.	2008. 01. 01.
Bejárat a reaktorcsarnokba	$2,45 \cdot 10^1$	$2,19 \cdot 10^1$	$1,89 \cdot 10^1$
Reaktorpódium	$6,43 \cdot 10^4$	$5,76 \cdot 10^4$	$4,98 \cdot 10^4$
Átrakógép kabin	$3,68 \cdot 10^2$	$3,30 \cdot 10^2$	$2,85 \cdot 10^2$
Turbina csarnok helyisége	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$9,91 \cdot 10^{-3}$	$8,57 \cdot 10^{-3}$
Blokkvezénylő és relé-helyiség	$< 1 \cdot 10^{-8}$	$< 1 \cdot 10^{-8}$	$< 1 \cdot 10^{-8}$

határoztunk meg. Figyelembe vettük a belső sugárterhelés ellenőrzési szintjét (5 mSv), a dóziskonverziós tényezőket, a lehetséges védőeszközöket, a dolgozók légzésteljesítményét, illetve a munkaterületen eltöltött időt és a várhatóan kialakuló aktivitáskoncentrációkat. A számítások szerint a munkavégzők belső sugárterhelése igen pesszimista megközelítés alkalmazásával, még légszűrő használata nélkül sem lépheti túl a $0,8 \text{ mSv}$ értéket.

A reaktorpódiumon és a reaktorcsarnokban tartózkodó személyzetre a munkaplatform légterében megjelenő aeroszolok nincsenek hatással, mert a szellőzőrendszer kizárja a reaktorcsarnok levegőjének elszennyeződését. Légfüggöny alkalmazásán túl a levegőáramlás is irányított, a munkaplatform alól történik az elszívás megfelelő áramlási sebességgel. A beépítendő két elszívó ventilátor egyúttal egymás tartaléka.

Nukleáris környezetvédelmi szempontok vizsgálata, kibocsátási korlátok

Az eltávolítási tevékenység során keletkező folyékony radioaktív hulladékok előzetes feldolgozását az atomerőműben rendszeresített technológiákkal valósítják meg, így biztosítható a kibocsátási korlátok biztonságos betartása.

Az eltávolítás során a légnemű-kibocsátásoknál figyelembe kell venni, hogy a munkák alatt a fűtőelemek tovább roncsolódhatnak. Ennek hatására a légnemű-kibocsátás gyakorlatilag a ^{85}Kr izotóptól származik, mivel a többi nemesgázizotóp már lebomlott, az aeroszolokhoz kötődő izotópokat pedig a légszűrőrendszerek megkötik.

Az elképzelhető legrosszabb kiindulási szempontok alapján elvégzett modellszámítás szerint, ha az összes üzemanyagpalcában lévő teljes kriptonaktivitás kijutna, akkor a kritikus (e szempontból a legveszélyeztetettebb) lakossági csoport dózisznövekménye $5,58 \cdot 10^{-10} \text{ Sv}$ lenne.

A teljes tevékenységre összesített (előkészületektől a hulladékok elhelyezéséig) maximális lakossági effektív dózis értéke $6 \cdot 10^{-10} \text{ Sv}$, ez a Paksi Atomerőműre vonatkozó $90 \mu\text{Sv/év}$ dózismegszorítás $0,00067\%$ -a, ami gyakorlatilag elhanyagolható kockázatárulékot jelent. Magyarországon a természetes háttérsugárzás átlagosan néhány másodpercenként eredményez ekkora dózist, s napi, évi ingadozása is nagyságrendekkel nagyobb.

FOLYADÉKKRISTÁLY-TELEVÍZIÓK – A 21. SZÁZAD KÉPERNYŐI

Éber Nándor
MTA SZFKI, Budapest

A szerkezetük és tulajdonságaik alapján a folyadékok és a szilárd anyagok között sajátos átmenetet képező folyadékkristályok felfedezésük (1888) után sokáig csak kevesek érdeklődését felkeltő kuriózumnak számítottak. Mióta 1968-ban megmutatták, hogy belőlük elektrooptikai kijelző (*Liquid Crystal Display*, LCD) készíthető, a kutatás a folyadékkristályok számos ígéretes tulajdonságát tárta fel, melyek némelyike alkalmazásra kerülhetett. Folyadékkristályokkal ma már nap mint nap találkozunk, hiszen a folyadékkristály-kijelző számos használati tárgyunk nélkülözhetetlen alkatrészévé vált.

A kis teljesítményigényű LCD-k első sikereiket az elemes készülékek (karórák, kalkulátorok) számkijelzőiként aratták, de már a kezdeteknél felsejlett a remény, hogy a folyadékkristályok a lapos televízió elkészítését is lehetővé teszik majd. Az első LCD zsebtelevíziók már 1984 táján megjelentek ugyan, de ezek még sem kis (1"–3") méretűk, sem gyenge képminőségük miatt nem lehettek a katódsugárcsöves televíziók versenytársai. Mára azonban már a nagyfelbontású grafikus képernyők széles méretválasztéka áll rendelkezésünkre. A legkisebbek (1"–8") fő felhasználási területe a mobiltelefonok, digitális kamerák, video-kivetítők, vagy például a repülőgépek ülésébe épített televíziók. A közepes méreteket (10"–21") a hordozható számítógépek képernyői és az LCD-monitorok reprezentálják. Az utóbbi két évben pedig már megvásárolhatók a nagy (15"–57") képernyős, lapos LCD-televíziók: egy régi álom megvalósult. A méret növelésének felső korlátját még nem értük el, prototípusként már 82" (több mint 2 m) széles óriásképernyőt is készítettek.

Az alábbiakban e közel három évtizedes intenzív kutató-fejlesztő munka néhány állomását mutatjuk be, majd felhívjuk a figyelmet néhány érdekes alapkutatási eredményre, nemrég felfedezett folyadékkristály szerkezetre.

Miért használhatók a folyadékkristályok kijelzőnek?

A folyadékkristály elnevezés hosszú távú irányrendezettséggel jellemezhető fázisok ma már több mint 30 tagot számláló családját takarja. A főbb folyadékkristály-fázisok (nematikus, koleszterikus, szmektikus) szerkezetét, tulajdonságait és a bennük fellépő fizikai jelenségeket bőszes irodalom taglalja [1–3]. Itt csak a kijelző működését meghatározó legfontosabb tulajdonságokra térhetünk ki.

A forgalomban levő LCD-k túlnyomó többsége az irányrendezett folyadéknak tekinthető nematikus folyadékkristályt tartalmazza, melynek hosszúkás molekulái átlagosan egy irányt tüntetnek ki, az \mathbf{n} direktort. A nematikusok alapállapotának a térben állandó direktor felelne meg ugyan, a valóságban azonban a direktor körülbelül μm távolságokon már változhat, azaz a direktor helyfüggő $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ eloszlást mutathat. E deformált

állapotban a direktorra az alapállapot felé visszatérítő rugalmas forgatónyomaték hat.

Az irányrendezettségből adódóan a folyadékkristályok anizotrop közegek, fizikai tulajdonságaik a kristályokéhoz hasonlóan irányfüggők. A nematikusok optikai tengelye egybeesik a direktorral, mely körül hengersizmetriát tapasztalunk. Ennek következtében a direktorral párhuzamosan (ϵ_{\parallel}) és az arra merőlegesen (ϵ_{\perp}) mért dielektromos permittivitás értékei eltérőek, különbségük, $\epsilon_a = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$, az anizotrópia mértékét jellemzi. \mathbf{E} elektromos térben a direktorra $\epsilon_a \epsilon_0 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) (\mathbf{n} \times \mathbf{E})$ dielektromos forgatónyomaték hat, melynek iránya a dielektromos anizotrópia előjelétől függ. E forgatónyomaték a direktort $\epsilon_a > 0$ esetben a térrel párhuzamos, míg $\epsilon_a < 0$ esetben a térre merőleges irány felé forgatja.

Az LCD-kben a folyadékkristály két üveglap között található 5–10 μm vastag réteg formájában. Az üveglapok belső felületén átlátszó, elektromosan vezető réteg teszi lehetővé, hogy a folyadékkristályra feszültséget kapcsolhassunk. Az elektródákat orientáló bevonat borítja, mely kijelöli a direktor irányát a felületeken és ezáltal biztosítja a kijelző feszültségmentes (kikapcsolt) állapotának homogenitását. Az elektródákra egy U_b küszöbértéket meghaladó U feszültséget kapcsolva a dielektromos forgatónyomaték a direktort a cella belsejében elfordítja (a felületeken a direktor iránya nem változik), a kijelző bekapcsolt állapotba kerül. Az optikai tulajdonságoknak a direktor elfordulása miatti megváltozása polarizált fényben detektálható a legjobban. A kijelző megfelelő kontrasztjának biztosítására ezért az üveglapok külső felületére polarizátorfóliát ragasztanak, melyek polarizációs irányai többnyire egymásra merőlegesek. A feszültség lekapcsolásakor a kitérítő dielektromos forgatónyomaték megszűnik, így a rugalmas forgatónyomaték hatására a kijelző visszatér alapállapotába.

A fenti általános működési elvet sokféle cellageometriával (elektródaelrendezés, orientáció), különböző optikai effektusok (polarizációforgatás, kettőtörés, fényszórás) felhasználásával lehetséges realizálni [3]. E kijelzési módok közös jellemzője, hogy a kijelzők saját fényt nem bocsátanak ki, csak a rajtuk áthaladó fény tulajdonságait változtatják meg. Sötét környezetben így háttérvilágításról is gondoskodnunk kell. Fényforrás lehet egy világító dióda (pl. a mobiltelefonokban), vagy vékony fluoreszcens lap (pl. a monitorokban). Ha a kijelző mögé tükröt helyezünk, a kijelző reflexiók üzemmódban működik. Ezeket az LCD-ket annál jobban lehet látni, minél erősebb a ráeső fény.

A folyadékkristály-kijelzési módok szinte mindegyike monokróm, így színes kijelzést additív színkeveréssel valósíthatunk meg. Ehhez a három alapszínnek megfelelő színszűrőket kell az elektródákra megfelelő mintázatban felvinni. A külön-külön vezérelt vörös, zöld és kék képelemeket szemünk színes képpontként észleli.

A továbbiakban a jelenleg is forgalomban lévő kijelző-típusokat igyekszünk bemutatni.

A csavart nematikus kijelző

A folyadékkristály-kijelzők sikertörténete a csavart nematikus (*Twisted Nematic*, TN) kijelzővel kezdődött 1974-ben. A TN-kijelző működési elvét az 1. a ábra szemlélteti. A direktor a felülettel párhuzamos, de a két elektródánál egymásra merőleges irányú, ezáltal a folyadékkristályrétegben 90 fokos csavar alakul ki. Az üveglapokra ragasztott polarizátorfóliák polarizációs irányai szintén egymásra merőlegesek. A csavarszerkezet a megvilágító fény polarizációsíkját 90 fokkal elforgatja, így a keresztezett polarizátorokon a fény áthaladhat. A feszültségmentes (kikapcsolt) állapot tehát világos.

A TN-kijelzőben használt nematikus folyadékkristályban $\epsilon_a > 0$. A kijelzőre küszöbértéket ($U_k \approx 1-3$ V) jóval meghaladó feszültséget kapcsolva, a direktor az elektromos térrel párhuzamos irányba fordul. Ezáltal megszűnik a fény polarizációsíkjának elfordulása, a keresztezett polarizátorokon a fény nem jut át, a bekapcsolt állapot sötét. A köztes $U_{10} < U < U_{90}$ feszültségtartományban a direktor elfordulási szöge, és vele az átérésztett fény intenzitása folyamatosan változik (1. b ábra), így különböző szűrkeségi szintek is megvalósíthatóak.

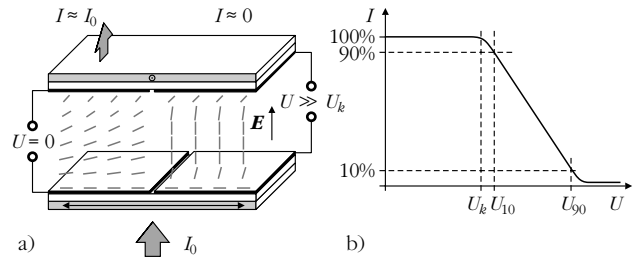
A csavart nematikus kijelző testesítette meg először az LCD-k előnyeit versenytársaikkal szemben. Kis küszöbfeszültségük jól illeszkedik a modern elektronika igényeire, áramfelvételük, teljesítményigényük minimális. Egyszerűen gyárthatók, a cellavastagság esetleges változása a kijelző optikai tulajdonságait alig befolyásolja. A kis bonyolultságú számkijelzők így ma is ezzel a technológiával készülnek.

Multiplexelhetőség és a szupercsavart kijelző

A grafikus képernyők sok ezer képelemből állnak, melyek elektródáit már nem lehet külön-külön kivezetéssel ellátni és függetlenül vezérelni. Ilyenkor úgynevezett mátrixkijelzőt használunk, amiben az $N \times M$ képelem az N sorelektroda (egyik felületen) és az M oszlopelektroda (másik felületen) metszéspontjaiban található. Adott képelem be- vagy kikapcsolása a hozzá tartozó sor- és oszlopelektrodára egyidejűleg kapcsolt megfelelő feszültségimpulzussal történhet meg, a képernyő tartalmának frissítése tehát időosztásos (multiplex) vezérlést igényel. Egyszerre csak egy sornyi képelem vezérelhető, a többi sorra csak időeltolódással kerülhet sor. E vezérlési módszerből adódóan nemcsak a címzett (be- vagy kikapcsolt), hanem a többi (éppen nem címzett) képelemen is van feszültség. A különböző állapotokhoz tartozó feszültségértékek annál közelebb vannak egymáshoz, minél több sort kell multiplexelni.

A TN LCD 1. b ábrán bemutatott $I(U)$ karakterisztikájának meredeksége túl kicsi, így már kevés ($N < 5$) sor esetén is drasztikusan lecsökken a be- és kikapcsolt állapotok közötti intenzitáskontraszt, a csavart nematikus kijelző gyakorlatilag nem multiplexelhető.

E probléma megoldására fejlesztették ki a *szupercsavart* (*SuperTwisted Nematic*, STN) kijelzőket, melyekben a direktor a két felület között nem 90, hanem 180–270 fokot csavarodik. Ez esetben ugyanis az $I(U)$ karakterisztika meredeksége megnő, így a multiplexelhető sorok száma



1. ábra. a) Csavart nematikus kijelző kikapcsolt (balra) és bekapcsolt (jobbra) állapota, és b) intenzitás–feszültség karakterisztikája

$N > 200$ lehet. Ez a technológia tette először lehetővé a nagyfelbontású grafikus képernyők megjelenését. A megkívánt nagy csavarodási szögek létrehozására a nematikushoz királis (tükrösszimmetriát nem mutató) vegyületet adalékolnak, ami spontán csavarszerkezetű koleszterikus fázist eredményez. Az adalék mennyiségével állítható be, hogy a kívánt fél- vagy háromnegyed csavar pont a mintavastagságnak feleljen meg.

Az STN kijelzési mód fényterjedési viszonyai a direktor nagyobb csavarodási szöge miatt bonyolultabbak, az átérésztett fény intenzitását elsődlegesen a kettőstörés határozza meg. Mivel a cellavastagságot a folyadékkristály törésmutatójának anizotrópiájával össze kell hangolni, a vastagság pontossága iránti igény megnő. Másrészt, a ki-, illetve bekapcsolt állapotok valamelyike színes lesz (a kapcsolás sárga és fekete, vagy átlátszó és sötétkéék állapotok között történik), de szerencsére ez kettőstörő polimer fóliával kompenzálható. Ma a mobiltelefonok nagy részében ilyen STN-kijelzőt találunk.

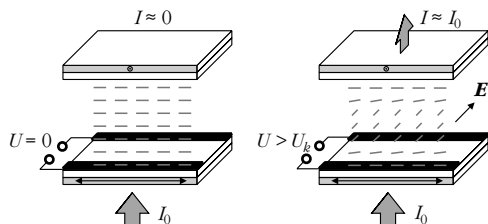
Folyadékkristályok és félvezetők összeházasítása – az aktív mátrix (AM) kijelző

A multiplexelhetőség megvalósításának másik útja az úgynevezett aktív mátrix kijelző. Ennek lényege, hogy az időosztásos vezérlés az egyik üveghordozóra felvitt félvezető vékonyréteg áramkörben történik. A címzés az egyes képelemek alá integrált tranzisztoros (*Thin Film Transistor*, TFT) kapcsolóelem állapotát állítja be. A folyadékkristálynak így minden képeleme közvetlenül vezérelt, így az aktív mátrix kijelzőben a TN kijelzési mód is alkalmazható.

Kezdetben e módszerrel csak kisméretű (1"–3" képátlójú) LCD-zsebtélevíziók készülhettek. A félvezető-technológia fejlődése mára lehetővé tette, hogy az AM-képernyőket az LCD-televíziókhöz szükséges méretekben is előállítsák.

Látószög növelése – új kijelzési módok

A TN- és STN-kijelzők bekapcsolt állapotában a direktornak a felületekkel bezárt szöge helyfüggő, a felületeken közel nulla, a cella közepén közel merőleges. E kijelző kontrasztja maximális, ha merőlegesen nézünk rá. A kijelzőre ferdén nézve a direktor és a fény terjedési iránya különbözik, így a kettőstörés mértéke megváltozik. Ezáltal a kontraszt szögfüggővé válik és lecsökken, sőt a sötét és világos állapotok felcserélődhetnek, a színek



2. ábra. IPS-kijelző kikapcsolt (balra) és bekapcsolt (jobbra) állapota

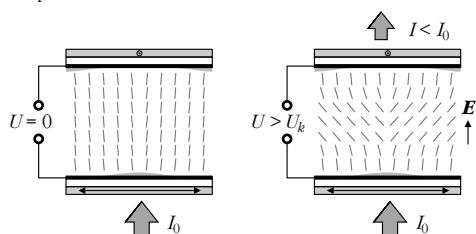
megváltozhatnak. E jelenség a képernyő használhatóságát jelentősen korlátozná, így olyan kijelzési módo(ka)t kellett találni, mely(ek)nek nagyobb a látószöge.

A Hitachi és az LG–Philips által kifejlesztett *síkbeli kapcsolás* (*In-Plane Switching*, IPS) kijelzési mód [4] esetében az elektromos teret létrehozó mindkét elektróda ugyanazon a felületen található, azaz a tér a felülettel párhuzamos lesz (2. ábra). A direktor a feszültségmentes alapállapotban az elektródákkal párhuzamos, a tér hatására (bekapcsolt állapotban) az elektródákra merőleges irányba fordul, de a felülettel mindvégig párhuzamos marad. A kereszttezett polarizátorok között áteresztett fény intenzitását itt is a kettőtörés határozza meg. E geometriában az optikai tulajdonságok a beesési szögtől csak kis mértékben függenek, így az IPS-kijelző látószöge 150–170 fokra növekedett.

A Fujitsu és a Samsung kutatói a *többszemélyes merőleges orientáció* (*Multidomain Vertical Alignment*, MVA) kijelzési módot dolgozták ki [5], melynél alapállapotban a direktor iránya a felületre közel merőleges, az elektródák az átellenes felületeken vannak (3. ábra). Mivel a kezdeti direktorirány az elektromos térrel párhuzamos, olyan nematikusot kell használni, melyben $\epsilon_a < 0$. A feszültség bekapcsolásakor a direktor a térre merőlegesen kidől, a kettőtörés megváltozik. A dőlés felületekkel párhuzamos irányát a felület enyhe anizotrópiája szabja meg. Ez a geometria még ugyanúgy érzékeny lenne a fény beesési szögére, mint a TN-kijelző, ha minden egyes képelemet nem osztanánk tovább olyan kisebb tartományokra, melyekben a dőlés iránya különböző. Ezt például a 3. ábra szerint a felületen képelemenként kialakított kitüremkedésekkel lehet megvalósítani. Így bár minden tartomány külön-külön látószögfüggő, a képelem egészére ez kiátlagolódik, így 150–170 fokra látószög is elérhető.

Az IPS és MVA kijelzési módok hasonló, nagy látószögű képernyők gyártását teszi lehetővé, természetesen aktív mátrix kivitelben. A jelenleg forgalomban levő LCD-monitorok és a nagyfelbontású digitális televízió (HDTV) követelményeit kielégítő, 1920×1080 képelemszámú LCD-televíziók többsége e két technológia valamelyikével készül.

3. ábra. MVA-kijelző kikapcsolt (balra) és félig bekapcsolt, szűrke (jobbra) állapota



Videokivetítők

Nagyobb képméreteket nemcsak a kijelző méretének növelésével, hanem kivetítő optikát használva is elérhetünk. Az LCD-kivetítők egy részében 3 db 1”–2” átmérőjű TFT- vagy STN-képernyőt találunk, melyeket vörös, zöld, illetve kék színű fényrel világítanak át. A kijelzők által modulált fényt a kivetítő optika egyesíti az additív színkeverés újabb példájaként.

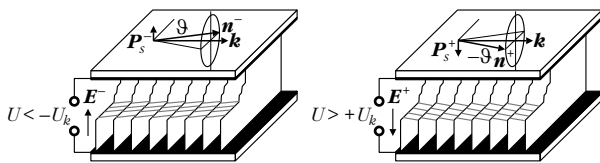
Az utóbbi években a kivetítők céljára egy újabb technológiát is kifejlesztettek. A *folyadékkristály a szilíciumon* (*Liquid Crystal On Silicon*, LCOS) eszközökben a folyadékkristályt egyik oldalról az a szilícium-egy kristály határolja, amiben a vezérlő elektronikát és a folyadékkristályra feszültséget kapcsoló tranzisztort is kialakították. E kijelző lapka nem átlátszó, ezért reflexiók üzemből használják. A megvilágító fény a folyadékkristályon áthalad, visszaverődik a szilícium felületéről és ismét áthalad a folyadékkristályon. A kétszeri áthaladás jelentősen növelheti a kijelző lapka kontrasztját. Míg a TFT AM képernyőknél az átláthatóság igénye miatt a képelemek mérete jóval nagyobb kell, hogy legyen a kapcsoló tranzisztorénál, az LCOS-chipekben postabélyegnél kisebb méretű, nagy (minimum 1365×1024) felbontású mikroképernyők is készíthetők.

Gyors kapcsolás – ferroelektromos kijelzők

A nematikus folyadékkristályokat hasznosító kijelzők kezdetben viszonylag lassúak, néhány száz ms kapcsolási idejűek voltak. Mozgókép megjelenítéséhez e kapcsolási időket lényegesen csökkenteni kellett. A bekapcsolás az alkalmazott feszültség növelésével jelentősen gyorsítható ugyan, a kikapcsolás ideje viszont csak a folyadékkristály rugalmas állandóitól, viszkozitásától, valamint a kijelző geometriájától (a direktor orientációjától és a folyadékkristály-réteg vastagságától) függ. Vékonyabb minta ugyan gyorsabban kapcsol, de a cellavastagság csökkentésének a kontraszt változása korlátot szab. Kis viszkozitású, főleg fluortartalmú nematikusokkal a kapcsolási időt az optimális (kb. 5 μm) cellavastagság esetén is a tv-kép élvezhetőségéhez szükséges 20 ms alá lehetett csökkenteni.

Ferroelektromos szmeztikus folyadékkristályok segítségével a fenténél lényegesen gyorsabb kapcsolás is megvalósítható. Ferroelektromosság a *királis* molekulákból felépülő *dőlt szmeztikus* (pl. SmC*) fázisokban léphet fel [6]. Ezen anyagok elektromos tér hiányában is fellépő \mathbf{P}_s spontán polarizációja a \mathbf{k} rétegnormálisra és a vele $0^\circ < \vartheta < 90^\circ$ dőlésszöget bezáró direktorra egyaránt merőleges forgástengely irányába mutat. A kiralitás másik következménye e fázisok csavarszerkezete; a direktor és vele együtt a spontán polarizáció a rétegnormális irányában haladva körbefordul. E folyadékkristályokra elektromos térben a dielektromos forgatónyomaték mellett $\mathbf{P}_s \times \mathbf{E}$ ferroelektromos forgatónyomaték is hat, sőt a szokásos tereknél ez utóbbi dominál.

A gyors kapcsolást 1980-ban a *felületstabilizált ferroelektromos folyadékkristály* (*Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal*, SSFLC) kijelző megalkotásával



4. ábra. SSFLC-kijelző két stabil állapota

demonstráltak [7]. Kis ($< 2 \mu\text{m}$) cellavastagság és a felületre merőlegesen beállított szmektikus rétegek esetén az SmC^* -fázisra jellemző csavarszerkezet a cellában nem tud kialakulni (4. ábra). A cellára adott feszültséggel az elektromos tér és a spontán polarizáció közötti lineáris kölcsönhatás miatt a direktor a felülettel párhuzamos két, polaritásfüggő ferroelektromos állapot között átkapcsolható. Keresztezett polarizátorok között az egyik állapot sötét (fényzáró), a másik a kettőtörés miatt világos (fényáteresztő) lehet. A kapcsolás bistabil, a feszültség lekapcsolásakor a beállított állapot megmarad, így a közvetlen multiplexelésnek nincs akadálya. Bár a tér merőleges a felületre, a kapcsolat síkban történik, így nagy a látószög. Az átkapcsolás a tér polaritásváltásakor, vagyis feszültség hatására következik be, így a be- és kikapcsolási idők (néhány μs) megegyeznek.

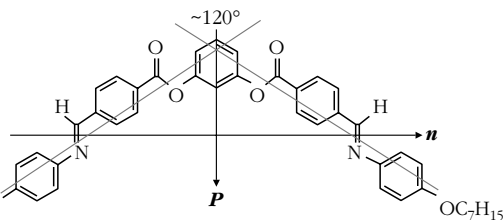
Az SSFLC-kijelző fejlesztése azonban a gyártástechnológia radikális megújítását tette volna szükségessé (kis mintavastagság, más meghajtó elektronika). Problémák adódtak a kontraszttal és a mechanikai érzékenységgel is, így a nematikus technológiák gyors fejlődése kiszorította az SSFLC-kijelzőket a nagyméretű képernyők területéről. Kisméretű, a gyorsaságot kihasználó speciális alkalmazásoknál találkozhatunk velük, így például már kapható ferroelektromos folyadékkristályt tartalmazó LCOS-mikrokijelző.

Anti-ferroelektromos folyadékkristályok

1989-ben fedezték fel, hogy az SmC^* -folyadékkristályok egy csoportjának a hőmérséklet csökkenésekor *anti-ferroelektromos* (SmC_A^*) fázisa is van. Az SmC_A^* -fázisban a szomszédos rétegek spontán polarizációja ellentétes irányú, a direktor rétegenként váltakozva a rétegnormálishoz képest ellentétes irányba dől [6]. Ez az optikai tulajdonságokat is kiátlagolja, így az SmC_A^* -fázisban a látszólagos direktorirány a rétegnormálissal esik egybe.

Egy hőmérsékletfüggő küszöbértéket meghaladó elektromos tér hatására a direktor minden rétegben ugyanabba az irányba fordul, azaz a térrel anti-ferroelektromos–ferroelektromos fázisátalakulást idézhetünk elő. E fázisátalakulás reverzibilis, de hiszterézis jellemzi.

Anti-ferroelektromos folyadékkristállyal a 4. ábra felületstabilizált kijelző geometriájában háromállapotú kapcsolást tapasztalhatunk; a két ferroelektromos mellett a feszültségmentes anti-ferroelektromos állapot a harmadik. A keresztezett polarizátorokat a rétegnormálishoz igazítva az anti-ferroelektromos állapot sötét lesz, míg a két ferroelektromos egyformán világos. Az anti-ferroelektromos kijelző így a nematikushoz hasonlóan polaritásfüggetlenül vezérelhető, de gyorsabb. Alkalmazásának egyelőre korlátot szab az orientáció (a rétegnormális irányának) gyakori



5. ábra. Hajlott törzsű molekula szerkezete, hossz tengelye (\mathbf{n}) és dipólmomentuma (\mathbf{P})

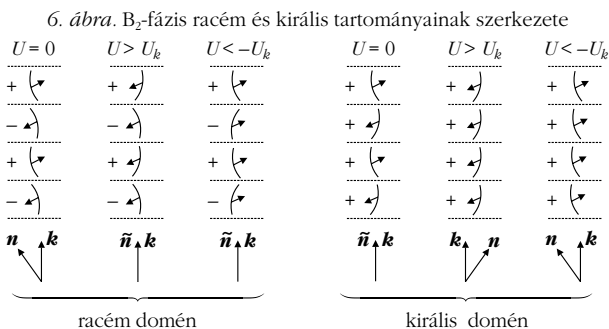
inhomogenitása miatt lecsökkent kontraszt. Megoldást jelenthetnek a közelmúltban előállított, $\vartheta = 45^\circ$ dőlésszögű anti-ferroelektromos folyadékkristályok. Bár a dőlt szmektikusok optikailag kéttengelyűek, kivételesen e 45° dőlésszög esetén az anti-ferroelektromos állapot egytengelyű; az optikai tengely a rétegnormálisra és a direktorra egyaránt merőleges [8]. Így a 4. ábra geometriájában az anti-ferroelektromos állapotban a fény az optikai tengely irányában terjed, a keresztezett polarizátorok között a rétegnormális irányától függetlenül teljes kioltást, azaz megnövelt kontrasztot kaphatunk.

A fenti optikai tulajdonságok polarizátorok nélküli kijelző készítését is lehetővé tehetik [8]. Ehhez szándékosan hozunk létre olyan inhomogén orientációt, ahol a rétegnormális iránya kisméretű tartományokban véletlenszerűen változik. Az anti-ferroelektromos állapotban az egyes tartományok optikai tengelyei egybeesnek, a fény intenzitásvesztés nélkül áthaladhat, míg a bekapcsolt, ferroelektromos (kéttengelyű) állapotban a tartományok eltérő optikai tengelyei miatt erős fényszórást kapunk.

Hajlott törzsű folyadékkristályok

Folyadékkristály-állapotra általában rúd, vagy korong alakú molekuláknál számíthatunk. 1996-ban fedezték fel, hogy hajlott törzsű – banán (ij) alakú – molekulák is lehetnek folyadékkristályok [9].

A banán alakú folyadékkristályok kétdimenziós építőelemek, a molekula két fele egymással körülbelül 120° tompaszöget zár be (5. ábra). A direktort kijelző „hossztengelyt” a molekula végeit összekötő egyenessel (az ij húrjával) párhuzamosnak tekinthetjük, az eredő molekuláris dipólmomentum általában erre merőleges. E molekula-geometria a legszorosabb térkitöltés esetén poláros elrendeződést eredményezhet, mely korábban ismeretlen, úgynevezett *banánfázisokban* (B_1, B_2, \dots, B_8) testesülhet meg.



Ha a poláros elrendeződés dőlt szmektikus szerkezettel jár együtt (pl. B_2 -fázis, melynek modelljét a 6. ábrán mutatjuk be [10]), anti-ferroelektromos, illetve ferroelektromos viselkedést annak ellenére is kaphatunk, hogy a molekulák nem királisak (a korábban ismert ferroelektromos folyadékkristályok szükségszerűen mind királis molekulákat tartalmaztak). A szoros térkitöltés a molekulák hossz tengely körüli szabad forgását meggátolja. Így poláros rend jön létre, melyben a molekuláris dipólmomentum (és ezáltal a szmektikus réteg polarizációja) a rétegnormálissal és a molekula hossz tengelyével vagy jobb- (+), vagy bal-rendszer (-) képez, azaz a szerkezet kiralitást eredményezett.

Nem királis folyadékkristály esetén a kétfajta molekula (antipód) azonos számban van jelen. Racém szerkezetet kapunk, melyben a rétegek felváltva a (+) és (-) antipódot tartalmaznak. Tér hiányában a struktúra anti-ferroelektromos, a szomszédos rétegek polarizációja ellentétes, de a dőlés iránya megegyezik. A rétegekkel párhuzamos elektromos tér hatására a rendszer átkapcsol ferroelektromos állapotba, ahol a polarizáció minden rétegben a tér irányába mutat, de a dőlés iránya rétegenként alternál.

A polarizációs mikroszkopos megfigyelések azonban kimutatták, hogy a fenti kapcsolat mellett a B_2 -fázisban spontán királis szeparáció is bekövetkezhet. Ennek során a mintában királis domének alakulnak ki, melyek vagy csak (+), vagy csak (-) antipódot tartalmaznak (minden rétegben). A kétfajta domén összetérfogatának természetesen meg kell egyeznie. A térmentes anti-ferroelektromos struktúra a királis doménben alternáló dőlésiránnyal jár

együtt, míg a ferroelektromos állapotban a dőlés iránya minden rétegben megegyezik. E spontán királis szeparáció nem visszafordíthatatlan folyamat; a racém, illetve királis doménekből álló textúra megfelelően alkalmazott elektromos terekkel egymásba átvihető.



Jelen írás csupán némi ízelítőt adhatott a folyadékkristályokra épülő kijelző-technológiákból és az új kutatási eredményekből. A folyadékkristályoknak sok olyan tulajdonságuk van, melyek megfelelhetnek új, fejlesztés alatt álló, technológiák igényeinek, így a jövőben a folyadékkristályok még szélesebb körű elterjedésére számíthatunk.

Irodalom

1. BATA LAJOS: *Folyadékkristályok. Új anyagok a tudományos kutatás és a gyakorlati felhasználás számára* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1980
2. BATA LAJOS: *Folyadékkristályok* – Műszaki Kiadó, Budapest, 1986
3. ÉBER NÁNDOR, BATA LAJOS: *Folyadékkristályok az optoelektronikában* – Fizikai Szemle 46 (1996) 117
4. M. OH-E, K. KONDO – Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 3895
5. Y. KOIKE, K. OKAMOTO – FUJITSU Sci. Tech. J. 35 (1999) 222
6. BATA LAJOS, ÉBER NÁNDOR, JÁKLI ANTAL: *Ferroelektromos folyadékkristályok* – Fizikai Szemle 46 (1996) 59
7. N.A. CLARK, S.T. LAGERWALL – Appl. Phys. Lett. 36 (1980) 899
8. K. D'HAVE, A. DAHLGREN, P. RUDQUIST, J.P.F. LAGERWALL, G. ANDERSSON, M. MATUSZCZYK, S.T. LAGERWALL, R. DABROWSKI, W. DRZEWINSKI – Ferroelectrics 244 (2000) 115
9. T. NIORI, T. SEKINE, J. WATANABE, T. FURUKAWA, H. TAKEZOE – J. Mater. Chem. 6 (1996) 1231
10. A. JÁKLI, L.-C. CHIEN, D. KRÜCKER, H. SAWADE, G. HEPPKE – Liquid Crystals 29 (2002) 377

ARCKÉPVÁZLAT GOMBÁS PÁL RÓL

Füstöss László
BME TTK Fizika Tanszék

Három év múlva lesz száz éve, hogy *Gombás Pál* megszületett. Nem kötelez tehát semmilyen kerek szám, hogy adatokkal teli ismertetés vagy munkatársi visszaemlékezés szülessen.

Ezek megvannak többfelé, a legjobbak éppen a *Fizikai Szemle* egyes számaiban.

A következő néhány oldal arra keresi a választ, hogy mire emlékezünk Gombás Pálban.

A hatvan évnél fiatalabbak közül kevesen ismerik a nevét, és ha igen, alig tudják hová tenni. Ebben a félig elfelejtett helyzetben nincs egyedül – *Jánossy Lajos, Novobátzky Károly, Szalay Sándor* – így, találomra és ábécérendben sorolva fel néhány nevet – ugyancsak az előző század második harmadának meghatározó szerepű fizikusai voltak, akik azonban nem kaptak Nobel-díjat, sem az amerikai televízióban nem szerepeltek rendszeresen.

Gombás Pál Selegszántón született 1909-ben. A születési hely, a manapság békés burgenlandi falu, a nyelvi meghatározottság szempontjából érdekes; gyerekkorát csaknem kizárólag német és horvát anyanyelvű falubeliekkel töltötte. Ezért volt az, hogy Gombás, ha tehette, szívesen fordította a szót németre.

Apja halálakor egyéves volt, ezért gyerekkorát özvegyen maradt édesanyjával viselhető, de meghatározó

szegénységben töltötte. Tanulni eszmélésétől fogva szeretett, de mert a tandíjmentesség sokszor nem volt elég a megélhetéshez, ezért a tanítva tanulást kellett választania, ami hatásossága miatt ajánlott, ugyanakkor kevésbé élvezetes bevékenység.

A budapesti egyetemre beiratkozni se volt könnyű egy vidéki fiúnak, de a neheze azután jött. Az albérleti költségekkel súlyosbított napi kiadások nélkülözhetetlenné tették a házi tanítóskodást. Szerencsére akadt elég ambíciózus polgár, és a gimnáziumok szigorúak voltak, így egy halk szavú, szelíd arcú, matematikához értő, németül tudó egyetemista könnyen talált fizető tanítványokat. Pontosabb, ha reménybeli tanítványokat mondunk, mert Gombás csak annyit tanított, amennyinek a bevételéből ő maga a legtöbb szabadidőhöz juthatott. Ez már önmagában egy feltételes szélsőérték-feladat volt, aminek helyes megoldása vezetett a szabadidőért vásárolt tudáshoz.

1933-ban megkapta matematika-fizika szakos tanári oklevelét, megnyílt az út a szolid polgári életkezdéshez. Gombás azonban több kedvet érzett a fizika műveléséhez, mint tanításához, ezért vállalkozott arra, hogy a pesti tudományegyetem elméleti fizika intézetében díjtalan gyakornok legyen. Ennek a díjtalan gyakornokságnak a belátható perspektívája a díjtalan tanársegédség volt –

mindkettő anyagi haszna kizárólag a féléru vasúti jegy váltására jogosító arcképes igazolvány birtoklása. Távlabbi kilátások: egy-egy itthoni vagy külföldi ösztöndíj, majd sok év múlva, tudományos sikerek birtokában, a szóba jöhető három egyetemi tanszék valamelyike. Valójában a tipikusnak mondható *díjtalan* pályafutás egy-két év után egy jó gimnáziumi vagy köztisztviselői munkakörben szokott befejeződni. Az ingyen munkaerő hasznos volt az egyetemnek, és a rövid éhezés általában a kinézett állás minőségében térült meg az átlagon felüli képességekkel rendelkező *díjtalan* részére.

Gombás esetében további fenyegetésnek számított az intézet igazgatója, *Ortvy Rudolf* ny. r. egyetemi tanár, a Tudományos Akadémia levelező tagja. Ortvy sokat tudott a fizikából, és szenvedélyesen érdekelte a modern fizika alakulása. Erőtéljes kitörései sokszor alaposan megviselték környezetét. Gombás, ha már vállalta a folytonos magántanítással járó díjtalanságot, ezzel egyúttal arról is határozott, hogy elviseli Ortvy rabiátusságát az egyetemi környezet, legfőképpen az intézeti könyvtár nyújtotta kutatási lehetőségeikért.

Az indulásnál felmérhető kilátásokhoz képest szerencséje volt, mert hat év alatt – harmincéves korára – elérte az önálló tanszékét. Természetesen a szerencse csak a tehetséges szorgalmasok esetében működik (mármint az a fajta, amelyikről szó van). Ortvy a lényegét illetően azt nyújtotta, amire Gombásnak szüksége volt – a tudományos munka lehetőségét. Az elméleti fizikához ott voltak az alapvető könyvek, a legfontosabb folyóiratok, a téma-választás szabadsága, és ha igény volt rá, akkor Ortvy javaslata is. Egy-egy témához hónapokra pontos programot tudott adni, konzultációkat, és ennyi elég volt az induláshoz. A már elkezdett kutatás részleteibe értelem-szerűen nem szólt bele, inkább arra ügyelt, hogy az eredményekkel arányos legyen az elismerés. Intézte a doktrálás, a magántanári képesítés ügyeit, belföldi és külföldi ösztöndíjakat szervezett, és megfelelően széles körben informálódott az elvégzett munka értékéről.

Ortvy „fáradtságot és munkát nem kímélve négy ízben szerzett belföldi tudományos kutatásra szóló ösztöndíjat. Ez az akkori időben szinte a lehetetlennel volt határos” – emlékezett vissza Gombás ezekre az évekre. Az apa nélkül felnőtt Gombásra nagy hatással lehetett Ortvy gondoskodása. De kapcsolatuk ennél bonyolultabb volt, noha akkoriban egy egyetemi tanár és beosztottja nagyon különböző világokban éltek, közöttük nem kapcsolatról, hanem hierarchikus viszonyról lehetett beszélni. Ortvy indulatrohamai feszültséget teremtettek, de egyúttal valami személyest vittek a távolságtartó hivatalosságba.

Abban teljes volt az egyetértés Ortvy és Gombás között, hogy a fizika tele van érdekes felismerésekkel és megoldatlan problémákkal. A harmincas évek elejére a kvantummechanika legfontosabb eredményei megszülettek, de a kísérletekkel egyező számszerű eredmények csak a hidrogénre léteztek. A numerikus számításokat illetően a harmincas évek a hélium évtizede volt. *Szent-Györgyi Albert* még az ötvenes években is arról panaszkodott, hogy amikor fizikusoknak elárulja, hogy az élő szervezetben kettőnél több elektron van, többé nem állnak szóba vele.

Az atomfizikai többtestprobléma egyik ígéretes eszköze volt a statisztikus atommodell. Gombás hamar átlátta, hogy itt hasznát veheti a klasszikus elektrosztatikában meglévő jártasságának, és nagy elszántsággal látott hozzá a numerikus számításokhoz. 1939 végéig külföldi folyóiratokban 19 cikke jelent meg, közülük 3 készült szerzőtársal. A magyar nyelven megjelent írásokat is figyelembe véve 30 felett volt ekkor publikációinak száma, közöttük sokak által és gyakran idézett cikkek a statisztikus modell alapjairól és a pszeudopotenciálokról.

Ez a teljesítmény önmagában még nem vezetett volna ki a díjtalan státusból, ha *Bay Zoltán* távozásával (a Tungstram kutatólaboratóriumának élére) nem üresedik meg a szegedi egyetemen az elméleti fizika tanszék. De megüresedett, és Ortvy arról számolhatott be *Neumann*hoz írt levelében, hogy „Itthon végre eldőlt a szegedi tanszék ügye Gombás kinevezésével, aminek igen örültem. Igen erős nyomás volt különböző helyekről *Szél*l érdekében, de végre oly megoldást találtak, hogy Gombás megy Szegedre és Debrecenben felállítottak egy elméleti fizikai tanszékét, amelyre Széllet fogják kinevezni.”

A kinevezés hátterére jellemző *Gelei József* Szegedről Ortvyhoz intézett levele, amelyben beszámol Gombás érdekében *Szily* államtitkárnál tett látogatásáról. Gelei megütközve tapasztalta, hogy a másik jelölt mellett csak a korára és az egyházi támogatásra vonatkozó érvek szólnak. „Ti is vegyetek igénybe mindennemű egyházi támogatást is ... Karunkban ma egyetlen katolikus ember sincs, csupa protestánsok vagyunk. Tehát menjetek el *Serédy*hez és mozgassatok meg mindent, hogy *Hómann*nál a Gombás kinevezését a legerélyesebben szorgalmazza.”

Gombás tehát megkapta kinevezését a szegedi egyetemre, de még berendezkedésre sem volt ideje, mert 1940-ben a Ferenc József Tudományegyetemet visszahelyezték Kolozsvárra. Gombás Kolozsvárra került, és a nagyon zajos időkben igyekezett nyugalmat találni, elsősorban eredményei rendszerezéséhez, rögzítéséhez. Így született meg 1943-ban a kolozsvári egyetem kiadásában a *Bevezetés az atomfizikai többtestprobléma kvantummechanikai elméletébe* című majd' 200 oldalas monográfiája. És már valami iskolaféle is kezdett csírázni, ami a három háborús év alatt nem is juthatott ennél tovább. *Fényes Imre* visszaméltóztatása kifejezetten utalnak erre: „Gombás a szobájába hívott és közölte: ha magam is akarom, felvesz az intézetbe díjtalan gyakornoknak. Hogy akartam-e? ... Magyarországon aligha lehetett valaki szerencsésebb, mint az, aki Gombás intézetébe kerülhetett tanulónak.”

1943-ban meghalt a budapesti Műegyetem Fizika Tanszékének professzora, *Pogány Béla*. A Műegyetem meghívta Gombást a Fizika Tanszék vezetésére. Gombás elfogadta a meghívást, és a továbbiakban élethosszig hű maradt a Műegyetemhez (legalábbis földrajzilag).



A háború után egy darabig romokat kellett takarítani, majd hozzákezdeni a tanításhoz a maradék épületekben. Új feladat volt gépészmérnököknek fizikát tanítani. A legnagyobb próbatétel azonban a szűken vett szakmában, az atom statisztikus elméletében 15 év alatt felhalmozott tudás rendszerezése, egyetlen monográfiába sűrítése volt. 1949-ben jelent meg Bécsben, a Springer kiadá-

sában a *Die statistische Theorie des Atoms und ihre Anwendungen*, amit majd csak az orosz kiadás után, 1955-ben követett a magyar fordítás, *Az atom statisztikus elmélete és alkalmazásai*. Közben azonban fontos dolgok történtek Gombással.

Gombást 1946-ban választotta az MTA levelező, majd néhány hónappal később rendes tagjává. Szegedi megismerkedésük óta változatlanul nagy hatással volt rá Szent-Györgyi lenyűgöző temperamentuma és lelkesedése, majd a fordulat évéhez közeledve a kiábrándulás fázisait is hasonlóan, bár természetének megfelelően visszafogottabban élte meg. A demokratikus berendezkedésről lemondani kényszerülő országban a politikai hangoskodás Gombásban is riadalmat keltett, és igénybe véve Szent-Györgyi kapcsolatait, 1947-ben ő is az Egyesült Államokba távozott.

A szinte kizárólag németül publikáló, angolul nem jól tudó Gombást az USA-ban nem fogadták azzal a megkülönböztetett tisztelettel, amihez itthon hozzászokott. A monográfiája előkészítésén dolgozhatott, de ezt megtehetette otthon is, így néhány hónap amerikai vendégeskedés után Révai Józsefnél érdeklődött, hogy mi lenne, ha hazamenne. Révai, kulturális kérdésekben élet és halál ura, hamar átlátta, hogy mennyire előnyös, ha egy nagy magyar fizikus csalódik az imperialistákban és hazajön.

Gombás tehát 1948-ban hazajött, és helyzetében megerősödve vezette tovább a műegyetemi tanszékét, a Tudományos Akadémián pedig a vezetőségbe választották; tíz éven keresztül volt az Akadémia alelnöke. Még abban az évben megkapta a Kossuth-díj arany fokozatát, majd két évvel később ismét. A hivatalos tudománypolitika végre önmagával elégedetten ismert el egy nagy tudóst nagy tudósnak. Úgy képzelte, hogy ezzel védhetetlen kinevezéseit, kitüntetéseit is megalapozza. A valóságban gyanakvást keltett azzal az akadémikusai átlagnál majd húsz évvel fiatalabb fizikussal szemben, akinek viselkedése amúgy is rejtélyes volt, hiszen minden kényszerítő ok nélkül hazajött Amerikából.

Gombás Pál hazaérkezése után a proletárdiktatúra pártönkívüli szerencsefiának számított. Ki is használta ezt a helyzetét; közvetlen vonal kötötte össze a Pártközponttal, azon belül is Révai titkárságával. Aki valamit el akart érni, az ilyen vonalról álmodozott akkoriban. Szerencsére Gombás csak nyugalmat akart, ezért csak olyankor használta a telefont, ha a helyi pártszervekkel nem tudott megegyezni. Vagy amikor egyik munkatársa feljelentette, felforgató magatartással vádolva Gombást (egy tankönyvbírálattal kapcsolatban); egy órával később rendkívüli tanszéki értekezleten ismertette Gombás a feljelentés szövegét, negyven percet adva az elkövetőnek a végleges távozásra. A mindennapi gyakorlatban nem a közvetlen vonal volt a fontos, hanem annak a tudata; a nyugalomhoz elég a hatalom lehetősége, alkalmazására már alig van szükség.

1949-ben megjelent Bécsben nagy monográfiája az atom statisztikus elméletéről, ami minden hozzáértő számára nyilvánvalóvá tette, hogy jelentős alkotó fizikusról van szó. Rendelkezett tehát annyi hatalommal és tekintéllyel, amennyivel egy egyetemi tanár egyáltalán rendelkezhetett, mégsem volt elégedett. Azt a *független nyugal-*

mat hiányolta, ami Ortway mellett részben számára is létezett, és amelyről azt képzelte, hogy főnöke hiánytalanul birtokolja. A műegyetemi fizika tanszék az ábrándokkal szemben nagy volt és mozgalmas. A nagy létszám megtartásához sok oktatási feladat teljesítésével kellett elszámolni (szükség esetén ugyanezt meg lehetett fogalmazni fordított sorrendben).

1949-ben megalakult a Villamosmérnöki Kar, ami a fizika tanszék számára örvendetes oktatási feladat-többletet jelentett. Csakhogy az időközben uralkodóvá lett szovjet mintának megfelelően az oktatási terhelést – a kötelező óraszámot – úgy szabták meg, hogy amellet tudományos munkára idő alig maradt, legfeljebb a marxista továbbképzésre. Díjtalan gyakornokok helyett rosszul fizetett adjunktusok és tanársegédek alkották a tanszék derékhadát, akikben vagy volt tudományos ambíció, vagy nem, feladatuk mindkét esetben a nappali, esti és levelező képzésben a számolási és laboratóriumi gyakorlatok vezetése volt.

Ha rosszkedvűen is, Gombás alkalmazkodott az új helyzethez, és a kikerülhetetlen osztályharcban ellenséges személyek bűjtatására vállalkozott: származásuk alapján megbélyegzettek vett fel, akiket egyetemen személyzeti előadó szóba hozni sem mert volna. A zárkózott, konfliktuskerülő professzor az egzisztenciális gondokra fogékony és segítőkész volt. Révai József bizalmasa, aki a hangos szótól is megriadt, nem csinált titkot valóságosságából; a hivatalos dolga volt, hogy rendszeresen postára adja a felosztott katolikus szerzetesrendeket támogató adományait.

A Szovjetunióban az egyetem a tömegoktatás színtere lett, a tudomány kutatóintézetekbe költözött, a tervezettség részeként. Ennek mintájára 1950-ben itthon létrejött a Központi Fizikai Kutató Intézet. Az erők ésszerű összpontosítását jelentő KFKI erősödésének az egyetemek voltak a kárvallottjai. Gombás nem nézte tétlenül a folyamatot: „Kiharcolta például, hogy létesítsenek a KFKI-ban egy elméleti fizikai osztályt. Ebben az időben ugyanis szinte minden energiát a KFKI fejlesztésére szántak. Aztán amikor létrehozták az osztályt, önállósította magát, és úgy ahogy volt, áttelepítette az egészet a Műegyetemre. Ebből lett a ma is működő Elméleti Fizikai Kutatócsoport. Ennek létrehozása a trükk nélkül teljesen lehetetlen lett volna.” (*Kovács István*, a KFKI első igazgatójának visszaemlékezése.)

Az Elméleti Fizikai Kutatócsoporttal végre újra elemében érezhette magát. A Csoportba új tehetségek kerülhettek – aspiránsok, tudományos munkatársak, köztük olyanok is, akiknek Gombás numerikus számításai jutottak. Ezt a különös munkakört elsősorban nemrég érettségizett vagy friss tanári diplomával, de kevés pedagógiai ambícióval rendelkező hölgyek töltötték be. Gombás csoportjában a mechanikus szorzógépek kallantyújával folytatott szüntelen küzdelem egy hagyományos szövőgyár munkarendjére emlékeztetett. De ahogy egy szövőteremben is kialakul a békés szolidaritás, többnyire a kiszámító üzemben is jó volt a hangulat. Gombás kíváncsi volt a számítások eredményére, és hálás volt munkatársainak, ezért igyekezett minél többet tenni a jó légkör érdekében. A század elején épült F(izika) épületben rengeteg

hely volt, pihenésképpen a széles folyosón felállított pingpongasztalon lehetett játszani, és erre a fáradság első jelénél maga Gombás ösztönözte munkatársait. Ebben az időben még voltak olyan események, amelyeket később elhítni is nehéz volt: „Amikor sor került az évszázad meccsére matematikusok és fizikusok közt, az egyik oldalon *Alexits György*, a másik oldalon Gombás Pál védte a kaput. Nem is rosszul.” (*Marx György* visszaemlékezése.)

Az ötvenes évek közepén Gombás tekintélye magasan állt. A fizikusok szakmai egyesületének, az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak elnöki tiszte a szakma elismerése volt. 1956-ban tetőzött a nemzetközi megbecsülés a *Handbuch der Physik*ben megjelent 120 oldalas Gombás-tanulmány, a *Statistische Behandlung des Atoms* hatására.

Ez az 1956-os év itthon mindenkit megmozgatott, a kívülállókat is: „Gombást politikai kívülállása, pártonkívülisége alkalmassá tették arra, hogy '56-ban megválasszák az Akadémia akkori Nemzeti Bizottsága alelnökének. Ő persze ezért nem tett semmit, jelen sem volt, semmilyen politikai elkötelezettséget nem vállalt a rendszer ellenségeivel sem, csak éppen megválasztották. Ezután soha többé nem lehetett alelnök; kis folt keletkezett a lapján.” (Kovács István)



Az a bizonyos folt egy ideig nem is volt észrevehető. *Kádárék* kisebb gondja is nagyobb volt annál, mintsem ártalmatlan elméleti fizikusokkal huzakodjanak. Később meg az *aki nincs ellenünk, az velünk van* jelszava által kijelölt játéktér elegendőnek bizonyult Gombás számára. A folt azonban megvolt, és minthogy informális felső kapcsolata elveszett, addig nyújtózkodhatott, ameddig a Kossuth-díjas akadémikusság takarója ért. Nem lehetett például egyszerre több vezető állása, ezért az elméleti Kutatócsoport igazgatójaként, mint félállású tanszékvezető tevékenykedett a továbbiakban. A megállapodást szigorúan betartotta: a kétszer ötven perces előadás szünetéig ő beszélt, majd a tervezetből hátralévő – a felénél mindig jóval nagyobb – részt az ügyeletes adjunktusnak kellett elmondania.

A villamoskari kényszerű egyezkedésnél feltehetően nagyobb gondot jelentett akarata érvényesítésének tanszéken belüli korlátja. Gombás 15 éven keresztül nem tudott mit tenni az ellen, hogy a szemináriumokon a tanszék másik professzora, számos magas állami és pártfunkció birtokosa, egyik cigarettáról a másikra gyújtson, lévén rendíthetetlen láncdohányos. Láncdohányosok voltak a tanszéken többen is, de Gombás jelenlétében cigarettára gondolni sem mertek. Gombás mindentől rettegett, ami az egészségre káros lehet. Nem adott kezét, nem fogta meg a kilincset, az ajtót jellegzetes vállrántással bevezetve könyökével nyitotta ki. A szemináriumokhoz azonban ragaszkodott – arcán a kétségbeesés, de kitartott füstölgő professzortársa mellett.

A még Szegedről munkatárs *Kónya* professzonnal kölcsönösen tegeződtek. Gombás egyébként minden férfi munkatársát tegezte, de a kölcsönösség professzori privilégium volt. Nem volt ezzel egyedül, számos tanszéken cifrább vezetői elvárásoknak kellett megfelelni, csak éppen Gombás választékos stílusa mellett volt meglepő,

különösen hasonló korúak vagy idősebbek esetében. Gombás a tegezést közeledésnek szánta, és valahogy nem ébredt rá a felemás következményekre. Akadémikusokkal, miniszterekkel és kezdő tanársegédekkel, megtalálta a korrekt, gyakran szívélyes hangot – legkritikusabb adjunktusaival szemben volt.

Egyik szemináriumon éppen valami számolás nehézségei miatt panaszkodott – szeretett panaszkodni, különösen az egészségére, de napi gondjaira is –, amire egyik hasonló számolási gondokkal küzdő adjunktusa megjegyezte, hogy *...bát igen professzor úr, a nép is azt mondja, hogy minden számár a maga terbét érzi*. Ezt soha nem tudta megbocsátani, hogy őt nyilvánosan leszamarazták – az illető a továbbiakban csak név és lakcím szerint publikálhatott, tanszéki munkatársként csak tanítania volt szabad.

A vezetői nehézkesség ellenére a jó hangulat jellemezte a tanszék és a kutatócsoport hétköznapjait. Ez néha zavarta is Gombást, aki vasszorgalmú fiatalkorára emlékezve kellő elszántságot várt el másoktól is. Ezt elősegítendő, alkalmanként reggel nyolckor elhelyezkedett a bejáratnál, és feljegyezte a különböző beérkezési időpontokat. Vagy boros nyár eleji napon hazaautózott a Balatonról, és többnyire azt tapasztalta, amit sejteni lehetett, hogy az intézet félig üres (vagy félig tele van). Mindez csak morgolódásra vezetett, ami azonban meglepően hatásosnak bizonyult. A tucatnyi munkatárs megbízhatóan végezte a számításokat, és a hatvanas évek elején még a legeredményesebbek is megmaradtak a statisztikus elmélet keretei között.

A hatvanas évek ahogy haladtak – ami Gombás számára az ő ötvenes éveit jelentette – munkálkodása elsősorban eredményei rendszerezésére irányult. A pszudopotenciálokról 1967-ben megjelent karcsú monográfiája is összefoglalás, de még inkább így van ez a társszerzőként jegyzett terjedelmes munkákkal, amelyekben a negyvenes években félretett előadásvázlatok alapján állított össze majd kétezer oldalt *Kisdi Dávid* arról, ami a fizikában nélkülözhetetlen. Különösen sikeres közös vállalkozásnak bizonyult a *Bevezetés a hullámmechanikába és alkalmazásaiba*, ami már majdnem királyi útnak számít ehhez a sokak által tervbe vett, de kevesek által elert tartományhoz.

Gombás születésének hetvenötödik évfordulójára Marx György azt írta, hogy „...amikor eltávozott, befejezett művet hagyott hátra”. Utolsó éveinek programja szerint valóban erre törekedett. Talán nem tervszerűen, csak amennyire mindenki tudatában van halandóságának, és ez a tudat az erő csökkenésével automatikusan érvényesülni képes. A tudományos közéletben a lehető legkisebb mértékben vett részt. A külföld számára azt az olaszországi családi üdülőt jelentette, amit örökség révén rendszeresen látogatható, és a hatvanas években következetesen ott is töltötte a májustól szeptemberig tartó nyári szabadságát. Ilyenkor a felesége vezetett, feltehetően az Akadémia megszokott gépkocsivezetőjétől eltérő stílusban, mert makacsul élt a legenda, hogy a hegyvidék élesebb kanyarai előtt Gombás kiszállt, és gyalogolt néhány száz métert, amíg ismét áttekinthetőnek látszott az út.

Pedig már indulás előtt szigorú intézkedések történtek az út sikere érdekében. A munkatársak közül a gondosan

nyilvántartott adatok alapján kiválasztották a legfiatalabb férfit, aki köteles volt az indulásnál megjelenni és jókivánságaival az utazás szerencsés kimenetelét elősegíteni. Előfordult, hogy ezután az öreg pedellus is jó utat kívánt – vissza kellett fordulni és megismételni a ceremóniát a fiatalal.

Gombás Pál 1971-ben a hazai fizikus társadalom elismert személyisége volt, akit életművéért mindenki tisztelt. Igaz, a tökéletesedő számítógépek arra figyelmeztettek, hogy a kiszámításoknál a nyers erő fog győzni a közelítések szellemes trükkjei felett. A számítógépek tudomásul vételét nyugodtan tanítványaira, fiatalabb munkatársaira bízhatta. Sokasodtak a jelek, amelyek egy fizikai intézet szerveződésére utaltak, de ennek megvalósulására legjobb (legrosszabb) esetben is csak akkor kerülhetett sor, amikor a vezetéstől életkora miatt amúgy is meg kellett válnia.

Gyermektelen, békés házasságban élt harmadik feleségével. Egészsége látszólag hatvankét évének megfelelő volt, félelmein túl csak ismétlődő fejfájásai kínozták. A fájdalom a tökéletes magánügy – aki képtelen elviselni, arról joggal mondjuk, hogy elviselhetetlen fájdalmai vannak. Ő azonban közeli munkatársai visszaemlékezései szerint jobban félt attól, hogy a fájdalmait agydagaganat okozza, mint amennyire a migrén kínozta.

Megvolt az esedékes szeminárium azon a bizonyos májusi napon is, utána a könyvtárszoba nehézkesen nyíló ajtajának kilincsére nehezedő könyvekkel utat csinált magának a folyosóra, szobájában alkalmas helyre rakta a búcsúlevelet, majd megette az utolsó fél kilométert a villamosokkal teli Bartók Béla úton, hogy vagy 15 méter zuhanás után egy bérház belső udvarán végezze.

Mondhatnak bármit a moralisták: a leugráshoz ugyanaz az elszántság kell, akár egyedül, akár egy törököt magunkkal rántva hajtjuk végre. Ennél nagyobb titok a hozzákészülés időszaka. Tény, hogy az elméleti fizikusoktól nem idegen az öngyilkosság. *Boltzmann* és *Ehrenfest* szakmai indítékai közismertek – az elsónél a hiányos elfogadottság, a másodiknál az elégedetlenség saját szakmai teljesítményével. De öngyilkos lett Ortvay is, aki mellett Gombás hat évet töltött – őt a háborús feszültség és kilátástalanság roppantotta össze hatvanadik születésnapján.

Túl azon, hogy munkássága része a magyar fizikatörténetnek, a Gombás által legeredményesebbé fejlesztett statisztikus atomelmélet, mint viszonylag egyszerű és könnyen kezelhető modell ma is használatos például a kvantumkémia vagy a nanotechnika egyes problémáinál. Az arcképvázlat azonban véget ér a halállal, hiszen az az emberről szól, ahogy mások számára létezett.

SZÁZ ÉVE SZÜLETETT DETRE LÁSZLÓ

Detre László (1906–1974) a huszadik századi magyar tudományosság egyik meghatározó személye volt, tudományos és szervező tevékenységével nemzetközi szintre emelte a hazai csillagászati kutatásokat.

Tudományos kutatóként a pulzáló változócsillagok vizsgálatával foglalkozva mindmáig a nemzetközi élvonalba tartozó iskolát teremtett. Alapvető kutatási eredményeit a rövid periódussal pulzáló RR Lyrae típusú változócsillagok vizsgálata terén érte el. Leginkább az ilyen csillagok oszcillációjában fellépő hosszú periódusú moduláció (Blazsko-effektus), illetve a pulzáció periódusában bekövetkező hosszú időskálájú változások érdekelték.

Ugyancsak az ő nevéhez köthető a Pizskéstetői Observatórium létrehozása, melynek felszerelése, az oda került távcsövek is a szerinte hazai körülmények között ígéretesnek tartott kutatási iránynak feleltek meg. Elsőként, az 1960-as évek elején egy 90 cm tükörátmérőjű Schmidt-teleszkóp, amely lehetővé tette a stellárstatisztikai kutatások hazai megkezdését. 1966-tól üzemel az 50 cm-



es Cassegrain-távcső, míg éppen Detre halálának évében kezdtük használni az 1 méteres Ritchey–Chrétien-teleszkópot, amely azóta is a legnagyobb csillagászati műszer hazánkban. E két utóbbi távcső elsősorban fotometriai célú megfigyelésekre használható, vagyis a Detre által művelt téma folytatására, illetve kiterjesztésére.

Tevékenységének harmadik vonulata, amely ugyancsak kedvezően hatott a magyar csillagászatra, a nemzetközi kapcsolatok ápolása. Egyformán szoros kapcsolatokat tartott fenn a nyugati világ vezető asztrofizikusaival és a baráti tábor országaiban dolgozó csillagászokkal, ami az ötvenes és hatvanas években egyáltalán nem volt természetes. A kelet és nyugat közötti szakmai együttműködés egyik jellemző példája, hogy a változócsillagokkal foglalkozó szakemberek találkozva Budapesten és Bambergben tartották konferenciájukat. A budapesti kollokviumoknak természetesen Detre volt a fő szervezője. Nemzetközi elismertségének eredményeként egy-egy hároméves cikluson át ő töltötte be a Nemzetközi Csillagászati Unió változócsillag-bizottsá-

gának alelnöki (1964–1967), majd elnöki tisztét (1967–1970). A kezdeményezésére megindított *Information Bulletin on Variable Stars* változócsillagászati gyorskiadványt annak 1961-ben megjelent első számától kezdve az MTA Csillagászati Kutatóintézetében szerkesztik és adják ki.

Bár az általa művelt kutatási téma viszonylag szűk területe volt az asztrofizikának, közismert volt Detrének a teljes csillagászatot átfogó naprakész tájékozottsága. Tudományos eredményeit mindmáig idézik a változócsillagokkal foglalkozó asztrofizikusok. Munkássága azért időtálló, mert mindig az abban az időszakban a legprecízebb

mérési technikát alkalmazta, és a megfigyelési adatok feldolgozása és értelmezése során ugyancsak a maximális pontosságra törekedett.

Detre László születésének centenáriumán az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete – amelynek Detre több mint három évtizeden át igazgatója volt – emlékülést szervez. Az április 20-án sorra kerülő rendezvényen több olyan külföldi csillagász is részt vesz és előadást tart, aki egykor személyesen is szakmai kapcsolatban állt Detre Lászlóval.

Szabados László

RIBÁR BÉLA

1930–2006

Ribár Béla, az Újvidéki Egyetem professzora, a Szerb és a Vajdasági Tudományos Akadémia tagja és nem utolsósorban a Magyar Tudományos Akadémia külső tagja, a vajdasági magyar tudományosság kiemelkedő alakja, mondhatjuk első számú szervezője és alakítója volt, 2006. március 22-én Újvidéken elhunyt.

Halálának körülményei bizonyos értelemben életét mintázzák. Márciusban részt vett az MTA Magyar Tudományosság Külföldön Elnöki Bizottság kolozsvári ülésén, de ott olyan szerencsétlenül esett el, hogy többé nem

épült fel: helikopterrel hazaszállítva alig két hetet élt még a baleset után, és otthon hunyt el.

Ribár Béla a kristályszerkezet-kutatás nemzetközileg elismert képviselője, neves nemzetközi folyóiratok szerkesztőbizottságának tagja, akinek közel kétszáz tudományos közleménye jelent meg, amelyekre mintegy ezer hivatkozás történt a nemzetközi irodalomban.

Ribár Bélát gyászolja a magyar és a szerb tudományos közösség és mindezen túl az egyetemes tudományosság.

Berényi Dénes

A FIZIKA TANÍTÁSA

KÉSZÍTSÜNK NAPÓRÁT!

A teljes napóra készítése kellemes és hasznos időtöltés. Az eredménye szép, amint azt példázza a címlapon is látható, a gyöngyösi Berze Nagy János Gimnázium egyik belső terasza felett található óra. A példa azt is mutatja, mit értünk teljes napórán: nem csupán az adott napon mutatja a napszakot, hanem az adott évszakon belül a dátumot is.

Azt hihetnénk, hogy napórát készíteni a legegyszerűbb dolog. Kell hozzá egy pálca, egy év türelem és folyamatos napsütés; ettől kezdve nincs más dolgunk, mint a pálca hegyének árnyékát időnként megjelölni. Ez a tapasztalati módszer azonban csak elvileg kivitelezhető: túlságosan fáradságos és bizonytalan is, hiszen felhős időben nem alkalmazható.

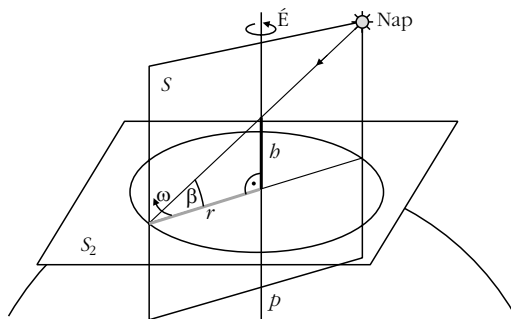
¹ Engem a Nap, benneteket az árnyék vezérel.

Kiss Miklós

Berze Nagy János Gimnázium, Gyöngyös

„Me Sol, vos umbra ducit.”¹

Napórát mégis készíthetünk egyszerűen! Ha ismerjük az árnyék mozgásának *fizikai hátterét*, a pálca hegyének árnyékát számolással meg is *jósolhatjuk*. (A napóra elkészítéséhez ugyan csupán mértani ismeretekre van szükség, azonban amögött, hogy az árnyék mozgása évről évre ugyanúgy megjósolható, a newtoni mechanika egyszerű törvényei vannak.) A Föld a Nap körül kis excentricitású ellipszispályán halad, melynek síkjára a Föld forgástengelye nem merőleges, hanem a merőlegeshez képest 23,5 fokkal elhajlik. A tengely iránya keringés közben nagyjából a Sarkcsillag felé mutat. Ebből adódik, hogy a Földről nézve a nyári napfordulók a Nap felé dől, téli napfordulók éppen ellenkező irányba, míg napéjegyenlőségek alkalmával a napsugarak irányára merőleges; az égen való haladás magassága az évszaktól függ. Nálunk sosem delel függőlegesen a Nap, hiszen



1. ábra. Napóra az Északi-sarkon

csak a Ráktérítőig jut el júniusban, ekkor a legnagyobb a delelés szöge, mintegy 66,5 fok, decemberben a legkisebb, ekkor csak 19,5 fok. A Földről nézve tehát úgy látjuk, hogy a Nap az egyenlítő síkjához képest egy év alatt egy teljes rezgést tesz meg 23,5 fokos amplitúdóval. Ez persze csak közelítés, mert a Föld pályája nem kör, de nem rossz közelítés. Ezzel a közelítéssel egy egészen jól „működő” napórát szerkeszthetünk.

A napóra nagyszerűsége abban rejlik, hogy nemcsak az időt, de a dátumot is mutatja az árnyék iránya és hossza segítségével. Ennek megértése érdekében a következőkben részletesen áttekintjük a különféle napórák mutatója árnyékának helyzetét. Egyelőre nem törődünk a nyári időszámítással és a zónaidővel; ezeket az alapok megértése után könnyen figyelembe vehetjük.

Az óraszög

Elsőként gondoljuk át a Föld forgásából adódó következményeket, amit legkönnyebben úgy tehetünk meg, hogy gondolatban az Északi-sarkra helyezzük magunkat [1].

Ha az Északi-sarkon állunk a nyári félévben (március 21. és szeptember 23. között), a Föld forgásából adódóan azt tapasztaljuk, hogy a Nap az égen egyenletesen körbejár. Június 22-ig napról napra magasabban halad, utána alacsonyabban. Az első és utolsó napon pedig a látóhatár peremén jár körbe. Egy napon belül a magasság nem változik számottevően, nyugodtan mondhatjuk, hogy körbejár 24 óra alatt. A szögsebesség $\omega = 360^\circ / 24 \text{ h}$, azaz 15 fokot halad óránként, egy fokot pedig négy perc alatt tesz meg.

Szúrjunk le most egy pálcát merőlegesen az Északi-sarkon. Az említettekből adódóan a pálca árnyéka is egyenletesen körbejár a pálcára merőleges, az Északi-sarkon átmenő úgynevezett egyenlítői (ekvatoriális) síkon, 15 fokot haladva óránként. Egy nap alatt a pálca végpontja egy teljes kört jár be (1. ábra, az ábrákon használt jelöléseket a cikk végén összegezve megtalálhatjuk). A kör sugara hosszabb távon változik, a nyári napfordulónál a legkisebb ($r = b/\tan 23,5^\circ$, ahol b a pálca hossza, r a kör sugara). A nyári félév első és utolsó napján az árnyék hossza „végtelen”, a sikkal párhuzamosan beeső napsugarak következtében.

Minden napra igaz, hogy a pálca csúcsán átmenő napsugár és árnyék által kifeszített sík a Föld forgástengelye (poláris tengely) körül egyenletesen, a Földhöz képest keletről nyugatra a megadott szögsebességgel forog (1.

ábra). A továbbiakban ezt a síkot *óraszög-síknak* fogjuk nevezni, ez lesz számításaink egyik alapja. Az *óraszögön* pedig értsük az óraszög-síknak egy előre meghatározott helyzete és az adott időponthoz tartozó helyzete által bezárt szöget. Az előre meghatározandó viszonyítási helyzetet saját hosszúsági körünk észak–déli vonalával azonosítjuk. Magát a $\varphi = \omega t$ szöget ennek megfelelően mérhetjük nulla órától, de lehet 12 órától is mérni.

Ha átmegyünk Föld egy másik pontjára, például Gyöngyösre, akkor magunkkal visszük az egyenlítői és az óraszög-síkot. A Nap járását napkelte és napnyugta között ugyanolyannak látjuk itt is, illetve más szélességi körön minden ugyanígy adódik.

A napórák fajtái

Ha az előző szakaszban megadott pálcát használjuk árnyékvetőnek, vagyis helyzete a Föld forgástengelyével párhuzamos, a mutatópálcát *poláris* helyzetűnek nevezük. A továbbiakban csak a poláris mutatójú napórát tárgyaljuk. A cikkhez kapcsolódó <http://www.berzenagy.sulinet.hu/mikola/km/napora> lapon kitérünk rá, hogy a másféle mutatóállású órák tárgyalása visszavezethető erre. (Minden később hivatkozott kiegészítés is itt található.)

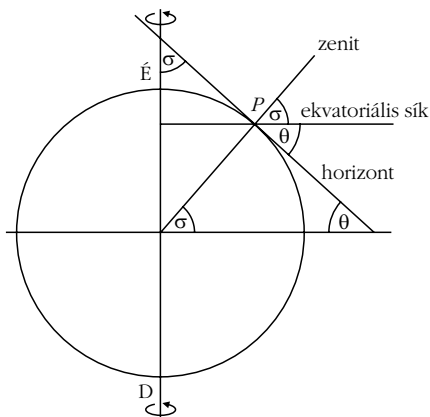
A számlap lehet sík, lehet henger alakú, vagy más is. Mi a síkszámlapú napórákat elemezzük. A számlapsík a legegyszerűbb esetben vízszintes. Ekkor az órabeosztás meghatározása meglehetősen egyszerű, azonban a dátum meghatározásához szükséges vonalak felrajzolása már komolyabb tervezést igényel. Falon elhelyezett napórák esetén a számlapsík függőleges, a fal tájolása azonban tetszőleges lehet. Az alapeset a kelet–nyugati tájolású fal, ami ritkán valósítható meg. Az általános tájolású függőleges helyzetű számlapsík megrajzolása térgeometriai megfontolásokat igényel. Lehet készíteni hordozható napórát is, amely meghatározott szélességi körre készül, előre meghatározott tájolóással.

A Nap magassága

Az általunk választott, Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben a Nap a nyári félévben az egyenlítő síkjával párhuzamos, a megfigyelés pontján átmenő egyenlítői sík felett, a téli félévben alatta helyezkedik el. Ha a Föld Nap körüli mozgását közelítőleg egyenletes körmozgásnak tekintjük (a sugár ingadozása az átlagtávolsághoz képest kisebb mint három és fél százalék), akkor a Nap elhelyezkedését az egyenlítői síkhoz képest a következő összefüggés adja meg:

$$\alpha = 23,5^\circ \sin \left[\frac{2\pi}{365,2422} (nap - 80) \right],$$

ahol *nap* adja meg, hogy az év hányadik napján vagyunk. Adott napon a Nap az így számított α szöggel az egyenlítői sík felett helyezkedik el pozitív α esetén, negatív α -ra pedig alatta. Március 21-e az év 80. napja. Ekkor,



2. ábra. A σ szélességi szög θ pótszögét zárja be a vízszintes sík az egyenlítői síkkal

továbbá szeptember 22-én $\alpha = 0$, ami ugyan nem teljesen pontosan, de jó közelítéssel igaz. A közelítés pontosságára becslést adunk meg a cikkhez kapcsolódó honlapon.

Itt érdemes kiemelni, hogy a két napéjegyenlőség alkalmával a Nap az egyenlítői síkban mozog, vagyis a napsugarak merőlegesek a Föld forgástengelyére, és így a napóra poláris mutatópálcájára is.

A földrajzi szélesség

Szükség lesz a földrajzi helyünk jellemzésére. A 2. ábrán a P pont jelöli helyünket. Itt σ a szélességi szög, θ pedig a 90° -ra kiegészítő pótszöge. A mi helyi koordináta-rendszerünket a vízszintes sík és a függőleges egyenes adja. Az egyszerűség kedvéért tekintsük függőlegesnek a Föld sugarának meghosszabbítását. A földrajzi szélesség figyelembevételével kapjuk a mutatópálca szögét a vízszintes síkhoz, illetve a helyi függőlegeshez: a horizonthoz képest σ , a függőleges egyeneshez képest θ .

Vízszintes síkú napóra

Minden további napórához alapvető az adott földrajzi helyen, vízszintes síkon elhelyezett poláris mutatójú napóra ismerete, ezért ezt tárgyaljuk elsőként. Ennek a napórának a síkja az adott helyen a földgömb érintősíkjával párhuzamos, vízszintes sík, amelyben a poláris mutatópálca árnyéka már nem jár egyenletesen.

A számolások alapja az *óraszög-henger*, amely a következőképpen adódik. Vegyünk egy olyan körhengert, amelynek szimmetriatengelye a poláris egyenes, a merőleges síkmetszete pedig az egyenlítői sík által kimetszett kör (3. ábra). A kör sugara legyen egységnyi, $|r| = 1$.

Metsszük el a vízszintes síkkal a hengert, úgy hogy a sík az egyenlítői kör középpontján menjen át (3. ábra). A henger a vízszintes síkból egy ellipszist metasz ki, amelynek kistengelye az egyenlítői kör kelet–nyugat irányú átmérője. Mint már említettük a Nap látszólagos mozgása során egy a poláris tengely körül forgó síkban az *óraszög-síkban* helyezkedik el. E síknak és a horizont síkjának metszészvonala adja meg a vízszintes óraszöget. Számoljuk ki a γ egyenlítői óraszög függvényében γ'

vízszintes óraszöget (3. ábra)! MÉRJÜK A SZÖGEKET A FORGÓ SÍK DÉLI HELYZETÉHEZ VISZONYÍTVÁ! Vegyünk fel mindkét síkban egy koordináta-rendszert, melyek x tengelye a közös kelet–nyugati egyenes kelet felé irányítva, az y tengelyeket metssze ki a déli napsík. Ekkor $\gamma = 180^\circ - \varphi$,

$$|x| = \sin \gamma, \quad |y| = \cos \gamma$$

és

$$|x'| = |x| = \sin \gamma, \quad y' = \frac{y}{\cos \theta}$$

ahonnan

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2},$$

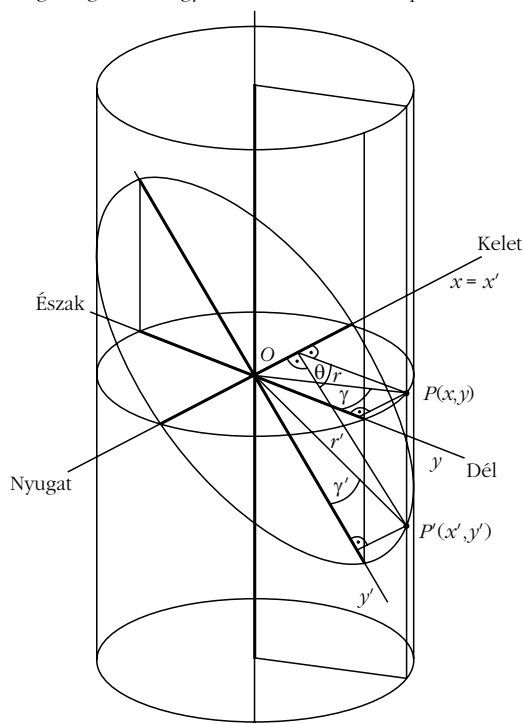
$$\begin{aligned} \gamma' &= \arctan\left(\frac{x'}{y'}\right) = \arctan\left(\frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} \cos \theta\right) \\ &= \arctan(\tan \gamma \cos \theta), \end{aligned}$$

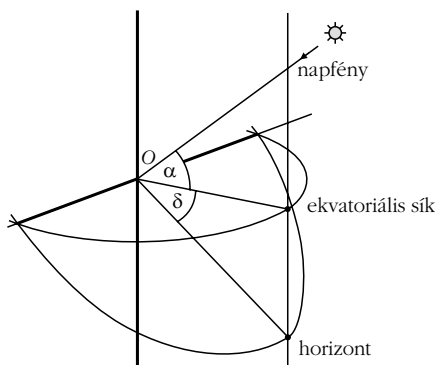
vagy ezzel egyenértékűen

$$\gamma' = \arcsin\left(\frac{x'}{r'}\right).$$

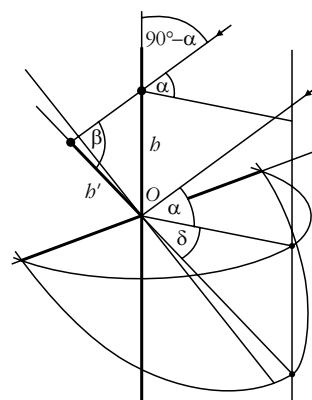
Ezzel meghatároztuk az óraszöget. A következő kérdés a *Nap magassága a horizont felett az óraszög-síkban*. Az óraszög-sík csak délben merőleges a vízszintes síkra. Egy adott nap a Nap az egyenlítői sík feletti magassága két szög összegeként adható meg: a napsugarak és az egyenlítői sík által bezárt a szög (egy napon belül állandónak vehető) és az a δ szög, amelyet az óraszög-síkból az adott pillanatban az egyenlítői és a vízszintes sík

3. ábra. Az óraszög-henger és az óraszög-sík metszete (kör), valamint az óraszög-henger és az egyenlítői sík metszete (ellipszis)





4. ábra. A Nap magasságát az óraszög-síkban meghatározó szögek



5. ábra. A mutató és árnyéka a vízszintes síkon

kimetsz (4. ábra). Ez utóbbi reggel és este hat órákor nulla, délben a földrajzi hely függvénye, például Gyöngyösön $42^\circ 11'$. Ez a szög a POP' szög a 3. ábrán, nagysága $\delta = \arccos(r/r')$. A teljes napmagasság a horizont felett $\beta = \alpha + \delta$. Itt meg kell említeni, hogy a napóra csak akkor használható, ha $\beta > 0$, azaz a Nap a horizont felett van, ami nyári félévben már negatív δ esetén is teljesül, a téli félévben azonban α negatív, így csak δ megfelelően nagy értéke esetén következik be a napkelte.

Szóljunk most az árnyék hosszáról! A mutató a kezdőpontból (O) indul ki és poláris irányú. Árnyéka az óraszög-sík és a horizont metszéspontjára esik. Így a horizontális síkban az északi iránytól óraszögnyivel, γ -vel tér el, amikor az egyenlítői síkban γ -val. Az árnyék hosszát szinusztétellel számíthatjuk (5. ábra)

$$\frac{b'}{b} = \frac{\sin(90^\circ - \alpha)}{\sin \beta} = \frac{\cos \alpha}{\sin \beta},$$

ahonnan

$$b' = b \frac{\cos \alpha}{\sin \beta}.$$

Összegezve, a pálca árnyéka γ -vel fordult el és hossza b' . Ezzel célunkat elértünk, meg tudjuk rajzolni a számlapsíknak a $\gamma(t)$ és a $b'(t)$ függvényekkel paraméteresen megadott vonalait úgy, hogy a napóra nem csak időt, de dátumot is mutasson. (Itt tehát t a teljes dátum.) Az árnyék óraszöge mutatja az időt. Itt meg is állhatunk, és máris egyszerű napórához jutunk. Nem horizontális építésű, de ilyen a chartres-i székesegyház napórája [3], vagy ilyen látható a fraknoi vár egyik belső falán (lásd a képet). Ha az árnyék hosszát is figyelembe vesszük, a dátumot is megmutatja a napóra. Igaz a két szélső helyzetet leszámítva minden ponthoz két nap tartozik, de az évszak alapján el tudjuk dönteni, hol tartunk. A számlapon a szöget az északi iránytól mérjük, a távolságot az O kezdőponttól, és így elkészíthetjük a számlap beosztását.

A szögmérésnél pontosabban tudunk hosszúságot mérni, ezért a polár-koordinátákról célszerű áttérnünk derékszögű koordinátákra, $x' = b' \sin \gamma$, $y' = b' \cos \gamma$.

Az adott időhöz tartozó pontokat ebben a horizontális koordináta-rendszerben bejelölhetjük. Ha összekötjük az azonos időhöz tartozó pontokat, megkapjuk az óravonalakat, ha az azonos dátumú pontokat, akkor pedig a dátumvonalakat. Ehhez a napórához több már nem is kell,



Fraknó várának napórája 1645-től mutatja az időt (fotó: Kiss Miklós)

csak még helyesen tájolni és vízszintezni, és ha süt a Nap, már mutatja is az időt.

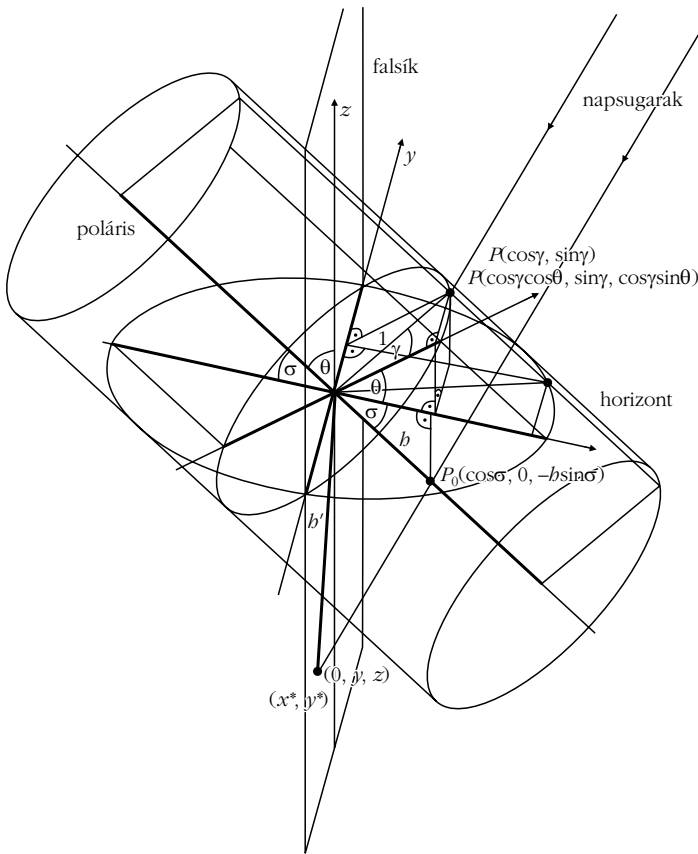
Az persze szükséges, hogy a számlap tényleg vízszintes legyen. A helyes tájolás pedig a földrajzi észak-déli beállítást jelenti. Alkalmos helyen ez a napóra napkelte-től napnyugtáig használható.

A bemutatott számítás helyettesíthető szerkesztéssel is, ha a kör síkját és az ellipszis síkját a metszéspontjuk körül egybeforgatjuk (merőleges affinitás). Így az óraszögeket tudjuk megszerkeszteni.

Függőleges síkú napóra

Gyakran célszerű az árnyékvető palcát inkább a falhoz rögzíteni. Ilyenkor kézenfekvő, hogy a falon keletkezett árnyékot használjuk az idő megállapításához. Tekintsük át először azt a még mindig viszonylag egyszerű esetet, amikor a poláris helyzetű palcát egy kelet-nyugat tájolású függőleges síkon (falon) helyeztük el (6. ábra).

A poláris árnyékvető palcájú függőleges síkú napórák palcája értelemszerűen lefelé mutat, tehát a fal síkjával θ szöget zár be. Ez a napóra csak reggel hat és este hat óra között használható, mert máskor vagy a sík mögött van a Nap (a nyári félévben) vagy a napkelte és a napnyugta a két időpont közé esik (a téli félévben). A kelet-nyugat tájolású, függőleges síkú napóra hasonlóan tárgyalható, mint a vízszintes síkú, azonban ezt az egyszerű tárgyalást már nem tudjuk továbbfejleszteni arra az esetre, ha a fal más tájolású. Ezért ezt a leírást csak a korábban jelzett honlapon helyeztük el. Inkább megadunk egy más tájolású falsíkra is általánosítható módszert, amely térmértant használ.



6. ábra. A függőleges falsík, a mutató és árnyékának helyzete az óraszög-hengerben.

Általánosítható módszer függőleges, kelet-nyugati síkra

A megfelelő síkok, egyenesek és vektorok térbeli egyenletével, koordinátaival számolunk. Röviden és szemléletesen a következőt kell látnunk. Az adott pillanathoz tartozó napsugár-egyenesek egyike átmegy a mutatópálca végpontján, és metszi a fal síkját. Ez a pont az árnyék végpontja, a kezdőpontja pedig a pálca rögzítési pontja.

A koordináta-rendszer y -tengelye a korábbiaktól eltérően mutasson nyugatról keletre, x -tengelye a horizonton délre, z -tengelye pedig legyen függőleges. A falsík egyenlete ebben a koordináta-rendszerben $x = 0$.

Szükségünk van még a mutató végpontján átmenő napsugár-egyenes egyenletére. A b hosszúságú árnyékvető pálca végpontjának koordinátái $(b \cos \sigma, 0, -b \sin \sigma)$. Határozzuk meg a napsugár egyenesének irányvektorát. Ehhez keressünk két pontot az egyenesen. Az egyik pont (P) legyen az óraszög-sík és az egyenlítői egységkör metszéspontja, a másik a horizont síkjára a Nap által vetített képe ugyanennek a pontnak (P''). A P pont koordinátái az egyenlítői síkban $(\cos \gamma, \sin \gamma)$. Koordináta-rendszerünkben ugyanennek a pontnak a koordinátái (6. ábra): $(\cos \gamma \cos \sigma, \sin \gamma, \cos \gamma \sin \sigma) = (\cos \gamma \cos \sigma, \sin \gamma, \cos \gamma \sin \sigma)$.

A napsugár P -n átmenő egyenese az OPP' síkban, a P'' pontban metszi a horizont síkját (7. ábra). Itt ketté kell vennünk a számításban a folytatást, aszerint, hogy a Nap az egyenlítői sík felett ($\alpha > 0$), vagy alatt ($\alpha < 0$) van. Ha $\alpha > 0$, akkor a 7. ábra bal oldali rajza alapján az OPP'' háromszögre a szinusz-tételt felírva:

$$|r''| = \frac{r''}{r} = \frac{\sin \alpha}{\sin(180^\circ - \beta)} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

A P'' pont az egyenlítői síkban van, tehát csak az

$$|x'| = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cos \gamma' \quad \text{és} \quad |y'| = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \sin \gamma'$$

koordinátái különböznek nullától.

A keresett irányvektor koordinátáit a P és P'' pontok koordinátáinak különbsége adja. A napsugár-egyenes paraméteres egyenletrendszere tehát (p valós paraméter)

$$x = \left(\cos \gamma \sin \sigma - \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cos \gamma' \right) p + b \cos \sigma,$$

$$y = \left(\sin \gamma - \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \sin \gamma' \right) p,$$

$$z = \cos \gamma \cos \sigma p - b \sin \sigma.$$

A falsíkból a napsugár kimetszi az árnyék végpontját, ezért vegyük a sík és egyenes metszéspontját, tehát az egyenes egyenletrendszeréből a falsík egyenletébe helyettesítve:

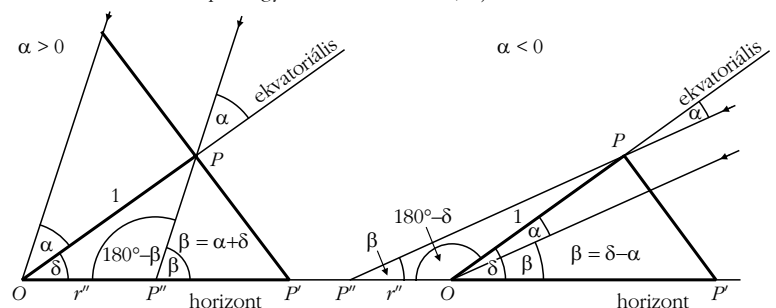
$$x = \left(\cos \gamma \sin \sigma - \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cos \gamma' \right) p + b \cos \sigma = 0,$$

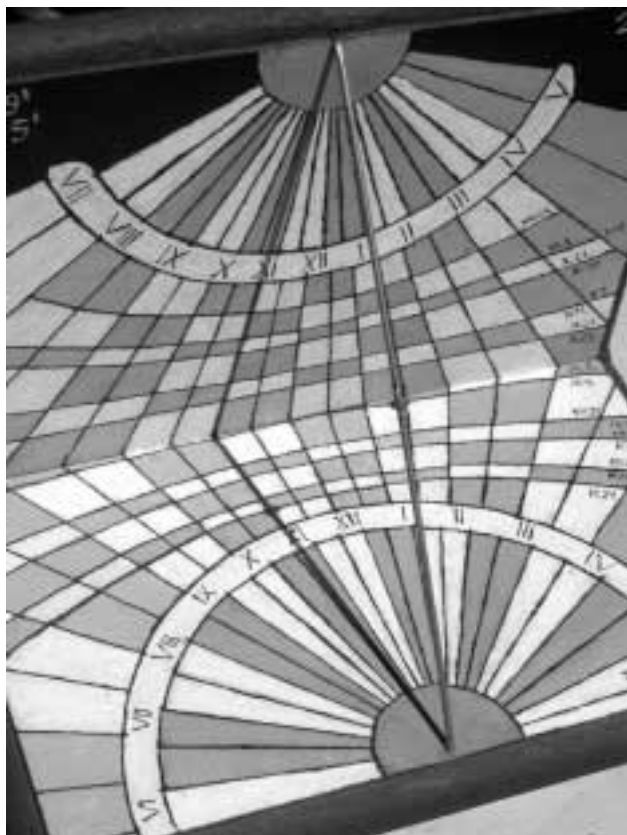
ahonnan

$$p = \frac{-b \cos \sigma}{\cos \gamma \sin \sigma - \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cos \gamma'}$$

adódik. Ezt behelyettesítve az y és z koordináták paraméteres kifejezésébe, megkapjuk az árnyék végpontjának koordinátáit a falsík természetes kétdimenziós koordináta-rendszerében, amelyek a számlapon a megjelölhetők.

7. ábra. Az óraszög-sík metszete az egyenlítői síkkal (OP egyenes) és a vízszintes síkkal (OP'' egyenes). A napsugár egyenesének irányvektora a PP'' irányított szakasz. A bal oldali ábrán a nap az egyenlítői sík felett van, a jobb oldalin alatta.





8. ábra. Kézi napóra június 21-én helyi idő, közép- és napidő szerint 11 órakor

Ha $\alpha < 0$, akkor is ugyanezekhez az összefüggésekhez jutunk, ha α -t előjelesen vesszük. A megfelelő ábrát azonban érdemes megtekintenünk a 7. ábrán jobbra. Az ábrán a szög előjelét nem vettük figyelembe, csak a feliratban jelöltük.

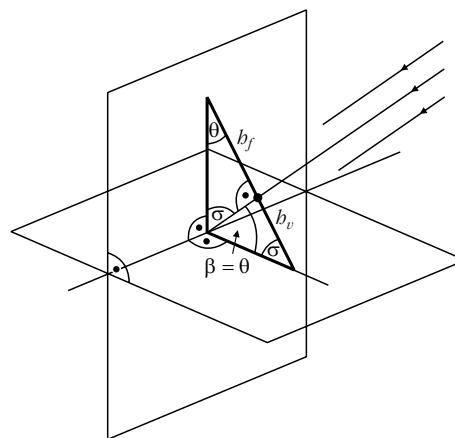
Asztali napóra

A 8. ábrán bemutatott asztali napóra a vízszintes és függőleges síkú óra kombinációja. Előnye, hogy kisebb helyen elfér, jobban illik a belső térhez. Én a soprani Stornó-ház gyűjteményében figyeltem fel egy ilyen napórára.

Lehetséges összeállítás a következő. Vesszünk két fél napórát: egy vízszintes és egy függőleges síkút. A mutatók párhuzamosak, illesszük össze a végpontjukat! Az illesztés helyét a pálcán kis vastagítással jelöljük. Külön előny, hogy mindkét napóra kevésbé elnyúlt részét használjuk így, nyáron a horizontális, télen a vertikális részt. Ez javítja a pontosságot!

A két napóra mutatójának hosszát megválaszthatjuk úgy, hogy a poláris mutatóra merőlegesen delelő Nap a két mutató egybeeső vastagított végpontjának árnyékát a két sík metszésvonalán hozza létre (9. ábra). Ez akkor következik be, amikor a Nap a horizont felett éppen $\beta = \delta_{\max} = \theta$ -ban delel, vagyis a tavaszi és az őszi napéjegyenlőségekkor. Az óraszög-vonalak a metszésvonalon találkoznak.

Másik célszerű választás a poláris mutató felezése. Az ilyen hordozható napóra részleteiről a megadott honlapon olvashatunk.



9. ábra. Az asztali napóra két mutatójának közös a végpontja

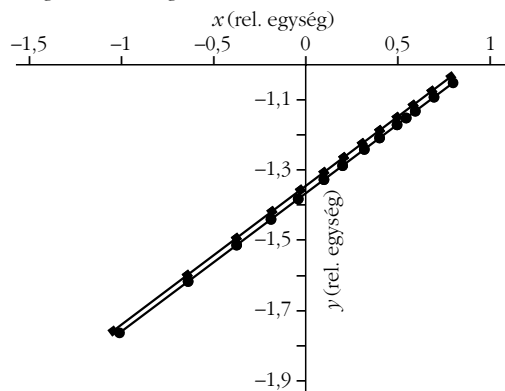
Helyi idő – zónaidő

Az eddigi megfontolások alapján kapott napóra mindig a helyi időt mutatja. Ha figyelembe vesszük a földrajzi hosszúságot, a zónaidőhöz illeszthetjük a napórát. Gyönyörsön például, közel a 20. hosszúsági körön 5 fokkal vagyunk a zónahatártól keletre, ezért 20 perccel előbb van a helyi dél, mint a zónaidő szerinti dél, vagyis a Nap itt 11:40-kor delel. Ezért, ha 20 perccel nagyobb óraszöggel számolunk, zónaidőt mutató napórához jutunk. A helyi idő délvonalát mindenképpen célszerű bejelölni, esetleg kettős beosztást készíteni. Erre példa a kézi napóránál lévő képen látható, a számokat jelző gyűrűkön kívül zónaidő, a dátumos részben helyi idő szerinti beosztás található (8. ábra).

Függőleges, elforgatott síkú napóra

Egy már meglévő épület síkjainak adott a helyzete. Gimnáziumunk déli falának síkja például 26,3 fokkal nyugat felé fordul. Ez már jelentős elfordulás a kelet–nyugati irányítású függőleges helyzethez képest, ezért jelentősen torzul a beosztás. Amint tudjuk a fal elfordulásának szögét, számolhatunk. De ki mondja meg a szöveget, és hihetünk-e neki? Ez az a kérdés, amit mérésrel kell meghatározni. De milyen szöveget mérjünk?

10. ábra. A mért és a számított egyenes párhuzamossága mutatja, hogy ez a jó szög a falsík elforgatásához



Napéjegenlőség alkalmával a mutató árnyékának végpontja egy egyenes mentén halad, mivel ilyenkor a Nap éppen az egyenlítői síkkal párhuzamos síkban mozog, és ennek a síknak a napóra síkjával való metszete a pálcaárnyék végpontjának a helye. Jelöljük be ezért ezen a napon (ősszel vagy tavasszal) a végpont helyét a falon többször. Ha az egyenesünk vízszintes, épületünk fala kelet–nyugati tájolású, ha nem, el van forgatva egy függőleges tengely körül. Ha az elforgatott falsíkot szeretnénk alkalmazni számlapnak, már bonyolultabb a napóravonalakat kiszámolni. A számítás alapján azonban megkaphatjuk a napéjegenlőséghez tartozó egyenest. Számításainkban a falsík elfordulását olyan szöggel kell figyelembe venni, hogy a mért és a számított egyenes meredeksége megegyezzen (10. ábra). Az ábrán nem fed egymást a mért és számított egyenes. Ennek az oka, az, hogy a mérőpálca végpontja nem ugyanott volt, mint a mutatópalcáé. (Igazából egy falra merőleges rúddal mértük meg a vonalat, mert nem is volt még mutatópalcánk.)

Az elforgatás szögének ismeretében meghatározottá vált az óra és dátumvonalak egyenlete. Az érdeklődők kedvéért a számítások a jelzett honlapon megtalálhatók.

Pontosság, korrekciók

Ennél a napóránál a lehetőséghez képest egyszerű számítás, elkészítés volt a cél. A gyakorlatban nem kielégítő pontossággal működik, ha egy pontos órát szeretnénk vele helyettesíteni. A napórával azonban nem ez a célunk. A pontatlanság szabályos, a pontos idő és a napóra által mutatott idő közti különbségből adódik. Ennek fő oka a Föld keringési sebességének éves ingadozása a földpálya excentricitása miatt.

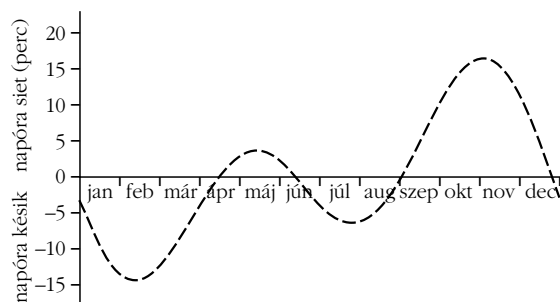
A kétféle idő kapcsolatát az úgynevezett időegyenlet adja meg [4]. Ennek a mi számításainkhoz igazodó alakja:

$$t = -7,7 \sin\left(\frac{nap}{365}\right) + 9,5 \sin\left(2 \frac{nap - 80}{365}\right),$$

ahol a t a delelés eltérése percben, a nap az adott nap sorszáma az év elejétől kezdve.

Az időegyenlet következtében a Nap hol a helyi dél előtt, hol utána delel itt Gyöngyösön (11:40-hez képest). Az eltéréseket a grafikon mutatja (11. ábra). Ha a helyi délhez ezt az időt hozzáadjuk, az éves delelési adatok kirajzolják az *analemmát*. Egészen pontosan a vízszintes napóránál szoktunk analemmáról beszélni, de a fogalom általánosítható más napórák esetére.

A nyolcas alakú görbe a címlap közepe táján (analemma) segítségével vehetjük figyelembe, hogy a napóra általában nem egészen az általunk használt időt mutatja. Egy évben a napóra csak négy napon mutatja pontosan az időt: április 15-én, június 13-án, szeptember 1-jén és december 25-én. Szeptembertől december végéig siet, azután április közepéig késik, majd június közepéig megint siet, és szeptember 1-jéig ismét késik. A sietés maximális értéke meghaladja a 16 percet, a késésé a 14 percet. A helyi dél 11:40-kor van az említett négy napon. Ilyen-



11. ábra. Az időegyenlet mutatja a napi középido (a „pontos” idő) és a napi idő (amit a napóra mutat) közötti különbséget

kor a pálca árnyéka, a mutató függőleges, azaz a piros egyenesre esik. Más napokon 11:40-kor az árnyék a „nyolcasra” (analemmára) kerül. Minden más időpont is ennek megfelelően jelenik meg.

Végezetül felsorolok a pontosságot befolyásoló néhány további problémát:

- a légköri fénytörés, különösen akkor, ha a Nap a horizonthoz közel van,
- a mutató vastagsága és a félárnyék,
- a felület nem teljesen sík, nem vízszintes, vagy nem függőleges,
- a függőleges nem merőleges a horizontra.

Ne felejtjük azonban, hogy a napóra elsődleges jelentősége nem pontossága, hanem kulturális és esztétikai értéke.



Köszönöm *Trócsányi Zoltánnak* a cikk gondos áttanulmányozását, tartalmának és formájának kialakításához adott hasznos ötleteit, tanácsait.

Jelölések

α : a Nap (delelési) magassága az egyenlítő felett, adott dátum mellett ($-23,5^\circ$ és $+23,5^\circ$ között változik), a napsugárnak az egyenlítő síkjával bezárt szöge

β : a Nap magassága a horizont felett az óraszög-síkban

γ : óraszög az egyenlítői síkban a déli irányhoz képest

γ' : óraszög a horizontális síkban a déli irányhoz képest, vagy óraszög a vertikális síkban a déli (függőleges) irányhoz képest, vagy óraszög a falsíkban a déli (függőleges) irányhoz képest

σ : szélességi szög, Gyöngyösön, $\sigma = 47^\circ 49'$

θ : a horizont és az egyenlítői sík szöge, Gyöngyösön $42^\circ 11'$ ($\theta = 90^\circ - \sigma$)

δ : a vízszintes és az egyenlítői sík között adott pillanatban az óraszög-sík által kimetszett szög, a Nap magasságával kapcsolatos, vízszintes napszöggörrekció

δ' : a függőleges és az egyenlítői sík között adott pillanatban az óraszög-sík által kimetszett szög, a Nap magasságával kapcsolatos, vertikális napszöggörrekció

Irodalom

1. SZÉCSÉNYI-NAGY GÁBOR: *Tájékozódás a csillagos égen* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
2. VITRUVIUS: *Tíz könyv az építészetről* (Kilencedik könyv) – Képzőművészeti Kiadó, Budapest, 1988
3. *Magyar nagylexikon* – Akadémiai Kiadó, illetve Magyar Nagylexikon Kiadó, Budapest, 1993–2004
4. MARIK MIKLÓS: *Csillagászat* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1989
5. <http://www.analemma.com/SunGraph/index.html>
6. <http://www.sundials.co.uk/equation.htm>
7. <http://www.berze-nagy.sunline.hu/mikola/km/napora>

FÓRUMOK AZ ÚJ RENDSZERŰ FIZIKA-ÉRETTSÉGI TAPASZTALATAIRÓL

Az ELFT Elnöksége által szervezett rendezvényeken elhangzottak összefoglalása

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat (ELFT) az oktatási miniszter felkérő levelét követően két fórumot szervezett a fizika érettségi vizsga értékelésére.

Az Eötvös Társulat 2006. március 22-én rendezett kibővített elnökségi ülésén az elnökségi tagok mellett részt vettek az Oktatási Minisztérium (OM), az Országos Közoktatási Intézet (OKI) és az Országos Közoktatási Értékelési és Vizsgaközpont (OKÉV) szakértői, továbbá a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE), a Debreceni Egyetem (DE), a Nyíregyházi Főiskola (NyF), a Pécsi Tudományegyetem (PTE), a Szegedi Tudományegyetem (SZTE) és a Nyugat-Magyarországi Egyetem (NyME) fizikai intézeteinek (tanszékeinek) véleményét tolmácsoló kollégák. A középfokú fizikatanulmányok felsőoktatási fontosságát tükrözi az a tény, hogy megjelentek és tapasztalataikról beszámoltak a PTE, a Semmelweis Egyetem (SE) és az SZTE Általános Orvostudományi Karain a fizika oktatásával foglalkozó kollégák is.

Az ülésen az OM képviselőjétől a 2006. évi vizsgajelentkezésekről kapott tájékoztatásból a résztvevők megelégedéssel vették tudomásul a fizikából és kémiából emelt szintű érettségire jelentkezők számának növekedését. Ugyanakkor az első helyen fizika alapszakra jelentkezők száma a jelentkezők átlagos számának csökkenését lényegesen meghaladó mértékben csökkent. A kedvezőtlen fejlemény megállítása mind a fizika szakmai közösségetől, mind az oktatáspolitikától jelentős erőfeszítéseket követel.

2006. április 3-án a 49. Országos Középszintű Fizika-tanári Ankét és Eszközbemutató keretében Pakson a középszintű tanárok számoltak be tapasztalataikról. Az anketon mintegy 150 középszintű fizikatanár vett részt, akiknek az alábbi összefoglalóban olvasható megjegyzései hitelesen reprezentálják a tanári közvéleményt. Ezen a fórumon is jelen voltak az OM, az OKI és az OKÉV szakértői.

A fizika érettségi tapasztalataihoz kapcsolódó legfontosabb megállapítások

Az új rendszerű érettségi első évének tapasztalatai szerint az érettségi vizsga nem differenciált a továbbtanulásra jelentkezők között, egy-egy pont eltérés a „vonalhúzásban” 10–20 jelentkező felvételét, illetve elutasítását eredményezte. A középszintű írásbeli vizsga kifejezetten könnyű volt. A tanulók számára a szóbeli során a feleletre és a mérések elvégzésére biztosított felkészülési idő (30 perc) kevés.

Az iskolák jó részében elterjedt, a záró eredményt „kozmetizáló” hozzáállásnak a diákok hamis önismerete

az eredménye. A korábbinál nagyobb arányban bizonyultak képtelennek a bevezető felsőoktatási tanulmányok során a fizika kredit megszerzésére az elsőéves hallgatók.

Kedvezőtlen, hogy a nyelvvizsgák domináns szerepet kaptak a továbbtanulásban, ugyanakkor a felsőoktatási intézmények – egy-két kivételtől eltekintve – még a középszintű természettudományos (azon belül fizika) érettségit sem igényelték. A nyelvvizsgát egyoldalúan és túlzóan elismerő többletpont torzította a felvettek társadalmi összetételét, az egyes szakokra való bekerüléshez szükséges ponthatárt (amely széles körben az egyes szakterületek megítélésének alapja), valamint az érettségi tárgyak kiválasztásában is tükröződött hatása. Az egyes szakokra jelentkezettek képességeit a felvételi pontszámok nem hűen tükrözték, jóval kisebb volt a pontszámok által sugalltnál a rátermettségbeli eltérés.

A fizika érettséginek új eleme volt a kísérletes feladat, amelyet minden résztvevő üdvözlő és továbbfejlesztését hangsúlyosan támogatja. A minden középiskolában bemutatható tanári demonstrációs kísérletek kis száma, valamint a tanulói kísérletezés szinte teljes megszűnése miatt ez az új irányzat ma még elsősorban gondot jelent. A kis óraszám, a kevés működésképes eszköz miatt sok iskolában a kiscsoportos tanulói mérések elvégzésére alig van mód, sőt vannak iskolák, ahol szinte csak az érettségire felkészülők végezhetnek kísérleteket. A tanárok szakmai konzervatívizmusának fő oka a modern (a 20. század második felében feltárt) fizika osztálytermi bemutatásának megoldatlansága. Az új kísérleti eszközök drágasága miatt a szertárak kiürülnek. Demonstrációs műszerek javítására alig található műhely, a tanszergyártók érdekeit kizárólagosan szolgáló oktatási politika semmilyen formában nem támogatja anyagilag ezen eszközök felújítását.

Probléma a középszintű fizikatanárok újabb generációiban egyre inkább tapasztalható felkészületlenség. A tanárok között csökken az érdeklődés az érettségit támogató segédanyagok fejlesztésében való részvételre, a kísérleti eszköztár olcsó, egyszerű eszközökkel való megújítására. A tanári pályára lépők elkötelezettsége a fizika oktatása mellett és társadalmi (nem pusztán anyagi) megbecsültségük egyaránt alacsony szintű. Kérdés, hogy milyen hatásfokkal ösztönzik majd a természettudományi karoktól elkülönült pedagógiai karok és intézetek a BSc fizika alapszakot elvégzőket a fizika tanári szak választására?

Nem volt egyetértés abban, hogy a fizika alapszakon az egyetemi tanulmányokhoz kötelezően szükséges legyen-e az emelt szintű fizika érettségi. Budapesti és debreceni vélemények ezt támogatták, míg pécsi és szegedi kollégáink azt hangsúlyozták, hogy a fizika iránt

érdeklődőket fogadni kell, ha szükséges, még kiterjedtebben kell felzárkóztató kurzusokat szervezni számukra. Új, a fizika rutinalkalmazásaihoz kapcsolható, tömegképzésben elsajátítható szakmákat is ki kell fejleszteni. Az orvoskarok képviselői hangsúlyozták, hogy a mesterszakok alapításakor nem szabad elfelejteni a „klinikai fizikus” szakma növekvő fontosságáról és önállósodásáról.

Az érettségi vizsgáztatásban való részvételből a tanári diplomával nem rendelkezőket sommásan kizárták. A felsőoktatásban akár évtizedekre tekintő oktatói múltú, a szaktanárképzést meghatározó kollégák nem kaptak lehetőséget, még kevésbé ösztönzést az emelt szintű érettségiben közreműködéshez szükséges kiegészítő képzés elvégzésére. Ez is hozzájárult ahhoz a közvélekedéshez, hogy a felsőoktatás és a közoktatás közötti együttműködés a felvételi folyamatban jelenleg a minimálisra csökkent.

A közoktatásban és a felsőoktatásban dolgozók közötti rossz kommunikáció további jele, hogy a felsőoktatás nem kapja meg a felvettek írásbeli érettségi dolgozatait, ami rontja a felzárkóztató kurzusok személyre szabott programjának hatékonyságát.

javaslatok

Ösztönözni kell az érettségi-felvételi folyamatban a közoktatás és a felsőoktatás közötti együttműködést.

Tegyük lehetővé a szaktanárképzést meghatározó főiskolai–egyetemi oktatóknak az emelt szintű érettségi feladatainak kidolgozásában és a vizsgáztatásban való részvétel feltételeként előírt tanfolyam elvégzését akkor is, ha az oktató nem rendelkezik tanári diplomával. Legyen az érettségiben ellátott tevékenység, az ahhoz kapcsolódó továbbképzés, valamint a felzárkóztató (középszintű) kurzusok tartása az egyetemi oktatómunka (óraterhelés) elismert része.

A felsőoktatási intézmény kapja meg a felvett hallgatónak az alapszak szempontjából releváns érettségi dolgozatát, amelynek alapján hatékonyabban szervezheti meg a felsőfokú tanulmányok elején immár kötelezően megszervezett felzárkóztató kurzusokat.

A természettudományos területek tanárutánpótlási igényét számszerű prognózis formájában térképezzék fel és tanári pálya választását kiemelt oktatáspolitikai célként támogassák (lásd Egyesült Államok, Európai Unió).

A mesterszakot (a jelenlegi 4. és 5. évfolyam) és a pályakezdés első három évét ötéves kiemelt ösztöndíjjal támogassák, hogy a természettudományi végzettségű fiatal szaktanárok valóban a tanári pályát válasszák.

A valós szakemberigénynek megfelelő pályákra történő középszintű orientáció érdekében szükségesnek tartjuk egy kötelező természettudományi (azon belül választhatóan: természetismereti) érettségi tárgy bevezetését.

A műszaki szakirányú egyetemi tanulmányok sikeres megkezdését segítené, ha legalább a műszaki egyete-

mek(!) megfelelő alapszakjain felvételi követelmény lenne a legalább középszintű fizika érettségi vizsga.

A fizika érettségi tételei között a modern (20. századi) fizika jelenségkörét a klasszikus jelenségkörrel egyenrangúan kell szerepeltetni.

A kísérletes fizika érettségi célját csak akkor érheti el, ha az oktatási kormányzat biztosítja az összes magyar középiskola számára az alapvető kísérletek tanulói elvégzéséhez minimálisan szükséges eszközöket.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a Magyar Nukleáris Társaság szakmai segítséget kíván nyújtani az érettségi tételeket összeállító OKÉV-nek országosan elterjeszthető, egyszerű demonstrációs eszközök és az azokkal végezhető modern fizikai kísérletek fejlesztésére. Az e céllal kiírt első társulati pályázat eredményét 2006 júniusában hirdetjük ki. Reméljük az OM, az OKI és az OKÉV támogatását a legjobb javaslatok elterjesztésének megvalósításában (megvásárlás, legyártás és tanárok kiképzése).

Javasoljuk a természettudományok mindegyikét átfogó, a természettudományok előrehaladásának középiskolai megújítását fejlesztő pályázat OM-szintű meghirdetését. Adjon támogatást a program a meglévő eszközök működőképességének biztosításához is.

A kísérletes oktatási eszközök vonzó demonstrációs eszközeit megalkotó középiskolai tanárok szakmai előrelépését (nemzetközi publikálás, tudományos fokozat szerzése stb.) az OM ösztöndíjakkal támogassa.

A fizika (bővebben a természettudományi tárgyakban teendő) emelt szintű érettségi választására ösztönzést adó többletpontrendszert igénylünk,

amely a középszintű tanulmányok egész időszakában vállalt és a magyar tehetséggondozás bizonyítottan eredményes rendszeréhez tartozó aktivitások mindegyikét elismeri.

- Javasoljuk az országos részvételű, a szakmai társaságok szakmai garanciája mellett lebonyolított és a fizika teljes jelenségkörét átfogó, legnagyobb hagyományú fizika tanulmányi versenyek első 5 helyezettjének többlet felvételi pont megadását, amennyiben eredményes emelt szintű fizika érettségit tesznek.

- Javasoljuk a Középszintű Matematikai és Fizikai Lapok feladatmegoldó versenyén a fizikából 3 éven át folyamatosan az első 10 helyezett között végző tanulóknak többlet felvételi pont megadását, amennyiben eredményes emelt szintű fizika érettségit tesznek.

A többletpontokat azon alapszakok felvételi sorrendjének kiszámításánál vegyék figyelembe, amelyeken a fizika érettségiben elért eredményeket egyébként is beszámíthatják.

Megfontolandó, hogy *többletpontot általában (bármely tantárgyban) csak akkor kaphasson a tanuló, ha a megfelelő területen emelt szintű érettségit tesz.*



Jelen összefoglaló értékelésünket és javaslatainkat az Oktatási Miniszternek és a közoktatást felügyelő helyettes államtitkárnak megküldjük. Eljuttatjuk továbbá a Magyar Tudományos Akadémia főtítkárához is, kérve a köztestület szakmai támogatását.

az ELFT elnöksége

138. PROBLÉMA

Egy tavon lebegő, álló vízibicikliről fejest ugrik a tóba egy gyerek. Melyik állítás igaz a vízibicikli és a gyerek vízszintes irányú lendületére az ugrás pillanatában?

- Vízibiciklinek és a gyereknek azonos lesz a lendülete.
- Egyenlő nagyságú, de ellentétes irányú lesz a lendületük.
- A gyereknek nagyobb, a vízibiciklinek ezzel ellentétes irányú és kisebb lesz a lendülete.

(A 2005. évi középszintű fizika érettségi egyik – *hibásan értékelt* – feladata.)

A 138. PROBLÉMA MEGOLDÁSA

A helyes válasz: c)!

Igaz ugyan, hogy vízszintes irányú külső erő hiányában egy zárt rendszer vízszintes irányú lendülete nem változhat meg (nyilván erre gondoltak a feladat kitűzői, amikor a (b) választ jelölték meg hivatalos megoldásként), ez a tétel azonban a jelen esetben *nem alkalmazható!*

A gyerek és a vízibicikli ugyanis *nem* tekinthető zárt rendszernek, hiszen az elugró gyerek nem csak a vízibiciklit, hanem a körülötte levő vizet is meglöki. A lendület-

megmaradás törvénye szerint tehát a gyerek vízszintes irányú lendülete egyenlő nagyságú, de ellentétes irányú lesz a vízibicikli és a meglökött víz *együttes* lendületével.

Gondolhatunk esetleg arra, hogy a víz lendülete (amely nagyságrendileg a kiszorított víz tömegének és a meglökött vízibicikli sebességének szorzatával egyenlő) elhanyagolható a vízibicikli lendületéhez képest. Ez azonban nem fordulhat elő, hiszen a kiszorított víz tömege éppen egyenlő kell, hogy legyen a vízibicikli és a gyerek össztömegével; egyébként nem teljesülne az úszás (lebegés?) feltétele.

(*Gnädig Péter*, Budapest)

139. PROBLÉMA

Egy fiatal eszkimó fókavadász az új szigonyát próbálgatja. A kisméretű, de nehéz szigonyhoz a földön fekvő vékony, hosszú, gondosan (gubancolódásmentesen) összetekert lánc csatlakozik. Amikor az eszkimó függőlegesen felfelé elhajítja a szigonyát, az olyan magasra emelkedik, hogy a róla lelógó lánc tömege éppen megegyezik a szigony tömegével. Vajon hányszor magasabbra repülne az ugyanekkora kezdősebességgel függőlegesen feldobott szigony, ha nem lenne hozzákötve a lánc?

(*Varga István*, Békéscsaba)

PÁLYÁZATOK

DOKTORI ISKOLÁK

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

A BME TTK Doktori Iskola pályázatot hirdet a fizika területén a 2006/2007. tanévben induló doktori (PhD) képzésben való részvételre. A következő programokra lehet jelentkezni:

- Kondenzált anyagok fizikája (szilárdtestfizika, anyagtudomány, statisztikus fizika)
- Alkalmazott fizika (optika, lézerfizika, holográfia, felületfizika, reaktorfizika)

Jelentkezési határidő: 2006. május 31.

További információk: vidamari@ttddh.bme.hu

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Az ELTE TTK Fizika Doktori Iskola pályázatot hirdet a 2006/2007. tanévben induló doktori (PhD) képzésben való részvételre. A következő programokra lehet jelentkezni:

- Anyagtudomány és szilárdtestfizika
- Részecskefizika és csillagászat
- Statisztikus fizika, biológiai fizika és kvantumrendszerek fizikája

Jelentkezési határidő: 2006. május 31.

További információk: <http://teo.elte.hu>

Szegedi Tudományegyetem

A SZTE TTK Fizika Doktori Iskola pályázatot hirdet a 2006–2007-es tanévben induló doktori képzésben való részvételre. A következő programokra lehet jelentkezni:

- Biofizika
- Elméleti és matematikai fizika
- Optika, lézerfizika, lézerek alkalmazásai
- Szilárdtestfizika, lézerezés–anyag kölcsönhatás
- Fizikai képalkotó módszerek az orvostudományban, radiológia
- Csillagászat, asztrofizika

Jelentkezési határidő: 2006. május 15.
Információk és dokumentációk: <http://www.u-szeged.hu>
<http://titan.physx.u-szeged.hu/~vinko/FDI/FDI.html>

Debreceni Egyetem

A Debreceni Egyetem TTK „Fizikai tudományok” Doktori Iskolája pályázatot hirdet a 2006/2007. tanévben induló doktori (PhD) képzésben való részvételre. A következő

programokra lehet jelentkezni nappali, levelező és egyéni képzésben:

- Atom- és molekulafizika
- Magfizika
- Szilárdtestfizika és anyagtudomány
- Fizikai módszerek interdiszciplináris kutatásokban
- Részecskefizika

Jelentkezési határidő: 2006. május 5.

További információk kaphatók: <http://dragon.unideb.hu/~physphd/>

DOKUMENTUM

George W. Bush: STATE OF THE UNION ADDRESS

– részlet

2006. március 13-án a Mindentudás Egyetemén *Hogyan lehet egyszerre játékos és tudományos a fizika?* címmel Szabó Gábor akadémikus nagyszerű előadást tartott. Az előadás fizikai kísérleteinél négy kiváló tanár: Vida József, Nagy Anett, Härtléin Károly, valamint Pilátb Károly működött közre.

Az előadásban Szabó professzor néhány rendkívül figyelemreméltó bekezdést idézett *George W. Bush*, az USA elnöke 2006. január 31-én tartott *State of the Union Address* elnevezésű, az elmúlt év amerikai szempontból legfontosabb eseményeit értékelő beszédéből. Tekintettel arra, hogy ez a részlet a tudományos kutatás és oktatás alapvető fontosságú vonatkozásait érinti, érdemes szó szerinti fordításban idézni:

„És hogy megtarthassuk Amerika versenyképességét, mindenekfelett egy dologban legyünk eltökéltek: továbbra is elsőnek kell lennünk a világban az emberi kreativitás és tehetség terén. Legnagyobb előnyünk mindig is képzett, keményen dolgozó és ambíciózus polgárainkban rejtett, és ezt az előnyt meg is fogjuk tartani. Ma este meghirdetem az *Amerikai Versenyképességi Kezdeményezést*, melynek célja az innováció támogatása a gazdaság minden területén, valamint az, hogy gyermekeinknek biztos alapokat adjunk a matematika és a természettudományok terén.

Először is javaslom, hogy a következő tíz évben duplázzuk meg az élettelen természettudományok terén folyó, legfontosabb alapkutatói programok támogatását. Ezzel Amerika legkreatívabb elméinek nyújtunk támogatást ahhoz, hogy olyan ígéretes területeken kutassanak, mint a nanotechnológia, a szuperszámítógépek, vagy az alternatív energiaforrások.

Másodszor javaslom, hogy állandósítsuk a kutatás-fejlesztés jelenlegi adókedvezményeit, hogy ezzel a magánszektor merész technológiai befektetésekre bátorít-

suk. Az állami és magánszektorban folyó kutatások bővítése javítja életminőségünket, és biztosítja, hogy az elkövetkező évtizedekben Amerika világelső legyen a lehetőségek és innováció terén.

Harmadszor, bátorítanunk kell a gyermekeket arra, hogy több matematikát és természettudományt tanuljanak. Egyúttal tanterveink legyenek kellően szigorúak ahhoz, hogy más nemzetekkel felvehessük a versenyt. Ehhez jó alapot biztosít a *Nincs lemaradó gyermek* törvényünk, amely az alsóbb osztályokban országsszerte emeli a színvonalat és javítja a vizsgaeredményeket. Mai javaslatom az, hogy képezzünk ki 70 000 középiskolai tanárt az emelt szintű matematikai és természettudományi órák tartására, továbbá vigyünk 30 000 matematikus és természettudományos kutatót az osztálytermekbe. Nyújtunk időben segítséget azoknak, akiknek nehézségeik vannak a matematikával, hogy javítsuk esélyeiket jó, magas fizetésű munkahelyek megszerzésére. Ha lehetővé tesszük, hogy az amerikai gyermekek sikeresek legyenek az életben, ők majd elérik azt, hogy Amerika sikeres legyen a világban.

Nemzetünk felkészítése a nemzetközi versenyre olyan cél, amelyet mindnyájan magunkénak tekinthetünk. Nyomatékkal kérem önöket, hogy támogassák az Amerikai Versenyképességi Kezdeményezést, hogy együtt megmutathassuk a világnak, mire képesek az amerikai emberek...”

Az idézett mondatok önmagukért beszélnek. Tekintettel arra, hogy nekünk is Magyarország boldogulása a legfontosabb célunk, érdemes lenne elgondolkodni azon, vajon természettudósaink és pedagógusaink mellett oktatásunk felelős vezetői is úgy látják-e, hogy (élettelen) természettudományos oktatásunk színvonalán még sok sürgős javítanivaló akad?

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

A Társulat internet-honlapja <http://www.eflt.hu>, e-mailcíme: mail.eflt@mtesz.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

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

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

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 700.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2006. május 27., szombaton 10.00 órai kezdettel tartja Küldöttközgyűlését az Eötvös Egyetem Fizikai épületének (Budapest, XI. Pázmány Péter sétány 1/A) 083. előadótermében.

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.

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.

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Akadémiái kitüntetések

FIZIKAI FŐDÍJ

A *Fizikai Fődíjat* FAZEKAS PATRIK, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet tudományos tanácsadója nyerte el az erősen korrelált elektronrendszerek elmélete területén végzett, nemzetközi szinten is kiemelkedő tudományos munkásságáért, valamint a mágnesség modern kutatása hazai iskolájának létrehozásáért.

FIZIKAI DÍJ

DERÉNYI IMRE, az ELTE TTK Fizikai Intézet, Biológiai Fizika Tanszéke egyetemi adjunktusa, a molekuláris motorfehérjék működési mechanizmusának feltárásában, a biológiai membrán nanocsövek kialakulásának és dinamikájának megértésében, valamint a komplex hálózatok szerkezeti és dinamikai tulajdonságainak vizsgálatában elért kiemelkedő eredményeiért;

FÜLÖP ZSOLT, az MTA Atommagkutató Intézete igazgatóhelyettese, a kísérleti nukleáris asztrofizika terén elért eredményeiért, különös tekintettel a világegyetem fejlődésének, a kémiai elemek keletkezésének kutatásáért. E kísérleti munkák olyan különleges nagyberendezéseket igényelnek, amelyek kizárólag nemzetközi együttműködésben érhetők el. Fülöp Zsolt például résztvevője az európai LUNA-II együttműködésnek, amely föld alá tele-

Napirend előtti előadást (kezdetre 10 óra) tart *Horváth Dezső* (KFKI RMKI): *Szimmetriák és sértésük a részecskék világában – a paritássértés 50 éve* címmel.

Az Elnökség a Küldöttközgyűlésnek a következő tárgysorozatot javasolja:

1. Elnöki megnyitó;
2. A Szavazatszámoló bizottság felkérése;
3. Főtitkári beszámoló, 3.1 A Társulat 2005. évi közhasznúsági jelentése, 3.2 A Társulat 2006. 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 a 2007-ben hivatalba lépő elnök személyére;
7. Vita és választás;
8. A Társulat díjainak kiosztása;
9. Zárzó.

pített gyorsítót használ és a RIKEN-ATOMKI japán–magyar együttműködésnek, melynek keretein belül egzotikus atommagok vizsgálhatók radioaktív nyalábot előállító gyorsítórendszer segítségével;

PETROVAY KRISTÓF, az ELTE TTK Csillagászati Tanszék docense, a napfizika témakörében folytatott, nemzetközi szinten is kiemelkedően eredményes kutatásaiért, valamint a hazai oktatásban való intenzív részvételéért részesült a díjban.

AKADÉMIAI IFJÚSÁGI DÍJ

FARKAS ILLÉS, az MTA-ELTE Biológiai és Fizikai Kutatócsoport tudományos munkatársa és PALLA GERGELY, az ELTE Biológiai és Fizikai Kutatócsoport tudományos munkatársa *Komplex hálózatok vizsgálata statisztikus fizikai módszerekkel*,

PUSZTAI TAMÁS, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet, tudományos főmunkatársa *Megszilárdulási folyamatok modellezése*,

SMAUSZ KOLUMBÁN TAMÁS, az MTA-SZTE Lézerfizikai Kutatócsoport tudományos munkatársa *Az impulzuslézeres anyagátvitel alkalmazási lehetőségei a biológiában és az orvostudományban* című munkájukért nyerték el a díjat.

Ünnepi tudományos ülés a 70 éves Zawadowski Alfréd tiszteletére

2006. április 7-én ünnepi tudományos ülést rendeztek *Zawadowski Alfréd* akadémikus 70. születésnapja tiszteletére. Az ünnepeltet *Kroó Norbert*, az MTA alelnöke, *Horváth Zalán*, az MTA Fizikai Tudományok Osztálya

elnöke és *Kertész János*, a BME Fizikai Intézetének igazgatója köszöntötte. Az ülésen neves magyar és külföldi kutatók tudományos előadással tisztelegtek az ünnepelt előtt.

Szatomáry Zoltán, Aszódi Attila: CSERNOBIL – tények, okok, hiedelmek Typotex Kiadó, Budapest, 2005.

Vannak olyan távoli események, amelyek közfigyelmet keltenek, noha maga az esemény nincs hatással az életünkre. A figyelem oka lehet empátia, mélyen átérezzük a távoli tragédia borzalmát, vagy a félelem, ha nem tudjuk, milyen hatással lesz, lehet életünkre. A csernobili tragédia esetében vélhetően a félelem volt a döntő. Egyesek azonnal igyekeztek elbagatellizálni az eset következményeit, mások pedig eltúlozták azt. Csak a szakemberek tudták, milyen következményekkel is járt valójában a baleset ott a távoli helyszínen, és járhat majd itt, Magyarországon.

Majd húsz év elteltével két szakember elhatározta, hogy közérthető módon megírja a valóságos „Csernobil sztorit”. A vállalkozás komoly erőfeszítést igényel, hiszen csak úgy lehet közérthető módon elmondani, mi miért történt, ha egyszerű eszközökkel leírják az atomreaktorok működésének alapjait, a sugárvédelem és a statisztika néhány alapelemét. Noha napjainkban már egy általános célra alakult kft. is kaphat milliós támogatást egy nukleáris kérdéseket tárgyaló kiadvány elkészítésére, a szerzők – igen helyesen – úgy vélték, sem a négyfaktor-formula, sem a mágikus atommagok nem váltak még a pesti folklór részévé. A reaktorok működését sikerült 17 oldalon érthetően elmondani, a radioaktív sugárzást és biológiai hatásait 24 oldal ismerteti, képekkel, képletek nélkül, érthetően.

A baleset leírásánál (ami a szóban forgó műben mindössze 10 oldal) sokkal fontosabb a balesetekhez vezető okok és következmények vizsgálata (kb. 100 oldal). A baleset okai között a szerzők szerepeltetnek egyéni okokat, mint a kezelőszemélyzet felelőtlen magatartása, szervezeti okokat (miért engedélyezték egy pozitív visszacsatolású ipari berendezés használatát) és társadalmi okokat (miért nem választották szét a hadseregnek szükséges plutónium termelését a civil célokat szolgáló energiatermeléstől). Az okok vizsgálata azért is fontos, mert vélhetően egyre inkább rá leszünk szorulva veszélyes berendezések (autó, autópálya, veszélyes anyagok és módszerek) használatára. Okulni kell tehát minden balesetből!

Immáron hétköznapi eset, ha azonos tényekből két személy vagy két szervezet homlokegyenest ellentétes következtetésekre jut. A híradásokat elborító politikában ez nem meglepő, hiszen a politikus azt mondja, ami érdekében áll. Meglepő viszont, hogy a bíróságok gyakran hoznak ellentétes ítéletet azonos tényanyagból kiindulva. Azért meglepő, mert a bíróság egy vita eldöntésére létrehozott társadalmi intézmény, ítélete menthetetlenül azt jelenti, az egyik félnek igaz van, a másiknak nincs. A bíróság ítéletének komoly következményei vannak.

Nem lehet minden kérdéssel a bíróságra rohanni. Ki fogja eldönteni, mi a szennyezett levegő, a rossz ivóvíz következménye? Hogyan tudjuk eldönteni, mitől betegedett meg a gyerek és ki a felelős érte? Valamikor az általánosban elfogadott nézet szerint egy-egy kérdés akkor és pártatlan vizsgálatával egy tudományos intézményhez kell fordulnunk, ám amióta a tudományos rákényszerült tudása áruba bocsátására, ez a bizalom elillant. A tudományos intézmények tekintélye árucikk lett. Azt látjuk a reklámban, hogy fehérköpenyes, komoly, tudós kinézetű emberek bármely mosóporról kijelentik (feltehetően jó pénzért), hogy a vizsgált mosópor jobb, mint az összes többi. A végeredmény? A társadalom magára hagyta az egyént: dönts el magad, miben hiszel.

Nagynéném egy alkalommal a paksi mosótartály üzemzavarára¹ kapcsán megkérdezte tőlem, kell-e félni az esettől. Tagadó válaszomat annak ellenére fogadta nyilvánvaló kételkedéssel, hogy apró gyermekkorom óta ismer. Íme egy eset, amikor a

tudomány hitelvesztését saját bőrömmön tapasztaltam. Ez persze sokkal jobban bántott, mint a zöldek által gyakran használt *atomlobbi* kifejezés, noha ez utóbbi azt akarja sugallni, hogy aki érti, mi történik egy atomreaktorban, az már eleve elfogult, hiszen abból él, amihez ért. Azt már csak hozzágondolják, hogy az ilyen embertől jobb óvakodni, hiszen bármire képes állása védelmében (nem úgy, mint a nemes, önfeláldozó zöldek). Valójában egy szakember abban érdekelt, hogy tudását igénybe vegyék, az, hogy véleménye alapján milyen intézkedés születik, ugyanúgy nem érdekli, mint egy matematikust, hogy a vizsgált egyenlet gyöke pozitív vagy negatív adódott.

Ebben a légkörben a baleset kapcsán lehetne a konkrét esettel foglalkozni, ám a szerzők érdemének tartom, hogy figyelmüket az általános jelenségekre fordítják. Az egyik kérdés, amelyet vizsgálunk: Miért vádolták a nukleáris szakmát hazugsággal a csernobili események kapcsán? Végre valakinek van bátorsága feltenni ezt a kérdést! Kétségtelen tény, hogy a tájékoztatás akkoriban nehézségekbe ütközött, noha megvolt rá a készség a szakemberek oldaláról. Emlékszem, *Fehér István* nem kapott a TV-híradóban pár percet, hogy elmondja, mi a helyzet. A szerzők vélhetően személyeskedésnek vélték és elkerülték azon kollégák megnevezését, akik a „pártos” tájékoztatást felvállalták a híradásokban.

A tájékoztatáshoz kapcsolódik egy másik vitás kérdés is. Az újságok nem szeretik az adatokat (ritka, hogy egy újságban megjelent adat pontos legyen), imádják a szenzációt, ezért még egy ismeretterjesztő rovatból sem várhatunk korrekt tájékoztatást. A szerzők végre felvetik a kérdést: mennyiben felelős a média a félretájékoztatásért? Én nem emlékszem arra, hogy előtűnt valaki is felvetette volna a TV-híradó szerkesztőjének felelősségét, mert nem adott pár percet egy olyan kérdés megvitatására, amely az egész országot foglalkoztatta. Nem merült fel a napilapok, hetilapok szerkesztőinek, főszerkesztőinek, újságíróinak felelőssége sem, hogy a kétségtelenül meglévő adatok nem jutottak el az olvasókhoz. Érdekes módon, a felelőtlen, hozzá nem értő tájékoztatás viszont helyet kapott a sajtóban. Évekkel az esemény után megjelentek olyan újságírók, akik feltehetően anyagi érdekből hosszú időn keresztül szedték a sápot a csernobili álhírek után, magukat pedig az igazság bajnokának tüntették föl. Erről *Szatomáry* és *Aszódi* könyvében nem esik szó, feltehetően a kiadó (vagy a szerkesztő?) közbeavatkozása vezetett a fenti esetek kihúzásához.

Szatomáry és Aszódi könyvéből kirajzolódik a nyolcvanas évek valósága. A mindent őrszövé politikai, a gúzsba kötött tájékoztatás, a szakmai viták arról, hogy szabad-e tájékoztatni a közvéleményt részben bizonytalan elemzésekre támaszkodva, ez volt a nyolcvanas évek valósága. Ez volt az a táptalaj, amelyen a legvadabb, máig élő tévhitek is megtelepedtek.

Egy szó, mint száz: Szatomáry Zoltán és Aszódi Attila: *Csernobil* című könyvét jó szívvel ajánlom mindenki figyelmébe. Még a zöldekébe is, tanulni ugyanis sohasem késő. Az újságírók, tanárok, diákok a könyvet nukleáris témákhoz háttéranyagként is fel tudják használni. A többiek pedig színvonalas, érdekes és hasznos olvasmányra lelnek a könyvben.

Makai Mibály
BME Nukleáris Technikai Intézet

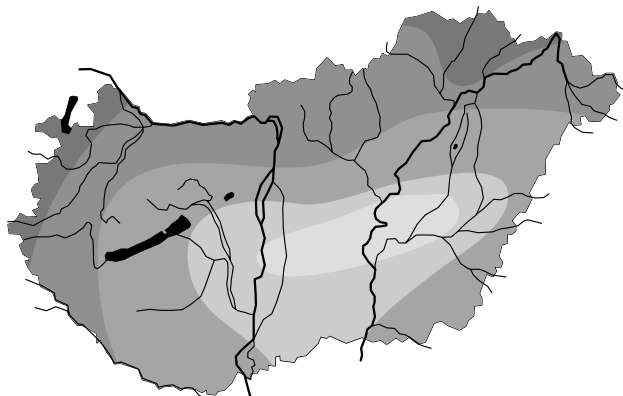
¹ Érdemes megjegyezni, hogy akkor beszélünk balesetről, ha személyi sérülés történt. Ennek hiányában az eseményt üzemzavarnak nevezik.

A NAPENERGIA MODERN FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI

Gyorsan fejlődő társadalmunk energiaigénye az utóbbi évtizedekben egyre nő. Ezt az igényt elsősorban fosszilis energiaforrások eltüzelésével elégítjük ki, ami azonban a környezetet károsítja. A fosszilis szén, olaj, földgáz energiahordozók ráadásul kimerülőben vannak, ezért jelen korunk figyelme az alternatív energiaformák felé fordul. Az alternatív energiaforrások a geotermikus energia, a nukleáris energia és a megújuló energiaforrások. Ez utóbbiak legtöbb esetben a napsugárzás folyamatosan érkező energiájából származnak, mint a szél-, a nap- és a vízi energia. A napsugárzás először a Föld felszínét melegíti, és a levegő ennek hatására melegszik csak fel. Ebből ered a légkör egyenlőtlen felmelegedése, ami a szeleket okozza. A napenergia hatására elpárolgó víz a csapadékkal a hegyekbe kerül, ez adja a vízi energia (helyzeti energia) kihasználásának lehetőségét. A napsugárzás energiáját ezeken kívül közvetlenül is fel lehet használni. Amikor a napenergiát felhasználjuk, átalakítjuk valamilyen más energiaformává, ami lehet elektromos áram vagy hő. Az energia felhasználása történhet kis méretekben, háztartásokban néhány kW teljesítménnyel, vagy építhetünk nagy kiterjedésű és teljesítményű erőműveket is. Hazánkban egyik sem terjedt még el a gyakorlatban.

A Nap mélyén, annak központjában atommagfúziós reakciók termelik az energiát. Ez a forrása a napsugárzást alkotó elektromágneses hullámok energiájának is. A légkörben a napfény különböző frekvenciái (színei) különbözően nyelődnek el, és a felszínre érve megmaradó energiája négyzetméterenként 1,3 kW. Ez az energia folyamatosan melegíti a Föld felszínét. Megújuló energiának azért hívjuk, mert a Napban zajló magfúzió energiája még évmilliárdokig képes lesz fedezni a napsugárzás energiáját. A Nap energiája egyike a tiszta energiáknak, felhasználásának általában nincs környezetet károsító mellékhatása. Mennyisége azonban nagy területen oszlik

1. ábra. Magyarország globálsugárzás térképe. A legvilágosabb rész jelenti az 1300 kWh/m² összenergiát, a legsötétebb árnyalat az 1175 kWh/m²-t. Az alföldi régiót a kevés felhő tünteti ki.



szét, az energiakonzentráció kicsi. Az energia átalakítási hatásfoka a jelenlegi technikai színvonalon is még elég alacsony. A napelemek esetén körülbelül 15%, a napkollektorok esetén körülbelül 80% hatásfok érhető el. A felhasználható napenergia mennyisége az évszakoktól és a napsütéses órák számától is függ. Ezt a környező domborzat mellett leginkább a meteorológiai viszonyok által meghatározott felhőzet-leárnnyékoló hatása befolyásolja. Az 1. ábra hazánk területén 1 m²-re jutó éves napenergia mennyiségét (globálsugárzás) ábrázolja.

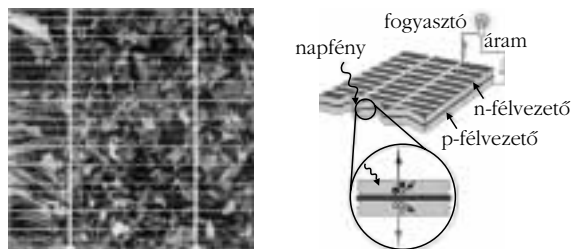
A napenergia felhasználása otthonokban

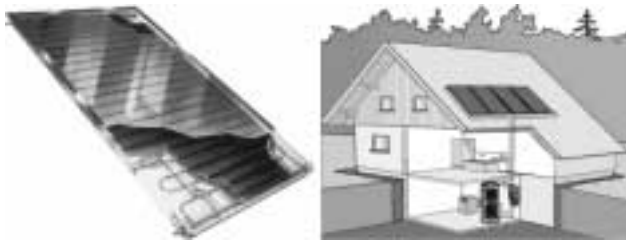
A napenergia átalakítását elektromos árammá a *napelemek* végzik. A napelem egy félvezető dióda, benne egy n-típusú és egy p-típusú anyaggal szennyezett félvezető réteg helyezkedik el. A napelemre beeső fény fotonjai fotoelektromos effektussal elektronokat hoznak mozgásba, és löknek át az egyik félvezető rétegből a másikba (2. ábra). Így a napenergia intenzitásával arányos áram keletkezik. Ezt közvetlenül fel lehet használni például fényforrások táplálására, az általános felhasználáshoz azonban 50 Hz-es váltóáramot kell előállítani belőle.

Egy lakás, családi ház energiafogyasztását egy körülbelül 6–10 kW teljesítményű energiaforrás képes fedezni. Egy 10 m²-es napelem a legerősebb napsütésben 13 kW teljesítményt tud felvenni, és körülbelül 2 kW energiát termel. A lakás energiaigényéhez ezért 30–50 m²-es napelem lenne szükséges. Ez egyrészt túl nagy a tető felületéhez képest, másrészt nagyon drága. A napelemek anyagának szerkezete háromféle lehet az ár és hatásfok csökkenő sorrendjében: monokristályos, polikristályos és amorf szilíciumos félvezető. A napelemek ára szorosan kapcsolódik a mikroprocesszorok árának alakulásához, hiszen mindkettőt a félvezető-technológiák határozzák meg. A legújabb technológia az üveg típusú napelem, melyek ablakokba is beszerelhetők. Ezen modern technológiák a fizikai anyagtudományi kutatások eredményei, melyek során számos intelligens anyag gyártása válik lehetővé.

Általában az energiát nem a déli legnagyobb napsütés idején szeretnénk felhasználni, hanem este. A napenergia

2. ábra. Amorfi szilíciumból készült napelem és annak sematikus rajza





3. ábra. Napkollektor szerkezete és elhelyezkedése egy családi házban

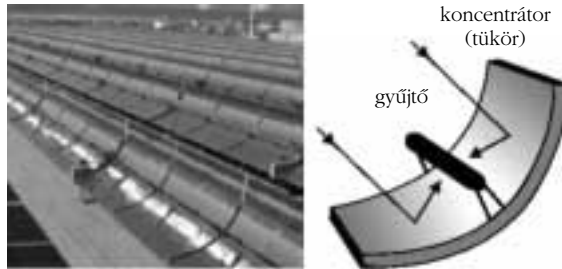
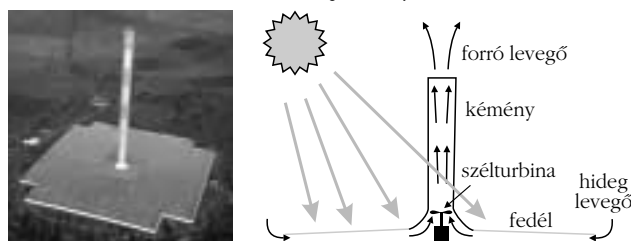
felhasználását ezért kiegészíti a tárolásának technológiája, mely lehet akkumulátoros, vagy hidrogéncellás, de ezek napjainkban még nem terjedtek el.

A napenergia jóval hatékonyabban felhasználható, ha hővé alakítjuk. Az erre szolgáló *napkollektorok* használata egyre terjed a családi házak melegvízellátására. A fosszilis energiahordozókat felhasználó kazánokat nem váltják ki, de hatékonyan rásegítenek. A technológia jelenlegi szintjén az olcsóbb napkollektorok körülbelül 15 év alatt térülnek meg (kb. 200–500 ezer forintos beruházás). A napkollektorban a napenergia egy csővezetékben keringő folyadékot melegít fel, amely a családi ház melegvíztárolójának hőellátását képes biztosítani (3. ábra). A napkollektor leggazdaságosabb típusa a vákuumcsöves, szelektív bevonattal ellátott kollektor. A legfontosabb szempont, hogy a felmelegített csőrendszer ne adja le az energiáját hővezetéssel, hosszúhullámú elektromágneses sugárzás útján, és ne is verje vissza a napsugarakat. Az első miatt kell vákuumcsőbe helyezni azt a rézcsövet, ami a felmelegített folyadékot szállítja. A második két tulajdonságot az úgynevezett szelektív bevonat teszi lehetővé. Ez a gyorsan fejlődő technológia mai állása szerint, egy vékony, nikkelt és alumínium-oxidból álló porózus réteg, mely visszaveri a hősugárzást, és jól elnyeli a napfényt.

Naperőművek

A napenergia nem koncentrált energia. Az erőművek teljesítményének eléréséhez nagy területről kell begyűjteni a napsugárzás energiáját. Ez kiterjedt építkezéseket, precíz technológiákat nagy tömegű megvalósítását jelent. A napelemek kis hatásfoka és a szilícium drága gyárthatósága miatt az erőművi napenergia-felhasználás a napsugarak energiáját leggyakrabban először hővé alakítja, de léteznek napelemes rendszerek is. Már maga az a tény is meglepő, hogy léteznek naperőművek, de a tiszta levegőt, leginkább napsütötte helyeken (például sivatagban) ez gazdaságos lehet. Napelemekből álló legnagyobb mai erőmű a Mülhausenben lévő 6,3 MW maximális teljesíté-

5. ábra. Napkémény



4. ábra. Napteknő (354 MW) a kaliforniai Mojave sivatagban (<http://www1.eere.energy.gov/solar/csp.html>)

ményű telep, amely évente 6,75 GWh energiát termel, ami 770 kW átlagteljesítményt jelent. A termikus naperőművek első típusa a *napteknő* (4. ábra). Ez a napenergiát egy hosszú vályúhoz hasonló tükörrendszerrel fókuszálja, melynek keresztmetszete parabola alakú, egy szelektív bevonatú, vákuumos csőrendszerre, melyben a keringő folyadékot jelentősen fel tudja melegíteni. Ez a rendszer egy hőtartályt melegít, amiből az energiát többféle módon is ki lehet venni. Egyszerű esetben gőzgépet hajtanak meg, vagy Stirling-motort alkalmaznak.

A *napfarm* alap gondolata hasonló. Itt a meleg hőtartályt nem egy csőrendszer melegíti, hanem egy nagy terület napfényt tükrözik a központban álló „víztorony” felületére. Sok tükröt kis motorok egyenként forgatnak a Nap járásának megfelelően, mindig úgy, hogy a naptorony tetejére fókuszálódjon. Itt a fény több száz métert is megtesz a levegőben, amíg a tükörtől a toronyhoz ér, ezért csak a tiszta, kis elnyelőképességű helyek alkalmasak. A kaliforniai Barstow-ban 1999-ben fejezték be a Sun II. projektet, amely egy 10 MW-os, energiaelnyelő folyadékként olvadt só felhasználó naptorony kísérleti üzemeltetése volt. A projekt alapján tervezik a lakossági energiatermelésre is használható jövőbeni erőműveket.

A *napkémény* energiaátalakítási képessége az üvegházhatáshoz hasonló hatáson alapul. Egy több száz méter sugarú területen a felszín feletti néhány méter magas levegőt üvegfedéllel zárjuk le. A felszín által kibocsátott hosszú hullámú elektromágneses sugárzást ez visszaveri, de a fentről jövő napsugarakat átengedi. A fedél alatti levegő jelentősen felmelegszik és kitágul, ezért a közepen lévő kéménybe áramlik, és ott a nagy területről összegyűlt meleg levegő gyorsan áramlik felfelé – ez lényegében mesterséges szél. A kéménybe hagyományos szélturbinákat helyezve, azok villamos energiát állítanak elő (5. ábra). Ausztráliában nemrégiben elfogadott projekt szerint New South Wales-ben épül meg az első ilyen kémény, amely több mint 1000 méter magasságával az ember által épített legmagasabb épület lehet. A projekt előkészítéseként egy 50 kW-os napkémény üzemelt (1982–1989-ig) a spanyol Manzanaresben.

Horváth Ákos

ELTE Atomfizikai Tanszék

A képek és további információ forrásai a weben:

<http://www.naplopo.hu>
<http://www.napenergia.lap.hu>
<http://napenergia.freeweb.hu>
<http://www.xsany.com>
<http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/>