

AZ OTKA NK 101438 SZÁMÚ NAGY KUTATÁSI PÁLYÁZAT ZÁRÓJELENTÉSE

A QCD kritikus pontjának és új tartományainak keresése a RHIC gyorsító PHENIX és az LHC gyorsító TOTEM kísérletében

Témavezető:

Csörgő Tamás, az Európai Akadémia tagja, az MTA Doktora
MTA Wigner FK, RMI, Budapest és KRF, Gyöngyös

Részvevő vezető (senior) kutatók:

Csanád Máté PhD, egyetemi adjunktus, majd docens
ELTE TTK Atomfizikai Tanszék

Csernai László Pál, az Európai Akadémia tagja, az MTA külső tagja
MTA Wigner FK, Budapest és Bergeni Egyetem, Bergen, Norvégia

Jenkovszky László professzor, az MTA külső tagja
MTA Wigner FK, Budapest és BITP, Kiev, Ukrajna

Lacey, Roy A. professzor
State University of New York at Stony Brook, USA

Sziklai János kandidátus, tudományos főmunkatárs
MTA Wigner FK, Budapest

Wolf György, az MTA Doktora, osztályvezető
MTA Wigner FK, Budapest

Részvevő kutatók:

Barna Imre Ferenc PhD, tud. főmunkatárs
MTA KFKI AEKI majd Wigner FK, Budapest

Hegyi Sándor, tudományos műszaki ügyintéző
MTA Wigner FK, Budapest

Kovács Péter PhD, tud. főmunkatárs
MTA Wigner FK RMI, Budapest

Nagy Márton PhD, egyetemi tanársegéd, majd adjunktus
ELTE TTK Atomfizikai Tanszék

Nemes Frigyes János PhD hallgató, majd tudományos munkatárs
ELTE TTK Atomfizikai Tanszék / CERN / Wigner FK, Budapest

Novák Tamás PhD, egyetemi docens, mb. intézet igazgató
KRF, Gyöngyös

Ster András tud. munkatárs
MTA Wigner FK RMI, Budapest

Taylor, Cyrus Cooper, professzor, dékán
Case Western Reserve University, Cleveland, OH

Vértési Róbert PhD, tudományos munkatárs
MTA Wigner FK RMI, Budapest

Zétényi Miklós PhD, tudományos főmunkatárs
MTA Wigner FK RMI, Budapest

Résztevő diákok, doktoranduszok:

Bagoly Attila BSc/MSc hallgató, ELTE TTK Atomfizikai Tanszék (2013-)
Kasza Gábor BSc/MSc hallgató, ELTE TTK Atomfizikai Tanszék (2014-)
Kincses Dániel BSc/MSc hallgató, ELTE TTK Atomfizikai Tanszék (2013-)
Kőfaragó Mónika BSc/MSc hallgató, ELTE TTK Atomfizikai Tanszék (2011-13)
Lökös Sándor BSc/MSc/PhD hallgató, ELTE TTK Atomfizikai Tanszék (2011-)
Lucsányi Dávid BSc/MSc hallgató, BME Nukleáris Technikai Tanszék (2014-)
Májfer Imre BSc hallgató, ELTE TTK Atomfizikai Tanszék (2011-2012)
Sveiczter András TDK-s BSc hallgató, ELTE TTK Atomfizikai Tanszék (2014-)
Vargyas Márton BSc/MSc majd PhD hallgató, (2011-)
ELTE TTK Atomfizikai Tanszék majd MTA Wigner FK és
Jyvascyle Egyetem, Finnország

A pályázat futamideje:

2012 január 1 – 2015 december 31.

A zárójelentés a kutatási tevékenységet és a publikációkat a jelentés lezárásáig meghosszabbított, 2016 áprilisáig tartó időszakra foglalja össze.

A kutatás eredményeinek rövid, tényszerű összefoglalása magyarul, 500-1500 karakter terjedelemben:

Kísérleti nehézionfizikai kutatásainkat az USA BNL RHIC gyorsítójánál működő PHENIX kísérletben végeztük, melynek egyik mérföldkövét a Bose-Einstein korrelációs függvények sugárparamétereinek gerjesztési függvényében egy csúcsmegfigyelése jelentette, ami a QCD kritikus pont közelségére utalt a RHIC $\sqrt{s_{NN}} \sim 50$ GeV-es $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ ütközéseiben. Másik, paradigma váltást hozó eredményünk az Au+Au ütközésekben felfedezett tökéletes kvarkfolyadék cseppecskéinek, és ezek folyási mintázatának a megfigyelése volt a RHIC $^2\text{d}+^{197}\text{Au}$ és $^3\text{He}+^{197}\text{Au}$ ütközéseiben.

A RHIC és az LHC nehézion-ütközéseinek hidrodinamikai analízisében korábban figyelmen kívül hagyták a kezdeti impulzuszórány fontos szerepét, melyet a forgó, szferoidálisan szimmetrikusan táguló tűzgömb hidrodinamika egzakt, a rács QCD állapotegyenletét alkalmazó megoldásaink segítségével mutattunk ki.

A TOTEM kísérlet 7 és 8 TeV-es proton-proton ütközéseket vizsgáló méréseinek váratlan és pozitív eredményeként egyik TOTEM cikkünk két díjat is nyert eredetiségéért, innovatív megoldásaiért és várható tudományos impaktja okán, a CERN LHC nyaláboptikájának a TOTEM adatok alapján történő kalibrálásáért.

A TOTEM adatokat a Bialas-Bzdak modell keretein belül értelmeztük és azt a Glauber-Velasco modell segítségével ellenőriztük. Eredményeink szerint az LHC 7 és 8 TeV-es energiáin a proton femtoszkópiai képe szaturál, jelezve, hogy elértük az erős kölcsönhatás egy újabb tartományát.

Executive summary of the main research results, 500-1500 characters:

Our experimental search for the QCD critical point was performed within the PHENIX collaboration at the RHIC accelerator, BNL, USA. PHENIX discovered a peak in the excitation function of the radius parameters of the Bose-Einstein correlation functions, indicating that the QCD critical point corresponds to $\sqrt{s_{NN}} \sim 50$ GeV $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ collisions at RHIC. Another PHENIX paradigm shifting result was the observation of flow patterns, or the droplets of the nearly perfect fluid of quarks, in $^2\text{d}+^{197}\text{Au}$ and $^3\text{He}+^{197}\text{Au}$ collisions at RHIC.

In hydrodynamical models of heavy ion collisions at RHIC and at LHC energies, our new, rotating, exact and explicit solutions of fireball hydrodynamics with a lattice QCD equation of state clarified the important role of the initial angular momentum.

Our TOTEM paper on 7 and 8 TeV proton-proton collisions won two scientific recognitions for its originality, innovative solutions and its potential scientific impact, for calibration of the LHC optics based on TOTEM data on elastic proton-proton scattering.

We have interpreted TOTEM data with the help of the Bialas-Bzdak model and we have cross-checked the results using the Glauber-Velasco model. The femtoscopic picture of the proton at 7 and 8 TeV LHC collisions indicates the onset of parton saturation, corresponding to a new domain of QCD, the theory of strong interactions.

Főbb kutatási eredményeink részletesebb, magyar nyelvű áttekintése:

Kutatási területeink spektruma a kísérleti nehézionfizikától és a kísérleti részecskefizikától az elméleti nehézionfizikán és az elméleti részecskefizikán át a tudományos ismeretterjesztés szakmódszertani kutatásáig ívelt, fókuszáltan szűkebb szakterületünkre, a femtoszkópiára, azaz a femtométer (10^{-15} m) távolságokon és a femtométer/c azaz a 3×10^{-24} másodperc időtartamokban lezajló részecske és magfizikai folyamatok kísérleti, elméleti és szakmódszertani kutatására.

Kísérleti nehézionfizikai kutatásainkat az amerikai Brookhaveni Nemzeti Laboratórium RHIC gyorsítójánál működő PHENIX kísérletének tagjaiként, kísérleti részecskefizikai kutatásainkat pedig főleg az európai CERN LHC gyorsítójának TOTEM kísérletének a tagjainkét végeztük, bár a PHENIX kísérletben is vizsgáltunk (polarizált proton-proton) részecskefizikai ütközéseket. Ezen kísérletek méréseit értelmező elméleti kutatásainkat pedig a kvantum-optikai módszerek nagyenergiás fizikai alkalmazásai foglalták fészes, a természet egységét is kifejező szakmai keretbe.

PHENIXes kutatásaink egyik főbb **eredménye volt az $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ ütközésekben felfedezett tökéletes kvarkfolyadék cseppecskéinek, és ezek folyási mintázatának a megfigyelése a RHIC $^2\text{d}+^{197}\text{Au}$ és $^3\text{He}+^{197}\text{Au}$ ütközéseiben.** Ez a felfedezés kisebb paradigma-váltást jelentett a szakterületen, a korábbi feltételezések szerint ugyanis a d+Au és He+Au ütközések a hideg maganyaggal való kölcsönhatást vizsgálták, az Au+Au ütközések pedig a forró kvarkanyagot. Új eredményeink szerint a d+Au és a He+Au ütközésekben is ugyanolyan forró és ugyanannyira tökéletes kvarkfolyadék keletkezik, mint az Au+Au ütközésekben, csak kisebb cseppekben. Publikálásra beküldött PHENIXes cikkünk a Bose-Einstein korrelációs függvények sugárparamétereinek nem monoton viselkedését mutatta ki, ami **pályázatunk egyik fő céljának, a QCD kritikus pontjának** a megközelítésére utal a RHIC Au+Au ütközéseiben, közel **50 GeV-es** ütközési energiákon. Előkészítés alatt áll PHENIX-es cikkünk a korrelációs függvény exponensének megméréséről és a QCD univerzalitási osztályának kritikus exponensével történő összehasonlításáról: PHENIX előzetes, konferenciákon bemutatott kísérleti eredményünk szerint **a korrelációs függvény exponense a 200 GeV-es Au+Au ütközésekben nagyobb, mint a QCD kritikus pontra elméletileg várt érték, de kisebb, mint a hidrodinamikai kép szerinti elméleti érték.** Eredményünkről a PHENIX nevében kutatócsoportunk tagjai tarthattak konferencia előadásokat 2015 végén, és 2016 első hónapjaiban.

A RHIC és az LHC ütközéseinek hidrodinamikai analízisében korábban figyelmen kívül hagyták a nehézion-ütközések kezdeti impulzusmomentumának, forgásának szerepét. Ennek megértésére **a relativisztikus hidrodinamika új, forgó, egzakt és explicit megoldási osztályait tártuk fel.** Feltártuk **a kezdeti feltételek és a hidrodinamikai kifagyás utáni megfigyelhető mennyiségek közötti analitikus kapcsolatot.** Feltártuk és publikáltuk a forgó, nemrelativisztikus, szferoidálisan szimmetrikusan táguló tűzgömb hidrodinamika egzakt megoldásait a rács QCD állapotegyenletének figyelembevételével, és konferenciákon közöltük ezen megoldások általánosításait a triaxiálisan táguló és forgó megoldások esetére a nem-relativisztikus kinematikai tartományban.

A 7 és 8 TeV-es proton-proton ütközéseket vizsgáló, doktoranduszunk által előkészített **TOTEM-es cikkünk két díjat is nyert** eredetiségéért, innovatív megoldásaiért és várható tudományos impaktja alapján, a CERN LHC nyaláboptikájának a TOTEM adatok alapján történő kalibrálásáért. Az LHC nyaláboptika pontos meghatározása tette lehetővé számunkra a p+p szórás teljes hatáskeresztmetszetének minden korábbinál jóval pontosabb kísérleti meghatározását a CERN LHC $\sqrt{s} = 7$ és 8 TeV-es energiáin. Részt vettünk az első közös CMS – TOTEM publikáció előkészítésében és bekapcsolódtunk a CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer (CT-PPS) fejlesztési projekt előkészítésébe is, amely várhatóan unikális képességekkel és felfedezési potenciállal fog rendelkezni.

A TOTEM adatokat a Bialas-Bzdak modellel értelmeztük, és a Glauber-Velasco modell segítségével ellenőriztük. Ezek szerint az LHC 7 és 8 TeV-es energiáin **a proton femtoszkópiái képe szaturál: elértük a QCD újabb tartományát, teljesítettük pályázatunk másik fő célkitűzését is.**

PHENIX aktivitásunk részletesebb bemutatása (nucl-ex, azaz a kísérleti magfizika témaköre):

Kutatási pályázatunk egyik fő célja az erős kölcsönhatás elméletének, azaz a kvantum színdinamikának a halmazállapotainak a tanulmányozása, a rács QCD számolások által elméletileg **megjósolt QCD kritikus pont** helyének, azaz a (μ_B, T_c) értékeknek a kísérleti meghatározása volt a nehézion ütközések energiáinak, illetve centralitásának a megváltoztatásával. A kritikus pont helyének kísérleti meghatározásában az első lépés annak a bizonyítása volt, hogy a 200 GeV Au+Au ütközésekben keletkező direkt fotonok spektruma legalább 300 MeV-es kezdeti hőmérsékletnek felel meg; ez a hőmérséklet lényegesen magasabb, mint a hadronikus halmazállapotban elérhető maximális, mintegy 175 MeV-es Hagedorn-féle hőmérséklet. A direkt fotonok spektrumának második Fourier-harmonikusának, azaz elliptikus folyásának kimérésével igazoltuk, hogy ebben a rendkívül forró, fotonokat sugárzó anyagban már kialakulnak a hadronikus végállapotra jellemző folyási spektrumok. A direkt fotonok elliptikus folyási adatait a Buda-Lund modell alapjául szolgáló egzakt és analitikus hidrodinamikai számításokból reprodukáltuk, amelyre egyébként a szakirodalomban más hidrodinamikai számolás lényegében nem volt képes. A PHENIX kísérlet keretein belül minden évben teljesítettük vagy túlteljesítettük adatfelvételi kötelezettségeinket, a direkt foton méréseknél részt vettünk az elektromágneses kaloriméter időmérésének adatokból történő kalibrációjában, analízis jegyzeteket írtunk és belső előadásokat tartottunk a kritikus pont kereséséhez kapcsolódó technikai jellegű munkáinkról, mint például az alacsony impulzusú részecskék azonosításának recalibrálásáról, a Coulomb kölcsönhatás korrekciójáról a Lévy típusú forrásfüggvények esetére, és új módszert vezettünk be a korrelációs függvény exponensének a meghatározására.

OTKA témánk vezető kutatója, Roy Lacey professzor úr volt a vezető szerzője annak a PHENIX-es, jelenleg referált szakfolyóiratban a bírálati szakaszban lévő, preprintként nyilvánosságra hozott cikknek, amely a Bose-Einstein korrelációs függvények úgynevezett Hanbury Brown – Twiss (HBT) sugárparamétereiben nem monoton viselkedést, csúcsot jelez, és elvégezve a kritikus pont közelében szokásos véges méret skálázásokat, **a QCD kritikus pontjának bariokémiai potenciálját a meglepően alacsony, 95 MeV-es tartományba helyezi, ami meglepően nagy, 50 GeV körüli nukleononkénti tömegközépponti ütközési energiával közelíthető meg.** Ez az energia messze a CERN SPS és a GSI-ben tervezett FAIR gyorsítók által elérhető energiatartomány felett található, de nagyságrenddel alacsonyabb, mint a CERN LHC gyorsítója által előállítható legkisebb energiák; azaz ha ezt az eredményt további független mérések megerősítik, akkor a QCD kritikus pontjának a vizsgálatára **unikálisan a RHIC gyorsítónál** lesz a közeljövőben lehetőség. A PHENIX és a STAR egybeeső eredményei alapján **a QCD kritikus pont feltárásának kulcsa az ütköző ionok méretének és az ütközések energiájának változtathatósága a releváns, és a RHIC által jól vizsgálható, 20-60 GeV-es nukleononkénti tömegközépponti energiák tartományában.**

A PHENIX kísérlet keretében végzett adatelemzési munkánk fő célja egy olyan új, a korábbi módszerektől független mérés kidolgozása volt, mely a korrelációs függvény exponensének a pontos kísérleti meghatározásán alapul. PHENIX előzetes, konferencia anyagokban bemutatható kísérleti eredményünk szerint **a korrelációs függvény exponense 200 GeV-es Au+Au ütközésekben nagyobb, mint a QCD kritikus pontra elméletben kiszámolt érték,** de kisebb, mint a hidrodinamikai kép szerinti elméleti érték. Erről az eredményről a PHENIX kísérlet képviselőiben kutatócsoportunk tagjai tarthattak az eredményeket áttekintő konferencia előadásokat a femtoszkópiái és a kritikus pont keresésével foglalkozó területek nemzetközi szakkonferenciáin (WPCF 2015, Varsó, CPOD 2016, Wrocław). **A QCD kritikus pont jelzett helyének más mérésekkel való megerősítése, valamint a tulajdonságainak a részletes vizsgálata, univerzalitási osztályának részletes kísérleti meghatározása a pályázat lezárása utáni időszak feladata.** A PHENIX dilepton spektrum analízisünk és a publikált HBT adatok elemzésének összevetéséből **400 MeV és 757 MeV közé korlátoztuk a forró és sűrű hadronanyagban propagáló η' mezon tömegét,** mely összhangban van a PHENIX előzetes státuszú legújabb intercept paramétert mérő legújabb kísérleti eredményeinkkel is.

PHENIX-es aktivitásunk további részleteit a <http://phenix.elte.hu/> oldalon foglaltuk össze.

Elméleti nehézionfizikai aktivitásunk (azaz a nucl-th témaköre):

Elméleti nehézionfizikai kutatásainkat három fő témakörbe csoportosíthatjuk:

- a PHENIX és a STAR dilepton spektrumainak értelmezése, az η' mezon közegbeli módosulásának vizsgálata a hidrodinamikai kép és a láncbomlások figyelembe vételével
- Új egzakt, forgó hidrodinamikai megoldások felkutatása, a nem-centrális ütközések perdületének a végállapotra és az időfejlődésre gyakorolt hatásának a figyelembe vételére
- Új egzakt vagy numerikus hidrodinamikai megoldások kutatása, a nehézion-ütközések kezdeti energiasűrűség illetve hőmérséklet-fluktuációinak a figyelembe vételére

Publikáltuk a PHENIX 200 GeV-es Au+Au ütközéseiben mért dilepton-spektrumainak elemzését, és a részletesebb, centralitás és p_T függő adatok első szimulációit is elvégeztük ezen eredmények alátámasztására. **A dilepton spektrum analízisünk és a publikált HBT adatok elemzésének összevetéséből 400 MeV és 758 MeV közé korlátozható a forró és sűrű hadronanyagban propagáló η' mezon tömege.** Háromszerezős publikációnk azt jelzi, hogy a dilepton adatok szerint az η' mezon közegbeli tömege összhangban van a korábbi kutatásaink eredményével, melyek szerint a forró és sűrű hadronanyagban az **η' mezon tömege legalább 200 MeV-vel lecsökken.** Ennek alátámasztására illetve ellenőrzésére tovább folytattuk a dilepton spektrumok elemzését, egyenlőre a PHENIX belső munkacsoportjaiban tartott előadások formájában.

A Wolf György vezető kutató dilepton szakértőkből álló elméleti csoportjának (Kovács Péter, Wolf György és Zétényi Miklós) a pályázati időszak kezdetén folytatott kutatásai főleg az η és az η' mezonok tömegének és bomlási szélességeinek $T=0$ hőmérsékleten történő leírására fókuszáltak, melyeket a pályázati időszak végére kiterjesztettek nulla barionsűrűségeen a hidrodinamikai számításokhoz szükséges $T > 140$ MeV-es hőmérséklet tartományba, különösen a barion oktett és az (axiál)vektormezonok tulajdonságainak az elméleti vizsgálatára. A 2015-ös Zimányi Nehézionfizikai Téli Iskolán Kovács Péter már az η és az η' mezonok közegbeli módosulásának véges hőmérsékletű elméletét is ismertette.

Csanád Máté publikálta az első olyan hidrodinamikai számítást, amelyben a dilepton-spektrum módosulását a hadronikus közeg folyásának főbb paraméterei függvényében vizsgálja. Csanád Máté, Nagy Márton és diákjuk pedig a relativisztikus hidrodinamika egzakt megoldásait kiterjesztette a rács-QCD-ből meghatározott, realisztikus állapotegyenletre is. Csanád Máté publikálta a relativisztikus hidrodinamika olyan új, egzakt megoldásait, amely a kezdeti feltételekben megjelenő hőmérséklet-fluktuációk analitikus, egzakt megoldásokban történő figyelembevételét is lehetővé teszi, a másodrendű és a negyedrendű folyási paraméterek megváltoztatása nélkül. Csörgő Tamás és Nagy Márton pedig a nem-relativisztikus hidrodinamika olyan új, forgó egzakt megoldásait publikálta Barna Imre Ferencsel közösen, amely már a forgásnak a megfigyelhető mennyiségekre gyakorolt hatását is kiértékelte a nem-relativisztikus kinematikai, szferoidálisan szimmetrikus határesetben.

Csernai professzor úrral közös publikációnkban (Csernai, Wang és Csörgő) a numerikus hidrodinamikai megoldások és az analitikus megoldások komplementer jellegét és a teljes impulzumomentum figyelembevételének a fontosságát domborítottuk ki.

TOTEM aktivitásunk, azaz a pályázat kísérleti részecskefizikai (hep-ex) témaköre:

Az LHC TOTEM kísérletének keretei között 2012-ben publikáltuk a 7 TeV-es proton-proton ütközések teljes hatáskeresztmetszetét, valamint ennek elasztikus és inelasztikus felbontását is. A konstrukciós szakaszban a TOTEM Roman Pot detektorainak elektronikájához és a DCS rendszer kiépítéséhez járultunk hozzá, a 2012-13-as periódusban Sziklai János révén a TOTEM DCS fejlesztésével, majd Nemes Frigyes révén főleg az LHC nyaláb optika TOTEM adatokból történő kalibrációjával járultunk hozzá a TOTEM kísérlet sikeréhez. Sikeresen teljesíteni tudtuk fő fizikai céljainkat, az LHC 7 és 8 TeV-es energiáin a p+p ütközések teljes hatáskeresztmetszetének a luminozitás-független módszerrel történő meghatározását. 7 TeV-es luminozitás független teljes hatáskeresztmetszet mérésünk az "EPL Editors' Choice" kiemelészt kapta, 8 TeV-es méréseink eredményét pedig a Physical Review Letters folyóiratban publikáltuk.

A proton-proton szórás teljes hatáskeresztmetszetének a vártnál jobb, mintegy 2-3 % relatív pontossággal történő meghatározását főleg az LHC nyaláb optika adatokból történő kalibrációja tette lehetővé, amely a TOTEM-en belül Hubert Niewiadomski és Nemes Frigyes ELTE-s doktorandusz feladata volt, ennek a módszernek a kifejlesztését tárgyaló TOTEM cikknek Nemes Frigyes volt a felelős szerkesztője, ez a munka szolgáltatta a 2015-ben sikeresen megvédett ELTE PhD értekezésének a kísérleti alapját is.

2015 során a TOTEM kísérletben elért legfontosabb eredményünk a rugalmas proton-proton szórás differenciális hatáskeresztmetszetének a kis impulzustranszfer tartományban szokásosan feltételezett exponenciális alaktól való szignifikáns eltéréseinek a kimutatása volt. Ez az eredmény azt jelenti, hogy az LHC energiáin a protonok belső szerkezete még nagy távolságokon sem tekinthető közelítőleg Gauss eloszlásúnak. A differenciális hatáskeresztmetszet részletesebb, a Bialas-Bzdak modell vagy a Glauber-Velasco modell keretein belül történő elemzése a parton-parton szórás szaturációját, telítődését jelzi az LHC 7 és 8 TeV-es energiáin.

A TOTEM inelasztikus teleszkópjai lehetővé tették az inelasztikus proton-proton szórás pszeudorapiditás sűrűségeloszlásának a meghatározását is, melyet először a T2 teleszkópok nagy pszeudorapiditás értékeinél vittünk véghez, majd egy speciális, eltolódott ütközési ponthoz tartozó adatsor segítségével a $dn/d\eta$ mérést kiterjesztettük egy váratlan kinematikájú, nagy pszeudorapiditásoknál feltáruló kinematikai tartományra is. A szerkesztőbizottság tagjaként bekapcsolódtunk az első közös, a CMS és a TOTEM kísérletek közötti együttműködésből származó publikáció előkészítésébe, mely az eddig mért legnagyobb pszeudorapiditás intervallumon határozta meg a töltött részecskék sűrűségeloszlását. Csörgő Tamás 2014-től a TOTEM cikkszerkesztő bizottság tagjává vált.

A magyar TOTEM csoport a létszámának arányától (~5 %) lényegesen fontosabb szerepet játszott a pályázati periódusban, többek között a p+Pb ütközések adatfelvételében és ezek vizsgálatában való részvételével, valamint a különböző LHC optikai adatok kalibrálásával és a rugalmas p+p ütközések differenciális hatáskeresztmetszetének értelmezésével. Szerepünknek a TOTEM kísérlet általi elismerése jól látszik a magyar kutatók TOTEM nevében tartott előadásainak, és a magyar kutatók TOTEM nevében írt konferenciaközleményeinek létszámarányunktól lényegesen jelentősebb, 10%-nál jóval nagyobb számarányában.

TOTEM-es aktivitásunk további részleteit a <http://totem.kfki.hu/> oldalon foglaltuk össze. A TOTEM kísérlet belső szabályai szerint a belső előadások anyagai csak a jelszóval védett területen olvashatóak.

Részecskefizikai fenomenológia, diffraktív szórás elmélete (a hep-ph cikkeink témaköre):

Nemes Frigyes és Csörgő Tamás a Bialas-Bzdak modell segítségével helyreállította a p+p rugalmas szórás diffraktív hatáskeresztmetszete alapján a protonok femtoszkópiai képét 7 TeV-es energián, első közelítésben a diffraktív minimum pontos alakjának figyelembe vétele nélkül.

Csörgő Tamás és Nemes Frigyes a Bialas-Bzdak modellt második e témában írt cikkében továbbfejlesztette, kiterjesztette azért, hogy az pontosabban, a diffraktív minimum és maximum környékén is helyesen írja le a p+p rugalmas szórás diffraktív hatáskeresztmetszetét, mely alapján tovább finomították a protonok femtoszkópiai képét 7 TeV-es energián. Harmadik, Csanád Mátéval közös cikkükben pedig unitarizálták a kiterjesztett Bialas-Bzdak modellt, hogy a rugalmas pp szórás teljes t intervallumban való statisztikailag elfogadható pontosságú leírását is elérhessék.

A TOTEM adatok értelmezésére a Bialas-Bzdak modell általánosított változatait dolgoztuk ki, első eredményeink a geometriai skálázás megjelenésére, és egy új skálaösszefüggés létezésére utalnak. A 7 TeV-es TOTEM rugalmas proton-proton szórási adatokat a Glauber-Velasco modell segítségével is sikerült konzisztens módon értelmeznünk, mely eredményről a Harvard Egyetem Nobel-díjas kutatója, Glauber professzor úr tartott internetes előadást az általunk Gyöngyösön megszervezett WPCF 2014 (10th Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy) világkonferencián, és amely eredményt témavezetőnk meghívott előadásban ismertette két, Kyotóban illetve Kréta szigetén megrendezett rangos nemzetközi konferencián is.

A rugalmas proton-proton szórás differenciális hatáskeresztmetszetének ezen részletesebb, a Bialas-Bzdak modell vagy a Glauber-Velasco modell keretein belül történő elemzése a parton-parton szórás szaturációját, telítődését jelzi az LHC 7 és 8 TeV-es energiáin: az ütközések energiájának növekedésével a protonok belseje egyre feketébb, a mérete egyre nagyobb lesz, azonban a protonok parton-eloszlásának a pereme, a széle egy energiától független, szürke zóna jelenlétét jelentheti.

Jenkovszky professzor úrral együttműködve elemeztük a proton-proton és a proton-antiproton rugalmas szórások differenciális hatáskeresztmetszetét a Philips-Barger modell kereteiben, meghatározva egy régóta keresett kvázirészecske, az Odderon járulékát a rugalmas szórás differenciális hatáskeresztmetszetéhez.

A lundi egyetem kutatóival együttműködve bekapcsolódtunk a DIPSY Monte-Carlo modell fejlesztésébe, jóslatot adva a nagyenergiás proton-atommag és virtuális foton-atommag ütközések teljes, rugalmatlan és kvázi-rugalmatlan hatáskeresztmetszeteinek az energiafüggésére, ezzel megkezdtük felkészülésünket az elektron-atommag ütközések, az eIC (electron – ion collider) várható, elsősorban az USA-ban de Európában is előkészítés alatt álló kutatási korszakára.

Tudományometriai összefoglaló - statisztika a 2012 - 2015-ös kutatási időszakról:

Főbb témakörök, az arXiv.org e-print archívum kategóriáinak megfelelően:

nucl-th: Elméleti nehézionfizika, főleg tűzgömb hidrodinamika

hep-ph: Elméleti részecskefizikai fenomenológia, főleg diffraktív fizika

nucl-ex: PHENIX kísérlet (a PHENIX részecskefizikai eredményeit is ide sorolva)

hep-ex: TOTEM kísérlet

pop-ph: Ismeretterjesztés

Összefoglaló táblázat									
az OTKA NK 101438-as pályázat zárójelentéséhez									
NK101438	2012		2013		2014		2015 -		Összesen
	cikk	konf.	cikk	konf.	cikk	konf.	cikk	konf.	
nucl-th	5	7	2	4	5	5	2	8	38
hep-ph	1	2	0	5	1	4	2	9	24
nucl-ex	9	0	11	1	8	1	14	7	51
hep-ex	2	2	6	2	6	2	5	6	31
pop-ph	0	0	0	1	0	2	0	7	10
Összesen	17	11	19	13	20	14	23	37	154

A közlés helye, formája szerint:

Referált szakfolyóiratban megjelent cikkeink száma:	79
Konferencia kötet, konferencia előadás vagy egyéb kézirat:	74
Általunk szerkesztett konferencia kötet:	1
<hr/>	
Összesen	154

Kutatásaink főbb irányai szerint:

Elméleti nehézionfizika (nucl-th):	38
Elméleti részecskefizika, fenomenológia (hep-ph):	24
Kísérleti nehézionfizika a PHENIX keretében (nucl-ex):	51
Kísérleti részecskefizika, TOTEM és PHENIX p+p (hep-ex):	31
Tudományos ismeretterjesztés, populáris fizika (pop-ph):	10
<hr/>	
Összesen	154

Általunk szervezett konferenciák a 2012-2015-ös időszakban:

Zimányi Nehézionfizikai Téli Iskola, Budapest, 2012 dec. 3-7 (82 résztvevő, ebből 35 diák)	http://zimanyischool.kfki.hu/12/
Zimányi Nehézionfizikai Téli Iskola, Budapest, 2013 dec. 2-6 (82 résztvevő, 35 diák)	http://zimanyischool.kfki.hu/13/
10th Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Gyöngyös, 2014 augusztus (86 fő)	http://wpcf2014.karolyrobert.hu/
Zimányi Nehézionfizikai Téli Iskola, Budapest, 2014 dec. 1-5 (78 résztvevő, 40 diák)	http://zimanyischool.kfki.hu/14/
Magyar Femtoszkópiai Műhely, Gyöngyös, 2015 augusztus (13 fő)	http://indico.cern.ch/e/mfm/15/
Zimányi Nehézionfizikai Téli Iskola, Budapest, 2015 dec. 7-11 (75 résztvevő, 35 diák)	http://zimanyischool.kfki.hu/15/

Összesen: **6 rendezvény, 416 résztvevővel**

Az NK 101438-as OTKA pályázat főbb témakörei és az ezekben résztvevő kutatók:

Név	Nucl-ex (PHENIX)	Hep-ex (TOTEM)	Nucl-th (hidro és dilepton)	Hep-ph (korrelációk és diffrakció)	Pop-ph (Ismeret- terjesztés)
Témavezető:					
Csörgő Tamás	x	x	x	x	x
Vezető kutatók:					
Csanád Máté	x	x	x	x	
Csernai László Pál			x		x
Jenkovszky László				x	
Lacey, Roy A.	x				
Sziklai János	x	x			
Wolf György			x		
Résztvevő kutatók:					
Barna Imre Ferenc			x		
Hegyí Sándor				x	
Kovács Péter			x		
Nagy Márton Imre	x		x		
Nemes Frigyes János		x		x	
Novák Tamás	x	x		x	x
Ster András	x			x	
Taylor, Cyrus C.		x			
Vértési Róbert	x		x		
Zétényi Miklós			x		
PhD, MSc és BSc hallgatók:					
Bagoly Attila			x		
Kasza Gábor			x		
Kincses Dániel	x				
Kőfaragó Mónika	x			x	
Lökös Sándor			x		
Lucsányi Dávid		x			
Májér Imre			x		
Sveiczter András					x
Vargyas Márton	x		x		x
Összesen:	11x	7x	13x	8x	4 x

A projektben eredményesen és harmonikusan működtek együtt vezető kutatók, résztvevő kutatók és egyetemi diákok illetve doktoranduszok, mindenki a képességeinek és érdeklődésének megfelelő területen.

Díjaink, elismeréseink, tudományos minősítéseink, előléptetéseink a pályázat benyújtása után:

2011:

Vértesi Róbert: PhD, Debreceni Egyetem.
Témavezetők: Dávid Gábor, Csörgő Tamás
Cím: Exploring Hot, Strongly Interacting Matter with PHENIX Experiment at RHIC
(a vártnál hamarabb védte meg, de része a pályázat benyújtásakor tervezett 3 PhD-nek)
EPL „Bests of 2011” válogatásba bekerült a TOTEM-es cikkünk, témája a 7 TeV-es proton-proton ütközések teljes hatáskeresztmetszetének precíziós meghatározása

2012:

Csanád Máté: Bolyai Emléklap
Csanád Máté: G. Racah Diploma
(Erice School of Subnuclear Physics, t’Hooft and Zichichi által)
Csörgő Tamás: Dicséret (honorable mention), US Külügyminisztérium
Csörgő Tamás: Ch. Simonyi ösztöndíj, a természettudományok területén
Nagy Márton Imre: PhD, ELTE
Témavezető: Csörgő Tamás
Cím: Egzakt hidrodinamikai megoldások és nehézionfizikai alkalmazásaik
Wolf György és Zétényi Miklós: Editors’ Choice cikk a Physical Review C-ben

2013:

Csanád Máté: habilitáció, ELTE
EPL Editors’ Choice, TOTEM kísérlet mérése a pp szórás teljes hatáskeresztmetszetének luminozitás független meghatározásáról

2014:

Csörgő Tamás: kutatóprofesszori kinevezés, KRF
Csörgő Tamás: a TOTEM Editorial Board tagja
Csanád Máté: egyetemi docensi kinevezés, ELTE
Highlights of 2014, Editors of New Journal of Physics G és
IOP 2014 Select Special Collection: TOTEM cikk az LHC nyaláboptika kalibrálásáról
Nagy Márton: egyetemi adjunktusi kinevezés, ELTE
Nagy Márton: Erdős Pál fiatal kutatói ösztöndíj, ELTE
Novák Tamás: egyetemi docensi kinevezés, KRF
Novák Tamás: mb. intézetigazgatói kinevezés, KRF

2015:

Csanád Máté: HAESF Senior Leaders and Scholars ösztöndíj,
SUNY at Stony Brook, NY, USA
Csanád Máté: Az ELTE 2. leghivatkozottabb kutatója, 2005-2015
Kincses Dániel: OTDK 1. helyezés, nehézion és plazmafizika
Nagy Márton: Fulbright Advanced Research Award,
SUNY at Stony Brook, NY, USA
Nemes Frigyes: Tudományos segédmunkatársi kinevezés,
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
Nemes Frigyes: PhD, ELTE
Témavezetők: Csörgő Tamás és Csanád Máté
cím: Elastic Scattering of protons in the TOTEM experiment at CERN LHC
Nemes Frigyes: TOTEM project associate kinevezés, CERN

Néhány fontosabb, kiemelt konferencia előadásunk:

2012:

- Csörgő Tamás: 2 előadás az Európai Akadémia bergeni ülésén (diffrakció, outreach)
Csörgő Tamás: Összefoglaló előadás a QCD kritikus pont kísérleti kereséséről,
12. Zimányi Nehézionfizikai Téli Iskola, Budapest
Nemes Frigyes, for the TOTEM Collaboration: Low-x 2012, Paphos
Sziklai János, for the TOTEM Collaboration: ISMD 2012, Kielce
Vértesi Róbert, for the PHENIX Collaboration: Hot Quarks 2012, Cagliari

2013:

- Csanád Máté, for the TOTEM Collaboration: Diffraction at LHC (Összefoglaló előadás)
Chicago, IL, XLIIIth ISMD, 2013
Csörgő Tamás: Initial energy density of p+p collisions at LHC, EDS Blois 2013,
Saariselka
Csörgő Tamás: Elastic pp scattering from ISR to LHC energies, Low-x 2013, Eilat
Nemes Frigyes, for the TOTEM Collaboration: Hadron Structure 2013, Tátralomnic
Vértesi Róbert: Összefoglaló előadás a STAR és a PHENIX kísérletek eredményeiről a
kaon femtoszkópia területén, WPCF 2013, Acireale

2014:

- Csernai László Pál: Rotation in Fluid Dynamics, Instabilities and their Observation,
14th Zimányi Winter School on Rel. Heavy Ion Physics, Budapest
Csörgő Tamás, for the TOTEM Collaboration: TOTEM results on the total pp cross section
and diffractive dissociation, Low-x 2014, Kiotó
Csörgő Tamás: A generalized Glauber-Velasco model, Low-x 2014, Kiotó
Kovács Péter: Zero temperature properties of mesons and baryons from an extended
linear sigma model, Fairness 2013, Berlin

2015:

- Csörgő Tamás, for the TOTEM Collaboration: Evidence for non-exponential differential cross-
section, XLVth ISMD, Wildbad Kreuth
Kincses Dániel, for the PHENIX Collaboration: PHENIX Levy analysis of Bose-Einstein
correlation functions, WPCF 2015, Varsó
R. A. Lacey: Recent results about the QCD Critical End Point, 15th Zimányi Winter
School on Relativistic Heavy Ion Physics, Budapest

2016:

- Kincses Dániel, for the PHENIX Collaboration:
PHENIX results on the search for the QCD Critical Point,
CPOD 2016, Wrocław

Zárásként megjegyzem, hogy vállalt ismeretterjesztési feladatainkat is sikeresen teljesítettük, a részecske és magfizikai legújabb kutatási eredmények gamifikációjával, eredményeinkről konferencia közleményekben, előadásokban számoltunk be. Konferencia előadásaink, kontribúcióink részletes összefoglalását a közleményjegyzék tartalmazza.