

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 jóslott, 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 szolgáltató 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 rács-térelmélet 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 rács-térelmélet 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 ^8Be 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 kíváná, 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 részecskecsugarak 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 játékmodelljeit 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].

Az I. fejezet hivatkozásai*

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. Vértési**):
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. Vértési, 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. Vértési**):
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. Vértési, 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)

[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. Pálinkás, 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)

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

- [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. Pálinkás, 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. Pálinkás, 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. Hertzenberger, H. J. Maier, **Z. Máté**, D. Rudolph, P. Thierolf, **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}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. Thierolf, Y. Yanagisawa, K. Yoshida,
Decoupling of valence neutrons from the core in ^{16}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. Nazarewitz, **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}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 ^8Be : 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. Mikóczy, 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 ϕ^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. Páll, 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. Czellár, 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)