

MŰHELYTANULMÁNYOK

Fizikai tudományok az ezredfordulón

AGRÁRIUM

KÖRNYEZETVÉDELEM ÉS INTEGRÁCIÓ

RENDSZERVÁLTOZÁS:

PIACGAZDASÁG, TÁRSADALOM, POLITIKA

TUDOMÁNYPOLITIKA

TERÜLETFEJLESZTÉS

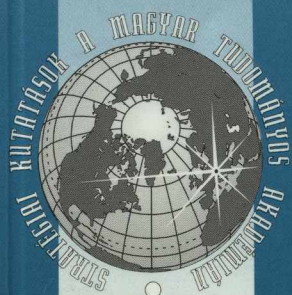
ÉLETMINŐSÉG

KÖZLEKEDÉS

NEMZETI KULTÚRA

DUNA-VÖLGYI RÉGIÓ

TECHNOLÓGIAI FEJLESZTÉS



Fizikai tudományok az ezredfordulón

Fizikai tudományok az ezredfordulón

Szerkesztő
Károlyi György

Budapest 2001

ELŐSZÓ

Magyarország az ezredfordulón
Stratégiai kutatások a Magyar Tudományos Akadémián
Műhelytanulmányok

Sorozatszerkesztő:
Glatz Ferenc

Magyarország az ezredfordulón
Stratégiai kutatások a Magyar Tudományos Akadémián

Műhelytanulmányok

Fizikai tudományok az ezredfordulón

Szerkesztő
Nagy Károly

Budapest 2000

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

© Balázs Lajos, Beke Dezső, Csikor Ferenc, Glatz Ferenc, Janszky József,
Kertész János, Kiss Árpád Zoltán, Lovas Rezső, Marx György, Nagy Károly,
Ormos Pál, Szőkefalvi-Nagy Zoltán, Tompa Kálmán

Olvasószerkesztő
Balogh Margit, Menczel György

ISBN 963 508 168 5
ISSN 1419-1822

Kiadja a Magyar Tudományos Akadémia
Kiadásért felel: Glatz Ferenc, az MTA elnöke
Borító: Horváth Imre
Tördelés: AbiPrint Bt.
Nyomdai munkálatok: Áldási és Németh Nyomda Bt.
Felelős vezető: Németh József
Megjelent: 9 A/5 ív terjedelemben, 1000 példányban

Tartalom

GLATZ Ferenc: Fizikáról, fizikusokról tegnap és ma	7
NAGY Károly: A huszadik század fizikájáról	11
CSIKOR Ferenc: Részecskefizika	15
Bevezetés 15 • A részecskefizikai kutatás helyzete és fejlődési irányai 16 • A hazai részecskefizikai kutatás helyzete, jövője, a részecskefizika oktatása 18 • A részecskefizika távlatai 20	
LOVAS Rezső–KISS Árpád Zoltán: Magfizika	23
A magfizika tudománya 23 • Mai kutatási irányok a világ magfizikájában 25 • A hazai magfizika 27 • Következtetések, javaslatok 34	
SZŐKEFALVI-NAGY Zoltán: Atom- és molekulafizika	37
Bevezetés 37 • Fő fejlődési irányok 40 • Hazai helyzet 42 • Perspektívák és ajánlások 43	
JANSZKY József: Lézerfizika és modern optika	47
A szakterület meghatározása 47 • Főbb nemzetközi irányzatok 48 • Hazai helyzet 51 • Összefoglalás, következtetések 58	
TOMPA Kálmán–BEKE Dezső: Szilárdtestfizika és fizikai anyagtudomány	59
A szilárdtestfizika és a fizikai anyagtudomány tárgya 59 • Kutatási irányok a világban 63 • A hazai szilárdtestkutatás múltja, területei, műhelyei, kapcsolatai és jövője 65 • Gondok, következtetések 68	
KERTÉSZ János: Statisztikus fizika	73
A statisztikus fizika tárgya 73 • Látványos fejlődés 74 • Interdiszciplinaritás és alkalmazások: komplex rendszerek 76 • A statisztikus fizika helyzete, távlatai és oktatása 79 • A statisztikus fizika Magyarországon 80	

BALÁZS Lajos: Csillagászat és űrfizika	83
A szakterület meghatározása 83 • Kapcsolat más tudományterü- letekkel 84 • Főbb nemzetközi kutatási irányok 87 • Hazai helyzet 90 • Összefoglalás, következtetések 95	
ORMOS Pál: Biofizika	97
A biofizika általános jellemzése 97 • A főbb irányzatok 100 • A biofizika hazai helyzete 102	
MARX György: Környezetfizika, sugárvédelem, reaktorfizika	107
Sugárvédelem 109 • Környezetfizika 113 • Reaktorfizika 115	
A kötet szerzői	119

Fizikáról, fizikusokról tegnap és ma

Olvasói-szerkesztői jegyzet

„Századunk a fizika százada” – mondták fizikus pályakezdő társaim majd négy évtizeddel ezelőtt. És én, aki a természettudományok és a matematika őszinte tiszteletében iskoláztam, el is fogadtam ezt az értékelést. Az úrkutatás fellendülésének évei voltak azok, amikor a gondolkodó történésznek rá kellett ébrednie, mennyire a tudományos-technikai felfedezések és az azokhoz kapcsolódó világpolitikai stratégiai erőviszony-változások formálják, határozzák meg korunk politikáját, társadalmi rendszereinek sorsát.

Magam is szenvedélyesen olvastam Neumann, Einstein, de ugyanígy biológusaink ismeretterjesztő könyvecskéit, amelyek mindenekelőtt a Gondolat Könyvkiadó gondozásában jelentek meg. Máig ott porosodnak aláhúzgált oldalakkal, lapszéli jegyzetekkel könyvespolcomon. Beláttam nemcsak a relativitáselmélet, de ugyanígy a századelőn a kvantumelmélet történelemformáló kihatásait. A kvantum elméletét, amely alapja volt a tranzisztorzálásnak, magának a tranzisztornak (ha jól emlékszem megalkotása 1947-ben történt), amely végül is megváltoztatta az egész korábbi technikát, és így áttételesen ipari és élelemtermelési kultúránkat. Sőt ma már hozzáteszem: személyi kapcsolatrendszerünket is. Hiszen az elmélet alkalmazássorozatának végén ott áll korunk egyik csodája: a számítógép. És a kvantumfizika lett korunk második csodájának az atomfizikának alapja. Amely atomfizika nélkül – ahogy értettem olvasmányaimból és természetkutató barátaim vitáiból – a kémikusok és a biológusok sem tudták volna megfejtetni a fehérjék titkait. Az atomok közötti elektromágneses eredetű kölcsönhatások felismerése segítette ebben őket. Vagyis a fizika. Mint ahogy megdöbbenett az is, hogy a hidrogén- és az oxigénmolekulák összekapcsolódását is csak a fizika (kvantummechanika) alapján lehet megmagyarázni. Azután büszkén emlegették barátaim és olvasmányaim szerzői a relativitáselméletet, amelyet igyekeztem részleteiben is megérteni. Hiszen a kor újabb csodájának, az úrkutatásnak ez volt, úgymond, elméleti alapja. Amely a világegyetemről és így önmagunk helyéről eddig valótlan felfogásunk változásához, világgépváltozáshoz vezetett...

Most, az évszázad végén olvasva az Akadémia Fizikai Osztályának diszciplína-tanulmányait, megkeresem korábbi pályakezdő fizikus barátaimat, akik már korántsem olyan optimisták a fizikáról beszélve, mint néhány évtizeddel ezelőtt. Mint öregedő kutató sértődötten hallják, hogy a mai fiatalok már arról beszélnek, hogy noha a 20. század a fizika százada volt, de a 21. század már nem a fizikáé, hanem az informatikáé vagy a szédítő gyorsasággal fejlődő biológiáé. És, ha tréfálkozásba fulladva is, de mégiscsak rossz érzéssel hallják a kémikusok érvelését – és látják az én lelkesedésemet –, amikor azok arról beszélnek, hogy az anyagot ugyan a fizikusok bontották szét, de újra és másképpen a kémikusok „rakták össze”. És így hozták létre korunk újabb csodáját néhány évtizeddel ezelőtt, a mesterséges anyagot. A vitában a fizikusokat az „elemzőknek”, önmagukat a kémikusokat, az „alkotóknak”, „újrateremtőknek” nevezik. Azután azt is kényszeredetten hallgatják, hogy kezdi nyitogatni száját a társadalomkutatók tábora is, mondván: a 21. század a társadalomtudományok százada kell, hogy legyen, hiszen a múltban lévő évszázad természettudományos-technikai felfedezéseinek bővületében megfeledekünk arról, hogy mindez nem valami világszellem, hanem *az ember, a társadalom érdekében kell, hogy álljon*. Az ember tanulmányozása lesz a nagy korparancs. Mivelhogy az ember nemcsak egy biokémiai egység, de egy lelki, cselekvőképességgel, érzelmi étellel rendelkező „társadalmi egység” is.

Mi tehát a valóság? – teszi fel a kérdést magának a kutató, aki már évtizedek óta ott tart, hogy a saját maga kutatási területét, a társadalom történelmét sem érzi megragadhatónak természettudományos ismeretek nélkül. Aki arról beszél, hogy még politikai rendszerváltásokat sem lehet politikai doktrínákon, intézményeken mérni, hanem arra is figyelni kell, milyen kihatásai vannak a rendszerváltozásnak az emberi nembeliségre, szellemi-biológiai állapotunkra, sőt azon túlmenően szállásterületünk természeti viszonyaira, a talaj, a víz, a mező és erdő, állatvilág állapotára. És mohón vesszük elő az évtizedekkel korábban már félrerakott kémiai, biológiai, fizikai tankönyveinket, hogy értjük a talajt, a vízgazdálkodás, a környezettudomány, sőt a molekuláris biológia köréből vett olvasmányainkat, és hozzá tudjunk szólni annak érvanyagához, hogy integráljuk azok következtetéseit a magunk társadalomtudományos következtetéseibe.

A 21. század az új szintézis százada lesz. Mi inkább erről beszélünk. Szerintünk ez lesz a 21. század jelmondata. És beszélünk a kutatási területek egyenrangúságáról. Hiszen bármilyen új szintetizáló szempont jelenik is meg, legyen szó akár az ökológiáról vagy genetikáról, vagy antropológiáról, egyik szempont sem érvényesíthető az alaptudományok bármelyikének hiánya esetén. Ennek az új szintézisnek a tudományszervezeti és oktatásbeli alapjait kidolgozni, ez korunk nagy kihívása a tudomány- és oktatáspolitikával szemben. És az ismeretegyüttesek, valamint a különböző kutatásmódszertanok együttes tanulmányozása, ez korunk kihívása a kutatóval szemben. A 21.

század ugyanúgy a fizikáé, mint a kémiáé, a biológiáé, a társadalomtudományoké, az élettelen, az élő természet, benne kiemelten az ember tanulmányozásának a kora. Értetlenül fogadjuk tehát fizikus barátaink szomorkodását. És értetlenül fogadjuk szakmaelhagyásuknak indokaként azt, hogy a 21. század már nem a fizika százada. És mosolyogva hallgatjuk kémikus, biológus vagy éppen társadalomtudós barátainkat, akik a magukénak mondják a jövőt, a 21. századot.

Korunknak ezt a kihívását a tudományos gondolkodással szemben kívánjuk pontosan megérteni és e kihívásnak megfelelni. Ezért is javasoltuk 1997-ben, hogy induljanak az ún. diszciplína-viták. Mérjük fel: mennyiben feszíti szét napjaink tudományos gondolkodásának fejlődése a hagyományos diszciplínakereteket? Hol tart egyes kutatási területeken a világ tudományossága? Hol tartanak a magyarországi kutatások? Hol vannak lemaradások a világ élenjáró kutatási módszereihez képest? Mit kíván speciálisan Magyarország és a magyar társadalom érdeke? Mennyire felelnek meg a jelenlegi kutatásszervezeti keretek (tanszékek, kutatóintézetek) a kutatói elvárásoknak és a nemzetközi igényeknek? Ahhoz, hogy az állami fenntartású kutatásszervezetben preferenciákról, témakiemelésekről beszélhessünk, először ezekre a kérdésekre kell választ adni. E válaszok nélkül mindenféle preferencia megfogalmazása önkényes lesz. Az 1996-ban megkezdett tudománypolitikai programnak egyik fontos részeként tekintettük tehát az egyes diszciplínák helyzetelemzését és az alternatív fejlesztések megfogalmazását.

1998-ban megindultak a Magyar Tudományos Akadémián a diszciplína-viták. Egyelőre a 11 osztály keretében. Hamarosan megjelenik az a kötet, amelyik ezen viták végső eredményeit tartalmazza. És külön jelentetjük meg a fizika és a kémia területén keletkezett tanulmányokat és külön kötetben a társadalomtudományi dolgozatokat.

A jelen – a Fizikai Osztályon keletkezett tanulmányokból összeállt – kötet feltehetően elsősorban fizikustársaink olvassák majd. De remélem, hogy eljön az idő, amikor a más természettudományok, sőt a társadalomtudományok művelői is legalább kézbe veszik és tanulmányozni fogják azt.

Budapest, 2000. április

GLATZ FERENC

A huszadik század fizikájáról

Egy lehetséges nézőpontból tekintve

A huszadik század végéhez közeledve, és visszatekintve e század tudományos téren tett haladására megállapíthatjuk, hogy a fizika nagyszerű eredményeivel és felfedezéseivel, valamint azok műszaki és orvosi alkalmazásaival nagymértékben gazdagította az emberiséget. Meghatározó szerepe volt nemcsak a világról alkotott képünk formálásában, hanem más diszciplínák megtermékenyítésével az emberek életének szebbé, boldogabbá tételében is. Elég itt arra utalni, hogy a rádió, a televízió, az elektronika, a számítógépek és a robbanás-szerűen terjedő információközlés teljesen megváltoztatták és napjainkban is alakítják az emberek életformáját. Talán nem tévedünk nagyot, ha azt mondjuk, hogy a többi természettudományi diszciplína, mint például a kémia és a biológia sikereihez is hozzájárult a fizika.

A huszadik század fizikájáról szólva, már a bevezetőben rá kell mutatni, hogy az két elméleten, a kvantumelméleten és a relativitáselméleten nyugszik. Mindegyik alapvetően megváltoztatta a világról alkotott képünket, és az eredményeikre alapozott alkalmazások felgyorsították az egész természettudományos fejlődést. Érdeemes felidézni, hogy ez mindjárt a 20. század hajnalán kezdődött, amikor Max Planck 1900 decemberében megtartotta azt az előadását, amelyben beszámolt arról, hogy a hőmérsékleti sugárzás energiájának frekvencia szerinti eloszlását az oszcillátor energiájának kvantált-ságára vonatkozó hipotézissel, az ún. kvantumhipotézissel sikerült a tapasztalattal egyezően megmagyaráznia. Ez volt az első lépés a 20. század fizikájának máig ívelő diadalútján. Ezt követte Albert Einstein fotonhipotézise. Majd Niels Bohr, Werner Heisenberg, Ervin Schrödinger és Paul Dirac munkássága révén megszületett a század egyik legragyogóbb fizikai elmélete, a kvantummechanika. Hatását tekintve példátlan a fizikai elméletek között, mert az atomok fizikáját, azok egymáshoz kapcsolódását, a molekulák törvényszerűségeit és végső soron az anyag szerkezetét, a különféle halmazállapotok mibenlétét ez magyarázza meg. Az elvi jelentőségű eredmények mellett az alkalmazások egész sorát lehetne felsorolni a műszaki tudományok, a biológia vagy az orvostudomány területéről. Ennek illusztrálására

legyen itt csupán egyetlen példa. A különféle anyagok elektromos vezetési tulajdonságainak kvantummechanikai magyarázata vezette Bardeent a tranzistor elvének felfedezéséhez. Erre alapozva indult meg a modern elektronikai kutatás és az eredmények műszaki alkalmazása, ami mára a szórakoztató elektronikai iparral, valamint a számítógépekkel teljesen átalakította az emberi kapcsolatokat, és jelentősen megváltoztatta az emberek viszonyát a munkához.

A relativitáselmélet a térre és az időre vonatkozó, megszokott fogalmaink teljesen új értelmezése mellett, kritériumot állított az egzakt, tehát igaz törvényekkel szemben, nevezetesen azt, hogy azoknak változatlanoknak kell maradniuk, ha egyik inerciarendszerről másikra térünk át, mert a relativitás elve szerint ezek a vonatkoztatási rendszerek teljesen egyenértékűek a természeti jelenségek leírása szempontjából. Ezzel egy fontos módszertani eszközt adott az elméleti kutatók kezébe, mert a kutatás menetében már kiderül, hogy az új felismerés igaz-e vagy eleve hamis. Az energia és a tehetetlenség közötti kapcsolat felismerésével pedig az egész ez utáni fizika alakulását döntően befolyásolta. Az általános relativitáselmélet a gravitáció modern elméleteként mennyiségileg meghatározza, hogy a tömegek miként hozzák létre és alakítják ki a tér-idő geometriai szerkezetét. Az elmélet alapegyenletei a Világegyetem keletkezésére és szerkezetére vonatkozó kutatások elméleti alapjául szolgálnak ma is.

A kvantumelméletnek az erőterekre történt kiterjesztése, az ún. kvantumtérelmélet az anyag legelemibb alkotórészeit, azok között ható kölcsönhatásokat, az ún. elemi részek fizikáját kutatja. Ez és a hozzákapcsolódó kísérleti vizsgálatok jelentik a század utolsó néhány évtizedének kutatásait a fizika fejlődésének abban a fő vonulatában, amely Newton *Principiájával* kezdődött, és a fizika fundamentális kérdéseire keresi a választ. A legelemibbnek gondolt alkotórészek törvényszerűségeit vizsgálva, végeredményben az a távolabbi cél lebeg a kutatók előtt, hogy egyre közelebb kerüljenek a nagy elvi kérdések megválaszolásához. A gondolkodó emberben eleve megvan a kíváncsiság arra, hogyan keletkezett a világ, amelynek ő is része, milyen törvények szerint fejlődik, s így tovább. A nagy energiájú fizika már ma is, de még inkább a közeljövőben olyan kísérleti feltételeket tud előállítani, ugyan rövid ideig, amelyek az Univerzum keletkezése utáni másodpercekben lehettek. Ezek tanulmányozása a világról kialakult képünk gazdagítását és egyre pontosabbá válását eredményezik. Az sem mellékes persze, hogy eközben olyan kísérleti eszközök és új technológiai eljárások születnek, amelyek az élet más területein is eredményesen alkalmazhatók. Az elvi kérdések tanulmányozása tehát a gyakorlati életben is hasznosul, és ezáltal is szolgálja az emberiség javát. Az elvontnak tűnő alap kutatásokra fordított pénz ilyen értelemben is a fejlődést segíti.

Az Akadémia Fizikai Tudományok Osztályához tartozó tudományos bizottságok 1998-ban és 1999 első felében alapos elemző munkával megvizsgálták a

fizika egyes részterületeinek jelenlegi helyzetét a világban. Ennek során azt is áttekintették, hogy milyen kutatási irányzatok érvényesülnek, és hogy egyáltalán merre fejlődik a fizika. Ezzel a nemzetközi helyzettel összevetették a hazai viszonyokat és kutatásokat. Az így elkészült tanulmányokat megtárgyalták az illetékes bizottságok, majd az elhangzott megjegyzések alapján átdolgozott anyagok kerültek az osztály ülése elé, ahol a fizikusok szélesebb köre alakított ki véleményt az éppen szereplő bizottsági előterjesztésről, illetve tanulmányról.

Mivel a fizikai kutatások az anyag legelemibb összetevőinek vizsgálatától a Világegyetem keletkezésének és fejlődésének lehetséges modelljeiig terjednek, az elemző tanulmányok is az elemi részekkel kezdődően a csillagászati és űrfizikai kutatásokig ívelő, egész fizikát átfogják az osztály bizottságai szerinti bontásban. Mindegyik résztanulmány önmagában is kerek egységet képez, a szerkesztésnél éppen ezért lényegében semmit nem változtattunk. Csak ahol a kapcsolódások indokolták, ott utaltunk a fizika másik fejezetére, illetve a kívánatos összefüggésre.

A soron következő tanulmányok a huszadik század utolsó évtizedeinek fizikájáról szólnak. Az elolvasásuk után érdemes visszagondolni a száz év előtti helyzetre, amikor a fiatal Plancknak, tanára azt tanácsolta, hogy nem érdemes fizikára adni a fejét, mert a fizika épülete szinte teljesen készen áll, olyan tökéletes, hogy azon már nem sok tennivaló akad a jövőben. Nagyon tévedett, mert a fejlődés olyan nagyszerű tudományos eredményeket hozott, amelyek e századot magasan kiemelik a megelőzők közül. Hogy mit hoz a jövő század e rohamos fejlődés mellett, azt senki sem tudja, de nagy valószínűséggel mondható, hogy a fizikának akkor is fontos szerepe lesz. Talán még meghatározó is.

CSIKOR FERENC*

Részecskefizika

Bevezetés

A részecskefizika a legalapvetőbb ismereteinket próbálja összhangba hozni a természet megismerése során a legkisebb részecskéktől, a legapróbb mikrovilágtól egészen a galaxisklaszterek méretéig. Teljes egészében alaptudomány jellegű, a természet megismerését célzó alapvető igényünknek és törekvéseinknek kielégítésére szolgál. Nem véletlen, hogy ez a tudományterület hozta a legtöbb alapvető felismerést, amit számszerűen a legtöbb Nobel-díjjal jutalmaztak.

A 20. század elejétől a fizika látványos fejlődése következett be. E fejlődés bizonyos elemeit, például az elektron, pozitron, foton, nukleonok felfedezését, a térelmélet kidolgozását mai szemmel visszapillantva, a részecskefizika ki-fejlődéséhez tartozó eredményeknek tekintjük. A mai értelemben vett részecskefizika azonban csak később önállósodott, vált el a magfizikától. Kísérleti téren a pion felfedezését követően megindult gyorsítóépítésekől dátumozhatjuk, az elmélet vonatkozásában valamivel korábban következett be alapvető előrelépés a kvantum-elektrodinamika renormálásának, a magasabb közelítések számíthatóságának megértésével. 1956 táján (a tértükrözési szimmetria sérülésének felfedezése idején) a részecskefizika már önálló rész-tudománynak tekinthető, melynek fejlődése napjainkig is töretlenül folyik. Kísérleti téren az egyre nagyobb energiák felé való törekvés jellemzi, ami által az anyag szerkezetét egyre kisebb skálákon tanulmányozhatjuk. Fejlődéséhez kétség kívül hozzájárult a keleti és nyugati világ (ez esetben egészséges) versengése. Napjainkra a kutatások további folytatásához olyan nagyméretű, bonyolult berendezésekre (gyorsítókra, detektorokra) van szükség, amelyek megépítése és üzemeltetése még a leggazdagabb országoknak is problémát jelent. A nemzetközi együttműködés tehát a részecskefizika szempontjából

* A Részecskefizikai Bizottság megvitatta a most közölt anyag előzményeit, amelyeket Fodor Zoltán és Pócsik György egyetemi tanárok (ELTE, Elméleti Fizikai Tanszék) készítettek. Ezeket felhasználva e tanulmányt Csikor Ferenc, a Részecskefizikai Bizottság elnöke írta.

alapvető szükségyszerűség. Szerencsére ezt a tényt korán felismerték, így a részecskefizikusok a nemzetközi együttműködés szempontjából ma is igen kedvező helyzetben vannak.

A részecskefizikai kutatás helyzete és fejlődési irányai

A jelenlegi részecskefizikai ismereteink eléggé megérett, alapos tudásról adnak tanúságot. A részecskefizikáról alkotott képünk azonban egy érdekes kettősséggel jellemezhető. Egyrészt, a ma ismert elmélet az ún. *standard modell* az összes létező részecskefizikai kísérletet nagy pontossággal leírja, olyannyira, hogy nem ismerünk egyetlen olyan kísérleti tényt sem, amely ennek direkt ellentmondana. Ugyanakkor tisztában vagyunk azzal, hogy ez a jelenleg legátfogóbb elméletünk csak egy fenomenológiai leírás lehet. Számos olyan tény előtt állunk értetlenül, amelynek megértése fontos lenne, de a standard modell nem ad rájuk választ, hanem bemenő paraméterként, vagy alapvető feltevésként kezeli őket. Ilyen kérdés például az, hogy miért éppen három részecskecsalád létezik, azaz mi az oka annak, hogy az elektron mellett a müon és a tau részecske is létezik a természetben? A kísérleti indíttatású kérdések mellett elméleti jellegű problémák is felmerülnek a standard modellel kapcsolatban. A legsúlyosabb ezek közül a tömeggenerálás kérdése. A standard modellben alkalmazott megoldás, az ún. Higgs-mechanizmus ad hoc jellegű és további problémákat vet fel. Ezek egyike, hogy a Higgs-részecskét – mely az elmélet szerint valódi, talán nem is túl nagy tömegű skalár részecske – ez idáig a kísérletekben nem sikerült megtalálni. Fontos elméleti jellegű probléma az, hogy nem tudjuk, milyen extra szimmetria vagy finomhangolás révén kerül el az elmélet a tömegek Planck-skálájú korrekcióinak megjelenését? Utóbbi érv alapján azt kell mondanunk, hogy a jelenleg ismert modell csupán kisenergiás megjelenési formája egy magasabb szintű, a természetet jobban leíró, nagyobb energiákig érvényes elméletnek.

A standard modell kiterjesztésére irányuló jelenlegi elméleti javaslatok számos kiutat mutatnak a fenti problémák megoldására. Pusztán az elméleti megfontolások természetesen nem jelölhetik ki azt az irányt, amerre haladnunk kell. Mindenképpen szükség van a kísérleti információk megértésére és feldolgozására. Ezek azok az információk, amelyek révén majd ki tudjuk választani, hogy a számos elméleti lehetőség közül a természetben végül is melyik valósul meg?

Az elmélet továbbfejlesztésével egyidejűleg természetesen fontos feladat a standard modell predikcióinak minél pontosabb kidolgozása és annak (esetleg precíziós) tesztelése. Ezen kutatások előrehaladása a standard modellel túlmutató kísérleti jelzések értelmezése szempontjából is döntő jelentőségű. Fontos feladat olyan módszerek kidolgozása, melyek az elmélet által elvileg leírt jelenségek (pl. magfizika) tényleges értelmezését lehetővé teszik. Rend-

kívüli érdeklődésre számíthat minden olyan elképzelés, ami a gravitáció kvantumelmélete, a gravitációnak a többi kölcsönhatással egyesített tárgyalásának megteremtésére irányul. Igen erős az érdeklődés a részecskefizika asztrofizikai alkalmazásait illetően is.

A kísérleti részecskefizika e kérdésekre elsősorban részecskegyorsítókon és nem gyorsító fizikai detektorokkal végzett kísérletek segítségével igyekszik választ adni. A gyorsító fizikában elemi vagy összetett részecskéket (pl. proton, antiproton, nehéz ionok) ütköztetünk, majd meghatározzuk az ütközéskor keletkezett különféle részecskék számát, mérjük ezek impulzusait, energiáit és ezek alapján vonunk le következtetéseket az ütközés során szerepet játszó kölcsönhatások jellemzőire. A mai napig a gyorsító berendezések szállították a legtöbb információt a részecskefizika számára, segítségükkel új elemi részecskék tucatjait találtuk meg, és az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatások alapvető tulajdonságait sikerült tisztáznunk. Ma már ott tartunk, hogy a jelenlegi energiákon (néhány száz GeV alatti tartomány) az elektromágneses kölcsönhatás jóslatait 13, a gyengéét 4, az erősét pedig gyakran 3 tizedes jegy pontosságig tudjuk igazolni.

A részecskefizika nem gyorsítókhöz kapcsolódó kísérletei újra virágkorukat élik. Olyan fontos információkhoz juthatunk segítségükkel, mint a világegyetem tömegének túlnyomó többségét (kb. 90%-át) kitevő sötét anyag megismerése, vagy a nagyenergiás kozmikus sugárzás részleteinek tisztázása. Igen jelentősek az utóbbi években különösen sikeres (pl. a Super Kamio-kande kísérlet révén) neutrínófizikai kutatások. Az egyik legígéretesebb kísérleti irány, a mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás irányfüggésének a vizsgálata. Ez a világegyetem keletkezésének korai szakaszára utal, segítségével lehetővé válik annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy hogyan alakultak ki azok a kezdeti tömegcsomósodások, a nagy ősrobbanást követő 10^{-45} másodpercen belül, amelyek a mai Univerzumban a galaxisokat és azok klasztereit eredményezték. Az épülőben lévő gravitációshullám-detektorok minőségileg új ismereteket hozhatnak a gravitációelmélet és a részecskefizika számára egyaránt, talán közelebb vive a két tudományterület közötti kapcsolat megértéséhez is.

A kísérleti részecskefizika berendezéseire jelentős összegeket fordítanak a világ vezető országai. Ezek több millió dolláros összegek, így a teljes magyar államadósság tartományába esnek. Számos új gyorsító épül Japánban (KEK), az európai együttműködéssel létrehozott és működtetett svájci kutatóintézetben (CERN) és Németországban (DESY). Az USA 1999. évi költségvetésében ismét alapvető prioritással szerepel a részecskefizikai alap kutatás finanszírozása. A kísérleti berendezések ezen nagyfokú koncentrációja azt is eredményezi, hogy a részecskefizika meglehetősen koncentrált tudomány, főleg kísérleti szempontból, de a kutatás jellegét tekintve elméleti szempontból is, hiszen az alapvetőnek tűnő problémák világosan kirajzolódtak már. A lehetséges

megoldások viszont a kutatói fantáziának és találékonyságnak megfelelően rendkívül szerteágazó, gazdag struktúrát eredményeznek.

A hazai részecskefizikai kutatás helyzete, jövője, a részecskefizika oktatása

A magyar részecskefizikai kutatásoknak régi, jól megalapozott nemzetközi tekintélye van, ami nem kis mértékben az 1950-es években az elméleti részecskefizikát meghonosító Novobátzky Károlynak és a kísérleti részecskefizikai kultúrát hazánkba hozó Jánossy Lajosnak köszönhető. (Mindketten az MTA alelnökei is voltak.) Több magyar részecskefizikus is kapott Kossuth-, Állami és Széchenyi-díjat. 1972-ben magyar kezdeményezésre hazánkból (Balatonfüredről) indult el a Nemzetközi Neutrínó Konferenciák kétévente szabályosan ismétlődő sorozata, ami kezdettől fogva Nobel-díjasokat vonzott az előadók és résztvevők soraiba. Hazánkban már háromszor rendeztek ilyen konferenciát. A Nemzetközi Neutrínó Bizottságnak magyar elnöke van. Az Európai Fizikai Társaság Részecskefizikai Osztályának volt magyar elnöke; az Európai Részecskefizikai Konferenciát 1977-ben Budapest látta vendégül; 2001-re ismét pályáztunk és el is nyertük a rendezés jogát. A dubnai Egyesített Magfizikai Kutatóintézetnek volt magyar igazgatója is. A vasfüggönyön elsőként átnyúló részecskefizikai Bécs–Pozsony–Budapest háromszög-együttműködés négy évtizedes múltra tekint vissza és ma is él. A Tudomány Világkonferenciájához csatlakozva 1999-ben megrendeztük az *Univerzum jövője* konferenciát.

Számos nemzetközi kutatóintézetben dolgoznak a magyar kísérleti részecskefizikusok. Közöttük legfontosabb a CERN, az egyesült európai kutatóintézet, melynek hazánk 1992 óta teljes jogú tagja. Érdemes megjegyezni, hogy a magyar belépés a CERN-be az európai integrációs folyamatunknak egyik legelső mozzanata volt, és maga a CERN pedig az EU előképe. A részecskefizika az a terület, ahol Európa megelőzte az USA-t. A CERN-tagság lehetővé teszi kutatóinknak, hogy a világ legnagyobb gyorsítóját használják, és így a nemzetközi kutatások élvonalában legyenek. Mivel a CERN működtetése során az egyes országok befizetési kötelezettségei az ország bruttó hazai termékével (GDP) arányosak, így a magyar fizikusok igen alacsony befizetés mellett (a CERN teljes költségvetésének kevesebb mint 1%-a), a LEP-gyorsító két nagy detektorának működtetésében (L3, OPAL) vesznek részt. Itt az elsődleges kutatási irány a részecskék tömegéért felelős Higgs-mechanizmus vizsgálata, a Higgs-részecskék keresése, de az erős kölcsönhatás részleteinek tisztázása is fontos vizsgálati téma. Igen perspektivikusak azok a vizsgálatok, amelyek egy ma még nem ismert bozon-fermion szimmetriát, az úgynevezett szuperszimmetriát próbálják kísérletileg kimutatni. A feladat nehézsége abban rejlik, hogy ez a hipotetikus szimmetria csak a jelenleginél nagyobb energiáskálán lehet pontos, így a mai kísérleti lehetőségek legfeljebb csak egy-

egy vonás erejéig mutathatnak fel szuperszimmetriára utaló jeleket. A nagyenergiás kísérletek mellett kisenergiás, proton-antiproton hadronos szétszgázás mérésében és analizisében is részt vettek magyar kutatók.

A CERN-ben a részecskefizikai kutatások mellett jelentős magyar kutatócsoport foglalkozik a magfizika és a részecskefizika határterületéhez tartozó nehézion-kutatásokkal. Ezen kutatások a korai Univerzum egyik legfontosabb fázisátmenetének a kvark-gluon plazma keletkezésének gyorsító kísérletekben való megvalósítását is célozzák. Ez a téma sajátos hazai fejlődés következtében Magyarországon – ellentétben a világ számos jó fizikai kutatási hagyományokkal rendelkező országával – ma jórészt magfizikai kutatásnak számít, ezért nem itt, hanem a magfizikai kutatások ismertetésénél foglalkozunk vele. A nem gyorsító kísérletek közül a neutronfizikai kísérletekben van jelentős hazai részvétel.

A magyar részecskefizikusok tevékenysége tehát szervesen illeszkedik a világ fő kutatási irányvonalához. A konkrét kutatási témák bizonyos értelemben eltérnek a különböző kutatóintézetekben (DESY, KEK, Fermilab), hiszen a természetet más-más berendezésekkel sokféle módon és sokféle irányból megközelítve próbáljuk megérteni. Várható, hogy a magyar kutatók a nemzetközi kapcsolatok szélesedésével megjelennek a többi nagy kutatóintézetben is, de valószínűleg hosszú távon igaz marad az az állítás, hogy a magyar kísérleti részecskefizika leginkább a CERN-re és az ott folyó kutatómunkára alapozódik.

A nemzetközi kapcsolatok szerepe a részecskefizikában meghatározó. Ahogy már fentebb említettük a kísérleti berendezések beruházási költsége olyan magas, hogy egyetlen ország, még ha a leggazdagabbak közé tartozik is, egyre kevésbé engedheti meg magának, hogy egyedül megvalósítson egy ilyen drága programot. Ezért egyre inkább nemzetközi együttműködések keretében készülnek a berendezések, és folynak a kísérletek. Illusztrálásként érdemes megemlíteni, hogy a magyar kutatók részvételével működő LEP-kutatócsoportok egyenként mintegy 300 fizikus munkájára építenek. A készülóban lévő LHC-gyorsító CMS- és ATLAS-csoportjainak létszáma még nagyobb, közöttük számos magyar résztvevő is van, akik jelenleg a detektor egy-egy fontos részét tervezik és készítik. A 2000 utáni munka zöme az LHC-t érinti.

Az elméleti részecskefizikának kiváló magyar művelői vannak itthon és külföldön is. Viszonylag új jelenség, hogy a pályakezdő fiatalok egy része a nyugati világban szokásos posztdoktori állásokban kezdi tudományos karrierjét. A hazai munkahelyű és külföldön élő fizikusok közötti együttműködés példaeértékű. A magyar elméleti részecskefizikusok szerepe kiemelkedőnek mondható mind a formálisabb elméleti fizika, mind a fenomenológiai részecskefizika területén. Az elmúlt években a szakterület számos, nemzetközi viszonylatban is jelentős eredményt produkált. Ezek közé tartozik a semleges Z-bozon és Higgs-bozon vizsgálata, az erős csatolás meghatározása és gluon

jetek, elektromos fázisátalakulás, a világ barion aszimmetriája, sugárzási korrekciók számítása, egzakt, konform és alacsony dimenziós térelméletek, húrelméletek és klasszikus térelméleti megoldások vizsgálata. Különösen széles körű a nemzetközi együttműködés (CERN, DESY, Bécs, Pozsony, MPI München, Bielefeld, Jéna, Trieszt, Tours, Marseille, Cambridge stb.). Ennek többféle formája valósul meg. Öröndetes, hogy a mozgás már korántsem egyirányú.

Az egyetemi oktatók tapasztalatai szerint sem tehetség, sem elhivatottság tekintetében nincs kevesebb utánpótlásul szolgáló fiatal ma, mint a korábbi évtizedekben. A részecskefizika oktatásának feladatát hagyományosan az ELTE TTK látta el. A kutatási lehetőségeknek megfelelően különösen az elméleti részecskefizika oktatása magas színvonalú. A kísérleti oktatás fejlesztésében döntőek a KFKI RMKI-val való kapcsolatok. Öröndetes tény, hogy újabban más egyetemek is oktatnak professzionális szinten részecskefizikát. A doktori iskolák létrejötte a korábbi helyzettel összehasonlítva sokkal kedvezőbb lehetőségeket teremtett meg a részecskefizika oktatására. A hallgatók egyetemi és doktoranduszi éveik alatt szisztematikus bevezetést kapnak a részecskefizika legfontosabb területeibe.

A részecskefizika táulatai

A részecskefizika szerepe az általános társadalmi kultúrával való összefüggésben olyan alapvető kérdések életben tartására irányul, amelyek az emberiséget több ezer éve foglalkoztatják. Mindig és mindenhol felmerült a kérdés, vajon hogyan alakult ki a világ, melyek a legalapvetőbb építő kövei, hogyan fejlődik, mivé alakul? A tudósok, filozófusok, alkalom adtán költők, a történelem egyes szakaszaiban más-más választ adtak ezekre a kérdésekre. Ma a kérdések megválaszolásához a részecskefizika jutott legközelebb, a társadalom kíváncsiságának kielégítését e tudományág valósítja meg leginkább.

Az elmúlt 100 évben a világképünk drámaian megváltozott. A kb. 15 milliárd évvel ezelőtt történt ősrobbanás tucatnyi jelét látjuk ma is. A kérdéskör egyáltalán nem nevezhető lezártnak, inkább gyors fejlődés várható. A laikus közvélemény mély érdeklődését az is mutatja, hogy a világ vezető napilapjai (New York Times, Washington Post, Frankfurter Allgemeine Zeitung, sőt magyar újságok is) címdoldalon foglalkoznak egy-egy új felfedezés után a kérdéskörrel (pl. sötét anyag, ősrobbanás, a világ keletkezése és fejlődése).

A részecskefizika távlati problémái Eötvös Loránd nevét juttatják eszünkbe. Az égitestek mozgása méri a rájuk ható gravitációs erőt, a gravitáció pedig jelzi az azt keltő tömegeket. A tapasztalatok szerint a Tejútrendszer és az Univerzum tömegének több mint 90%-a nem magyarázható az ismert, standard modellben szereplő részecskékkel (neutronokkal, protonokkal, elektronok-

kal, fotonokkal). A „sötét anyag” rejtélyének megértése napjaink olyan kihívása, mint az „éter kimutatása” lehetett száz éve. A részecskék tömege (száz évvel korábbi reményekre rációfolva) nem magyarázható az általuk keltett kölcsönhatásokkal, a standard modellhez e célból fűzött Higgs-modell még igazolásra szorul. Márpedig ezek a tömegproblémák alapvetően fontosak az ősrobbanás utáni pillanatok, a galaxisok születése és az Univerzum jövője szempontjából.

A részecskefizika a saját kérdéseinek megválaszolása során olyan megoldásokat is talál, melyeket azután a társadalom széles körben alkalmaz. Elég emlékeztetni a számítógépes világháló, a World Wide Web kidolgozására, mely a CERN részecskefizikai kutatóintézetben történt, és a kísérletek távolból történő megfigyelésére szolgált, és melynek magyar kezdeményezői is természetesen részecskefizikusok voltak. A részecskefizika az egyik legfontosabb húzóereje az informatika fejlődésének. Óriási méretű adatmennyiség feldolgozására van szükség rendkívül nagy sebességgel. Ez nyilvánvalóan szétterül a társadalom más részeire is, gazdaságosabbá és hatékonyabbá téve az informatikai rendszereket. Ennek egyik hazai vonatkozása, hogy a CERN egyik regionális adatfeldolgozási bázisa a jelenlegi tervek szerint Magyarországon fog létrejönni. További területek, melyekben a gyorsítóépítések során jelentős technológiai fejlesztések születtek: vákuumtechnika, nagyméretű szupravezető mágnesek előállítása, nagy teljesítményű klisztronok kifejlesztése, különleges anyagok előállítása stb. A gyorsítóknál keletkező sugárzások kutatási, gyógyászati és ipari felhasználást is nyerne.

A részecskefizika jövője biztosnak mondható, a kutatási irányok sok érdekes kérdést vetnek föl. Ezen kérdések megválaszolása közelebb visz a természet alapvető építő elemeinek és kölcsönhatásaik megértéséhez. Nemzetközi méretekben a pénzügyi kilátások is biztatóak, hiszen a fejlett országok biztosítják a részecskefizikai intézetek működtetését. Magyarország számára a pénzügyi kötelezettségek nagyon kedvező feltételek mellett jelennek meg. A 2 millió svájci frank CERN-tagsági díj befizetése mellett 1,4 millió svájci frank konkrét megrendelések formájában visszafolyik az országba.

Magfizika

A magfizika tudománya

A magfizika helye a természet leírásában

Atommagoknak hadronok kötött és kvázikötött rendszereit nevezzük. A magfizika tudománya az atommagok szerkezetét és az egymással vagy egyéb részecskékkel való ütközéseik során kialakuló nukleáris rendszereket vizsgálja.

Az atommagok változatos előfordulási formáinak leírására a kvantummechanika és a hadroni alkotórészek térelmélete, a kvantum-színdinamika szolgál. A természetben megtalálható ezernyi fajta atommag közül 266 mutatkozik stabilnak. Létezhet még további néhány ezerféle atommag, amelyeknek eddig csupán kisebbik hányadát állították elő. Léteznek gravitációsan kötött hadronikus rendszerek is, az ún. neutroncsillagok. A nukleáris rendszereket többnyire úgy vizsgálják, hogy a természetben hozzáférhető atommagokat ütköztetik egymással vagy egyéb részecskékkel, és az ütközéskor kirepülő részek megfigyelt jellemzőiből következtetnek a kialakult állapotok tulajdonságaira. Világszerte sok száz részecskegyorsító berendezést működtetnek e célból, és a tudományos kutatást szolgáló csúcstechnológia nagy részét évtizedek óta atommagfizikai kutatásokra használják.

A nukleáris rendszerek jelentőségét a világmindenségben és az emberi környezetben betöltött szerepük, valamint struktúráik változatossága adja.

Atommagok teszik ki a világ ismert tömegének nagy részét. Alkotórészeik a nukleonok, amelyek kvarkokból és gluonokból, a világ fundamentális építőköveiből épülnek fel. A kvarkok a hadronokba való bezártsága miatt a legrejtvetőbb ismert részecskék.

A könnyen hozzáférhető atommagok legfontosabb tulajdonságai, a nyugalmi tömegüknél jóval kisebb energiájú ütközéseik mechanizmusai nagyrészt ismertté és elvileg értelmezhetőkké váltak. Kiderült, hogy a mag nukleonjai hajlamosak mind egyéni, mind együttes, összehangolt mozgásra. A nukleáris rendszerek alkotórészeinek száma túl kicsi ahhoz, hogy klasszikus törvények által uralt makroszkopikus viselkedést mutassanak, azonban gyakran túl nagy ahhoz, hogy az egyes részecskék dinamikai változói jellemezhetnék a rendszerek viselkedését. Így fontosak mind az egyedi részecskék, mind pedig együttes

viselkedésük. Míg az egyes részecskék csak a kvantummechanika nyelvén tárgyalhatók, a kollektív jelenségek már klasszikus vonásokat is mutatnak. Az atommag *mezoszkopikus rendszer*, s mint ilyen átmenetet alkot a kvantum és a klasszikus világ között. A nukleáris rendszerek viselkedése kevésbé függ az elemek kölcsönhatásának részleteitől, annál inkább a sok alkotórész alkotta struktúrák közös globális tulajdonságaitól. Sok atommagról ismert, hogy tulajdonságaik gyakorlati alkalmazásokra adnak alkalmat.

A magfizika nem a legalapvetőbb fizikai diszciplína, hiszen a magok alkotó-elemeinek viselkedését a részecskefizika kutatja. Jelentős sajátága azonban az, hogy számos fogalma, módszere, állítása más tudományokra is átvihető, és ott ezek alkalmazása igen hasznosnak bizonyult. Ez az „univerzalitás” nem kevésbé fontos, mint a „fundamentalitás”. A magerők tudománya alapvetőbb ugyan, mint a bonyolult magok spektroszkópiája, a magok viselkedéséből mégis több következtetést vonhatunk le a magerőkre, mint fordítva.

A magfizika univerzalitására a legismertebb példák a természet alapvető szimmetriáiból következnek. Ezeknek köszönhető, hogy az atommag az alapvető természeti *szimmetriák* és *megmaradási tételek* (pl. időmegfordítás, tükörszimmetria, barionszám-megmaradás) ellenőrzésére szolgáló laboratóriumként szolgálhat. Az univerzáliság egy másik csoportját a magok mezoszkopikus jellege adja. Úgy tűnik, azok az elvek, amelyek a mezoszkopikus rendszerekre jellemző állapotokat és paramétereket kiválasztják, univerzálisak. Az a tudományág, amelyben az utóbbi években a magfizikai fogalmak megdöbbentően sikeresen vizsgáltak, az atomi klaszterek fizikája. Még újabb terület a csupán néhány elektront tartalmazó félvezetőzárványok, az ún. kvantumputtyok leírása. A kvantumputtyok a jövő mikroelektronikájában játszhatnak szerepet. A kvantumputtyokba bezárt elektronok a mag átlagterébe bezárt nukleonokhoz hasonlóan viselkednek. A néhány részecske ütközésének elméletét ugyancsak a magfizikán belül fejlesztették ki, és alkalmazási területe ez ideig túlnyomóan a magfizikára szorítkozott, azonban a töltött-részecske-rendszerek ütközéseinek leírásában is jelentős előrelépések vannak, s ezek alkalmazásra lelnek az atom- és a molekulafizikában is.

Alig száz évvel ezelőttig a nukleáris környezet ismeretlen volt, és a laikus számára máig is homályban van. A bomló atommagok által kibocsátott sugárzások veszélyforrást jelentenek, de megzabolázva gyógyászati eszközök lehetnek. A magfizika azzal a felismeréssel tett szert kiemelkedő jelentőségre, hogy a magfolyamatokból hőenergia szabadítható föl. A hirtelen felszabadítható energia a fegyverkezési verseny tárgyává vált, a szabályozottan felszabadítható energia pedig az emberiség energiaéhségének kielégítését szolgálja. A nukleáris energiatermelés katasztrofális környezetszennyezés okozója lehet, a jövőben kidolgozandó kimeríthetetlen és kevésbé szennyező magfizikai energiatermelő módszerek viszont a civilizáció fennmaradásához adhatnak esélyt.

Mai kutatási irányok a világ magfizikájában

Az alap kutatás a magfizikai jelenségek egyre mélyebb megértésére és alapvető fogalmakkal való leírására törekszik. Az ebbe az irányba vivő egyik fő kutatási terület ma a *különleges rendszerek, állapotok, jelenségek és szerkezeti formák* tanulmányozása. A „különleges” kifejezés a földi környezetben, hagyományos kísérletekben megfigyelt jelenségekhez képest értendő. Egzotikus lehet a stabil rendszerektől erősen eltérő deformáció, impulzusnyomaték, proton-neutron arány, gerjesztési és bomlási módus.

Ugyancsak különlegeseknek számítanak olyan magfolyamatok, amelyek a világegyetem anyagának kialakulása során az ún. nukleoszintézisben játszottak fontos szerepet, de laboratóriumban eddig nem lehetett megfigyelni.

A bombázó energia növelésével előálló klasszikus statisztikus aspektusok, „fázisátalakulások”, a nemnukleoni komponensek megjelenése, a szubnukleoni szerkezet szerepe egyre nő: a hadronok feltörésével kialakuló kvark-gluon plazma előállítása küszöbön áll. Ez az „ősrobbanás” utáni korai szakaszban a világegyetem anyagának fő formája volt.

A magfizikában manapság folyó főbb kutatások a következőképpen foglathatók össze:

1. *A különleges tulajdonságú magállapotok szerkezetének tanulmányozása.* Idetartoznak az erősen deformált magok, a neutronglória (pl. a ^{11}Li -ben) és a neutronbőr jelensége (nagy neutrontöbbletű nehéz magokban), a proton-neutron párképződés (közel azonos neutron- és protonszámú nehéz magokban), a stabilitási tartománytól távoli héjlezáródások (pl. a ^{12}Be -ben és a ^{100}Sn -ben) és a szupernehéz elemek (1999-ben a 118-as rendszámnál tartanak) stb.
2. *Nukleáris soktest-rendszerek leírása.* A szórásproblémákban a határfel-tételek precíz kezelésének megoldása (Coulomb-problémát kivéve) lehetővé tette napjainkra egyes konkrét fizikai feladatok megoldását. E terület lényegéhez tartozik az interdiszciplinaritás. A néhány részecskére vonatkozó egzakt kvantummechanikai szóráselmélet első alkalmazási területe a magfizika, azonban az ún. néhányrészecske-módszerek ma már az elméleti kutatások eszköztárának nélkülözhetetlen részét képezik. Ezek a módszerek egyaránt használatosak a töltött részecske-rendszerek ütközéseinek leírásában mind a normális és a különleges magállapotok, mind pedig az atom- és molekulafizikában fellépő hasonló problémák tárgyalásánál.
3. *Nukleáris asztrofizika.* A magfizika – a részecskefizikával együtt – sok szállal kapcsolódik az asztrofizikához. Magfolyamatoktól függ a világmindenség fejlődésének korai időszakában létrejött legkönnyebb elemek és a csillagokban szintetizálódott többi elem gyakorisága. A neutrínók tömegének és a sötét anyag mibenlétének is vannak alapvető fontosságú

magfizikai aspektusai. Az asztrofizika szempontjából fontos magfizikai jelenségeknek a vizsgálata nagy kihívás a magfizikusok számára, azok különleges technikai igényei (radioaktív nyalábok, föld alatti gyorsítók, speciális detektorok) miatt.

4. *A szubnukleoni szerkezet tanulmányozása.* A közepes és nagyenergiás (100MeV/N-1GeV/N) mag-mag (nehézion) ütközési kísérletek az ütközés dinamikájának új vonásait tárták fel, amelyek a nagysűrűségű maganyagban a nukleonok és a mezonok kvark-gluon szerkezetének effektusai. Központi kérdés ma a szerkezetre érzékeny korrelációkra, részecskeeloszlásokra, karakterisztikus fizikai mennyiségekre, valamint a sűrű maganyag jelenlétének a nukleonok szerkezetére kifejtett hatásának megértése, amelyhez a hadronok hullámfüggvényének elektronszórással, az ütköző rendszer multifragmentációjának, és a forró maganyag állapotegyenletének hidrodinamikai és mikroszkopikus (kvantum molekula-dinamikai) modellek keretében való vizsgálatával juthatunk.
5. *A maganyag fázisátmenetei mag-mag ütközésekben.* A relativisztikus energiájú (GeV/N - TeV/N) mag-mag ütközések kiváló eszköznek bizonyultak az atommagok felforrósításához, osszenyomásához és a maganyag fázisátalakulásainak [folyadék-gáz, hadroni-(kvark-gluon)-hadroni átalakulásokat] tanulmányozásához. A közbenső rendszer, a maganyag fundamentális alkotórészeiből álló Quark-Gluon-Plazma (QGP), tulajdonságainak vizsgálati lehetősége új, ígéretes perspektívát jelent a jelen és a jövő magfizikája számára. Ennek az ad különleges jelentőséget, hogy ilyen lehetett az univerzum keletkezése utáni igen rövid ideig tartó állapot, és az a közeli jövőben laboratóriumi keretek között előállítható és tanulmányozható.

A magfizika hasznossága

A magfizika hasznossága mellett felhozható legmeggyőzőbb érv az, hogy mennyi mindent adott a többi tudománynak, és gyakorlati alkalmazásai milyen jelentősek az emberiség számára: pl. a mágneses magrezonanciás és pozitronemissziós tomografikus képalkotás az emberi testről, a γ -sugárzásos és a protonterápia, a radioaktív izotópos nyomjelzés és analízis az iparban, a mezőgazdaságban és a környezetvédelemben stb. De nem csak a rég feltalált nukleáris módszereket csiszolgatják: a magfizika az új feladatokra új módszereket kínál. A rákterápia több fejlődési iránya is a mai magfizikához kapcsolódik, ilyen a nehézion-terápia, ennek radioaktív ionnyalábos változata és a szervezetbe bevitt bórral befogatott neutronok kiváltotta α -sugárzás hatásán alapuló gyógymód. A magtudomány az, amelyik képes lehet megoldani azt a problémát is, amelynek létrejöttéhez is köze volt: a nukleáris hulladékok prob-

lémáját. A nukleáris üzemanyag „elégésekor” keletkező hulladék komoly kockázatot hordoz a jelen és a jövő generációi számára. Jelenleg gyorsítóval vezérelt olyan reaktorrendszerek megvalósításának lehetőségét kutatják, amelyek a nukleáris hulladékot veszélytelen anyaggá változtatnák. Ezt az eljárást transzmutációnak nevezik. Dolgoznak azon is, hogy energiaforrásként tóriumot alkalmazhassunk. Ez hallatlan előnyökkel kecsegtet: *legalább 10 000 évre adna elegendő energiát, atomfegyverkezésben nem használható és „égésterméke” kevésbé radioaktív.* Egy ilyen reaktor ráadásul eredendően biztonságos volna, hiszen szubkritikus üzemmódban működne, tehát a láncreakció nem önfenn-tartó: energia csak addig termelődik, amíg a gyorsítót működtetik, s így a rendszer nem „szaladhat meg”.

Az alkalmazott magfizikához sorolhatunk minden nukleáris elven működő mintavizsgálati módszert is. Ezek személyileg és műszerfelhasználásukban sokszor ma is ahhoz az alapkutatáshoz kapcsolódnak, amelyből eredetileg ki-sarjadtak, ezért ezekre is ki fogunk térni.

A hazai magfizika

A magyarországi kutatóközösség benne él a világ tudományos vérkeringésében, az itt folyó kutatások az előző fejezetben ismertetett tendenciát tükrözik. A kutatási profil dinamikusan változik, néha bővül, többnyire azonban koncentrálódik. A „profiltisztítást” a tudományos közösség nem adminisztratív kényszer alatt hajtja végre, hanem tudományos meggyőződését követve és a világtendenciákhoz alkalmazkodva.

A következőkben a magyarországi magfizikai kutatásokat tekintjük át a múlt vázlatos felidézésével, a jövőben is fontos tendenciák hangsúlyozásával, mintegy *a hazai magfizika kataszterét* adva. Végül igyekszünk képet adni a magfizika gyakorlati és más tudományterületeken való alkalmazásáról. Minden pontban megemlítjük, hogy mely intézményekben folynak a kutatások.

Egzotikus magállapotok és reakciók

E kategóriába tartoznak a különleges anyageloszlású állapotok, a különleges kvantumszámú állapotok, a különleges protonszám–neutronszám arányú magok állapotai és a különleges módon bomló állapotok.

1. Különleges alakú állapotok

A magok általában gömbszerűek vagy kissé „deformáltak”. Nagy sebességgel pörgő deformált magok alakját forgási állapotok szabályos sorozatának

megfigyelésével és ezek vizsgálatával lehet meghatározni. Elméleti megfontolásokból következik, hogy – ha erősen deformált állapotok létezhetnek – közöttük azok a legstabilabbak, amelyek hossza kétszer vagy háromszor akkora, mint a vastagsága. Az előbbieket szuper-, az utóbbiakat hiperdeformáltaknak nevezték el. *A legelső sebeseen pörgő szuperdeformált állapotokat az ATOMKI egyik fizikusa fedezte fel az angliai Daresbury-ben (1983).* Azóta több tucat ilyen állapotsorozatot vizsgáltak főként az EUROGAM (Strasbourg) és az EUROBALL (Legnaro, Olaszország) detektorrendszerek köré csoportosuló együttműködésekben – részben ATOMKI-beli kutatók részvételével – és érdekes magszerkezeti jelenségekre bukkantak: szomszédos magpárok forgási sávjainak hasonlósága („ikersávok”), rezgési módusokra ráépülő állapotsorozatok, e magok nukleonkibocsátása, és egy sávon belüli alakátmenet. A vizsgálatok a kibocsátott γ -kvantumok észlelésén alapszanak, de az ATOMKI kutatói a γ -spektroszkópiai mérőrendszert a mai frontvonalat vezető EUROBALL-együttműködésben egy általuk kifejlesztett töltött-részecske-detektor-rendszerrel fogják kiegészíteni.

Gyorsan pörgő magokban eddig még nem sikerült hiperdeformált állapotokat azonosítani. *Egyértelműen sikeres volt viszont a hiperdeformáltság kimutatása indukált maghasadást megelőző állapotban az ATOMKI ciklotronjánál.* Az aktinidák tartományához tartozó hiperdeformált állapotok keskeny hasadási rezonanciákként jelentkeznek, amelyek jól meghatározott rotációs sávokba rendeződnek. Ezek hasadásakor keletkező termékek tömegeloszlása eltér a hasadványok jól ismert eloszlásától. Ez arra enged következtetni, hogy adott energiájú neutronokkal thóriumon indukált, hiperdeformált állapoton át történő hasadási folyamatot felhasználva az atomreaktorban kevesebb nukleáris hulladék termelődik. A témát ATOMKI-KVI-LMU (München) együttműködésben művelik.

Erősen deformált atommagokkal neutronbombázásos kísérleteket a KLTE Kísérleti Fizikai Intézetében végeztek, bomlási tulajdonságaikat tisztázták.

A magbéli kollektív mozgásoknak, deformációknak fontos szerep jut a forgási sávok állapotai gerjesztéséhez vezető folyamatok, rugalmatlan szórások és részecskeátadó reakciók mechanizmusában, a deformációk erősségének meghatározásában, ami a reakciócsatornák deformációfüggő csatolásában nyilvánul meg. E jelenséget korábban az RMKI kutatói mutatták ki kisenergiás gerjesztéseknél. Nagy, szuperdeformációknál ezen jelenség különösen fontossá válik.

A magdeformáció egy dinamikus formája a csomóképződés, amelyet bizonyos állapotokban egy nukleoncsomó (klaszter) kibocsátásával járó radioaktív bomlás követ. A csomóképződés és -kibocsátás első kvantitatíve is korrekt elméletét az ATOMKI-ben dolgozták ki, és itt fejlesztettek ki szimmetriára alapozott modelleket a klaszterállapotokra és egzotikus bomlásaikra.

Vibrációs gerjesztésben különleges lehet a gerjesztési módus fajtája (pl. megnyúlt proton- és a neutronfelhő ollószerű hajladozása egymáshoz képest) vagy több különböző fonon együttes jelenléte. E témában értek el úttörő eredményeket a KKK-IFKI munkatársai Lexingtonban (Kentucky, USA) és a KFKI-AEKI kutatóreaktornál hasadási termékek spektroszkópiai vizsgálatával.

Nem kötött neutronállapotok spektroszkópiai vizsgálata. Az ELTE-RMKI kutatócsoport az MSU (Michigan, USA) szupravezető gyorsítójánál nehézion-ütközések mechanizmusát tanulmányozta a neutron-fragmentum korreláció mérésével. A forró zóna, a targetszerű fragmentum és a bombázórészecske-típusú neutronforrás hőmérsékletét, sebességét meghatározva megállapította, hogy a diszkrét gerjesztett állapotban keletkező részecske típusú forrás nemkötött neutronállapotainak energiája, élettartama meghatározható a szekvenciális neutronemissziója során (pl. ^8Be és ^9Li magoké).

2. Különleges protonszám-neutronszám arányú magok. Magfizika radioaktív nyalábokkal

Az itt felsorolandó problémák jórészt olyan magokat érintenek, amelyek (töredék) másodpercek alatt elbomlanak. Általában magreakciók végtermékeként előállva bombázórészecske-nyalábok formájában vizsgálhatók. Ez a technika az utóbbi évtizedben teremtett új kutatási irányt. Ma az ilyen radioaktív nyalábokkal végzett kutatás az egzotikus magállapotok fizikájának legdinamikusabban kibontakozó ága. *A radioaktív nyalábok a kisenergiás magfizika reneszánszát hozták el*, amelyet új óriásprojektumok létesítése is mutat. *A magyar magfizikusok közösségének egy része ebben a kutatási ágban látja jövőjét.*

Anomáliás anyageloszlás lép föl a stabilitási sávtól távol eső magokban.

Könnyű neutrongazdag magokban egy-két neutron a mag sűrű törzse körül mintegy glóriát alkotva kering, nehezebb neutrongazdag magokban pedig a protonban és neutronban kiegyenlített magtörzset sűrű neutronréteg, ún. „neutronbőr” veszi körül. A neutronglóriás magok leírását jelentősen vitték előbbre az ATOMKI munkatársai.

Az ELTE-RMKI kutatócsoport a ^{11}Li neutronglória szerkezetét és a ^{11}Li Coulomb-disszociáció mechanizmusát vizsgálta az MSU radioaktív nyalábjával. Az n-n korrelációs függvény a neutronglóriának megfelelő nagy forrásméretre, a talált jelentős utógyorsítás pedig „direkt break-up” folyamatra utal. A kísérletben a saját fejlesztésű komplex, a visszalökött magok regisztrálásával kiegészített neutron repülésiidő-spektrométerrendszerüket alkalmazták.

A neutronbőr vastagságának mérésére ATOMKI-beli kutatók dolgoztak ki módszereket Groningenben és Oszakában a mag elemi rezgési módusainak a gerjesztésére alapozva. E módszereket RIKEN-ben (Tokió) és a GSI-ben (Darmstadt) radioaktív nyalábos mérésekben alkalmazzák. A tervek szerint

ott fogják a magok proton- és neutroneloszlásának deformáltsága közötti különbséget is vizsgálni.

Neutronhiányban extrémumot mutatnak az ^{100}Sn környéki magok. Az ^{100}Sn -nak mind protonjai, mind neutronjai zárt héjat alkotnak. E magok spektroszkópiájában az ATOMKI-nek egy másik csoportja ért el jelentős eredményeket a NORDBALL- (Risø, Dánia) együttműködésben és lehetőségük lesz a γ -spektroszkópiai EXOGAM-programban (GANIL, Caen) való részvételre.

A nukleon kibocsátásával bomló vagy majdnem bomló magok elméleti leírása új problémákat vet fel, amelyek megoldásán ugyancsak az ATOMKI-ben dolgoznak.

A néhányrészesecske-probléma

A néhányrészesecske-problémának Magyarországon iskolája van. Az eredmények az absztrakt szóráselmélettől az alkalmazásokig terjednek: magfizikai folyamatok leírását, a magerők problémakörét, a néhány nukleon-feladatokat, a kvark szabadsági fokok nyelvén tárgyalt hadronszerkezeti modelleket, egzotikus molekulákat és atomokat foglalnak magukban. Külön kiemelendő az azonos részesceské szórásának magyar kutató (RMKI) által korábban kidolgozott általános algebrai elmélete, amelynek alkalmazása atomfizikai háromtest ionizációs folyamatokra („break-up” reakció) nagy figyelmet váltott, vált ki azzal, hogy általános elvi kérdéseket tisztázott. E területeken az RMKI és az ATOMKI munkatársai dolgoznak.

Nukleáris asztrofizika

A töltött néhányrészesecske-rendszerek vizsgálata a nukleáris asztrofizikában különösen fontos, mivel az asztrofizikai energiák miatt az elektronárnyékolási effektusok jelentősek. E vonatkozású elméleti munkák az RMKI-ban, míg kísérletek az ATOMKI-ben (bochumi együttműködésben) folynak.

Az ún. p-magok nukleosintézisének első kísérleti vizsgálatát az ATOMKI kutatói végezték. Ennek hatására mérések indultak el más laboratóriumokban is, hasonló módszert alkalmazva.

A Nap-neutrínó problémával kapcsolatos vizsgálatokban vesznek részt hazai kutatók (ATOMKI, Bochum, Nápoly).

Radioaktív nyalábok segítségével olyan rövid felezési idejű izotópokon lejártszódo reakciók tanulmányozhatók, amelyek az asztrofizika számára döntő jelentőségűek, de eddig kísérletileg nem voltak vizsgálhatók. E kutatások MSU-ELTE/RMKI, BME-Louven-la-Neuve, RIKEN-ATOMKI együttműködésben folynak.

A fenti magfizikai témákon jelenleg az ATOMKI-ban 22 kutató és 3 doktorandusz, a KLTE-n 4, az ELTE-n 3, az RMKI-ban 4, a BME-n 2, a KKK-IFKI-ban 2 kutató dolgozik.

Szubnukleoni szerkezetvizsgálatok – közepes energiás nehézion-fizika

A közepes energiájú nehézion-fizikában két téma áll az érdeklődés középpontjában: az állapotegyenlet meghatározása és hadronok keletkezésének vizsgálata. Az állapotegyenlet megadja, hogy egy atommagban (esetleg maganyagban, ami végtelen nagy atommagnak felel meg) hogyan függ a rendszer energiája vagy nyomása a részecskék sűrűségétől, illetve a rendszer hőmérsékletétől. Közepes energiájú nehézionok ütközésekor (1–2 GeV energia részecskénként) a neutronok és protonok gerjesztett instabil állapotba mehetnek át, és közben bomlékony mezonok is keletkezhetnek. Különösen sok információt nyújthat bizonyos mezonok bomlása esetén a keletkezett elektron–proton párok vizsgálata.

Közepes energiájú kísérleti kutatásokban az RMKI kutatói a darmstadti GSI-ben vesznek részt. A FOPI-kísérletben a komplex mérőrendszer önálló eleme, a HELITRON (nagy méretű ún. radiális driftkamra) tervezésében, megépítésében meghatározó szerepük volt, a méréseknél ezen detektor működtetéséért felelősek. A reakciókban keletkező fragmentumok impulzustérbeli eloszlásának mérésével meghatározzák a keletkezett anyag hőmérsékletét és sűrűségét, valamint a maganyag folyási tulajdonságait, amiből a modellek segítségével megkapható a maganyag állapotegyenlete. Új mérési módszert dolgoztak ki, amellyel kimutatták, hogy a bombázó és a céltárgymag nukleonjai még centrális ütközések után is emlékeznek az eredetükre, azaz nem tökéletes a nukleonok keveredése. A küszöbkörnyéki kaonok keletkezése erősen függ a hadronok maganyagbeli tulajdonságaitól, így e kaonemisszió a nukleonok kvark-gluon struktúrájára vonatkozó információ hordozójának bizonyul. Jelenleg ezen kaonok mérésével foglalkoznak.

Az ilyen energiával ütköző atommagok maganyaggyömböknek tekinthetők, s a folyamatot gyakran a Walecka-féle relativisztikus átlagtérelmélettel írják le. Ennek a modellnek egy erősen korlátozó kritikus pontja, hogy a rendszerben a nem egyenlő tömegű barionok jelenléte estén a kisebb tömegűek effektív tömege nullává, sőt negatívvá válhat. Ezt sikerült az RMKI-ban kiküszöbölni, s ezzel a maganyag összenyomhatóságát is valószerű értékre növelni, és a modell alkalmazhatósági területét relativisztikus tartományra is kiterjeszteni.

A maganyag egy feltételezett speciális állapota Migdal-típusú pionkondenzátumot tartalmaz. Modelljét a KLTE kutatói dolgozták ki. Ezen állapot a neutroncsillagok viselkedését is befolyásolhatja.

A közepes energiás nehézion-ütközésekből nyerhető ismeretek az asztrofizika szempontjából is fontosak. Az univerzum látványos jelensége a szupernova-robbanás. Ennek során a csillag a gravitációs vonzás miatt összeroskad, majd az összeroskadás megáll, és a csillag szétrobban. Ezt a fordulatot is az állapotegyenlet szabályozza, s ezért is fontos annak pontos ismerete. A robbanás után a visszamaradó csillag túlnyomóan neutronokból áll (vagy kvarkokból – ennek eldöntése is magfizikai kérdés). Hogy a maradék csillag stabil-e, vagy tovább roskad fekete lyukká, attól függ, mekkora a tömege, és milyen a szerkezete, ami szintén az állapotegyenlettől és a folyamat egyéb jellemzőitől függ, és a választ ugyancsak a nehézion-fizikában kereshetjük. Ezzel a kérdéskörrel főleg az ELTE-n foglalkoznak.

Maganyag fázisátmeneteinek vizsgálata – relativisztikus nehézion-fizika

A bombázó részecskék energiájának növelésével egyre magasabb hőmérsékletű és sűrűbb maganyagot hozhatunk létre. Elérve egy bizonyos energiát a keletkezett anyag már nem hadronokból fog állni, hanem kvarkokból és gluonokból, amilyen anyagból állt világegyetemünk az ősrobbanás utáni első mikroszekundumban. Ezen terület fő kérdései, hogy mekkora ez a küszöbenergia, és hogy milyen tulajdonságokkal rendelkezik ez az ún. kvark-gluonplazma (GQP).

E terület fejlődését az egymás után üzembe állított legnagyobb energiájú atommagyorsító berendezések felsorolásával jellemezhetjük:

Hely	Céltárgy	Név	Max. energia	Üzembehelyezés
Berkeley	rögzített	Bevalac	2.1 GeV/nukleon	hetvenes évek
Brookhaven	rögzített	AGS	14 GeV/nukleon	kilencvenes évek
CERN, Genf	rögzített	SPS	160 GeV/nukleon	1994
Brookhaven	ütköző nyaláb	RHIC	200 GeV/nukleon	1999
CERN, Genf	ütköző nyaláb	LHC	3200 GeV/nukleon	2004

GeV: gigaelektronvolt = 10⁹ elektronvolt

CERN-beli tagságunk lehetővé teszi részvételünket a CERN SPS gyorsítója melletti NA49 jelű kísérletben, amelynek fő célja a maganyag fázisátalakulásának, a QGP megjelenésének kimutatása. A nehézion-reakciókban keletkező QGP rövid élettartamú, közvetlenül nem megfigyelhető. A fázisátalakulást a lehűlésével és tágulásával járó hadronizációjának karakterisztikus vonásai alapján lehetséges egyértelműen kimutatni.

Az NA49 kísérlet grandiózus vállalkozás. Egyetlen ütközésben közel 2000 töltött részecske keletkezik, és ebből csaknem 1000-nek a pályáját jegyzi fel elektronikusan, és azonosítják típus szerint. Némely részecskéket a „Buda-

pest-fal" nevű, magyarok által fejlesztett és épített, különlegesen jó hely- és időfelbontású detektorrendszerrel észlelnek, amely rendszerrel az ismert impulzusú részecskék egy pályaszakaszon való repülési idejét mérik, ez alapján válik lehetővé az azonosításuk. A Budapest-fal elkészülte után, annak üzemeltetése mellett, a magyar csoport figyelme egyre inkább kiterjed a komplex mérőrendszer egészére, valamint a teljes rendszer adatainak fizikai analizésére. *Az utóbbi években a magyar csoport súlya egyre jelentősebbé vált.*

A kísérletek eddigi analizise (korrelációk, ritkaság stb.) alapján az eredmények utalnak a nukleonból kiszabaduló kvarkok és gluonok rendszerének megjelenésére. A QGP kialakulásának egyértelmű bizonyítékához és az eddig talált jelenségek megértéséhez további vizsgálatok szükségesek. Kérdéses egyrészt a fázisátalakulás kritikus energiája, amelynek közelében várhatóan a karakterisztikus mennyiségek eseményenkénti fluktuációja ugrásszerűen megnő, másrészt a lejátszódó folyamatok jobb megértéséhez szükséges a bombázó energiától és kölcsönható rendszer nagyságától való függésének ismerete. Ezért újabb energiákon készülnek mérések, és méréseiket kiterjesztik a proton–proton és a proton–mag rendszerekre is. Itt nagyon lényeges, hogy azonos kísérleti feltételek mellett történjenek a mérések.

Az ütközésben keletkező tűzgolyó térbeli kiterjedését az RMKI kutatói egy olyan, a csillagászatban használt korrelációs módszerrel határozták meg, ahol az ottani fotonok szerepét pionok, illetve kaonok játsszák. A precíziós kaonkorreláció-mérést egyedül a Budapest-fal jó fizikai paraméterei tették lehetővé.

Az RMKI-ban kidolgoztak egy modellt a kvarkanyag hadronizációjára, amellyel meghatározható a kihűlés folyamán keletkezett hadronok spektruma, ezt a kísérletekben lehet azután detektálni. A modell jóslata elég közel van a mért kísérleti eredményekhez. A RHIC-gyorsítóban az ütközés tömegközépponti energiája hússzorosa lesz az SPS-ben elért energiának. Erre a célra dolgozták ki a nehézion-ütközések partonmodelljét.

Az NA49 kísérlettel párhuzamosan az LHC-re tervezett, már a QGP tulajdonságait vizsgáló ALICE-program előkészítésében is részt vesznek az RMKI kutatói.

A magyar nehézion-fizikusok kutatásaikat általában nemzetközi együttműködésben végzik. Főbb partnereik a CERN (Genf) mellett: University of Columbia, Duke University, State University of New York (Stony Brook), Lawrence Berkeley Laboratory, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität (Frankfurt am Main), Justus-Liebig-Universität (Giessen), GSI (Darmstadt), Niels Bohr Institute (Koppenhága); University of Lund, Technische Universität Wien.

A nehézion-fizika vizsgálatával az RMKI-ban 13, az ELTE-n 2, a KLTE-n szintén 2 kutató és 6 doktorandusz foglalkozik.

Alkalmazott magfizika

A magfizikai ismeretek, módszerek és technikai eszközök néhány alkalmazását a következő csoportokra oszthatjuk:

1. A magfizikával ma is összefüggő témák, például gyors neutronoknak az anyaggal való kölcsönhatásainak kísérleti és elméleti vizsgálata (KLTE, ATOMKI), az izotóptermeléshez szükséges magadatok mérése (ATOMKI, KKK-IFKI), a KFKI-AEKI kutatóreaktoránál hasadási termékek spektroszkópiai vizsgálatával (hasadó anyagok analitikája) a transzmutációs eljárás kidolgozásához járulhatnak hozzá a KKK-IFKI munkatársai.
2. A magfizikához mérés technikában és eszközhasználatban kötődő témák, például a prompt γ -aktivációs analízis, ionnyalábos analitikai módszerek, nukleáris mikronyaláb, ionimplantáció (ATOMKI, RMKI), az atomerőmű és hulladéktárolók környezeti hatásainak kutatása (ATOMKI, KLTE), általános sugárvédelem és környezetszennyezés, tiltott és veszélyes anyagok kimutatása neutronos elemanalitikai módszerekkel (KLTE), művészeti tárgyak roncsolásmentes vizsgálata (RMKI, ATOMKI) stb.
3. Az alkalmazó tudományterületbe integrálódott témák, például a Mössbauer-spektroszkópia, elektron–pozitron szétsugárzáson, szinkrotron-sugárzáson alapuló módszerek, a nukleáris magrezonancia módszere (RMKI, MFAKI), protonerjesztéses elemanalitika (RMKI, ATOMKI), K-Ar-os és a radiokarbonos kormeghatározás (ATOMKI) stb.

Az RMKI-ban, az ATOMKI-ben, az MFAKI-ben, a KKK-IFKI-ben és a KLTE-n alkalmazott magfizikán jelenleg mintegy 35-40 kutató dolgozik, akik kb. 10 doktorandusz témáját vezetik.

Következtetések, javaslatok

A magfizika a fizikán belül az egyik központi helyet elfoglaló aldiszciplína. Története során tömérdek más tudományra terjesztette ki áldásait, és számos kiágazása önálló tudománnyá vált (pl. a részecskefizika) vagy más diszciplínákhoz csapódott (pl. a nukleáris anyagvizsgálati módszerek).

Egy alkalmazott tudomány akkor önállósodik, ha az alaptudománynak csak a lezárt, klasszikus eredményeire épít. Egy alaptudomány akkor osztozik, amikor új paradigmarendszer alakul ki, ez történt a részecskefizika kiválásakor.

A magyar tudományt a tudomány nemzetközi fejlődése és a potenciális alkalmazások szüntelen keresése lendíti előre. *A magyar magfizikai alaptudomány fejlődésében a nemzetközi, a diszciplínán belüli kapcsolatok a döntők. Az alkalmazások viszont – amelyeket főleg a hazai kapcsolatok motiválnak – rendszerint interdiszciplináris kötődéseket létesítenek.*

A magfizika hatalmas terület, amelynek intézményei között kapcsolatok szövődnek. A kutatás nem alkalmazkodik a diszciplináris rendezettség valamely elvont eszméjéhez. *Noha hazánkban két kutatóintézetben és két tudományegyetemen folyik a magfizikai kutatások döntő többsége, a magfizika hatalmas területét ezen intézmények csak töredékesen fedik le.* Belföldi kapcsolataik az alkalmazások terén erősebb, együttműködéseik hatékonyak, hasznosak, de *egymást fölöslegessé tevő párhuzamosság nincs közöttük.*

A nemzetközi kötődések erősödése a magyar magfizikusok közösségében is belső átrendeződéshez vezetett. Tudományos iskolák tagjai kirajzottak, műhelyek fellazultak, ami nem hátrányos. A nemzetközi tudományos közösségnek azonban úgy lehetünk csak egyenrangú részvevői, ha van hazai műhely is. A tudományirányítóknak szem előtt kell tartaniuk, hogy a magyar tudósok a nemzetközi mezőnyben csak biztos hátországgal lehetnek a *magyar tudomány* képviselői. Olyan feltételeket kell teremteniük, amelyek a *hazai műhelyeket erősítik*, és amelyek lehetővé teszik, hogy a *nemzetközi munkamegosztásban és együttműködésben mint magyar tudományos műhelyek és ne mint elszigetelt egyének vehessenek részt.*

A jövőt illető szempontok:

1. *A magfizika az emberi tudásnak alapvetően fontos fejezete, amelyet gazdagítani kell.* A magtudomány pótolhatatlan szolgálatokat tesz a társadalomnak, és a társadalom jövője lényegesen függ a jelen és a jövő magfizikai kutatásainak eredményeitől.
2. *Azért, hogy a tudomány fejlődésével Magyarországról lépést tudjunk tartani, csatlakoznunk kell nagy nemzetközi központok programjaihoz.* Létesíteni kell egy külön támogatási csatornát, amely nagy nemzetközi projektumokban való intézményi részvételt támogatna. Ennek híján a magfizikában még az elmélet életképessége is kérdéses.
3. *A meglévő kutatási berendezéseket használni és modernizálni kell mindaddig, amíg értékes eredményeket adnak.* A hazai berendezések az egyetemi oktatásban is hasznosulnak, ezért is ösztönözni kell mind az oktatásban, mind a kutatásban a kutatóintézetek és az egyetemek kapcsolatait.

SZŐKEFALVI-NAGY ZOLTÁN

Atom- és molekulafizika*

Bevezetés

Az ezredforduló közeledtével a huszadik századot sok minden századának nevezik majd. Méltán nevezhetjük az atomfizika századának is. A század kezdete sajátosan összekapcsolódik egy, a fizika évezredes skáláján is számottevő, közgondolkodásunkra is jelentős hatást gyakorló paradigmaváltással: az atom szerkezetének felfedezésével.

A mai kor embere nehezen tudja beleképzelni magát a Kopernikusz, Kepler, Galilei előtti világba, amikor az emberek fejében – az emberek *képzeletében* – a Mindenség középpontjában az emberek által lakott Föld állt, az éjszakai égbolt fénylő teste pedig érthetetlenül bonyolult módon mozogtak. A mai kor embere már úgy eszmél a világra, hogy azt tanulja: Földünk a harmadik bolygó a Nap körül keringő kilenc közül, és a Mindenséget a mi Napunkhoz hasonló csillagok sokaságából álló csillagrendszerek építik fel, amelyek galaxisokká szerveződnek.

Az emberiség történelmének skáláján Kopernikusz, Kepler, Galilei után Newton – lényegében azonnal – végképp egyszerűvé, a beavatatlanok számára is nyilvánvalóan egyszerűvé tette ezt a képet: a testeknek alapvető (tömegükből, azaz mintegy létükből, lényegükből eredő) tulajdonsága, hogy vonzzák egymást. Egy kis test, pl. a Föld és egy nagy test, pl. a Nap ún. tömegközéppontjuk körül (amely lényegében a nagy test középpontjában van) keringenek, és ez a mozgás az apró részletektől eltekintve olyan, hogy a kis test – a Föld – kör- (ellipszis) pályán kering a nagy test, a Nap körül, és az ehhez szükséges erőt a kölcsönös vonzás, a gravitáció biztosítja. Ugyanúgy mozog a többi bolygó is a Nap körül, és ha eltekintünk attól, hogy ezek a bolygók egymás és a Nap

* Ezt a tanulmányt, mely a szerkesztést végző Szőkefalvy-Nagy Zoltán neve alatt jelenik meg, az MTA Fizikai Tudományok Osztálya Atom- és Molekulafizikai Bizottsága készítette. Megírásában a legjelentősebb részt Pálinkás József, Sarkadi László, Nagy Ágnes és Gyémánt Iván vállalta.

pályáját is kissé befolyásolják, előttünk áll egy egyszerű, elképzelhető Naprendszer.

A világegyetem persze bonyolult, mert mindegyik test vonzza a másikat és az sem világos, hogy az egész honnan és hová fejlődik, de az alapvető kép egyszerű: van egy könnyen elképzelhető váza.

A Kopernikusz–Kepler–Galilei–Newton szemléletváltáshoz hasonló es ahhoz mérhető szemléletváltás zajlott le a 20. század első harmadában a fizikában, a fizika ma atomfizikának nevezett ágában. Thomson, Rutherford, Bohr, Moseley, Heisenberg és a század még számos szellemóriása megváltoztatta *világképünket*. Az anyagot alkotó atomok úgy épülnek fel, hogy van egy a 10^{-10} m átmérőjű atom méretéhez képest nagyon kicsi, mintegy 10^{-15} m átmérőjű, nagyon tömör, az egész atom sűrűségénél 100 milliárdszor sűrűbb, pozitív elektromos töltésű mag, amely körül az atom térfogatának nagy részét igen ritkán kitöltő, az atom magjánál több tízezerszer kisebb tömegű, negatív elektromos töltésű elektronok helyezkednek el. Az atomot az atommag és az elektronok közötti elektromos vonzóerő tartja egyben. Később kiderült, hogy az atommagokat pozitív töltésű protonok és elektromos töltés nélküli neutronok építik fel, és ezeket egy másik bonyolult erős erő tartja egyben.

Ez tehát a század első harmadában a fizikában végbement paradigmaváltás lényege: bizonyossá vált, hogy a világot nem száz-egynéhány, periodikus csoportokba rendezhető kémiai „elem” építi fel bonyolult receptkönyvekben leírt szabályok szerint, hanem a protonokból és neutronokból álló atommag, és a körülötte lévő elektronok, az összetartó erő pedig a már az ókori görögök óta ismert elektromosság. A felépítés szabályai is fokozatosan kirajzolódtak. Kiderült, hogy a kis térrészbe bezárt részecskék mozgásának leírására a 18. és 19. században oly pontosan kidolgozott mechanika nem alkalmas. A leíráshoz új formalizmusra van szükség, amelyet a tudomány a kvantummechanikában talált meg.

Részben éppen az összetartó erő érthetetlenül bonyolult volta, részben újabb és újabb „elemi” részecskék felfedezése alapján jutottak arra a felismerésre, hogy a protonoknak és a neutronoknak is szerkezetük van: a kvarkoknak nevezett részecskék építik fel. Ezeket ma szerkezet nélküli alapvető részecskéknek tekintjük, úgy tudjuk, hogy hat darab van belőlük, és az ún. erős erő (kölcsönhatás) révén hatnak egymásra. Az atom alapvető építőkövének tekintett elektrónról ma is úgy tudjuk, hogy szerkezet nélküli. Itt az újabb vizsgálatok azt derítették ki, hogy létezik öt hasonló testvére, és a hat testvért együtt leptonoknak nevezzük. A hat kvark és a hat lepton építi fel tehát világunkat. Ma úgy gondoljuk, ezek a világ építőkövei. Az építőköveket összetartó erők a kvarkok között ható erős erő, továbbá egy gyenge erőnek nevezett kölcsönhatás, amelyről már régóta tudjuk, hogy a következő erőnek, az elektromágnesesnek egy különleges esete. A természet negyedik (illetve az elektromágnesest és a gyengét elektromágnesesnek nevezve harmadik) ereje az atomok

szintjén jelentéktelennek tűnő, ugyanakkor a bolygók, csillagok és galaxis-rendszer mozgását meghatározó gravitáció.

Az emberiség történelmében a tudomány fejlődését két kérdés vitte előre: 1. Miből és hogyan épül föl a világ? 2. Hogyan szolgálhatja a megismerés az életet, a jólétet, a szabadságot és a boldogságot? A megismerés e két alapkérdése mentén a 20. században eljutottunk egyfelől a galaxisrendszerekhez, a galaxisokhoz, a naprendszerekhez, és a mi bolygónkhoz, másfelől az atomokig, az atommagokig, a kvarkokig és leptonokig, és felismerni véljük az ezek mozgását irányító erőket. Ezen az óriási skálán mi tünteti ki az atomokat? Miért nem feledtük már el régen ezeket az anyag szerkezetének egy, ha úgy tetszik, közbülső állapotát jelentő objektumokat? A legfontosabb kitüntető pont az, hogy az atomok és molekulák belső törvényszerűségei határozzák meg az élő anyag szerveződését. Nyilván ettől nem függetlenül az atomok szintjén történik a természettudományok összetalálkozása vagy szétágazása. Itt válik el a kémia és a fizika, itt kapcsolódik össze a fizika és a biológia, itt érintkezik a fizika és az anyagtudomány. Azok a folyamatok, amelyek a tudományos fejlődés második nagy kérdése szempontjából lényegesek, szintén az atomfizika szintjén zajlanak, az égéstől a táplálkozásig, mindennapjaink életszükségleti és kényelmi eszközeiig.

Az atomfizika, az atomok szerkezetének ismerete tehát a világ szerkezete megismerésének az élet szempontjából meghatározó szintje. Nélküle nincs biokémia, és érthetetlen minden, ami körülöttünk működik. Az atomfizika a világ szerkezetének szintjei közül éppen azt vizsgálja, amely az élet, a jólét (ezáltal a szabadság és boldogság) szempontjából fizikailag a legalapvetőbb. Ez adja meg az atomfizika kutatásának tegnapi, mai és holnap hajtóeréjét. A világnak ezt a szintjét a legutolsó részletekig kell és érdemes megismerni.

Az atomfizika a harmincas évektől kezdve a részletek tudományává vált. Fejlődése akkor meg is torpant egy kissé, hiszen nem álltak rendelkezésre azok a kísérleti és elméleti eszközök, amelyekkel az atomok részletei pontosan felderíthetők lettek volna, és az az elméleti és kísérleti eszköztár, amelyekkel néhány, illetőleg néhány tízezer atomból álló rendszer leírható, megvizsgálható lett volna. Ma ezek az eszközök részben az atomfizika fejlődésének köszönhetően rendelkezésre állnak és az atomfizika új korszakát nyitják meg. Ennek az új korszaknak a főbb jellemzőit mutatjuk be az alábbiakban, kiemelve a magyarországi eredményeket és megjelölve azokat a területeket, amelyeket sikeres tudományos műhelyek okán, vagy éppen a magyarországi fejlesztésekből hiányolva fokozottan támogatni ítélünk.

Ha azt a nagyon egyszerű kérdést tesszük fel, hogy melyek azok a mennyiségek, amelyeket igaznak gondolt elméleteink alapján kiszámolva a kísérletekkel legpontosabban egyező eredményre jutunk, akkor a választ az atomfizikában, az atomi paraméterek világában kell keresnünk.

Azt is meg kell kérdeznünk, hogy szükséges-e – és ha igen, miért – nagyon pontosan ismerni és megbízhatóan leírni az atomok tulajdonságait. A válasz nyilvánvalóan az, hogy szükség van a pontos leírásra, azért hogy olyan módszerekkel rendelkezünk, amellyel tetszőleges atomot vagy iont tetszőleges pontossággal leírhatunk. Az atomok leírása ugyanis maguknak az elméleti módszereknek a legfontosabb ellenőrzési terepe, és az atomi tulajdonságok ismerete kiinduló eleme az atomi technológiáknak. Tudományterületi és főként prioritási vitákat nem indítva, atomi technológiának kell neveznünk számos kémiai, biokémiai, biofizikai, anyagtudományi és anyagvizsgálati módszert. Ezekben a tudományterületeken az atomfizika olyan szerepet tölt be, mint a közönséges anyagi tulajdonságok ismerete a korábbi évtizedek technikájában. A kémiai, a biokémiai, biofizikai tervezéshez és az anyag nanotechnológiai tervezéséhez az atomokat, atomi rendszereket nagy pontossággal és megbízhatóan kell ismerni.

Az anyag különleges körülmények között való viselkedésének pontos megismeréséhez és tervezéséhez nem csupán az atomok alapállapotának, hanem sokszorosan töltött ionjaik lehetséges állapotainak és jellemzőinek ismerete is szükséges (pl. az ún. kettős Cepheidák periódusidejét csak a sokszorosan ionizált vas sugárzási tulajdonságainak pontosabb laboratóriumi mérése és modellezése tette érthetővé).

Fő fejlődési irányok

Az utóbbi évtized kísérleti atomfizikáját több fronton is jelentős fejlődés jellemezte.

A precíziós atomszerkezeti vizsgálatok folyamatosan stimulálják a kötött állapotú Coulomb-kölcsönhatás megértését célzó elméletek tesztelését, illetve finomítását. Kísérleti szempontból jelentős előrelépést egyrészt az egyre finomuló lézerspektroszkópiai mérések hoztak, másrészt a vizsgálatok tárgyát képező atomi rendszerek palettájának kibővülése egzotikus atomi rendszerekkel (nagyöltésű ionok, antirészecskéket tartalmazó rendszerek, egyéb kötött Coulomb-rendszerek). Legkézenfekvőbb példaként felhozható a hidrogénatom spektroszkópiája, amelynek pontosságát jelenleg a proton sugara ismeretének pontatlansága korlátozza. Nagyöltésű ionokon végzett röntgenspektroszkópiai (pl. Lamb-eltolódás) mérésekkel az utóbbi időkből nagyot fejlődött kvantum-elektrodinamikai számításokat tesztelik. A közelmúltban antirészecskéket tartalmazó rendszerekben alapvető természeti szimmetriákat tesztelő méréseket végeztek, de a vizsgálatok kiteljesedése igazán csak az elkövetkező néhány évtizedben várható.

A másik nagy terület, amely jelentős fejlődést hozott, a töltött részecskék csapdázásával foglalkozik. A precíziós atomcsapdákkal végzett tömegméré-

sek pontossága lassan eléri azt a nagyságrendet, amely lehetővé teszi, hogy a kémiai kötések energiáját a rendszer tömegének mérésével határozzák meg. Töltött részecskék más típusú csapdázására használják a tárológyűrűket. Itt a csapdázott részecskéknek, bár nagy sebességgel keringenek, az egymáshoz viszonyított sebességük nagyon kicsi. Ezt a tényt használják ki, amikor precíz spektroszkópiai mérést végeznek rajtuk, illetve amikor nagyon kis energiájú rezonanciafolyamatokat vizsgálnak (pl. kételektronos rekombináció). Speciális tárológyűrűk a szinkrotronok, amelyek elsősorban elektromágneses sugárzás keltésére alkalmasak, és manapság a világ legintenzívebb fényforrásai.

Az atomi ütközések fizikájában a legnagyobb áttörést az ún. COLTRIMS-berendezések (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectrometer) kifejlesztése hozta. Ezekkel az eszközökkel kinematikailag teljes kísérletek végezhetőek, ami azt jelenti, hogy minden szétrepülő részecskének mérhető az energiája és a kirepülés iránya. Az, hogy az atomi ütközések kutatása a magyarországi fizikának méretében is jelentős és egyben egyik legsikeresebb területe, világosan kiderül Sarkadi László összefoglaló tanulmányából (Fizikai Szemle 1998/11. szám).

A precíziós spektroszkópiában történő alkalmazás mellett a lézerek legjelentősebb felhasználási területe az atomok lézerekkel történő átalakítása, mely felfedezést 1997-ben Nobel-díjjal jutalmaztak. Lézeres hűtés segítségével érték el a kísérleti atomfizika utóbbi időkben legjelentősebb eredményét, a Bose–Einstein-kondenzáció kialakulását rendkívül alacsony hőmérsékletű, ritka gázokban. Az atomoptika is az atomok mozgásának lézerekkel való manipulálásán alapszik. Speciális lézerelrendezések segítségével atomnyalábokat lehet szétszítani, tükrözni, fókuszálni, polarizálni stb. Az atomoptikai módszerek Bose–Einstein-kondenzátumokra történő alkalmazása eredményeképpen az atomlézerek megjelenése az elkövetkező néhány évben várható.

Az atomfizika és más diszciplínák határterületére eső jelenségek általában élénk vizsgálatok tárgyai. Egyik legintenzívebben kutatott téma az atomok, illetve ionok szilárdtestfelületekkel való kölcsönhatása. Ilyen vizsgálatokkal mutatták ki a nagy töltésű ionok szilárdtestekkel való ütközésekor keletkező üres atomokat. Ezek olyan atomi rendszerek, amelyek ugyan semlegesek, de legtöbb elektronjuk magasan gerjesztett Rydberg-pályákon helyezkedik el, a belső elektronállapotok pedig betöltetlenek. Az atomfizika és a plazmafizika határán vannak azok a vizsgálatok, amelyek különböző laboratóriumi (ioncsapdák, ionforrások) és asztrofizikai plazmákban uralkodó ionizációs, illetve rekombinációs folyamatok révén keletkező töltésegyensúly kialakulását tanulmányozzák.

Hazai helyzet

A hazai atom- és molekulafizikai kutatás helyzetének áttekintésekor ismét hangsúlyozni kell, hogy az atomfizika a világ szerkezetének szintjei közül éppen azt vizsgálja, amely az élet szempontjából fizikailag a legalapvetőbb, így a fizikának egyik olyan ága, amelyiknek rendkívül széles az alkalmazhatósága az anyagvizsgálattól kezdve a biológián át az asztrofizikáig és a meteorológiáig. Éppen ezért ebben a tanulmányban nem tudjuk számba venni az összes érintett hazai kutatóhelyet és eredményt, ezek jelentős része ugyanis más akadémiai bizottságokhoz, de kétségtelenül az atom- és molekulafizikai diszciplínához tartozik.

Az MTA ATOMKI az atomi ütközések fizikájának egyik legjelentősebb centrumaként ismert a világban. Egyik legfontosabb kutatási területe az egyszerű ütközési rendszerek, így pl. a háromtest Coulomb-probléma vizsgálata, továbbá az elektronkorreláció szerepének tisztázása az ütközésekben lejátszódó töltésátadási folyamatokban. A kutatók elektron- és röntgenspektroszkópiai módszerrel vizsgálták a többszörös ionizáció jelenségét, pontos mérésekkel határozták meg a belső atomi állapotok nívószélességét és a különböző átmenetek valószínűségét. Elméleti fejlesztő munkáik, számítógépprogramjaik komoly nemzetközi sikert hoztak számukra. Az intézetben épült spektrométerek világviszonylatban is kiemelkedő instrumentális eredmények. Lehetőségeiket nagymértékben megnövelte a nagytöltésű ionok előállítására alkalmas elektron-ciklotronrezonancia (ECR) ionforrás megépítése, amely paramétereit tekintve világszínvonalú berendezés.

A KLTE Kísérleti Fizika Tanszékének atomfizikai kutatásai elsősorban az MTA ATOMKI ECR-típusú ionforrása köré épülnek. A berendezéssel nagytöltésű ionok állíthatók elő, ennek megfelelően a két fő kutatási irányzat az ilyen típusú ionok felületekkel való kölcsönhatásának vizsgálata, illetve a nagytöltésű ionokat tartalmazó plazma tulajdonságainak tanulmányozása. Nemzetközi együttműködések keretében részt vesznek nagytöltésű ionokon, illetve antiprotont tartalmazó atomokon végzett precíziós spektroszkópiai mérésekben.

A kísérleti atom- és molekulafizikai kutatások további jelentős műhelyei alakultak ki az MTA kutatóintézeteiben (így az RMKI-ban plazma- és biofizikai, az SZBK-ban biofizikai, a KKK-ban fizikai-kémiai), de az egyetemek természettudományi karain is (BME, ELTE, JATE). (Ezekről azonban más akadémiai bizottságok – spektroszkópiai, biofizikai, szilárdtestfizikai, fizikai-kémiai és szervetlen kémiai – számolnak be.)

A BME Atomfizikai Tanszék Felületfizikai Laboratóriuma alkalmazásorientált alapkutatásokat végez, lényegében anyagtudományi jelleggel. Atomi szinten modellezik a félvezetők ponthibáinak tulajdonságait, mozgását és reakcióit.

Jelentős hagyományai vannak az elméleti kutatásoknak. Több neves kutató indult a „Gombás-iskolából”. Az innen eredeztethető hazai sűrűségfüggvény-elméleti és vele kapcsolatos kutatások ma már az ország több helyén folynak (pl. KLTE, Debrecen – „Gáspár-iskola”, BME, JATE). Ezek a kutatások az elmélet továbbfejlesztésére (pl. új függvények, új módszerek az elektronkorreláció figyelembevételére, gerjesztett állapotok elmélete), báziskiterjesztési effektusok kiküszöbölésére irányulnak, illetve alkalmazott kutatások folynak az atom-, molekula- és szilárdtestfizika legkülönbözőbb területein.

Hagyományos kvantumkémiai kutatásokat több hazai műhelyben végeznek (BME, ELTE, KLTE, JATE, KKK). Vizsgálják pl. elektronkorrelációt többtest-perturbáció elmélettel, molekula-kölcsönhatásokat. Kutatások folynak az intermolekuláris kölcsönhatások elméletében, többek között nagy stabilitású kémiai reakcióutat kereső módszereket is sikerült kifejleszteni. Jelentős kutatási tevékenység folyik poliének, fullerének stb. elektronszerkezetének vizsgálatában. Olyan félempirikus eljárásokat dolgoznak ki, amelyek jól alkalmazhatók ezen rendszerek geometriai és elektronszerkezeti leírására.

Perspektívák és ajánlások

Az atomok és molekulák elektronszerkezetének leírására alkalmas hagyományos kvantumkémiai, illetve egyéb, pl. sűrűségfüggvény-, sűrűségmátrix-elméletek folyamatos fejlesztése várható. Ezek a kutatások – most, hogy az 1998. évi kémiai Nobel-díj (Walter Kohn és John Pople) odaítélésekor kiváltképpen az érdeklődés középpontjába kerültek – egyrészt a leírás pontosítását, másrészt mind nagyobb és bonyolultabb rendszerek tárgyalását célozzák meg. Az alapállapotok vizsgálata mellett egyre nagyobb jelentőségre tesz szert a gerjesztett állapotok tanulmányozása. A kutatás egyik fő irányát mindenképpen a korrelációs korrekciók jelentik (pl. gradiens korrekciók a sűrűségfüggvény-elméletben; a Hartree–Fock- és a sűrűségfüggvény-elméletek „keverése”; vagy félempirikus korrelációs korrekciók bevezetése a Hartree–Fock-elméletbe). Az elméleti leírás finomodása és a számítástechnikai kapacitás fejlődése, bővülése a meglévő programrendszerek nagymértékű továbbfejlesztését, illetve új, hatékony programcsomagok létrehozását fogják eredményezni. Ezek fokozott mértékben elősegítik azt a már ma is fellelhető gyakorlatot, hogy számításokkal sok esetben „ki lehet váltani” a drága és hosszadalmas kísérletek egy részét. Ennek óriási jelentősége lesz a molekulatervezésben (pl. gyógyszerkutatásban). Komplex, többféle közelítést integráló programcsomagok jönnek létre egyre bámulatosabb grafikai lehetőségekkel, melyek mintegy „fekete dobozként” használhatók. Ez lassan iparaggá érik! Az így születő programok 2–10 M Ft-ért kelnek el a vegyiparban és a gyógyszeriparban. Várhatóan a biológiai kutatásban is egyre növekvő jelentőségre

tesznek szert az atom- és molekulafizikában kifejlesztett, és a vizsgált problémák leírására alkalmasan átdolgozott közelítő elméleti módszerek.

A fizika egyes határterületeire is jelentős hatással lesznek az atom- és molekulafizika módszerei. Egyre elterjedtebb a molekulafizika és a szilárdtestfizika egyik érintkezési pontja, az ún. klaszterek vizsgálata. A szilárdtestekben lejátszódó pont és vonalhibákkal, illetve felületekkel kapcsolatos folyamatok (hibatervezés, defect engineering a félvezetőkben, ötvözéssel kapcsolatos folyamatok, heterogén katalízis, repedésterjedés stb.) modellezésében egyre nagyobb szerepet kapnak a kvantumkémiai, így például a lokalizált bázisú LDA-számítások, kvantummolekulai szimulációk. A mikroelektronikai és mikromechanikai technológiák mérettartományában bekövetkező csökkenés és a szimulációs méretnövekedés görbéje a következő évtizedben várhatóan metszi egymást. Így a szimuláció nemcsak a kísérletek egy részét váltja majd ki, hanem helyet kap a technológia tervezésében is. A különböző rokon tudományterületek elméleti módszerei egyre többet merítenek egymás eredményeiből, és a jövőben egyre elterjedtebb lesz ezen módszerek ötvözése (pl. sűrűségfacionál-elmélet, erősen korrelált rendszerek).

Magyarországon a fenti területeken eredményes kutatás folyik. A versenyképesség fenntartásához azonban szükséges, hogy a magyar kutatók intézményes lehetőséget kapjanak valamelyik európai vagy tengerentúli *szuper-számítógép* használatára.

A *kísérleti lehetőségeket* tekintve az elmúlt évtizedekben Magyarországon egyre inkább lemarad a kutatás élvonalába tartozó országoktól. Javuló finanszírozási feltételek mellett a lemaradás lassítható, bizonyos területeken a hátrány akár be is hozható. Itt néhány példát említünk. Amennyiben az elkészült ECR-ionforrás mellé sikerülne néhány éven belül korszerű mérőrendszereket építeni, akkor olyan jellegű vizsgálatokat, mint pl. a nagyöltésű ionoknak szilárdtestfelülettel való kölcsönhatása, világszínvonalon lehetne folytatni. A szóba jövő vizsgálatok számát megsokszorozná, ha az eredeti elképzeléseknek megfelelően az ionforrás egy néhány száz kilovolt feszültségű alapzatra kerülne.

Másik példa a pozitronokkal végzett alapvető ütközési folyamatok fizikájának itthoni megteremtése. Az előbbieken már utaltunk az antirészecskékkal végzett vizsgálatok jelentőségére. Az ilyen jellegű kísérletekhez a szaktudás, a technikai háttér rendelkezésre áll (például a pozitronforrás a debreceni ciklotronnal előállítható lenne), így minimális pénzbefektetéssel a programot el lehetne indítani. A hazai lézerfizikai tapasztalatok felhasználásával új kutatási irányként felvethető ion- és atomcsapdák építése, és ezekben különlegesen alacsony energiájú atomi kölcsönhatások vizsgálata.

Amennyiben a kutatásfinanszírozás a mostani szinten marad, a meglévő eszközökkel minimális fejlesztéssel a hagyományosnak számító témákban még egy-két évtizedig lehet „eladható” eredményeket elérni. Az atomi ütközé-

sek esetében az eszközök elavulása nem olyan gyors, mint például a magfizika vagy részecskefizika esetében. A számítástechnika fejlődésével sokféle kísérlet, amelyekre korábban az adatgyűjtési, tárolási és feldolgozási nehézségek miatt gondolni sem lehetett, ma már könnyűszerrel elvégezhető (pl. sokparaméteres koincidenciamérések). Továbbá az atomfizikában több olyan „örökzöld” kutatási téma van (pl. a néhánytest-probléma), amelyek egyszerű ütközési rendszerek (alacsony ütközési energia, könnyű ionok) esetén is hatékonyan művelhetők egy magasabb szintű mérési technika alkalmazásával. A nehezebb időszakok túlélésének egy másik módja a fokozottabb részvétel nemzetközi együttműködésekben. Ez utóbbival kapcsolatban azonban látni kell, hogy hazai fejlesztések nélkül a magyar résztvevők ezekben nem játszhatnak kezdeményező szerepet.

A jelenlegi helyzetben áttörő, minőségi változást csak egy nagyberendezés megépítése hozhatna. Ismeretes egy ilyen program összefogó, lelkesítő ereje nemcsak egy szűkebb kutatói kollektíva, hanem az egész intézmény, sőt az illető régió tudományos közössége számára. Több év távlatában, dinamikus gazdasági fejlődés esetén elképzelhető lenne egy ilyen beruházás. A választott nagyberendezésnek nem egy szűk, speciális felhasználói réteg (például atomfizikus és magfizikus alapkutatók) igényeit kellene csupán kielégítenie (ezért nem lenne szerencsés választás például egy tárológyűrű). Jelenlegi szemmel nézve az igazán interdiszciplináris, más tudományok (biológia, orvos-biológia, kémia, környezettudomány, stb.) számára is hasznos, sőt élvonalbeli ipari-technológiai kutatásokat is lehetővé tevő berendezés egy *szinkrotron* lehetne. Egy ilyen, a debreceni ciklotronénál nagyságrenddel nagyobb beruházás, alighanem meghaladná Magyarország erejét, és csak nemzetközi összefogással valósulhatna meg. Ugyanakkor reális igényt elégítene ki, és – például a „visegrádiak” közös projektjeként – is reális lenne. Egy ilyen beruházásnak a régióra gyakorolt egyéb pozitív hatásait sem szükséges külön ecsetelnünk.

JANSZKY JÓZSEF

Lézerfizika és modern optika

A szakterület meghatározása

A modern optika és lézerfizika érdeklődési körének pontos definiálása a határterületek összefonódása, valamint a témakör folytonos változása miatt igen nehéz feladat, ezért definíció helyett inkább egyfajta körülírást próbálunk adni.

A szakterület a fizika egyik klasszikus ágából, az optikából alakult ki. Kifejlődését az utóbbi harminc évben három igen fontos eredmény: a lézerek felfedezése, az optikai távközlés eszköztárának (alacsony veszteségű fényvezetők, félvezető lézerek, kapcsolók stb.) kifejlesztése, illetve a nemlineáris optika kialakulása határozta meg. Napjainkban az alábbi részterületeket szokás tematikailag ide sorolni.

Kvantumelektronikán általában olyan eszközöket, technikákat értünk, amelyek a kényszerített emisszió, és/vagy nemlineáris fény–anyag kölcsönhatáson alapulnak. (Példák: lézerek, optikai erősítők, frekvenciatöbbszörözés, hullámkeverés stb.)

A *kvantumoptika* a fény és anyag kölcsönhatásával foglalkozik, ahol a kvantumos jelleg dominál. Ezen belül különös hangsúlyt kapnak a fény koherencia-tulajdonságai, a fotonstatisztikák, illetve a fotonok nem klasszikus állapotai.

Az *elektrooptika* tárgykörébe azon eszközök tartoznak, amelyeknél valamilyen elektromos jelenség segítségével befolyásolunk optikai tulajdonságokat (elektrooptikus modulátorok, kapcsolók stb.).

Az *optoelektronika* olyan rendszerekkel foglalkozik, amelyekben valamilyen elektronikus eszköz működése fény emissziójával/abszorpciójával kapcsolódik össze (fénykibocsátó diódák, folyadékkristályos kijelzők, diódasorok stb.).

Az utóbbi néhány évben önálló részterületté kezd válni a *nagy intenzitású optika*, amelynek keretében extrém nagy fényintenzitásoknak (10^{18} – 10^{21} W/cm²) kitett anyag viselkedését vizsgáljuk.

A *lézerek alkalmazásai* a társtudományoktól – kémia, biológia, orvostudomány – kezdve a modern elektronikán és távközlésen át olyan, a hétköznapi életben használt eszközökig terjed, mint a CD-lejátszó vagy a vonalkódeolvasó.

Amint az a fenti felsorolásból is kitűnik, a szakterület a fizikán belül az atomfizikával (fény–anyag kölcsönhatás), a statisztikus fizikával, a sugárzás-elmélettel és a metrológiával (precíziós távolságmérés, frekvenciaetalonok stb.) közvetlenül is érintkezik.

A lézerfizika erőteljesen kapcsolódik számos, a lézerfizikán, sőt fizikán kívüli tudományterülethez. Az MTA XI. osztályának Lézerfizikai és Spektroszkópai Bizottsága – a kapcsolódási pont fontosságára tekintettel – létrehozta a Molekulaspektroszkópia és az Orvosi Lézer Albizottságot, valamint a Kondenzált Anyagok Spektroszkópiája Munkabizottságot. Ezeknek a bizottságoknak a területén folyó kutatások eredményei elsősorban nem a lézerfizikában, hanem a kémián, az orvostudományon, illetve a szilárdtestfizikán belül jelennek meg. A diszciplínávitá logikája szerint itt csak a kapcsolódásra utalunk, kiemelve azt a viharos fejlődést, ami ezeken a területeken végbement (elég hivatkozni olyasmire, mint a szinkrotronsugárzás alkalmazása, a Fourier-spektroszkópia, a femtoszekundumos lumineszcencia, a többfotonos spektroszkópia).

Főbb nemzetközi irányzatok

A szakterület általános helyzete

Egy tudományterület iránt megnyilvánuló érdeklődés egyik jellemzője a publikációs aktivitás. A *Physics Abstracts* adatai szerint az utóbbi öt évben 10-15 ezer közé esett az optikai témában évente publikált dolgozatok száma, ami önmagában is komoly aktivitásról tanúskodik. A fenti szám helyes értékeléséhez ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy napjainkban az alkalmazások kerültek előtérbe, így a szakterülethez tartozó eredmények egy jelentős hányada nem a *Physics Abstracts* által követett folyóiratokban lát napvilágot.

A szakterület nemzetközi helyzetének megítéléséhez ugyancsak fontos adalékot nyújt a különböző országokban rendelkezésre álló tudományos infrastruktúra, illetve támogatás becslése. Ez általában nehéz feladat, miután az intézmények nevéből nem feltétlenül derül ki tudományos aktivitásuk iránya, valamint – éppen az alkalmazások korábban említett egyre növekvő súlya miatt – jórészt nem a fizikai kutatások számára fenntartott forrásokból szerzik költségvetésük jelentős, olykor döntő részét.

Az alábbiakban illusztrációként a németországi helyzetet vázoljuk fel. Az, hogy éppen Németországot választottuk, jórészt annak tudható be, hogy a Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), illetve a Verein Deutscher Ingenieure adatbázisaiban jól áttekinthető

információk állnak rendelkezésre, de az is nyilvánvaló, hogy az ottani helyzet a fejlett országokra vonatkozóan reprezentatív, és Magyarországra nézve is releváns. Németországban 38 egyetemi és 36 nem egyetemi kutatóhelyen folynak lézeres kutatások. (Ezekbe az adatokba nem számítanak bele az iparvállalatok saját kutató-fejlesztő részlegei.) Az össz-szövetségi jelentőségük miatt az ún. „kék listára” felvett összesen 84 kiemelt kutatóintézet közül – melyek a tudomány teljes spektrumát lefedik – hatban folytatnak ilyen témájú kutatásokat. Tervezés, illetve megvalósítás alatt áll három, 100 millió márkát meghaladó beruházás (szabadelektron-lézer a DESY mellett, egy fúziós célú lézerrendszer Darmstadtban, illetve egy interferometrikus gravitációshullám-detektor angol–német együttműködésben Hannoverben). A BMBF összesen 24 kiemelt témája közül az egyik a *Laser 2000* című program, amely az egyetlen, kifejezetten a fizika területére eső kiemelt téma. Mindebből levonható az a következtetés, hogy Németországban a szakterület kiemelt támogatást élvez.

A tudományos fejlődés irányai

A lézerfizika fejlődésének első 25 évét, azaz a 1980-as évek közepéig terjedő időszakot egyfajta extenzivitás jellemezte. Ez főképp azt jelenti, hogy a kutatás középpontjában az újfajta lézerek, új technikák vizsgálata állt. Egy új lézer kifejlesztésének fő motivációja a jelenségek jobb megértése volt, az a kérdés, hogy mire jó, nem játszott döntő szerepet. Az 1990-es évekre a helyzet gyökeresen megváltozott. Ma már a lehetséges alkalmazások, illetve azok kiszolgálása áll a középpontban. Ennek megfelelően a fejlesztések egyik fő iránya a hosszú élettartamú, stabil, „felhasználóbarát” lézerek építése.

Főképp ez áll a szilárdtestlézerek, illetve ezen lézerek hullámhossztartományának kiterjesztésére szolgáló nemlineáris frekvenciakonverziós technikák iránti érdeklődés háttérében. Ez az érdeklődés az utóbbi években olyan látványos eredményeket hozott, mint például a kompakt diódapumpált Nd:YAG lézerek, illetve napjaink egyik „slágere” a Ti:zafir lézer. Ezen a területen az aktivitás várhatóan az elkövetkezendő években is jelentős marad.

A lehetséges alkalmazások által nyújtott hatalmas potenciál – és természetesen ezek gazdasági jelentősége – áll a háttérében annak a megdöbbentő fejlődésnek, ami a félvezető lézerek területén következett be. A diódalézer, lényegében tíz év alatt, laboratóriumi kuriózumból a mindennapok eszközévé vált. A modern távközlés vagy információátvitel ma már elképzelhetetlen diódalézerek nélkül. A fejlődés nemcsak technikai értelemben volt látványos, hanem például a kvantumvölgy-szerkezetek kidolgozása a szilárdtestfizika fejlődésére is jelentős hatással volt. A diódalézerek megbízhatóságának és élettartamának növelése mellett jelenleg – és minden valószínűség szerint az

elkövetkező néhány évben is – a kék hullámhossztartományban működő diódák fejlesztése áll az érdeklődés középpontjában. A tisztán optikai elven működő szupergyors számítógép fejlesztése pedig már a jövő század technológiájába vezet át.

A technika általános fejlődése áttörést okozott a lézerfizikában abban az értelemben is, hogy bizonyos lézerfajták, melyeknél korábban a fő cél csupán működésük demonstrálása volt, amellet, hogy paramétereik lényegesen javultak, széles körben hozzáférhetővé váltak az alkalmazók számára. Erre az egyik legfontosabb példát a femtoszekundumos lézerek szolgáltatják. A néhány éve még csúcsteljesítménynek számító 20 fs impulzusnyi időtartam ma már standardnak számít, a világ számos laboratóriumában folynak rutinszerű mérések ilyen készülékekkel. Ennek a fejlődésnek a hatása legjobban az alkalmazások területén mérhető. Az utóbbi időben igen fontos eredmények születtek egyebek mellett a femtoszekundumos molekuláris dinamika, a kvantumrendszerek optimális kontrollja, az ultragyors biológiai folyamatok tanulmányozása, illetve az időben bontott anyagszerkezeti vizsgálatok területén. A közeli jövőben a femtoszekundumos dinamikai vizsgálatok további fejlődése, illetve újabb területeken való megjelenése várható.

Jórészt ugyancsak a femtoszekundumos technika fejlődésével függ össze a nagy intenzitású fény–anyag kölcsönhatás vizsgálatában az utóbbi években tapasztalható forradalom. Ma már a világ több laboratóriumában is végeznek kísérleteket a $10^{21} - 10^{22}$ W/cm² intenzitástartományban. (Azt, hogy ez az intenzitás mit jelent, azzal lehet érzékeltetni, ha meggondoljuk, hogy 10^{18} /cm² intenzitás esetén a fény elektromos tere eléri a hidrogénatomban a Bohr-sugárnál mérhető Coulomb-teret.) Ilyen körülmények között az anyagnak új aspektusai jelennek meg. Az elektron a fény elektromos terében egy félperiódusban már relativisztikus sebességekre gyorsulhat, a szilárdtest-sűrűségű plazmákban a skinmélység a fény hullámhosszával összemérhető, az optikai alagúteffektus domináns ionizációs folyamattá válhat stb. A meglepő, sokszor a szemléletnek ellentmondó kísérleti eredmények – pl. a magas harmonikusok intenzitásfüggése, a plazmában keletkező anomálsan nagy, MEV-nagyságrendű energiával rendelkező elektronok – igen termékenyítőleg hatottak az elméleti vizsgálatokra. Mivel az utóbbi időben egyre több kutatóhelyen válnak elérhetővé az extrém fényintenzitások, e téren a közeli jövőben jelentős fejlődés várható.

A lézeres módszerek az anyag különleges állapotainak előállításában is látványos eredményekhez vezettek. A lézeres hűtés, illetve csapdázás – amint azt az 1998. évi fizikai Nobel-díjak is mutatják – külön kiemelendő.

A modern optikához kapcsolódó elméleti kutatások jelentős része a kísérleti munkát „szolgálja ki”. Ennek megfelelően fontos eredmények születtek a kvantumkémia, a plazmafizika vagy az alkalmazott kvantummechanika területén. Más területeken, mint például a sugárzáselméletben, az elméleti vizsgálá-

tok jelentősen megelőzik a kísérleteket. A fény különleges állapotainak vizsgálata (összenyomott állapotok, összefonódott állapotok, Schrödinger-macska stb.) rendszeresen produkál meglepő, olykor a szemlélettel ellentétes eredményeket.

A különböző optikai technológiai eljárások az utóbbi években egyre növekvő szerepet játszanak a modern anyagtudományban. A felületek mikromegmunkálása, az optikai rétegleválasztás, a különleges anyagok (pl. gyémántszerű szén), illetve szuperrácsok előállítására igen fontos gyakorlati alkalmazásokat tesz lehetővé.

A spektroszkópiai módszerek közül különösen a Fourier-technika az egyik legizgalmasabban fejlődő terület. A spektrométerek stabilitása a He-Ne lézerrel szabályzott ún. dinamikus vezérlés következtében nagyságrendekkel javult az utóbbi évtizedben. Hasonló mértékű fejlődést jelentett az egy- és két-dimenziós detektorok (HgCdTe, InSb, Ge stb.) megjelenése és érzékenységének növekedése. Ezáltal a kétdimenziós és időfelbontásos spektroszkópia, IR- és Raman-mikroszkópia, a mélységprofil-analízis számos új fizikai, kémiai, biológiai és orvosi alkalmazást tesz lehetővé. Magyarországon jelenleg mintegy száz korszerű Fourier-spektrométer működik.

Hazai helyzet

A lézerfizika és spektroszkópia területén egyetemi tanszékeken, kutatóintézeti munkacsoportokban, klinikákon, lézerfejlesztéssel és alkalmazással foglalkozó kisvállalkozásokban egyaránt folyik kutató-fejlesztő tevékenység, összességében több mint 35 munkahelyen. A hazai helyzet bemutatása így, már terjedelmi okokból is, csak vázlatos lehet. A következőkben a tevékenységet néhány, általunk legmarkánsabbnak ítélt kutatóhelyen keresztül mutatjuk be.

A JATE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén az alábbi főbb kutatások folynak:

Térawattos lézerrendszer (TeWaTi). Megépítették a lézerrendszer alapját képező Ti:S oszcillátort, mely megbízhatóan működve 10 fs-os lézerimpulzusokat állít elő. A fázismodulált, impulzusoptikai, parametrikus erősítésen alapuló kétfokozatú erősítő megvalósítása után 10 Hz-es ismétlési frekvenciával, >10 mJ energiájú lézerimpulzusok alkalmazása válik lehetővé.

Szélessávú frekvenciakeverés. Elméletileg kimutatták és kísérletileg igazolták, hogy femtoszekundumos lézerimpulzusokkal hatásos szélessávú frekvenciakeverés (összeg- és különbségi frekvenciakeltés) érhető el, ha az impulzusokat a nemlineáris optikai kristály diszperziója által meghatározott mértékű és ellentétes előjelű fázismodulációval látják el.

Kvantumkontroll. Kísérletileg megvalósították az alkáli-halogenid molekula disszociációjának optikai kontrollját. Kvantumrendszerek kontrolljának elérésére genetikus algoritmuson alapuló tanulórendszert fejlesztettek ki, amely a visszacsatolt mérési eredmények alapján, tanulási folyamatban éri el az optimális állapotot.

Szuperlumináris terjedés. Elméletileg kimutatták, hogy egy ultrarövid fényimpulzus a fókuszponton való áthaladásakor a fénysebességnél nagyobb sebességet ér el. Mivel a fókuszpont előtti és utáni régiókban a terjedési sebesség kisebb c -nél, ezért az impulzus teljes terjedési ideje változatlan marad.

Mikrolitográfia. Mikrolitográfiai célokra felhasználható, közel diffrakciómentes Bessel-nyalábot kísérletileg egy He-Ne lézerrel és egy pásztázó Fabry-Perot-interferométerrel állítottak elő. A lencse annuláris kivilágítása miatt a mélységélesség kétszeresére, a transzverzális feloldóképesség 1,6-szeresére növekedett, a mért intenzitáseloszlás pedig megközelítőleg nulladrendű Bessel-függvénnyel írható le. A kísérleti eredményeket a hullámoptika segítségével elméletileg modellezték és igazolták.

Klasszikus- és hullámoptika. Vizsgálták és kvantitatíve jellemezték egy döntött tükrű Michelson-interferométerben megfigyelhető szélessávú csíkok dőlését és alakját. Egy prizmatikus küvetta és festékoldat felhasználásával kidolgoztak egy látványos és egyszerű, középiskolában is elvégezhető kísérleti eljárást az anomális diszperzió be- és kimutatására.

Fotoakusztika. Külső rezonátoros diódalézereket építettek, melyek alkalmasnak bizonyultak nagyfelbontású spektroszkópiai mérések végzésére. Megmutatták, hogy ezen lézerek segítségével és az általuk kifejlesztett fotoakusztikus gázdetektorrendszer alkalmazásával különböző gázok koncentrációja nagy érzékenységgel és szelektíven mérhető. A megépített kísérleti rendszert többek között olaj- és élelmiszer-ipari, valamint környezetvédelmi mérésekre használták.

A JATE-n működő MTA Lézerfizikai Kutatócsoport kutatási irányai:

Lézeres anyagleválasztás. Rövid lézerimpulzusok alkalmazásával ultragyors felvételeket készítettek olvadákfémek impulzuslézeres ablációjáról (leolvasztásáról). A felvételekből megállapították, hogy az eltávozó anyag két időtartományban hagyja el a felületet: közvetlenül a leválasztó lézerimpulzus alatt és után nagy sebességű plazma, és mikroszekundumokkal az impulzus után pedig a felület mechanikai deformációiból eredő kilövellések, cseppek formájában.

Megmutatták, hogy lézeres vékonyréteg-párologatási technika esetén – folyadék halmazállapotú céltárgyakat alkalmazva – az inhomogenitást okozó mikron-, és az a fölötti méretű részek száma több nagyságrenddel csökkent-

hető. ArF excimer lézeres kezeléssel amorf, gyémántszerű szénfilmet állítottak elő pirolitikus grafitgykristály felszínén.

Kísérleti és elméleti oldalról vizsgálták az impulzuslézeres elgőzölögtetési vékonyréteg-építés (PLD) során keletkező vékonyréteg anyageloszlásának és a gyakorlati szempontból igen zavaró csepplerakódásnak a kísérleti körülményekkel való összefüggéseit. Kimutatták, hogy bár a csepplerakódás szoros összefüggésben van a céltárgy halmazállapotával, reaktív PLD esetén a vékonyréteg cseppmentessége nem közvetlen következménye a céltárgy folyadékállapotának. A kísérleti adatokkal jó egyezést adó Monte Carlo-számításokat végeztek alacsony nyomású inert gázzal töltött kamrában végzett PLD-modellezésére.

A szem lézeres ablációja. Az excimer lézeres szemműtétekkel kapcsolatos egyik komoly kérdés a cornea átláthatóságának műtét utáni változása, illetve UV transzmissziós képessége. A vizsgálatok során egy atomerő-mikroszkóppal letapogatták az excimer lézerral besugárzott cornea felületét, s azt tapasztalták, hogy a kialakult struktúráért a szaruhártyát alkotó szövetek eltérő leválási tulajdonságai a felelősek. Az egyes cornea-rétegek 200–400 nm közti tartományban mért abszorpciós együtthatójából arra következtettünk, hogy a szaruhártyából a korrekciós műtétekkel eltávolított ún. Bowman-membrán hiánya miatt jelentősen megnő a cornea transzmissziója a káros UV-B és UV-C tartományokban.

A JATE Kísérleti Fizikai Tanszéke és az RMKI Plazmafizikai Főosztálya közös kísérleteiben az ultrarövid (<1 ps) lézerimpulzusok kölcsönhatását vizsgálják szilárdtestek felületén keltett plazmákban. A keletkezett plazmának a rövid idő miatt nincs ideje hidrodinamikailag tágulni, a szabad elektronok a meredek gradiens miatt anharmonikusan rezegnek a lézertérben, ami a lézertér magas felharmonikusainak keltését teszi lehetővé. Esély van arra, hogy a kutatások intenzív, hangolható, koherens fényforrás létrehozását eredményezik a vákuum-ultraibolya és a lágú röntgen tartományában.

Az előbbiekből részletezett kísérletek nagy intenzitású lézerforrásokat igényelnek.

A JATE Környezetfizikai Tanszékéhez kötődő excimer lézeres kutatások az intenzitás növelése érdekében három irányban folynak:

- A nyaláb térbeli, illetve az impulzus időbeli tulajdonságainak optimalizálása.
- Az excimerek – fizikai okokból limitált – energiakinyerési hatásfokának növelése.
- Nagyobb tárolt energiával rendelkező optikai erősítők fejlesztése.

Elsődlegesen a fentebb ismertetett eredményekre alapozva, jelenleg egy – a korábbiánál háromszor nagyobb teljesítményű – lézerrendszer megépítése van folyamatban.

A *szilárdtestfizikai labor tevékenysége* az alábbi pontokban foglalható össze:

Infravörös lézerfényvel indukált fénoxidáció és deszorpciós folyamatok in-situ vizsgálata: a termikus oxidáció kinetikáját le tudják írni a minta hőmérsékletének és reflexióképességének követése által. A felületi érdesség evolúcióját mind statikus, mind dinamikus mérésekkel jellemzik. A megfigyelt jelenségek a legtöbb vizsgált fém (Ti, Co) esetében egyértelműen mutatják a termikus oxidáció és termikus deszorpció kompetitív szerepét.

Kisméretű struktúrák, nanocsövek előállítása fénoxid-olvadék újrakristályosodása által, a kapott csőstruktúrák geometriai paramétereinek vizsgálata a lézer- és anyagi tulajdonságok függvényében.

Polimer- és fémabláció hangolható hullámhosszú lézerfényvel a látható tartományban: a kapott felületek topográfiájának jellemzése a folyamat-paraméterekkel összevetve és összehasonlítva a korábbi, ultraibolya-lézer által előállított felületi jellemzőkkel.

A *JATE Elméleti Fizikai Tanszékén* az atom-elektromágneses mező közös kvantumstatistikájának vizsgálatára atom-fény egyesített Wigner-függvényt használnak. Megvizsgálták az ún. „atomi Schrödinger-macska” állapotok Wigner-függvényét, rámutattak arra, hogyan tükröződik az állapot nem-klasszikus volta a Wigner-függvényben.

A *Janus Pannonius Tudományegyetem Fizikai Intézetének* három tanszékén főleg lézerfizikai és spektroszkópiai kutatások folynak.

Az excimer lézere erősítők elméleti modellezésében sikeresnek bizonyult a lokális jellemzők (hatásfok, erősítés és kontraszt) bevezetése.

Nagyáramú, kapillárisban létrehozott kisülések spektroszkópiai vizsgálata folyik olyan nagy ionizáltsági fokú plazma előállítása céljából, amelyből röntgentartományba eső emisszió várható.

Időben bontott lézergyerjesztésű plazmaemissziós spektroszkópia széles körű analitikai alkalmazásait vizsgálják kriminalisztikai, illetve ipari, technológiai felhasználás céljából.

Szerves anyagok (fehérjék), fémkomplexek dinamikai vizsgálata folyik időben bontott lézergyerjesztésű lumineszcencia-spektroszkópia módszerével.

Pirén gerjesztett állapotainak finomszerkezetét és a termalizáció karakterisztikus idejét határozták meg femtoszekundumos tranziens abszorpcióval. Túlhűtött folyadékok (szalol, jód-benzol) orientációs relaxációját mérték tranziens optikai Kerr-effektus segítségével. Fourier-transzformációs technikával

a femtoszekundumos lecsengésből túlcstillapított, aperiodikus librációs intermolekuláris rezgéseket mutattak ki.

A *Budapesti Műszaki Egyetem Fizika Tanszékén* koherens optikai mérés-technikai kutatás-fejlesztés folyik. A kutatócsoport meghatározóan a holográfia, a holografikus interferometria és az elektronikus szemcsekép-interferometria tárgykörökben tevékenykedik. Megemlíthetők azonban más területek is: frekvenciastabilizált félvezető lézer kifejlesztése és alkalmazása lineáris útmérőben.

A kutatás-fejlesztés célja az elmúlt negyedszázad alatt mindig is kettős volt: a holográfia és holografikus interferometria fizikai alapjainak kutatása, új mérési módszerek kidolgozása, továbbá az ismert, illetve kifejlesztett mérés-technikai eljárások ipari alkalmazása.

A *BME Atomfizika Tanszék Optikai Laboratóriumának* fő kutatási iránya a modern optika, és ennek alkalmazása elsősorban az ipari technológiák, információtechnika és mérés-technika területén.

A főbb kutatási területek: új optikai technológiák (akusztóoptika, integrált optika, diffraktív optikai elemek, aszférikus felületek, műanyag optikák, szál-optika); lézeres anyagmegmunkálás (CO_2 , NdYAG és kombinált rendszerek); optikai tervezés; optikai jelfeldolgozás (valós idejű spektrumanalízis); optikai adattárolás (lapszervezésű optikai memória, háromdimenziós optikai adattárolás); új spektroszkópiai technológiák (lézeres távanalitika, FT-Raman-, NIR-spektroszkópia, fluoreszcencia-spektroszkópia környezetvédelmi alkalmazásai); optikai szenzorok (távolság, szög, helyzet meghatározása).

A *KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék Részecskefizikai Csoportjában* optikai módszereket fejlesztenek részecskefizikai detektorok tulajdonságainak vizsgálatára, elsősorban CERN-beli alkalmazás céljából.

Az *MTA SZFKI Lézerfizikai Osztály* érdekes kutatási területe az üreges katódú lézerek, illetve az alacsony nyomású gázkisülések kísérleti és számítógépes szimulációkkal történő vizsgálata. Az üreges katódú lézerek területén elsősorban az ultraibolya tartományba eső fémion-átmeneteket vizsgálják (Cu-II 249 nm, 270 nm, Au-II 282 nm).

Egy másik érdekes kísérleti és elméleti kutatási terület a különösen nagy intenzitású lézerek és szabad, illetve fémfelületi elektronok kölcsönhatásának vizsgálata. Tanulmányozzák elektronok lézerfénybeli szórásfolyamatait, fémek nemlineáris fotoeffektusát, a lézerfény magasrendű felharmonikusait, igen rövid nagyenergiájú röntgenimpulzusok keltési mechanizmusát, valamint a nemlineáris jelek korrelációs tulajdonságait.

Az osztályon folyó felületi plazmonkutatások során széles spektrális tartományban (450–950 nm) működő berendezést állítottak össze vékony fémfilmek (arany, ezüst) komplex dielektromos állandóinak meghatározására.

A lézerek biológiai-orvosi alkalmazásait kutatják. A rákos sejtek és egyes baktériumok optikailag szelektív detektálására és elpusztítására alkalmazható fotodinamikus diagnosztikai és terápiás triggeranyag- és besugárzás-optimalizálási eredményeik lehetővé teszik a pácienseket érő fénykárosodási mellékhatások jelentős csökkentését.

Az oldat savazása után a ködfénykisülés által kibocsátott színekben megjelennek az elektrolitban feloldott nehézfémek atomi színekvonalai. Napjaink egyik legsúlyosabb környezetvédelmi problémája a vizek nehézfémekkel történő szennyezése. Városi szennyvíztelepeken a bejövő szennyvizek nehézfém-koncentrációjának folyamatos, a helyszínen történő mérését (folyamatos mérési módszer) lehet ezen vizsgálatok alapján megvalósítani. Az eljárást európai uniós, amerikai stb. szabadalom védi. Működő berendezés található itthon, az USA-ban és Szöulban.

Az *MTA SZFKI Lézeralkalmazási Osztályában* az alábbi témákkal foglalkoznak :

A különösen rövid impulzusidejű lézerek fejlesztésére kidolgozott különleges rétegszerkezetű lézertükröket ma már világszerte alkalmazják a femtoszekundum tartományú impulzuslézerekben. Segítségükkel ezen az időskálán egy sor lineáris és nemlineáris optikai jelenség tanulmányozható.

Koherens optikai mérés technikai módszerek fejlesztése és alkalmazása a fény szórás különböző területein – pl. a szubmikronos és mikronos részecskeszámlálásban, ezek méreteloszlásának és koncentrációjának meghatározásában, a lézeres kontaktus nélküli sebességmérésben. A kifejlesztett berendezések alkalmazhatók: a környezetvédelemben, tiszta terek folyamatos ellenőrzésére a gyógyszerészetben, a vegyiparban és az egészségvédelemben.

A fény nemklasszikus (összefonódott) állapotainak (entangled states) kísérleti vizsgálata és ezek alkalmazása a fotometriában.

Az *MTA SZFKI Kristályfizikai Főosztályán* egy sor nemlineáris optikai kristály, többek között LiNbO_3 , $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, Bi_2TeO_5 , TeO_2 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, BaB_2O_4 , $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ előállítására és – elsősorban spektroszkópiailag – vizsgálata folyik. Az előállított kristályokból különböző optikai elemek, frekvenciasokszorozók, modulátorok, deflektorok, parametrikus eszközök, holografikus memória stb. alakíthatók ki.

Ugyanott a fény nemklasszikus állapotainak leírása, előállítására, mérése és felhasználása témakörhöz kapcsolódó elméleti kutatások folynak. Különösen érdekes az olyan fény, amelynek valamely mérhető fizikai jellemzőjének, például amplitúdójának, fázisának vagy intenzitásának kvantumzaja kisebb,

mint a koherens állapotú fényé, azaz az ideális lézerefényé. Modellt hoztak létre az integrált optikai folyamatok leírására, kidolgozták a mikrogömblézer kvantumelméletét. A háromfotonos parametrikus folyamatban keletkező ún. „csillag”-állapotú fényről megmutatták, hogy többfotonos folyamatokban nagyságrendekkel jobb a hatásfoka mint a lézerefényé.

A kvantumállapot-rekonstrukció témakörében bebizonyították, hogy a homodin tomográfia alkalmas lehet az eddig még nem mért nemklasszikus fotonszám-oszcillációk kimutatására. Az utóbbi időben nagy érdeklődést váltott ki az ún. kvantum-teleportáció. A szokásos teleportációban egy beeső fényfoton polarizációs állapotát tudják átvinni egy másik, máshol lévő fotonra. Kidolgoztak egy elvi módszert, amellyel nemcsak a foton polarizációját tudják átvinni egy másik fénynyaládba, de azt a tényt is, hogy hány foton volt benne.

A KFKI RMKI Plazmafizikai Főosztályán keskeny természetes vonalszélességű atomok lézeres hűtésének és manipulációjának lehetőségeit vizsgálják. Az időben változó frekvenciájú lézerimpulzusokkal való kölcsönhatás eredményeképpen megvalósítható az atomnyaláb fékezése, eltérítése, kettéosztása, a spontán emissziós folyamatok sebességétől függetlenül. Létrehoztak egy rubídium-atomsugár berendezést és az MFA kutatóival együtt a rubídiumatom átmenetével rezonanciában működő, modulált frekvenciájú impulzusorozatot kibocsátó lézerrendszert a módszerek kísérleti megvalósításához.

A MTA MFA Vegyületfélvezető Főosztályán radiometriai minőségű infravörös detektorokat fejlesztenek nagy pontosságú spektroszkópiai eljárások kutatása, illetve etalonok előállítására céljából. Hullámvezető szerkezetek effektív törésmutatójának nagy pontosságú mérésére dolgoztak ki eljárást. Közeli infravörös tartományban hangolható félvezető lézereket fejlesztettek ki.

A VE Analitikai Kémia Tanszéke és az MTA Izotóp- és Felületkémiai Kutatóintézet Spektroszkópiai Osztálya szoros együttműködésben műveli a Fourier-transzformációs infravörös- (FTIR) és FT-Raman-spektroszkópiai anyag- és molekulaszervezeti kutatásokat. Az FTIR emissziós, reflexiós, valamint FT-Raman-méréstechnikákat sikeresen adaptálták számos katalizátor, elektrokatalizátor, fémpor, fémbevonatok, vékonyrétegek stb. korszerű felületvizsgálatára. Új, ún. emissziós-abszorpciós mérés technika elvi és elméleti alapjait dolgozták ki. Nagy érzékenységű, hosszú fényutú (360 m) FTIR-gázspektroszkópia segítségével légköri szennyezők laboratóriumi, illetve telepen történő azonosítását oldották meg, mely Magyarországon jelenleg a legérzékenyebb roncsolásmentes, multikomponensű gázanalitikai módszer.

Összefoglalás, következtetések

A lézerfizika az utóbbi időben viharos fejlődést mutatott. A „felhasználóbarát” lézerfejlesztés olyan látványos eredményeket hozott, mint például a már említett kompakt dióda-pumpált Nd:YAG lézerek, illetve a Ti:zafír lézer. Ezen a területen az aktivitás várhatóan az elkövetkezendő években is jelentős marad. A diódalézer – lényegében tíz év alatt – laboratóriumi kuriózumból a mindennapok eszközévé vált. A modern távközlés vagy információtárolás ma már elképzelhetetlen diódalézerek nélkül. A néhány éve még csúcsteljesítménynek számító 20 fs impulzus-időtartam ma már standardnak számít, a világ számos laboratóriumában folynak rutinszerű mérések ilyen készülékekkel. Az utóbbi időben igen fontos eredmények születtek egyebek mellett a femtoszekundumos molekuláris dinamika, a kvantumrendszerek optimális kontrollja, az ultragyors biológiai folyamatok tanulmányozása, illetve az időben bontott anyagszerkezeti vizsgálatok területén.

A hazai helyzetet összefoglalóan a következőkkel jellemezhetjük: rendelkezésre áll egy jól képzett, többségében világszínvonalú kutatásra képes kutatógárda, amely a folyamatosan romló anyagi viszonyokhoz eddig még elfogadhatóan alkalmazkodott. Az utánpótlás kérdése sem tűnik, legalábbis rövid és középtávon, reménytelennek, a fiatalok, diákok szívesen választják a lézerfizikai, kvantumoptikai témákat.

A szakterület jellege olyan, hogy jól illik a Magyarország-méretű és gazdasági potenciálú országokhoz. Ez főképp két tényező következménye. Egyrészt művelése viszonylag olcsó, néhány főnyi kutatócsoportok évi 100 ezer dollár nagyságrendű pályázati támogatás mellett – ami, legalábbis nyugati mércével mérve, kifejezetten alacsony – világraszóló eredményeket érhetnek el (lásd Bose–Einstein-kondenzáció). Másrészt azon ritka területek egyike, ahol hazánknak is van esélye a csúcstechnikai iparban a nemzetközi felzárkózásra, miután a kutatási eredmények, nem utolsósorban a területen működő kisvállalkozások segítségével, viszonylag olcsón vihetők át az ipari gyakorlatba.

Szilárdtestfizika és fizikai anyagtudomány

Mindennapi életünk használati eszközeivé váló kisebb-nagyobb műszaki csodáit, például a számítástechnika-informatika-távközlés alig nyomon követhető sebességgel fejlődő, és egyre szélesebb körben használatba vett eszközeit, az energiatakarékos és csökkenő méretű elektromágneses eszközöket (elektromotorok, transzformátorok, magnetronok stb.), a félvezető, a mágneses és optikai adattárolókat, a jobb hatásfokú és hosszabb életű világitóttesteket, a nagy szilárdságú, szélsőséges körülmények között használható, ugyanakkor könnyű szerkezeti elemeket stb. szemlélve, illetve használva tudnunk kell, hogy mögöttük a fizika tudománya, a szilárdtestfizikai-anyag-tudományi kutatások hosszú sora, tágabb értelemben a természet- és műszaki tudományok, továbbá a kutatás kudarcai, és legvégül a már természetesnek vett eredmény áll. Gondoljunk a zsebünkben hordozható „kártyától”, a nem filmre rögzítő fényképezőgépeken keresztül a személyi számítógépünkre, a vele, illetve általa elérhető adatbankokra, az orvostudomány új fizikai eszközeire (pl. tomográfia).

A szilárdtestfizika és a fizikai anyagtudomány tárgya

A szilárdtestfizika a fizikai tudomány részeként a szilárd halmazállapotra vonatkozó makroszkopikus és mikroszkopikus ismeretek és jelenségek megismerésével, mennyiségi leírásával, rendszerezésével és a megfigyelt jelenségek értelmezésével foglalkozik. Népszerűen talán úgy írható körül a tudományterület, hogy a „kézbe, illetve kézzelfogható anyagok” fizikájával, és nem általában az „anyag” tudományával foglalkozik.

Kézbe vehető és használható anyag vagy eszköz (szerszám vagy fegyver), és tágabb értelemben anyag/eszköz alatt a „homo faber” mindazon alkotását értjük, amelyeket valamilyen cél érdekében létrehoz és használ a hídtól a szilárdtest-elektronika eszközein keresztül az atomi felbontású mikroszkópokig. Az első esetben a folyón való biztonságos átjutás, az utolsóban az atomi léptékű anyagszerkezet megismerése a cél.

Közös cél viszont mindhárom említett esetben az életminőség javítása.

A létrehozott eszközök anyaga, illetve azok minősége módot adott az emberiség történelmének egyféle, időszakokra történő bontására. A jól ismert periódusok a kőkorszakoktól a réz-, bronz-, vaskorszakon keresztül, napjaink informatikai anyag- és mesterségesen előállított polimerkorszakáig vezetnek. Talán nem ennyire közismert, hogy ezen anyagszemléletű szakaszokat technikai fejlődés is kísérte, ami kezdetben csak a kődarab és csont alakját formálta célszerűre, majd igénybe vehette a tűz nyújtotta lehetőségeket; először agyagedényt égetett, majd alkalmas por olvasztásával átlátszó üveget hozott létre, még később tűzzel és megfelelő adalékokkal a porlékony ércből alakítható fémeket olvasztott. További lépéseket jelentett az alapanyagok összekeverése és tisztítása. Ezekkel az eljárásokkal még jobb tulajdonságú, a természetben elő nem forduló anyagok, például ötvözetek, illetve nagy tisztaságú félvezetőket tudtak előállítani, eljutva egészen odáig, hogy a szamurájkardok kovácsai felfedezték a multiréteg és „tisztá-műhely” nyújtotta előnyöket. A tisztaság és a multiréteg végül is a jelenlegi informatikai anyag- és köztechnikai eljárásokban érték el csúcspontjukat.

Ezek a korok sem a használt anyagok, sem az alkalmazott technika szempontjából nem lezártak. Ma a szédületesen növekvő teljesítőképességű félvezető eszközök, a mágneses és optikai információtárolók és polimerek korában is legfontosabb szerkezeti anyagunk az acél, és az ókorra visszanyúló cement mai változatai adják a modern épített környezet meghatározó anyagát. A klasszikus kerámiákat jellemző előállítási technológia – a színterelés – nemcsak a korszerű kerámia- és kompozitszerszámok egyik alapvető előállítási módjává nőtte ki magát, de alapvető módszere a nukleáris fűtőanyagtestek előállításának is.

Úgy tűnik továbbá, hogy az idő, a korábbi, kinetikában játszott szerepén túlnöve, korunkban új dimenzióként jelenik meg az anyagtudományban. A legtöbb felhasznált anyag termodinamikai értelemben metastabil, következésképpen a tudománynak válaszolnia kell arra a kérdésre is, hogy a belőle készült eszköz meddig használható. Ebbe a kategóriába nagy értékű nemzeti vagyontárgyak (hidak, erőművek, csővezetékek stb.) is tartoznak. Ma már kezdjük megtanulni: az öregedés és a fáradás nem csupán az élő anyag tulajdonsága. Vizsgálatunk tárgya tehát nemcsak egy „új anyag”, hanem egy öreg híd is lehet, és itt olyan élettartamok szerepelhetnek, amelyek nem férnek bele egy kutató életébe.

Az adott célnak megfelelőbb, tartósabb eszköz nemcsak a felhasznált anyag mélyebb ismeretét követeli meg, hanem a technológiai folyamatok mélyebb megismerését is igényli, állandó külső hajtóerőt adva a megismerésnek. Az anyagtudomány egyik jellemző vonása a kutatói kíváncsiságon túli hajtóerő megléte. A társadalmi cél gyakran a jobb fegyver és nem a jobb termék vagy a gazdaságosabb technológia létrehozása volt, és a cél mindig lokális sajtócsatákat hordozott. Ezen a társadalmi háttéren fejlődött, és mozog ma is

előre a tudományfejlődés sajátos törvényei szerint a szilárdtestfizika és az anyagtudomány fizikusi megközelítésű része, a fizikai anyagtudomány.

A szilárdtestfizika a 20. század szülötte. Létrejött két eseményhez kapcsolható. Az elektron felfedezése után néhány évvel a fémek fizikai tulajdonságainak leírására P. Drude, majd H. A. Lorentz szabad elektronokon alapuló modellt javasoltak, megértendő azt például, hogy miért vezet az elektromos áramot a fém, és miért nem vezet a szigetelő. Majd 1912. június 12-én Münchenben, a Bajor Tudományos Akadémián M. von Laue bemutatta a *Röntgensugarak interferenciajelenségei* dolgozatát, W. Friedrich és P. Knipping pedig kísérletileg bizonyították a kristálybeli atomok periodikus elrendeződését. Ezek a korszakalkotó eredmények atomi szintre, elektronállapotokra és „katonás rendre” egyszerűsítik például a gyémánt tökéletes szépségét és a grafit használhatóságát.

A klasszikus szilárdtestfizika a határok nélküli – vagy a végtelenséget periodikus határfeltétellel helyettesítő – tökéletes szerkezetet tekinti kiindulási alapjának. A reális szilárdtestek leírására ez az ideális modell nem elégséges. Különböző rácshibákkal, geometriai és kémiai rendezetlenségekkel, a felület és méret hatásának figyelembevételével bővült a terület. Ma már a hosszú távú kristálytani rendet egyáltalán nem mutató amorf állapot, illetve anyag is, és a „lágy” szilárdtestek, például folyadékkristályok is a szilárdtestfizikusok érdeklődési körébe tartoznak.

A szilárdtestfizika szemléletében sohasem különült el a fizikai tudomány többi ágától, felhasználja a többi ág, az atom- és molekulafizika eredményeit, a statisztikus fizika, a termodinamika, a kvantumelmélet által nyújtott módszertani lehetőségeket. Egyre több szállal kapcsolódik a többi tudományos diszciplínához is. Állításunk szemléltetésére legyen szabad két olyan tényt említeni, amelyek a tudományterület „alulról és felülről” való nyitottságát mutatják:

- Módszerei interdiszciplinárisak, eredetük a magfizikában, az elektromágneses hullámok teljes tartományában alkalmazott eszközeiben stb. keresendők. Példaként a neutronfizikai módszerek, a Mössbauer-spektroszkópia, az elektronmikroszkópia vagy a magfizika és a katonai radar-technika szülte nukleáris mágneses rezonancia említhetők. Ezek a módszerek a kondenzált anyagok vizsgálatán túl a molekulakutatás, a kémiai, a földtudományok, a minőség-ellenőrzés, az utóbbi pedig az orvosi diagnosztika kulcsfontosságú eszközeivé is váltak;
- A szilárdtestfizika által tanulmányozott anyagok nagy része vagy más diszciplína (kémia, műszaki tudomány, élettudomány, földtudomány) terméke/tárgya, vagy nem is rendelhető csupán egyetlen diszciplínához, mint például az élő anyag vagy a sokarcú szén. A klasszikus szilárdtestfizikát alapvetően kibővítette az anyagtudománynak nevezett multidiszciplináris kutatási tevékenység megjelenése és robbanásszerű fejlődése. Az anyagtudomány a klasszikus tudományterületek közül a fizika több ágát (szilárdtestfizika, statisztikus fizika, termodinamika stb.), a kémia és

műszaki tudományok bizonyos fejezeteit tekintheti elődjének. Kiindulásának sokan a tranzistor 1947-es felfedezését és fejlesztését tekintik. A tranzistor létrehozói között számos tudományág egymás nyelvét értő és/vagy megtanuló képviselői voltak jelen. Az anyagtudomány elnevezése még ma sem egységes; a tudományterület átfogó szervezetét Anyagkutató Társaságnak (Materials Research Society) nevezik, jelentős monográfiatorozata az *Anyagtudomány és technológia* (Materials Science and Technology), tankönyve *Az anyagok tudománya és technikája* (The Science and Engineering of Materials), egyik legutóbbi felmérése *Az anyagok fizikája* (The Physics of Materials) címet viseli. A többféle elnevezés mögött ugyanaz a tartalom rejlik: az anyag szerkezete és tulajdonságai közti mennyiségi összefüggések feltárása, azok megértése, az adott célra leginkább megfelelő anyagok kiválasztása, illetve új anyagok kifejlesztése céljából.

A klasszikus szilárdtestfizika anyagtudományi kibővülése a terület alapvető tankönyvének, Ch. Kittel *Bevezetés a szilárdtestfizikába* című magyarul is két kiadásban megjelent, eredetiben pedig a hetedik kiadásnál tartó tankönyve tartalmának a változásain is érzékelhető. Amorf anyagok, fullerének, pásztázó alagútmikroszkópia című részek találhatók a hetedik kiadásban, míg a második kiadás kizárólag a kristályos szilárdtestek tárgyalását tűzte ki célul.

A szilárd anyag kutatásának a fenti értelemben kibővült kérdéskörét az alábbi sarokpontokból kiindulva közelíthetjük meg:

- a vizsgálat tárgyát képező anyag és/vagy modell,
- a tanulmányozott jelenség,
- az alkalmazott elméleti és/vagy kísérleti módszer,
- a kitűzött cél,
- vagy ezek kombinációi lehetnek a primer meghatározók.

A négy meghatározó elem rangsorában a szilárdtestfizika a jelenség vizsgálatát, és célként az alapismeretek bővítését helyezi előtérbe. A fizikai anyagtudomány első motivációja a vizsgálandó anyag, célja általában egy konkrét anyaghoz vagy alkalmazáshoz kapcsolódik. Közös mindkettőben a mennyiségi leírás és a fizikai hajtóerők megismerésének a szándéka. Az alapoktól az alkalmazásokig tartó íven természetesen a kémiai és műszaki anyagtudományok azok, amelyek közelebb vannak a konkrét célok megvalósításához. Pontosabb körülírásukra nincs szükség, körülhatárolásuk pedig céltalan. A szilárdtestfizika és fizikai anyagtudomány eredményein közvetve olyan iparágak alapulnak, mint a kohászat, a félvezetőipar, bizonyos lézer- és optoelektronikai termékek gyártása, mágneses tárolók, szupravezetők, kompozitok, folyadék-kristályok stb. termelése és alkalmazásaik. Az alapokat illetően a miniatürizált elektronikus és optikai eszközök atomi és elektronszerkezeti ismereteket, a polimerek molekulászerkezeti tudást, a szuperötvözetek pedig a mikro-szerkezet ismeretét igénylik.

Ismereteink mélysége és az anyag használhatósága között azonban nem ilyen egyszerű a kapcsolat; amire az üveg példáját említhetjük. Az üveg egyike a legrégebbi mesterséges anyagainknak, kitűnő optikai lencséket állítanak elő belőle, és ma sem ismerjük szerkezetét, a szerkezetmeghatározó módszerek elvi korlátjai miatt. Sok esetben elegendő a felhasználás szempontjából lényeges fizikai jellemző vagy jellemzők ismerete. A továbblépés, a fejlesztés azonban mindig szélesebb és mélyebb ismereteket és általánosítható törvényszerűségeket igényel.

A vizsgálat tárgya elméletileg lehet egy modell is, kísérletileg azonban csak konkrét anyag lehet. Az a kérdés, hogy a kutatás iránya szilárdtestfizika, avagy anyagtudomány, legfeljebb a tevékenység célja alapján dönthető el, az esetek nagy részében nem is szükséges. A fizikai vagy akár matematikai modellek elméleti vizsgálatának végső célja mindenképpen egy tulajdonság vagy jelenlét mélyebb megértése, általában egy anyagcsaládhoz rendelhetően. A modell az anyagtudományban a megértés eszköze és nem a kutatás végcélja.

Az alkalmazott módszerekhez (korábban csak a kísérletiekhez, ma már egyre inkább az elméletiekhez is) módszer- és eszközfejlesztés is tartozhat. E tevékenységet szinte lehetetlen diszciplínához rendelni; azt az eszköz- és módszerfejlesztést, ami a szilárdtestfizikát és a fizikai anyagtudományt szolgálja, a tudományterülethez tartozónak ítéljük.

A kutatás célja alap- vagy alkalmazott kutatási lehet, azaz a „kutatói motiváció” és a „társadalmi igény” nehezen megfogható kritériumait érinti. Részből természetesen a kutatói odafigyelés a társadalom előtt feladatok elvárt vagy finanszírozott (vélt/valós) kutatási vetületére, a kutatási feladatok kitűzésének jó részét azonban a kutatói ambíciók és a materiális feltételek által lényegesen befolyásolt „belső fejlődés törvényei” diktálják. A szilárdtestkutatást Magyarországon korábban a jelenleginél jelentősebben befolyásolta a hazai ipar igénye és támogatása, amely nemzetközi trendekkel esett egybe. Napjainkban – sajnos – a közvetlen társadalmi motiváció még az anyagtudományban is csak nyomokban lelhető fel. A kutatás és a vonatkozó felsőoktatás egyik célja: az újdonságok befogadására képes szakmai kör fenntartása, és az új ismeretek beültetése a jövő nemzedékének szürkeállományába.

Kutatási irányok a világban

A világban folyó szilárdtestfizikai és fizikai anyagtudományi kutatás áttekintése érdekében az alábbi kérdések köré csoportosítjuk a mondanivalónkat:

1. Növekszik vagy csökken a terület publikált eredményeinek az aránya egy kiválasztott vezető folyóirat tartalmának a tükrében?
2. Milyen területeken folyik a legaktívabb tevékenység?

A válaszok:

1. A *Physical Review Letters* kondenzált anyag témájú cikkeinek száma az 1983–1998 közötti periódusban enyhe emelkedést mutat, hasonlóan az interdiszciplináris fizika eredményeihez, és az 1998. augusztus 17. és szeptember 14. közötti öt szám adatai szerint a publikált cikkek 47,6%-a tartozik a témakörbe.
2. Áttekintettük három nagy nemzetközi rendezvénycsoportba tartozó szimpóziumok tematikáját, egy aktuális tanulmányt, és egy nagy tudományos kiadó könyvjegyzékéből vettünk mintát. Szándékunk azt bizonyítani, hogy a hazai kutatógárda nem perifériális területeken dolgozik.

Az észak-amerikai székhelyű Materials Research Society (MRS) évente két kongresszust rendez. Az 1999. évi rendezvényeken tavasszal 34, ősszel 43 szimpózium volt. Teljes felsorolásuk helyett kiemeljük a folyamatok vizsgálatára is kiterjedő számítógépes modellezést, a különböző idő- és hosszúságskálájú módszerek együttes alkalmazását; a szinkrotronsugárzás, az elektronmikroszkópos, az atomi léptékű vizsgálati és anyagmódosító módszerek térhódítását. Az alacsonyabb dimenziók és kisebb méretek tartományából a nanoszerkezetek, nanokompozitok, nanolitográfia, molekuláris elektronika, a felületek, a köztés tartományok és hordozók vizsgálata, valamint módosítása, az ultravékony dielektrikumok említendőek. Az anyagcsaládok oldaláról közelítve a kérdést a szerves szilárdtestek, a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén működő szupravezető kerámiák, a félvezetők, az optika, optoelektronika, optikai hírközlés, a számítógép-technika, az érzékelés (szenzor) és végrehajtás (aktuátor) alapanyagai külön szimpóziumokon szerepeltek. A roncsolásmentes anyagvizsgálat és a radioaktív hulladékok kezelésének anyagtudományi vonzata egyre aktuálisabb kérdéseket vetnek fel.

Az EUROMAT az Európai Anyagtudományi Társaságok Szövetsége (EFMS, 21 európai ország, 27 ezer egyéni tag) 1999. őszi rendezvényének szimpóziumait az alábbiak szerint csoportosította: információtechnika, közlekedés, energiaátalakítás és villamosenergia-termelés, orvostech-nika és építőipar alapanyagai (összesen 20 szimpózium). További 30 szimpóziumon a számítógépes modellezésről; a fémeken belül az acélról, a szuperötövezetkekről, a tömbi amorf ötövezetkekről, a pormetallurgiáról, a kerámiákról, a polimerekről, ezen belül a félvezetőkről, a nano-, mikro- és felületi technológiákról volt szó.

Az Amerikai Fizikai Társulat (APS) rendezvényéből (APS March Meeting) vett tematikai válogatás a kvantum Hall-effektus, a magashőmérsékleti szupravezetők, az erősen korrelált anyagok, a fémszigetelő-átmenetek, a kvázikristályok, a fullerének és nanocsövek, a vezető polimerek, az óriás mágneses ellenállás, az üvegek és spinüvegek, a számítógépes modellezés aktualitását mutatja.

A National Academy Press, Washington D. C. gondozásában 1997-ben megjelent *The Physics of Materials: How Science Improves Our Lives* című tanulmány, hangsúlyozva a fizika és más természet- és műszaki tudomány kapcsolatát, az anyagkutatás interdiszciplináris jellegét, az alábbi tevékenységi területeket emeli ki: nem egyensúlyi és újra feldolgozható anyagok szintézise, vegyület-félvezetők (GaAs, GaN, SiGe), polimerek, bio-kompatibilis anyagok, fullerének és fulleridek, szupravezetők, optikai szálak, szuperötövezetek (Ni_3Al , Ni_3Ti precipitátumokat tartalmazó Ni-egy kristály turbinalapátok!), a kvázi kétdimenziós folyadékkristály-megjelenítők, az újabb és újabb lehetőségeket nyújtó mágneses anyagok, a számítógépes modellezés, a nem

egyensúlyi jelenségek vizsgálata, a magashőmérsékleti szupravezetés, a kvantumos Hall-effektus, az extrém körülmények hatásának a vizsgálata, makromolekulák fizikájának (pl. a DNA gélekben való mozgásának!) az újrafelfedezése. A tanulmány konklúzióként hangsúlyozza az egyetemek, az állami kutatóintézetek és vállalatok együttműködését a tudomány és technika hatékonyabb integrációja érdekében.

Végül néhány példa a Springer Verlag könyvvásztékából, könyvcímek szerint, nem törekedve teljességre: *Lágy szilárdtestek fizikája* (kolloidok, fraktálok, folyadékkristályok, polimerek), *Folyadékkristályok*, *Mezozkópikus anyagok és klaszterek* (nanoméretű anyagok, nanotechnológiák, kiválások mátrixokban); még mindig izgalmas az *Optikai üvegek tulajdonságai* és az *Kis nyomáson előállított szintetikus gyémánt*, a *Fullerének és rokon szerkezetek*, *Szénszálerősítés és szén/szén kompozitok*, a *Molekuláris szerves szilárdtestek* és *Molekuláris szűrők*, a *Kerámiák*, a *Szuperszén* (fullerének, nanocsövek és szintetikus grafit előállítása, technológiája, felhasználása), a *Hidrogén fémekben*, a *Félvezető fizika*, a vizsgálati módszerek közül a *Páztározó mintavevő mikroszkópia*, a *Nagyfelbontású röntgenszórás*, az *NMR-spektroszkópia*, és a spektroszkópia további módszerei, az *Elektronholográfia*, a *Mágneses domének*, a *Mágnesség elmélete*, a *Kölcsönható elektronok és kvantumágnesség*.

Az 1–2. pontokban elmondottak célja a szilárdtestfizikán és a fizika anyagtudományon belüli, közelítő arányainak, és aktuális működési területeinek a bemutatása. A belső összefüggésekre az jellemző leginkább, hogy új alkalmazás, új kérdéseket vet fel az alapkutatással és a „rég” anyaggal szemben is, egy új anyag, egy új jelenség felismerése pedig az új alkalmazások sorát gerjesztheti.

A kondenzált anyagok kutatásának aktualitását az utóbbi idők Nobel-díjai is bizonyítják (például kvantumos Hall-effektus, 1985; STM, 1986; magashőmérsékleti szupravezetés, 1987; folyadékkristály, 1991; neutronszórás szilárdtesteken, 1994).

A hazai szilárdtestkutatás múltja, területei, műhelyei, kapcsolatai és jövője

A szilárdtestfizika és a fizikai anyagtudomány hazai története megírásra vár, itt és most csak néhány momentum említhető. A kezdetek a kristályos anyagokhoz, a wolframhoz, a mágnesség kutatásához, a magfizikai és az elektronfizikai módszerek itthoni alkalmazásához, a félvezető- és fémkutatásokhoz kapcsolódnak.

A sikerrel művelt területekből azokat soroljuk fel, amelyeken nemzetközileg elismert, sokszor hivatkozott eredményeket értünk el, nemzetközi konferenciákat rendeztünk itthon, illetve nemzetközi rendezvényeken hallgatták meg kutatóinkat. Ezek a híg ötvözetek és a Kondo-probléma kísérleti és elméleti vizsgálata, a fémüvegek technológiája és széles körű kutatása, a folyadékkristályok előállítása és vizsgálata, a nemlineáris optikai kristályok előállítása és vizsgálata, a rácshibák, a fázisátalakulások, a diffúzió, a vékonyrétegek, az alacsonydimenziós és rendezetlen rendszerek kutatása, a félvezetők kutatása,

a nukleáris eredetű méréstechnikák és technológiák alkalmazásai. Idetartozik még az eszközeiben világpiacon forgalmazásig elvitt mélynívó spektroszkópia és molekuláris rétegvékonyítás.

Az eredményekből két metodikai újdonságot: a neutronspin-echó módszer felfedezését, és egy új szerkezetvizsgáló módszer, az atomi felbontású röntgenholográfia kifejlesztését emeljük ki. Alkotói a világon elsőként mutatták meg, hogy lehetséges belső sugárforrás felhasználásával olyan röntgenhologram készítése, amely direkt módon visszaadja a szilárdtestekben elhelyezkedő atomok háromdimenziós elrendeződését.

A diszciplína helyzetét és jövőjét illetően két korábbi felméréssel rendelkezünk: 1971-ből, illetve 1982-ből. Az elsőt a Szilárdtestfizikai Komplex Bizottság, a másodikat az Anyagtudományi Komplex Bizottság Szilárdtestkutatói Bizottsága készítette. A tanulmányok módot adnak a jelenlegi helyzettel való objektív összevetésre. A kutatók és kutatóhelyek számának csökkenése, az ipari kapcsolatok elszegényedése, az eszközpark szűkülése és elöregedése a legszembetűnőbb jellemzők.

A szilárdtestfizikai és fizikai anyagtudományi kutatások művelése ma az MTA kutatóintézeti konszolidációjának eredményeképpen két összevont akadémiai kutatóintézetben, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai, valamint az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetben, továbbá az egyetemeken támogatott kutatócsoportjaiban folyik, és kiegészül a nem szilárdtestkutatói főfeladatú akadémiai kutatóintézetek (RMKI, ATOMKI, AEKI) kapcsolódó tevékenységével. A tudományegyetemek (ELTE, KLTE, JATE) fizikai tanszékei, a BME Fizikai Intézete, a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatói Alapítvány Anyagtudományi és Technológiai Intézete jelentik a szilárdtestfizika és a fizikai anyagtudomány további hazai bázisát.

A legfontosabb kutatási területeket az alacsonydimenziós, erősen korrelált és komplex rendszerek; a folyadékkristályok; az amorf, a nanokristályos, a magas olvadáspontú és metastabil fémek; a töltés- és spinsűrűség-hullámok; a vékonyréteg- és felületfizika; az ionsugaras analitika és nanotechnológia; a mágneses anyagok és jelenségek, a félvezető rétegek és heteroszerkezetek, valamint érzékelők; az optoelektronikai kristályok és optikai anyagok vizsgálata jelenti. A kutatási tevékenység szerves része az anyagvizsgálattal összefüggő sajátos módszerek, elsősorban a nukleáris eredetű, valamint az elektromágneses sugárzás és anyag kölcsönhatásán alapuló módszerek fejlesztése és alkalmazása.

A kutató területek egybeesése itthon és a nagyvilágban nem kíván további alátámasztást. Ha nem is minden részletében, de nagy vonalakban a hazai kutatások követik az említett nemzetközi trendeket.

A tevékenység szélesedő hazai és nemzetközi együttműködésben folyik, eredményességét bizonyítja a rangos nemzetközi folyóiratokban megjelent több ezer publikáció és a nemzetközi konferencián elhangzott, illetve bemutatott előadás, továbbá a hazai nemzetközi rendezvények sikere.

Nemzetközi kapcsolataink

Nagy részben személyes ismeretségre épülnek. Az utóbbi években sok esetben valódi munkakapcsolattá fejlődhetnek, néhány kimondottan ilyen célú pályázati alap segítségével (pl. MAKA, Balaton stb.). A legnagyobb probléma, hogy ezek a kapcsolatok legtöbbször nem kiegyensúlyozottak, a külföldi partnernek nincs miért ideutaznia. A magyar fél általában nem tud egyedülálló mérési vagy egyéb lehetőséget nyújtani, ez alól talán a BKR (Budapesti Kutatóreaktor) lesz a kivétel. Ezen túl gyakran még a hazai ellátás pénzügyi háttere sem megfelelően biztosított. Külföldi vendégek fogadását segítő, hasznos lenne az MTA-nak vagy az egyes intézeteknek vendégházakat létrehozni, ez nagyban elősegítené a nemzetközi kapcsolatok szélesítését. Hiányoznak vagy csak nagyon kis mértékben vannak olyan pályázati lehetőségek, amelyek a nagyberendezések melletti méréseket, illetve más intézetcsoportokkal való közös kutatást segítik elő. Még a volt szocialista blokk többi államához képest is elmaradtunk a nagy nemzetközi létesítmények tagsága tekintetében. Az EU V. keretprogramjában való részvételünk új lehetőségeket teremt, és várhatóan új feladatok elé állítja kutatóinkat.

A kutatás és felsőoktatás kapcsolatai: „kutató egyetem” – „oktató kutató-intézet”

Az utóbbi években megváltozott az egyetemek és az MTA kutatóhálózata közötti viszony. A kihelyezett tanszékek, a Széchenyi professzori ösztöndíj, a személyes kapcsolatok alapján az egyetemek a kutatóintézeti kapacitást a laboratóriumi képzésben, a speciális kollégiumok kibővítésében, a diplomamunkák és PhD-disszertációk készítésében, röviden a magasabb szintű, továbbképzésben veszik igénybe. (A PhD területén nem ártana a „de facto” helyzet „de jure” rendezése.) Ilyen értelemben kutatóintézeteink néhányát megilletné az „oktató kutatóintézeti” rang.

A fizikus- és mérnökfizikus-képzésben (ELTE, BME, KLTE, JATE) a szilárdtestfizika és a fizikai anyagtudomány jelentőségének megfelelő súllyal szerepel. Az alapképzésben mindenütt megfelelő színvonalú előadások, laboratóriumok és speciális kollégiumi kínálat található. A BME-n és az ELTE-n több ilyen jellegű szakirány is van, a KLTE-en például az ilyen irányú diplomát választók aránya – többéves átlagban – 25–30%. A posztgraduális képzésben is mindenütt van ilyen alprogram, és a BME-n, illetve a KLTE-n ezek hallgatói létszámban is jelentős részt képviselnek (mintegy 50%, illetve 30%). Az ELTE-n is 11–12 fő a *szilárdtestfizika és anyagtudomány* alprogram beiratkozott hallgatóinak a száma. A BME-n a – *fizika* – program mindkét alprogramja (kondenzált anyagok fizikája, alkalmazott fizika) kapcsolódik ehhez a

szakterülethez is. Fontos kiemelni, hogy már a diplomamunkák vezetésében, de elsősorban a doktoranduszok képzésében különösen jelentős szerepet játszanak az akadémiai kutatóintézetek.

Gondok, következtetések

Úgy gondoljuk, hogy a következőkben felvetett problémák nem csak a tárgyalt tudományágakra vonatkoznak, feltehetően érintik a fizika, illetve a tudomány több területét.

1. A hazai tudományos kutatásra általában jellemző magas átlagos életkor mellett a szilárdtestfizikát és a fizikai anyagtudományt is sújtja a középkorú generáció kellő létszámának a hiánya. Így egyes vezető kutatók nyugalmába vonulása az általuk művelt téma megszűnését vonhatja maga után (pl. a mágneses kutatások és az anyagtudományt kiszolgáló laboratóriumi tisztaságú fémtechnológia kutatói bázisának az elszegényedése). A fiatalok esetében is megváltozott a helyzet. Nem divatos szakma a kutatás: túl sok a befektetés, túl kevés a siker. Ez az értékrend valószínűleg távol tartja a sikervadász jelölteket, de az ideigyekvő megszállottaknak is kell valamiből élni. A kutatás alulfinanszírozott, a nevetségesen alacsony fizetéseken változtatni kell, nehogy kontraszelekció érvényesüljön. A PhD-képzés, a fiatal kutatók akadémiai támogatása, és a Bolyai-ösztöndíj javított valamit a fiatalok helyzetén.
2. Az eszközállomány elöregedése és hiányos volta két szempontból is gondot okoz. Az 1970-es évek – nyugati országokhoz képest szerény, hazai viszonylatban kiemelkedő – beruházásai képezik sok helyen ma is a közép-műszer-kategória gerincét. Azóta nem történt hasonló volumenű fejlesztés, a világon ma már nem is emlékeznek az akkori színvonalra. Továbbá eltűnt, vagy minimálisra csökkent az a mérnöki-technikusi háttér, amelyik korábban eszköz- és módszerfejlesztéssel vagy kiegészítéssel állt a kutatók mögött. A piacon kapható új eszköz is már bizonyos mértékben le van maradva az élvonalhoz képest, mert az élvonal mindig tartalmaz egyedi elemet.
3. A technológiai/technikai háttér elszegényedése tulajdonképpen az előbbi gond folytatása, mégis külön ki kell emelni. A szilárdtestfizika és a fizikai anyagtudomány nincs pontosan definiált tulajdonságú anyagminták nélkül, ezek pedig ritkán vásárolhatók meg a boltban. A technológus kutató pedig még kevesebb elismerésre számíthat, mint az anyagmintát megrendelő, és azon méréseket végző kutatótársa.
4. Az informatikai háttér a középszintű számítógép-hálózatot tekintve elfogadható, azonban szükséges a nagy teljesítményű számítógépközpontokhoz (pl. NATO-gépekhez) való csatlakozás megteremtése. Komoly

problémák vannak a könyvtári ellátásban, amely intézeti és akadémiai szinten folyamatosan romlott az elmúlt években. Ennek megállítása a kutatás létkérdése, hiszen a kutató egyik legfontosabb „munkaeszköze” a tudományos irodalom; ennek ismerete nélkül nincs modern kutatás.

5. A belső koherencia hiánya két mutatóval jellemezhető. Az egyik az elméleti és kísérleti munkák több területen való függetlensége. (Történeiszek szerint ez a probléma már annak idején is létezett: az alkimisták és a kézművesek tudása is független volt.) A második említendő kérdés az elaprózódást előidéző pályázati szisztéma. A pályázati koncepció nem önmagában hibás, hanem a nevetségesen alacsony pályázati összegek, és a „kapjon mindenki néhány forintot, hadd tanuljon gazdálkodni” elv, ami a tudományos iskolák szétverését segítette elő.
6. Mindannyian tudjuk, hogy a kutatói eredményesség és a siker, illetve elismertség nem azonos fogalmak. Minél több objektív feltétele, gátja van a munkának, annál nehezebben elérhető a kitűzött cél, annál valószínűlenebb a siker. A miénkhez hasonló kis és szegény országok kutatói számára ezért kevésbé vonzó az instrumentális és anyagi feltételektől jobban függő kísérleti munka. Ha az instrumentális háttér (legalább néhány kiválasztott területen) külön nem biztosítjuk, és az elméleti és kísérleti programok pályázati támogatása csaknem azonos marad, akkor a hazai kísérleti kutatások háttere és személyi vonzása tovább romlik.
7. A tudományos teljesítmény értékelésének kanonizált formája, a minősítési rendszer átalakulóban van. Ennek vannak jó és rossz oldalai. A PhD csak jogilag azonos – de színvonalában nem – a tudomány kandidátusa fokozattal. A kandidátusi szint süllyedése magával vonhatja az MTA doktora címnek a tudomány doktora fokozathoz képesti színvonalcsökkenését. Ennek megállítása aktuális feladat. A pótlékok rendszere – a tisztességes fizetési szisztéma helyett – csak növeli a torzításokat.

Láthatjuk, hogy az „új anyag” elnevezés milyen széles fogalomkört takar: tartalmazza a tisztaság-, technológia-, kezelés-, előtörténet-, alak- és méretkombinációt, szinte határtalanná teszi a kutatás tárgyválasztékát. Tovább bővül a lehetőségek száma az új jelenségek, az új technológiák és új vagy jobb felbontású módszerek felfedezésével, alkalmazásával, a számítógépes modellezés csatasorba állításával. Szükséges ezért a szorosabb kapcsolatok kiépítése az anyagtudomány többi – nem fizikus – művelőjével.

A tapasztalatok arra tanítanak, és reméljük, hogy az elmondottak is azt illusztrálják, hogy az anyagkutatásban az újdonságkeresés, a kutatás nem feltétlenül a szélsőséges külső körülmények hajszolásán keresztül vezet – különösen, ha annak extrém anyagi vonzata is van. Ez a kutatói habitus szegény országok kutatói számára úgysem reális, ugyanakkor indokolt esetekben a nagyberendezésekhez való hozzáférés biztosítása szükséges. A lineáris extrapoláció mint kutatási stratégia helyett a meglévő ismeretek új módon való össze-

kapcsolása és felhasználása, valamint új felismerések keresése tekinthető kutatói célnak.

Fel kell tennünk a kérdést, hogy mit adjon ehhez – a hazai szilárdtestfizikát és fizikai anyagtudományi kutatást előkészítendő – a felsőoktatás. A szükséglet a tudás átadójától (tanár) a felderítőn (alapkutató) keresztül az alkalmazóig (mérnök, mérnökfizikus) tart. Bár a cél első látásra különböző, közös kell, hogy legyen mindhárom területen a kritikus szemlélet kialakításának, a tudás határai ismeretének és ismertetésének, az életminőség javításának a célkitűzése, azaz a sikercentrikusság helyett az eredménycentrikusság tudatosítása, rangjának emelése. Az oktatás is felveti a „mit-mivel-hogyan-milyen céllal” alapkérdéseket. A kérdéssor megítélésünk szerint minden értelmes emberi tevékenységre vonatkozik, az ismeretek átadása mellett az ismeretek megszerzésének buktatókkal terhes útja is a tanítás tárgya kell, hogy legyen.

Végül azt a kérdést tesszük fel, hogy csökkent-e a társadalmi érdeklődés a szilárdtestkutatás és fizikai anyagtudomány iránt. A kétpólusú hatalmi elrendeződés átmeneti megszűnése kétségtelenül csökkentette a „fegyverkovácsok” iránti igényt, mégis úgy gondoljuk, hogy az informatika, a bio-kompatibilis anyagok, a környezetbarát és az újra feldolgozható anyagok, valamint a teljesen új struktúrák (pl. eddig nem ismert szénmódosulatok stb.) felfedezése, továbbá az anyagtudomány multidiszciplináris és több nézőpontú megközelítése biztos jövőt jósol a területnek.

Tisztában vagyunk azzal is, hogy társadalmi szemléletváltásra is szükség van, és ezért az oktatás és tömegkommunikáció sokat tehet, és kell is, hogy tegyen. Ennek érdekében nagyon lényeges, hogy ne ártson magának sem a szilárdtestfizika, sem a fizikai anyagtudomány (sem a tudományművelés többi ága) hamis illúziókeltéssel. A kérdést azért tartjuk szükségesnek megemlíteni, mert felhívja a figyelmet az előrejelzésekkel/jóslásokkal kapcsolatos óvatosságra, valamint a kapott saját eredmények kritikus értékelésének szükségességére, és főleg a közzététel mérlegelésére. Tudatosítani kell a társadalom minden tagjában, hogy a háztartási gép vagy szórakoztató elektronika csak akkor működik, ha az erőmű (lett legyen akár atomerőmű) villamos energiát táplál a hálózatba. Vagy: azért feküdhetünk az életműködésünket vagy betegségünket felderítő, a testünket egyáltalán nem károsító mágneses rezonancián alapuló diagnosztikai gépbe, mert anyagtudósok, radartechnikusok, mérnökök, informatikusok és orvosok az utóbbi időben megtanultak együtt dolgozni. Ezekben és több hasonló eszközben nagyon sok szilárdtestfizikai eredmény testesül meg, és legalább ugyanannyi vár még tökéletesebb vagy gazdaságosabb megoldásra. Az életminőség javításában a tudománynak és technológiának – ezeken belül a fizikai tudományoknak – meghatározó szerepe volt, van és lesz a következő századokban.

Értékrendünk és önértékelésünk pályamódosítására is szükség van, a prométheuszi tűz mellett a tűz táplálóinak és a legjobb nyársak készítőinek is he-

lyet kell biztosítani. Azt gondoljuk, hogy a homo sapiens genetikai adottsága a tökéletesebbre való törekvés, és azt reméljük, hogy a tudományt művelők mennyiségi csökkenése a minőség javulásával jár együtt.

*

Köszönetünket fejezzük ki Barna Péternek, Bársony Istvánnak, Beleznay Ferencnek, Corradi Gábornak, Deák Péternek, Faigel Gyulának, Gaál István-
nak, Gyulai Józsefnek, Hargitai Csabának, Kemény Tamásnak, Kollár János-
nak, Konczos Gézának, Kriza Györgynek, Kroó Norbertnek, Lendvai János-
nak, Mezei Ferencnek, Mihály Györgynek, Nagy Dénes Lajosnak, Pócsik
Istvánnak, Radnóczi Györgynek, Sólyom Jenőnek, Sváb Erzsébetnek, Szörényi
Tamásnak, Tichy Gézának, Tóth Ferencnek, Tüttö Istvánnak, Varga Lajos
Károlynak, Vincze Imrének, hogy gondolataikat az anyag összeállítása érdeké-
ben megosztották velünk.

KERTÉSZ JÁNOS

Statisztikai fizika

A statisztikus fizika tárgya

A múlt század második felére kiderült, hogy a makroszkopikus testek a mechanika szempontjából meglepő törvényszerűségeket követnek, amelyeket a fenomenologikus termodinamika segítségével lehetett leírni. Ezek a törvényszerűségek nem következnek egyszerűen a testeket alkotó részecskék kölcsönhatásaiból és a mozgásegyenletekből. A folyamatok irányultságának, az idő megfordíthatatlanságának megértése, az entrópia fogalmának értelmezése újszerű megközelítést igényelt, ami abból indult ki, hogy a makrorendszereket alkotó részecskék rendkívül nagy száma valószínűségi leírást tesz szükségessé. A kinetikus gázelmélet sikereire építve létrejött egy új diszciplína, a *statisztikus mechanika*, aminek kialakulása olyan óriások nevéhez fűződik, mint Maxwell, Boltzmann, Gibbs, Einstein. Az utóbbi évtizedekben egyre inkább elterjedt a *statisztikus fizika* elnevezés, mutatva, hogy a feltárt törvényszerűségek nem csak a mechanikai kölcsönhatásokkal jellemezhető rendszerekre érvényesek. Az egyre mélyebbre hatoló, egyre alapvetőbb kölcsönhatásokra koncentráló kutatások mellett kialakult és a fizikai valóság megértéséhez alapvetően hozzájárult a fizikának egy másik, az *alkotóelemek bonyolult szerveződésével* foglalkozó ágazata is. A kétféle megközelítés számos ponton érintkezik, és kölcsönösen megtermékenyítő kapcsolatban áll egymással.

Kezdetben a statisztikus fizika elsősorban a *termodinamika mikroszkopikus megalapozásával* foglalkozott. Hamar kiderült azonban, hogy a statisztikus fizikai módszerek ennél jóval többre képesek, és új törvényszerűségek felfedezését is lehetővé teszik. Elegendő itt a Brown-mozgásnak az atomizmus diadalához döntően hozzájáruló Einstein-féle elméletére utalni, vagy arra, hogy a 20. századi kvantumfizikai forradalmat elindító Planck-féle sugárzási törvény is statisztikus fizikai eredmény. Az egyensúlyi termodinamika mint lényegében kész, múlt századi fenomenologikus elmélet várta a mikroszkopikus magyarázatot, de a *nemegyensúlyi termodinamika* már együtt fejlődött a statisztikus fizikával. Onsager híres reciprocitási összefüggései nem születettek volna meg a statisztikus fizikai gondolkodásmód nélkül.

Az utóbbi két évtizedben a statisztikus fizika tárgyköre és alkalmazásai dinamikus fejlődésen mentek keresztül. Az egyik alapvető felismerés, hogy a kevés szabadsági fokú *nemlineáris* dinamikai rendszerek viselkedésének megértéséhez a statisztikus fizika eszközeire is szükség van, tehát a statisztikus fizika tárgyköre nem korlátozódik az igen nagy számú elemet tartalmazó rendszerekre. Instabilitások leírásához gyakran a fázisátalakulások elmélete szolgáltat kiindulópontot. Nagyszámú kölcsönható egység együttes viselkedésének tanulmányozására vonatkozó technikák természetes módon alkalmazhatók kémiai rendszerekre vagy az anyagtudomány egyes kérdéseinél, tért hódítanak a biológiai kooperativitás törvényszerűségeinek modellezésénél; a legutóbbi időben mind sikeresebbé válik a statisztikus fizikai megközelítés alkalmazása a fizika számára egzotikusnak tűnő területeken is.

A statisztikus fizika tárgykörének meghatározása az ilyen definíciók eleve korlátolt érvényessége mellett az említett, egyre bővülő alkalmazási területek miatt is fokozottan nehéz. *A statisztikus fizika olyan rendszerek törvényszerűségeinek feltárásával foglalkozik, amelyekre az alkotóelemek nagy száma vagy a kölcsönhatások nemlineáris természete miatt sztochasztikus viselkedés jellemző. A valószínűségszámítással szoros és kölcsönösen megtermékenyítő kapcsolatban áll, de megközelítési módja fizikai. A fizika számos ágazatával gyümölcsöző kölcsönhatásban van, és a határok gyakran elmosódnak.*

Látványos fejlődés

A hetvenes évek elején szembeötlő – szinte fázisátalakulásszerű – fejlődés következett be a statisztikus fizikában, az aktivitás számottevően megnőtt. Természetesen korábban is születtek nagyszerű eredmények, hiszen a kvantumfizika kiépülését végigkíséri az „új fizika” makroszkopikus testekre vonatkozó következményeinek levonása, és erre az időszakra esik a nemegyensúlyi statisztikus fizika alapjainak lerakása is. Az általánosan elterjedt megközelítés az egyszerű kölcsönhatásmentes referenciarendszerek alkalmazása és a perturbációszámítás volt. Az erősen kölcsönható rendszerek esetében áttörés következett be a fázisátalakulások területén. Van der Waals, Landau, Onsager és még sok más kiváló tudós munkája után mintegy negyedszázaddal ezelőtt a Wilson-féle *renormálási csoport elmélete* nemcsak ezen speciális terület kérdéseire adott választ, hanem alapvető szemléletformáló hatással is volt. Már az elmélet keletkezésének pillanatában hangsúlyozták, hogy az eredeti problémán jóval túlmutató koncepciók és technikák születtek, és az elmúlt időszak fényesen igazolta az akkori várakozásokat.

Aligha vonható kétségbe, hogy a statisztikus fizika látványos fellendülésének egyik okát a renormálási csoport elméletének sikerében kell keresni. A másik ok a *számítógépek* széles körű elterjedése és elképesztő fejlődése.

A hagyományos módszertani megközelítések (kísérleti és elméleti fizika) mellett mára egyenrangú harmadikként lép fel a számítógépes fizika, amely a természet megismeréséhez alapvető eszköznek a számítógépet tekinti. A statisztikus fizika egyike azon területeknek, ahol a számítógépek hatása rendkívüli volt. Az itt fellépő problémák esetében gyakran a számítógépes lehetőségek határáig kell elmenni, hiszen igen nagy rendszerek hosszú ideig tartó vizsgálatára is szükség lehet, például ha divergáló karakterisztikus hossz lép fel, mint az előző bekezdésben említett fázisátalakulásoknál. Nemlineáris dinamikai rendszerek vizsgálata is elképzelhetetlen szimulációk nélkül. Az elmúlt két évtized fontos tanulsága, hogy az algoritmusok fizikai alapokon történő javítása legalább olyan fontos a hatékonyság növeléséhez, mint a hardver fejlődése. Ezen technikák és algoritmusok kialakításában fontos eredmények születtek, aminek következtében bizonyos esetekben akár százmilliós nagyságrendű részecskét tartalmazó rendszerek numerikus vizsgálata is lehetséges. Mára a sokrészecskerendszerek szimulációja, a molekuladinamika és a Monte Carlo-technika alkalmazása általános gyakorlattá vált. A statisztikus fizikában kifejlesztett módszereket széles körben alkalmazzák, például az anyagtudományban is.

Felvértezve a korszerű analitikus és számítógépes technikákkal, a statisztikus fizika számos nehéz probléma megoldását célozta meg sikerrel. A fázisátalakulások statikus és dinamikai elmélete után a *rendezetlen rendszerek* felé fordult az érdeklődés. Az olyan alapmodellek, mint a perkoláció vagy a kvantummechanika párja, az Anderson-lokalizáció megértésében is nagy szerepet játszott a fázisátalakulások elmélete. A spinüveg-modell a rendezetlenség új paradigmájává vált, amelynek tanulmányozása számos, a fizika hatókörén is túlmutató jelentőségű eredményt hozott. A polimerek, a gélek, a szemcsés anyagok, általában az ún. „lágymanyag” viselkedésének megértésében a statisztikus fizikának fontos szerep jut. A *fraktálok* elmélete a rendezetlen rendszerek geometriájának megértéséhez lényegesen hozzájárult, a növekedési jelenségek leírásában pedig központi szerepet játszik.

A fraktálok (és multifraktálok) fogalmán keresztül eljutunk a statisztikus fizikának a nyolcvanas években nagy hangsúlyt nyert újabb területéhez, a *nemlineáris dinamikai rendszerekhez*. Kiderült, hogy ezen rendszerek jellegzetes – *kaotikus* – viselkedését a statisztikus fizika segítségével lehet leírni, még akkor is, ha a szabadsági fokok száma csekély. A klasszikus *káosz* jelenségének mind részletesebb megértése mellett a *kvantumkáosz* törvényszerűségeinek feltárása vált érdekes feladattá.

Ellentétben az egyensúlyival, a *nemegyensúlyi statisztikus fizikában* még az alapelvek szintjén is sok a tisztázatlan kérdés. Ezen a területen az elmúlt időszakban sok fontos eredmény született. A részletes egyensúly, a stacionárius állapotok kitüntetett szerepének mélyebb megértése, a nemegyensúlyi fázisátalakulások természetének felderítése, a struktúrák kialakulásának

elmélete jelentősen előrehaladt. Olyan érdekes új koncepciók születtek, mint például az önszerveződően kritikus rendszer vagy a „kilincskerék-“ (ratchet) rendszerek fogalma.

A statisztikus fizika elmélete a kísérletekkel kölcsönhatásban fejlődik; az egzakt módszerek és a fenomenológiai elméletek mellett egyre nagyobb szerepet kapnak a számítógépes fizika eszközei. Ugyanakkor meg kell állapítani, hogy az utóbbi időben növekvő súlyt nyernek a statisztikus fizika által kezdeményezett *modellkísérletek*. Ilyenekre számos példát láttunk a növekedési jelenségek vizsgálatánál, a szemcsés anyagok tanulmányozásánál vagy a nemlineáris jelenségek területén.

A statisztikus fizika értékei közé tartozik a kapcsolatteremtés olykor látzólag távol eső területek, modellek között. Ennek alapja az univerzális viselkedés, ami a renomálási csoport elméletében mély értelmet nyert. Gyakran lehet közelítő vagy egzakt leképezések segítségével hidat verni egészen különböző modellek közé. Ilyenkor nagy előny, hogy az egyes részterületek egymás eredményeit átvehetik, és a szerteágazó összefüggések feltárása a megértést jelentősen segíti. Ez történt, amikor a polimerfizika és a spinrendszerek közös vonásait sikerült feltárni. A statisztikus fizika ezen sajátossága az alkalmazások szempontjából különösen gyümölcsöző.

Interdiszciplinaritás és alkalmazások: komplex rendszerek

A statisztikus fizika a fizika más ágaival szoros kölcsönhatásban fejlődött. Az elméleti *szilárdtestfizika* és a statisztikus fizika között éles határt húzni nem is lehet, például a törtszámú kvantum Hall-effektus 1998-ban Nobel-díjjal jutalmazott elméletét egyaránt vallhatja magáénak a szilárdtest- és a statisztikus fizika. Inkább alkalmazásnak tekinthető, amikor a korábban bevezetett statisztikus fizikai fogalmak, technikák és eredmények jól felhasználhatók a szilárdtestfizikában. A renormálási csoport transzformáció széles körű használata, a kvantumkáosz és a mezoszkopikus jelenségek kapcsolata, vagy a multifraktalitás megjelenése az elektronlokalizációban példa ilyen alkalmazásokra.

Kiemelten kell tárgyalni a *részecskefizika/térelmélet* és a statisztikus fizika kapcsolatát. Az ötvenes és hatvanas években a térelméleti módszerek átvétele jelentős lökést adott a statisztikus fizikának; a „kölcsönt” a spontán szimmetriasértés és a szupravezetés elméletének megtermékenyítő hatásával fizette vissza, és így fontos szerepet játszott például a Higgs-mechanizmus kidolgozásában. A renormálási csoport elmélete és annak felhasználása a rácsmértékelméletben az együttműködés szinergikus hatását példázzák. A kölcsönhatás érdekes fejezetét jelenti a konform invariancia gyümölcsöző kiaknázása. A véges hőmérsékletes térelméletben, illetve a részecskefizikai

fázisátalakulások dinamikájának legutóbbi időkben megkezdődött tanulmányozása esetében a párhuzamok kézenfekvők.

Az *atomfizika és az optika* sokat nyert a statisztikus fizikai megközelítések-ből. A kvantumkáosz elmélete az újabban kísérletileg is vizsgálható Bose–Einstein-kondenzáció tanulmányozásánál is hasznosnak bizonyult. A kvantumoptikai jelenségekben megmutatkozó csillapodási és koherencia-vesztési folyamatok elmélete a fluktuációknak a statisztikus fizikában kialakult dinamikai elméletére épül.

Különösen fontos a *matematikával* való kölcsönhatás. A matematikától nemcsak a valószínűségi számítást és a többi, fizikában általánosan használatos eszközt kapta a statisztikus fizika, hanem olyan újabb területekről is merített, mint a sejtautomaták vagy a játékelmélet. A statisztikus fizika számos matematikai kutatási irányt hozott létre – elegendő itt az ergodelméletre vagy a bolyongások elméletére utalni. A matematikai statisztikus fizika ma már fontos szakterület, amely egzakt módszerekkel teremti meg a statisztikus fizika matematikai szigorúságú alapjait. A statisztikus fizika azonban nemcsak problémafelvetéssel, hanem megoldásokkal is szolgál: például lehetséges az ún. nempolinomiális bonyolultságú optimalizációs feladatok közelítő tárgyalása a spinűvegek Monte Carlo-szimulációs tapasztalataira támaszkodva. A számítástudomány a mesterséges ideghálózatok elméletéhez kapott fontos hozzájárulást a statisztikus fizikától.

Az *asztrofizika* az Univerzum geometriai szerkezetének feltárásához statisztikus fizikai eszközöket használ. A fekete lyukak entrópiájának mikroszkopikus elmélete egészen friss fejlemény. A nemlineáris dinamikai rendszerek és a fraktálok fizikája számos érdekes felismeréssel gazdagította a *hidrodinamikát*, elsősorban a turbulencia és a keveredési jelenségek megértésének területén. Az *anyagtudomány* sokat köszönhet a már említett szimulációs módszereknek, de a felületi növekedés elméletének is, amely hozzájárult a kristálynövesztéskor kialakuló felületi formák osztályozásához és kialakulási körülmények szerepének tisztázásához. A törési mintázatok tanulmányozása a fraktálgeometria egy új, érdekes alkalmazási területét nyitotta meg. A *reaktorfizika* is szoros kapcsolatban van a statisztikus fizikával: a korrelált valószínűségi változók elmélete, a korrelációs függvények módszere, a Monte Carlo-technika megannyi érintkezési pont. A *kémia* folyamatosan kap impulzusokat a statisztikus fizikától, hiszen például az oszcilláló vagy a térbeli struktúrákhoz vezető reakciók, a reakció–diffúzió típusú jelenségek vizsgálatánál ez a megközelítés természetes.

A statisztikus fizika alkalmazása *biológiai problémákra* szintén nem új keletű, de az utóbbi időben rendkívül felgyorsult a fejlődés, és új távlatok nyíltak meg. Már korábban említettük a mesterséges ideghálózatok és a spinűvegek kapcsolatát. A statisztikus fizika fogalmai és módszerei a biológiai memória törvényszerűségeinek és a tanulás mechanizmusának a megértéséhez is

hozzájárultak, az agyműködés kísérleti vizsgálatánál az eredmények kiértékeléséhez pedig egyre általánosabban használnak statisztikus fizikai módszereket. A nemlineáris jelenségek, a káosz, a fraktálok és az önszerveződő kritikuság fogalmköre az élő szervezetekben található kváziperiodikus jelenségek (szív- és tüdőműködés) vizsgálatát segítik. A mintázatképződéssel kapcsolatos tapasztalatok jól kamatoztathatók a biológiai morfogenezis tanulmányozásánál. Az öröklés és az evolúció, az immunrendszer és az öregedés kérdésköréhez a kísérleti adatok, és a DNS-szekvenciák analízisével és modellezésével, valamint statisztikus fizikai alapokon álló sejtautomata-modellek alkalmazásával sikerült érdemben hozzászólni. Biológiai egyedek kollektív mozgási törvényeinek felderítése statisztikus fizikai alapokon sikeres, új irányzat. A statisztikus fizika számára a fehérjék felcsavarodásának jelensége az egyik nagy kihívást jelenti; a probléma megértéséhez a spinüvegektől a korlátozott, kölcsönható bolyongásokig már számos eszközt bevetettek. Érdekes pozitív fejlemény, hogy a biológusokra korábban jellemző tartózkodás újabban kezd feloldódni.

Az öregedés genetikai problémájának sejtautomata-megközelítése, vagy a biológiai rendszerek kollektív viselkedésének statisztikus fizikai modellezése a fizika szempontjából „egzotikus” alkalmazásoknak tekinthetők, hiszen a vizsgált rendszerek alkotóelemei közötti kölcsönhatásokat nem a fizika törvényszerűségei szolgáltatják, hanem azokat mint a szakterületre jellemző „szabályokat” adottnak tekintjük, vagy éppen – a fizikusokra jellemző leegyszerűsítési hajlamot követve – magunk próbálunk szabályokat leszűrni. Még különösebbnek tűnhet, amikor a statisztikus fizika eszközeit olyan kérdések tárgyalásához vetjük be, amelyeknél az *emberi kölcsönhatás* a meghatározó. Ilyenek a jármű- és gyalogosközlekedés problémái, ahol a valóságot meglepően jól tükröző és gyakorlatilag hasznosítható eredmények születtek viszonylag egyszerű statisztikus fizikai modellek segítségével. De a kezdeti eredmények igen biztatóak az emberi társadalom olyan különböző aspektusainak a modellezésében is, mint a közvélemény kialakulása, döntéshozatal, a politikai erők versenye, vagy a társadalmi átalakulásokat kikényszerítő technikai változások terjedése. A gazdasági és pénzügyi folyamatok statisztikus fizikai szempontú elemzése és modellezése az utóbbi néhány év dinamikus fejlődő irányzata és már jelentős sikereket ért el, például a portfólió optimalizálásának területén.

A rendkívül szerteágazó alkalmazások, a tematikai sokszínűség ellenére jól érzékelhető a fenti problémák statisztikus fizikai tárgyalásánál a megközelítésbeli azonosság. Ezt hangsúlyozza a „komplex rendszerek” megjelölés, amely a statisztikus fizikának azon törekvését ragadja meg, hogy alkotóelemek bonyolult szerveződésére találjon magyarázatot. Ez az elnevezés egyre inkább elterjed, és ma már folyóiratok, konferenciák, intézmények profilját határozza meg a komplex rendszer fogalma.

A statisztikus fizika helyzete, távlatai és oktatása

A statisztikus fizika a fizika azon ágai közé tartozik, amelyek az elmúlt években rendkívül erőteljesen fejlődtek, és minden jel arra utal, hogy ez a folyamat töretlenül folytatódik. Az előzőekben utalásszerűen említett eredményekhez természetesen a fejlődés mennyiségi-formai jegyei is járulnak. Ezek közé tartozik az önálló folyóiratok, illetve a közölt cikkek számának dinamikus fejlődése: Az amerikai *Journal of Statistical Physics* mellett ma már a *Physical Review* külön kötete foglalkozik statisztikus fizikával, ugyanez áll az Európában újonnan indult *European Physical Journalra*, miközben a *Journal of Physics A*, a *Physica A* túlnyomó részt statisztikus fizikát tartalmaz, de a „Letter” folyóiratok is nagy arányban közölnek ilyen tárgyú cikkeket. A távol-keleti vezető szakfolyóiratok (*Journal of the Physical Society of Japan*, *Progress in the Theoretical Physics*, *Journal of Modern Physics*) is egyre növekvő mértékben publikálnak a statisztikus fizika témakörében. Az olyan folyóiratok megjelenése, mint *Complex Systems*, *Chaos*, *Fractals*, *Journal of Nonlinearity* szintén az aktivitás erőteljes bővülését jelzi. Erre utal az is, hogy 1995-ben megalakult az Amerikai Fizikai Társaság (APS), 1998-ban az Európai Fizikai Társaság (EPS) Statisztikus és Nemlineáris Fizikai Divíziója. A háromévente megrendezett *Statistical Physics* konferenciák a szakterület egyre bővülő, ma már mintegy 2000 résztvevős rendezvényei.

Noha a tudomány fejlődésében mindig felbukkanó (és döntő fontosságú) váratlan fordulatok miatt rendkívül nehéz *prognosztizálni*, néhány irányvonal felrajzolását megkísérelhetjük. Melyek tehát azok a kérdések, amelyekre a statisztikus fizika a közeljövőben várhatóan koncentrálni fog? Nyilvánvaló, hogy jelentős szerepet fog játszani a nemegyensúlyi jelenségek fizikájának mélyebb megértése. Ezen a területen komoly áttörésre, új koncepciókra is szükség van. Tovább fog növekedni a számítógépek szerepe; új, hatékony algoritmusok, modellek fognak megjelenni. A párhuzamos számítási technikák adta lehetőségek kiaknázásának még csak az elején tartunk. A nemlinearitás, a rendezetlenség problematikája még számos megválaszolatlan kérdést tartogat, amelyek jóval túlmutatnak a szűkebb szakterületi jelentőségen. A Bose–Einstein-kondenzáció tanulmányozása közelebb visz az atomlézer megvalósításához. Ez az eszköz a gyakorlati alkalmazásokon túl hozzájárulhat a kvantummechanika és a klasszikus fizika közötti kapcsolat máig tisztázatlan kérdéseinek megválaszolásához. A lágy anyagok törvényszerűségeinek feltárása még sokáig ellátja feladatokkal a statisztikus fizikusokat. Az erők koncentrációját figyelembe véve várható, hogy a fehérjék „felcsavarodásának” kérdését sikerül az elkövetkező tíz éven belül tisztázni. Ezzel tulajdonképpen máris az alkalmazásoknál vagyunk, hiszen ez már biofizikai/kémiai probléma.

Minden jel arra mutat, hogy a *statisztikus fizika alkalmazásának* szinte robbanásszerű terjedése a jövőben folytatódik. A turbulencia megértése szin-

tén nagy gyakorlati jelentőségű kihívás, és itt jelentős előrelépésre lehet számítani. Az anyagtudományi alkalmazások, a számítógépes szimulációs módszerek további széles körű terjedése várható; ezek a módszerek az anyagok, technológiai folyamatok tervezésénél is szerepet fognak kapni. A biológiában a statisztikus fizika felgyorsítja majd a haladást az egzaktabb, kvantitatívabb megközelítések felé vezető úton, és újszerű kérdésfelvetésével, szemléletmódjával további meglepő eredményeket szolgáltat. Hasonló hatásra lehet számítani olyan alkalmazásoknál, mint a gazdaságfizika, illetve más humán kölcsönhatásokon alapuló rendszerek vizsgálata. A statisztikus fizika gyakran úgy lép be egy új területre, hogy a rendelkezésre álló adatokat sajátos szemszögéből elemzi, és ezzel új összefüggések lehetőségére mutat rá. A jövőben az alkalmazásoknál is várható, hogy a folyamatok modellezése nagyobb hangsúlyt kap, miközben természetesen megmarad az adatok fizikára jellemző tisztelete.

Az alkalmazások körének az említett és a jövőbeli nagymértékű szélesedése az *egyetemi oktatás* szempontjából is figyelembe veendő fejlemény. A statisztikus fizika alapjai ma már hagyományosnak tekinthető módon beépülnek a fizikai tanmenetekbe. Az utóbbi időszak eredményei felvetik annak szükségességét, hogy megfontoljuk: miként lehet egyrészt a kötelező kurzusokat korszerűsíteni és a nemegyensúlyi problémák, a modellezés, a szimulációk és az alkalmazások területe felé elmozdulni, másrészt hogyan lehetne a statisztikus fizika gondolatvilágát közvetlenül az alkalmazások szakterületeivel (pl. biológia, közgazdaságtan) jobban megismertetni. Az első figyelemre méltó lépések ebbe az irányba már megtörténtek. Az alkalmazások a friss diplomások, illetve doktorok álláslehetőségei szempontjából kiemelkedő jelentőségűek: például meglepően nagy számban helyezkedtek el az elmúlt öt évben statisztikus fizikai szakemberek a pénzügyi-banki szférában, ahol modellezési és szimulációs tapasztalataikat, sajátos fizikusi szemléletüket hasznosítják.

A statisztikus fizika Magyarországon

Magyarországon nemzetközi mércével mérve is kiemelkedő statisztikus fizikai iskola működik, amit számon tartanak az egész világon. A centrumok az Eötvös Loránd Tudományegyetemen és az MTA KFKI Szilárdtestkutató Intézetében alakultak ki, de az ilyen irányú aktivitás fontos szerepet játszott néhány más kutatóhelyen is. Jelenleg számottevő kutatások folynak az ELTE-n, az SZFKI-ban, a BME-n, az MFA-ban, MTA KKK-ban, a Matematikai Kutatóintézetben és figyelemre méltó, öröndetes fejlemény, hogy az utóbbi időben Debrecenben és Szegeden is egyre jelentősebb szerepet kapnak a statisztikus fizikai kutatások.

A hazai statisztikus fizika eredményei mennyiségi és minőségi szempontból az ország méretéhez viszonyítva *kiugróan jók*. Ebben a nagy egyéniségek

meghatározó hatása mellett fontos szerepet játszottak a kiterjedt nemzetközi kapcsolatok, együttműködések. Az iskolák kultúrateremtő erejének jellegzetes példaként létrejött statisztikus fizikus közösség fontos szellemi értéket képvisel. A magyar statisztikus fizikusok az előzőekben vázlatosan felsorolt eredményekhez szinte valamennyi területen lényegesen hozzájárultak. Kezdvé a fázisátalakulások dinamikáján és a kölcsönható elektronrendszerek elméletén, a rendezetlen rendszereken, a klasszikus- és kvantumkáoszon, a növekedési jelenségeken, a nemegyensúlyi folyamatok vizsgálatán keresztül a kémiai, biológiai, anyagtudományi és egyéb alkalmazásokig hosszan sorolhatók a magyar kutatók eredményei. Számos esetben, mint például a kritikus dinamika és a felületnövekedés, a magyar statisztikus fizikusok a kezdeményezők közé tartoztak.

A nemzetközi irányzatokkal összhangban a statisztikus fizika hagyományos területei mellett – amelyeken változatlanul jelentős eredmények születnek – Magyarországon is egyre jellemzőbb a módszerek alkalmazása olyan sok szabadsági fokú, kölcsönható rendszerekre, amelyek olykor távol esnek a hagyományos fizikától, mint például a kémiai reakciók, a biológia kooperativitás, vagy akár humán területek, így a közlekedés, a pénzügy és a gazdaság.

A *nemzetközi elismerések* jelzik a magyar statisztikus fizika rangját. Kutatóink megtalálhatók vezető folyóiratok szerkesztőbizottságaiban, fontos konferenciák szervezői között, szakterületek összefoglaló cikkeinek, meghívott előadások sorának szerzői, előadói. Az évenként megrendezett nemzetközi MECO-konferenciasorozatot magyar statisztikus fizikusok kezdeményezték.

A hazai statisztikus fizikai életet az MTA Statisztikus Fizikai Bizottsága és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Statisztikus Fizikai Szakcsoportja szervezi. A legfontosabb esemény az évente közös rendezésben megtartott „Statisztikus Fizika Nap”, amelyen gyakorlatilag valamennyi csoport röviden bemutatja újabb eredményeit.

A statisztikus fizika oktatása Magyarországon követi a nemzetközi gyakorlatot, és természetesen kapcsolódik a hazai iskolákhoz. Korábban rendszeres nyári, illetve őszi iskolák ismertették meg a hallgatókkal és a kutatókkal az újabb fejleményeket; újabban az Eötvös Graduate School sikeres nemzetközi rendezvényei vették át ezt a szerepet. Az előzőekben bemutatott oktatási problémák természetesen nálunk is fellépnek, súlyosbítva a magyar felsőoktatás általános gondjaival. A hazai felsőfokú fizikaoktatás helyzetének és az elhelyezkedési lehetőségeknek az ismeretében arra kell következtetnünk, hogy a jövőben az alkalmazásoknak az eddigieknél jóval nagyobb teret kellene kapniuk az egyetemi tananyagban – itt fontos szerep juthat a statisztikus fizikának is.

*

A szerző köszönetet mond Geszti Tamásnak, Rácz Zoltánnak, Szabó Györgynek, Szépfalusy Péternek az anyag összeállításában nyújtott segítségükért, valamint Pócsik Györgynek kritikai megjegyzéseiért.

BALÁZS LAJOS

Csillagászat és űrfizika

A szakterület meghatározása

A csillagászat a legősibb természettudomány, egyidős az emberi civilizációval. Vizsgálati köre hagyományosan az égboltot benépesítő égitestek elhelyezkedésének és mozgásának a tanulmányozása, megkülönböztetve az „égi” és „földi” világot. Mai megfogalmazásban ez a meghatározás úgy módosul, hogy a csillagászat alapvető érdeklődési köre a földi világot körülfogó természetben, a kozmoszban lejátszódó jelenségek vizsgálata. Ebből következően nem adható olyan szakmaspecifikus definíció, mint más fizikai diszciplínáik esetében, mivel a jelenségek vizsgálatához a fizikai diszciplínák teljes vertikumát igénybe kell venni.

A fizika több diszciplínája csillagászati megfigyeléseken alapulva fejlődött ki (például mechanika). Ennek ellenére a csillagászat nem szorítkozik kizárólag a jelenségek mögött meghúzódó általános érvényű törvényszerűségek feltárására, hanem ezeket felhasználva magyarázatot kíván adni a konkrét jelenségekre is, például a csillagászatot nemcsak az érdekli, hogy az égitestek általában hogyan alakulnak ki, hanem az is, hogy egy konkrét égitest, mondjuk a Nap vagy a Föld vagy a Tejútrendszer milyen folyamatoknak köszönheti létét, milyen múltat hagyott maga mögött, és mi lesz a sorsa. Szorosan kötődik a fizikához, de nem a fizika részterülete.

A csillagászat alapvetően *megfigyelő tudomány*. Ez azt jelenti, hogy a tanulmányozott jelenséget nem laboratóriumban, kísérletek sorozatával hozza létre. Ebben a helyzetben egy, a megfigyelő és a kozmosz viszonyára jellemző sajátos ontológiai tény is tükröződik.

A kozmoszból érkező információ túlnyomórészt elektromágneses sugárzás formájában éri el a földi megfigyelőt. Az elektromágneses hullámokat megadó fizikai mennyiségek – irány, hullámhossz, amplitúdó, polarizációs állapot – meghatározzák az alapvető észlelhető mennyiségeket. A csillagászati megfigyelések jellegzetessége, hogy az adott időponthoz kötődnek, még egyszer ugyanolyan körülmények között a megfigyeléseket megismételni nem lehet.

A kozmikus sugárzás formájában különféle elemi részecskék is elérik a Földet. A Napból, illetve az 1987-ben a Nagy Magellan felhőben felrobbant

szupernóvából érkező neutrínók észlelésével ez az elemi részecske is felsorakozott az észlelt információhordozók közé. Főleg a Naprendszer vonatkozásában további információhordozók is rendelkezésre állnak. Ilyen például a meteoritikus anyag, illetve a napszél. Paradigmaváltás következett be az űrbe való kilépéskor, amikor a fenti jelenségek vizsgálata mellett lehetővé vált a földfelszín elérni nem tudó információhordozók légkörön és magnetoszférán kívüli tanulmányozása, és a Naprendszerben végbemenő jelenségek „in situ” vizsgálata. Ekkor született meg és indult fejlődésnek az *űrfizika*.

Az űrfizika vagy kozmikus fizika az űr kutatás egyik alapvető területe. Vizsgálata tárgyát a Földön kívüli térségben található égitestek, a közeg és fizikai erőterek, a bolygóközi anyag képezik, eszközeit pedig az űrtechnika szolgáltatja (mesterséges holdak, űrszondák, geofizikai kutatórakéták stb.). A téma szorosan kapcsolódik ugyan a csillagászati, a geofizikai és az aeronómiai kutatásokhoz, de önálló diszciplínát alkot, amelynek független nemzetközi szervezete (COSPAR), konferenciái, folyóiratai és finanszírozási forrásai vannak.

Mindkét diszciplínához szorosan kapcsolódik az észlelőtechnika. Az űrben használt mérőeszközökkel szemben rendkívüli, sokszor egymásnak ellentmondó követelményeket támasztanak, például a szélsőséges környezeti hatások elviselése, a nagy megbízhatóság és mérési pontosság. Gyakran a műszerek olyan környezetben végeznek méréseket, ahol még nem járt szonda, ezért nagy szerep hárul az előzetes modellezésre. (Tipikus példa erre a VEGA-szondákon elhelyezett KFKI RMKI által készített kamerát vezérlő rendszer, amely autonóm módon találta meg és követte az üstökös magját).

Kapcsolat más tudományterületekkel

A kozmoszban az anyag olyan extrém állapotai is előfordulnak, amelyeket laboratóriumban nem lehet előállítani (igen nagy, illetve igen kis anyagsűrűség, nagy tömeg, magas hőmérséklet stb.). Ezeknek a különleges állapotoknak a megfigyelésén keresztül a csillagászat a fizika számos területéhez kapcsolódik. A korszerű megfigyelési eszközök a csúcstechnika minden vívmányát alkalmazzák. Az észlelőtechnika által megfogalmazott követelmények húzóerőt jelentenek a csúcstechnika fejlődésére anélkül, hogy alá lennének vetve a piaci verseny szorításának és kockázatának.

A csillagászatnak a többi tudományterülettel való kapcsolatát történeti fejlődése is jól tükrözi. A Napot a bolygórendszer középpontjába helyezve lehetővé vált az általános tömegvonzás törvényének a felfedezése, illetve a newtoni mechanika megalkotása. A mechanika megalkotása nyitotta meg az utat az újkori technikai forradalom számára. Megemlítjük, hogy ez a klasszikus diszciplína a kaoszjelenségek felfedezésével ismét a kutatások homlokterébe került.

A pozíciós csillagászat hagyományosan a matematikához, illetve a földrajzi helymeghatározáshoz, a térképészethez, valamint az idő méréséhez kötődött. A színeképelemzés felfedezése a múlt század második felében gyökeresen változtatott ezen a helyzeten. Az égitestekről érkező elektromágneses sugárzás színeképi információjának a megfejtése lehetővé tette a sugárzást kibocsátó közegek fizikai állapotának a vizsgálatát. A színeképelemzésnek a csillagászatba történő behatolásával született meg az asztrofizika.

A színeképelemzés és a fotometria megjelenése a csillagászatban lehetővé tette a hagyományosan a háromszögelésre alapozott távolságmérések kiterjesztését, és ezen keresztül a világegyetem méretével kapcsolatos problémáknak a megfigyelési oldalról történő megközelítését. Hubble munkássága nyomán az 1920-as évek közepén, nagyjából a kvantummechanika megszületésével egy időben bebizonyosodott, hogy a csillagok hatalmas szigetekbe, galaxisokba szerveződnek, és ezek a szigetek távolságukkal arányos sebességgel távolodnak egymástól. Ezt az effektust értelmezni lehet az általános relativitáselmélet keretei között. Így a Merkúr perihéliumvándorlása, a fénynek a Nap melletti elhajlása mellett a Hubble-effektus volt a harmadik csillagászati megfigyelés, amely az általános relativitáselmélet alapján értelmezhető. A Hubble-effektus nyomán megfogalmazódott táguló világegyetem elméletéből természetes módon következik, hogy létezhetett egy kezdeti igen sűrű, forró állapot, amelyből a világ jelenleg megfigyelhető arculata tágulással jött létre. A forró Univerzum elmélete természetes kapcsolatot talál a részecskefizikával.

A nagy robbanás elmélete felveti a kémiai elemek keletkezésének a problémáját. A nagy robbanásban csak alacsony rendszámú atomok keletkezhetnek. A nehezebb elemek egyik lehetséges forrása a csillagok belsejében lejátszódó folyamatokban kereshető. A hidrogénnek héliummá történő átalakulása a csillagok fő energiaforrása; a nehéz elemek nagy tömegű csillagok halálával, a szupernóvák robbanásakor keletkeznek. Szabályozott termonukleáris fúziót jelenleg csak a csillagok belsejében ismerünk.

A hagyományos felfogás szerint a csillagok közötti tér – a világűr – üres, nem található benne anyag. A 20. század első három évtizedében derült ki, hogy a csillagközi teret igen ritka gáz, por, illetve plazma keveréke tölti ki. A csillagközi anyag vizsgálatában forradalmi változást jelentett a II. világháború után a rádiócsillagászat megjelenése.

A hidrogénatom elektronjának alapállapota a magspinnel való kölcsönhatás miatt két igen közeli nívóra hasad fel, közöttük tiltott átmenet van, amely azonban a csillagközi térben uralkodó viszonyok között mégis létrejöhet. Az elméletileg megjósolt 21 cm-es sugárzás valóban létezik. Az 1960-as évek közepétől kezdődően rádiócsillagászati módszerekkel egyre több szerves molekulát fedeztek fel a csillagközi anyag sűrű csomóiban. A molekulák a felhőkben található porszemcsék felületén szintetizálódnak. A porszemcsék kiala-

kulása és szerkezete révén a csillagászatnak ez az ága a szilárdtestfizikához, míg a bonyolult szerves molekulák révén a kémiához kapcsolódik.

A szerves molekulák jelenléte a csillagközi felhőkben összefüggésbe hozható az anyag prebiológiai fejlődésével, és általában annak a kérdésnek a vizsgálatával, hogy a kozmoszban hol és mikor alakulnak ki az élet létrejöttének feltételei.

A csillagközi felhők nemcsak a szerves molekulák felépülésében játszanak alapvető szerepet, hanem a csillagok és bolygórendszereik kialakulásában is. A Naprendszer szilárd kérgű bolygóinak, illetve a holdközötteknek a vizsgálata a csillagászatot a geofizikához, valamint a geológiához köti. A csillagközi anyagban, illetve a Naprendszeren belüli interplanetáris anyagban lejátszódó folyamatok megértésében fontos eszköz a plazmafizika.

A Napon lejátszódó folyamatok alapvetően befolyásolják a Föld kozmikus környezetét és földi időjárásunkat is. Az Amerikai Egyesült Államok légereje az egész Földre kiterjedő obszervatórium-hálózatot működtet, hogy a rádió-, földmágneses és magaslégköri zavarokat okozó *fléreket* idejében észleljék, és fel tudjanak készülni a várható kedvezőtlen hatásokra. A napfizikán keresztül a csillagászat a meteorológiához is kapcsolódik. A Nap hosszú időskálán való viselkedése alapvető fontosságú a Föld geológiai korszakainak a megértésében.

A Nap belső szerkezetének a feltárása és energiatermelésének a korszerű fizika segítségével történő értelmezése fontos szerepet kapott a neutrínók sajátságainak a meghatározásában.

A kozmikus sugárzás eredetének a kutatásában fontos szerepet játszik a szupernóváknak, galaxisunk magjának, a csillagközi anyagnak, valamint a galaktikus mágneses térnek a vizsgálata.

A rádiócsillagászati módszereket kiterjedten alkalmazzák a földtudományokban, ezen belül a referenciarendszerek, a kontinensvándorlás, a földforgás paramétereinek a meghatározásában.

A csillagászat tehát diszciplinárisan a fizika csaknem minden ágával, és ezen túlmenően a kémiával, illetve a geofizikával, geológiával és meteorológiával szoros kapcsolatban van. Eredményei kapcsolódnak a mérés-technika, a finommechanika és az optika fejlődéséhez. Az elektronika forradalmasította az adatgyűjtést, és a kapott információ feldolgozását. Napjainkra a számítástechnika a többi tudományhoz hasonlóan, a korszerű csillagászzal is elválaszthatatlanul összeforrott.

Az űrkutatás megjelenésével lehetővé vált, hogy a kutatásokat az elektromágneses spektrumnak arra a részére is kiterjesszék, amelyet a földi légkör elzár előlünk. A gamma-röntgen-, ultraibolya-, infravörös-tartományban dolgozó csillagászati mesterséges holdak forradalmasították a kozmoszról alkotott elképzeléseinket.

Van egy olyan fontos aspektusa a csillagászatnak, amely sok tekintetben megkülönbözteti más tudományágaktól, ez pedig az ember és a kozmosz létével kapcsolatos, illetve a kettő viszonyával összefüggő ismeretelméleti kérdések felvetése. Ezekben a kérdésekben keresztül a csillagászat döntő hatást gyakorolt az emberi gondolkodásra, világszemléletre. A lét legáltalánosabb kérdéseivel való ilyen szembesülés közvetlen élménye magyarázza azt az általános érdeklődést, ami a laikusok körében a csillagászat iránt mindenkor megnyilvánult. A természettudományos műveltség terjesztésében ennek a diszciplínának kitüntetett szerepe van.

Főbb nemzetközi kutatási irányok

Jelenleg a kutatások a Naprendszer kis égitestjeitől a csillagokon, csillagrendszereken, galaxisokon, valamint galaxishalmazokon át az egész Univerzum vizsgálatáig minden méretskálán folynak.

A kozmológia a világegyetem legnagyobb léptékű szerkezetét, illetve a jelenleg megfigyelhető struktúrák eredetét vizsgálja. Alapvető elméleti eszköztára az általános relativitáselméleten, illetve az Univerzum korai állapotainak vizsgálatában a részecskefizikán alapul. A kozmológia megfigyelési programjai a világ legnagyobb távcsöveit igénylik. Jelenleg a csillagászatban napvilágot látott tudományos cikkek igen tekintélyes hányada kozmológiával foglalkozik. A kozmológiai távolságok mérésében alapvető szerepet játszik a világegyetem tágulásából adódó vöröseltolódás mérése, amelyben kulcsfontosságú a Hubble-állandó értéke. A jelenlegi kutatások egyik legfontosabb célja, hogy az állandó értékében meglévő kettesfaktor-értékű bizonytalanságot 10% körüli szorítsák le. A megfigyelési kozmológia másik fontos törekvése, hogy minél több galaxisról álljon rendelkezésre megbízható pontosságú vöröseltolódás. A jelenleg folyó Sloan Digital Sky Survey a rendelkezésre álló vöröseltolódás-mérések számát több nagyságrenddel növelni fogja.

A kozmológia igen fontos problémája az Univerzumban található anyag sűrűségének a meghatározása. Adott értékű Hubble-állandó mellett az átlagos anyagsűrűség dönt emellett, hogy a tér milyen geometriát követ: zárt, euklideszi vagy hiperbolikus, azaz nyitott. A globális geometria által megkövetelt anyagsűrűség nem egyezik meg az elektromágneses sugárzást kibocsátó, azaz megfigyelhető anyag mennyiségével. A kutatások igen fontos iránya annak eldöntése, hogy ez a láthatatlan, egyelőre csak gravitációs hatásaiban kimutatható anyag milyen fizikailag létező formával azonosítható.

A kozmológiai kutatások homlokterében van annak a problémának a megoldása, hogy a jelenlegi világ struktúrákban igen gazdag, ezzel szemben a világegyetem korai állapota – ahogyan azt a kozmikus háttérsugárzás meglepő

simasága mutatja – nem tartalmazott térbeli struktúrákat. Hogyan történt ez a strukturálódás, és mikor?

Mindezekhez a kérdésekhez vehetjük azt a problémát, amit a „finomhangoltság” problémájaként szoktak említeni. A finomhangoltság azt jelenti, hogy a kozmosz jelenleg megfigyelhető nagyléptékű izotrópiája csak úgy állhat fenn, ha a kezdeti állapot igen nagy mértékben homogén és izotróp volt. Egy ilyen állapot a kezdőfeltételeknek csak egy igen kis mértékű halmazán valósulhat meg, tehát igen valószínűtlen. A probléma egyik lehetséges megoldása a „fel-fúvódó” Univerzum elmélete.

A galaxisok az ún. „kozmológiai szubsztrátum” atomjai. A galaxisok kialakulásának kérdése szorosan kötődik a kozmológiához. A világegyetem expanziójának egy meghatározott szakaszában a feltételek igen kedvezővé váltak az anyag felhőkre szakadozásához. Az alapvető kérdés, hogy mekkorák voltak ezek az anyagcsomók, és a jelenleg megfigyelhető struktúrák ezekből hogyan jöttek létre. Fontos eredmény volt ezen a téren a Hubble-űrtávcső által elvégzett „deep field” (mélyég) -vizsgálat, amelynek során a közeli csillagok nem zavarták a távolabbi tartomány észleléseit, s így a távcső 10 napon keresztül összesen 342 felvételt készített, majd a felvételek egyesítésével a halvány galaxisokról az eddig ismert legteljesebb mintát szolgáltatotta.

A nagy robbanás során csak az alacsony rendszámú elemek alakulnak ki, a nehezebb elemek már a galaxisok életében épülnek fel. A vasnál nehezebb elemek explozív nukleonszintézissel keletkeznek, amelyhez a megfelelő feltételeket bizonyos típusú szupernóva-robbanások szolgáltatják, így egy galaxis nehézelem-tartalma alapvetően a benne lejátszódó szupernóva-robbanások számának a függvénye.

A szupernóva-robbanások egyik lehetséges „végtermékét” alkotják a neutroncsillagok. A korszerű asztrofizika egyik látványos sikere volt a pulzároknak a neutroncsillagokkal való azonosítása. A korszerű asztrofizika egyik megoldatlan rejtélye, a kozmoszból érkező gammafelvillanások eredete is kapcsolatba hozható „összeolvadó” neutroncsillagokkal. A gravitációs sugárzás létének bizonyítéka kettős pulzár keringési periódusának a megfigyelésén alapszik.

A galaxisok rotációs görbéjének a vizsgálatából úgy tűnik, hogy a látható sugárzást kibocsátó anyag a teljes tömegnek mintegy tizedét teszi ki. A hiányzó tömeg sötét anyagból felépülő égitestek formájában való jelenlétét kutatják a gravitációs mikrolencsehatás megfigyelésére indított projektek (MACHO, OGLE).

Sok jel utal arra, hogy a galaxisok centrális vidéke nem egyszerűen a csillagok által sűrűbben lakott vidék, az ott megfigyelhető aktivitás nagy valószínűséggel 10^6 naptömegű fekete lyukak jelenlétére utal. Valószínűleg fekete lyukak jelenlétére vezethető vissza a kvazároknak megfigyelhető aktivitás is.

Úgy tűnik, megalapozott az az állítás, hogy a csillagok a csillagközi anyag sűrűsödése nyomán jönnek létre. A kondenzáció során a csillagközi anyag sűrűsége 24 nagyságrendet, 10^{-24} g/cm³-ről 1 g/cm³-re növekszik. A csillagok kialakulása az optikailag sűrű interstelláris felhőkben megy végbe, ezért kiemelkedő jelentősége van a jelenleg is működő, illetőleg a közeljövőben indítandó, az infravörös hullámhossztartományban dolgozó földi, illetve az űrbe telepített távcsöveknek.

A csillagok kialakulása összefonódik a bolygók és bolygórendszerek kialakulásával. A csillagok körül keringő bolygók kimutatása a jelenlegi észlelőtechnika egyik legnagyobb kihívása.

A gömbhalmazok, amelyek Tejútrendszerünk legöregebb objektumainak számítanak, jelentős számú változó csillagot tartalmaznak. A gömbhalmazok kora fontos próbaköve a világegyetem korát taglaló kozmológiai elméleteknek. A kozmológiai kor nem lehet rövidebb a csillagfejlődési elméletekből kapott kornál. A változó csillagoknak a csillagfejlődés menetében történő elhelyezése a jelenleg folyó asztrofizikai kutatások egyik kulcskérdése. A változó csillagok kutatásában kiemelkedő szerep jut a cefeida típusú változóknak, mivel a kozmológiai távolságskála egyik alappilléret alkotják.

A csillagok vizsgálatában kitüntetett szerepe van a Nap kutatásának. Jelenleg az elektromágneses sugárzás teljes tartományában folynak ezek a vizsgálatok. A korpuszkuláris sugárzásnak és a napszélnek a fizikai sajátosságai az egyik legfontosabb vizsgálati területet jelentik. A napszél alapvető hatást fejt ki a földi légkörre, és ezen keresztül a meteorológiai jelenségekre is. A Naprendszerbe küldött űrszondák fontos mérési adatokat szolgáltatottak a bolygóközi anyagról, az ott uralkodó fizikai viszonyokról. A Nap az egyedüli csillag, ahol ilyen vizsgálatokra lehetőség van. Működésének megértéséhez szükség van a többi csillagon lejátszódó, hozzá hasonló aktív jelenségek tanulmányozására.

A Nappal kapcsolatos tudományos kutatásoknál külön kell szólni a neutrínósugárzás problémájáról. A Napból érkező, a vártnál kisebb intenzitású neutrínósugárzás arra utal, hogy vagy a Nap energiatermelése változik időben, vagy a neutrínók fizikai tulajdonságai térnek el a feltételezettől.

Az ebben a rövid áttekintésben ismertetett eredményeket a csúcstechnika, informatika és az űrkutatás együttesen tették lehetővé. Jelentős földi, illetve űrbázisú eszközök létrehozása várható a közeljövőben is. Az elektromágneses sugárzás detektálása mellett jelentős erőfeszítések történnek a neutrínóknak mint információhordozónak a kutatásokba történő mind szélesebb bekapcsolására, az érzékenység és a szögfelbontás javítására. A számítástechnikai fejlesztések lehetővé teszik a keletkezett hatalmas mennyiségű információ feldolgozását. A tervezett projektek a csillagászat teljes skáláját felölelik. A projektek közül talán a legambiciózusabb a NASA Origins programja, amelyben a kozmikus struktúrák kialakulását kutatják majd a bolygóméretű égitestektől a kozmológiai skáláig.

Az űrfizikában hasonló irányzatok mutatkoznak, mint az űrkutatás egyéb területein. A NASA itt is erőteljesen érvényesíti azt az elvárását, hogy kisebb, olcsóbb és gyorsabban megvalósítható űreszközök végezzék el a feladatokat. Ez a tendencia annyiban kedvez a kisebb országoknak, köztük hazánknak is, hogy egy ilyen programban való részvétel pénzügyi szempontból realisabb lehetőség.

A Naprendszer égitestjeit kutató űrszondákat már nemcsak Amerika és Oroszország indítja, hanem Európa és Japán is. Az elmúlt években új lendületet kapott és menetrendszerűen folyik a Mars kutatása űrszondákkal, és újra megkezdődött a holdrakéták indítása is. Rendszeresen állítanak pályára csillagászati, illetve a Föld környezetét vizsgáló műholdakat.

Az ESA-n (European Space Agency) belül az űrtudományi programok kiemelt támogatást élveznek, a tagországok a belépéssel együtt kötelezettséget vállalnak arra, hogy GDP-jükkel arányos mértékben részt vesznek e programok finanszírozásában. 1999-ben az ESA költségvetése 2,65 milliárd euró, ebből 355,2 millió euró az űrtudományi programok részesedése (ami 2,2%-nyi növekedést jelent 1998-hoz képest). Magyarország jelenleg már az ESA-PRODEX tagországa, és lépéseket tesz a teljes tagság elérése érdekében.

Hazai helyzet

Magyarországon a nagyszombati egyetem Pázmány Péter által történt 1635-ös alapítása óta folyamatosan van professzionális szintű csillagászat, amely új lendületet kapott 1871-ben Konkoly Thege Miklós ógyallai obszervatóriumának a létrejöttével. Az intézet fő profilja már teljes egészében a forradalmian új ág, az asztrofizika volt. Nem sokkal később az újonnan született magyar asztrofizika két jelentős létesítménnyel gazdagodott: 1877-ben a kalocsai és 1881-ben a Gothard-féle herényi csillagvizsgálóval. A Konkoly-féle, illetve a Gothard-féle intézet fő profilja a spektroszkópia, míg a kalocsai érseki csillagvizsgálóé a napfizika volt.

Konkoly intézetét 1899-ben a magyar államnak adományozta, ezzel létrehozta a jelenlegi MTA Csillagászati Kutatóintézetének a jogelődjét. A Svábhegyen 1921–1928 között épült fel a jelenlegi intézet. A kalocsai érseki csillagvizsgáló 1951-ben megszűnt. A Gothard Obszervatórium jelenleg az ELTE TTK-hoz tartozik. 1976-ban létesült Pécen a Kozmikus Geodéziai Obszervatórium, ahol kiterjedten alkalmazzák a globális és az európai hosszú bázisú rádióinterferencia-hálózatot (VLBI) rádiócsillagászati kutatásokra. 1991-ben jött létre a JATE-hoz tartozó szegedi csillagvizsgáló, míg 1994-ben az MTA Csillagászati Kutatóintézete Bajai Obszervatóriumából a Bács-Kiskun Megyei Önkormányzat Csillagvizsgáló Intézete. Nemzetközileg is jelentős kutatások folynak az ELTE Csillagászati, illetve Atomfizikai Tanszékén.

Hazánkban űrfizikai kutatások több kutatóintézetben és egyetemen folynak, ezek közül a Csillagászati Kutatóintézet, a KFKI RMKI és az ELTE kapcsolódik az MTA Fizikai Tudományok Osztályához. A két kutatóintézet együttműködik egymással, valamint más kutatóintézetekkel (pl. GGKI) és tanszékekkel (BME, ELTE). Valamennyi kutatást nemzetközi együttműködésben végzik, a magyar űrkutatók közreműködését mind amerikai, mind európai és orosz részről igénylik a nemzetközi űrprogramokban (Cassini, Ulysses, Rosetta, Spektrum-X-Gamma stb.). Az űrfizika több területén fontos adatbázisok európai vagy regionális központjai működnek, illetve fognak működni a két akadémiai kutatóintézetben (NASA Kisebb égitestek, Cluster, Isophot).

Magyarországon a megfigyelő asztrofizikának hagyományosan három fő területe alakult ki: a csillagászati fotometria, a Nap felszíni jelenségeinek, illetve a Naprendszer kis égitestjeinek a vizsgálata. Mindhárom említett terület közös sajátossága, hogy az elvégzett megfigyelésekben az észlelés időpontja döntő szerepet játszik. A megfigyelt objektum még egyszer nem fog ugyanúgy viselkedni. A változó jelenségek vizsgálatában az idő minden megfigyelő számára egyformán telik, a gyakran több évtizedet is meghaladó időskálájú folyamatok nyomon követésére nem kellenek okvetlenül nagy, drága műszerek. A magyar csillagászat története igazolja, hogy ezen a területen a kisebb nemzetek kutatói is nemzetközileg sikeres kutatásokat folytathatnak.

A változó csillagokkal kapcsolatos asztrofizikai kutatások hazánkban tehát közel egy évszázadra tekintenek vissza. Az MTA Csillagászati Kutatóintézetében több évtizede vizsgálják a gömbhalmazokban, a Tejútrendszerben levő legöregebb objektumokban található RR Lyrae típusú pulzáló változókat. A fényváltozás időbeli lefutását leíró fénygörbe alakja és a mögöttes fizikai paraméterek között szoros kapcsolatot tártak fel. A kapcsolat segítségével igen pontos becslést lehetett adni a csillag nehézelem-tartalmára, abszolút fényességére. A nehézelem-tartalom egy gömbhalmazon belül is jelentős változást mutatott, utalva arra, hogy a gömbhalmazokban a csillagok kialakulása, illetve a nehéz elemek bedúsulása nem azonos időben és azonos feltételek között történt.

Az RR Lyrae-k hosszú időskálán való megfigyelésével megpróbálták a fénygörbe alakjának a változásából a csillag fejlődésére következtetni. A változókból ki kellett szűrni a más fizikai hatások során fellépő hosszú időskálájú hatásokat. Az RR Lyrae-k jelentős hányada több év karakterisztikus idejű fénygörbeváltozást, ún. Blazsko-effektust mutat. Az MTA Csillagászati Kutatóintézet, sok évtizedes megfigyelés alapján több RR Lyrae Blazsko-periódusát határozta meg. A csillagfejlődést leíró elméletek jóslataival egybevetve kimutatták, hogy olyan változások is vannak, amelyek az elméleti elvárásoknak ellentmondanak.

A δ Scuti változók 1-2 naptömegűek, és valószínűleg a fősorozati hidrogén-égetés utolsó fázisában vagy a közvetlen ez utáni fejlődési állapotban vannak.

Vizsgálatukban nagy szerepet játszik a különféle földrajzi hosszúságokon található megfigyelőállomások együttműködése. A fénygörbe Fourier-spektrumából a belső szerkezet vizsgálatához (asztroszeizmológia) szükséges módusokat lehet azonosítani. Nemzetközi kampánnyal, igen jó felbontású Fourier-spektrum segítségével először sikerült a p (nyomás) módusok mellett g (gravitációs) módusokat is azonosítani.

Kimutatták, hogy a kozmológiai távolságskála meghatározásában alapillérnek számító δ Cephei-változók több mint 50%-a kettős rendszer. Megmutatták, hogy a HIPPARCOS asztrometriai mesterséges hold trigonometrikus távolságméréseinél jelentős hibát okoz, ha ezt az effektust nem veszik figyelembe. A JATE Optikai és Kvantumelektronikai, illetve Kísérleti Fizikai Tanszékén jelentős eredményeket értek el a δ Cepheik nagyfelbontású spektroszkópiája terén. Megmutatták, hogy fényváltozáskor $H\alpha$ emisszió lép fel, ami kis optikai mélységű burok jelenlétére utal.

A pulzáló változó csillagok mint dinamikai rendszerek modellezésében nemzetközileg is jelentős eredményeket értek el az MTA Csillagászati Kutatóintézetében. Bebizonyították, hogy az R Scutti csillag pulzációja kaotikus.

A fedési kettőscsillagok a változók egy sajátos osztályát alkotják, ahol fényváltozást a komponenseknek a keringés során fellépő geometriai takarása okoz. A fénygörbéből rekonstruálható pályaelemek időbeli változásából következtetni lehet a komponensek közötti anyag átáramlására, esetleges harmadik sötét test jelenlétére, illetve relativisztikus effektusokra. A fedési változók az MTA Csillagászati Kutatóintézetének hagyományos kutatási témái közé tartoznak. Nemzetközileg jelentősek a Bajai Csillagvizsgáló Intézet sötét kísérők jelenlétére, illetve relativisztikus hatások kimutatására folytatott kutatásai.

A Csillagászati Kutatóintézetben már több mint két évtizedes múltra tekint vissza a csillagaktivitás vizsgálata. A jelenség a Nap felszínén megfigyelhető foltokkal és kifényesedésekkel hozható párhuzamba. A színképvonalaknak a tengely körüli forgás miatt bekövetkező Doppler-torzulásából több csillag felszíni foltosodását vezették le. A kapott felszíni alakzatokat összehasonlították a foltos felszínből adódó integrális fényváltozásokkal, és ennek segítségével a napciklusokhoz hasonló aktivitási periódusokat vezettek le.

A Nap felszíni alakzatainak vizsgálata (napfoltok, protuberanciák) a magyarországi megfigyelési asztrofizika hagyományos területe. Jelenleg a Debreceni Napfizikai Observatóriumban található a világ legteljesebb napfelszín-adatbázisa. A napfoltok alakjának és helyzetének nyomon követésére igen pontos módszert fejlesztettek ki, amely jelenleg egyedülálló a világon. A napfoltok mozgása és méretváltozása fontos elméleti vizsgálatoknak is kiinduló pontja. Az ELTE TTK Csillagászati Tanszékén nemzetközileg is jelentős eredményeket értek el a napfoltok kialakulásában lényeges szerepet játszó folyamatok magneto-hidrodinamikai modellezésében.

A Naprendszer kis égitesteinek, a kisbolygóknak, illetve az üstökösöknek a vizsgálata a Konkoly-alapítású intézettől kezdve napjainkig eredményes kutatási terület hazánkban. A két világháború között jelentős számú kisbolygót fedeztek fel, többeknek ennél fogva magyar neve van. Jelenleg az MTA Csillagászati Kutatóintézetében, illetve a JATE-n folynak a kisbolygókkal kapcsolatos fotometriai és pályameghatározási munkák. A Naprendszer kis égitestjeinek a mozgását jól lehet modellezni a Nap–Jupiter–kisbolygó rendszerekre alkalmazott korlátozott háromtestprobléma megoldásaival. A korlátozott háromtestprobléma elméleti vizsgálata terén, illetve a konkrét alkalmazásokban nemzetközileg is jelentős iskola alakult ki az ELTE TTK Csillagászati Tanszékén.

A mátrai Schmidt-teleszkóp üzembe állítása az 1960-as évek elején megteremtette a statisztikus csillagászat megfigyelési bázisát. Külön ki kell emelni a fiatal, $H\alpha$ emissziót mutató csillagok eloszlására vonatkozó vizsgálatokat. Ezek a csillagok keletkezési helyüktől életük során nem jutottak messze, és lehetőséget nyújtanak a csillagkeletkezésben aktív intersztelláris felhők vizsgálatára. A magyar kutatók kiemelkedő eredménye a Cepheus csillagképben levő gyűrű alakú képződmény felfedezése, amely fizikai kapcsolatot létesít több csillagkeletkezésben aktív terület között, és az ún. indukált csillagkeletkezésre szolgáltat bizonyítékot. A csillagkeletkezéssel kapcsolatos kutatások az MTA Csillagászati Kutatóintézete és az ELTE TTK Csillagászati Tanszéke együttműködésében folynak.

Az ELTE Gothard Obszervatóriumában nemzetközileg is jelentős eredményt értek el a fiatal csillagok nagyfelbontású spektroszkópiája területén. Egy homogén mintán megvizsgálták a kérdéses csillagok légkörében uralkodó sebességet, és kimutatták kapcsolatát a csillagkeletkezésből visszamaradt, beágyazó intersztelláris anyaggal.

A világegyetem korai, forró állapotának az elképzelése szorosan kapcsolódik a részecskefizikához. Az ELTE TTK Elméleti Fizikai, illetve Atomfizikai Tanszékén folyó kutatások biztos elméleti alapul szolgáltak az Univerzum korai állapotának, a galaxisok létrejöttéhez vezető struktúrák kialakulásának a vizsgálatához. Ennek során igen fontos a magyar részvétel napjaink egyik legjelentősebb asztrofizikai projektjében, a Sloan Digital Sky Survey-ben, amely több millió vöröseltolódási adat segítségével megteremti a nagy pontosságú empirikus kozmológia lehetőségét. A kozmológiai eredmények elméleti értelmezéséhez jelentősek a KFKI RMKI-ben folyó, az általános relativitáselmélettel kapcsolatos vizsgálatok.

A nagy energiájú asztrofizikában mind elméleti, mind megfigyelési munkákhoz kapcsolódó kutatások is folynak Magyarországon. Az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékén a neutroncsillagok belső szerkezetének modellezésére új állapotegyenletet állítottak fel. A penci Kozmikus Geodéziai Obszervatóriumban nemzetközileg is jelentős eredmények születtek a különféle kozmikus

objektumokban, jelesül a kvazárookban megfigyelhető relativisztikus sebességű anyagkiáramlások vizsgálatában az űr VLBI (japán HALCA-műhold) felhasználásával.

A KFKI RMKI, a kozmikus sugárzási kutatásokban szerzett elméleti és kísérleti tapasztalatait felhasználva, az 1970-es évektől kezdve bekapcsolódott az űreszközökön végzett plazmafizikai mérések kiértékelésébe. A Halley-üstökös vizsgálatára indult VEGA-programban nyílt először lehetőségük fizikai eszközöket űrszonda felületén működtetni. Először sikerült 1986 márciusában közeli képeket továbbítani a Földre egy üstökös magjáról, megelőzve a Giotto képeit. A képek kiértékelése adta az első megbízható információt az üstökös mag méretéről, forgásáról, a felszíni porkilóvéleésekről. A Plazma napszél- és üstökösplazma-érzékelő ugyancsak sikerrel működött, és segítségével a plazmakörnyezetben egy új, *kometopauzának* elnevezett határfelületet fedeztek fel. A teljesen magyar részvétellel készült TÜNDE nagy energiájú töltött részecskét mérő detektor – a Giottoénál lényegesen nagyobb energiafelbontású – méréseiből új részecskegyorsítási mechanizmust azonosítottak.

1989-ben a Phobos űrszonda Mars körüli keringése során a részvételünkkel végzett plazma- és részecskemérésekkel kimutatták, hogy a mágneses csóva irányában mozgó nehéz ionok a Marsról származó oxigénionok, és elsőként bizonyították forró elektrongázt tartalmazó mágneses rétegek létezését. Az Ulysses-szondának a magas heliografikus szélességeken elsőként végzett megfigyeléseiből megállapították a helioszféra kétféle mágneses polaritású tartományait elválasztó felület térbeli alakját és mozgását. A SOHO napfizikai műhold fedélzetén 1995 decembere óta sikerrel végzi a közepes energiájú részecskék mérését a részvételükkel készült LION-berendezés.

Az 1980–1989 közötti időszakban a KFKI RMKI által művelt űrfizikai témakör rendelkezett a legerősebb idézettséggel a magyar fizikán belül: négy publikációjuk került be a hét, legmagasabb idézettséggel rendelkező publikáció közé a Naprendszer témakörében.

A KFKI RMKI kutatói a szoros értelemben vett űrfizikai vizsgálatok mellett továbbra is foglalkoznak nagy energiájú szoláris és interplanetáris részecskék, valamint a galaktikus kozmikus sugárzás naprendszerbeli terjedésének elméleti vizsgálatával és modellezésével.

A Csillagászati Kutatóintézet 1958-ban létesített és 1992-ig fenntartott optikai műholdkövető hálózatának megfigyeléseiből fejlődtek ki a felsőlégköri kutatások, amelyek napjainkig sikeresen folynak. Elismerésüket jelzi, hogy az interkozmosz együttműködésen belül ezeket a kutatásokat évtizedekig Magyarország koordinálta és vezette. Az elsősorban a COSPAR kongresszusain bemutatott magyar eredmények új effektusok felfedezésével és leírásával járultak hozzá a semleges felsőlégkör modelljeinek javításához, ami fontos a műholdak várható élettartamának számításához is. Planetológiai kutatások is folynak, például a Hubble-űrtávcső megfigyelései alapján több üstökös magjának méreteit

sikerült levezetni. Az asztrofizikai kutatásokban sikeresen használják több csillagászati hold (IRAS, ISO, IUE, Hipparcos) mérési eredményeit.

A magyar űrfizikai kutatások rendszeres támogatást élveznek az űrkutatást finanszírozó állami szervek részéről. Űrfizikai témapályázatok gyakran eredményesek a Magyar Űrkutatási Iroda által kiírt és az Űrkutatási Tudományos Tanács által elbírált pályázatokon.

Összefoglalás, következtetések

A magyar csillagászatot a Konkoly-féle intézet megalakulásától kezdve jellemezte, hogy érzékenyen reagált a tudományterület nemzetközi kihívásaira, és eredményesen találta meg azt a középutat, amely a kihívásoknak megfelelő kutatás és az anyagi lehetőségek szabta keretek között haladt.

A magyar kutatók sikerrel fedezték fel azokat az „információs fehér foltokat”, ahol szerényebb eszközeikkel is eredményesen kapcsolódtak a csúcstechnológiával folytatott projektekhez. Ilyen módon sikerült a nemzetközi tudományos vérkeringésben maradniuk, saját méréseiknek az értéke a csúcstechnológiával végzett kutatásokhoz kapcsolva jelentősen megnőtt, és hozzájárultak ahhoz, hogy az élvonalbeli kutatásokból származó tudományos haszonból a magyar csillagászat is részesült.

Az utóbbi megállapítás általános, a jövőre nézve is útmutatást jelentő tanulsággal szolgál. Az ország tudományossága nehéz anyagi helyzetben sem mondhat le arról, hogy szerényebb anyagi ráfordítással ugyan, de olyan tudományos beruházásokat valósítson meg, amelyek képessé teszik a magyar kutatókat a nemzetközi porondon való sikeres helytállásra. Ez természetesen csak egy minimális program lehet, és semmiképpen sem egy nagy távlatokban gondolkodó stratégia alapja.

Magyarországnak az euroatlanti integrációja során fontos szerepet kell kapnia a nyugat-európai közös kutatási központokban, jelesül az ESO-ba (European Southern Observatory) való bekapcsolódásunk, illetve egyenrangú partnerként történő részvételünk a közös kutatási programokban. Mindenestre a csillagászatban elért eddigi eredmények nyomán bizvást állíthatjuk, hogy az mindenképpen alkalmas arra, hogy a távlati stratégia kialakításánál komolyan számításba vegyék.

Vitathatatlan, hogy az űrfizikai eredmények folyamatosan gazdagítják egyrészt a közvetlen kozmikus környezetünkre, másrészt az Univerzumra vonatkozó ismereteket. Ezek a kutatások az elmúlt negyven évben teljesen átalakították a csillagászatot, például a Naprendszer égitestjeinek megismerése, a napszél-kölcsönhatások vagy a röntgen- és gammacsillagászat területén. Az űrfizika ezen eredményei világszerte nagy érdeklődést váltanak ki, különösen az ifjúság körében.

Magyarország eddig is jelentős részt vállalt az űrfizikai kutatásokban, további részvételünk alapvető érdek, már csak a jövőendő ESA-tagság követelményei miatt is. A közfelfogással ellentétben kapcsolódásunk ezekhez az űrprogramokhoz rövid távon nem szükségképpen jelent nagy anyagi terheket az ország számára, hiszen a részvételnek különféle formái léteznek az adatfeldolgozástól a szimulációig vagy az elméleti interpretációig. A hatékony munkához azonban feltétlenül szükség van a műszerépítésben való aktív részvételünkre is.

Biofizika

A biofizika általános jellemzése

A diszciplínák tárgyalásakor célszerű kiindulni Feynman („egy fizikus”) nézetéből. Ő a következőt mondja: „Ha agyunk a célszerűség kedvéért részekre is bontja ezt a világmindenséget: fizikára, biológiára, csillagászatra stb., azért ne feledjük, hogy a természet erről a »felosztásról« nem tud”. Ha ezt következetesen átgondoljuk, akkor végül is oda kellene jutnunk, hogy tulajdonképpen ma is csak egy természettudomány van, csakúgy mint néhány száz évvel ezelőtt. Hogy ez miért ütközik mindennapi tapasztalatainkkal, annak oka abban keresendő, hogy például a fizika egészét még a századfordulón is tudta a fizikusoknak (egy nem véletlenszerűen választott) kb. 10 fős halmaza, ma ilyen ember – a tudásanyag megsokszorozódása és a speciális területek sokasodása miatt – nyilván nincsen.

A valóság lehetőleg kisszámú axiómára épülő logikus leírására törekvő fizika önfejlődése során a természet egyre jobb leírására vált képessé. Ezzel együtt persze (az emberi befogadóképesség végelessége miatt) a fizikán belül is egyre újabb diszciplínák alakultak ki. A biofizika is ilyen diszciplínának tekinthető, azzal a komplikációval, hogy a tudományfejlődés során kialakult nagy és jól elhatárolódni hitt tudományterületek, a biológia és a fizika határán működik.

A fizika a fejlődése korábbi szintjein mindig is igyekezett az élő rendszerekre is alkalmazni módszereit, megközelítési módját. Valamennyi ismert fizikai terület megtalálta biológiai alkalmazását: a mechanika, a hidrodinamika, az elektromosság stb. A biológia oldaláról tekintve a biológusok, orvosok részéről ugyancsak szinte kezdettől fogva élt a törekvés a biológiai-fiziológiai problémák fizikai irányú megközelítésére: pl. Meyer, Helmholtz, Starling biológiai-életteni problémákból kiindulva alkalmazták a fizikai szemléletet, módszereket. Ez a megközelítési mód nagyon sok hasznos ismeretet eredményezett. Fizikai eredetű információk még a gyógyításban is fontos szerepet nyertek, ennek ellenére, az életre speciálisan jellemző folyamatokra a múlt századi fizika módszereivel nem nagyon lehetett lényeges, alapvető új in-

formációkhoz jutni. Azt is mondhatjuk, a fizika hasznos segédtudománya volt a biológiának.

A századforduló a fizika forradalmát eredményezte: világgépünk, megközelítési módunk alapvetően megváltozott. A megjelenő új fizikai világgép a valóság sokkal teljesebb, pontosabb leírására vált képessé, ez (a tanulmány legelején említett gondolat logikája szerint, azaz hogy egyes emberek befogadóképessége véges) új fizikai diszciplínának megjelenését is eredményezte – amint ez a diszciplínavitára szánt többi anyagból is kiderül. A század második felére a fizika látásmódbeli, módszertani forradalma lezajlott, és a hihetetlenül megnőtt teljesítőképesség eddig távol eső területeket tett elérhetővé. Ezzel a fizika az élő rendszerek tárgyalásában is minőségileg új lehetőségeket nyitott meg.

A biofizika mint tudományág az élő természetet vizsgálja a fizika módszereivel, ugyanakkor a biológiai jelenségek lejátszódását szabályozó fizikai törvényeket is tanulmányozza. A terület manapság különösen dinamikusan fejlődik, és ennek több oka van.

1. Általában elmondható, hogy a természettudományok között, ami a társadalom életére gyakorolt hatást illeti, az élettal foglalkozó tudományok (az élettudományok) szerepe nő, és belátható időn belül ez a tendencia erősödni fog. Ez azonban korántsem jelenti azt, hogy a klasszikus értelemben vett biológiai tudományág dominanciájáról van szó.
2. Más, tradicionálisan az élettelen természettel foglalkozó tudományok fordultak az élő természet felé: pl. a fizika, a kémia. A kutatásokban az interdiszciplináris jelleg egyre erősödik. Ennek egyrészt a világméretű érdeklődés, de még inkább a tudományok önfejlődése az oka. Arról van szó, hogy ezek a tudományágak olyan fejlettséget értek el, hogy képessé váltak a legnagyobb bonyolultságú anyag, az élő rendszer tárgyalására. Ez vonatkozik természetesen a fizikára is. A továbbiakban csak erről lesz szó, bár hasonló érvek például a kémiára is elmondhatók.
3. A fizika képességei az élő rendszerek vizsgálatára manapság robbanásszerűen fejlődnek. Ennek három fő mozgatórugója van:
 - A fizika kialakult modern eljárásai, tárgyalási módjai, amelyek hagyományosan kizárólag a fizika területére vonatkoztak, például statisztikus fizika, atom- és molekulafizika, optika stb., a biológiai rendszerek leírására is alkalmassá váltak.
 - A modern számítógépekkel lehetővé vált a nagy bonyolultságú biológiai rendszereknek a fizikai megközelítés által megkövetelt egzakt tárgyalása, például meg tudjuk oldani több ezer atomból álló óriásmolekulák mozgásegyenleteit, meg tudjuk határozni e rendkívül bonyolult mole-

kulák pontos térszerkezetét röntgensugár-szórásuk alapján vagy magmágneses rezonanciaspektroszkópia segítségével stb.

- Számos olyan új fizikai alapú kísérleti módszer jelent meg, amely eddig elképzelhetetlen biológiai jellegű vizsgálatokat tesz lehetővé például spektroszkópai módszerekkel egyes (esetleg toxikus) biológiai molekulákat is ki tudunk mutatni, tulajdonságaikat meg tudjuk határozni; igen nagy számú sejtet szét tudunk egyenként válogatni szinte tetszőleges tulajdonságaik alapján. Lehetőség van a biológiai jelenségek időbeli követésére elegendően nagy időfelbontással, úgyhogy a molekuláris mozgásokat is követni tudjuk. Különféle, az egészségre egyáltalán nem ártalmas sugárzásokkal az emberi test belsejéről tudunk a korábbiaknál sokkal nagyobb részletességű képeket kapni. Fizikai alapú berendezésekkel új gyógyítási eljárások alakultak ki, például modern sugárterápia, lézeres sebészet, s a sor végtelen.

A biofizika tehát tágabb értelemben is folyamatosan fejlődik: egyrészt vizsgálati területe egyre nő (mind a jelenségek körét, mind a metodikák sokszínűségét tekintve), másrészt nő a fizika jelenléte más élettudományágakban is. Nyugodtan ki lehet jelteni, sőt hangsúlyozni kell, hogy manapság modern élettudományi kutatásokat nem lehet fizika (biológiai fizika) nélkül végezni.

Az eddigi megállapítások a biofizikára általában vonatkoznak, ezért a világ fejlett részében a terület igen nagy megbecsülést kap. A tudományterület interdiszciplináris jellege erősödik: ez persze valamennyi természettudományi ágra igaz.

A terület nagy tradicionális kongresszusain általában néhány ezer fő vesz részt: a biofizikus világszervezet IUPAB (International Union of Pure and Applied Biophysics) háromévente tart kongresszust, az Amerikai Biofizika Társaság kongresszusa (talán a legszínvonalasabb rendezvény) évente zajlik. Egyre megbecsültebb az EBSA (Európai Biofizikai Társaságok Szövetsége) szintén háromévente rendezett találkozója is.

Biofizika – biológiai fizika

Mind a biológia, mind a fizika rendkívül széles témakört tárgyaló, számos markáns területre felosztható diszciplína. Nyilvánvalóan következik ebből, hogy a két tudományág kölcsönhatásaként előálló terület mind a vizsgált problémák, mind a megközelítési módok szempontjából óriási változatosságot mutat. Valamennyi terület jellemzése reménytelen vállalkozás, ezért itt csak néhány általános megjegyzést tehetünk, és néhány nagyon jellemző részterületet mutathatunk be.

A fizikának az élet tanulmányozásában való részvételének jellege is nagyon sokféle lehet, és valamennyi megvalósul. A kérdés illusztrálására két véglet célszerű bemutatni. Egyrészt, a fizika szolgáltathat módszert az élettudományok számára úgy, hogy a technikán kívül a vizsgálatokban semmilyen további érdemi részvétele nincsen. Ilyenek elsősorban bizonyos vizsgálati módszerek, például a röntgenkészülék. A másik véglet a következő: a fizika az élő anyag különlegességét használja fel, hiszen az életre jellemző anyagok (fehérjék, nukleinsavak) sajátos fizikai, kémiai tulajdonságokkal bírnak. E tulajdonságok a biológiai funkciótól teljesen függetlenül is érdekesek lehetnek fizikusok, kémikusok számára, például a komplex rendszerek vizsgálatának egyik kedvenc objektumai a fehérjék, amelyek molekuláiban sajátos, új típusú reakciók figyelhetők meg a reakciókinetikusok nagy örömeire – a sor folytatható. E két véglet között minden fokozatra lehet példát adni. A biofizika legjellemzőbb megközelítési módja az, amikor egy biológiában felmerülő jelenséget a fizika módszereivel, tárgyalási módjával vizsgálják, és a biológiai probléma megoldásával együtt új fizikai jelenségeket, elveket is megismernek. A fizika teljesítő-képességének növekedésével a fizika által dominált megközelítés egyre intenzívebb lesz. E gondolatok szerint szokták ma körülhatárolni a biofizika tudományág egy területét, amelyet *biológiai fizika* néven szoktak megkülönböztetni: jellemzője az előzőek alapján a fizikusi meghatározottság a biológiai problémák kezelésében. Fontos jellemzője a legújabb biológiai fizikai kutatásoknak, hogy a tudományterületek nagyfokú specializálódása következtében a munka akkor folyik a leghatékonyabban, ha az együttműködésben a résztvevők nem az adott témára specializálódnak, hanem megtartva eredeti profiljukat a saját, eredendően meglévő tudásukat adják a közös munkához. Ez lényegében biológusokból, fizikusokból esetleg vegyészekből és mérnökökből álló, az adott feladatra összehozott laza kutatási társulást jelent.

A trendet a nemzetközi szervezetek módosításai is tükrözik: a biofizikusok legnagyobb nemzetközi szervezete az IUPAB, ám ennek keretében 1993-ban megalakult a Biológiai Fizikai Bizottság, amelynek egyébként megalakulása óta van magyar tagja.

Az ilyen osztályozás segít eligazodni az egyre szélesedő vizsgálati területeken, azok jellemzésében, ám a „besorolás” nem igazán alapvető különbségen alapul. Nagyon sok esetben nem nyilvánvaló, és merev megkülönböztetésektől általában óvakodni kell.

A főbb irányzatok

A biofizika által vizsgált problémakör az előzőek alapján rendkívül tág, itt csak néhány, megítélésünk szerint a jelenleg legnagyobb aktivitással művelt, legalapvetőbb új ismereteket ígérő területeket emeljük ki.

Biológiai molekulák (elsősorban fehérjék és nukleinsavak) szerkezete, működése, dinamikája. Az életre legjellemzőbb molekulák a nukleinsavak és a fehérjék, működésük megértésében elsődleges a molekulák térszerkezetének az ismerete. Alapvető probléma a szerkezet és a működés kapcsolata. Ennek kutatásában számos ágon van lényeges előrehaladás. A szerkezetkutatás maga is több fronton halad. Egyik alapprobléma az, hogyan ismerhető meg a szerkezet a DNS-molekulában rendelkezésre álló genetikai kód, illetve az aminosav-szekvencia ismeretében. Az elméleti vizsgálatokban nagyon eredményesen használhatók a statisztikus fizikai módszerek. Nagyon fontos a szerkezet direkt kísérleti meghatározása, ezt NMR-spektroszkópiái, de elsősorban röntgendiffrakciós módszerrel lehet meghatározni. A szerkezet finomításában a molekuladinamikai számítások nélkülözhetetlenek. Ezekben alapvetően a kötések mechanikai tulajdonságai és az elektrostatikus kölcsönhatások figyelembevételével, illetve kvantumkémiai módszerekkel finomítják a molekulák mozgásegyenleteit.

A legelőrehaladottabb vizsgálatokban a működő, mozgó fehérjék, nukleinsavak szerkezetváltozásait közvetlenül határozzák meg (pl. a röntgendiffrakció időfelbontásával). Így a működés, annak dinamikája a legnagyobb részletességgel tanulmányozható, és az alapvető fizikai elvek is megismerhetők.

Biológiai struktúrák szerveződése (membránok, sejtek, szervek, egyedek), ezek dinamikája, a szerkezet és funkció kapcsolata. A biológiai rendszerek működésében a térbeli tagozódás meghatározó. A működési egységek az egymástól membránokkal elválasztott térrészek a szerveződés valamennyi szintjén (sejtnél kisebb, illetve annál sokkal nagyobb méretekben is). Az anyagtranszport, információátvitel, energiaátalakítás mind-mind struktúrák kölcsönhatásával valósul meg, és ezek vizsgálata a fizika teljes arzenáljával (a mikroszkópiától a statisztikus fizikai módszerekig) nagy intenzitással zajlik.

A biológiai energiaátalakítás mechanizmusa. Az élet fenntartásához szükséges energia különféle formákban áll rendelkezésre, illetve az egyes életfolyamatokhoz különböző energiafajtákra van szükség, de az energiát továbbítani is kell. Számos energiaátalakító rendszer működik az élő szervezetekben, ezek fehérjemolekulákból álló gépek. Működésük, az energiaátalakítás lépései a fizikus számára a biológia egyik legérdekesebb területe, és a vizsgálatok legszélesebb spektrumát kötik le mind a kísérletek, mind az elméleti leírás és megértés szintjén

Szabályozó mechanizmusok. Az élő rendszerek működésében meghatározó szerepet játszanak azok a szabályozó mechanizmusok, amelyek a jelátviteli rendszerek és az egyes specifikus anyagcsere-folyamatok formáját, mértékét

és számos paraméterét szabályozzák. A témakör molekuláris és szöveti szintű vizsgálata egyaránt intenzív kutatások tárgya.

Az idegrendszeri működés alapja. Az idegi folyamatok, végső soron a gondolkodás, szakadatlanul az érdeklődés középpontjában van. A folyamatos érdeklődés a jelenlegi fejlettség szintjén a kísérleti módszerekre (mikroszkópiák és kapcsolódó funkcionális vizsgálatok) és az elméleti megközelítésre (idegi hálózatok) irányul.

Egyrészecke-, egymolekula-manipuláció, a módszerek forradalma. A legutóbbi időben számos új fizikai alapú kísérleti módszer jelent meg, amelyek forradalmasítják a biológiai rendszerek vizsgálatát. Ilyenek az egyetlen részecske, sokszor egyetlen molekula megfigyelését, manipulálását lehetővé tevő eljárások. Ezek fő típusai egyrészt a pásztázó mikroszkópok, a biológiában az ún. atomerő-mikroszkóp (Atomic Force Microscope, AFM). Még újabb keletű a lézercsipesz: e módszerben fókuszált lézerfény képes manipulálni a környezetétől eltérő törésmutatójú fényhullámhossznyi méretű tárgyakat. E módszerekkel minőségileg új lehetőségek nyíltak meg: eddig csak nagyszámú átlag megfigyelésre volt lehetőség. A kiegészítő technikák (érzékeny spektroszkópiai módszerek) szintén sebesen fejlődnek, és e részecskék komplex vizsgálatára van lehetőség.

Érdemes megjegyezni, hogy például Stephen Chu, aki 1997-ben fizikai Nobel-díjat kapott a lézeres hűtés, illetve lézeres csapdázás területén kifejtett munkájáért, jelenleg elsősorban biológiai folyamatokat vizsgál az általa is kifejlesztett egyrészecke-megfigyelési eljárásokkal.

A biofizika hazai helyzete

A biofizika tradicionálisan erősen jelen van a magyar tudományos életben. Helyzete, fejlődése nagyjából megfelel a nemzetközi irányzatoknak. Az erősödést, illetve az interdiszciplináris jelleget az a tény is kifejezi, hogy az MTA Fizikai Osztályában jelenleg négy tag foglalkozik biológiai fizikával (ez a szám a Biológiai Osztályon kettő), és ezek közül egyet-egyét a legutóbbi két alkalommal választottak levelező taggá.

A budapesti, debreceni, pécsi és szegedi egyetemeken kiváló biofizikai tanszékek működnek (helyi előzmények eredményeként a tudományegyetem vagy az orvostudományi egyetem keretében. Az universitasok szerveződésével ez a közeljövőben valamennyire átrendeződhet, de ez is csak a terület interdiszciplináris jellegét tükrözi): JATE Biofizikai Tanszék, POTE Biofizikai Intézet, DOTE Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet, SOTE Biofizikai és Sugár-

biológiai Intézet, ELTE Biológiai Fizikai Tanszék (ez utóbbi a közelmúltban alakult, és már nevében is deklarálja a fizikai szemléletmód dominanciáját).

Öt éve működik a Debreceni Orvostudományi Egyetemen a PET-centrum, amely a pozitronemissziós tomográfia fizikai vizsgáló módszerét tette elérhetővé az orvosi, biológiai, farmakológiai, élettani stb. klinikai és alkalmazott kutatások számára.

Az akadémiai kutatóintézetek közül egyben művelik a biofizikát: az MTA Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézetében. A biofizika–biológiai fizika tárgykörébe is eső kutatások folynak az MTA SZBK Növényélettani, valamint Enzimológiai Intézetében is. Jelentős erőfeszítést fejt ki az atomfizika biológiai alkalmazására az MTA KFKI RMKI is. Számos, elsősorban kémiai kutatóhely is igen komoly, általában a biofizika tárgykörébe tartozó biológiai vonatkozású kutatásokat folytat (ilyen például többek között az ELTE Szerves Kémiai Tanszékén végzett peptidkémiai kutatás, vagy a röntgenkrisztallográfiai fehérjeszerkezet-vizsgálat az ELTE Elméleti Kémiai Laboratóriumában) – ismét jól tükrözzén az interdiszciplináris jelleget. Itt meg kell azért jegyezni, hasznos lenne a magyar biofizikának, ha jelentősen nőne részvétele a röntgenkrisztallográfiás fehérjeszerkezet-vizsgálatokban.

A magyarországi biofizikai kutatások a nemzetközi trendeket tükrözik. Alább felsoroljuk a leglényegesebb témákat. Ezek mindegyikében jól dokumentálható, nemzetközi élvonalba tartozó eredmények születtek.

1. Jelentős részben az életfolyamatok molekuláris mechanizmusának a fizika módszereivel való feltárását végzik számos területen, a legkülönbözőbb módszerekkel, alapkutatás jelleggel. Néhány példa:
 - Fehérjemolekulák működésének legalapvetőbb sajátosságai. A fehérjék működést követő mozgásai. A biológiai energiaátalakítás molekuláris mechanizmusa, az egyes meghatározó lépések azonosítása. A vizsgált objektumok fehérjék, amelyeknek fő biológiai szerepe ismert, és a működés alapjainak a megismerése a cél.
 - Fehérjék szerkezetének meghatározása az aminosav-sorrend alapján (MTA SZBK Enzimológiai Intézet).
 - Fehérjék különleges hőtűrésének fizikai alapjai (MTA SZBK Enzimológiai Intézet).
 - A fehérjék működésének legáltalánosabb elemei. A szerkezet és a funkció kapcsolata. A működésben megnyilvánuló általános és alapvető sajátosság, a dinamikus jelleg tanulmányozása (DOTE Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet, JATE Biofizika Tanszék, MTA SZBK Biofizikai Intézet, POTE Biofizika Tanszék, SOTE Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet).
 - Chaperon-fehérjék (ezek más fehérjék felcsavarodását katalizálják) működésének fizikája (SOTE Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet, POTE Biofizikai Intézet).

- Fehérjék atomi összetételének elemzése (különös tekintettel a fehérjékben ritkán előforduló atomokra), érdekes alegységek összetételének és szerkezetének meghatározása (MTA KFKI RMKI).
 - A napenergiát biológiailag hasznosítható energiává alakító fotoszintézis (a fő földi energiaforrás) működésének molekuláris alapjai (MTA SZBK Növénybiológiai Intézet, JATE Biofizikai Tanszék, SOTE Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet, ELTE Növényélettani Tanszék).
 - Kémiai energiát mechanikai energiává átalakító molekuláris motorok működésének kísérleti és elméleti tanulmányozása (ELTE Biológiai Fizikai Tanszék, POTE Biofizikai Intézet, POTE Központi Laboratórium).
 - A fényenergiát átalakító bakteriorodopszin: ez az előzőnél egyszerűbb molekulagép, az alapvető energiaátalakítási fizikai folyamatok egzaktul vizsgálhatóak rajta (MTA SZBK Biofizikai Intézet, ELTE Biológiai Fizikai Tanszék).
 - A receptorsűrűség és a szervezet funkcionális állapota közötti összefüggések vizsgálata (DOTE PET-centrum).
2. Szupramolekuláris szerveződések, biológiai membránok szerkezetvizsgálata, dinamikai tulajdonságai, a membránon keresztüli jelátvitel lépései, mechanizmusa (DOTE Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet, POTE Biofizikai Intézet Központi Laboratórium, MTA SZBK Biofizikai Intézet).
 - Sejtek adhéziójának molekuláris alapjai (MTA SZBK Biofizikai Intézet, DOTE Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet).
 - A kloroplasztiszok fénybegyűjtő komplexeinek struktúrája, kialakulásának okai (MTA SZBK Növénybiológiai Intézet).
 - Sejtek felületén levő receptormolekulák működése (DOTE Biofizikai és Sejtbiológiai Intézet), valamint a receptordenzitás megváltozását eredményező receptorregulációs folyamatok tanulmányozása (DOTE PET-centrum).
 - Membránon keresztüli aktív és passzív anyagtranszport követése (MTA SZBK Biofizikai Intézet, ELTE Biológiai Fizikai Tanszék).
 - Élőlények kollektív mozgása, evolúciós modellek (ELTE Biológiai Fizikai Tanszék).
 3. Káros környezeti hatások: elsősorban az UV-sugárzás káros hatása az élő szervezetekre; a hatás molekuláris mechanizmusának a jellemzése, és a védekezés stratégiájának kidolgozása (MTA SZBK Növénybiológiai Intézet, SOTE Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet).
 - Szerves hulladékok környezetkímélő lebontása, újrafelhasználása a környezeti terhelés csökkentése céljából (MTA SZBK Biofizikai Intézet).
 4. Igen kis mennyiségű anyagok kimutatása biológiai eredetű érzékelőkkel, biológiai szenzorok (ELTE Biológiai Fizikai Tanszék).

5. Új anyagok: számos biológiai eredetű anyag, a biológiai funkciótól teljesen függetlenül nagyon érdekes és más területeken esetleg előnyösen alkalmazható tulajdonságokkal bír: pl. optikai tulajdonságaikat működés közben változtató biológiai anyagok optoelektronikai alkalmazását vizsgálják (MTA SZBK Biofizikai Intézet és a JATE optikai és Kvantumelektronikai Tanszék kooperáció).
6. Az idegrendszeri ingerületáttevődés molekuláris lépéseit, a bekövetkező változások globális, egész szervezetre gyakorolt hatásait vizsgálják fizikai-biológiai módszerekkel (MTA SZBK Biofizikai Intézet). Hasonló neurobiológiai jellegű kutatásokat – a terület interdiszciplináris jellegének megfelelően – biológiai és orvosi intézetekben is folytatnak.
7. Az igen korszerű Pozitronemissziós Tomográfia (PET) módszerével a működő agy aktivitását lehet követni, az aktív területeket lokalizálni lehet, ezzel az agyműködésre vonatkozóan nyernek értékes információt, a kóros elváltozásokat pedig nagy pontossággal tudják jellemezni (DOTE PET-centrum).

Az előzőekben a biofizikai kutatásokat soroltuk fel. A biofizika tudományág, illetve a kutatóhelyek tevékenységének az értékelésénél alapvető szempont a szakemberképzés is. Ilyen felkészültségű szakemberekre mai világunkban a kutatáson kívül is egyre nagyobb szükség van: az egészségügyben nagy számban jelennek meg új, nagy bonyolultságú, fizikai elven működő diagnosztikai és gyógyító berendezések, amelyeknek jó határfokú használatához a biofizikai képzettségű szakemberek nélkülözhetetlenek. E tendencia várhatóan tovább erősödik.

Kiemelendő, hogy a biológiai vonatkozású kutatásokat végző fizikusok a nemzetközi tudományos munkaerőpiacon egyre népszerűbbek, mivel szakterületük és képzésük jellegénél fogva problémamegoldó képességük kiemelkedően jók számít.

Az egyetemek a követelményeknek az ilyen jellegű igényeket fokozottan kielégítő szakok indításával igyekeznek megfelelni. Jelenleg formális biofizikus-, biológiai-fizikus-képzés nem folyik, az egyetemek a fizikus alapképzés végső szakaszában nyújtanak biofizikus szakosítást. Jelenleg az előkészítés végső szakaszában van az önálló biofizikus szak alapítása.

Az interdiszciplináris területre készülő szakember képzésében a diszciplináris oktatás és az inter- és multidiszciplinaritás megfelelő arányaira van szükség. (Nyilván csak abból lesz jó multidiszciplináris szakember, aki legalább egy diszciplinában jól eligazodik.) Ugyanakkor a képzés során, illetve főként annak későbbi szakaszaiban a multidiszciplinaritásra kell a hangsúlyt tenni. A multidiszciplináris képzéshez az is kell szerintünk, hogy az ilyen képzés súlypontja posztgraduális irányba tolódjék el. Ebből a szempontból is nagyon fontos a multidiszciplináris képzés fejlesztése, és ez az a forma, ahol (szakterülettől függetlenül) az MTA intézményei igazán eredményesen

kapcsolódhatnak be az oktatásba. A közvetlen oktatáson túl nemzetközi iskolák rendezésével/látogatásának előmozdításával is segítve a képzés sokoldalúságát.

A kutatás technikai feltételeinek biztosítása

A jelenleg zajló informatikai forradalom nagyszámú új módszer megjelenésével jár együtt. Ezek honosítása komoly műszerberuházásokat követel meg, amelyek elkerülhetetlenek. A technikai lehetőségek javítása körültekintő tervezést igényel.

Számos területen a beruházás költségei messze meghaladják egy-egy ország lehetőségeit. Ezen területeken célszerű olyan nemzetközi programokba bekapcsolódni, amelyek révén a nagyműszerek használata biztosítható (pl. szinkrotronsugárzással kapcsolatos mérések, nagy térerejű mágnesek stb.).

Több esetben a hazai lehetőségek is elérhetők (pl. a Budapesti Kísérleti Reaktor mérőállomásai).

Környezetfizika, sugárvédelem, reaktorfizika

A röntgensugarat, radioaktivitást, rádiumot több mint száz éve fedezték föl. A 20. század elején már foglalkoztak azok (pozitív és/vagy negatív) biológiai hatásaival. A 20. század első felében az orvostudományon belül kibontakozott a radiológia mint a diagnosztika és terápia fontos (nagyreszt empirián nyugvó) fejezete.

Atombombák robbanása, atomerőművek építése, majd az 1970–1980-as évek atomerőmű-balesetei a társadalom figyelmét a sugárvédelemre irányították, amely így érzelmi-publicisztikai-politikai töltetet is kapott, s megítélése sokat veszített józan empirikus realitásából.

Tükrözi ezt például a nemzetközi (és az eddigi magyar) joggyakorlat. E szerint a nukleáris technika által okozott legkisebb (legtöbbször mérhetetlenül kicsiny) sugárdózis is *káros*, de az orvosi sugárdózis vagy a „természetes sugárdózis” (amelyek legtöbbször nagyságrendekkel fölülmúlják az előbbit) *ártalmatlan*. Míg az atomtörvény az *atomerőmű* esetében korlátot szab a levegőbe kibocsátható lebegő por radioaktivitására, viszont nem szab ugyanilyen korlátot *szénerőműveknél*, noha egyes esetekben utóbbiak egy kilowattóra villanytermelésre jutó radioaktivitás-kibocsátása nagyságrendekkel magasabb, de hát utóbbi „természetes radioaktivitás”. Uránbányában a radioaktív terhelésért jár sugárvesélyességi pótlék, de *ugyanekkora* dózisterhelésért szénbányában nem jár. Ha egy Kijevet megjárt (Csernobilt megközelítő) kamionsofőr egy évtized múlva (nem is rákban) meghal, azért a magyar bíróság milliós kártérítést fizettet, hiszen a sofőr útközben dózistöbbletet kapott – akkorát mint egy fogröntgen!

Az ilyen inkonzisztenciák mögött némi történetileg kialakult utilitarizmus is rejlik: az atomerőművek megengedhetik maguknak a sugárvédelmi szakemberek alkalmazását és a sok lehetséges kibocsátáscsökkentés műszaki megvalósítását. Az egészségügy és a helyi önkormányzatok pénzhiánnyal küzdenek. Iskolázatlan falusi bácsiktól meg néniktől a radiológusok nem remélhetnek magas fizetést. Így történhet, hogy néhány falusi házban az ott lakó kicsi gyerekek a talajból felszivárgó radontól akkora sugárdózist kapnak, amekkorát atomerőműben a jog elfogadhatatlannak ítélt. A növekvő kisgyermek sejtjei gyorsabban osztódnak, ezért ő fokozottan érzékeny a sugárhatás-

ra, de *gyermekszoba* radonmentesítésére az önkormányzat – jogi szabályozás hiányában – nem adhat támogatást, és – ugyanilyen okból – a tisztiorvos sem szólíthatja fel a szülőt a gyermekét veszélyeztető állapot megszüntetésére, hiszen az „természetes állapot”. (El kellene dönteni, hogy a lakóház jogilag „természeti jelenség”-e.)

Fizikus számára abszurd az a fölfogás, hogy az emberi sejt előbb lekáderezi az érkező nagy energiájú ionizáló részecskét: ördögi technokraták küldték-e vagy édes Földanyánk, és e szerint dönti el, hogy illik-e károsodnia vagy sem. A fizikus tapasztalatból tudja, hogy két azonos energiájú és típusú részecskét nemcsak a fizikus nem különböztet meg, hanem a természet sem. A magyar atomerőmű indítása után a magyar iskolai tantervbe bekerültek a radioaktivitás, magtechnika, sugárvédelem elemei. (Ugyanekkor, az 1980-as években lett tantervi anyag a számítógép és az informatika is.) Csakhamar kitűnt: lelkiismeretes fizikatanárok, és előítéletektől még mentes diákjaik számára érthetetlenek és elfogadhatatlanok a hazai joggyakorlat és közvélekedés ilyen ellentmondásai. Ők empirikusan megalapozott, racionálisan érthető és kvantitatívan ellenőrizhető, tehát *tudományos ismereteket igényelnek*, azokat fogadják el.

A környezetbe (hazánk levegőjébe) *kerülő kémiai anyagok* nagyságrendekkel nagyobb egészségi kockázatot jelentenek, de a legutóbbi időkig – a kifinomult modern fizikai mérés technikák kifejlesztéséig – kevésbé pontosan voltak mérhetőek, mint az ionizáló sugárzás, így a hatósági szabályozás sem sietett visszaszorításukra. (Hazánkban még sohasem rendeltek el szmogriadót, hatósági határérték túllépése esetén sem.) Az 1990-es években került a napisajtó, a tudományos világ, kormányok érdeklődési körébe az ultraibolya sugárzás ellen védő ózonréteg időszakos helyi megritkulása és a bőrrákos esetek számának (hazánkban is ijesztő mértékű) növekedése. A nemionizáló sugárzások detektálása szintén igényes fizikusi feladat, itt is meghatározandó *a biológiai kockázat kapcsolata a fizikai paraméterekkel*. (Az ionizáló és nemionizáló sugárzások hatásvizsgálata már akkreditált egyetemi doktori téma.)

Ez az 1990 táján kialakult helyzet teszi szükségessé *a sugárvédelem és általában a környezetvédelem objektív (kvantitatív, empirikus) tudományos megközelítését*. Ez igényli az MTA Fizikai Osztályának beavatkozását. Ez tette az MTA erkölcsi kötelességévé, hogy állást foglaljon olyan kérdésekben, mint a megengedhető lakossági sugárterhelés eurokonform jogi szabályozása, (radioaktív és kémiailag mérgező anyagokat tartalmazó) hulladék, salak, bányameddő elhelyezése. Az MTA országos tekintélyének köszönhető módon e területeken ismételten kikérték az MTA állásfoglalását, amire az MTA elnöke pozitívan reagált.

Az első atomerőművet a Szovjetunióban katonai technikára támaszkodva építették. De a szovjet atomerőművek ellen a Nyugat (elsősorban az atombombát bevető Amerika) fenntartásokat hangoztat. Ennek egyik oka a két

rendszer stíluskülönbsége. A Szovjetunió a biztonságot túlméretezéssel (nehézipar), Amerika csúcstechnikával (elektronika) valósította meg. Nemzeti érdek az orosz gyártmányú VVER (*vízzel-moderált, vízzel-hűtött energia-termelő reaktorok*) biztonsági ellenőrzése nyugati normák szerint, nyugati módszerekkel. Ahol minden rendben van, arról meg kell győzni a Nyugatot (sőt a magyar társadalmat is). Ahol pedig még lehet és kell javítani, azt el kell végezni. Ezt a felülvizsgálatot nem (csak) paksi alkalmazottaknak kell elvégezniük, mert náluk esetleg fölemlergethető üzleti összefonódás, hanem független szakértőknek, akik például az MTA-nak felelősek, és akiknek a Nemzetközi Atomenergia Ügynökséget is meg kell győzniük. Mivel a két biztonsági filozófia különböző nyelven beszél, a megfogalmazott feladat elvégzéséhez az atomerőmű működésének mindenhol feltétlenül elfogadott *objektív fizikai alapjaitól kell kiindulni*.

A felsorolt esetek, példák, célzások nem íróasztalnál kiagyalt történetek, hanem hazai gyakorlatunkban fölmerült, valósan megoldandó problémák. Abban bízunk, hogy (hidegháborúk, tudományt megfizető katonai rendelkezések múltán) az Akadémia és annak XI. Osztálya jobban odafigyel a *tudomány, a gazdaság és a társadalom dialógusára*. Ezt a figyelmet tükröznie kell az Akadémia interdiszciplináris, pályázati, akkreditációs politikájának is.

Sugárvédelem

A sugárvédelemnek – és általában a magfizikai eredmények tudományos-társadalmi hasznosításának – szép hagyományai vannak hazánkban. A radioaktivitás kutatását a századelőn vezette be Hevesi György a budapesti tudományegyetemen, itt lett a fizika professzora. Itt született meg a *radioaktív nyomjelzés* gondolata, amit később – a Nobel-díj elnyerése után – Stockholmban biológiai és orvostudományi kutatásaiban alkalmazott. A század közepén Bozóky László hozta el Budapestre a *sugárterápiát*. A lakosság természetes sugárterhelésével foglalkozva Szalay Sándor mérte az Eger környéki vizek *radontartalmát*, majd a felszíni természetes radioaktivitás eloszlásának földrajzi anomáliái vezették az uránérckutatáshoz és *dunántúli szenek nagy urántartalmának* felismeréséhez.

A sugárvédelem az *ionizáló sugárzások* kutatásával (mérésével, hatásaival, árnyékolásával), valamint az ember ellenük való védelmével foglalkozik. A bevezetőben mondtak szemléltetik a sugárvédelem mint diszciplína különleges helyzetét. Az MTA XI. Osztálya Sugárvédelmi Munkabizottságának vannak magasan minősített vegyész, mérnök és orvos tagjai is. Ezért tartunk rendszeres kapcsolatot a VI. Osztály Energetikai Bizottságával, a VII. Osztály Radiokémiai Bizottságával és a VIII. Osztály Biofizikai Bizottságával és Környezet-egészségügyi Bizottságával.

A sugárvédelemnek egzakt természettudományi alapokra kell épülnie, hogy hitele legyen. (Amerikában használt elnevezése: *health physics*, *egészségügyi fizika*). Javarást fizikusi méréstechnikát alkalmaz, a felmerülő problémák azonban összetetten fizikai-kémiai-geológiai-biológiai jellegűek, végső céljaik már az orvostudomány területére esnek, a döntéseknek pedig súlyos műszaki-gazdasági következményei vannak. Társadalmi megvalósításuk a jogalkotás, közegészségügy, államigazgatás, pedagógia feladata lesz.

A sugárvédelem *nemzetközi diszciplína*, ugyanekkor bizonyos értelemben „*nemzeti tudomány*”, mert nemzeti feladatot lát el, akárcsak a földrajz, agronómia, geológia, régészet, történelem- és irodalomtudomány vagy a reaktorbiztonság. Hogy a *salakbeton-építkezésnek a Dunántúl szénbányáinak és szénérőműveinek környékén milyen sugár-egészségügyi hatásai vannak*, hogy használható-e a tatabányai általános iskola „sugárzó” épülete, azt ismernünk kell, az foglalkoztatja a napilapokat, de nem feltétlenül érdekli a *Physical Review* szerkesztőit, nem feltétlenül vonzza majd a *Science Citation Index*ben felsorolt külföldi hivatkozások százait. A feladatot az Akadémiának mégis vállalnia, annak teljesítését pedig méltányolnia kell. Például amikor a radioaktív hulladék elhelyezésére kiszemelt Üveghuta térségének polgármesterei az MTA elnökéhez fordultak, a Paksi Atomerőmű Rt. megbízásából dolgozó szakértők jelentésének és következtetéseinek független véleményezését kérték. Az MTA elnöke fizikus-geológus-mérnök összetételű bizottságot hozott létre, amely azóta – sok száz mérési adat alapján – (az említett szakértőknek nem ellentmondó, de azokat kiegészítő) nem triviális következtetésekre jutott. A fizika és biológia egymásrautaltságát jelzi például az is, hogy hazánkban vizsgálják: mi a biológiai (mikrobális) korrózió szerepe a nukleáris hulladék-tárolóban.

Szembe kell néznünk azzal az 1990-es években tudatosult ténnyel, hogy a magyar lakosságot a legnagyobb sugárterhelés saját hálózobájában éri, nem az atomerőművektől, nem is a nukleáris balesetektől és atomfegyver-kísérletektől. (Utóbbiaknak a járuléka jelentősebb az előbbieknél.) A *lakossági sugárterhelésnek mintegy fele (vagy még nagyobb hányada) a talajból a házakba beszivárgó radioaktív radongáztól (és annak bomlástermékeitől) származik*. A talajból származó természetes eredetű radongáz feldúsul szellőztelen („energiatakarékos” nyílászárókkal védett) lakásokban: koncentrációja a külső levegőhöz képest akár több mint százszorosra is növekedhet. Ennek a radonnal kapcsolatos lakossági sugárterhelésnek több száz településre, tízezer-nél több lakásra, ötvenezernél több – nemzetközileg igazoltan pontos – helyszíni mérésre kiterjedő hazai felmérése az utóbbi 5 esztendő eredménye. A fizikatanárok által megtalált néhány egészen magas (atomerőműben megtűrt korlátokat meghaladó) dózisszintű falusi lakásban a mentesítést itthon is megvalósították, mégpedig példaértékű eredményességgel, de az általános gyakorlat közigazgatási-jogi háttérének megteremtése még várat magára.

Nemzetközi jogi ajánlás szigorúan megmondja, hogy mekkora lehet a nukleáris létesítménytől eredő, lakosságot érő dózistöbblet. Ez összemérhető a természetes sugárzási háttér *megváltozásával*, amit az is okozhat, hogy egyik faluból a másikba vagy emeletről a földszintre költözünk. A Paksi Atomerőmű környezetében a lakossági *dózistöbblet* az előírt határérték ezredénél is kisebb.

A Mohi Atomerőmű indulása előtt a hozzá közel eső észak-magyarországi vidéken felmérték a különböző radioaktív izotópok koncentrációit, hogy később ehhez a zérusszinthez lehessen viszonyítani a Mohi Atomerőmű hosszabb működése után kialakult helyzetet. Ezzel egy időben mérték ugyanezen izotópkoncentrációkat a Paksi Atomerőmű környezetében is. *Figyelemre méltó eredmény, hogy a Paksi Atomerőmű 15 éves működése után a radioizotópeloszlás nem különbözik a még nem érintett természetes észak-magyarországi eloszlástól.* A radioaktivitás zérusszint-felmérése megtörtént Üveghuta környékén a lakóházakban, a radioaktív hulladék tervezett mélységi elhelyezése előtt. Ez a jövőben szintén viszonyítási alapul szolgálhat.

Magyarországon mintegy 12 ezer ember dolgozik sugárveszélyesnek minősített munkahelyeken. Átlagos sugárterhelésük kisebb, mint a természetes sugárterhelésből adódó háttér. De esetleges balesetre gondolva foglalkoznak az alkalmilag kapott sugárdózis utólagos rekonstruálásának metodikájával, valamint a radioaktivitás feltételezett kiszabadulása esetén (pl. exponált élelmiszerekre is gondolva) a sugárterhelés optimalizálásával.

A belső sugárterhelés meghatározása, így a belélegzett és tüdőben fennakadó (radonbomlásra és levegőszennyezettségre visszavezethetően radioaktív) aeroszol tanulmányozása (mérése és modellezése) terén is lényeges hazai eredmények születtek. Megkezdődött az ionizáló sugárzás hatásának molekuláris (génszinten történő) vizsgálata is. A hazai (gyógyhatású) barlangokban lényegében befejeződött a levegő aeroszoltartalmának, radioaktivitásának szezonális fölmérése.

Az is a hazai sugárvédelmi kultúra színvonalának nemzetközi elismertséget jelzi, hogy (keleti és nyugati építésű) újrjárművekben is mind többször használnak magyar fejlesztésű pehelykönnyű dozimétert (pille).

A sugárvédelmi kutatás nemzetközi homlokterében jelenleg az a probléma áll, hogy az egészségi kockázat arányos-e a dózis nagyságával (ahogy a jelenleg érvényes nemzetközi jogszabályozás kimondja), vagy pedig alacsony dózisok fizikokémiai hatását képes-e kivédeni az emberi szervezet immunrendszere. E téren magyar kutatók is értek el olyan eredményeket, amelyek nemzetközi figyelmet érdemelnek, mind sejtenyészetben (in vitro), mind élő állatokon (in vivo), mind emberek esetén a természetes sugárterhelések kimérésével és rákgyakorisággal történő egybevetésével genetika, életmód és kémiai szennyezettség szempontjából homogén mintán (in societate). Jó volna tudni, hogy érdemes-e milliárdokat költeni földszintes falusi lakások radonmentesítésére, az

atomerőmű környékének hipertisztán tartására, az atomhulladék bomba- és „bolondbiztos” eltemetésére, ha *egy (nem is túl alacsony) küszöb alatt a szervezet maga is ellátja önmaga védelmét*, mert ezt mutatják a (statisztikailag nagyon szignifikáns) külföldi és hazai eredmények. (Ne feledjük, hogy a földkéregben néhány milliárd éve több volt a radioaktív anyag, az élet pedig akkor fejlődött ki.)

A *kis dózisok kockázatára vonatkozó* új (statisztikailag szignifikáns) kutatási eredmények ellentmondanak a sugárvédelmi szabályozásban elfogadott és műszakilag követett *kockázat/dózis* arányosságnak, ez pedig a sugárvédelmi szabályozás filozófiájának új alapokra történő helyezését, a jelen gyakorlat megváltoztatását igényli. Tudományosan indokoltnak tűnik, hogy valamennyi – természetes vagy mesterséges, ionizáló vagy más – egyéni egészségterhelést nemcsak a *dózis*, hanem a várható *kockázat* értéke szerint korlátozzuk. Szerencsére az utóbbi években gyakorlattá vált, hogy az atomenergiával, sugárvédelemmel és környezetvédelemmel kapcsolatos rendelettervezeteket véleményezésre megküldik az Akadémiának is.

A dózisterhelések közt – pl. a komputertomográfiai vizsgálatok terjedésével – előkelő helyet foglal el az *orvosi sugárterhelés*, az a legfejlettebb országokban a legmagasabb egyéni dóziszjárulékká kezd válni. Meghatározására (így a *haszon/kockázat* mérlegelésére) fizikai adatokat kell mérni, műszaki paramétereket kell elemezni.

Ez is mutatja, hogy milyen aktuális tudományos és társadalmi feladat a *változó trendek* (az orvosi, illetve energiatakarékossági programokból adódó dózisznövekedés) figyelemmel követése.

A sugárvédelem területén végzett hazai szolgáltatómunka eredményeinek számottevő része (részben bizalmas) magyar nyelvű jelentésekben, jelentéskötetekben lát napvilágot. De a sugárvédelem területén hazánkban végzett *tudományos kutatás* a XI. Osztálynak (az MTA több más osztályánál szigorúbb) mércéjével mérve is figyelmet érdemel: *a sugárvédelemről az elmúlt öt évben száznál több tudományos közlemény jelent meg lektorált angol nyelvű folyóiratokban*. Az International Radiation Protection Association (Nemzetközi Sugárvédelmi Társaság) közreműködésével 1999-ben hazánkban rendezték meg a Közép-európai Regionális Sugárvédelmi Konferenciát. Talán az sem véletlen, hogy ezekben az években magyar előadókat hívtak meg Japánba, Indiába, Amerikába (Los Alamosba és Livermore-ba is), és hogy magyar módszert vesznek át és vesznek meg Kaliforniában (Berkeley). Tudomásul kell tehát vennünk e diszciplína különleges helyzetét: *interdiszciplináris* voltát, részben *nemzeti program* jellegét, a *tudomány (ezen belül a fizika) gazdasági-társadalmi szerepének* direkt bemutatását és *fokozódó nemzetközi aktualitását*. (Erőmű-alternatívák, nukleáris hulladékelhelyezés, orvosi röntgenkészülék-parkunk modernizálása, hazai sugárterápia kiterjesztése.)

Környezetfizika

A környezetfizika szemlélete, mérés technikája nagymértékben a sugárvédelemből fejlődött ki. Az ionizáló sugárzások hatása ellen való védekezésről fentebb mondtak nagymértékben érvényesek a *környezetfizika* többi fejezetére is. A *környezetfizika képezi a környezetvédelem kvantitatív alapját*. Tárgya olyan fizikai elvek és módszerek kidolgozása, amelyek lehetővé teszik a környezet állapotát jellemző paraméterek mérését, a károsító tényező terjedésének előrejelzését, a várható biológiai (ökológiai, humán) kockázat becslését.

Minden környezeti (radiológiai, kémiai, biológiai) környezetkárosodásnál szembe kell nézni azzal a publicisztikai fölfogással, hogy *amit mérni lehet – amit tehát egy pozitív számmal vagyunk képesek jellemezni –, az veszélyes. Amit nem mérnek – nem tudnak vagy nem akarnak mérni –, az veszélytelen*. Mivel pedig a *fizikusok szolgáltatják a legpontosabb mérés technikát*, „környezetvédő” mozgalmak és a publicisztika hajlandók a fizikát ültetni a vádlottak padjára. A környezeti problémák empirikus, racionális, kvantitatív kezelésére alapozott környezeti kultúra megteremtéséhez ezért kell fizikusoknak, alkalmazott fizikusoknak, fizikatanároknak, fizikanepszerűsítőknak is hozzájárulniuk. E téren jó munkakapcsolat alakult ki az MTA Földtudományi Osztályának, Kémiai Osztályának és Fizikai Osztályának megfelelő szervei között.

Hazánkban évente tízezerre tehető a kémiai jellegű levegőszennyezés áldozatainak a száma. Ezért számunkra is egyre fontosabbá vált a levegőminőséget jellemző paraméterek (összetétel, szerves és szervetlen szennyezések, aeroszoltartalom) alapértékének meghatározása, a meteorológiai hatások, városi közlekedés, fosszilis tüzelőanyagot használó erőművek működése következtében beálló változásának nyomon követése. A nehézfém-szennyezettséget (pl. ólom, higany) legpontosabban (akár billiomodrésznyi precizitással) atomfizikai mérőeszközökkel (plazmaindukciós atomemissziós spektroszkópiával, illetve röntgen-fluoreszcenciával) hazánkban is nyomon követik. A lebegő por (aeroszol) forrásainak, regionális összetételének, transzportjának, ülepedésének empirikus figyelemmel kísérése lehetővé teszi a statisztikus transzportelméleti modellek alkalmazását egy kiválasztott helyszín levegőminőségi elemzésére.

Gyors neutronok és az általuk kiváltott kemény γ -fotonok nagy áthatoló képessége lehetővé teszi kiterjedt anyagminták (sok kg súly, sok m^3 térfogat) roncsolásmentes, *on-line* kémiai elemzését a szórt neutronok és keltett γ -fotonok sűrűség- és energiaspektrumának mérésével. A keresett elem észlelhetőségét a választott magreakció gerjesztési függvényének és a használt neutronspektrumnak a szorzata határozza meg. Hazánkban mind radioaktív neutronforrásból (Pu-Be, Cf), mind gyorsító neutrongenerátorból nyert neutronokkal végeznek ilyen méréseket a Nemzetközi Atomenergia Ügynökséggel, az USA Energiaügyi Minisztériumával (Department of Energy) való

kooperációban és MTA-Japán Akadémia együttműködésében. E neutronfizikai módszer főbb alkalmazási területei:

- Erőművi szerekben a hidrogén, szén, nitrogén és oxigén (H, C, N, O) mennyisége a *fűtőértékre*, kén és klór a *környezetszennyező hatásra*, a szilícium, kalcium és a vas a *hamutartalomra* vonatkozólag ad felvilágosítást.
- Szállító konténerekben a H, C, N, O arányok mérésével meghatározhatók a C/O, C/N, N/O arányok, mert ezek az *arányok veszélyes és tiltott anyagokban* (robbanószer, kábítószer) *szignifikánsan különböznek a rejtőanyagra jellemző arányoktól*, így az eltérés elárulja a veszélyes és tiltott anyagok jelenlétét és helyét.
- Talajokban a mélységi érzékenység meghatározása után a *mérgező arzén-, kadmium-, higany-, ólomtartalom* (As, Cd, Hg, Pb) mérhető meg.

Az életszínvonal-emelkedés és az amerikai szépségideál hozta magával a napfény (napfürdő, barnulás, szolárium) imádatát. De vele párhuzamosan, az utolsó évtizedben fény derült a (biológiailag káros) ultraibolya-B sugárzás bőrrákot és szemhomályt kiváltó hatására is. És arra, hogy ez az ózonlyuk kiterjedése miatt hazánkban is fenyegeti a strandolókat, már eddig is a bőrrákos esetek megduplázódását (huszonéveseknél megháromszorozódását) eredményezve. Mindeme fenyegetés mögött a hűtőszekrények, légkondicionálók, habszivacsgyárak által használt (fluor- és klórtartalmú szénhidrogének) légkörkémiái hatása rejlik. A probléma megértésének és megoldásának útja ismét a jelenség szubmolekuláris megértésétől a hatások mérésén át az orvosi gyakorlatig, sőt azon túl a pedagógiáig ível. El kell mondanunk, hogy Budapesten dolgozták ki az ultraibolya-B (UV-B) sugárzás mérésének legközvetlenebb módszerét, ami a biológiai DNS-molekulához hasonló *poliuracil molekuláris sérüléseinek spektroszkópiai kimutatásán* alapul. Ezt a módszert magyar kutatók Európa-szerte és Afrikában is tesztelték, s az nagy nemzetközi elismerést váltott ki. Így lehetővé válik személyi UV-B doziméterek kifejlesztése is.

Hazánkban is vizsgálják, károsítja-e az idegrendszer működését a rádiótelefonokból és azok központi antennáiból származó *rádiófrekvenciás sugárzás*, szükséges-e dozimetriai rendszer kifejlesztése és az elfogadható dózisi jogi szabályozása.

Utoljára szóljunk a 21. század talán legfenyegetőbb globális környezeti problémájáról: az ember által felfokozott *léggöri üvegházhatás éghajlatot instabilizáló-megváltoztató szerepéről*. A talaj infravörös kisugárzását visszartartják a léggöri szén-dioxid és más, az ipar által termelt gázok molekulái, ami évtizedek folyamán globális fölmelegedésre, a trópusokon fokozott párolgásra, intenzívebb globális vízkörforgásra, váratlan szárazságok és felhőszakadások bekövetkeztére vezet. (Erre elsőként Neumann János számítógépes légkörmodelljei hívták föl a figyelmet.) Ez pedig olyan komplex láncolat, aminek mélyén a fizika törvényei működnek. A tudomány feladata, hogy elmagyaráz-

za a döntéshozóknak (ha azok nem hallgatnak rá, a társadalomnak): mi az összefüggés a jelenlegi energia-árpolitika, a közlekedéspolitiká, az erőmű-politika, a fenyegető klíma-instabilitás, szélviharok, fokozott vízkörforgás, esőzés, belvizek és árvizek, valamint az ENSZ meg Európai Unió elvárásainak (vonatkozó hazai) teljesítése között.

A hazai kutatások eddig is nemzetközi figyelmet váltottak ki. Nemzetközi szervezetek hazánkban ismételten rendeztek konferenciát Közép-Európa környezetének állapotáról és a környezeti kultúra iskolai tanításáról. *Az elmúlt öt évben magyar kutatók száznál több tudományos közleményt jelentettek meg angol nyelven a lektorált folyóiratokban.* Az iskolai oktatásban is nemzetközi (IUPAP, UNESCO) figyelmet keltő kezdeményezéseket és eredményeket mondhatunk magunkénak. *Az elkövetkező években igazodnunk kell az Európai Unió természeti környezetre vonatkozó szigorú előírásaihoz.* Az EU 5. keretprogramja keretében környezettudományi kutatási programokat is megfogalmaztak, pl. *Környezet és egészség, Vízhűtés, Globális klímaváltozás* címmel.

Reaktorfizika

Az atomreaktor Szilárd Leó találmánya. A vízhűtésű teljesítményreaktort Wigner Jenő tervezte. Együtt kapták meg az Egyesült Nemzetek „Atom a békéért” díját, ami összegében túlszárnyalta a Nobel-díjat. Wigner Jenő, a világ első reaktormérnöke, a Wigner-tanítvány Alvin Weinberg, a vízzel lassító, vízzel hűtött reaktor ugyanígy díjazott megalkotója és Teller Ede, a reaktorbiztonság első szakértője, meglátogatták a Paksi Atomerőművet. (Teller ismerte fel a Csernobil-típusú urán-grafit-víz reaktorok belső instabilitását, azokat bezáratta Amerikában.) Wigner Jenő látogatásakor konstataulta a szovjet és amerikai reaktor stíluskülönbségét. Teller Ede első látogatása előtt elkérte Paks biztonsági rendszerének angol nyelvű leírását, azt látogatása előtt Kaliforniában szakértőivel véleményeztette, Paksra már kész kérdéslistával érkezett, ahol kérdéseire választ kapott. Így a Paksi Atomerőmű megbízhatóságának hirdetője lett itt, a magyar kormányoknál és tengerentúl is.

A Paksi Atomerőmű nyugati szempontból is méltányolt biztonságos és gazdaságos működésének megvalósítása nem volt triviális feladat. A szovjet katonai nukleáris technikára alapozva kifejlesztett paksi atomreaktorok már a KGST-reaktorvásárlások második menetében, az 1980-as években épültek meg (üzemzavar esetén a környéket a kiszabaduló radioaktivitástól megvédő lokalizációs toronnyal). De a modern reaktortervezés és reaktorfejlesztés kiterjedt számítógépes modellezést alkalmaz. (A fizikában ma már széles körben használt Monte Carlo-módszert is reaktorfizikusok fejlesztették ki Amerikában, de manapság alig van olyan kísérletes kutatási terület, ahol ne lehetne

alkalmazni.) A Szovjetunióban késett a számítógépes kultúra. Itthon fizikusok már 1958-ban hozzákezdtek a reaktorfizikai kutatások megszervezéséhez. Szubkritikus majd önfenntartó rendszerek épültek, amelyeken pontosabb módszert dolgoztak ki a fontos reaktorparaméterek empirikus meghatározására. Olyan tervező és ellenőrző programrendszert fejlesztettek ki, amely időben követni tudta a neutron-sűrűség változásait különböző energiatarományokban, a reaktor üzemanyagának kiegészését, és lehetővé teszi az atomerőmű működésének biztonsági, gazdasági, környezettisztasági optimalizálását.

Ez a számítógépprogram fizikai alaptörvényekre (magfizikában mért adatokra és Boltzmann-egyenletre) alapozva ab initio vezet el az atomerőmű műszaki működéséhez. A moduláris program közel millió utasításból épül fel. Fejlesztésében külföldi (nem publikus) programokkal szemben minőségi előrelépést jelentett a tárgyalt rendszer szimmetriáinak messzemenő kihasználása. Hazánkban mindmáig ez az egyik legnagyobb szabású számítástechnikai rendszer, amelyben számos eredeti megoldás van. Ezzel ellenőrizni lehet, hogy milyen beavatkozásra (vagy üzemzavarra) hogyan reagál a reaktor. *A mért neutronfluktuáció jól diagnosztizálja a reaktor neutronmezejének mindenkori állapotát.*

A program helyességét, realitását fizikusoknak itthon kellett ellenőrizniük kis teljesítményű, ezért tág határok közt szabadon manipulálható *zérusreaktoron*. A munka végeredménye kiemelkedő tudományos-műszaki alkotás és *nemzeti érték*.

E feladatokat magyar fizikusoknak kellett megoldaniuk. A reaktorfizika hazánkban négy évtizedes múltra tekint vissza. Reaktorfizikusaink munkájának eredménye, hogy ma a Paksi Atomerőművet (és a két budai reaktort) a világ reaktorbiztonsági szakértői (a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség is) nagyon jónak (az akkori KGST-területen kiemelkedőnek) ítélik. Amerikai kimutatás szerint a világ atomerőművei közül a paksi működött a megépülés óta eltelt idő legnagyobb hányadában. Folyamatban van a reaktoraink biztonságát tovább fokozó (hasonló nyugati programokkal párhuzamosan futó) munka.

Napjainkban gyorsan fejlődik a számítástechnika. Ezt ki kell használni a reaktorszimulációs program állandó fejlesztésére. A neutron-hatáskeresztmetszetek egyre pontosabb ismeretét követve folyamatosan fejleszteni kell ezt a programrendszert. Javítani lehet a közelítő módszereket, csökkenteni kell a szabad paraméterek számát. A szilárdtestfizikusok kidolgozták a termikus neutronok szórási magfüggvényét, amit be kell építeni a programrendszerbe. Keresni kell a ritka események kezelésére alkalmas eljárásokat. Manapság a reaktorbiztonság növelésének fontosnak ítélt része az ember-gép kapcsolat, ezért folytatni kell a hazánkban kifejlesztett üzemzavar-szimulációs kiképzőprogram tökéletesítését, valamint a reaktor-kontrollterem kijelzéseiinek áttekinthetőbbé tételét és egyszerűsítését.

Aktuális feladat a reaktorok várható élettartamának becslése, a reaktor-tartály sugárkárosodásának figyelemmel követése. Az atomtörvény megkívánja a használt fűtőanyagok elhelyezésének, a néhány évtized múlva használatból kivonandó reaktorok leszerelésének előkészítését. Ez sok más tudománnyal (geológia, kémia, meteorológia, biológia) érintkező, most beindult felelősségteljes tudományos feladat.

Hazánkban atomreaktorok szolgálják és segítik az anyagszerkezeti, geológiai, magfizikai, biológiai, orvostudományi kutatásokat. Magyar reaktorfizikusok munkájának nemzetközi elismerését jelzi, hogy magyar fizikus volt a berlini Hahn–Meitner Intézet tudományos tanácsának elnöke (itt fedezték fel a maghasadást). Magyar fizikus vezette 10 ország igényes *kísérleti zérusreaktor* programját. Magyar elnöke van az Európai Nukleáris Társaságnak. Magyar fizikus dolgozik Los Alamosban. (Magyar alatt most nemcsak magyar származást, hanem magyar állampolgárságot értve.) Reaktorfizika területén akadémiai doktori disszertációkat írtak és védtek meg a legutóbbi években is. Mérnök-, fizikus- és fizikatanár-hallgatók, tanártovábbképzés résztvevői rendszeresen tanulják, *használják* – tehát ismerik és nem félik – az atomreaktort. Megszületett a reaktorfizika magyar tankönyve, kiadását az Akadémia támogatja.

Mindezek mellett fontos érdek, hogy a Paksi Atomerőműnek (mint ipari létesítménynek) biztonsági ellenőrzését az atomerőműtől beosztásilag, főhátóságilag, anyagilag *független* intézmény lássa el. Akadémiánk megfelel ennek a nemzeti feladatnak. Nem kell szégyenkezni a nagy úttörők, Wigner és Teller előtt.

A kötet szerzői

- BALÁZS Lajos a fizikai tudomány kandidátusa, KLTE Szilárdtestfizikai Tanszék
- BEKE Dezső a fizikai tudomány doktora, KLTE Szilárdtestfizikai tanszék
- GLATZ Ferenc akadémikus, az MTA elnöke
- JANSZKY József a fizikai tudomány doktora, tudományos főosztályvezető, MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézete
- KERTÉSZ Ákos a fizikai tudomány doktora, egyetemi tanár, BME Fizikai Intézet
- KISS Árpád Zoltán a fizikai tudomány doktora, tudományos igazgatóhelyettes, MTA Atommagkutató Intézete
- LOVAS Rezső a fizikai tudomány doktora, igazgató, MTA Atommagkutató Intézete
- MARX György az MTA rendes tagja, professor emeritus (ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszék)
- ORMOS Pál az MTA levelező tagja, igazgató, MTA SZBK Biofizikai Intézet
- SZŐKEFALVI-NAGY Zoltán a fizikai tudomány doktora, MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet
- TOMPA Kálmán a fizikai tudomány doktora, MTA Szilárdtestfizikai Kutatóintézet

Ára: 440 Ft

