

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.

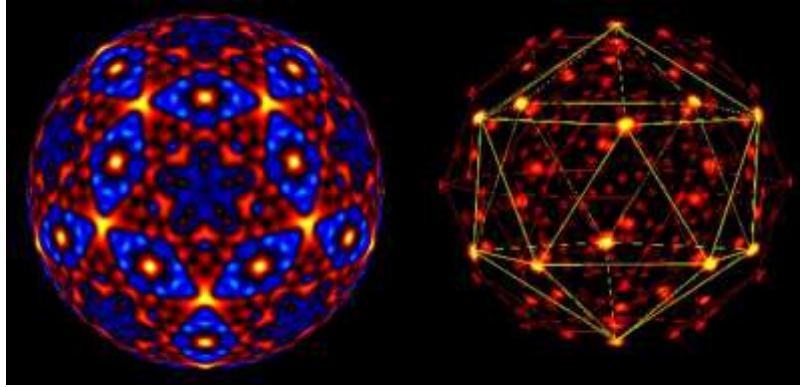
II.1. Röntgenmódszerek

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 (röntgentartomány) 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]

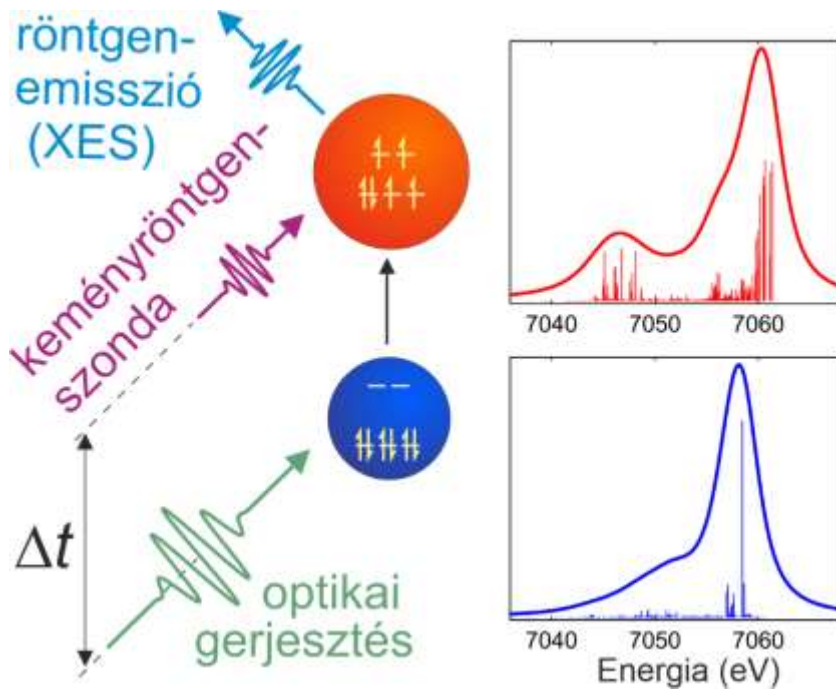


Töltésalternáló módszer kifejlesztése az atomi szerkezet meghatározására

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].

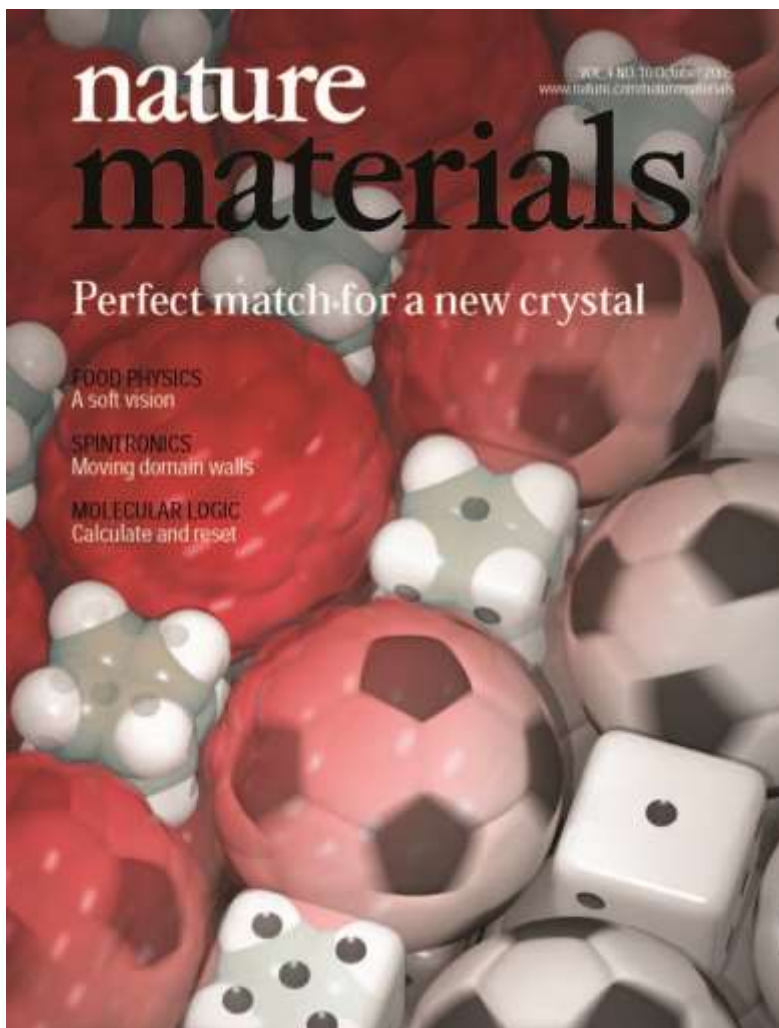


4. kép Fénnyel kiváltott spinállapot-kapcsolás vizsgálata időfeloldásos röntgenspektroszkópiával

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

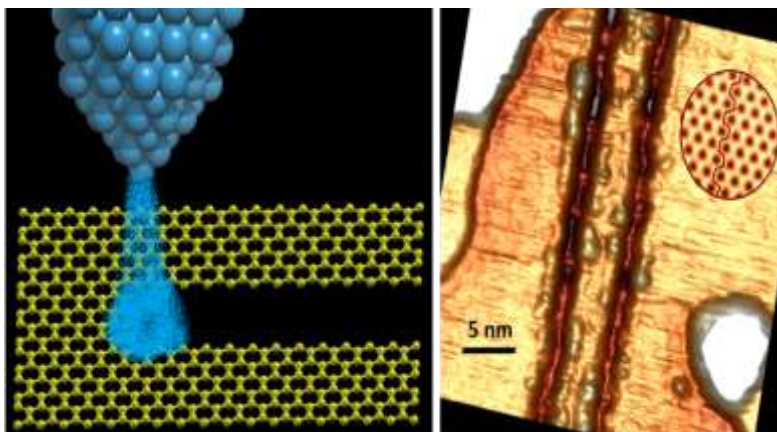
A fullerén és kubán molekulák elrendeződése, és a fullerén molekulák forgásának szemléltetése a C_{60} kubánnal alkotott vegyületében [C3]

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 kialakítását. 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 mágnesezettség 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 anyagcsaládok 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 kvantumozás 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 modellezéséről a DNS-töredékek fénysugárzással szembeni stabilitásának vizsgálatáig.

A kvantumozás 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].

A II. fejezet hivatkozásai*

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_1C_{60} and K_1C_{60} ,
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^+ 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)

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

[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 MgB₂ 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 GaV₄S₈
Nature Materilas **14**, 1116 (2015)
- [E12] **I. Kézsmárki**, N. Kida, H. Murakawa, **S. Bordács**, Y. Onose, Y. Tokura
Enhanced Directional Dichroism of Terahertz Light in Resonance with Magnetic Excitations of the Multiferroic Ba₂CoGe₂O₇ 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,
Physical Review Letters **104**, 130401 (2010)