

**Magyar fizika:  
Három évtized kutatási eredményei (1989–2019)**

A dokumentumot az MTA Fizikai Tudományok Osztálya 2020. március 30. és április 2. között tartott titkos e-szavazással fogadta el.

(Szerkesztők: Faigel Gyula, Iglói Ferenc, Mihály György és Patkós András)

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés</b>	4
<b>I. Alapvető kölcsönhatások és részecskék: az atomok alatti méretektől a galaxisokig</b>	
1. A részecskefizika standard modelljének precíziós kísérleti igazolása, a Higgs-bozon felfedezése, a hozzávezető kísérleti és elméleti kutatások	5
2. A részecskefizika standard térelméletének megoldása téridő rácson	6
3. Atommagreakciók a laboratóriumtól a csillagokig	7
4. Fekete lyukak, oszcillatonok, gravitációs monopólusok és társaik: a gravitációelmélet kutatása	8
5. A kvark-gluon plazma kísérleti és elméleti kutatása	8
6. A kétdimenziós modellvilág egzakt fizikájától a húrelméletig	9
<b>II. Atomi szintű kutatások</b>	
1. Röntgenmódszerek Röntgenholográfia Töltésalternáló módszer kifejlesztése az atomi szerkezet meghatározására Nagy felbontású keményröntgen-spektroszkópia és alkalmazása ultragyors folyamatok vizsgálatára	10
2. Szénalapú anyagok kutatása Fullerének Nanocsövek Grafén	13
3. Elektronrendszerek kvantummechanikája Mágneses nanoszerkezetek Szupravezetés, nanoelektronika Egzotikus mágneses anyagok Erősen korrelált kvantumrendszerek elmélete	15
4. Lézersugárzáson alapuló kutatások Döntött impulzusfront alkalmazása terahertzes impulzusok keltésére Nagyterű, attoszekundumos lézerek Csörpölt tükrök és femtoszekundumos impulzusok Atomok önszerveződése optikai rezonátorban szuperradiáns mintázatba	18

<b>III. Makroszkopikus fizika</b>	
1. Biológiai eredetű fotonikus nanoarchitektúrák	21
2. Diffúziós folyamatok leírása	22
3. Diszlokációk statisztikus térelmélete	22
4. Komplex megszilárdulási alakzatok	22
5. Mintázatképződés az egyensúlytól távoli struktúrákban	23
6. Nemegyensúlyi kvantumozott rendszerek	23
7. Spinűvegek és rendezetlen rendszerek	24
8. Nemlineáris dinamika és kaotikus jelenségek	24
9. Elektromos gázkisülések vizsgálata	24
<b>IV. Az Univerzum kutatása</b>	
1. Naprendszerkutatás űrszondákkal	27
2. Az SDSS égfelmérés	28
3. Infravörös-űrcsillagászat	28
4. Űrfotometria	28
5. Űrasszimetria	29
6. Gravitációs hullámok	30
<b>V. A fizika alkalmazása más tudományterületeken</b>	
1. Kollektív viselkedés a természetben és társadalomban	31
2. Hálózatok kutatása	32
3. Evolúciós játékelmélet	32
4. Kvantitatív gazdasági elemzés	33
<b>VI. Fizika a társadalomban: egészségügy, kultúra, technológia</b>	
1. Reaktorfizika és nukleáris adatok	34
2. Környezet- és sugárfizika	34
3. Lézeralkalmazások	35
4. Lézeres szemműtétek	35
5. Kulturális örökség	36
<b>Történeti fontosságú intézmény- és iskolateremtő személyiségek</b>	37
<b>Monográfiák, tankönyvek</b>	38
<b>Hivatkozások</b>	40

## Bevezetés

A tudomány és technika fejlődése egyre gyorsuló tendenciát mutat. Az emberiség által mára felhalmozott tudásanyag hatalmas, ehhez minden ország a saját erejéhez mérten járul hozzá. A jelen összeállítás célja, hogy szemelvényeket mutasson be a fizika területén az utóbbi 30 évben Magyarországon elért legfontosabb eredményekből. Az alábbi ismertetés csak egy töredékét mutatja be a hazánkban folyó ilyen kutatásoknak. Olyan eredményeket választottunk ki, amelyek, jelentős nemzetközi visszhangot váltottak ki, ugyanakkor viszonylag egyszerűen, közérthető formában megfogalmazhatók. A három évtizedet átfogó válogatás értelemszerűen nem tartalmazza az utóbbi évek néhány olyan jelentős hazai eredményét, melyek hivatkozottságban mérhető visszhangja csak ezután válik számszerűsíthetővé.

A természettudományos kutatások célja a természet alapvető törvényszerűségeinek feltárása, a természeti törvények megértése. Erre a tudásra épülnek az olyan gyakorlati megoldások, innovációk, amelyek hozzájárulnak az emberiség életkörülményeinek javításához. Az anyag különböző szerveződési szintjeinek megfelelően alakultak ki az egyes diszciplínák, mint pl. a fizika, kémia, biológia, orvostudomány. A fizika az anyag legalapvetőbb tulajdonságainak megértését célozza meg, és megalapozza az anyag magasabb szerveződési formáinak vizsgálatát, ami a többi természettudományos diszciplína területe. Fontos megemlíteni, hogy minden kutatás számára elengedhetetlen eszköz a matematika, amely lehetővé teszi a megismert törvényszerűségek pontos leírását, absztrakt módon való megfogalmazását.

A fizika az anyagi világ teljes méret- és időskáláját vizsgálja az atommagok alatti legkisebb méretektől a Világegyetem legtávolabbi objektumainak megfelelő távolságokig, illetve a nagyon rövid időintervallumoktól a Világegyetem teljes életkoráig. Jelen bemutatóban azt az elvet követtük, hogy az eredményeket a méretskálák szerint csoportosítva mutatjuk be.

A fizikában általában a természeti jelenségek megfigyelő megismerését, majd szabályozott körülmények közötti reprodukálását célzó, kíváncsiságvezérelt kutatásokat végzünk. A kutatások vezérelve az a törekvés, hogy a természetet alapelveiben egységesen és ellentmondásmentesen írjuk le. A mindennapos gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a kutató a fizikatörténet eredményeivel folyamatosan szembesítve tanulmányozza, figyeli a kortárs kutatók eredményeit, igyekszik ezeket teljesen új, még fel nem fedezett ismeretekkel, szabályokkal kiegészíteni, és saját alkotását a fizika felhalmozott ismeretanyagával összhangba hozni. A természet törvényszerűségeinek egyre jobb megismerésével, természetes és teremtett környezetünk egyre több folyamatát tudjuk követni, változásait előre jelezni, új eszközöket alkotva szabályozottan befolyásolni.

A kíváncsiság- és megismerésvezérelt kutatások általában hosszú távon és nem mindig közvetlenül a gazdasági szférában térülnek meg. Egy adott eredményről gyakran nem lehet előre megmondani, hogy mikor kerül hasznosításra, egy kreatív ötlet milyen innovációt alapoz meg. Mindemellett, szeretnénk kiemelni a fizikai kutatásoknak a gazdaságra gyakorolt hatását. Az Európai Fizikai Társulat megbízásából végzett két felmérésből\* kiderül, hogy az Európai Unió gazdaságának 16%-a „fizikaalapú iparon” nyugszik. Ennek a ténynek az a társadalmi üzenete, hogy a gazdasági haladáshoz, ipari innovációhoz is elengedhetetlen a fizika és általában a természettudományok oktatása, a kutatások támogatása.

\* The Importance of Physics to the Economics of Europe, A study by Cebr for the period 2011-2016, Cebr – Centre for Economics and Business Research for the European Physical Society, 22 October 2019, [https://www.eps.org/resource/resmgr/policy/eps\\_pp\\_physics\\_ecov5\\_full.pdf](https://www.eps.org/resource/resmgr/policy/eps_pp_physics_ecov5_full.pdf), vezetői összefoglalóját lásd: [https://www.eps.org/resource/resmgr/policy/eps\\_pp\\_physics\\_ecov5\\_abs.pdf](https://www.eps.org/resource/resmgr/policy/eps_pp_physics_ecov5_abs.pdf).

A jelentés korábbi változatát lásd: <https://cebr.com/reports/economic-importance-of-physics>

# I. Alapvető kölcsönhatások és részecskék: az atomok alatti méretektől a galaxisokig

A természeti jelenségek teljességét meghatározó alapvető kölcsönhatások megismerése utáni két évezrednyi vágyakozás a modern kísérleti adatokból leszűrt információk révén a XX. század utolsó harmadára egységes matematikai megfogalmazású fizikai modellé csiszolódott. Az elmúlt negyedszázadban felfedezték a modell építőkövei közül még hiányzó t-kvarkot (1994) és a Higgs-részecskét (2012). Kísérletekkel és szuperszámítógépes szimulációkkal hihetetlen pontosságú igazolását adták az elemi részecskék kölcsönhatási törvényeit összefoglaló elektrogyenge és kvantum-kromodinamikai elméletnek. A nukleonok között ható erők egyre pontosabb dinamikai vizsgálatával jelentős előrelépést tettek az atommagok szerkezetének megismerésében, a földi környezetet és az embert alkotó nehéz elemek kozmikus eredetének feltárásában.

A XXI. század hasonlóan drámai előrelépést ígér a legrégebben ismert, ám legréjtélyesebb természetű alapvető kölcsönhatás, a gravitáció megismerésében. Az einsteini-newtoni gravitációelmélet megoldásai között jósolt, korábban a fantasztikumok világába sorolt kuriózumok, például neutroncsillagok és fekete lyukak a század első negyedében már a Világegyetemben nagy számban előforduló, megfigyelésekkel részletesen megismerhető természeti objektumokként jelennek meg a kutatási stratégiákban. Elméleti fizikai tanulmányozásukban egyre inkább a megfigyelésekkel ellenőrizhető jóslatok kapnak hangsúlyt.

A Világegyetem ősrobbanást követő egyik legkorábbi történeti szakaszának, a szabad kvarkok és erőterek alkotta plazmafázisnak a földi kísérleti létrehozásában és tulajdonságainak megismerésében is jelentős sikereket értek el a kutatók.

Az alapvető kölcsönhatási jelenségek kvantitatív értelmezésének kizárólagos módszere a folyamatosan megújuló kvantumtérelméleti eljárások alkalmazása. E módszerek fejlesztésében fontos szerepe van az egyszerűsített modellvilágok egzakt tárgyalásának. A vizsgálatok izgalmas közvetlen eredményeként ígéretes lehetőségek nyíltak meg az összes alapvető kölcsönhatást egységes elméletté egyesítő ún. húrelméleti modellek megoldására.

## I.1. A részecskefizika standard modelljének precíziós kísérleti igazolása, a Higgs-bozon felfedezése, a hozzá vezető kísérleti és elméleti kutatások

A részecskefizika standard modellje szerint az anyagot kvarkok és leptonok (köztük az elektron) építik fel, és a köztük ható erőket mezők közvetítik (a mindennapokban jól ismert az elektromágneses mező, melynek szemmel látható megnyilvánulása a fotonokból álló fény). A modell középpontjában a Brout–Englert–Higgs-mechanizmus áll, amely megmagyarázza az elemi részecskék tömegének eredetét, és megjósolja egy új nehéz skalár részecske, a Higgs-bozon létét.

Az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet (CERN) két óriási gyorsítója a Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető (LEP, 1989–2000) és a 2009 óta adatokat szolgáltatató Nagy Hadronütköztető (LHC) egyik fő célja a standard modell kísérleti ellenőrzése és a Higgs-bozon felfedezése volt. Magyar kutatók jelentős szerepet játszottak a LEP L3- és OPAL-, majd az LHC ATLAS- és CMS-kísérletek adatgyűjtő eszközeinek építésében és működtetésében, valamint az adatok kiértékelésében és az eredmények értelmezésében.



1. kép

*Az LHC CMS észlelőrendszerének magyar kutatók által készített detektorelemei (a hadronkaloriméter szeletei) beszerelésre várnak a CERN-ben.*

Az MTA Atomki és az MTA RMKI kutatói a LEP-kísérletben az elektronok és antirészecskék ütközési megsemmisülésekor születő, a gyenge nukleáris kölcsönhatást közvetítő Z- és W-bozonok tulajdonságait [P1, P2] és az erős kölcsönhatást tanulmányozták. Egyre kisebb bizonytalanságot megengedő korlátok közé szorították a standard modellel nem tisztázott kérdéseket (például a sötét anyag mibenlétének rejtélyét) megoldani igyekvő kiterjesztett elméletek, közöttük a szuperszimmetriát [P3, P4], illetve új térbeli dimenziókat [P1, P2] feltételező modellek lehetséges tulajdonságait.

Az LHC nagy energiájú protonokat ütköztet. A mérések értelmezéséhez jól kell ismernünk a protonok alkotórészeit, a kvarkok és az őket összetartó gluonok között ható erős kölcsönhatást. A Debreceni Egyetem kutatói meghatározó módon hozzájárultak a protonütközések elméleti leírásához [P5, P6], valamint a keletkező részecskék tulajdonságainak kísérleti vizsgálatához. Magyar kutatók munkája vezetett a CMS első tudományos közleményéhez [P7]. A Higgs-bozon 2012-es kísérleti kimutatása az LHC ütközéseiben [P8, P9] megkoronázta az elméleti és kísérleti erőfeszítéseket [P10]. Ez a felfedezés nem történhetett volna meg a komplex detektorrendszer [P11] megépítése nélkül. A magyar fizikusok a CMS műondetektorai helyzetmeghatározó rendszerének, a belső nyomkövető detektorának és a hadronkaloriméter nyalábhoz közeli elemeinek megépítéséhez és kalibrációjához járultak hozzá.

## **I.2. A részecskefizika standard térelméletének megoldása téridőrácsan**

A részecskefizika standard modellje nagyon pontosan leírja az elemi részecskék kölcsönhatásait. Bár a standard modell egyenleteinek megoldása sok esetben lehetséges analitikus módszerekkel, vannak olyan jelenségek, melyek megértéséhez ez nem elegendő, csak az egyenletek numerikus megoldásán alapuló rácstérelmélet nyújthat segítséget. Ennek során a részecskéket leíró mezőket csak a téridő diszkrét pontjaiban, egy rácson értelmezzük, majd a rácsra leszűkített egyenleteket szuperszámítógépek segítségével numerikusan megoldjuk. Magyar kutatók több generációja az 1980-as évektől kezdődően több évtizeden át jelentősen hozzájárult e tudományterület fejlődéséhez.

Nemzetközi együttműködések tagjaiként az ELTE kutatói elsők között ismerték fel, hogy rácstérelmélet segítségével vizsgálható a korai Világegyetemnek az a pillanata, amikor az elemi részecskék a Higgs-mezőnek köszönhetően tömeget kaptak [P12]. Ennek kapcsán sikerült megmutatni, hogy a Higgs-részecske nagy tömege miatt a standard modell nem tudja a világban megfigyelhető anyag-antianyag aszimmetriát megmagyarázni, létrejöttének megértéséhez új fizikára van szükség [P13].



Ahogy a Világegyetem tovább tágult, a kezdetben majdnem szabad kvarkokból és gluonokból létrejöttek az atommagot alkotó protonok és neutronok. Az ELTE kutatóinak meghatározó részvételével bebizonyították, hogy ez az átmenet folytonosan történt [P14], és megmutatták, hogy a proton tömegét helyesen megkaphatjuk az azt alkotó kvarkok és gluonok erős kölcsönhatásának pontos leírásával [P15]. A rácstérelmélet segítségével feltérképezték a standard modell olyan lehetséges kiterjesztéseit, melyekben a Higgs-bozon nem elemi, hanem összetett részecske [P16].

### I.3. Atommag-reakciók a laboratóriumtól a csillagokig

Atommagok különleges deformációjú, speciális tengelyaránynak megfelelő állapotait mutatták ki [N1], illetve jósolták és találták meg az Atomki berendezésein és hazai kezdeményezésű kísérletekben külföldön [N2, N3, N4]. Feltárták az atommagok egy új szimmetriáját, amely magyarázhatja az egzotikus magalakok megjelenését. Szintén jelentős részben az Atomkiból származó ötlet alapján pontosították a maganyag állapotegyenletét [N5]. Először mutatták ki neutrongazdag bór- és szénizotópokban a magtörzsről lecsatolódtott valencianeutronok meghatározó szerepét [N6, N7]. Kvantitatív magyarázatot adtak atommagok klasszikus alfa-bomlására [N8] és nemrég felismert proton-radioaktivitására [N9]. Radioaktív nyalábokat (GANIL, RIKEN) használva először mutatták meg, hogy az atommagok szerkezetét meghatározó héjstruktúra nagy neutronszámok esetén átrendeződik [N10, N11]. A héjmodell-leírást megújították, bevezetve a Gamow-héjmodellt, mellyel rezonanciaállapotok is kezelhetők [N12].

Az Atomkiben kifejlesztett berendezések felhasználásával a  $^8\text{Be}$  atommag legerjesztődése során az 5 millió voltos Van de Graaff-gyorsítón, majd az új Tandetron gyorsítón végzett kísérletekben egy új részecske keletkezéseként értelmezhető eseményeket regisztráltak [N13]. Ez a részecske az alapvető kölcsönhatások jelenlegi elméletének kiegészítését kívánna, ezért a felfedezés független ellenőrzésének jelentősége túlmutat a magfizika keretein.



2. kép

*Az Atomki új, tandem elven működő gyorsítója*

Az Atomki infrastruktúrájának és úttörő kísérleti eljárások alkalmazásával ERC-támogatású projekt keretében szisztematikusan vizsgálták a vasnál nehezebb protongazdag izotópokat termelő magreakciókat [N14]. Ezek az eredmények jelentősen hozzájárultak a szupernóva-robbanásokban lejátszódó elemkeletkezés megértéséhez. A LUNA együttműködés keretében a világon egyedülálló mély földalatti gyorsítóval végzett mérések a Napban zajló magfizikai folyamatok fontos részleteire világítottak rá [N15, N16].

#### **I.4. Fekete lyukak, oszcillatonok, gravitációs monopólusok és társaik: a gravitációelmélet kutatása**

A megfigyelésekkel sokszorosán ellenőrzött általános relativitáselmélet szerint a téridő görbülete játssza a gravitáció szerepét. A görbület térben és időben terjedő kis változásai a gravitációs hullámok. Felfedezésük megnyitotta az utat a fekete lyukak dinamikájának megfigyelésekkel történő tanulmányozásához. Az ELTE kutatói elemezték a galaxismagokban feltételezhetően nagy gyakorisággal előforduló [P17], továbbá az excentrikus pályán egymáshoz közelítő feketelyuk-kettősök sugárzásának sajátosságait. Modellezték egy szupernagy tömegű fekete lyuk gravitációs sugárzásának visszahatását környezetének anyageloszlására [P18]. Az MTA RMKI és az SZTE kutatói kiszámították a pályák elliptikus jellegének és a fekete lyukak spinjének hatását a kettősök pályafejlődésére és gravitációs sugárzására, valamint elsőként azonosították egy fekete lyuk spinjét nagyenergiás nyalábjának hosszú bázisvonalú interferometrikus rádiótérképéből [P19]. Az általános relativitáselmélet kozmológiai, feketelyuk és egyéb egzakt téridőinek elemzésében, valamint skalár mezők által alkotott oszcilláló szolitoncsillagok vizsgálatában az MTA RMKI elméleti fizikusai fontos eredményeket értek el [P20, P21]. Tanulmányozták a gravitáció időfejlődésének matematikai aspektusait és kvázilokális energia-impulzusát [P22, P23]. Az SZTE kutatója kiterjedt vizsgálatokat folytatott az Univerzum ismeretlen komponenseit magyarázó sötét energia és sötét anyag modelljei, valamint a magasabb dimenziós és skalár-tenzor gravitációelméletek területén [P24].

#### **I.5. A kvark-gluon plazma kísérleti és elméleti kutatása**

A kvarkanyag olyan ősi-új anyag, amelynek elméleti vizsgálatát a magfizika és a részecskefizika összefogásával, változatos matematikai módszerekkel, számítógépes szimulációkkal és numerikus számításokkal végzik, amelyben a magyar kutatók világszerte jelentős visszhangot kiváltó eredményeket értek el [NP1, NP2, NP3]. A kvarkanyag tulajdonságai kísérletileg a nagy energiájú nehézion-gyorsítókkal vizsgálhatók.

Az 1990-es években ezeket a kutatásokat a CERN eredményei határozták meg. E mérésekben az MTA RMKI és az ELTE kísérleti fizikusai is részt vettek. Megfigyelték, hogy a nehézion-ütközésekben keletkezett részecskék kollektív mozgást is végeznek [NP4]. Becsléseik szerint az ütközések elérhették az atommag anyagának „megolvasztásához” szükséges energiasűrűséget [NP5]. A nehézion-ütközések végállapotában megfigyelt részecskék számát az MTA RMKI kutatócsoportja a kvarkok kiszabadulásával, majd a megfigyelhető hadronokká való egyesülésükkel magyarázta [NP6]. A hadronok végállapotú folyásának vizsgálatára folyadékdinamikai modelleket vezettek be [NP7, NP8], megalapozva a hidrodinamikai kutatási irány későbbi sikereit.

A 2000-es éveket az USA-ban, a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban megépült Relativisztikus Nehézion-gyorsító, a RHIC sikerei határozták meg [NP9, NP10]. Új jelenséget fedeztek fel: az arany-arany ütközésekben a részecskesugarak energiájuk jelentős részét



elveszítik [NP11], míg a deuteron-arany ütközésekben ez a jelenség nem tapasztalható [NP12, NP13]. Felismerték, hogy ez az új jelenség egy új anyagfajta megjelenésének a következménye, amely a legopólosabb anyag a világon. Halmazállapotáról kiderült, hogy a várakozásokkal ellentétben nem gáz, hanem folyadék. Az ELTE és az MTA RMKI kutatói hozzájárultak annak igazolásához, hogy ez az új anyag kvarkok közel tökéletes folyadéka, melynek a belső súrlódása a legkisebb az ismert anyagok közül [NP14]. Megmutatták azt is, hogy ez az anyag, noha a világon a legopólosabb anyag az erősen kölcsönható részecskék számára, teljesen átlátszó a fénysugárzás számára. A RHIC gyorsítónál születtek a nagyenergiás fizika legtöbbet hivatkozott kísérleti eredményei; a szakterület magyar fizikusai világelsőkké lettek az egy cikkre jutó hivatkozások számában az évszázad első évtizedében.

A 2010-es években a CERN-ben még nagyobb energiákon, hőmérsékleteken és térfogatokban figyelték meg ezt az ember által előállított legforróbb, legörvénylőbb, legopólosabb és legtökéletesebb folyadékot [NP15]. Felfedezték, hogy a nehéz (anti)kvarkokból álló összetett részecskék ezen a magas hőmérsékleten annál inkább szétesnek, minél gyengébben kötődnek egymáshoz. Megmérték, hogy ezen az anyagon áthaladva jelentős energiát veszítenek a részecskesugarak az LHC ütközéseiben is [NP16], viszont az olyan típusú részecskék sértetlenül repülnek át rajta, amelyek az erős kölcsönhatásban nem vesznek részt. Megmutatták, hogy ez az ősi-új anyag nemcsak a kiterjedt méretű ólom-ólom ütközésekben, hanem proton-ólom és a kicsi proton-proton ütközésekben is létrejön [NP17,18].

A RHIC gyorsítónak az ütközési energia és geometria jelentős tartományát végigpásztázó programjában a kvark-gluon plazma apró cseppjeit a proton-arany, a deuteron-arany és a hélium-arany ütközésekben is mérnöki pontossággal elő tudták állítani [NP19].

## **I.6.. A kétdimenziós modellvilág egzakt fizikájától a húrelméletig**

A kétdimenziós kvantumtérelméletek, amelyek egzakt megoldására hatékony módszereket fejlesztettek ki, a fizika számos területén jelentős szerephez jutnak. Amellett, hogy erősen anizotrop szilárd testeket írnak le, a részecskefizikának olyan játékmódelljeit adják, amelyekben egyszerűsített keretek között egzakt vagy közel egzakt módon vizsgálhatók négy dimenzióban jelenleg még kezelhetetlen fizikai jelenségek. A kutatások jelentősége túlnőhet ezen a modell-világon: az összes kölcsönhatást egyesíteni próbáló húrelmélet is egy kétdimenziós térelmélettel írható le.

A kétdimenziós integrálható kvantumtérelméletek vizsgálatában a magyar kutatók jelentős szerepet vállaltak, melynek fejleményeként sikerült számos modell véges térfogati energiaspektrumának egzakt meghatározása [P25].

Ezen eredmények egy nem várt, átütő alkalmazása a holografikus dualitás sejtése, amely szerint a négydimenziós legszimmetrikusabb mértékelmélet ekvivalens egy magasabb dimenziós húrelmélettel. A dualitás az erősen kölcsönható mértékelméletet klasszikus húrelméletre, míg a kvantum húrelméletet gyengén kölcsönható mértékelméletre képezi le, első pillantásra lehetetlennek mutatva a sejtés igazolását. Az áttörést annak felismerése hozta, hogy a szóban forgó húrelmélet egy integrálható térelmélet [P26]. Ezt kihasználva magyar kutatók sikeresen meghatározták az egzakt spektrumot [P27], majd a két határesetben az eredményt a mértékelmélettel és a húrelmélettel összehasonlítva a sejtést igazolták [P28].

## II. Atomi szintű kutatások

A bennünket körülvevő anyag atomokból áll. Az anyagok makroszkopikus szinten megnyilvánuló tulajdonságait három tényező határozza meg: az alkotó atomok minősége, a térbeli elhelyezkedésük és az, hogy milyen körülmények (hőmérséklet, nyomás, mágneses-elektromos tér) között vizsgáljuk ezeket. A külső körülményeket általában mi állítjuk be, tehát ismerjük, azonban a másik két meghatározó tényezőt esetről esetre meg kell határoznunk, ha meg akarjuk érteni és le akarjuk írni az anyagok tulajdonságait. Ezért az anyagokkal foglalkozó kutatások egyik legfontosabb területe az atomi szerkezet meghatározására irányul. Szerkezetvizsgáló módszereket az elmúlt 120 évben fejlesztettek, és jelentőségüket mutatja az eredményekért adott kb. 20 Nobel-díj és az, hogy még ma is igen aktív kutatási terület. A legkorábban felfedezett és leggyakrabban használt módszer a röntgendiffrakció, azonban sok esetben ennek teljesítőképessége nem elégséges, ezért a kutatók új eljárásokat dolgoznak ki. E fejezet első részében néhány ilyen hazai munkán alapuló eredményt mutatunk be. Természetesen a mérési módszerek fejlesztése nem öncélú, hanem azt segíti elő, hogy olyan új anyagokat állítsunk elő, amelyek az emberek életkörülményeit javítják, hozzájárulnak az emberiség előtt álló nagy kihívások megoldásához. A következő két részben olyan új anyagcsaládokat, illetve mesterségesen épített rendszereket mutatunk be, amelyek az elmúlt évtizedekben a kutatás homlokterében álltak, és kutatóink nemzetközi visszhangot kiváltó eredményeket értek el ezek vizsgálatában. Ezután az elméleti munkák jelentőségére világítunk rá. Ezek adnak alapot a mérések eredményeinek értelmezéséhez és az anyagi tulajdonságok előrejelzéséhez, új anyagok tervezéséhez. Végezetül a lézersugárzáson alapuló kutatások néhány eredményét ismertetjük, amelyek a jövőben számos, a gyakorlat számára fontos alkalmazáshoz vezethetnek.

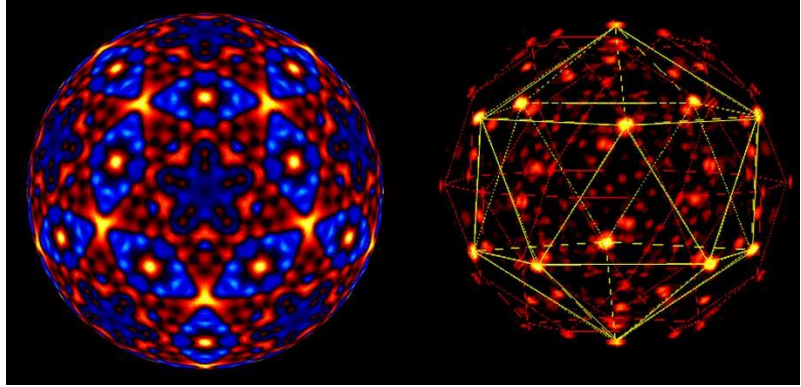
### II.1. Röntgenmódszerek

#### Röntgenholográfia

A Gábor Dénes által felfedezett holografikus módszert hosszú ideig csak nagy méretű (szemmel látható) tárgyak fényel való 3D leképezésére használták. Az atomi szerkezetek ilyen vizsgálata a fényel történő holografikus leképezésekkel analóg módon technikailag nem oldható meg. A rövid hullámhosszak (röntgentsugárzás) esetén, amelyek alkalmasak lehetnek az atomok holografikus leképezésére, új ötletekre volt szükség. A 90-es évek közepén az MTA Szilárdtestfizikai Kutatóintézet (MTA SZFKI) két kutatójának sikerült kísérletileg bizonyítani, hogy az atomok 3D elrendezését meg lehet határozni a holografikus módszerre alapozva is [X1]. A holográfia előnye, hogy a hullámok fázisában hordozott információt is hasznosítja, míg a hagyományos röntgendiffrakció csak a hullámok intenzitását detektálja, amely nem mindig elégséges a szerkezet egyértelmű megoldásához. A röntgensugárzást kibocsátó szabadelektron-lézerek megjelenésével a röntgenholográfia új lehetőséget kínál a nagyon rövid élettartamú állapotok szerkezetének meghatározására.

### 3. kép

*Az  $Al_{70.4}Pd_{21}Mn_{8.6}$  kvázikristály röntgen hologramja (baloldali kép), és az ebből rekonstruált atomi szerkezet (jobboldali kép) [X2]*

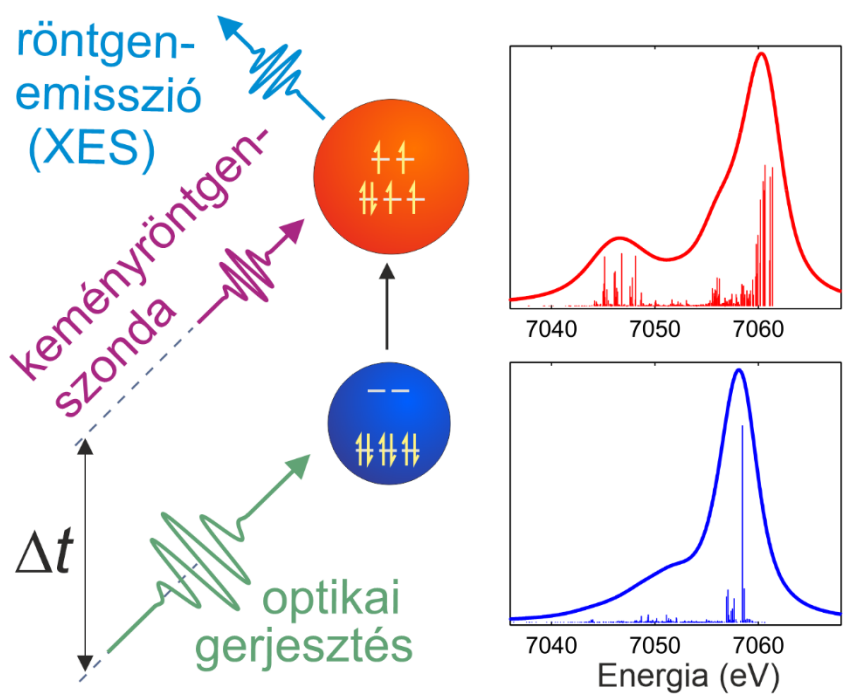


### **Töltésalternáló módszer kifejlesztése az atomi szerkezet meghatározására**

A röntgenholográfiával kapcsolatban már említettük, hogy a diffrakciós mérések nem tartalmazzák a fázisinformációt. A hiányzó információt valamilyen indirekt módon pótolhatjuk, de ez nem mindig lehetséges és nem egyértelmű. Az eddig kidolgozott elméleti eljárások egyike sem old meg minden ismeretlen szerkezetet. Ezért jelenleg is folynak kutatások olyan módszerek kifejlesztésére, amelyek kiterjesztik a megoldható szerkezetek családját, és stabil, megbízható megoldáshoz vezetnek. Az MTA SZFKI kutatói egy ilyen új eljárást, az ún. töltésalternáló módszert dolgoztak ki, amely gyorsan elterjedt a diffrakcióval foglalkozó kutatók több tízezres táborában. Jelenleg az atomi szerkezet meghatározására szolgáló legtöbb kiértékelő programcsomag része, és a világ minden laboratóriumában használják. Napjainkban már nemcsak a röntgendiffraktogramok, hanem a neutron- és elektrondiffraktogramok kiértékelésére is alkalmazzák. Előnye, hogy nem kíván semmilyen kiinduló információt a diffrakciós mérésen kívül [X3].

### **Nagy felbontású keményröntgen-spektroszkópia és alkalmazása ultragyors folyamatok vizsgálatára**

A statikus atomi szerkezet meghatározása mellett egyre nagyobb szerepet töltenek be azok a módszerek, amelyek egy-egy folyamat időbeli lefolyásának vizsgálatát teszik lehetővé. A kihívást ezekben az esetekben az jelenti, hogy a folyamatok karakterisztikus ideje nagyon rövid: a másodperc milliárdod részétől (ns) a milliárdod milliomod részéig (fs) terjed. Ilyen rövid idők alatt sok esetben a szerkezetet nem is lehet meghatározni, azonban számos egyéb, az anyagra jellemző mennyiség mérhető. Az MTA Wigner FK munkatársai nemzetközi együttműködésben az elmúlt 15 évben jelentősen továbbfejlesztették a nagy felbontású keményröntgen-spektroszkópiát, illetve megvalósították annak ultragyors szondaként való alkalmazását, amivel nagy teljesítőképességű elemszelektív módszereket sikerült femto- és pikoszekundumos folyamatok vizsgálatába bevonni. Elsőként végeztek időfeloldásos röntgenemissziós és inelasztikus röntgenszórás kísérleteket, és két keményröntgen-szabadelektron-lézernél (LCLS Stanford, SACLA Japán) elsőként állítottak össze nagy felbontású röntgenspektroszkópiai kísérletet. A kísérleteket molekuláris kvantummechanikai számításokkal kiegészítő munkáik új bepillantást engedtek fényel gerjesztett funkcionális molekulákban lezajló töltéstranszfer- és energiáttranszfer-folyamatokba, fontos hozzájárulást szolgáltatva a fényel kiváltott átalakulások mechanizmusának megértéséhez, amelyek nélkülözhetetlenek a későbbi hasznosításhoz [X4].

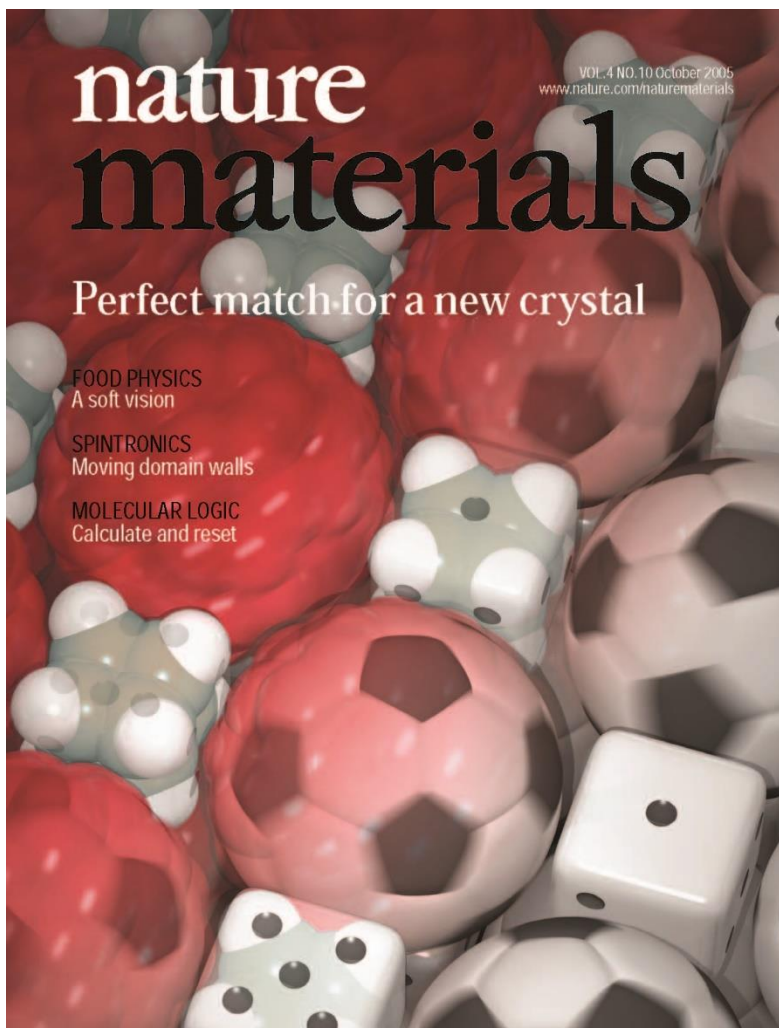


4. kép Fénnyel kiváltott spinállapot-kapcsolás vizsgálata időfeloldásos röntgenspektroszkópiával

## II.2. Szénalapú anyagok kutatása

### Fullerének

A csak szénatomokból álló anyagoknak sokáig három fajtáját ismertük: a gyémántot, a grafitot és a nyersen bányászott szenet. A 90-es években azonban megjelentek új szénalapú anyagok. Ezek közül az első az ún.  $C_{60}$ -molekulákból álló szilárd testek, majd a 60-nál is több szénatomból álló molekulák alkotta anyagok. Az alkotó molekulákat összefoglaló néven fulleréneknek nevezzük. A fullerénmolekulákban a szénatomok ötszögek és hatszögek csúcaiban helyezkednek el. A  $C_{60}$  pontosan egy focilabda geometriájának felel meg. Az elmúlt 30 évben jelentős kutatási kapacitásokat fordítottak a fullerénmolekulákból felépülő anyagcsaládok vizsgálatára. Ennek oka, hogy sok ígéretes tulajdonságuk van. Vannak köztük szupravezetők, plasztikus kristályok és az alkalmazások szempontjából előnyös tulajdonságú további anyagok. A magyar kutatók is idejekorán bekapcsolódtak e kutatásokba, és számos érdekes eredményt értek el. Az egyik ilyen az alkálifém (A) és a  $C_{60}$  vegyületeinek előállítása és tulajdonságaiknak felderítése. Az MTA SZFKI kutatói amerikai-svájci kollaborációban mutatták meg, hogy a várakozásokkal ellentétben az  $A_3C_{60}$  típusú vegyületekben a fullerénmolekulák között kettős kovalens kötés alakul ki [C1,C2]. E csoport és az ELTE kutatóinak közös munkája a  $C_{60}$  kubánnal alkotott anyagcsaládjának előállítása és annak kiderítése, hogy ezen anyagokban a  $C_{60}$  molekula szabadon forog a kubánok alkotta szerkezetben. [C3]



5. kép

*A fullerén és kubán molekulák elrendeződése, és a fullerén molekulák forgásának szemléltetése a  $C_{60}$  kubánnal alkotott vegyületében [C3]*

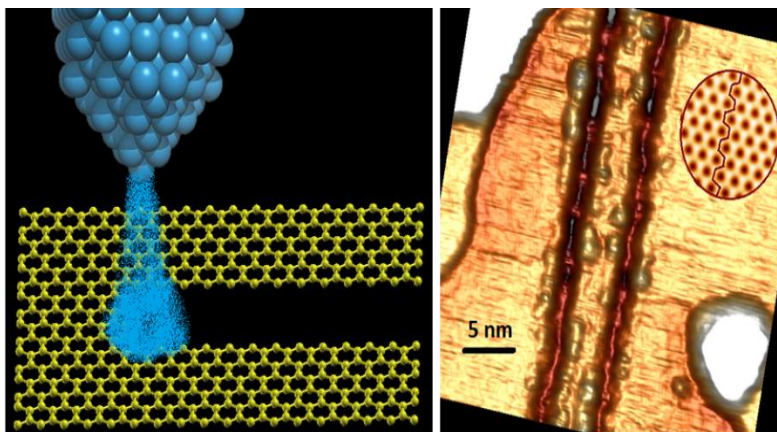


## Nanocsövek

A fullerén molekulák kutatása további érdekes, már nem fullerénalapú anyagok felfedezéséhez vezetett. Ezek közül az első az ún. szén nanocsövek osztálya volt. Ezeket is szénatomok alkotják, de nem zárt, közel gömb alakú molekulákból állnak, hanem hosszú, kis átmérőjű csövekből. Ezek a csövek állhatnak egymásba ágyazott koncentrikus hengerekből vagy csak egyetlen hengerpalástból. A szén nanocsövek kutatása igen komoly lendületet kapott, a számos alkalmazás lehetősége miatt. E nanocsövek nagyon erősek, emiatt kompozit anyagokban használhatók. A másik fő alkalmazási terület a mikroelektronika, ahol nagyon vékony vezetékek, félvezető elemek, érzékelők, stb. állíthatók elő segítségével. Az MTA MFA a szén nanocsövek pásztázószondás (STM, AFM) módszerrel történő atomi léptékű jellemzésében és módosításában ért el nemzetközileg is elismert eredményeket [C4] Az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézet kutatói nemzetközi együttműködés keretében szén nanocső rendszereket állítottak elő és optikai rezgési spektroszkópiai vizsgálatokat végeztek ezeken az anyagokon. Különösen nagy érdeklődésre számot tartó eredmény az átlátszó fémcső film előállítás [C5]. A kísérleti munkák mellett jelentős elméleti kutatások is folytak az ELTE-n, ahol szén nanocsövek rezgési módusainak elméleti számolását végezték el, ami megmagyarázza az optikai spektroszkópia által kapott eredményeket, és elősegíti olyan új anyagok szintézisét, amelyek elvezethetnek a mindennapi alkalmazásokhoz [C6].

## Grafén

A szénelapú anyagok közül utolsóként említjük a grafént. A grafit már régóta jól ismert, és a gyakorlatban is használt anyag. Tudjuk, hogy hatszögös elrendezésben elhelyezkedő szénatomok alkotta síkokból áll. A grafén a grafitból származtatható egyetlen atomi sík leválasztásával. Mivel ez egy kétdimenziós atomi elrendezés, speciális elektronszerkezeti és ennek megfelelően érdekes makroszkopikus tulajdonságokkal rendelkező anyag. Elsősorban a mikroelektronika számára lehet hasznos ez az anyagcsalád. Hazai kutatók is bekapcsolódtak a világ számos nagy laboratóriumában folytatott kutatásokba. Az egyik legjelentősebb eredményt az MTA MFA kutatói érték el, akik egy olyan módszert dolgoztak ki, amely a mai napig a legpontosabb nanotechnológiai eljárás a grafén megmunkálására és grafén nanoszerkezetek litográfias kialakítására. Munkájuk először bizonyítja, hogy a grafén hangolható tiltott sávú félvezetővé, és mágnessé tehető pontos atomi szintű megmunkálással [C7, C8]. Egy másik terület a graféneken alapuló anyagok vezetési tulajdonságainak elméleti leírása. Itt az ELTE kutatói érték el jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó eredményeket [C9], amelyek hozzájárultak ezen anyagok vezetési tulajdonságainak jobb megértéséhez és ezek alapján a gyakorlati alkalmazások elősegítéséhez.



6. kép

*Grafén pásztázó alagútmikroszkópos nanomegmunkálása, amely lehetővé teszi néhány nanométer széles grafén nanoszalagok ki-alakítását. A szalagok szélességének és éleik irányának változtatásával, különböző elektromos és mágneses tulajdonságokkal rendelkező nanoszerkezetek alakíthatók ki [C7, C8]*



## II.3. Elektronrendszerek kvantummechanikája

### Mágneses nanoszerkezetek

Az elektromos jelenségekben az elektron töltése mellett a spinje is fontos szerepet játszik: az elektronnak nemcsak töltése van, hanem "forog" is. A spintronika alap gondolata az elektronok spinje révén megvalósított információátvitel, -továbbítás és -feldolgozás. Ehhez olyan szerkezeteket kell építeni, melyekben a spinállapot megőrződik és/vagy tervezetten manipulálható. Nanométeres méretskálán kialakított rétegszerkezetben hozták létre az első spintronikai eszközt, a spinszelepet (ami a merevlemezek adatainak kiolvasásában tömeges alkalmazásra került az elmúlt 20 évben). Az MTA SZFKI munkatársai elektrokémiai úton előállított mágneses multirétegek kísérleti vizsgálatával járultak hozzá a terület fejlődéséhez [E1]. Azóta több kutatócsoport átvette eljárásukat, mellyel sikeresen választották szét a hibátlan rétegszerkezet és az ún. szuperparamágneses tartományok elektromos vezetésre gyakorolt hatását.

Nanométeres vékonyrétegekben és rétegstruktúrákban megfigyelt komplex és egzotikus mágneses struktúrák elméleti vizsgálatát teszi lehetővé a magyar kutatók részvételével kifejlesztett, alapelvekből származtatott elektronszerkezet-számolási módszer [E2]. A BME Fizikai Intézet és az MTA Wigner FK munkatársai jelentős mértékben hozzájárultak az atomi vastagságú rétegekben a mágneszettség irányának [E3] és a spingerjesztések elméleti leírásához [E4], valamint fémes felületre helyezett különálló mágneses atom elektronszerkezetének és vezetési tulajdonságainak megismeréséhez [E5].

### Szupravezetés, nanoelektronika, spintronika

A magas hőmérsékletű szupravezető anyagok felfedezése után, az ezredfordulót megelőző években a szilárdtest-fizikai kutatások forrongó területe volt új szupravezető anyagcsoportok keresése. Előtérbe kerültek a rétegszerkezetű kristályok elektronrendszerei, melyekben az izotrop anyagokhoz képest irányfüggő kölcsönhatások jelennek meg. A BME Fizikai Intézet nagy mágneses terű elektronspinrezonancia-laboratóriumának kutatói elsőként határozták meg az akkor felfedezett  $MgB_2$  szupravezető anizotrop paramétereit [E6].

A szupravezető Cooper-párok ellentétes spinű elektronjai természetes megvalósulásai lehetnek a kvantumszámítógépekben kulcsszerepet játszó, „összefonódott” elektron-állapotoknak. A spin szabadsági fokon keresztül összefonódó elektronok létezése a kvantummechanika olyan alapelveinek határát érinti, mint a kvantumrendszerekben megjelenő különleges korreláció. Összefonódott Cooper-pár szétválasztásának első kimutatása 2009-ben alapvető jelentőségű megfigyelés volt, ugyanakkor a kísérletben alkalmazott nanotechnológiai megoldások alkalmasak a qubit létrehozására, egyúttal a BME Fizikai Intézet nanoelektronikai kutatásainak új irányait indította el [E7]. Az intézetben az egyedi atomok, molekulák elektromos vezetési jelenségeinek vizsgálatára kifejlesztett eljárások [E8] alapozták meg az alkalmazások szempontjából perspektivikus másik területet, a nanoméretű memrisztorok előállítását és kísérleti vizsgálatát.

Félvezető nanoszerkezetekben is lehetőség van a kvantum interferenciaképességüket megőrző elektronok spinjének manipulálására, ami a spintronika, azaz a spint információs erőforrásként kezelő új technológia egy másik ágát jelenti. Ezzel kapcsolatban a Szegedi Tudományegyetemen születtek jelentős nemzetközi visszhangot kapott elméleti eredmények. Kimutatták, hogy alkalmas félvezetőből készült nanoméretű gyűrűkben a spin-interferencia külső kapuelektrodák feszültségeinek hangolásával befolyásolható, ezáltal többcélú kvantum eszközöket, többek között kvantumlogikai kapukat lehet létrehozni. Ilyen gyűrűk

hálózatát különböző módon programozva az képes lehet a bemenő elektronokat spinjüktől függően egy előre kiválasztott kimenetre terelni, vagy a spin szerint polarizálatlan elektronokat ellentétes spinirányú komponensekre szétválasztani [E9,E10].

### **Egzotikus mágneses anyagok**

A hosszú távú mágneses rend legismertebb példája a ferromágnesség, amikor a kristályban található elektronok közti kölcsönhatás egy irányba rendezi az elektronok spinjeit. Léteznek azonban olyan kristályok is, ahol emellett megjelenik egy másik kölcsönhatás is, amely egymásra merőlegesen szeretné rendezni a spineket. A két versengő kölcsönhatás között kialakuló kompromisszum eredménye, hogy kis szigetek alakulnak ki, ahol az elektronok spinje szembefordul a ferromágnes többi részén található spinekkel: az elemi mágneses momentumokból egy 10-100 nanométer átmérőjű csöszzerű objektum formálódik, az ún. skyrmion, melynek magja körül a spinek örvénylő mintázatba rendeződnek. A BME Fizikai Intézet kutatói – nemzetközi együttműködésben – elsőként figyelték meg a mágneses sündisznóra emlékeztető Néel-típusú skyrmionokat [E11]. A multiferroikus (egyszerre ferroelektromos és mágneses) anyagban kimutatott új típusú skyrmion egyúttal elektromostöltés-mintázattal is rendelkezik. A nagyszámú spin által kialakított csavarszerű struktúra rendkívül stabil. Elektromos és mágneses terekkel történő manipulálhatóságuk miatt az új generációs információtároló eszközök építőköveivé válhatnak.

A multiferroikus anyagokban a magnetoelektromos jelenség az elektromágneses hullámok terjedését is alapvetően befolyásolja. A BME Fizikai Intézet kutatói Japánban előállított kristályokat vizsgálva megmutatták, hogy a fényelnyelődés mértéke nemcsak a polarizációtól, hanem a fény terjedési irányától is függ. A kristály az egyik irányból átlátszó, a másiktól elnyeli a fényt, ráadásul mágneses vagy elektromos tér alkalmazásával a két irányt fel is lehet cserélni [E12]. Az „optikai kvadrokroizmus” kifejezéssel elnevezett felfedezés számos területen új alkalmazási lehetőségeket nyit, így például technológiai áttörést jelenthet az optikai adatátvitelben, a digitális adattárolásban, valamint a kemo- és bioszenzorikában.

### **Erősen korrelált kvantumrendszerek elmélete**

A kvantumrendszerekben megjelenő különleges korrelációnak, az úgynevezett összefonódásnak nem létezik klasszikus analógiája. A rendszereknek csak egy szűk osztálya vizsgálható matematikailag egzakt formalizmus keretében, a kvantuminformáció igazán érdekes elméleti problémáinak megoldása számítógépes szimulációkat igényel. Az MTA Wigner FK kutatói elsőként vezették be az elmélet számos koncepcióját a renormálási algoritmusba, ami által meghatározhatók a különféle rendszerekben fellépő korrelációk ujjlenyomata, és a korrelációk által kiváltott kvantumos fázisátalakulások is [E13, E14]. A Budapest-DMRG kódot a világ számos kutatóintézetében és egyetemén alkalmazzák nagy sikerrel, szilárdtest-fizikában, kvantumkémiaiban, magfizikában, statisztikus fizikában, ultrahideg atomok fizikájában, alkalmazott matematikában és magában a kvantuminformáció-elmélet kutatásában. A DMRG mellett más algoritmusokat is fejlesztettek, ezek közül az egyik legismertebb az ún. csatolt klaszterek módszere (MR-AQCC), melyet az ELTE és a Debreceni egyetem kutatói kidolgoztak ki [E15]. E módszer alkalmazható a kémiai reakciók modellezésétől a DNS-töredékek fénysugárzással szembeni stabilitásának vizsgálatáig.

A kvantumos statisztikus fizika és termodinamika alapvető kérdései tanulmányozhatók ultrahideg atomok zárt kvantumrendszerén. Az ún. integrálható rendszerek nem termalizálódnak, és az ebből adódó eltérések kísérletileg is kimutathatók [E16]. Az integrálható

rendszerek egyensúlyának leírására javasolt általánosított Gibbs-sokaságot először a BME kutatója konstruálta meg kölcsönható rendszer esetére [E17]. Az ultrahideg atomi rendszerekben megvalósítható kvantum szimulációk arra is alkalmasnak bizonyultak, hogy akár a részecskefizika nyitott elméleti problémáit, például az erős kölcsönhatásokban fellépő szín superfolyékony fázist és a barionok fizikáját tanulmányozzák segítségükkel [E18]. További érdekes fizikai jelenségeket tapasztalhatunk, amennyiben topologikus szigetelőket időben periodikus külső hatásnak teszünk ki: az ezzel kapcsolatos eredményekről magyar kutatók írtak összefoglalót francia és német kollégáikkal [E19].

## II.4. Lézersugárzáson alapuló kutatások

### Döntött impulzusfront alkalmazása terahertzes impulzusok keltésére

Terahertzes (THz) tartománynak az elektromágneses spektrum 0,1–10 THz frekvenciájú, azaz kb. 3,0–0,03 mm hullámhosszúságú részét szokás nevezni. Ez a tartomány az utolsó negyed évszázadig lényegében elérhetetlen volt megfelelő sugárforrások hiányában.

Ezen a területen lényeges áttörést hozott az 1980-as évek végén döntően szegedi kutatók által kifejlesztett ún. haladóhullámú gerjesztési elrendezésből ötletet merítő eljárás, amelyet 2002-ben a Pécsi Tudományegyetem (PTE) Fizikai Intézetében dolgoztak ki [L1]. Ennek során egy 800 nm hullámhosszúságú femtoszekundumos impulzus frontját alkalmas módon megdöntik, majd egy nemlineáris kristályba irányítják. Ekkor a gerjesztő impulzus kissé különböző spektrális komponenseinek különbségi frekvenciájával rezgő THz-es hullám keletkezik és erősödni is képes (ún. fázisillesztés valósul meg), vagyis a kristály a THz-es tartományban működő forrásként szolgál. A módszer továbbfejlesztésével több mint egy évtizeden keresztül a PTE-n majd az MTA–PTE Nagyintenzitású Terahertzes Kutatócsoportban állították elő a legnagyobb energiájú THz-es impulzusokat, és a kezdeti energiát négy nagyságrenddel növelve 2008-ban először tudtak THz pumpa – THz próba méréseket végezni. Ezt a technikát ma már világszerte használják ultragyors folyamatok vizsgálatára.

A legutóbbi néhány évben a pécsi kutatók olyan újabb, lépcsősen döntött impulzusfrontot használó elrendezéseket fejlesztettek ki és szabadalmaztattak, amelyekkel várhatóan jelentősen, akár 10 mJ-ig növelhető a THz-es impulzusok energiája. Fókuszálással így néhányszor 10 MV/cm elektromos térerősség állítható elő, miáltal asztali méretű, néhány MeV energián működő elektron- és protongyorsítók valósíthatók meg, szélesítve a részecskenyalábokon alapuló fizikai, kémiai, biológiai és egyéb kutatások körét.

### Nagyterű, attoszekundumos lézerek

Lézerfény és anyag kölcsönhatásának különösen érdekes esetét jelentik azok a folyamatok, ahol a lézerfény elektromos tere összemérhető azzal a térrel, melyet az elektronok az atom belsejében éreznek. E területen kutatások folytak az MTA SZFKI-ban [L2], melyek jelentősen hozzájárultak egy új tudományterület, az ún. attofizika kialakulásához. Az itt kifejlesztett módszerek lehetővé teszik az atomi, molekuláris és szilárdtest-fizikai folyamatok igen rövid időskálán való követését. A későbbiekben e munkákra épülő újabb kutatások vezettek el a Szegeden felépült ELI-HU-ban folyó világszínvonalú mérésekhez. A szuperintenzív lézer-anyag kölcsönhatásokra épülő mérőrendszerek – melyeket az MTA Wigner FK-ban építettek [L3] – az akár egy molekulát láthatóvá tévő spektroszkópiai módszerektől kezdve, az ultragyors információtechnológián át egészen egyes rákterápiás módszerekig jelentős alkalmazásokkal kecsegtetnek.

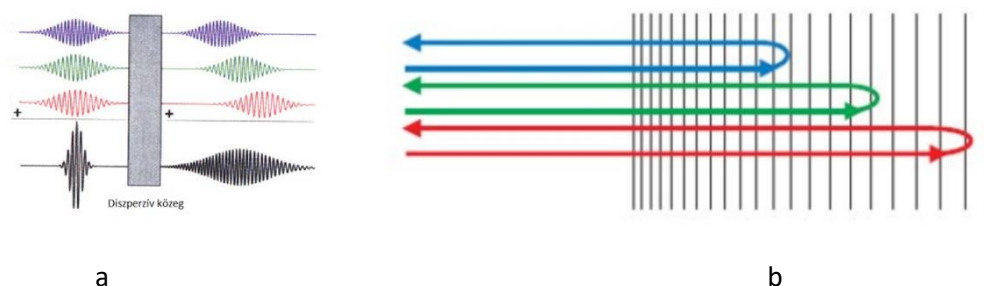


7. kép Az ELI-ALPS épülete Szegeden

### Csörpölt tükrök és femtoszekundumos impulzusok

Az 1980-as évek végére egy új lézerek aktív közeg, az igen széles vörös és közeli infravörös tartományban, a  $\sim 680\text{--}1040\text{ nm}$ -es hullámhossztartományon is kiváló optikai erősítést mutató Ti-zafír lézerek megjelenésével az ultrarövid fényimpulzusok előállítására új korszakba lépett. A további impulzusrövidítésnek volt azonban két akadálya. Az egyik, hogy a rendelkezésre álló tükrök reflexió tartománya jóval keskenyebb ( $\sim 200\text{ nm}$ ) volt az erősítési tartománynál. A másik pedig, hogy a nagy sávszélességen belüli egyes frekvenciakomponensek az optikai rendszeren különböző fázissebességgel haladnak át, mert a közeg törésmutatója függ a frekvenciától. Emiatt az impulzus időbeli hossza a terjedés során nő. A fenti két probléma kiküszöbölésére az a megoldás bizonyult a leginkább célravezetőnek, amelyet 1993-ban MTA SZFKI és a Bécsi Műszaki Egyetem kutatói közösen javasoltak és valósítottak meg. E munkákba később a Szegedi Tudományegyetem is bekapcsolódott. Így fejlődtek ki a ma széles körben használt ún. csörpölt tükrök [L4].

Napjainkban e technológiát használó femtoszekundumos Ti-zafír-lézerek kiemelkedően fontos szerepet játszanak pl. a nemlineáris mikroszkópiás 3D képalkotó rendszerekben; a lézerspektroszkópiában (2005-ös fizikai Nobel-díj), és a néhány fs-os lézerimpulzusokat előállító rendszerekben (2018-as fizikai Nobel-díj). Az utóbbi lézerek az időben szeparált attoszekundumos fényimpulzusok előállítására szempontjából is kiemelkedő jelentőségűek, ami az ELI-HU lézerközpont kiemelt kutatási iránya.



8. kép A probléma: (a) az optikai közegek diszperziója. A megoldás: (b) csörpölt tükör. Az optikai közeg tipikusan pozitív (normális) diszperzióját széles hullámhossz tartományban megfelelően megtervezett, aperiodikus (csörpölt) dielektrikum szerkezetekkel kompenzálhatjuk mind az ultrarövid impulzusú lézerezscillátorokban, mind azon kívül, pl. nagyenergiájú CPA (csörpölt impulzusú erősítő) rendszerekben.

### **Atomok önszerveződése optikai rezonátorban szuperradiáns mintázatba**

A kvantumoptika a fény-anyag kölcsönhatást azon az alapvető szinten vizsgálja, ahol az elektromágneses sugárzás és az anyagot alkotó atomok viselkedését a kvantummechanika jellegzetes törvényei szabják meg. Az 1990-es években Budapesten, Szegeden és Pécsen elméleti kvantumoptikai iskolák alakultak, ahol fotonokkal és atomokkal megvalósítható számos jelenséget vizsgáltak, és azok kvantuminformatikai alkalmazásait dolgozták ki.

Az eredmények közül kiemelkedő az MTA SZFKI kutatóinak elméleti fölismerése, mely szerint a makroszkopikus méretű anyag új formája valósulhat meg egy olyan nyílt rendszerben, amelybe lézerrel folytonosan fényenergiát pumpálunk, másrészt fotonok távoznak a környezetbe. Így megfelelő lézeres megvilágítás hatására az optikai rezonátorba helyezett atomok egy önszerveződési folyamat során térben periodikus „fénykristályba” rendeződhetnek [L5]. A kialakuló mintázatot a szokásos kristályokkal szemben nem a Coulomb-kölcsönhatás, hanem az atomok közötti sokszoros foton-szórás tartja egyben, a kristály kollektív viselkedést mutat. Ez a kvantum fázisátalakulás a gerjesztő lézer paramétereinek küszöbértékekkel meghatározott tartományában következik be. A nyílt rendszerekben megfigyelhető kvantum fázisátalakulások és kritikus jelenségek kutatásának világszerte bekövetkező kibontakozásában jelentős szerepe volt ennek a kvantumoptikai rendszerben kísérletileg is megfigyelt önszerveződésnek.

Az eredményeknek a hazai tudományos közösségre is jelentős hatása volt, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban folytatódtak az ilyen irányú kutatások, és egy nemzetközileg elismert, erős kvantumoptikai közösség fejlődött ki.

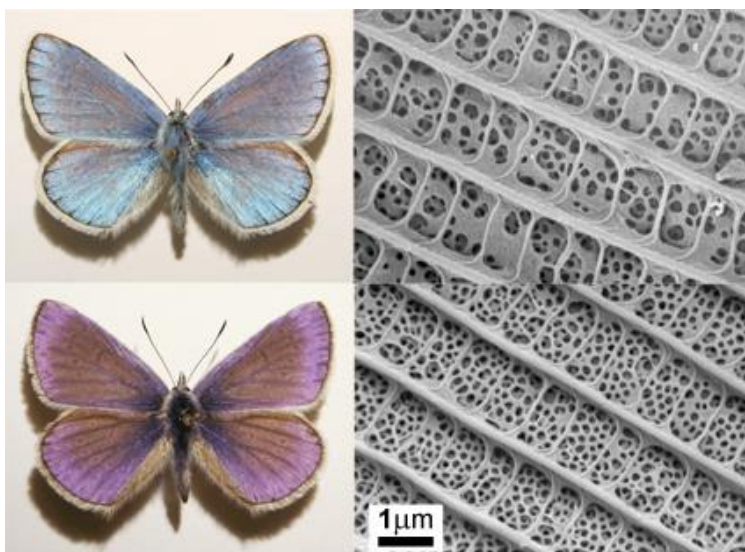


### III. Makroszkopikus fizika

A makroszkopikus testek nagyszámú mikroszkopikus összetevőből állnak. A kutatások során világossá vált, hogy a közvetlenül megfigyelhető makrovilág tulajdonságainak mikroszkopikus eredete van. Ennek a kapcsolatnak feltárását elméleti síkon a statisztikus fizika módszereivel lehet elvégezni. Ezen vizsgálat első lépéseként egy, a probléma lényeges elemeit megragadó modellt vezetünk be, melynek tanulmányozása történhet analitikus módszerekkel (átlagtérmódszer, térelméleti megközelítés, perturbációs közelítés), de igen gyakran számítógépes szimulációkat is lehet végezni. A számítógépes megközelítés a vizsgálatoknál az utóbbi időben egyre nagyobb szerepet játszik, ami a nagyobb teljesítményű számítógépekre és a hatékonyabb algoritmusok alkalmazására vezethető vissza. A kapott elméleti eredmények érvényességét ezek után a kísérletekkel történő összevetéssel ellenőrizzük. A hazai kutatások a makroszkopikus rendszerek területén igen széleskörűek. Kiterjednek biológiai eredetű rendszerekre, diffúziós folyamatok vizsgálatára és szilárd testekben megjelenő diszlokációk tanulmányozására. Egyensúlytól távoli folyamatok zajlanak le szilárd testek megszilárdulásánál, folyadékelegyek mintázatképződésénél és kvantumozott rendszerek stacionárius állapotainál is. További kiemelt fontosságú témakör a nemlineáris dinamika és a kaotikus jelenségek, a spinűvegek és rendezetlen rendszerek, valamint az elektromos gázkiszármazékok vizsgálata. A következőkben a fent említett jelenségekre mutatunk néhány példát.

#### III.1. Biológiai eredetű fotonikus nanoarchitektúrák

Az élővilág egyik szemet gyönyörködtető alkotása a lepkék szárnyain megjelenő élénk színű mintázat. Mint a biológiai kutatások megmutatták, a lepkék már 50 millió éve használják az élénk színeket, elsősorban a kék színt, szexuális kommunikációra. A kutatások során kiderült, hogy e színeket nem festékanyagok hozzák létre, hanem olyan nanoarchitektúrák, amelyek anyaguknál és szerkezetükénél fogva képesek befolyásolni a fény terjedését. Ezeknek a fotonikus nanoarchitektúráknak [M1] a kutatásába kapcsolódtak be az MTA MFA kutatói, és biológusokkal karöltve a lepkék életmódjával kapcsolatos számos tényre derítették fényt [M2].



9. kép

*Boglárkalepke hímek fajra jellemző, szerkezeti eredetű kékje és a szárnyfelszín pikkelyeiben a színt létrehozó fotonikus nano-architektúra pásztázó elektron-mikroszkópos képe. (Fent: mezei boglárka (*Polyommatus dorylas*), lent közösséges boglárka (*Polyommatus icarus*)) [M1,M2].*

## III.2. Diffúziós folyamatok leírása

A gyakorlatban használt legtöbb anyag nemcsak egy adott atomfajtából áll, hanem több komponenst tartalmaz. Ilyen anyagok esetén gyakran előfordul, hogy a megcélzott összetételt úgy állítjuk elő, hogy az egyes alkotóelemeket atomi szinten összekeverjük. Ennek egyik módja, hogy a két vagy több alkotóelemet egy közös térfogatba tesszük, és hagyjuk keveredni. A keveredést a diffúzió írja le. A Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékén nemzetközileg elismert eredmények születtek a nanoszerkezetekben zajló diffúziós folyamatok alapkérdéseiről. Az elméleti/szimulációs eredményeket kísérletekkel is igazolták. Egyik legjelentősebb eredményük, hogy nanoskálán a térfogati diffúziós jelenségek eltérnek a hagyományostól, ha a diffúziós együttható erősen függ a koncentrációtól. Például, elméleti és számítógépes modellszámolásokkal elsőként jósolták meg, hogy kölcsönösen korlátlanul oldódó kétalkotós ötvözetekben az elmosódott határfelület kiélekedhet [M3]. Ezeket az eredményeket később kísérletileg is bizonyították [M4]. Szintén elméleti és kísérleti munkából született kiemelkedő eredmény, hogy megadták a nanoszerkezetekben -a diffúziós feszültségek által indukált szemcsehatármozgás következtében lejátszódó- ún. „hideg homogenizáció” jelenségének általános makroszkopikus tárgyalását, és számos kísérletben megvalósították ezt a nanotechnológiában fontos jelenséget [M5].

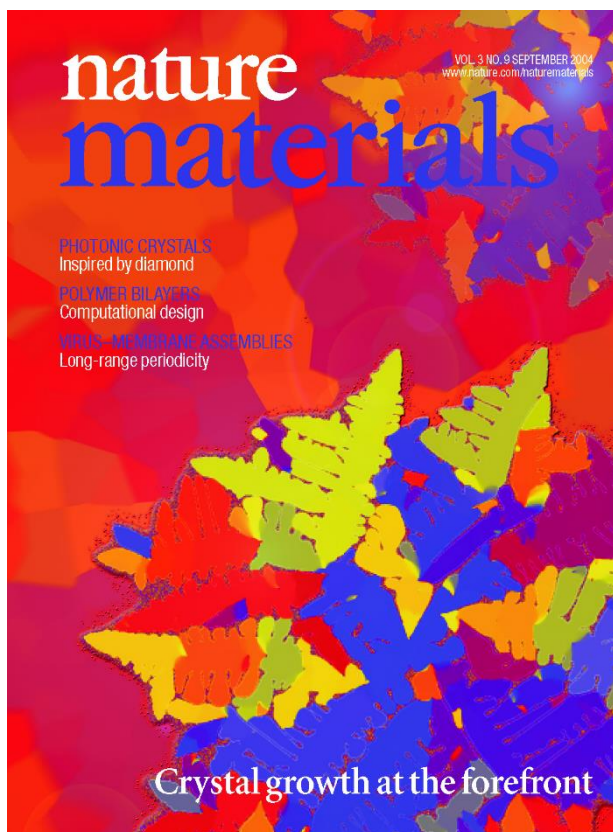
## III.3. Diszlokációk statisztikus térelmélete

A kristályos anyagokban az egyik leggyakoribb hiba az ún. diszlokáció, amely az anyagban egy vonal mentén jelenik meg. A diszlokációk mennyisége és eloszlása alapvetően módosítja az anyagok mechanikai tulajdonságait. Ezért ezek kutatása ma is aktuális. Az ELTE Anyagfizikai Tanszékén a 90-es évek elején egy a korábbiakhoz képest teljesen új statisztikus fizikai megközelítéssel kidolgozták a diszlokációk kollektív mozgását leíró térelméletet, amely szigorú matematikai módszerekkel teremt meg a kapcsolatot az egyedi diszlokációk mozgása és a folytonos sűrűségfüggvényekkel operáló mezoszkopikus megközelítés között [M6,M7]. Az elmélet továbbfejlesztésével az ELTE kutatói ma képesek modellezni a diszlokációmintázatok kialakulását, diszlokációlavinák keletkezését, méreteffektusokat stb [M8,M9].

## III.4. Komplex megszilárdulási alakzatok

Az olvadáspontjuk alá hűtött folyadékok megszilárdulásával létrejövő, nagyszámú kristályszemcséből álló, ún. polikristályos anyagok fontos résztvevői mindennapi életünknek. Közéjük tartoznak a technikai ötvözetek, kerámiák, ásványok, gyógyszerek, egyes élelmiszerek, a fogak, csontok, vesekövek és az érfalon kialakuló koleszterinlerakódások stb. Az MTA SZFKI kutatói kifejlesztettek egy matematikai modellt (orientációs mezőn alapuló fázismező-elméletet) és annak számítógépes implementációját, amely lehetővé teszi olyan összetett polikristályos alakzatok kialakulásának valóság-hű leírását [M10, M11], mint a rendezetlen dendritek, kristálykévék, szferolitok, ill. fraktálszerű polikristályos aggregátumok, melyek más módszerekkel kezelhetetlennek bizonyultak. Ezt az eredményt a Science News (USA) folyóirat szerkesztősége a fizika minden ágát tekintve a 2004. év 15 legfontosabb eredménye közé sorolta. A modell lényegesen hozzájárult a megszilárdulás során kialakuló kristályos mikroszerkezetek megértéséhez, és olyan anyagfejlesztésre irányuló nemzetközi projektek számítógépes anyagtudományi támogatását biztosította, mint pl. magasabb hőmérsékleten működő gázturbinalapát-anyagok, ólommentes önkenő csapágyanyagok, *in situ* kompozitok fejlesztése, vagy speciális optikai tulajdonságot mutató, ún. metaanyagok létrehozása. Újabban a modellt biológiai kristályosodási folyamatok (biomineralizáció)

leírására alkalmazzák, ahol biztató eredmények születtek [M12]. Az elért eredmények jelentőségét mutatja, hogy 9 alkalommal kerültek tudományos kiadvány címlapjára, köztük a Nature Materials folyóiratéra.



10. kép

*Polkristályos növekedés polimer rétegekben a fázismező elmélet alapján [M11].*

### III.5. Mintázatképződés az egyensúlytól távoli struktúrákban

Az egyensúlytól távoli struktúrák létrejöttében jelentős szerepet játszik a fázishatárok dinamikája. Így a reakció-diffúziós frontok is meghatározók a technológiai szempontból fontos csapadékmintázatok kialakulásában. E frontok tulajdonságait felhasználva az ELTE és a BME kutatói nemzetközi együttműködésben lényeges előrehaladást értek el a csapadékmintázatok várható tulajdonságainak leírásában és a jellemzők kontrolljában [M13,M14]. Megalkották a több mint száz éve kutatott Liesegang-jelenség „fáziszeperáció a mozgó front mögött” modelljét, amely magyarázza a normál Liesegang-mintázatok összes tulajdonságát, s a modelltől következő makroszkopikus és mikroszkopikus szintű kontroll a kísérletekben demonstrálható [M15]. Továbbá a nemegyensúlyi zaj szerepét is tárgyalhatóvá tették egzotikusabb mintázatok (pl. helikális struktúrák) megjelenési valószínűségének számolásával, majd kísérleti mérésével.

### III.6. Nemegyensúlyi kvantumoz rendszerek

A nemegyensúlyi rendszerek elméletének alapproblémája, hogy a dinamika lényeges a stacionárius állapotokban is. Jelentős előrelépés az utóbbi évtizedekben a legegyszerűbb, egy-dimenziós, áramot vivő, kvantumállapotok megkonstruálásában történt. Az ELTE kutatói meghatározták a homogén, energia- és mágnesezettségáramot vivő spinláncok (transzverz Ising-modell, XY láncok) stacionárius állapotaiban a hosszú távú, az egyensúlytól távoli állapotokkal társuló korrelációkat [M16]. Ezen túl, a szabadfermion-leképezést megengedő

rendszerekben megmutatták, hogy az inhomogén (lépcsőszerű) kezdeti állapotokból megjelenő frontok tulajdonságai univerzálisak, s leírhatók a véletlen mátrixok elméletével [M17]. Az MTA SZFKI és a BME kutatói a kvantumozott rendszerek paramétereinek hirtelen megváltoztatásával járó, ún. kvencs-folyamatokat is tanulmányozták. Elsők között vizsgálták a stacionárius állapot tulajdonságait mind szabad fermionrendszerekben [M18], mind Bethe–Ansatz-módszerrel megoldható modellekben [M19].

### **III.7. Spinűvegek és rendezetlen rendszerek**

A rendezetlenség jelenléte minden valós anyag elkerülhetetlen velejárója. Míg számos esetben a rendezetlenség jelentéktelen hatású, addig vannak olyan fizikai problémák, melyeknél a rendezetlenség szerepe döntő, sőt meghatározó. A klasszikus spinűvegek elméleti leírása több mint félévszázados múltra vezethető vissza. Ezen témakörben az ELTE kutatói az átlagtér megoldást meghaladó térelméleti vizsgálatokban játszottak kiemelkedő szerepet [M20]. Kvantumos spinűvegek és más végtelenül rendezetlen rendszerek vizsgálatánál az MTA SZFKI kutatói egy új típusú renormálási eljárás kifejlesztésében vettek részt [M21]. A hálózati modellek topológikus heterogenitásainak hatásainak feltárásában úttörő szerepet játszottak az MTA SZFKI és MFA kutatói [M22]. A spinűvegeknél kifejlesztett eljárásoknak az ideghálózatok modellezésében történő alkalmazásainál az ELTE kutatói játszottak fontos szerepet [M23].

### **III.8. Nemlineáris dinamika és kaotikus jelenségek**

A 90-es évekre a nemlineáris dinamika és kaotikus jelenségek vizsgálata önálló hazai kutatási irányra fejlődött. Az ELTE és az MTA SZFKI kutatói számos probléma vizsgálatánál kiemelkedő eredményeket értek el (nemintegrálható hamiltoni rendszerekben az invariáns tórusok felbomlása, sodródások terjedése, tranzienst káosz, turbulencia, kvantumkáosz) [M24]. Ezen vizsgálatokból nőtt ki az ELTE-n a környezeti problémák vizsgálata, a klímakutatás és a trenddel rendelkező rendszerek vizsgálata. A magyar kutatók számos a témakört tárgyaló szakkönyv szerzői angol és magyar nyelven is [M25,M26].

### **III.9. Elektromos gázkisülések vizsgálata**

Az MTA SZFKI kutatói az elektromosan töltött részecskék transzportjának tanulmányozására és alacsony hőmérsékletű plazmák vizsgálatára több unikális kísérleti berendezést építettek, és a jelenségek önkonzisztens leírására részecskealapú szimulációs programok egész családját fejlesztették ki. A rádiófrekvenciás gázkisülések fizikájában, a kisülések működése és az azokban lejátszódó elemi folyamatok összetett kölcsönhatásainak feltárása során elért eredmények hozzájárultak felületmódosítási eljárások továbbfejlesztéséhez olyan high-tech alkalmazásokban, mint a mikroelektronika és napelemgyártás [M27]. A sokrészecskefizika területén, -elektromos gázkisülésekben lebegtetett töltött, mikrométeres porszemcsékkel létrehozott laboratóriumi komplex plazmákkal- folyadék és szilárd fázisú anyagok hullámdiszperziós, transzport (diffúzió, viszkozitás) és szerkezeti tulajdonságainak mikroszkopikus részleteit tárták fel, egyensúlyban és külső erők hatására [M28]. A magyar kutatók hozzájárultak a plazmafizika két legújabb területének: a plazmagyógyászat és a plazma-mezőgazdaság fejlődéséhez, az itt alkalmazható gázkisülési rendszerek optimalizálásához, illetve a hideg plazmák biológiai rendszerekkel és folyadékkal való kölcsönhatásának megértéséhez [M29]. A hidegplazmák mellett fontos a világűrbeli, légköri és technológiai plazmákban zajló folyamatok megismerése is. Ezekben az esetekben a

nagyenergiájú töltött részecskék szabad atomokkal és molekulákkal való ütközéseit kell megértenünk. Hasonló folyamatok lépnek fel a részecske-besugárzáson alapuló terápiás módszerek tervezésénél, és számos iontechnológiai alkalmazásban is. Az elmúlt 30 évben a debreceni Atommagkutató Intézet munkatársai ionok és pozitronok atomokkal és molekulákkal történő ütközésiben többszörösen differenciális mérésekkel térképezték fel az ionizációs folyamatot [M30]. Értelmezték a lövedék-ion és az ionizált céltárgy atom vagy molekula együttes terében kialakuló elektron-emisszió számos, kísérletben megfigyelt tulajdonságát.



## IV. Az Univerzum kutatása

A csillagászat az elmúlt három évtizedben a korábnál látványosabban fejlődött. Nem véletlen, hogy ebben az időszakban a fizikai Nobel-díjak közül átlagosan minden ötödiket csillagászati eredményért ítelték oda. A rohamos fejlődés egyik fő tényezője az űreszközök fedélzetéről végzett csillagászati megfigyelések térnyerése. Az új eszközök révén a megfigyelhető objektumok köre is kitágult, az üstökösöktől, a Föld-típusú exobolygók keresésén és a csillagok szerkezetének nagyfelbontású vizsgálatán át a galaxisok, neutroncsillagok és fekete lyukak kozmikus eloszlásának feltérképezéséig terjed az új keletű és a megújult érdeklődést keltő kutatások spektruma. Mindegyikükhöz kapcsolódik sikeres magyar kutatás. A kutatási intenzitás jelentős növekedését jól illusztrálja, hogy a hazai csillagászok által publikált, legtöbbször idézett száz cikk mindegyike a rendszerváltás után jelent meg. Az alábbiakban hat kutatási témát emelünk ki a legeredményesebbek közül.



11.kép

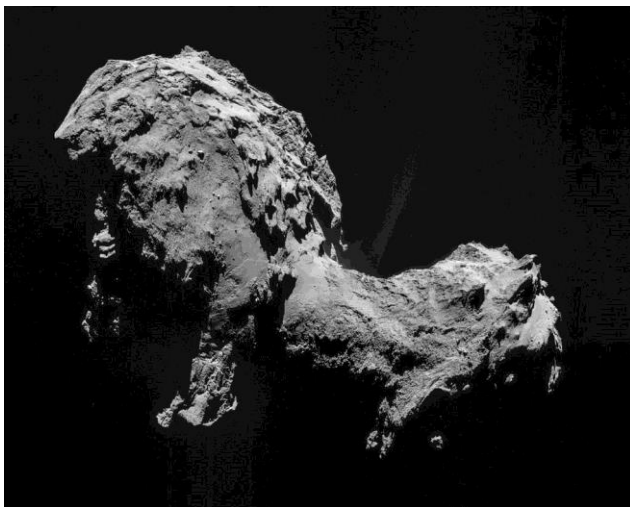
*A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont és a Szegedi Tudományegyetem (SZTE) által alkotott konzorcium 2017-ben kezdődött „Tranziens Asztrofizikai Objektumok” című projektje (GINOP-2.3.2-15-2016-00033) keretében kifejlesztett számítógép-vezérelt csillagászati mérőrendszer legújabb tagja: a 80 cm tükörmérőjű csillagászati távcső a CSFK Piskésetetői Observatóriumában. Ugyanilyen távcső működik majd az SZTE Bajai Observatóriumában is. Ilyen jelentős műszerfejlesztés közel fél évszázada nem történt a hazai csillagászati kutatásokban. A projekt tudományos célja kevésbé ismert természetű asztrofizikai jelenségek felfedezése és kutatása. Ilyen jelenség lehet egy nagy energiájú csillagrobbanás (szupernóva), gammakitörés, két összeolvadó neutroncsillag vagy fekete lyuk. (Forrás: CSFK CSI, Vinkó J.)*



## IV.1. Naprendszerkutatás űrszondákkal

Az utóbbi harminc évben a Naprendszer távoli területeire jutottak el űrszondák, hogy a célpont körüli pályáról helyszíni méréseket végezzenek, és az időbeli változásokat is regisztráló komplex képet nyújtsanak a célégitestről, annak környezetéről és az ott zajló folyamatokról. E programok közül jelentős magyar részvétellel zajlott le a Cassini és a Rosetta küldetés. A Cassini szonda a Szaturnusz rendszerét kutatta, a Rosetta űrszonda pedig a világon elsőként állt pályára egy üstökös mag körül, és követte végig az üstökös aktív időszakát annak kezdetétől végéig.

A NASA 1997-ben indított Cassini szondája a Szaturnuszt, annak magnetoszféráját, gyűrűrendszerét, jeges holdjait vizsgálta 2004 és 2017 között. A minden eddiginél ambiciózusabb bolygókutató misszió eredményei megváltoztatták a további kutatások irányát. A Cassini fedélzetén magával vitte a Huygens leszállóegységet is, ami 2005-ben leszállt a Titanra. A Cassini 12 fedélzeti tudományos műszere közül a magyar kutatók (főként a Wigner Fizikai Kutatóközpont munkatársai) a magnetométer és a Cassini-plazmaspektrométer (CAPS) méréseiben vettek részt, mérnökeink e műszerekhez készítettek földi ellenőrző berendezéseket [A1]. A Szaturnusz magnetoszférájának mérete dinamikusan változik, a Nap felőli oldalon benyomódott, 15-25 Szaturnusz-sugár kiterjedésű, az ellenkező irányban megnyúlt. Egyenlítői régiójában jelentős mennyiségű plazma gyűlik össze egy korongszerű struktúrában. A plazma forrása az Enceladus jég hold déli sarki gejzirjeiből származó víz. A magnetoszférát kitöltő anyag nagy része a fagyott felszín alatt rejtőző folyékony óceánból származik. A bolygó gyűrűi felett ritka ionoszféra van [A2]. A Cassini 126-szor közelítette meg a Titant, vizsgálta az ionoszféráját, a felszínét, és radarméréseket végzett, felfedezve a felszíni tavakat.



12.kép:

*A 67/P Churyumov–Gerasimenko üstökös magja a Rosetta szonda kamerájával 28 km távolságból készített felvételen. Ezen a szabálytalan alakú üstökös magon landolt a magyar közreműködéssel készült Philae egység, aminek műszereivel a felszín anyagának állapotát és kémiai összetételét vizsgálták. (Forrás: ESA/Rosetta/NAVCAM)*

Az ESA 2004-ben indított Rosetta űrszondája, fedélzetén a Philae leszállóegységgel, 2014-ben közelítette meg a 67P/Churyumov–Gerasimenko üstökösöt, amely körül sikeresen pályára állt. A keringő egység két éven át vizsgálta az üstökösöt, közben 2014-ben az üstökös felszínére bocsátotta a Philae ~~landert~~ leszállóegységet, amely a világon elsőként végzett vizsgálatokat egy üstökös mag felszínén. A leszállóegység működését irányító számítógépet és az energiaellátó rendszert magyarok fejlesztették. A Philae részben szintén magyar kutatók által készített műszerei rendkívül értékes adatokat gyűjtöttek közvetlenül a felszínről. A felszínen a jég mellett komplex szerves vegyületekben gazdag port is sikerült kimutatni. A mag belseje port és jeget tartalmaz, porózus szerkezetű. A keringőegység több mint két évet felölelő mérései nyomán követték az üstökös magnetoszférájának születését és fejlődését.

## IV.2. Az SDSS égfelmérés

A technológia fejlődése a 20. század végére tette lehetővé olyan műszerek megalkotását, amelyekkel az Univerzum nagy skálájú szerkezete tanulmányozható, és azon keresztül egyre pontosabban megérthető annak dinamikája. A precíziós kozmológia egyik úttörő észlelése a Sloan Digitális Égfelmérés (SDSS) az Univerzum első háromdimenziós térképét alkotta meg. Az SDSS keretében mintegy 300 millió galaxist fotóztak le öt színben, és 1 milliárdnak a színképét, és azon keresztül vöröseltolódását is meghatározták. A projekt egyik kulcsfontosságú eredménye, a galaxisok eloszlásából mérhető barionos akusztikus oszcillációk skálája a kozmológia egyik sarokköve a szupernóvák és a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás észlelései mellett [A3]. A számos új asztrofizikai és kozmológiai felfedezés mellett azért is jelentős az SDSS, mert úttörője volt az azóta szinte mindenütt előforduló tudományos „big data” projekteknek [A4]. Az SDSS adatbázisának kialakításában oroszánrészt vállaltak a magyar (főként az ELTE Fizikai Intézetében dolgozó) kutatók és annak eredményei nagyban hozzájárultak a kozmológia és az adatintenzív tudományok hazai fejlődéséhez.

## IV.3. Infravörös-űrcsillagászat

A modern asztrofizika, kozmogónia és kozmológia szempontjából legfontosabb megfigyelések az infravörös hullámhossztartományban történnek. Az elmúlt két évtized eredményei alapján az infravörös-űrcsillagászat a magyar csillagászat egyik pillérévé vált. Az első hazai eredmény az IRAS mesterséges hold infravörös-térképein egy 500 fényév átmérőjű óriás porbuborék felfedezése volt. 2002–2005-ben az ESA ISO űrtávcsöve mérései alapján létrehozott archívumhoz járultak hozzá magyar kutatók különlegesen pontos mérésértékeléssel és fontos eredményekkel a kialakuló csillagok változékonyságáról és az infravörös égbolt háttérfényességéről. 2009-ben egy magyar vezetéssel készült Nature-cikk adta hírül a NASA Spitzer-űrtávcsövének mérései alapján, hogy az EX Lupi fiatal csillag kitörése során először sikerült megfigyelni a csillagkörüli amorf szilikátszemcsék kristályosodását [A5]. A CSFK CSI-ben működő kutatócsoport fontos munkát vállalt az ESA Herschel szondájának küldetésében (2009–2013), többek között meghatározva a távoli háttérgalaxisok egybemosódásából eredő mérési bizonytalanságot. A Herschel egyik legfontosabb öröksége, a PACS műszer pontforrás-katalógusa is Magyarországon készült el, és jelentős magyar hozzájárulással térképezték fel a Tejútrendszer hideg csillagközi felhőmagjait is [A6]. A Herschel mérései alapján magyar vezetéssel meghatározták a Naprendszerben a Neptunuszon túli égitestek pontos méretét, felszíni tulajdonságait, és több esetben felfedezték kettősségüket vagy a körülöttük lévő porgyűrűt.

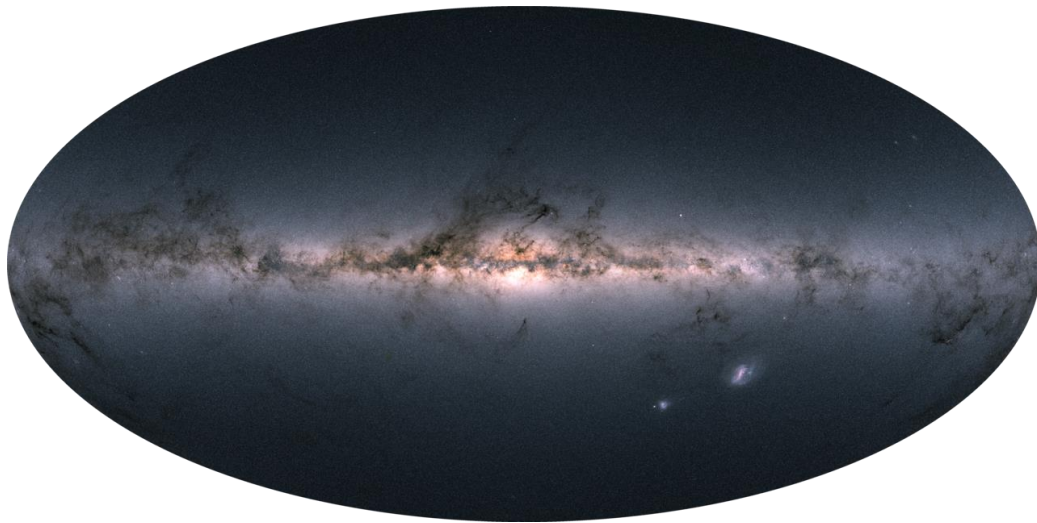
## IV.4. Űrfotometria

Az elmúlt másfél évtizedben az űrből végzett nagy pontosságú fényességmérés egyaránt áttörést hozott a távoli csillagok körül keringő (exo)bolygók felfedezésében és a csillagok fejlődésének és szerkezetének jobb megértésében. E tekintetben említést érdemelnek az európai CoRoT, valamint az amerikai Kepler/K2 és TESS űrtávcsövek, amelyek mindegyikének tudományos programjához jelentősen hozzájárult a hazai kutatóközösség (CSFK CSI, ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium) [A7]. Kiemelendő a klasszikus pulzáló és fedési változócsillagokkal foglalkozó nemzetközi munkacsoportok vezetése, új dinamikai jelenségek felfedezése, valamint ezen űreszközök innovatív használata naprendszerbeli objektumok vizsgálatára. Az űrfotometriának köszönhetően kiderült, hogy a csillagok többsége körül bolygók keringenek, és a parányi fényességváltozást okozó csillagrezgések segítségével nagyon pontosan feltérképezhető a csillagok belső szerkezete, és megállapítható a koruk. A

csillagregzéseket vizsgáló új tudományterület, a csillagszeizmológia egyik nemzetközi jelentőségű műhelye a CSFK CSI.

## IV.5. Űrasztrometria

Az égitestek helyzetét és annak változásait a Földön kívül végzett asztrometriai mérésekkel nagyságrendekkel pontosabban meg lehet határozni, mint földi távcsöves mérésekkel. Az első asztrometriai célú űreszköz, az ESA Hipparcos műholdja 1989–1993 között végezte úttörő méréseit. A Hipparcos programjában már volt magyar kezdeményezésű jóváhagyott projekt. A Hipparcos sikere hatására alkották meg az ugyancsak európai Gaia űrszondát, amelynek mérési pontossága 2-3 nagyságrenddel felülmúlja a Hipparcosét. A Gaia programját előkészítő és a mérési adatokat feldolgozó európai konzorciumban kezdettől fogva részt vesz a CSFK CSI néhány kutatója. A 2014 óta működő Gaia rendkívül pontosan méri minden, a 20,6 magnitúdónál fényesebb csillag helyzetét, mozgását és távolságát lehetővé téve a Tejútrendszer kialakulásának és fejlődésének jobb megértését. A Gaia-mérések 2018 óta elérhető második adathalmaza (Gaia DR2) 1,7 milliárd égi forrás asztrometriáját és fotometriáját tartalmazza, továbbá adatokat közöl a fényesebb források radiális sebességéről, asztrofizikai paramétereiről és fényességváltozásairól is. Sőt 1,3 milliárd forrásra parallaxis- és sajátmozgásértéket is tartalmaz, továbbá több mint félmillió csillagot változócsillagként azonosított. A magyar közreműködők fontos szerepet játszottak ez utóbbiak azonosításában és részletes vizsgálatában. A DR2 fontos mérföldkő a 21. század csillagászatában, amit jól mutat, hogy az adatbázist leíró szakcikk (hazai szerzőtársakkal) másfél év alatt több mint kétezer hivatkozást kapott [A8].



13.kép: A Gaia asztrometriai űrszonda működésének első két évében gyűjtött mérési adatok alapján összeállított kép a Tejútrendszeréről. Az ábra 1,7 milliárd csillag mérései alapján készült. A galaxisunk fősíkjához közeli csillagok alkotják a fényes vízszintes sávot. A fősíktól jobbra lefelé látható két feltűnő fényfolt a Tejútrendszer két legnagyobb kísérőgalaxisa, a Kis- és Nagy-Magellán-felhő. A Gaia jelenleg is folyó mérési programjának befejezése után pontos háromdimenziós térképünk lesz a Tejútrendszeréről és a közeli extragalaxisokról is. (Forrás: ESA/Gaia/DPAC, A. Moitinho / A. F. Silva / M. Barros / C. Barata, University of Lisbon, Portugal)

## IV.6. Gravitációs hullámok

A 21. század eddigi legjelentősebb kutatási eredménye a gravitációs hullámok közvetlen detektálása. Ez Einstein általános relativitáselméletének kísérleti igazolása, egyben – nem elektromágneses információ lévén – új csillagászati információforrás. Észlelésükkel lehetővé vált az ún. többcsatornás csillagászat művelése. Több évtizedes előkészítés és próbálkozás után a lézerinterferometrián alapuló detektorok érzékenységét 2015 őszére sikerült eléggé megnövelni a gravitációs hullámok kimutatásához. A hazai kutatók közül az ELTE TTK Fizikai Intézete, a Wigner FK és az SZTE TTK több munkatársa is közreműködött az e felfedezésekhez vezető kutatásokban. A LIGO Tudományos Kollaboráció és a Virgo Kollaboráció tagjaiként közvetlenül 2015-ben mutattak ki először fekete lyukak [A9], 2017-ben pedig neutroncsillag-kettős összeolvadása által létrehozott gravitációs hullámot [A10, A11]. Utóbbi forrását a 130 millió fényévre levő NGC 4993 galaxisban bekövetkezett kilonóva-robbanással sikerült azonosítani. Ez a megfigyelés eldöntötte, hogy a gravitációs hullám fénysebességgel terjed.

## V. A fizika alkalmazása más tudományterületeken

Az 1970-es és 80-as évekbeli, a kollektív jelenségek megértését hozó nagyszerű eredmények serkentették a 90-es évektől a statisztikus fizikának a hagyományos fizikától távol eső területekre való egyre szélesebb körben történő alkalmazását. Ennek egyik szép példája a természetben és a társadalomban meglévő kollektív viselkedés eredetének feltárása és a megfigyelt törvényszerűségek értelmezése. Az aktív anyagok vizsgálata jelenleg a nemzetközi kutatások homlokterében áll. A nagy adathalmazok elemzése arra az eredményre vezetett, hogy a különböző természetes és mesterséges eredetű összetevők kapcsolatrendszere gyakran komplex hálózati struktúrát mutat. A problémakörrel kapcsolatos vizsgálatokat a magyar kutatók interdiszciplináris keretekben folytatják. Hasonló mondható el az élőlények és embercsoportok közötti kölcsönhatással foglalkozó evolúciós játékelméletre is. Végül, a fizika módszerei egyre meghatározóbb szerepet játszanak a gazdasági és pénzügyi folyamatok kvantitatív elemzésében és az ezt kísérő kockázati analízisben.

### V.1. Kollektív viselkedés a természetben és társadalomban

A kollektív mozgás jelensége akkor jön létre, ha egy rendszer egyedei egymással összehangoltan mozognak. Ilyenkor a határfeltételek, vagy a kölcsönhatás következtében az együttmozgás érdekes formái és a mozgásmintázatok közötti újszerű átmenetek figyelhetők meg. A jelenség alapmodelljét megalkotója után széles körben Vicsek-modellként idézik [I1]. A modell lényege, hogy az egységek azonos sebességgel haladnak, és kölcsönhatásuk során a szomszédok átlagos iránya felé fordulva haladnak tovább, ezért a statisztikus fizikában szokásos feltételekkel ellentétben a rendszer impulzusa (átlagos iránya) nem állandó. Ez azért lehet így, mert a rendszert alkotó egységek csatolva vannak a környezethez. Valószínűleg a koncepció egyszerűsége és a kollektív viselkedés gazdagsága motiválta, hogy két kutatási irány is alapmodelljeként hivatkozzon: egyfelől az ún. aktív anyagok, másfelől az együttmozgó élőlények viselkedésének leírására is használják különféle módosított változatait. Az ELTE-n dolgozó csoport számos, sokat hivatkozott, a kollektív mozgással kapcsolatos eredményt ért el. Az emberek csoportos mozgását modellező munkájuk kapcsolódó cikkek sorát kezdeményezte [I2]. A vonatkozó modell egyik kiemelkedő, de szokatlan alkalmazásaként sikerült a Mekkában (vallási ünnepük alkalmából) évente milliósámra összegyűlő ember sokszor halálos baleseteit (valamint az áldozatok számát) jelentősen csökkenteni. Fontos eredményt sikerült elérniük a madarak mozgásának akkor még újszerű technológiával és módon kiértékelt adatsorait elemezve. Galambcsapat tagjainak a hátára erősítettek mini-GPS berendezést, és a sebességkorrelációk időfüggéséből következtetést vontak le a csoport tagjai között működő komplex kölcsönhatási struktúrára [I3]. Az eredmények azt mutatták, hogy a csapaton belül összetett hierarchikus vezető-követő viselkedés valósul meg. A madárrajok viselkedésének vizsgálata és a technológiai vívmányok inspirálták, hogy létrehozzák a világ első, autonóm robotrepülőgépekből (drónokból) álló, csoportban repülő raját, amelyről a *Nature News* videót is tartalmazó cikkben számolt be.

## V.2. Hálózat kutatás

Az utóbbi két évtized vizsgálatai megmutatták, hogy bizonyos közösségek egyedei a közöttük fennálló kapcsolódás alapján komplex hálózatokat alkotnak. Ilyen hálózatok léteznek a természetben, az emberi társadalomban és különböző mesterséges formákban is, mint az internet. A hálózatok kutatása terén az ELTE kutatói egy olyan új módszert vezetett be, amellyel egymással átfedő csoportokat lehet azonosítani. A hálózatokon belüli csoportok a csoporton belüli sűrűbb kapcsolattal rendelkeznek. A többi csoporttal pedig az átfedő részükön (egy adott csoporttag több csoporthoz is tartozhat) keresztül hatnak kölcsön [14].

A BME kutatói nemzetközi együttműködésben egy olyan lokális algoritmust vezettek be, amely képes az átlapoló modulok hierarchiáját is feltárni [15]. A súlyozott hálózatok tanulmányozása érdekében új fogalmakat vezettek be, mely mennyiségeket az agykutatástól a pénzügyi hálózatok elemzéséig széles körben használják [16]. A társadalom nagyskálás szerkezetére vonatkozó „gyenge kötések ereje” hipotézist mobiltelefon-adatok vizsgálata segítségével igazolták [17], mely munkát az új diszciplína, a számítógépes társadalomtudomány egyik korai dolgozataként tartják számon. Vizsgálták az ún. temporális hálózatokat, amelyeknél a kapcsolatok csak időlegesen vannak jelen, és megállapították, hogy a moduláris jelleg és a súly-topológia korreláción túl a temporális hálózat villanásos jellege is lassítja a folyamatokat [18]. Kidolgozták a temporális hálózati motívumok elméletét, és segítségével újszerű kapcsolatokat találtak a kommunikációs hálózatok dinamikus és sztatikus tulajdonságai között [19].

## V.3. Evolúciós játékelmélet

A csúcstechnológiák jelenlegi fejlődésében nélkülözhetetlen statisztikus fizikai módszerek hatékony matematikai hátteret adnak az evolúciós játékelméleti modellek tanulmányozásához. Ezekben a sokszereplős modellekben a játékelmélet fogalmait használják a biológiai élőlények és emberek, ill. embercsoportok közötti kölcsönhatás leírására. A legnagyobb intenzitással kutatott kérdések az olyan társadalmi csapdahelyzetekkel foglalkoznak, amelyek oka az egyéni és közösségi érdek közötti ellentét. Az elmúlt 20 évben kifejlesztett modellek segítségével az MTA MFA kutatóinak vizsgálatai alapján sikerült feltárni számos olyan körülményt, amelyek segíthetik a nagy létszámú közösségeket abban, hogy elkerüljék ezeket a társadalmi csapdahelyzeteket. Kiderült például, hogy a közösség számára előnyös önzetlen magatartás fenntartásában jelentős szerepe van az utánzásnak, aminek hatékonysága jelentősen növelhető a kapcsolatrendszer inhomogenitásával, illetve egyéb topológiai tulajdonságok megfelelő megválasztásával. Számos modell igazolta, hogy az élőködő magatartás elnyomását segítheti a megfelelően kialakított jutalmazás és büntetés, az önkéntesség vagy a kapcsolat megszakításának lehetősége [110]. Hasonlóan jótékony hatása lehet annak, ha a szereplők nemcsak a választható magatartást adhatják át egymásnak, hanem a tanulás módját, az utánzás pontosságát, vagy a többi szereplőről begyűjtött információt [111]. A fizikusi szemléletmód hozta felszínre azt az általános tulajdonságot is, miszerint a párkölcsönhatásokat négy olyan alapvetően különböző típusból építhetjük fel, amelyek közül kettő jelen van a fizikai rendszerekben [112]. Ez a megközelítés az élő és élettelen rendszerek közötti különbségek további szisztematikus elemzéséhez ad hátteret.



#### **V.4. Kvantitatív gazdasági elemzés**

A pénzügyi és gazdasági folyamatoknak a statisztikus fizika módszereit alkalmazó elemzése a 90-es évek pénzügyi válságát követően kezdődött el. Ezen témakörben az ELTE kutatói részben a spinüvegek vizsgálatánál kifejlesztett módszereket alkalmazva fontos eredményeket értek el a portfólióoptimalizálásnál [I13]. A pénzügyi adatok elemzésének egyik központi kérdése a különböző értékpapírok árfolyamai közötti korrelációk megértése, hiszen a portfóliókat diverzifikálás érdekében célszerű kevéssé korreláló elemekből felépíteni. A BME kutatói az időfüggő korrelációk módszerének segítségével az egyes cégek közötti hatás irányított hálózatát definiálták [I14]. Kidolgozták az aszinkron jelek korrelációinak az időfüggő korrelációs függvényeken alapuló, hatékony meghatározási módszerét, és ennek segítségével megmagyarázták az azonos idejű korrelációknak a mintavételi frekvenciától való erős függését leíró Epps-effektust [I15]. A részvények (azonos idejű) korrelációs mátrixának elemei felfoghatók egy súlyozott teljes gráf élsúlyainak. Számos versengő eljárás ismert a releváns információ kiszűrésére ebből a nagy adatmennyiségből. A BME munkatársai nemzetközi együttműködésben törvényszerűségeket tártak fel a minimális feszítőfára épülő módszerrel kapcsolatban, különösen arra vonatkozóan, hogy hogyan változik a feszítőfa geometriája – vagyis a korrelációk természete – az idő függvényében, pl. válság hatására [I16].

## **VI. Fizika a társadalomban: egészségügy, kultúra, technológia**

Számtalan olyan területen nyilvánul meg a társadalomnak a tudománnyal szembeni pozitív várakozása, ahol egy-egy konkrét gyakorlati kérdésre igényelnek megoldást. E fejezetben néhány példát mutatunk be, amelyekben a fizika tudományának vívmányait hazai fizikusok közvetlen gazdasági/társadalmi hasznot hozó feladatok megoldására fordítják. Ezek a kihívások gyakran a fizikától igen távoli területekre vezetnek.

Elsőként a reaktorfizika területéről említünk néhány példát. Az ott elért eredmények alapvető fontosságúak hazánk biztonságos energiaellátása szempontjából. Ezután a környezetünk védelmét elősegítő kutatásokat mutatunk be. A következő részben a lézerek különböző alkalmazásaira szakosodott, fizikusok által életre hívott néhány kisvállalkozást mutatunk be. Majd a lézeres szemműtékek magyar vonatkozásait foglaljuk össze. Az utóbbi három téma hatása elsősorban az egészségügyre és az orvostudományra gyakorolt jelentős hatást. Végül a kulturális örökség vizsgálatára fizikusok által kifejlesztett módszereket mutatunk be. Ezek az eredmények a társadalomtudományok fejlődésére vannak nagy hatással.

### **VI.1. Reaktorfizika és nukleáris adatok**

A hazai reaktorfizikai kutatások célja a működő Paksi Atomerőmű és kutató-oktató reaktorok biztonságos üzemeltetése során felmerülő kérdések és fejlesztések tudományos megoldása és egyes új típusú, ún. negyedik generációs reaktorok (GEN IV) kutatása és fejlesztése (K+F). A hazai K+F-intézetek az MTA EK, a BME NTI és a NUBIKI több tucat nagy hazai támogató, az EU, a NAÜ és a NEA által meghirdetett pályázatban vettek és vesznek részt. A projektek lényeges része számítógépi kódok fejlesztése és ezek kísérleti igazolása. Nemzetgazdasági szempontból legfontosabb eredményeik a Paksi Atomerőmű négy reaktorblokkjának üzemidő-hosszabbítása és teljesítményük növelése [CS1], valamint teljes léptékű és alapelvi oktató-szimulátor berendezések létrehozása [CS2]. Ezek mellett kiemelkedő eredményeket értek el a baleseti körülmények következményeinek kutatásában is [CS3].

A GEN IV reaktorok, elsősorban a héliumhűtéses ALLEGRO reaktor, K+F-ében is részt vesznek egy a visegrádi-negyekkel kialakított együttműködés keretében. Ezt egészíti ki a Budapesti Kutatóreaktor neutronyalábján EU-s projektek támogatásával biztosított nyílt hozzáférési rendszerben végzett nukleárisadat-mérések és a NAÜ által koordinált kutatások végzése [CS4], melyek hozzájárulnak a reaktorszimulációs és atommagreakció-kódok jóslatainak a pontosításával az új reaktorok biztonságos és költségtakarékos üzemeltetésének megtervezéséhez. E kutatások segítik a nukleáris hulladék veszélyességi időtartamának századrészére (kb. 1000 év) csökkentését és a meglévő uránkészlet kiegészítését új hasadóanyag előállításával, miközben hasznos elektromos vagy hőenergia is képződik.

### **VI.2. Környezet és sugárfizika**

Az emberre ható környezeti ártalmak számottevő része aeroszokok belégzéséből származik.

Az aeroszokok koncentrációjának mérésére hazánkban az utóbbi 30 évben számos új, sőt egyedülálló csúcstechnológia alakult ki. Ilyen a gyorsító analitikai technika [E1] (Atomki), a távmérési lézeres technika (MTA Wigner FK), az ultrafinom részecskék detektálása (ELTE), és kémiai analízisük (Veszprémi Egyetem). Létrejött egy három évtizedre visszatekintő adatbázis a régió aeroszol-szennyezettségéről (Atomki), amely egyedülálló Európában, és számos érdekes aeroszolfajta fizikai, kémiai és biológiai paramétereit felmérték és leírták,

például a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtérét (MTA EK és MTA Wigner FK), a dohányfüstét, pollenekét, a vörösiszapét [E2] és gyógyszereket (MTA Wigner FK).

Az egészségre gyakorolt hatás jellemzésére nemzetközi együttműködés keretében (MTA EK és a Salzburgi Egyetem) az elmúlt 30 év során kifejlesztettek egy flexibilis és precíz, Monte-Carlo-módszeren alapuló flexibilis és precíz aeroszol-kiülepedési és -tisztulási modellt [E3, E4]. Ez az emberi légzőrendszerbe került aeroszokok légúti kiülepedésének eloszlását, tisztulását, valamint ha radioaktív, akkor dóziseloszlását írja le mind egészséges ember, mind számos jellemző légzőrendszeri betegség esetére. A lokális, akár sejtszintű, légúti terheléseloszlást a világon először hazánkban számították ki (MTA EK), numerikus áramlástanai 3D légúti modell segítségével.

### **VI.3. Lézeralkalmazások**

A lézerek hazai alkalmazása a 60-as években, az első magyar lézer megépítése után kezdődött a KFKI-ban (1963). Mára a hazai lézerfejlesztéseket sikeresen hasznosítják az orvostudományban, a környezetvédelemben, valamint az ipar számos területén. Az MTA kutatóintézeteiben és az egyetemeken született eredmények alapján számos olyan kis- és közép vállalkozás jött létre, amelyek több tucat országba exportálnak élvonalbeli lézeres berendezéseket. Ilyen pl. a LASRAM – ipari és orvosi lézerberendezések fejlesztése és gyártása, az OPTILAB – csörpölt lézertükrök és különleges optikai bevonatok fejlesztése és gyártása, a SEMILAB – élvonalbeli félvezető-technológiai alkalmazások fejlesztése és gyártása, a Technoorg-Linda – holografikus lézerberendezések fejlesztése a geofizikai és geológiai alkalmazásokra, az Envi-Tech – környezetvédelmi és optikai mérés-technikai műszerek és technológiák fejlesztése és hasznosítása, a HILASE – fotoakusztikus berendezések fejlesztése. A FEMTONICS a femtoszekundumos lézertechnológiára és a BME Atomfizika Tanszékének akusztóoptikai kutatásaira alapozva világelső nagysebességű kétfotonos pásztázó mikroszkópokat fejleszt és gyárt agykutatási célokra [L6]. Hazai lézeres mérőberendezést alkalmaztak pl. a vörösiszap-katasztrófa következményeinek felmérésénél, amelyben a Wigner FK SZFI vett részt. Ugyanitt fejlesztettek olyan rugalmas, biokompatibilis és kémiaiilag semleges amorf szén védőbevonatot [L7], amely fémháló implantátumok (sztentek) felületére deponálva meggátolja a fém vérrel és érfallal való érintkezését, és így csökkenti a mellékhatások kialakulását. A hasonló eljárással készített amorf szén nanorészecskék adalékanyagként többszörösére növelték a szuperkondenzátorok kapacitását, amelyek az energiatárolásban játszanak fontos szerepet.

A lézeres technológiákat alkalmazó vállalkozások évente több milliárdos forgalmat bonyolítanak le, nagyban hozzájárulva a magyar technológiai szektor növekedéséhez.

### **VI.4. Lézeres szemműtétek**

A látásjavító femtoszekundumos műtéti eljárások tudományos alapja az a Szegeden 1992-től végzett kutatás, amelyben a szaruhártya-lézer kölcsönhatást fizikusok és szemorvosok közösen tanulmányozták. A szemészeti lézerek és a műtéti technikák kifejlesztésében is ennek a bővülő lézerfizikus és orvos csapatnak volt meghatározó szerepe.

Az egyik ilyen eljárás az „fs LASIK” (Laser Assisted In Situ Keratomileusis), melynek során femtoszekundumos lézerimpulzusok sorozatával a szaruhártyán egy fölhajtható lebenyt alakítanak ki. A lebeny fölhajtása után a szaruhártya felszínét már excimer lézerrel alakítják át a kívánt alakra, végül a lebeny visszahajtása történik meg. A páciensnek ezután nem lesz

szüksége szemüvegre. A világon az első néhány száz fs LASIK műtétet Budapesten a Focus Medical magánklinikán végezték 1997-ben [L8].

Egy másik eljárás, a FLACS (Femtosecond Laser Assisted Cataract Surgery) műtét a szürkehályog-eltávolítás új módszere, ahol a lézer a hályog roncsolását végzi. FLACS műtétet világelsőként 2008-ban a SOTE szemklinikáján Nagy Zoltán hajtott végre [L9].

Az elmúlt évtizedben volt olyan év, amikor fs LASIK eljárással 1 millió műtétet végeztek a világ különböző országaiban, ami ekvivalens 500 műtét munkaóránkénti elvégzésével. A világban évi 30 millió szürkehályogműtétet végeznek, azaz munkanaponként 120 ezret. A FLACS lézer igen drága, így elterjedése (az USA-ban) egyelőre csak 15%. A lézeres szemműtétek pontosabbak és biztonságosabbak, mint a kézzel végzettek.

A femtoszekundumos szemműtétek kifejlesztése Magyarország számára sok nemzetközi elismerést hozott, amint azt a Nobel-díjas Gerard Mourou előadásaiban többször is kifejtette. Az emberiség számára valószínűleg ez a femtoszekundumos lézertechnológia eddigi legnagyobb jótéteménye.

## **VI.5. Kulturális örökség**

Az Atomki atom- és magfizikai módszereket alkalmaz régészeti leletek és műtárgyak anyagösszetételének vizsgálatára és kormeghatározásra. Analizálták pl. a Seuso-kincset, a váci Fehérek templomából származó múmiacsontokat, honfoglalás kori ezüstvereteket és számos bronzkori leletanyagot. A vizsgálatok eredményei történeti jelentőségű információhoz juttatják a szakértőket, utalva technológiára, a nyersanyagok eredetére, korabeli kapcsolatrendszerre, ami az ismeretanyagon túl segíti a restaurátorok munkáját.

Radiokarbon-mérésekkel azonosítani lehetett a Szent Koronát I. István királynak hozó Asztrik kalocsai érsek relikviáit.

A BME Nukleáris Technikai Intézetében neutronaktivációval főleg régészeti kerámiák és történelmi relikviák elemvizsgálatát végzik. A Holt-tengeri tekercsek tárolóedényeinek eredetmeghatározásával kapcsolatot találtak az agyagedények és Qumran település között, és ez új megvilágításba helyezte a tekercsek származását is. Vizsgálták a koronázási palástot, és jelentős szerepük volt a Seuso-kincs magyarországi származási helyének bizonyítását célzó anyagvizsgálatokban is.

A Budapesti Neutroncentrum kutatói neutronbefogási és -szórási vizsgálatokkal pl. kőeszközök nyersanyagának eredetét [CH1], továbbá kerámia [CH2], üveg [CH3], fém [CH4] régészeti tárgyak előállításának technikáját határozták meg. Neutron- és protonnyalábbal vizsgáltak Kr. e. 3200-ból származó egyiptomi vasgyöngyöket [CH5]. Megállapították, hogy a gyöngyök vékonyra kalapált és hengeresen feltekert, meteorit eredetű vasból készültek. Ezzel igazoltak egy kb. 100 évvel korábbi feltevést.

## Történeti fontosságú intézmény- és iskolateremtő személyiségek

Az elmúlt három évtizedben zárult le több kiemelkedő tudományos személyiség pályája, akiknek a XX. század utolsó harmadában kezdődött stratégiaalkotó, intézményteremtő munkássága meghatározó volt abban, hogy a magyar fizikai kutatások és intézményeik világszínvonalú eredményeket értek el már közvetlenül a rendszerváltást követő években. Alább röviden emlékeztetünk az 1990 utáni munkásságukra.

*Berényi Dénes* (1928–2012) az Atomki igazgatójaként meghatározóan járult hozzá a modern atomfizikai kísérleti technika hazai meghonosításához, majd a 1990-es évektől kezdve központi szerepet vállalt a határon túli magyar tudományosság és az MTA kapcsolatainak létrehozásában.

*Janszky József* (1943-2018) a magyar kvantumoptikai és kvantuminformaticai kutatások kezdeményezője és iskolateremtő egyénisége. A fény nemklasszikus állapotainak vizsgálatában elért nemzetközileg elismert eredményei indították el az ezredforduló után rohamos fejlődésnek induló -- a kvantumtechnológia megvalósításának irányába mutató -- sikeres hazai kutatásokat.

*Marx György* (1927–2002) az asztrofizika nemzetközi tekintélyű kutatója, a modern fizika és csillagászat vívmányainak nagyhatású tanítója, döntő szerepet játszott a rendszerváltás után abban, hogy a magyar társadalom meghallotta a „marslakók hangját” (Hevesy György, Szilárd Leó hamvainak hazahozatala, Teller Ede látogatásainak megszervezése).

*Szépfalusy Péter* (1931–2014) az önálló statisztikus fizikai kutatási irányzat hazai megteremtője, a fázisátalakulások dinamikájának és a kaotikus rendszerek fizikájának úttörő kutatója pályája záró szakaszában a Bose–Einstein-kondenzációtól a kvark-hadron fázisátalakulás jellemzéséig terjedő széles spektrumú kutatásokat végzett.

*Zawadowski Alfréd* (1936–2017) a modern elméleti és kísérleti szilárdtest-fizikai kutatások világszerte elismert kutatója és a hazai kutatások mentora újjászervezte a Budapesti Műszaki Egyetem Fizikai Intézetét, és azt alig évtizednyi idő alatt a szilárdtest-fizika világszerte megbecsült kutatóközpontjává fejlesztette.

*Zimányi József* (1931–2006) a magyar elméleti magfizika kimagasló nemzetközi elismertségű képviselője vitte sikerre hazánk CERN-csatlakozásának ügyét, ezzel megteremtve a magyar nagyenergiás nehézion-fizikai kutatók részvételének tartós lehetőségét a forró kvarkanyag létrehozásának célját kitűző kísérletekben.

## Monográfiák, tankönyvek

Az 1990-es évtized végén lendületet kapott a modern fizika felsőfokú tankönyveinek és a nagy hagyományú középiskolai tehetséggondozást támogató feladattáraknak a megjelentetése. A fizikus szerzők legjelentősebb kiadói partnerei mindmáig az ELTE Eötvös Kiadó és a Typotex Kiadó. Számos angol nyelvű felsőoktatási előadási jegyzet, monográfia is megjelent az elmúlt 30 évben, amelyek közül néhány komoly nemzetközi visszhangot váltott ki.

### Kiemelkedő sikerű magyar nyelvű kiadványok

Geszti Tamás: *Kvantummechanika* (Typotex, 2007)

Hraskó Péter: *Relativitáselmélet* (Typotex, 2009, bővített kiadás 2016)

Fehér István és Deme Sándor szerkesztésében: *Sugárvédelem* (ELTE Eötvös Kiadó, 2010)

Sólyom Jenő: *A modern szilárdtest-fizika alapjai I-II-III.* (ELTE Eötvös Kiadó, 2009, 2010)

### Angol nyelvű szakkönyvek, tankönyvek, feladatgyűjtemények

Lux Iván, Koblinger László: *Monte Carlo particle transport methods: neutron and photon calculations*  
CRC Press, Boca Raton, FL, 1991

Marx György: *The Voice of the Martians*,  
Akadémiai Kiadó, 1994

Benedict Mihály, A. Ermolaev, V. Malyshev, I. Sokolov, E. Trifonov: *Superradiance: Multiatomic coherent emission*,  
Institute of Physics, Bristol (1996)

Fazekas Patrik: *Lecture Notes on Electron Correlation and Magnetism*,  
World Scientific, 1999

Gnädig Péter, Honyek Gyula, K.F. Riley: *200 Puzzling Physics Problems*,  
Cambridge UP, 2001

Y. Suzuki, R. G. Lovas, K. Yabana, K. Varga: *Structure and reactions of light exotic nuclei*.  
Taylor and Francis, 2003

Pál Lénárd, Pázsit Imre: *Neutron Fluctuations: A Treatise on the Physics of Branching Processes*,  
Elsevier, 2008

Sólyom Jenő: *Fundamentals of the Physics of Solids I-II-III*,  
Springer, 2007, 2009, 2010

Diósi Lajos: *A Short Course in Quantum Information Theory*,  
Springer 2011



Bíró Tamás: *Is There a Temperature?*,  
Springer, 2011

Jakovác Antal, Patkós András: *Resummation and Renormalization in Effective Theories of Particle Physics*,  
Springer, 2016

Gnädig Péter, Honyek Gyula, Vigh Máté: *200 More Puzzling Physics Problems*,  
Cambridge UP, 2016

Asbóth János, Oroszlány László, Pályi András: *A Short Course on Topological Insulators*,  
Springer, 2016

Bíró Tamás, Jakovác Antal: *Emergence of Temperature in Examples and Related Nuisances in Field Theory*,  
Springer, 2019

# Hivatkozások\*

## I. Alapvető kölcsönhatások és részecskék: az atomok alatti méretektől a galaxisokig

### I.1. fejezet

[P1] OPAL Collaboration, (251 szerző, hazai társszerzők: **B. Dienes, A. Csilling, C. Hajdu, D. Horváth, G. Pásztor, Z. Trócsányi, B. Ujvári, R. Vértesi**):

*Study of Z pair production and anomalous couplings in  $e^+e^-$  collisions at  $\sqrt{s}$  between 190 GeV and 209 GeV,*

Eur. Phys. J. C **32**, 303 (2004)

[P2] ALEPH and DELPHI and L3 and OPAL and LEP Electroweak Collaborations, (1644 szerző, hazai társszerzők: **L. Boldizsár, J. Debreczeni, B. Dienes, Á. Csilling, C. Hajdu, D. Horváth, A. Krasznahorkay Jr, S. Nagy, J. Pálinkás, G. Pásztor, P. Raics, P. Tarján, J. Tóth, Z. Trócsányi, B. Ujvári, R. Vértesi, G. Vesztergombi**):

*Electroweak Measurements in Electron-Positron Collisions at W-Boson-Pair Energies at LEP,*

Phys. Rept. **532**, 119 (2013)

[P3] OPAL Collaboration, (210 szerző, hazai társszerzők: **B. Dienes, A. Csilling, C. Hajdu, D. Horváth, A. Krasznahorkay Jr, G. Pásztor, Z. Trócsányi, B. Ujvári, R. Vértesi**):

*Search for Charged Higgs Bosons in  $e^+e^-$  Collisions at  $\sqrt{s} = 189-209$  GeV,*

Eur. Phys. J. C **72**, 2076 (2012)

[P4] ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL Collaborations and the LEP working group for Higgs boson searches, (1216 szerző, hazai társszerzők: **L. Boldizsár, J. Debreczeni, B. Dienes, Á. Csilling, C. Hajdu, D. Horváth, A. Krasznahorkay Jr, S. Nagy, G. Pásztor, P. Raics, P. Tarján, J. Tóth, Z. Trócsányi, B. Ujvári, R. Vértesi, G. Vesztergombi**):

*Search for Charged Higgs bosons: Combined Results Using LEP data,*

Eur. Phys. J. C **73**, 2463 (2013);

*Search for neutral MSSM Higgs bosons at LEP,*

Eur. Phys. J. C **47**, 547 (2006)

[P5] S. Catani, S. Dittmaier, M. H. Seymour, **Z. Trócsányi**,

*The Dipole formalism for next-to-leading order QCD calculations with massive partons,*

Nucl. Phys. B **627**, 189-265 (2002)

[P6] M.V. Garzelli, **Á. Kardos**, C.G. Papadopoulos, **Z. Trócsányi**,

*$ttW$  and  $ttZ$  Hadroproduction at NLO accuracy in QCD with Parton Shower and Hadronization effects,*

JHEP **11**, 056 (2012)

\* **a magyar szerzők** neve vastagon szedve (*dőlt betűvel* szerepelnek azok a magyar szerzők, akik az adott publikációban külföldi affiliációval szerepelnek)

[P7] CMS Collaboration, (1966 szerző, hazai társszerzők: **A. Aranyi, G. Bencze, N. Béni, L. Boldizsár, G. Debreczeni, C. Hajdu, D. Horváth, A. Kapusi, K. Krajczár, A. László, J. Molnár, J. Pálincás, P. Raics, F. Siklér, Z. Szillási, Z.L. Trócsányi, B. Ujvári, G.I. Veres, V. Veszprémi, G. Vesztergombi**):

*Transverse Momentum and Pseudorapidity Distributions of Charged Hadrons in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  and  $2.36$  TeV,*

JHEP **02**, 041 (2010)

[P8] CMS Collaboration, (2900 szerző, hazai társszerzők: **G. Bencze, N. Béni, S. Czellár, A. Fenyvesi, C. Hajdu, P. Hidas, D. Horváth, J. Karancsi, K. Krajczár, J. Molnár, J. Pálincás, P. Raics, F. Siklér, Z. Szillási, Z.L. Trócsányi, B. Ujvári, G.I. Veres, V. Veszprémi, G. Vesztergombi, P. Zalán, G. Zilizi**):

*Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC,* Phys. Lett. B **716**, 30 (2012)

[P9] ATLAS Collaboration, (2932 szerző, hazai társszerzők: **G. Pásztor, J. Tóth**):

*Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC,*

Phys. Lett. B **716**, 1 (2012)

[P10] ATLAS Collaboration, (3020 szerző, hazai társszerzők: **G. Pásztor, J. Tóth**):

*Measurements of the electron and muon inclusive cross-sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector,*

Phys. Lett. B **707**, 438 (2012)

[P11] CMS Collaboration, (3099 szerző, hazai társszerzők: **L. Baksay, G. Bencze, N. Béni, L. Boldizsár, G. Debreczeni, A. Fenyvesi, C. Hajdu, P. Hidas, D. Horváth, J. Imrek, A. Kapusi, P. Kövesárki, A. László, G. Marian, J. Molnár, D. Novák, G. Ódor, J. Pálincás, G. Pásztor, G. Patay, B. Radics, P. Raics, F. Siklér, Z. Szabó, G. Székely, Z. Szillási, Z.L. Trócsányi, G.I. Veres, G. Vesztergombi, P. Zalán, G. Zilizi**):

*The CMS experiment at the CERN LHC,*

JINST **3**, S08004 (2008)

## I.2. fejezet

[P12] F. Karsch, T. Neuhaus, **A. Patkós**, J. Rank,

*Gauge boson masses in the 3-D, SU(2) gauge Higgs model,*

Nucl. Phys. B **474**, 217 (1996)

[P13] **F. Csikor, Z. Fodor**, J. Heitger,

*Endpoint of the hot electroweak phase transition,*

Phys. Rev. Lett. **82**, 21 (1999)

[P14] Y. Aoki, G. Endrődi, **Z. Fodor, S.D. Katz**, K.K. Szabó,

*The order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics,*

Nature **443**, 675 (2006)

[P15] S. Dürr *et al.* (hazai társszerzők: **Z.Fodor, S.D. Katz**),  
*Ab-Initio Determination of Light Hadron Masses*,  
Science **322**, 1224 (2008)

[P16] **Z. Fodor**, K. Holland, J. Kuti, **D. Nográdi**, C. Schroeder, C.H. Wong,  
*Can the nearly conformal sextet gauge model hide the Higgs impostor?*,  
Phys. Lett. B **718**, 65 (2012)

### I.3. fejezet

[N1] **A. J. Krasznahorkay, M. Hunyadi**, M. N. Harakeh, **M. Csatlós**, T. Faestermann, A. Gollwitzer, G. Graw, **J. Gulyás**, D. Habs, R. Hertenberger, H. J. Maier, **Z. Máté**, D. Rudolph, P. Thirolf, **J. Timár**, and B. D. Valnion,  
*Experimental Evidence for Hyperdeformed States in U Isotopes*,  
Phys. Rev. Lett. **80**, 2073 (1998)

[N2] P. Joshi, D.G. Jenkins, P.M. Raddon, A.J. Simons, R. Wadsworth, A.R. Wilkinson, D.B. Fossan, T. Koike, K. Starosta, C. Vaman, **J. Timár, Zs. Dombrádi, A. Krasznahorkay, J. Molnár, D. Sohler, L. Zolnai, A. Algora**, E.S. Paul, G. Rainovski, A. Gizon, J. Gizon, P. Bednarczyk, D. Curien, G. Duchêne, J.N. Scheurer,  
*Stability of chiral geometry in the odd odd Rh isotopes: spectroscopy of  $^{106}\text{Rh}$* ,  
Phys. Lett. B **595**, 135 (2004)

[N3] **J. Timár**, C. Vaman, K. Starosta, D. B. Fossan, T. Koike, **D. Sohler**, I. Y. Lee, A.O.Macchiavelli,  
*Role of the core in degeneracy of chiral candidate band doubling*,  
Phys. Rev. C **73**, 011301(R) (2006)

[N4] K. Hagino, N. Rowley, **A. T. Kruppa**,  
*A program for coupled-channel calculations with all order couplings for heavy-ion fusion reactions*,  
Comp. Phys. Comm. **123**, 143 (1999)

[N5] **A. J. Krasznahorkay**, M. Fujiwara, P. van Aarle, H. Akimune, I. Daito, H. Fujimura, Y. Fujita, M. N. Harakeh, T. Inomata, J. Jänecke, S. Nakayama, A. Tamii, M. Tanaka, H. Toyokawa, W. Uijen, and M. Yosoi,  
*Excitation of Isovector „Spin-Dipole Resonances and Neutron Skin of Nuclei”*,  
Phys. Rev. Lett. **82**, 3216 (1999)

[N6] **Z. Elekes, Zs. Dombrádi, A. Krasznahorkay, Baba, M. Csatlós, L. Csige**, Fukuda, N; **Zs. Fülöp, Z. Gácsi, J. Gulyás**, N.Iwasa, H. Kinugawa, S. Kubono, M. Kurokawa, X. Liu, S. Michimasa, T. Minemura, T. Motobayashi, A. Ozawa, A. Saito, S. Shimoura, S. Takeuchi, I. Tanihata, P. G. Thirolf, Y. Yanagisawa, K. Yoshida,  
*Decoupling of valence neutrons from the core in  $^{16}\text{C}$* ,  
Physics Letters B **586**, 34 (2004)

- [N7] **K. Varga**, Y. Suzuki, **R. G. Lovas**,  
*Microscopic multicluster description of neutron-halo nuclei with a stochastic variational method*,  
Nuclear Physics A **571**, 447 (1994)
- [N8] **R. G. Lovas**, R.J. Liotta, A. Insolia, K. Varga, D. Delion,  
*Microscopic theory of cluster radioactivity*,  
Physics Reports **294**, 265 (1998)
- [N9] **A. T. Kruppa**, B. Barmore, W. Nazarewicz, **T. Vertse**,  
*Fine structure in the decay of deformed proton emitters: Nonadiabatic approach*,  
Phys. Rev. Lett **84**, 4549 (2000)
- [N10] M. Stanoiu *et al.* (hazai társszerzők: Zs. **Dombrádi**, D. **Sohler.**, Zs. **Fülöp**, A. **Krasznahorkay**, Zs. **Podolyak.**, J. **Timár**),  
*N=14 and 16 shell gaps in neutron-rich oxygen isotopes*,  
Physical Review C **69**, 034312 (2004)
- [N11] **Z. Elekes** *et al.* (hazai társszerzők: Zs. **Dombrádi**, Zs. **Fülöp**, D. **Sohler**),  
*Spectroscopic Study of Neutron Shell Closures via Nucleon Transfer in the Near-Dripline Nucleus  $^{23}\text{O}$* ,  
Physical Review Letters **98**, 102502 (2007)
- [N12] **A. T. Kruppa**, M. Bender, W. Nazarewicz, P. G. Reinhard, **T. Vertse**, S. Cwiok, *Shell corrections of superheavy nuclei in self-consistent calculations*,  
Phys. Rev. C **61** 034313 (2000)
- [N13] **A. J. Krasznahorkay**, M. Csatlós, L. Csige, Z. Gácsi, J. Gulyás, M. Hunyadi, I. Kuti, B.M. Nyakó, L. Stuhl, J. Timár, T.G. Tornyi, Zs. Vajta, T.J. Ketel, and A. **Krasznahorkay**,  
*Observation of Anomalous Internal Pair Creation in  $^8\text{Be}$ : A Possible Indication of a Light, Neutral Boson*,  
Phys. Rev. Lett. **116**, 042501 (2016).
- [N14] **E. Somorjai**, Zs. **Fülöp**, **Á. Z. Kiss**, C.E. Rolfs, H.P. Trautvetter, U. Greife, M. Junker, S. Goriely, M. Arnould, M. Rayet, T. Rauscher, H. Oberhummer,  
*Experimental cross section of  $^{144}\text{Sm}(\alpha, \gamma)^{148}\text{Gd}$  and implications for the p-process*,  
Astronomy & Astrophysics **333**, 1112 (1998)
- [N15] F. Confortola *et al* (31 szerző, hazai társszerzők: G. **Gyürky**, Z. **Elekes**, Zs. **Fülöp**, E. **Somorjai**),  
*Astrophysical S-factor of the  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  reaction measured at low energy via detection of prompt and delayed gamma rays*,  
Physical Review C **75**, 065803 (2007)
- [N16] A. Formicola *et al.* (32 szerző, hazai társszerzők: Zs. **Fülöp**, G. **Gyürky**, E. **Somorjai**),  
*Astrophysical S-factor of  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$* ,  
Physics Letters B **591**, 61 (2004)

## I.4. fejezet

[P17] **I. Bartos, B. Kocsis, Z. Haiman, S. Márka,**  
*Rapid and Bright Stellar Mass Binary Black Hole Mergers in Active Galactic Nuclei,*  
Ap.J. **835**, id:165 (2017)

[P18] **Z. Lippai, Z. Frei, Z. Haiman,**  
*Prompt Shocks in the Gas Disks around a Recoiling Supermassive Black Hole Binary,*  
Ap.J. Lett. **676**, L5 (2008)

[P19] **B. Mikóczi, M. Vasúth, L.Á. Gergely,**  
*Self-interaction spin effects in inspiralling compact binaries,*  
Phys. Rev. D **71**, 124043 (2005)

[P20] P. Breitenlohner, **P. Forgács,** D. Maison,  
*Gravitating monopole solutions,*  
Nucl. Phys. B **383**, 357 (1992)

[P21] **Gy. Fodor, P. Forgács,** P. Grandclément, **I. Rácz,**  
*Oscillons and quasibreathers in the  $\phi^4$  Klein-Gordon model,*  
Phys. Rev. D **74**, 124003 (2006)

[P22] **R. Bartnik, Gy. Fodor,**  
*On the restricted validity of the thin sandwich conjecture,*  
Phys. Rev. D **48**, 3596 (1993)

[P23] **L.B. Szabados,**  
*Quasi-Local Energy-Momentum and Angular Momentum in GR: A Review Article,*  
Living Rev. Relativity **7**, 4 (2004)

[P24] **L.Á. Gergely,**  
*Generalized Friedmann branes,*  
Phys. Rev. D **68**, 124011 (2003)

## I.5. fejezet

[NP1] **T. S. Biró,** E. van Doorn, B. Müller, M. H. Thoma, X. N. Wang,  
*Parton equilibration in relativistic heavy ion collisions,*  
Phys. Rev. C **48**, 1275 (1993)

[NP2] **M. Gyulassy, P. Lévai,** I. Vitev,  
*Reaction operator approach to non-Abelian energy loss,*  
Nucl. Phys. B **594**, 371 (2001)

[NP3] Y. Aoki, **G. Endrődi, Z. Fodor, S. D. Katz, K. K. Szabó:**  
*The order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics,*  
Nature **443**, 675 (2006)

- [NP4] NA49 Collaboration, (101 szerző, hazai társszerzők: **D. Barna, P. Csató, Z. Fodor, J. Gál, S. Hegyi, P. Lévai, J. Molnár, G. Pála, F. Siklér, I. Szentpétery, J. Sziklai, D. Varga, G. I. Veres, Gy. Vesztergombi, J. Zimányi**):  
*Directed and elliptic flow of charged pions and protons in Pb+Pb collisions at 40-A-GeV and 158-A-GeV,*  
 Phys. Rev. C **68** 034903 (2003)
- [NP5] NA49 Collaboration (97 szerző, hazai társszerzők: **P. Csató, Z. Fodor, J. Gál, S. Hegyi, J. Kecskeméti, J. Pálinkás, G. Pála, F. Siklér, I. Szentpétery, J. Sziklai, Gy. Vesztergombi, J. Zimányi**):  
*Transverse Energy Production in  $^{208}\text{Pb}+^{208}\text{Pb}$  Collisions at 158 GeV per Nucleon,*  
 Phys. Rev. Lett. **75**, 3814 (1995)
- [NP6] **J. Zimányi, T. S. Biró, T. Csörgő and P. Lévai**:  
*Quark liberation and coalescence at CERN SPS,*  
 Phys. Lett. B**472**, 243 (2000)
- [NP7] J. P. Bondorf, S. I. A. Garpman, **J. Zimányi**:  
*A Simple Analytic Hydrodynamic Model for Expanding Fireballs,*  
 Nucl. Phys. A**296**, 320 (1978)
- [NP8] **T. Csörgő**, B. Lörstad:  
*Bose-Einstein correlations for three-dimensionally expanding, cylindrically symmetric, finite systems,*  
 Phys.Rev. C **54** 1390 (1996)
- [NP9] PHOBOS Collaboration, (78 szerző, hazai társszerző: **G. I. Veres**):  
*The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC,*  
 Nucl. Phys. A**757**, 28 (2005)
- [NP10] PHENIX Collaboration, (510 szerző, hazai társszerzők: **M. Csanád, T. Csörgő, G. Dávid, F. Deák, P. Hidas, Á. Kiss, A. Ster, J. Sziklai, P. Tarján, V. Veszprémi, R. Vértesi, J. Zimányi**):  
*Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus–nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration,*  
 Nucl. Phys. A**757**, 184 (2005)
- [NP11] PHENIX Collaboration: (307 szerző, hazai társszerző: **G. Dávid, A. Ster**)  
*Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=130$  GeV,*  
 Phys. Rev. Lett. **88** 022301 (2002)
- [NP12] PHENIX Collaboration, (328 szerző, hazai társszerzők: **M. Csanád, T. Csörgő, G. Dávid, F. Deák, P. Hidas, Á. Kiss, A. Ster, P. Tarján, V. Veszprémi, J. Zimányi**):  
*Absence of suppression in particle production at large transverse momentum in  $s(NN)^{**1/2} = 200$  GeV d+Au collisions,*  
 Phys. Rev. Lett. **91**, 072303 (2003)



[NP13] PHOBOS Collaboration (68 szerző, hazai társszerző: **G. I. Veres**):  
*Centrality dependence of charged hadron transverse momentum spectra in  $d+Au$  collisions at  $s(NN)^{1/2} = 200$  GeV,*  
Phys. Rev. Lett. **91**, 072302 (2003)

[NP14] **T. Csörgő, M. I. Nagy, M. Csanád**:  
*A new family of simple solutions of perfect fluid hydrodynamics,*  
Phys. Lett. B**663**, 306 (2008)

[NP15] ALICE Collaboration (1161 szerző, hazai társszerzők: **G. Barnaföldi, L. Boldizsár, E. Dénes, Z. Fodor, G. Hamar, T. Kiss, P. Lévai, L. Molnár, G. Pála, Gy. Rubin, T. Tölyhi**):  
*The ALICE experiment at the CERN LHC,*  
JINST **3**, S08002 (2008)

[NP16] CMS Collaboration (2145 szerző, hazai társszerzők: **A. Aranyi, Gy. Bencze, N. Béni, L. Boldizsár, Cs. Hajdu, P. Hidas, D. Horváth, A. Kapusi, K. Krajczár, J. Molnár, J. Pálincás, P. Raics, F. Siklér, Z. Szillási, Z. L. Trócsányi, B. Ujvári, G. I. Veres, V. Veszprémi, G. Vesztergombi**):  
*Observation and studies of jet quenching in PbPb collisions at nucleon-nucleon center-of-mass energy = 2.76 TeV,*  
Phys. Rev. C**84**, 024906 (2011)

[NP17] CMS Collaboration, (2152 szerző, hazai társszerzők: **Gy. Bencze, N. Béni, S. Czellar, Cs. Hajdu, P. Hidas, D. Horváth, J. Karancsi, K. Krajczár, A. Makovec, J. Molnár, J. Pálincás, P. Raics, F. Siklér, Z. Szillási, Z. L. Trócsányi, B. Ujvári, G. I. Veres, V. Veszprémi, G. Vesztergombi, A. J. Zsigmond**):  
*Evidence for collective multiparticle correlations on pPb collisions,*  
Phys. Rev. Lett. **115** 012301 (2015);  
*Evidence for collectivity in pp collisions at the LHC,*  
Phys. Lett. B**765**, 193 (2017)

[NP18] ALICE Collaboration, (1003 szerző, hazai társszerzők: **G. Barnaföldi, Gy. Benczédi, D. Berényi, G. Bíró, L. Boldizsár, E. Dénes, G. Hamar, T. Kiss, P. Lévai, A. Lowe, L. Molnár, S. Pochybova, D. Varga, G. Volpe**):  
*Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions,*  
Nature Phys. **13**, 535 (2017)

[NP19] PHENIX Collaboration, (320 szerző, hazai társszerzők: **A. Bagoly, M. Csanád, T. Csörgő, G. Dávid, J. Imrek, D. Kincses, B. Kurgyis, K. Lovász, S. Lökös, T. Majoros, M. I. Nagy, T. Novák, Z. Sun, J. Sziklai, G. Tarnai, B. Ujvári**):  
*Creation of quark–gluon plasma droplets with three distinct geometries.*  
Nature Phys. **15**, 214 (2019)

## I.6. fejezet

[P25] G. Feverati, F. Ravanini, **G. Takács**,  
*Nonlinear integral equation and finite volume spectrum of Sine-Gordon theory*,  
Nucl. Phys. B **540**, 543 (1999)

[P26] N. Beisert, C. Ahn, L.F. Alday, **Z. Bajnok** *et al.*,  
*Review of AdS/CFT Integrability: An Overview*,  
Lett. Math. Phys. **99**, 3 (2012)

[P27] **J. Balog, Á. Hegedűs**,  
*Hybrid-NLIE for the AdS/CFT spectral problem*,  
JHEP **08**, 022 (2012)

[P28] **Z. Bajnok**, R.A. Janik,  
*Four-loop perturbative Konishi from strings and finite size effects for multiparticle states*,  
Nucl. Phys. B **807**, 625 (2009)

## II. Atomi szintű kutatások

### II.1. fejezet

[X1] **M. Tegze, G. Faigel**  
*X-ray holography with atomic resolution*,  
Nature **380**, 49 (1996)

[X2] S. Marchesini, F. Schmithüsen, **M. Tegze, G. Faigel**, Y. Calvayrac, M. Belakhovsky, J. Chevrier, A.S. Simionovici  
*Direct 3D imaging of  $Al_{70.4}Pd_{21}Mn_{8.6}$  quasicrystal local atomic structure by X-ray holography*  
Phys. Rev. Lett. **85**, 4723-4727 (2000)

[X3] **G. Oszlányi, A. Sütő**  
*Ab initio structure solution by charge flipping*,  
Acta Cryst. Section A **60**, 134 (2004)

[X4] **G. Vankó G**, P. Glatzel, V.T. Pham, R. Abela; D. Grolimund; C.N. Borca; S.L. Johnson, C.J. Milne, C. Bressler C  
*X-Ray Emission Spectroscopy: Ultrafast Spin-State Determination in an Iron Complex*  
Angewandte Chemie International Edition **49**, 5910 (2010)

### II.2 fejezet

[C1] **S. Pekker**, L. Forro, L. Mihaly, **A. Janossy**  
*Orthorhombic  $A_1C_{60}$ : A conducting linear alkali fulleride polymer?*  
Solid State Communications **90**, 349 (1994)

[C2] P. W. Stephens, **G. Bortel, G. Faigel, M. Tegze, A. Jánossy, S. Pekker, G. Oszlányi, L. Forró**

*Polymer chains in Rb<sub>1</sub>C<sub>60</sub> and K<sub>1</sub>C<sub>60</sub>,*  
Nature **370**, 636 (1994)

[C3] **S. Pekker, É. Kováts, G. Oszlányi, Gy. Bényei, G. Klupp, G. Bortel, I. Jalsovszky, E. Jakab, F. Borondics, K. Kamarás, M. Bokor, G. Kriza, K. Tompa, G. Faigel**  
*Rotor-Stator Molecular Crystals of Fullerenes with Cubane,*  
Nature Materials **4**, 764 (2005)

[C4] **Z. Osváth, G. Vertesy, L. Tapasztó, L.**, et al  
*Atomically resolved STM images of carbon nanotube defects produced by Ar<sup>+</sup> irradiation*  
Physical Review **B 72**, 045429 (2005)

[C5] Z.C. Wu, Z.H. Chen, X. Du, J.M. Logan, J. Sippel, M. Nikolou, **K. Kamarás, J.R. Reynolds, D.B. Tanner, A.F. Hebard, A.G. Rinzler**  
*Transparent, conductive carbon nanotube films*  
Science **305**, 1273-1276 (2004)

[C6] **J. Kurti, G. Kresse, H. Kuzmany**  
*First-principles calculations of the radial breathing mode of single-wall carbon nanotubes,*  
Phys. Rev. **B 58**, R8869 (1998)

[C7] **L. Tapasztó, G. Dobrik, P. Lambin, L.P. Biró**  
*Tailoring the atomic structure of graphene nanoribbons by scanning tunnelling microscope lithography,*  
Nature Nanotechnology **3**, 397 (2008)

[C8] **G.Zs. Magda, X.Z. Jin, I. Hagymási, P Vancsó, Z Osváth, P Nemes-Incze, C.Y. Hwang, L.P. Biró, L. Tapasztó**  
*Room-temperature magnetic order on zigzag edges of narrow graphene nanoribbons,*  
Nature **514**, 608 (2014)

[C9] **J. Cserti**  
*Application of the lattice Green's function for calculating the resistance of an infinite network of resistors,*  
American J. of Physics **68**, 896 (2000)

### **II.3. fejezet**

[E1] **I. Bakonyi, L. Péter**  
*Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): progress and problems,*  
Progress in Materials Science **55**, 107 (2010)

[E2] R. Zeller, B. Dederichs, **L. Szunyogh, P. Weinberger**  
*Theory and convergence properties of the screened Korringa-Kohn-Rostoker method,*  
Physical Review B **52**, 8807 (1995)

[E3] **B. Újfalussy, L. Szunyogh, P. Bruno, P. Weinberger**  
*First-principles calculation of the anomalous perpendicular anisotropy in Co monolayer on*

- Au(111)*,  
Physical Review Letters **77**, 1805 (1996)
- [E4] **L. Udvardi, L. Szunyogh**  
*Chiral asymmetry of the spin-wave spectra in ultrathin magnetic films*,  
Physical Review Letters **102**, 207204 (2009)
- [E5] **O. Újsághy, J. Kroha, L. Szunyogh, A. Zawadowski**  
*Theory of the Fano resonance in the STM tunneling density of states due to a single Kondo impurity*,  
Physical Review Letters **85**, 2557 (2000)
- [E6] **F. Simon, A. Jánossy, T. Fehér, F. Murányi, S. Garaj, L. Forró, C. Petrovic, S.I. Budko, P.C. Canfield**  
*Anisotropy of superconducting MgB<sub>2</sub> as seen in electron spin resonance and magnetization data*,  
Physical Review Letters **87**, 047002 (2001)
- [E7] **L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygard, C. Schonenberger**  
*Cooper pair splitter realized in a two-quantum-dot Y-junction*,  
Nature **461**, 960 (2009)
- [E8] **S. Csonka, A. Halbritter, G. Mihály, O.I. Shklyarevskii, S. Speller, H van Kempen**  
*Conductance of Pd-H nanojunctions*,  
Physical Review Letters **93**, 016802 (2004)
- [E9] **P. Földi, B. Molnár, M.G. Benedict, F. M. Peeters**  
*Spintronic single qubit gate based on a quantum ring with spin-orbit interactions*,  
Phys. Rev. **B 71**, 33309 (2005)
- [10] **P. Földi, O. Kálmán, M.G. Benedict, F. M. Peeters**  
*Quantum rings as electron spin beam splitters*,  
Phys. Rev. **B 73**, 155325 (2006)
- [E11] **I. Kézsmárki, S. Bordács, P. Milde, E. Neuber, L.M. Eng, J.S. White, H.M. Rønnow, C. D. Dewhurst, M. Mochizuki, K. Yanai, H. Nakamura, D. Ehlers, V. Tsurkan, A. Loidl**  
*Néel-type Skyrmion Lattice with Confined Orientation in the Polar Magnetic Semiconductor GaV<sub>4</sub>S<sub>8</sub>*  
Nature Materilas **14**, 1116 (2015)
- [E12] **I. Kézsmark, N. Kida, H. Murakawa, S. Bordács, Y. Onose, Y. Tokura**  
*Enhanced Directional Dichroism of Terahertz Light in Resonance with Magnetic Excitations of the Multiferroic Ba<sub>2</sub>CoGe<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Oxide Compound*,  
Physical Review Letters **106**, 057403 (2011)
- [E13] **Ö. Legeza, J. Sólyom**  
*Optimizing the density-matrix renormalization group method using quantum information entropy*,  
Physical Review B **68**, 195116 (2003)

[E14] **Ö. Legeza, J. Sólyom**  
*Quantum data compression, quantum information generation, and the density-matrix renormalization-group method,*  
Physical Review B **70**, 205118 (2004)

[E15] **M. Kallay, P. Szalay, P. Surjan,**  
*A general state-selective multireference coupled-cluster algorithm,*  
Journal of Chemical Physics **117** 980-990 (2002)

[E16] **M. Kormos, A. Shashi, Y.Z. Chou, J.S. Caux, A. Imambekov**  
*Interaction quenches in the one-dimensional Bose gas,*  
Physical Review B **88**, 205131 (2013)

[E17] **B. Pozsgay**  
*The generalized Gibbs ensemble for Heisenberg spin chains,*  
Journal of Statistical Mechanics - Theory and Experiment **07**, 07003 (2013)

[E18] **A. Rapp, G. Zaránd, C. Honerkamp, W. Hofstetter**  
*Color superfluidity and "Baryon" formation in ultracold fermions,*  
Physical Review Letters **98**, 160405 (2007)

[E19] **J. Cayssol, B. Dóra, F. Simon, R. Moessner**  
*Floquet topological insulators,*  
Physica Status Solidi - Rapid Research Letters **7**, 101 (2013)

## II.4. fejezet

[L1] **J. Hebling, G. Almási, Ida Z. Kozma, J. Kuhl**  
*Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation,*  
Optics Express **10**, 1161 (2002)

[L2] **Gy. Farkas, Cs. Tóth**  
*Proposal for attosecond light pulse generation using multiple harmonic conversion processes in rare gases,*  
Physics Letters A **168**, 447 (1992)

[L3] **P. Dombi, A. Hörl, P. Rácz, I. Márton, A. Trügler, J. R. Krenn, U. Hohenester,**  
*Ultrafast strong-field photoemission from plasmonic nanoparticles,*  
Nano Lett. **13**, 674 (2013).

[L4] **R. Szipőcs, K. Ferencz, C. Spielmann, F. Krausz**  
*Chirped multilayer coatings for broad-band dispersion control in femtosecond lasers,*  
Optics Letters, **19**, 201 (1994)

[L5] **D. Nagy, G. Kónya, G. Szirmai, P. Domokos**  
*Dicke-Model Phase Transition in the Quantum Motion of a Bose-Einstein Condensate in an Optical Cavity,*

### III. Makroszkopikus fizika

#### III.1. fejezet

[M1] **L.P. Biró, Z. Bálint, K. Kertész, Z. Vértesy, G.I. Márk, Z.E. Horváth, J. Balázs, D. Méhn, I. Kiricsi, V. Lousse, J.P. Vigneron**

*Role of photonic-crystal-type structures in the thermal regulation of a Lycaenid butterfly sister species pair.*

Phys. Rev. E **67**, 021907 (2003).

[M2] **K. Kertész, G. Piszter, Z. Bálint, L.P. Biró**

*Biogeographical patterns in the structural blue of male *Polyommatus icarus* butterflies.*

Sci. Rep. **9**, 2338 (2019).

#### III.2 fejezet

[M3] **Z. Erdélyi, I. A. Szabó, D. L. Beke**

*Interface sharpening instead of broadening by diffusion in ideal binary alloys,*

Phys. Rev. Lett. **89**, 165901 (2002)

[M4] **Z. Erdélyi, M. Sladeczek, L-M, Stadler, I. Zizak, G.A. Langer, M. Kis-Varga, D.L. Beke, B. Sepiol,**

*Transient Interface Sharpening in Miscible Alloys,*

Science **306**, 1913 (2004)

[M5] **D.L. Beke, Yu. Kaganovskii, G.L. Katona,**

*Interdiffusion along grain boundaries-diffusion induced grain boundary migration, low temperature homogenization and reactions in nanostructured films,*

Prog. in Mat. Sci. **98**, 625 (2018)

#### III.3. fejezet

[M6] **I. Groma,**

*Link between the microscopic and mesoscopic length-scale description of the collective behavior of dislocations,*

Physical Review B **56**, 5807 (1997)

[M7] **I. Groma, F.F. Csikor, M. Zaiser,**

*Spatial correlations and higher-order gradient terms in a continuum description of dislocation dynamics,*

Acta Materialia **51**, 1271 (2003)

[M8] **P.D. Ispánovity**, L. Laurson, M. Zaiser, **I. Groma**, S. Zapperi, M.J. Alava, *Avalanches in 2D dislocation systems: Plastic yielding is not depinning*, Phys. Rev. Lett. **112**, 235501 (2014)

[M9] **I. Groma**, M. Zaiser, **P.D. Ispánovity**, *Dislocation patterning in a two-dimensional continuum theory of dislocations*, Physical Review B **93**, 214110 (2016).

### III.4. fejezet

[M10] **L. Gránásy**, **T. Börzsönyi**, **T. Pusztai** *Nucleation and bulk crystallization in binary phase field theory*. Phys. Rev. Lett. **88**, 206105 (2002)

[M11] **L. Gránásy**, **T. Pusztai**, **T. Börzsönyi**, J. A. Warren, J. F. Douglas *A general mechanism of polycrystalline growth*. Nature Materials **3**, 645 (2004)

[M12] V. Schoeppler, **L. Gránásy**, E. Reich, N. Poulsen, R. de Kloe, P. Cook, A. Rack, **T. Pusztai**, I. Zlotnikov *Biom mineralization as a Paradigm of Directional Solidification: A physical model for molluscan shell ultrastructural morphogenesis* Advanced Materials **30**, 1803855 (2018)

### III.5. fejezet

[M13] **T. Antal**, M. Droz, J. Magnin, **Z. Rácz**, **M. Zrinyi**, *Derivation of the Matalon-Packter law for Liesegang patterns*, J. Chem. Phys. **109**, 9479 (1998)

[M14] I. Bena, M. Droz, **I. Lagzi**, K. Martens, **Z. Rácz**, **A. Volford**, *Designed Patterns: Flexible Control of Precipitation through Electric Currents*, Phys. Rev. Lett. **101**, 075701 (2008)

[M15] S. Thomas, **I. Lagzi**, **F. Molnár Jr.**, **Z. Rácz**, *Probability of the Emergence of Helical Precipitation Patterns in the Wake of Reaction-Diffusion Fronts*, Phys. Rev. Lett. **110**, 078303 (2013)

### III.6 fejezet

[M16] **T. Antal**, **Z. Rácz**, **L. Sasvári**, *Nonequilibrium Steady State in a Quantum System: One-dimensional Transverse Ising Model with Energy Current*, Phys. Rev. Lett. **78**, 167 (1997)



[M17] **V. Eisler, Z. Rácz**,  
*Full Counting Statistics in a Propagating Quantum Front and Random Matrix Spectra*,  
Phys. Rev. Lett. **110**, 060602 (2013)

[M18] **F. Iglói, H. Rieger**,  
*Long range correlations in the non-equilibrium quantum relaxation of a spin chain*,  
Phys. Rev. Lett. **85**, 3233 (2000)

[M19] **B. Pozsgay, M. Mestyán, M. A. Werner, M. Kormos, G. Zaránd, G. Takács**,  
*Correlations after quantum quenches in the XXZ spin chain: Failure of the Generalized Gibbs Ensemble*,  
Phys. Rev. Lett. **113**, 117203 (2014)

### III.7. fejezet

[M20] C. De Dominicis, **I. Kondor, T. Temesvári**  
*Beyond the Sherrington-Kirkpatrick Model*,  
in "Spin Glasses and Random Fields", ed. P. Young, World Scientific (1997)

[M21] **F. Iglói, C. Monthus**  
*Strong disorder RG approach of random systems*,  
Phys. Rep. **412**, 277 (2005)

[M22] M. A. Muñoz, **R. Juhász, C. Castellano, G. Ódor**  
*Griffiths phases on complex networks*,  
Phys. Rev. Lett. **105**, 128701 (2012)

[M23] **T. Geszti**  
*Physical models of neural networks*,  
Singapore: World Scientific (1990).

### III.8. fejezet

[M24] **Z. Kaufmann, H. Lustfeld, A. Németh, P. Szépfalusy**  
*Diffusion in Normal and Critical Transient Chaos*,  
Phys. Rev. Lett. **78**, 4031 (1979)

[M25] P. Cvitanović, R. Artuso, R. Mainieri, G. Tanner, **G. Vattay**  
*Chaos: Classical and Quantum*,  
ChaosBook.org (Niels Bohr Institute, Copenhagen 2016)

[M26] Y.-Ch. Lai, **T. Tél**  
*Transient Chaos, Complex Dynamics on Finite-Time Scales*,  
(Springer, New York, 2011)

### III.9. fejezet

[M27] J. Schulze, **A. Derzsi**, K. Dittmann, T. Hemke, J. Meichsner, **Z. Donkó**  
*Ionization by Drift and Ambipolar Electric Fields in Electronegative Capacitive Radio  
Frequency Plasmas*,  
Phys. Rev. Lett. **107**, 275001 (2011)

[M28] **Z. Donkó**, J. Goree, **P. Hartmann**, **K. Kutasi**  
*Shear viscosity and shear thinning in two-dimensional Yukawa liquids*;  
Phys. Rev. Lett., **96**, 145003 (2006)

[M29] **K. Kutasi**, V. Guerra, P. Sá  
*Active species downstream an Ar-O<sub>2</sub> surface-wave microwave discharge for biomedicine,  
surface treatment and nanostructuring*,  
Plasma Sources Science & Technology, **20**, 035006 (2011)

[M30] **Á. Kövér**, G. Laricchia,  
*Triply differential study of positron impact ionization of H<sub>2</sub>*  
Physical Review Letters **80** 5309-5312. (1998 )

## IV. Az univerzum kutatása

- [A1] D.T. Young *et al.* (58 szerző, hazai társszerzők: **K. Szegő, S. Szalai**)  
*Cassini Plasma Spectrometer Investigation*,  
Space Science Reviews, **114**, 1 (2004)
- [A2] D.T. Young *et al.* (43 szerző, hazai társszerzők: **K. Szegő, Z. Bebesi**)  
*Composition and Dynamics of Plasma in Saturn's Magnetosphere*,  
Science, **307**, 1262 (2005)
- [A3] D.G. York *et al.* (144 szerző, hazai társszerző: **I. Csabai**)  
*The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*,  
Astronomical Journal, **120**, 1579 (2000)
- [A4] D.J. Eisenstein *et al.* (48 szerző, hazai társszerző: **I. Csabai**)  
*Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies*,  
Astrophysical Journal, **633**, 560 (2005)
- [A5] A. Poglitsch *et al.* (83 szerző, hazai társszerző: **Cs. Kiss**)  
*The Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACs) on the Herschel Space Observatory*,  
Astronomy & Astrophysics, **518**, L2 (2010)
- [A6] P. **Ábrahám** *et al.* (11 szerző, hazai társszerzők: **A. Moór, L. Mosoni, N. Sipos**):  
*Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star*,  
Nature, **459**, 224 (2009)
- [A7] R.L. Gilliland *et al.* (35 szerző, hazai társszerzők: **L. Kiss, R. Szabó**):  
*Kepler Asteroseismology Program: Introduction and First Results*,  
Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **122**, 131 (2010)
- [A8] *Gaia Collaboration* (350 szerző, hazai társszerzők: **G. Marschalkó, G. Marton, L. Molnár, E. Plachy, L. Szabados, E. Szegedi-Elek**),  
*Gaia Data Release 2 – Summary of the contents and survey properties*.  
Astronomy and Astrophysics, **616**, A1 (2018)
- [A9] B.P. Abbott *et al.*, (1011 szerző, magyar társszerzők: **D. Barta, P. Bojtos, G. Debreczeni, Z. Frei, L. Gergely, L. Gondán, P. Raffai, M. Tápay, M. Vasúth**)  
*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*,  
Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016)
- [A10] B.P. Abbott *et al.*, (1124 szerző, magyar társszerzők: **D. Barta, B. Bécsy, G. Dálya, Z. Frei, L. Gergely, P. Raffai, M. Tápai, M. Vasúth**)  
*GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*,  
Phys. Rev. Lett. **119**, 161101 (2017)

[A11] B.P. Abbott *et al.*, (3542 szerző, magyar társszerzők: **D. Barta, B. Bécsy, G. Dálya, Z. Frei, L. Gergely, P. Raffai, M. Tápai, M. Vasúth, P. Veres, S. Frey**)  
*Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*,  
Astrophysical Journal Letter **848**, L12 (2017)

## V. A fizika alkalmazása más tudományterületeken

[I1] **T. Vicsek, A. Czirók**, E. Ben-Jacob, I. Cohen, O. Shochet,  
*Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles*,  
Phys. Rev. Lett. **75**, 1226 (1995)

[I2] D. Helbing, **I. Farkas, T. Vicsek**,  
*Simulating dynamical features of escape panic*,  
Nature **407**, 487 (2000)

[I3] **M. Nagy, Z. Ákos, D. Bíró, T. Vicsek**,  
*Hierarchical group dynamics in pigeon flocks*,  
Nature **464**, 890 (2010).

[I4] **G. Palla, I. Derényi, I. Farkas, T. Vicsek**,  
*Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society*,  
Nature **435**, 814 (2005)

[I5] A. Lancichinetti, S. Fortunato, **J. Kertész**,  
*Detecting the overlapping and hierarchical community structure in complex networks*,  
New J. Phys. **11**, 033015 (2009)

[I6] J-P. Onnela, J. Saramäki, **J. Kertész**, K. Kaski,  
*Intensity and coherence of motifs in weighted complex networks*,  
Phys. Rev. E **71**, 065103 (2005)

[I7] J.-P. Onnela, J. Saramäki, J. Hyvönen, **G. Szabó**, D. Lazer, K. Kaski, **J. Kertész, A. L. Barabási**,  
*Structure and tie strengths in mobile communication network*,  
PNAS **104**, 7332 (2007)

[I8] **M. Karsai**, M. Kivelä, R.K. Pan, K. Kaski, **J. Kertész, A. L. Barabási**, J. Saramäki ,  
*Small but slow world: How network topology and burstiness slow down spreading*,  
Phys. Rev. E **83**, 025102 (2011)

[I9] L. Kovanen, K. Kaski, **J. Kertész**, J. Saramäki ,  
*Temporal motifs reveal homophily, gender-specific patterns, and group talk in call sequences*,  
PNAS **110**, 18070 (2013).

[I10] **G. Szabó, G. Fáth**  
*Evolutionary games on graphs*,  
Phys. Rep. **446**, 97 (2007)

[I11] M. Perc, **A. Szolnoki**

*Coevolutionary games – a mini review*,  
BioSystems **99**, 109 (2010)

[I12] **G. Szabó, I. Borsos**

*Evolutionary potential games on lattices*,  
Phys. Rep. **624**, 1 (2016)

[I13] **S. Pafka, I. Kondor**,

*Estimated Correlation Matrices and Portfolio Optimization*,  
PHYSICA A **343**, 623 (2004).

[I14] **L. Kullmann, J. Kertész, K. Kaski**,

*Time dependent cross correlations between different stock returns: A directed network of influence*,  
Phys. Rev. E **66**, 026125 (2002).

[I15] **B. Tóth, J. Kertész**,

*The Epps effect revisited*,  
Quantitative Finance **9**, 793 (2009).

[I16] J.-P. Onnela, A. Chakraborti, K. Kaski, **J. Kertész**, A. Kanto,

*Dynamics of market correlations: Taxonomy and portfolio analysis*,  
Phys. Rev. E **68**, 056110 (2003).

## **VI. Fizika a társadalomban: egészségügy, kultúra, technológia**

### **VI.1. fejezet**

[CS1] A teljesítménynövelés éves szinten kb. 17 Mrd Ft nettó árbevétel-növekedést jelent, míg az üzemidő-hosszabbítás éves szinten kb. 170 Mrd Ft nettó árbevételt hoz a nemzetgazdaságnak, továbbá nem volt szükség új energiatermelő egységek felépítésére.

[CS2] Operátorok és szakemberek biztonságos oktatását, valamint nem szokványos atomerőművi tevékenységek biztonságos begyakorlását teszi lehetővé.

[CS3] **G. Házi, A. Márkus**,

*On the bubble departure diameter and release frequency based on numerical simulation results*,  
International J. of Heat and Mass Transfer **52**, 1472 (2009)

[CS4] R. Capote, M. Herman, P. Oblozinsky, PC. Young, S. Goriely, T. **Belgya** , AV. Ignatyuk, AJ. Koning, S. Hilaire, VA. Plujko, M. Avrigeanu, O. Bersillon, MB. Chadwick , T. Fukahori , ZG. Ge, YL. Han, S. Kailas, J. Kopecky, VM. Maslov, G. Reffo, M. Sin, ES. Soukhovitskii, P. Talou

*RIPL - Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations*  
Nuclear Data Sheet, **110**, 3107 (2009)

## VI.2. fejezet

[E1] **I. Borbély-Kiss, E. Koltay, Gy. Szabó, L. Bozó, K. Tar**  
*Composition and sources of urban and rural atmospheric aerosol in eastern Hungary*  
Journal of Aerosol Science **30**, 369 (1999)

[E2] **A. Gelencsér, N. Kováts, B. Turóczy, A. Rostási, A. Hoffer, K. Imre, I. Nyirő-Kósa, D. Csákberényi-Malasics, A. Toth, A. Czitrovsky, A.** (+ 6 további szerző).  
*The red mud accident in Ajka (Hungary): characterization and potential health effects of fugitive dust*  
Environmental Science & Technology **45**, 1608 (2011)

[E3] **L. Koblinger, W. Hofmann**  
*Monte-Carlo modeling of aerosol deposition in human lungs. 1. Simulation of particle transport in a stochastic lung structure.*  
Journal of Aerosol Science **21**, 661 (1990)

[E4] **I. Balásházy, W. Hofmann, T. Heistracher,**  
*Local particle deposition patterns may play a key role in the development of lung cancer.*  
Journal of Applied Physiology **94**, 1719 (2003)

## VI.3.-VI.4 fejezetek

[L6] **G. Katona, G. Szalay, P. Maak, A. Kaszas, M. Veress, D. Hillier; B. Chiovini; E.S. Vizi; B. Roska; B. Rozsa,**  
*Fast two-photon in vivo imaging with three-dimensional random-access scanning in large tissue volumes,*  
Nature Methods **9**, 201 (2012)

[L7] **M. Veres, M. Koós, I. Pócsik,**  
*IR study of the formation process of hydrogenated amorphous carbon film,*  
Diamond and Related Materials, **11**, 1110 (2002).

[L8] **T. Juhasz, H. Frieder, R.M. Kurtz, C. Horvath, J.F. Bille, G. Mourou,**  
*Corneal refractive surgery with femtosecond lasers,*  
IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics **5**, 902, (1999),

[L9] **Z.Z. Nagy, A. Takacs, T. Filkorn, M. Sarayba,**  
*Initial clinical evaluation of an intraocular femtosecond laser in cataract surgery,*  
Journal of Refractive Surgery **25**, 1053 (2009)

## VI.5. fejezet

[CH1] **Zs. Kasztovszky, K. T. Biró, I. Nagy-Korodi, S. J. Sztáncsuj, A. Hágó, V. Szilágyi, B. Maróti, B. Constantinescu, S. Berecki, P. Mirea,**  
*Provenance study on prehistoric obsidian objects found in Romania (Eastern Carpathian Basin and its neighbouring regions) using Prompt Gamma Activation Analysis,*  
Quaternary International **510**, 76 (2019)

[CH2] **V. Szilágyi, J. Gyarmati, M. Tóth, H. Taubald, M. Balla, Zs. Kasztovszky, Gy. Szakmány,**

*Petro-mineralogy and geochemistry as tools of provenance analysis on archaeological pottery: Study of Inka Period ceramics from Paria, Bolivia,*

Journal of South American Earth Sciences **36**, 1 (2012)

[CH3] A. Moropoulou, N. Zacharias, ET. Delegou, B. **Maróti, Zs. Kasztovszky**

*Analytical and technological examination of glass tesserae from Hagia Sophia*

Microchemical Journal **125**, 170 (2016)

[CH4] **V. Kiss, K.P. Fischl, E. Horváth, G. Káli, Zs. Kasztovszky, Z. Kis, B. Maróti, G. Szabó,**

*Non-destructive analyses of bronze artefacts from Bronze Age Hungary using neutron-based methods,*

Journal of Analytical Atomic Spectrometry **30**, 685 (2015)

[CH5] T. Rehren, **T. Belgya, A. Jambon, Gy. Káli, Zs. Kasztovszky, Z. Kis, I. Kovács, B.**

**Maróti, M. Martín-Torres, G. Miniaci, V.C. Pigott, M. Radivojevic, L. Rosta, L.**

**Szentmiklósi, Z. Szőkefalvi-Nagy,**

*5,000 years old Egyptian iron beads made from hammered meteoritic iron,*

J Arch Sci **40**, 4785 (2013)