

## TS 044839 sz. OTKA pályázat

### ZÁRÓJELENTÉSE

*Témavezető: Dr. Tél Tamás*

A Novobátzky-iskola hagyományainak folytatásaként, a beadott pályázati tervet követve a részecskefizikai térelmélet és a statisztikus fizika területén folytattunk kutatásokat. E két ágazat kölcsönhatása szakmailag természetes, mindkettő nagy szabadsági fokú rendszereket vizsgál, noha különböző szempontokból. A pályázat keretét adott e két terület közötti kapcsolat elmélyítéséhez, amely kapcsolat nem mindennapos a nemzetközi gyakorlatban kutatócsoportok között. Az együttműködés nem annyira közös publikációkon mutatható ki, mint inkább motiváló szellemiséget jelent, amely például konzultációkon és a „Termodinamika és statisztikus fizika a részecskefizikában” című, két félévben is futó kutatói szemináriumsorozaton keresztül valósult meg. A két fő terület a hagyományos problémákon kívül számos aktuális és interdiszciplináris témát is magában foglal, így a beszámoló anyaga koherens és egyben sokszínű. Külön szeretnénk kiemelni, hogy a pályázat során elért eredményekre már annak időtartama alatt mintegy 750 független hivatkozás született, nagy részben a kvantumszíndinamikabeli, részint termodinamikai vizsgálatokra.

Alább az éves beszámolókat során követett tematikai bontásban számolunk be tömören az összes elért tudományos eredményről. Ezt egészíti ki a pályázat résztvevői által vezetett doktoranduszok, köztük a pályázat jóvoltából alkalmazottak, rövid beszámolóit, melyekkel iskolagyarápító tevékenységünket mutatjuk be.

#### I. Véges hőmérsékletű térelméletek

A kvantumszíndinamika (QCD) nemeltűnő hőmérsékleten és barionsűrűségnél fontos szerepet tölt be a részecskefizikában. Segítségével írjuk le azokat a folyamatokat, melyek a korai világegyetemben, a neutroncsillagokban és a nehézionütközésekben zajlanak le. A QCD aszimptotikusan szabad elmélet, így a QCD magas hőmérsékletű és/vagy nagy sűrűségű viselkedését partonok (kvarkok és gluonok) segítségével írjuk le, míg az alacsony hőmérsékletű és kis sűrűségű tartományt a hadronok jellemzik. A QCD nemeltűnő sűrűségek mellett könnyen definiálható téridő rácson. Lényegesen több problémát okoz a jól definiált elmélet állapotösszegének a kiszámítása. Ezen segített az átfedést javító több-paraméteres átsúlyozás módszere, melyet még a pályázati időszak előtt publikáltunk. A módszert és különféle változatait széles körben használják a témában. A kutatásokat a Wuppertal-i egyetemmel közösen végeztük. Fontosabb eredményeinket az alábbiakban soroljuk fel.:

*Rács QCD zérus kémiai potenciál mellett.* Kiszámoltuk a QCD állapotegyenletét fizikai kvarktömegeknél és a számítógépes kapacitás által megengedett rácsállandóknál. A pályázat ideje alatt sikerült két kérdéskört véglegesen lezárunk. Megadtuk a QCD hadronikus vs. kvark-gluon plazma átmenet rendjét. Ez az eredmény a Nature folyóiratban jelent meg és a Nobel-díjas F. Wilczek írt hozzá bevezető cikket (Nature 443, 637 (2006)). Meghatároztuk továbbá az átmeneti hőmérsékletet is. Ezen eredmények fizikai kvarktömegekre és kontinuum limeszben érvényesek.

*Rács QCD nemeltűnő kémiai potenciál (azaz véges sűrűség) mellett.* Kiszámoltuk a QCD állapotegyenletet a számítógépes kapacitás által megengedett kvarktömegeknél és rácsállandóknál. Meghatároztuk a QCD kritikus végpontját fizikai kvarktömegeknél. Az

állapotsűrűség módszerét ötvöztük az átfedést javító többparaméteres átsúlyozás módszerével. Ezen új eljárás segítségével sikerült az irodalomban eddig elért kémiai potenciáloknál háromszor nagyobb értékig eljutni. A módszerrel képesek voltunk - elsőként az irodalomban - három fázis egyensúlyát elérni. A három fázis a hadronikus fázis, a kvark-gluon plazma fázis és vélhetően a korábban megjósolt szín szupravezető fázis. A fenti analízisek számítási szempontból legköltségesebb része, a módosított fermion mátrix diagonalizálása. Kidolgoztunk egy eljárást, mely tetszőleges kémiai potenciál mellett megadja a fermionmátrix komplex értékű determinánsát.

*Overlap fermionok.* Tanulmányoztuk a rácson a királis szimmetriát őrző ún. overlap fermion formalizmust. Sikerült a topológikus szektorváltozást kezelni és ezt használható kódban megvalósítani. Dinamikus számításokat végeztünk az overlap fermionok segítségével, becslést adtunk a topológikus szuszceptibilitásra.

E területeken végzett kutatásaiért Katz Sándor 2005-ben megkapta a Talentum Akadémiai díjat, 2006-ban pedig a Bolyai-ösztöndíjat. A témákhoz kapcsolódva a napokban nyújtja be MTA doktori értekezését a "Kvantum-szindinamika fázisdiagramja" címmel.

*Nehézionfizika.* Folytattuk a RHIC eredményeinek értékelését kidolgozott modelljeink segítségével. Az arany-arany és a réz-réz ütközések tanulmányozása alapján levontuk azt a következtetést, hogy az ütközés során kialakuló jelentős színtöltést hordozó közeg opacitása arányos az ütközésben résztvevő részecskék számával, és az opacitás rapiditásfüggése lehetővé teszi a kezdeti geometria rekonstruálását. A kísérleti korrelációs adatok értékeléséhez kidolgoztunk egy, a kinematikán alapuló egyszerűsített modellt fenomenológikus paraméterezésekkel. A modell alapján kiszámolható a párok átlagos transzverz impulzuskülönbsége, és megállapítható, hogy az mennyire véletlenszerű. Az eredmények megerősítették korábbi, egyrészecske spektrumok analízisére épülő eredményeinket.

## II. Integrálható térelméletek

*Peremes térelméletek.* Az integrálható térelméleti vizsgálatok egyik súlypontját a tömeges részecskéket leíró és a határokon nem triviális visszaverődést tartalmazó peremes elméletek tanulmányozása jelentette, de számos kérdést kutattunk a végtelen téren (ill. periodikus peremfeltételekkel) definiált ún. bulk elméletek területéről is. E modellek a kondenzált anyagok fizikájától a nyílt húrelméleten keresztül egészen a részecskefizikáig terjedő alkalmazással rendelkeznek. Vizsgálataink részben elvi jellegűek voltak, részben pedig konkrét modellek megoldásait célozták. Érdeklődésünk homlokterében sokszor ezen elméletek végesméret effektusainak meghatározása állott.

A peremes sine-Gordon modell megoldása kapcsán derült ki, hogy ezen elméletek Lagrange-i vizsgálata gyerekcipőben jár. Ezért első lépésként megalkottuk a peremes (nem feltétlenül integrálható) 1+1 dimenziós kvantumtérelméletekre az aszimptotikus terek elméletét. A visszaverődési (vagy reflexiós) mátrixot az általunk származtatott redukciós formulával visszavezettük a korrelációs függvényre. Ez összekapcsolta az irodalomban eddig meglévő és különbözőnek tűnő definíciókat. Megvizsgáltuk továbbá a reflexiós mátrix analitikus tulajdonságait, levezettük a perturbációszámítás Landau-egyenleteit, majd megalkottuk ezek Coleman-Norton-típusú interpretációját és leszámaztattuk a Cutkosky-szabályokat.

Az intervallumon definiált klasszikus sine-Gordon-modell alapállapotának vizsgálata mutatott rá a kvantum térelméletben ismert Lüscher-formula peremes általánosításának

szükségességére. Ezt sikeresen megalkotva kapcsolatot teremtettünk az alapállapotú energia vezető végesméret korrekciója és a kvantumtérelméletet jellemző szórási adatok között tetszőleges integrálható peremes elmélet esetén. Eredményeinket számos modellben ellenőriztük termodinamikai Bethe Ansatz számolással ill. a Destri de Vega-egyenlettel egy Miami-Szöul-Budapest együttműködés keretein belül. Ezen túlmenően ez a gondolatmenet vezetett el a D+1 dimenziós planáris Casimir-erő újszerű leírásához: ebben a megfogalmazásban a Casimir-effektus nem más mint a peremes kvantumtérelmélet végesméret effektusa. Ebben a levezetésben szükségünk volt visszaverődést és áthaladást egyszerre leíró határookra (az ún. defektokra), így kihasználtuk azt a korábbi eredményünket is, amely szerint minden defektumelmélet ekvivalens bizonyos peremes elmélettel.

A bulk elméletek vizsgálatában elért legfontosabb eredményeinket egyrészt a kétfrekvenciás sine-Gordon-modell tömegspektrumának tisztázása, másrészt annak a két módszernek a kidolgozása jelenti, amelyek segítségével tetszőleges 1+1 dimenziós elmélet véges térfogatbeli spektrumából ki lehet mérni az elméletben előforduló keskeny rezonanciák szélességét. E módszerek kézenfekvő módon általánosíthatóak magasabb dimenziókra, így várakozásaink szerint alkalmazást találnak majd a nagy intenzitással folyó rácstérelméleti hadron spektroszkópia számolásokban is.

Eredményeink elismeréseként Bajnok Zoltán két nemzetközi konferencia meghívott előadója volt. Ezekhez a témákhoz kapcsolódva Takács Gábor elnyerte a Bolyai-ösztöndíjat, és a napokban nyújtja be MTA doktori értekezését „Végesméret effektusok a kvantumtérelméletben” címmel.

*Konform térelméleti kutatások.* A pályázat időtartama alatt részletesen vizsgáltuk a kétdimenziós konform térelméletek több fontos témakörét, úgymint a permutációs orbifoldok elméletét és alkalmazásait, a konform térelméleti moduláris ábrázolás tulajdonságait, az egyszerű áram szimmetriák szerepét, és a konform karakterek meghatározásának kérdését. Munkánk egyik fontos eredménye az úgynevezett kongruencia részcsoport tulajdonság bizonyítása, amely alapvető szerepet játszik a konform térelméletek mélyebb tulajdonságaink megértésében, és több mint másfél évtizedig állt ellen a bizonyítására irányuló próbálkozásoknak. Ezen kutatásaink eredményeként sikerült részletesen jellemezni csoport- és számelméleti szempontból a konform elméletek megfelelő jellemzőit, ami jelentős előrelépés a racionális elméletek osztályozásának irányába. A fenti eredményekre építve dolgoztuk ki T. Gannon-nal, a Univ. of Alberta professzorával a konform karakterek vizsgálatának egy új módszerét, megmutatva, hogy ezek egy általánosított hipergeometrikus egyenlet megoldásait alkotják, ami lehetővé teszi explicit meghatározásukat részletes ábrázoláselméleti vizsgálatok nélkül. Eredményeink lehetséges alkalmazási területe a hűrelmélet, amely az alapvető kölcsönhatások egyesítését tűzi ki céljául, illetve az úgynevezett topologikus kvantum számítógépek elmélete.

A fenti témában Bántay Péter 2006 szeptemberében nyújtotta be MTA doktori értekezését, „Permutációs orbifoldok és alkalmazásaik” címmel. A kérdéses időszakban négy nemzetközi konferencián volt meghívott előadó. 2005-ben másodsorra nyerte el a Bolyai Kutatási Ösztöndíjat, és eredményeit ugyanezen évben Bolyai-Plakettel ismerték el.

### **III. Statisztikus fizikai rendszerek**

*Frontok tulajdonságai nemegyensúlyi rendszerekben.* (a) A nemegyensúlyi struktúrák egyik érdekes és fontos példáját adják a reakció-diffúziós folyamatok eredményeként megjelenő Liesegang-mintázatok. Mivel ezek mikroszkopikus szinten is megjelennek, s e

csapadékstruktúrák létrehozása igen olcsó, felmerült a gondolat, hogy felhasználjuk őket a mikro- és nanoskálán történő hálózatok gyártásában. Ennek megvalósításához azonban meg kell értenünk, hogyan lehet a Liesegang-mintázatok kialakulását, azaz a reakciófrontok mozgását kontrollálni. Egyik fő eredményünk, hogy a front mögött megjelenő csapadékszónák helye jól kontrollálható elektromos térrel, legalábbis egydimenziós geometriájú objektumok esetén. Eredményre vezethet továbbá a reagensek koncentrációinak finomhangolása. Egy kétdimenziós koncentrikus körként mozgó reakciófront például a kezdeti koncentrációk megfelelő megválasztásával szinte tetszőlegesen bonyolult mozgásra készíthető. (b) Az álló közegekben véges sebességgel mozgó reakciófrontok durvulását vizsgálva meghatároztuk, hogy milyen a lokálisan terjeszkedő, kompetitív növénytársulásokat elválasztó határvonal, illetve keverési tartomány. Egyszerű inváziós modelleket vizsgálva a határtartomány sebességét is meghatároztuk arra az esetre, ha az egyik növény kompetitív előnnyel rendelkezik. (c) Egyensúlytól távoli, inhomogén spinláncok relaxációja mágnesezettségfrontok mozgásán keresztül történik. A transzverz XY modellben a mágnesezettségáram kialakulása során megjelenő frontok véges sebességgel terjednek, s mint kimutattuk, lépcsőszerű mágnesezettségprofilal rendelkeznek. Igen érdekes, hogy a lépcsőfokok által szállított mágnesezettség az elemi mágnes egységeiben kvantált.

*Nemegyensúlyi stacionárius állapotokbeli áramok tulajdonságai.* A nemegyensúlyi problémák nehézsége részben abból ered, hogy nincsenek olyan egyszerű, de nemtriviális modellek, amelyek egyensúlytól távoli eloszlásai egzaktul számolhatók. E problémát részben megoldandó, bevezettük a végtelen hatótávolságú kölcsönhatással rendelkező Ising-modell olyan kinetikus változatát, amelyben a spinek két csoportra oszthatók, s a csoportok spin-flip dinamikáját két különböző hőmérsékletű egyensúlyi hőtartály generálja. A modell egzaktul megoldható, s mivel még a fázistér valószínűségi áramvonalai is egzaktul meghatározhatók, az energiaáram és az entrópiáfluxus fluktuációit ki tudtuk számolni. Többek között ellenőriztük a Gallavotti-Cohen-tételt, valamint megmutattuk, hogy a Green-Kubo-reláció teljesül egyensúlytól távol is.

*Extrém statisztikák.* Megvizsgáltuk, hogy a hatványszerű korrelációkkal rendelkező,  $1/f^\alpha$  teljesítményspektrumú folyamatokban extrém statisztikák dominálhatják-e az effektív kritikus viselkedést. A maximális Fourier-amplitúdók eloszlását egzaktul kiszámoltuk, s arra a következtetésre jutottunk, hogy a kapcsolat az ismert extrém statisztikákkal csak magas dimenziókban, illetve e diszperzió nélküli esetben mutathatók ki.

E munkák eredményként Rácz Zoltán négy nemzetközi konferencián és workshopon volt meghívott előadó.

*Diszlokáció rendszerek statisztikus tulajdonságai.* (a) Diszlokációk üvegszerű viselkedését tártuk fel nagyskálájú szimulációk segítségével. Fő eredményünk, hogy a diszlokáció dinamika az üvegszerű rendszerekre jellemző „aging” jelenségét mutatja, azaz a korrelációs függvény és az effektív diffúziós együttható az időben nem eltolásinvariáns, hanem az ún. várakozási időtől is függ. Összefüggést mutattunk ki a morfológia és az üveg jellege között, amennyiben a véletlen eloszlású csúszósíkokhoz kötött diszlokációk analógiát mutatnak a spinüvegekkel, míg ha a diszlokációk a csúszósíkra merőlegesen is elmozdulhatnak, akkor inflálódo szemcseszerkezet jön létre, amely hasonló a doménnövekedés jelenségéhez. (b) Vizsgáltuk diszlokáció rendszerek árnyékolási effektusát. A probléma analóg az elektrosztatikai árnyékolással, a diszlokációk hosszú hatótávolságú kölcsönhatását a háttér árnyékolja, s ezért a diszlokáció rendszerek teljes energiája csupán extenzív. Az árnyékolás elméletétől elvárjuk, hogy a relaxált diszlokációk közötti korrelációról és külső feszültség hatására létrejövő polarizációról is számot adjon. Érdekes módon ezt a kézenfekvő fizikai problémát eddig alig tanulmányozták. A legegyszerűbb, kétdimenziós éldiszlokáció

rendszerre variációs elvből kiindulva felírtuk és megoldottuk az árnyékolási potenciált és a polarizált diszlokáció eloszlást meghatározó egyenletet, s az eredmény a szimulációval kapott korrelációs függvénnyel jó egyezést mutatott. Kiemelendő effektus, hogy míg általános irányban a potenciál exponenciálisan árnyékolt, az él mentén hatványszerű a lecsengés. Ez az él irányú diszlokáció-falak kialakulását még árnyékoló háttér mellett is favorizálja, mely ismert kísérleti jelenség. Az inverz árnyékolási hossz az anyagi minőségtől függetlenül a diszlokáció sűrűség négyzetgyökével arányosnak adódott, s ezt egy korábbi kísérlettel is összhangban állónak találtuk. A módszer ígéretes a bonyolultabb diszlokáció-elrendezések egyensúlyi és dinamikai viselkedésének megértése szempontjából is.

#### **IV. Nemegyensúlyi struktúrák környezeti áramlásokban**

*Sodródás és reakciók áramlásokban.* Vizsgáltuk a passzív sodródás, vagyis a festékek, szennyezések terjedésének dinamikáját a forgó Földön mozgó örvénykettősök áramlási terében. Érdekes átmenetet találtunk az örvények között csapdázottan maradó és az örvények mögött szálas fraktál eloszlásban hátrahagyott szennyezés lehetősége között. Számos publikációnk, köztük egy összefoglaló cikk, foglalkozik a kaotikus folyadékáramlásokban zajló kémiai és biológiai reakciók leírásával, különös tekintettel a front-terjedéssel kapcsolatos reakciókra. A front a reakciómentes esetben megjelenő fraktál struktúrák mentén feltekeredik, s ennek következtében a reakció egészen másként zajlik le, mint álló, vagy akár jól kevert közegben. A zárt tartományban történő kaotikus áramlásokban a frontterjedéssel járó reakciók termékei előbb-utóbb az egész tartományt betöltik. Kimutattuk, hogy ilyenkor a reakció szétterjedése jól jellemezhető egy időfüggő fraktáldimenzióval. Ennek alapján levezettünk egy új típusú reakcióegyenletet, amely jelenleg a legpontosabb elméleti értelmezését adja a Gollub által nemrég végzet kísérlet eredményeinek. A kísérletről és lehetséges elméleti magyarázatáról a *Physics Today* (59, 15, 2006) beszámolt. Megmutattuk, hogy általános áramlásokban a versengő biológiai fajok aktivitást befolyásolja az egyedek véges mérete, méghozzá úgy, hogy az együttélést segíti. Ez újabb adalék lehet a klasszikus plankton paradoxon megoldásához.

*Környezeti folyamatok nemlineáris idősoranalízise.* Az utóbbi évek ugrásszerű fejlődést hozott a környezeti paraméterek nagy térbeli és időbeli felbontású észlelésében, automatikus műholdak pásztázzák a nap huszonnégy órájában a Föld minden pontját. Öröndetes tény, hogy ezen adattömeg egyre nagyobb része könnyen hozzáférhetővé vált/válik a kutatás számára. Az elmúlt időszakban létrehoztunk egy korszerű (SQL alapú) adatbáziskezelő rendszert, amellyel a legkülönbözőbb szempontok alapján lehet globális klimatológiai elemzéseket végezni nagy felbontású adatsorokon. Jelenleg számos adatbázis áll rendelkezésünkre különböző időtartamokra. Első lépésben elvégeztük a Föld egészére kiterjedően a napi hőmérsékleti adatok aszimptotikus korrelációinak vizsgálatát. Azt találtuk, hogy minden egyes földrajzi helyen hosszú-távú (hatvány függvény) korrelációk léteznek. Ennek igen nagy jelentősége van a globális felmelegedéssel kapcsolatos numerikus szimulációk értékelésében. Hasonló korrelációs elemzéseket végeztünk az ózon és aeroszol idősorokkal, melynek során felfedeztünk egy komoly kalibrációs hibát. Jelenleg már dolgozunk a széladatok statisztikus feldolgozásán. Fő célunk az időbeli intermittencia jellemzésének kidolgozása, az előrejelzési módszerek fejlesztése, valamint az alternatív szélenergia potenciális lehetőségeinek felmérése.

Az elért eredmények alapján Jánosi Imre 2006-ban elnyerte a Bolyai-ösztöndíjat. Ehhez a témához kapcsolódva a nyáron nyújtja be MTA doktori disszertációját.

*Klíma*változások: *adatok, nagyságrendek, modellek.* Az utóbbi 730 ezer év hőmérsékletváltozásainak tükrében áttekintettük a klímaváltozások egyszerűbb mechanizmusait, s nagyságrendileg összehasonlítottuk a Föld energiaháztartását meghatározó folyamatok energiafluxus fluktuációit a földi csatornákon átfolyó energiaáramokkal. Megmutatjuk, hogy a klíma-változásokat domináló 100 ezer éves periódust a Földpálya-dinamikán alapuló Milankovich-elmélet csak úgy tudja magyarázni, ha ezzel a periódussal összemérhető idejű memóriát tételez fel. Hasonló feltételezésre van szükség az alternatív elméletekben is. E memória fizikai háttere ismeretlen, ami óvatosságra int a klíma előrejelzések pontosságát illetően.

*Környezeti áramlások kísérleti szimulációja.* A környezeti áramlások fizikája az egyik legfontosabb, intenzíven kutatott területe a hidrodinamikának. A Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium a pályázat futamideje alatt fejlődött fel aktív kutatási egységgé. Front kialakulásával járó gátszakadási áramlást vizsgáltunk tiszta, és csekély mennyiségű polimer oldatot tartalmazó vízzel. Annak ellenére, hogy a lamináris viszkozitás nagyobb, az utóbbi esetben gyorsabb az áramlás, összhangban a 'drag reduction' jelenség új elméleteivel. Vizsgálataink egy spanyol csoportot arra készítették, hogy numerikus szimulációval is vizsgálják a folyamatot; eredményeik hamarosan publikálásra kerülnek. Tanulmányoztuk golyók függőleges rezgését rétegzett folyadékban. Kimutattuk, hogy a véges méretű testek mozgására vonatkozó differenciálegyenletek nem érvényesek, mert nem veszik figyelembe a rezgéssel járó nemlineáris belső hullámok keltését. Új, közelítő egyenletet javasoltunk. Egy forgókádás elrendezésben (a ciklonképződést modellező Fultz-kísérletben) tanulmányoztuk a baroklin frontok instabilitása következtében kialakuló turbulenciában a hőmérséklet-fluktuációinak statisztikáját. Meglepő módon a kapott eredmények kvantitatíve reprodukálják a meteorológiai állomások mért adatainak viselkedését, mely azt mutatja, hogy a kísérleti elrendezés a légkör alapvető áramlási formáit szépen modellezi. Ezen eredmény elismeréseként Jánosi Imre két meghívott előadásra kérték fel. A tornádószerű örvények rendkívül egyszerű modelljének bizonyul a mágneses keverőkben kialakuló áramlás. PIV (Particle Image Velocimetry) módszerrel, golyók és festékek nyomkövetésével kimutattuk, hogy az örvénymagon kívüli áramlás gyakorlatilag egy ideális örvényé. Az örvénymag komplex szerkezetet mutat, melyben a golyók mozgása kaotikus. Az utóbbi két publikáció sikeres diákköri munkák folytatásaként született, s hasonló előzmények után előkészületben vannak további publikációk. Témáik: az úgynevezett belső „tölengés” és „vízesés” és az ezzel járó frontok tanulmányozása víz alatti akadály jelenlétében (mely a Balaton vízének lassú mozgása kimutatására is lehetőséget ad), nagy amplitudójú felszíni nemlineáris hullámok, azaz nem Korteweg de Vries - típusú szolitonok, valamint a hajók mozgása következtében kétrétegű közegben keltett nemlineáris belső hullámok részletes hidrodinamikai vizsgálata. A Laboratórium részt vesz a meteorológus és környezettan szakos hallgatók oktatásában és ezzel a fizikai gondolkodás népszerűsítésében.

## V. Egyéb kutatások

*Rács QCD.* (a) Új QCD spektroszkópiai eljárást dolgoztunk ki, mellyel megbízhatóan kizártuk a kísérletek által valószínűsített pentakvark állapot létezésének lehetőségét a rácson. Eredményünket a megismételt kísérletek is igazolják. (b) A korai univerzum kutatásának egyik legfontosabb területe a fázisátalakulások tanulmányozása. Először a klasszikus térelméletekben lejátszódó átalakulásokra koncentráltunk. Minkowski és Friedmann-Robertson-Walker metrikában kimutattuk a globális U(1) szimmetria sérülésekor a pretermalizáció jelenségét. A globális vortexek (örvényfonalak) keletkezését is tanulmányoztuk. A vizsgálatot lokális szimmetriájú terekre is elvégeztük. Megmutattuk, hogy a tömeges vektor szabadsági fokok a termalizációnál jóval előbb jelennek meg. (c) A

rács QCD számítógépigénye óriási. A CPU-k mellett megjelent egy másik, rendkívüli költséghatékony processzorarchitektúra, a videokártya processzor (GPU). Kifejlesztettünk egy teljes QCD könyvtárat, mely Wilson-, staggered és overlap szimulációkra alkalmas NVidia GPU rendszereken. A QCD termodinamikai számítások során már eredményesen használtuk a beszerzett GPU-kat.

*Nehézionfizika.* A nehézion ütközések termékeinek nagy transzverz impulzushoz tartozó hatványfüggvényyszerű eloszlása sérti a kisebb energiájú tartományra feltételezett termikus egyensúly hipotézisét. Az egyensúly feltételezését megtarthatjuk, ha fenomenologikus módon nemextenzív termodinamikai elvet alkalmazunk. Ennek eredményeképpen az impulzuseloszlásra a teljes mérési tartományban csupán két paramétert tartalmazó függvényt javasoltunk, amely már kis impulzusok mellett illesztve is a nagyenergiájú tartományra meglepően jó extrapolációt ad.

*Asztrofizika.* A mérések szerint az Univerzum gyorsulva tágul. A szokásos homogén és izotróp kozmológiai modellek keretei között ez a tény csak valamilyen különleges anyagfajta, a sötét energia feltételezésével magyarázható. Perturbációszámítás és numerikus vizsgálatok segítségével megmutattuk, hogy a gyorsuló tágulás a nemrelativisztikus anyag inhomogén eloszlásának a következménye is lehet.

*Kvantumgravitáció.* Az elméleti fizika egyik legnagyobb, máig megoldatlan problémája az általános relativitáselmélet és a kvantumelmélet szintézise. A 80-as évek egyik reménykeltő elmélete a szupergravitáció volt, melytől azt várták, hogy divergenciákat nem tartalmazó kvantumtérelmélethez vezet. Ez a remény nem igazolódott, azonban általánosabb modellek határeseteként az elméletnek van létjogosultsága, így kozmológiai következményei fontosak lehetnek. Jelenleg a kvantumgravitáció egyik legizgalmasabb megoldási javaslata az új változók bevezetésén alapuló kanonikus kvantumgravitáció-elmélet. Mindkét elmélet keretei között végeztünk vizsgálatokat. A szupergravitáció-elmélet keretei között levezettük a homogén, szuperszimmetrikus kozmológiai megoldás feltételét. Ezt alkalmazva bebizonyítottuk, hogy a Friedmann-Robertson-Walker-típusú ill. a Kasner-típusú homogén kozmológiákban a szuperszimmetria szükségképpen sérül, ami azért is érdekes, mivel jól ismert, hogy a részecskefizikai kísérleti tapasztalattal csak a szuperszimmetria (fermionok és bozonok cseréjével járó művelet, az egyetlen, ami a dinamikai és geometriai szimmetriákat egyesítheti) spontán sértett formája férhet össze. Megmutattuk, hogy az elmélet keretei között hogyan kvantálható tömeges vektortér Higgs-mechanizmus nélkül. Rámutattunk, hogy az elmélet nem ad jósálatot a tömeg nagyságára.

*Biofizika.* A kutatások egyik fontos területe a sejtszervek működésének kvantitatív megértése. Fontos szerkezeti elemek a mikrocövecskék, mivel ezek alkotják a csillókat, ostorokat, vagy sejtosztódáskor a szétváló magokat húzó fonalakat. Filament modell közelítésben szükséges és elégséges feltételeket adtunk a mikrocövecskék stabilitására. Megmutattuk, hogy véges energiagát lép fel Lennard-Jones-szerű potenciálok alkalmazásával, továbbá, hogy metastabil állapot kialakulásához guanozin-trifoszfát-sapka jelenléte is szükséges. Megvizsgáltuk, hogy a helikális (csavarszerű) szerkezet stabilabb-e az erős deformációkkal szemben. Különböző modellek keretei között megmutattuk, hogy a helikális és az elméletileg létező nem helikális mikrocövecskék mechanikai tulajdonságai között nincs lényeges különbség. A helicitás eredetét dinamikai okokra vezettük vissza, továbbá megmutattuk, hogy a mikrocövecskét alkotó óriásmolekula-alapegységnek az evolúció során kifejlődött alakja biztosítja a mikrocövecskék egyértelmű és gyors növekedését.

*Oktatás.* Iskola OTKA-ról lévén szó megemlítjük, hogy a pályázat futamideje alatt készült el a két évtizedes oktatási tapasztalat alapján írott tankönyv angol változata, mely azóta „Chaotic

Dynamics, An introduction based on classical mechanics” címmel megjelent a Cambridge University Press kiadónál, az iskola OTKA támogatásának is köszönetet mondva. A pályázat résztvevői ismeretterjesztést is folytattak. Az ebben a műfajban megjelent több mint tíz magyar nyelvű cikk adatait nem tüntettük fel a publikációk között, mert – kutatói pályázat lévén - nem volt nekik megfelelő kategória. Szeretnénk hozzáfűzni, hogy egy iskola OTKA-ban érdemes lenne elismerni a támogatott kutatók megfelelő arányú ismeretterjesztő tevékenységét is.

## **VI. Hozzájárulás a doktoranduszképzéshez**

Röviden bemutatjuk a pályázat résztvevői által vezetett doktorandusz tevékenységét, a PhD dolgozat címének megadásával, a pályázat terhére történt alkalmazás időtartamával, a végzetek esetén a végzés idejével, a többiek esetén a végzés várható évével és a referált, ill., konferenciakiadványban megjelent cikkek számával. Az egyes témák szerinti bontásban:

### **I.**

#### **Egri Győző**

(Még nem indította el a doktori védés folyamatát; 3 cikk, 2 konferenciakiadvány)

Különösen fontos eredményeket ért el az overlap fermionos algoritmus fejlesztésében, a topológikus szektorváltás kezelésére javasolt módszert. Ezenkívül a GPU programozás rácstérelméleti kódokra való kifejlesztésében játszott igen alapvető szerepet.

#### **Szabó Kálmán (alkalmazás: 1/2 év)**

Dynamical fermions in lattice quantum chromodynamics (2007, bírálatra benyújtva; 11 cikk, 3 konferenciakiadvány)

A csoport által tanulmányozott minden kérdésben fontos hozzájárulásai vannak. Lényegében ő készítette el a staggered fermionos kód stout változatát a csoport által használt összes platformra. Doktori disszertációját megírta, a védésre a közeljövőben kerül sor a Wuppertal-i egyetemen.

#### **Tóth Anna (alkalmazás: 1/2 év)**

(Még nem indította el a doktori védés folyamatát; 4 cikk)

Az állapotegyenlet meghatározásában voltak eredményei. Tapasztalatait felhasználva szilárdtest fizikai témára tért át. Jelenleg a BME-n a Kondo-modell renormálási csoporttal és konform térelmélettel történő vizsgálatával foglalkozik.

#### **Tóth Bálint**

Exotic hadron spectroscopy in lattice QCD (2007; 2 cikk, 5 konferenciakiadvány)

Kifejlesztett egy módszert a multibozonos algoritmushoz és a hiperkőbösen javított hatáshoz használható magas fokszámú polinomok előállítására. Részt vett a pentakvark létezését vizsgáló munkában. Kidolgozott egy termodinamikai megfontolásokon alapuló spektroszkópiai módszert, amellyel elméletileg pusztán a részecske kvarktartalma alapján, hullámfüggvényének ismerete nélkül határozható meg annak tömege. A pion tömegének mérésére e módszert a gyakorlatban is sikeresen alkalmazta, és a korábbi spektroszkópiai eredményekkel megegyező eredményt kapott.



## II.

### **Kormos Márton**

Boundary renormalization group flows in supersymmetric minimal models (2007 bírálatra előkészítve; 2 cikk)

A csonkított konform állapotér közelítés segítségével megmutatta, hogy mind az unitér mind a nem unitér szuperszimmetrikus minimál modellek peremes folyamatai a kvalitatív elméleti várakozásoknak megfelelően viselkednek olyan esetekben is, amikor a kvalitatív kép nem lenne alkalmazható.

### **Tóth Gábor Zsolt**

Investigations in two dimensional quantum field theory by the bootstrap and TCSA methods (2007, bírálatra benyújtva; 3 cikk)

Kiterjesztette az  $N=1$  szuperszimmetriát peremes elméletekre és meghatározta számos modellben mind az alap mind a gerjesztett peremen történő visszaverődés amplitúdóját. Megvizsgálta a levágási effektusokat a véges intervallumon definiált, mindkét végén mágnésesen perturbált Ising-modellben. A csonkított konform állapotér közelítés segítségével megadta a háromfrekvenciás sine-Gordon-modell fázisdiagrammját.

### **Varga Tamás (alkalmazás: 1/2 év)**

A konform térelméletek moduláris ábrázolásainak vizsgálata (2006; 2 cikk)

Az egyszerű áramok a konform térelméletek fontos szimmetriáját határozzák meg. Megadta a ciklikus egyszerű áram csoportokkal rendelkező konform térelméletek algebrai jellemzését a korábban bevezetett súlyozott permutációs hatások elméletére támaszkodva. Vizsgálta a konform térelméletek magasabb génuszú moduláris ábrázolásait is, az ún. csavart dimenziók meghatározásával.

### **Wágner Ferenc (alkalmazás: 1/2 év)**

(Még nem indította el a doktori védés folyamatát; 2 cikk)

Megmutatta, hogy a szuperszimmetrikus sine-Gordon-modell alapállapotainak véges térfogatbeli felhasadását hogyan lehet leírni egy nemlineáris integrálegyenlet segítségével, és ezt konform perturbációs számítással és TCSA-val ellenőrizte. Elméleti érvekkel és numerikus eljárással is bebizonyította, hogy a kétfrekvenciás sine-Gordon-modell tömegspektrumára az eredetileg kapott eredmények a helyesek és az újabban egy szemiklasszikus közelítésből kapott eredmények hibásak.

## III.

### **Eisler Viktor (alkalmazás: 3 év)**

Fluctuations in strongly correlated equilibrium and nonequilibrium systems (2006; 4 cikk)

(a) Az egydimenziós transzverz Ising-modell energiaáramot vivő állapotait vizsgálva kimutatta, hogy bár az energiaáram hosszútávú korrelációkat generál, a rendszer nem kritikusan viselkedik, s az energiaáram növelésével a fluktuációk csökkennek. (b) A kvantummechanika egyik alapkérdése a klasszikusba való átmenet nagy szabadsági fokú rendszerekben. Megvizsgálta, hogy egy végtelen, alapállapotban lévő  $XX$  spinlánc véges

darabjában megfigyelhető kvantum-fluktuációk leírhatók-e klasszikusan. Azt találta, hogy ha a véges darab elég nagy, akkor a fluktuációk igen jó közelítéssel leírhatók a klasszikus Boltzmann-statisztikával, amelyben az effektív hőmérséklet a rendszer méretétől függő paraméter.

### **Farkas Szilárd**

(Még nem indította el a doktori védés folyamatát; 1 cikk)

Az eloszlásfüggvények alkalmazásának egyik fő területe a felületnövekedési modellek vizsgálata. Az ún.  $1/f$  típusú zajjal leírható periodikus jelek alkotta felületek „szélességei” Gumbel-statisztikát követnek. Megmutatta, hogy egy gömbi szubsztrátum felett definiált ún. Edwards-Wilkinson-típusú felületen rögzített sugarú körökön mérhető magasságfluktuációk  $1/f$  típusú zajnak felelnek meg, vagyis a felületek szélességének Gumbel-eloszlást kell követnie.

### **Ozogány Katalin**

Extrém statisztikák fizikai alkalmazásai (2009; 1 cikk)

Az extrém érték statisztikák elmélete csak független, azonos eloszlású változókra ismeretes. A korrelált rendszerek megértéséhez első lépésként  $1/f^\alpha$  típusú jelek extrém statisztikáját vizsgálta. Ezekben a jelekben a korreláltság  $\alpha$ -val szisztematikusan változtatható, s a rendszer elég egyszerű ahhoz, hogy az extrém statisztikát numerikusan (és bizonyos  $\alpha$ -kra analitikusan) meghatározhassuk.

## **IV.**

### **Benczik Izabella**

Inertial effects and reactions in chaotic flows (2003, december; 2 cikk)

A kis, gömb alakú részecskék sodródásuk során akadályok mögött fraktál attraktorokon halmozódhatnak fel, s numerikus vizsgálataink előkészítik a jelenség kísérleti vizsgálatát is. A zárt áramlásokban zajló reakciók során feltárta a nemegyensúlyi fázisátalakulással kialakuló ún. filamentális fázis szerkezetét. A módszer alkalmazható a tengerek felszíni hőmérsékletének jellemzésére, amelyhez ily módon határozott információs dimenziót sikerült rendelnünk.

### **Gyüre Balázs (alkalmazás 2 év)**

A nagy óceáni szállítószalag laboratóriumi modellezése (2008; 4 cikk)

Meghonosította az áramlási tér meghatározására szolgáló lézeres PIV mérési technikát és a nagyfelbontású kamerák segítségével történő digitális képfeldolgozást. Ezeket alkalmazta a felszíni szolitonok, a hajó által keltett belső hullámok, és a hegymögötti hullámok vizsgálatára. A lineáris elmélet által jósolt interferenciát és egyéb mintázatokat nem sikerült az adott paramétertartományban megtalálni, mely a belső hullámok különösen erős nemlinearitására utal, a kialakuló erős örvényekkel együtt.

### **Király Andrea**

Hosszútávú korrelációk vizsgálata napi hőmérsékleti adatokban (2006; 2 cikk)

Megvizsgálta, hogy létezik-e összefüggés egy adott napra vonatkozó hőmérsékleti anomália és az azt követő napon mérhető hőmérséklet-változás között, és javasolt egy egységes

sztochasztikus modellt. A mért napi hőmérsékleti adatsorok detrendált fluktuációanalízisen alapuló eredményei megerősítik, hogy a hőmérsékleti fluktuációkban a globális átlagértéknél alacsonyabb, ill. magasabb exponensek földrajzilag erősen korreláltan helyezkednek el.

### **Vanyó József**

(Még nem indította el a doktori védés folyamatát; 1 cikk)

Kimutatta, hogy az égitestek forgási dinamikája egy kaotikus időfüggéssel gerjesztett nemlineáris rendszernek felel meg. Javasolta, hogy hagyományos leképezések helyett a fázistérbeli pontok sokaságának dinamikáját kövessük, melyről kiderült, hogy időfüggő fraktáldimenzióval jellemezhető. Ez a dimenzió exponenciális ütemben tart egy határértékhez, s a kitevő a káosz egy új jellemzője, mely nem egyezik meg a Ljapunov-exponenssel.

## **V.**

### **Borsányi Szabolcs**

Thermalization dynamics of particle fields (2003 vége; 2 cikk)

A kutatás célja az egyensúlytól távoli térelméletekben lezajló fázisátalakulásoknak numerikus szimuláción alapuló tanulmányozása volt. Mind Minkowski-, mind Friedman-Robertson-Walker-metrikában kimutatta a globális  $U(1)$  szimmetriájú elmélet sérülésekor a pretermalizáció jelenségét és a globális vortexek keletkezését. Lokális szimmetriájú terekben igazolta a tömeges vektor-szabadsági foknak a termalizációt jóval megelőző megjelenését.

### **Gruiz Márton**

A nemlineáris jelenségek és a káosz oktatásának bevezetése az egyetemi alapkollégiumokba és a középiskolákba (2008; 1 angol nyelvű könyv)

Feltérképezte, hogy mik azok a kaotikus jelenségek, melyek középiskolai tanulók számára is jól érthetők. Az alsóéves egyetemi oktatásban számítógépes bemutatókkal illusztrált oktatási formát dolgozott ki, mellyel könnyen bevezethetők olyan nehéz fogalmak is, mint a kaotikus tranziensek és a nyereghalmaz. Egy több mint negyven évvel ezelőtt kitűzött versenyfeladat modern numerikus eszközökkel történő megoldásával megmutatta, hogy a rendszerben rejlő erős nemlinearitás miatt volt a feladat analitikusan megoldhatatlan.

### **Helesfai Gábor**

Massive fields in Loop Quantum Gravity (2008; 2 cikk)

A gravitációs térrel kölcsönható Proca-mező kvantálását végezte el a kanonikus kvantumgravitáció keretein belül. Eredménye alternatív leírást ad egy már ismert rendszerről, mely segíthet az új elmélet jobb megértésében. Itt nincs szükség Higgs-mechanizmusra, ami fontos lehet, ha kísérletileg nem sikerül a Higgs-bozont megfigyelni. Másrészt felhívja a figyelmet a kanonikus kvantumgravitáció elméletének hiányosságaira, ugyanis a tömegre nincs jóslat a jelenlegi keretek között.

### **Hunyadi Viktória (alkalmazás: 1 év)**

Mikrocsövecskék szerkezeti és stabilitási modellezése (2007, bírálásra beadva; 3 cikk)

Az *in vitro* körülmények között növesztett csövek különböző konfigurációit vizsgálta meg rugalmas deformációk szempontjából, illetve a stabilitásukra adott kvantitatív leírást. Egységes energetikai képet sikerült alkotnia a mikrocsövecskék speciális növekedési és

szétesési dinamikájára, melynek minden egyes részlépése döntő fontosságú az élettani funkciók ütemezésében.

**Máté György (alkalmazás: 1 év)**

(Még nem indította el a doktori védés folyamatát)

(a) Figyelemmel kísérte a perceptron tárolási probléma végesméret korrekcióját egy ismert tanítási algoritmus esetében, továbbá a tanulási folyamat során a rendparaméter, azaz a csatolások átfedésének időfejlődését. Az időeltolási szimmetria megszűnését tapasztalta, és hasonlóan a spinüvegek dinamikájához, az átfedés skálaviselkedést mutatott. (b) Az előreccsatolt és az újabban javasolt echo state neuronhálózatok idősor előrejelző képességeit hasonlította össze. Noha az előreccsatolt hálózatokkal szemben egyértelmű az echo state hálózatok fölénye, ezek teljesítménye a bonyolultabb  $1/f^{\alpha}$  zajra szintén nem kielégítő.

**Sexty Dénes (alkalmazás: 1 év)**

Tachyonic Cosmological Phase transitions (2006; 4 cikk)

A tachionikus instabilitásban egyensúlytól távol keletkező terek termodinamikai állapotegyenletének kialakulását vizsgálta a mikroszkópikus térelmélet keretében. Megtalálta a barionszám megmaradását sértő mértéktérbeli változások jellemző közbenső konfigurációit, a félegész topológikus töltéssel jellemezhető félcsomókat. Valósídejű közvetlen kvantum-időfejlődési algoritmusokban megadta egyszerű kvantummechanikai rendszerekre a Schrödinger-egyenletes fejlődéstől való eltérés kialakulásának időskáláját.

Végül megjegyezzük, hogy a beruházási tevékenység, a terveknek megfelelően, elsősorban az Elméleti Fizikai Tanszék szuperszámítógépének fenntartását és bővítését, valamint a Kármán Laboratórium műszerezettségének fejlesztését, azon belül a PIV berendezés és a digitális adatfeldolgozáshoz szükséges kamerák beszerzését célozta. Ezeket a berendezéseket, amellet, hogy a kutatás céljait szolgálták, a doktoranduszok képzésében is hasznosan alkalmaztuk.