

Negatív sugárzási nyomás (vonósugár)

Megvizsgáltuk a többcsatornás kétdimenziós szórásproblémák során a szórócentrumra ható erőt. Megmutattuk, hogy a várt szokásos esettől (a szórócentrumra a beeső hullám haladási irányával megegyező irányú „toló” erő) eltérő viselkedés eléggé általános körülmények között felléphet: gyakran transzverzális erő (Jordanski-erő) is hat a szórócentrumra, hasonlóan az Aharonov-Bohm szórás illetve a szuperfolyadékokban kialakult vortexeken való akusztikus szórás esetéhez. Igazán új fizikai effektus létrejöttére mutattunk rá abban az esetben amikor a két hullám diszperziós relációja különböző. Ilyen esetben, egy a „nehezebb” részecskét tartalmazó beeső síkhullám a szórócentrumra gyakran a beeső sugárzás irányával *ellentétes irányú* erőt fejt ki, más szóval **a sugárzási nyomás negatív**. Megmutattuk, hogy amennyiben a két szórási csatorna diszperziós relációja különböző, akkor a beeső sugárzás haladási irányával ellentétes irányú erő -- negatív sugárzási nyomás, vagy vonósugár effektus -- eléggé általános körülmények között, számos fizikai rendszerben föllép. Már egy aránylag egyszerű fizikai rendszerben, mint pl. egy kettőtörő közegben elhelyezett megvilágított, szintén kettőtörő lapkára nagyságrendileg a látható fény által kifejtett sugárzási nyomás 2%-5%-ába eső **negatív sugárzási nyomás** lép föl, mely mai technikával nagyobb nehézség nélkül kimérhető. Mesterséges (meta)anyagok esetében ez a vonósugár effektus már makroszkopikus nagyságrendbe esik.

A negatív sugárzási nyomás jelenségére másik egyszerű példa két, tömeges és tömeegtelen, szabad részecskefajta, a centrumtól adott távolságon belül konstans csatolással. Amennyiben az egyes szórási csatornák külön-külön is Aharonov-Bohm-típusúak (a szórás egy valódi, vagy mesterséges) vektorpotenciálon történik, akkor a modell paramétereinek tág tartományában fellép ez a jelenség. Az ún. XY-moddal leírható mágneses anyagok vortexén történő neutronszórás esetén is föllép a negatív sugárzási nyomás, ez azonban túl kicsinek tűnik ahhoz, hogy direktben mérhető legyen, viszont indirekt módon mégis kimutatható lehet, mert a spin-átfordulási hatáskereszmetszet nagy mértékben megnövekszik. Ez a hatáskereszmetszet növekedés az Aharonov-Bohm effektussal magyarázható.

Szintén fontos eredményünk, hogy ugyanezen negatív sugárzási nyomás az ún. kozmikus húroknál is föllép, s az eddigi számolásoknál figyelembe vett más erők nagyságrendjébe esik, amely effektus lényeges szerepet játszhat a kozmikus húrok által indukált barionszámsértő folyamatokban. (P. Forgács, Á. Lukács, T. Romańczukiewicz, Phys.Rev. D88 2013 125007)

Klasszikus elektrodinamikai sugárzási visszahatás

Meghatároztuk a dipólusmomentummal rendelkező töltés mozgásegyenletét a sugárzási visszahatás figyelembevételével, s kidolgoztunk egy általános renormálási eljárást, mellyel a mozgásegyenlet sémafüggése kezelhetővé válik. A véges méret korrekciókat is megvizsgáltunk a klasszikus elektrodinamikai sugárzási visszahatás esetén gömbszimmetrikus töltéseloszlást föltételezve. Ennek kapcsán megmutattuk, hogy a témában nagy érdeklődést és meglepetést kiváltó eredmény, mely szerint a sugárzási visszahatás csak *a méretben másodrendű* járulékokat adna egy véges méretű töltéseloszlás mozgásegyenletéhez (Galley, Leibovich, and Rothstein, Finite Size Corrections to the Radiation Reaction Force in Classical Electrodynamics, Phys. Rev. Lett. 105, 094802 2010), nem

helyes. A meglepetést többek között az váltotta ki, hogy valamennyi eddigi számolás szerint a méretben lineáris tag is megjelenik, így a Galley et al. cikk eredménye ellentétben állt az összes eddigi számolással. Sikert minden kétséget kizáróan megmutatnunk, hogy a sugárzási visszahatás vezető rendű járuléka a töltés mozgásegyenletében *a méretben ténylegesen lineáris*, és rámutattunk a cikk által használt új effektív térelméleti módszerrel elkövetett nemtriviális konceptuális hibára is. (P. Forgács, T. Herpay, P. Kovács Phys.Rev.Lett. 109, 2012, 029501).

Lokalizált skalármezők (oszcillatonok) és gravitációs hullámok (geonok) anti deSitter aszimptotikájú téridőben

Skalármezők által létrehozott, térben lokalizált, időperiódikus (ún. "lélegző") állapotokat tanulmányoztunk anti-de Sitter (AdS) háttér metrika esetén, tetszőleges téridő dimenzióban. Az egyik motiváció a negatív kozmológiai konstans esetének vizsgálatára az ADS/CFT megfeleltetés iránt megnövekedett érdeklődés. (A kozmológiára relevánsabb pozitív kozmológikus konstans esetét már korábban megvizsgáltuk). Anti de Sitter háttér esetén tömeges és tömegtelen Klein-Gordon skalármezők is periodikus lokalizált állapotokat hoznak létre, amelyeknek analitikusan számolhatók. Önkölcsönható skalármezőkből is létrejöhetnek periodikus lokalizált állapotok, amelyeket numerikus és perturbációs módszerekkel részletesen vizsgáltuk. Kidolgoztunk egy perturbatív kifejtést viszonylag kis amplitúdós lélegző állapotok leírására. Ez a módszer azon alapul, hogy nagyon kis amplitúdónál az állapotok a lineáris Klein-Gordon operátor AdS háttéren vett sajátértékeihez tartanak. Négydimenziós tér esetén, spektrális numerikus módszert használva, egy részletes numerikus vizsgálatot hajtottunk végre a periodikus állapotok keresésére, ami lélegző megoldások egy komplex struktúráját tárta fel. A periodikus lokalizált megoldások az amplitúdójukkal paraméterezett egyparaméteres családokat alkotnak, és a frekvenciájuk ennek az amplitúdónak általában nem monoton függvénye. Bizonyos frekvenciáknál rezonáns állapotokat találtunk, ahol az egyik magasabb rendű Fourier módus dominánssá válik. Kutatásaink az ADS/CFT megfeleltetés szempontjából is érdekesek lehetnek, mert a vizsgált állapotok aszimptotikus viselkedése a téridő aszimptotikus végtelennek megfelelő határán definiált térelméleti modellek tulajdonságairól is információt szolgáltat. Eredményeinkről a 2012 júniusában megrendezett Relativity and Gravitation, 100 Years after Einstein in Prague konferencián számoltunk be, mely meg is jelent a konferencia kötetében. (G. Fodor, P. Forgács, P. Grandclément, Phys.Rev. D89 2014 065027)

Einstein gravitációelmélethez csatolt nulla tömegű skalármezők által létrehozott, térben lokalizált, gömbszimmetrikus, időperiódikus (ún. "lélegző") öngravitáló megoldásokat tanulmányoztunk aszimptotikusan anti-de Sitter (AdS) metrikájú téridőkben, tetszőleges téridő dimenzióban. Kidolgoztuk a rögzített háttér-metrika esetén már alkalmazott perturbatív kifejtés formalizmus megfelelő általánosítását dinamikus metrikákra. Explicit megoldásokat négy ill ötdimenziós téridők esetén sikerült előállítanunk. Spektrális numerikus módszert használva, periodikus állapot-családokat állítottunk elő. A periódikus lokalizált megoldások az amplitúdójukkal paraméterezett egyparaméteres családokat alkotnak, és a frekvenciájuk ennek az amplitúdónak általában nem monoton függvénye. Bizonyos frekvenciáknál rezonáns állapotokat találtunk, ahol az egyik magasabb rendű Fourier módus dominánssá válik. Kutatásaink az ADS/CFT megfeleltetés szempontjából is

érdekesek lehetnek, mert a vizsgált állapotok aszimptotikus viselkedése a téridő aszimptotikus végtelennek megfelelő határán definiált térelméleti modellek tulajdonságairól is információt szolgáltat. (G. Fodor, P. Grandclément, P. Forgács, Phys. Rev. D92, 025036, 2015).

Legutóbbi munkánkban a vákum Einstein egyenletek olyan megoldásait állítottuk elő negatív kozmológia állandó esetén, melyek anti-de Sitter aszimptotikájú téridőknek felelnek meg, térben lokalizáltak és időperiódikusak, azaz nem bocsátanak ki gravitációs sugárzást. Ezen tisztán gravitációs hullámokból álló, „lélegző”-típusú megoldásokat AdS geonként emlegeti az irodalom. Az AdS geonok már a legegyszerűbb esetben is legfeljebb egy Killing-vektorral (szimmetriával) rendelkeznek, tehát semmiképpen sem lehetnek gömbszimmetrikusak, így igen nehéz matematikai problémát (csatolt nemlineáris parciális differenciálegyenlet rendszert) kell megoldani. Még az oszcillatonokra kidolgozott perturbatív módszerünket sikerült az AdS geonokra általánosítanunk és a meudoni asztrofizikai intézetben dolgozó Philippe Grandclément numerikus kódját erre az esetre adoptálni. Így a numerikus és perturbatív eredményeink egymást kiegészítő együttese alapján sikerült nagy amplitúdójú stabil geon-családokat, valamint radiálisan gerjesztett geonokat is előállítanunk. Az ilyen stabil AdS geonok elméleti fontossága többek között P. Bizon és A. Rostworowski által felfedezett az AdS aszimptotikájú téridők instabilitásának megértéséhez fontos. (G. Martinon, G. Fodor, P. Grandclément, P. Forgács, „Gravitational geons in asymptotically anti-de Sitter spacetimes”, arXiv:1701.09100 [gr-qc], 2017).

Vortexek és húrok

Nemábeli fluxuscsovek.

Többkomponensű skalármezőket (rendparamétereket) tartalmazó térelméleti modellekben vizsgáltunk vortex-megoldásokat. Az igen intenzíven tanulmányozott szuperszimmetrikus $U(N)$ mértékterekhez csatolt N -komplex skalármezőt tartalmazó elméletek nemábeli vortexei alapvető szerepet játszanak a Konishi és Shifman által kidolgozott kvark-bezárási mechanizmusban. Sikerült megmutatnunk, hogy a már korábban tanulmányozott és a legáltalánosabbnak gondolt nemábeli vortexek egy jóval nagyobb megoldás-család tagjai. Az általános megoldáscsalád a mértékcsoport Cartan-algebrájához tartozó fluxus-kvantumszámokon felül még egy a skalármezőkhöz rendelt $N \times N$ -s mátrixszal parametrizált fázissal is rendelkeznek. Megoldásaink fizikailag stacionáriusan forgó, (globális) áram által átjárt, így nemtriviális háromdimenziós struktúrával rendelkező fluxus-csoveknek felelnek meg. Természetesen igen fontos stabilitásuk kérdése, amit előzetes vizsgálataink alapján megmaradó Noether-töltések biztosítanak. Ezen új típusú fluxuscső megoldások elsősorban a szuperszimmetrikus mértékelméletek Konishi-Shifman féle bezárási mechanizmusában játszanak szerepet. (P. Forgács, Á. Lukács, F. Schaposnik, Phys. Rev. D91, 125001, 2015).

„1.5-típusú” szupravezetők vortexei.

A kétkomponensű rendparaméterrel rendelkező Ginzburg-Landau elmélet fontos szerepet játszik számos új típusú szupravezető fenomenológikus leírásában. Abban az esetben, amikor a két rendparaméter közül az egyik rendelkezik nemzérus várhatóértékkel, azaz, a mintát a második kondenzátum létrejöttéhez tartozó fázisátmenetnél magasabb hőmérsékleten tartjuk eddig nem sokat vizsgálták. Eredményeink szerint ilyenkor ugyan léteznek a jól ismert Abrikosov-Nielsen-Olesen vortexek, ezek azonban *instabillá* válnak azzal szemben, hogy a második rendparaméter a magban *kondenzálódik*, mely az energiát jelentősen csökkenti. Megmutattuk, hogy ezekben a rendszerekben a fluxuscövek viselkedése lényegesen eltér a szokásos szupravezetőkben lehetséges 1-es vagy 2-es típusú viselkedéstől. A modell paramétereitől függő n -fluxuskvantumot (n ezres nagyságrendű lehet) tartalmazó óriás-vortexek kialakulása favorizált energetikailag. Továbbá az ezen óriásvortexek közötti kölcsönhatás is erőteljesen különbözik az 1-s ill. 2-s típusú esettől, amennyiben a vortexek közötti kölcsönhatás a távolságnak nem monoton függvénye, így bonyolult vortex-mintázatok jöhetnek létre. Megmutattuk, hogy kis perturbációkkal szemben a kondenzátumos-magú fluxuscövek **stabilak**. A kapott eredmények alkalmazhatósága szempontjából kiemelendő a nagy nyomású szupravezető folyékony fémes hidrogén. (P. Forgács, Á. Lukács, Phys.Lett. B762, 271, Phys.Rev. D94, 125018, 2016). Az eredményekről Lukács Árpád tartott előadást az ACHT2016 konferencián, Cakovec-en, (Horvátország), 2016 október 5-7, “Semilocal-dark strings”, címmel.

Sötét skalár-kondenzátumos szemilokális húrok.

A két rendparamétert tartalmazó Ginzburg-Landau elmélettel analóg relativisztikus rendszer az ábeli Higgs modell kiterjesztett skalár szektorral. Ilyen típusú elméletet kapunk abban az esetben amikor a standard modell azon határesetét tekintjük amikor a Weinberg szög $\pi/2$, amikor is a nemábeli terek lecsatolódnak (szemilokális modell). A szemilokális modell vortexei nagy érdeklődést váltottak ki, ugyanis ezek természetesen módon a teljes standard modell megoldásai is (Z-fluxuscövek). Azonban elsősorban Hindmarsh vizsgálataiból kiderült, hogy a szemilokális húrok instabillá válnak a standard modellben a nemábeli terek kondenzációjával szemben, ezért kikerültek az érdeklődés homlokteréből. A sötét anyag egy jelenleg népszerű minimális modell-osztálya a skalármezőt tartalmazó ún. Higgs-portál típusú modellek. Megállapítottuk, hogy a skalár sötét anyaggal kiegészített standard modell a szemilokális határesetben már megenged olyan elektromos fluxuscső megoldásokat amelyekben a sötét skalár kondenzálódik. Fontos eredményünk, hogy a sötét skalár kondenzátumú vortexek szemben az ismert szemilokálisokkal, már stabilak. Ezen eredmények új utat nyitnak az elektromos skálájú stabil kozmikus húrok keresésére. Asztrofizikai következményeik mellett ilyen húrok (vagy cirkuláris, vagy mágneses monopólusokon végződő) kis darabjainak a részecske-ütköztetővel végzett kísérletekben(LHC) is keletkezhetnek, s fenomenológia következményei is lehetnek. (P. Forgács, Á. Lukács, Phys.Rev. D95, 035003, 2017).

Hadronok alacsonyenergiás leírása, skyrmionok

Az erősen kölcsönható részecskék (hadronok) alkotórészei, a kvarkok, közötti erős kölcsönhatás meghatározása a perturbációszámítás segítségével alacsony energián nem lehetséges. Így az ezen részecskék tulajdonságainak és kölcsönhatásainak leírásában nagy szerepet kapnak a kisenergiás, ún. effektív elméletek, melyekben ezen részecskék nem elemi voltát nem veszik figyelembe. Munkánkban túllépünk a legkisebb energiákon használható, pionokat és nukleonokat tartalmazó modelleken: figyelembe vesszük a skalár és pszeudoskalár nonett, a vektor és axiálvektor nonett valamint a barion dekuplett valamennyi részecskéjét, egy ún. három-flavor kiterjesztett lineáris szigma-modellben, mely D. Parganlija, P. Kovacs, G. Wolf, G. Giacosa és D. H. Rischke által korábban a mezonokra megadott modell kiterjesztése. A megadott modellben, a szereplő részecskék tömegeit és bomlásait fagráf rendben határozzuk meg, ezeket az empirikus adatokhoz illesztve a modell paramétereit beállítjuk. Modellünk a vizsgált részecskék tömegét és bomlásait kielégítően írja le, az itt bevezetett 8 paraméter, valamint, a már korábban ismert 11 paraméter segítségével. (P. Kovács, Á. Lukács, J. Váróczy, G. Wolf, M. Zétényi, Phys.Rev. D89 2014, 054004)

A Skyrme modell a maganyag QCD-motiválta, alacsony energián érvényes effektív térelméleti leírása, amelyben a dinamikus mezők a pionok, míg a barionok ezen elmélet térben lokalizált megoldásainak (skyrmion-szolitónoknak) feleltethetők meg. A Skyrme modell azon problémája, hogy gyakran túl nagy kötési energiák adódnak, motiválta a modell egy új változatát, a mindig zérus kötési energiát adó, topologikus változatát, az ún. BPS Skyrme modellt. Lukács Árpád T. Ioannidou-val közösen vizsgálta a BPS Skyrme modell dinamikáját; megmutatták, hogy a modell szolitónjainak oszcillációs frekvenciái, melyek kvantálásához és nukleon-adatokhoz való illesztéséhez szükségesek, szolitón-perturbációszámítással jól számíthatók, a kapott eredmények a numerikusan ellenőrzés próbáját kiállták. (Á. Lukács, T. Ioannidou, J.Math.Phys. 57, 022901 2016). Ezen eredményeket egy poszteren bemutattuk ("Some properties of BPS Skyrmions") az International School of Subnuclear Physics nyári iskolán, Ericeben, (Olaszország) 2016 június 14-23-ban.

A BPS Skyrme modell, melytől a maganyag állapotegyenletének kielégítőbb leírása is remélhető, az ideális folyadékok egyenleteivel mutat analógiát. A téregyenletek térfogat-örző diffeomorfizmus szimmetriával rendelkeznek. Ezen modell, a folyadék-analógiát erősítő érdekes tulajdonságára mutatott rá Lukács Árpád, mely szerint egy eredetileg gömbszimmetrikus megoldás energianövekedés nélkül "szétfolyhat", azaz energia és töltéssűrűsége delokalizálódhat. Lukács Árpád megvizsgálta a modell egy speciális megoldáscsoportját, melyekben a topológikus töltés törtértéket vesz fel. Ezen megoldások fontos szerepe a modell alkalmazhatósági határának vizsgálata; jól mutatják, hogy míg a modell konzisztens a nukleáris anyag folyadékcsepp-modelljével, az egyedi részecskék tulajdonságainak leírásához további tagok figyelembevétele szükséges. (Á. Lukács, J. Math. Phys. 57, 072903 2016)

Kompakt kettős-rendszerek gravitációs sugárzása

A kompakt kettősök által kibocsátott gravitációs sugárzás hullámformáit vizsgáltuk az irodalomban eddig nem kellően mértékben figyelembe vett pálya-excentricitás esetén. Meghatároztuk összeolvadó szupermasszív feketelyuk kettősökre a mérhető jel/zaj viszony értékeit és a Fisher-analízis segítségével kiszámoltuk a LISA detektor esetén a kettős geometriai paramétereinek relatív hibáit. Megvizsgáltuk az extrém kezdeti excentricitású szupermasszív fekete lyuk kettősök pályafejlődését az első relativisztikus korrekció, az ún. perihélium precesszió figyelembevételével. Megadtuk a precessziót tartalmazó vezetőrendű gravitációs sugárzás polarizációs állapotait. Kiderült, hogy a precesszió jelenléte a gravitációs hullámok frekvenciáját (egyben fázisát is) háromfelé „hasítja”. Így a paraméterbecslési eljárásban használatos integrálok (jel/zaj viszony és Fisher-mátrix) számolását kiterjesztettük az így megjelent háromféle frekvencia szerinti kiértékelésre. Az eredmények alapján elmondható, hogy a precesszió lényegesen megváltoztathatja a hullámformában lévő fizikai paraméterek hibáit, konkrétan nagy tömegű fekete lyukakra a luminozitási távolság és az ún. chirp tömeg paraméterek hibái javulnak, vagyis jobban mérhetőek a detektor által. Eredményeink szerint vannak olyan szupermasszív tömegű fekete lyuk kettősök, ahol a precesszióval módosított hullámforma javíthatja a két-detektoros standard paraméterek hibabecslését (Mikóczy, Forgács, Vasúth, Kocsis, Phys.Rev. D86 (2012) 104027).

Egy másik munkában meghatároztuk a gravitációs kéttestprobléma vezető rendű (1 PN) korrekciójának figyelembevételével a kettős-rendszer által kibocsátott gravitációs sugárzás explicit alakját (1 PN hullámformáját). Számolásaink során fölhasználtuk az égi-mechanikából ismert ún. Hansen-együtthetők, s azokat sikerült az 1PN korrigált Kepler mozgásra is általánosítanunk. Ezen általánosított Hansen kifejtés segítségével sikerült a gravitációs hullámformák Fourier transzformáltjait tetszőleges kezdeti excentricitás esetén is explicit módon meghatározni. A kifejtés során megjelenő szekuláris tagokat az ún. «drift valódi anomália» paraméter használatával kiszűrtük ki. Eredményeinket a gravitációs hullám-detektorok fizikájában alkalmazhatóak. (Mikóczy, Forgács, Vasúth, Phys.Rev. D92 (2015) 044038)