

**Az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet
legsikeresebb kutatási és fejlesztési eredményei**

2009

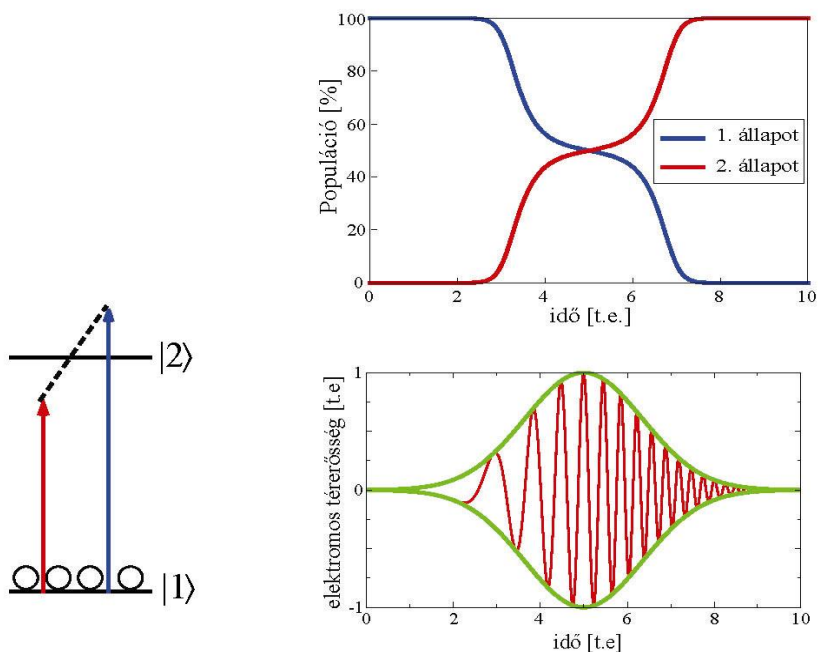
Információ rögzítése és tárolása atomi kvantumállapotokban

Az atomok és a fény kölcsönhatásának az erőssége a fény frekvenciájától függ. Ha a fény frekvenciája megegyezik egy atomi átmenet frekvenciájával, rezonanciába kerülnek. Ilyenkor a közeg nagymértékben befolyásolja a fény terjedését, erős abszorpció és diszperzió lép fel.

Az utóbbi évtized kutatásainak eredménye annak felismerése, hogy a rezonáns abszorbeáló közeg gyenge lézerral megvilágítva átlátszóvá válik, ha egy további, erős lézertér is kölcsönhat az anyaggal. Ennek az elektromágnesesen indukált átlátszóságnak nevezett jelenségnek a gyakorlati alkalmazás szempontjából fontos tulajdonsága az, hogy az anyag törésmutatója a rezonancia közelében meredeken változik a vákuumbeli érték körül, és a diszperziója ott a legmeredekebb, ahol az abszorpció kicsi. Ez a tulajdonság használható a fény lelassítására, sőt, megállítására, a fényimpulzusok összenyomására, a fény tárolására az anyagban, majd a fényimpulzus visszanyerésére.

Az elektromágnesesen indukált átlátszóságra alapozott technikák képesek a kvantumállapotok kontrollálására, s így a gyenge kvantumozott jelek, például az egyetlen fotonból álló impulzusok terjedési tulajdonságára hatást gyakorolni. Ezek a tulajdonságok nagyon fontosak a gyorsan fejlődő kvantum információval kapcsolatos tudományterület szempontjából.

Az RMKI kutatói a fázis- és intenzitás-információ (transzverzális kép) rögzítésének és hosszú idejű tárolásának egy új, frekvenciamodulált impulzusok használatán alapuló módszerét fejlesztették ki. Az információ a többszintű atomok hosszú élettartamú metastabil állapotaiban található atomok számában és az állapotok közötti koherenciában tárolódik. (1. ábra).



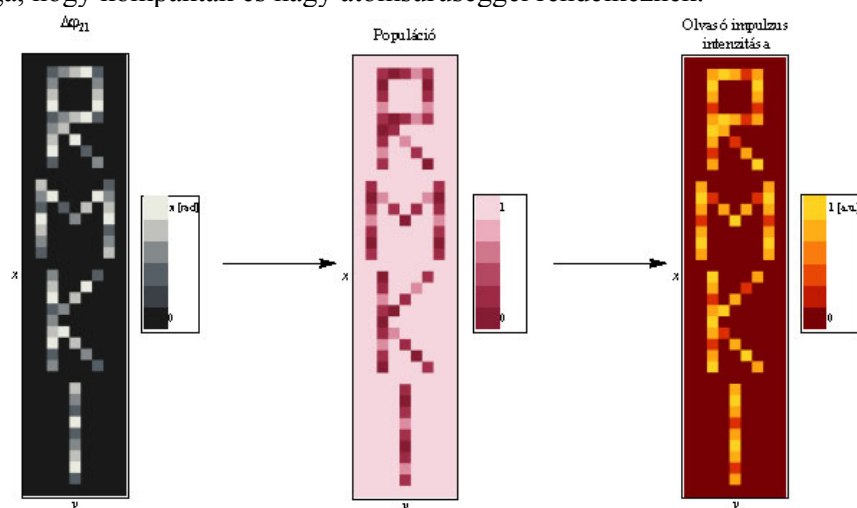
1. ábra: Ha a rezonancia körüli tartományban egy kétszintű atomot frekvenciamodulált impulzussal megvilágítunk, teljes populáció-átvitelt valósíthatunk meg a szintek között.

Koherens kevert állapotok létrehozására olyan módszert fejlesztettek ki frekvenciamodulált lézerezimpulzusok alkalmazásával, amelyekben csak hosszú élettartamú metastabil állapotok

játszanak szerepet anélkül, hogy közben gerjesztődne az atom. Az optikai információ a metastabil állapotokban lévő atomok számában tárolódik, míg ezzel párhuzamosan az időbeli információ az állapotok közötti koherenciában. Ez a módszer így kiegészíti az elektromágnesesen indukált átlátszóságon alapuló eljárásokat.

Ezzel a módszerrel kvantum-információt rögzíthetünk, tárolhatunk hosszú időtartamra, és az információt feldolgozhatjuk külső fényterek alkalmazásával. A transzverzális képek ilyen módon való rögzítése és feldolgozása lényegesen megnöveli azt az információmennyiséget, amelyet néhány foton hordozhat, számos lehetőséget nyitva a kvantuminformáció kezelésére.

A frekvencia-modulált impulzusok alkalmazása a szokásos átlátszósági ablak szignifikáns kiszélesítését teszi lehetővé. A javasolt módszerben a frekvencia-moduláció miatt a fény szigorú rezonanciája nem szükséges, így alkalmazható homogén és inhomogén (kiszélesedett átlátszósági ablakú) anyagban is. Az utóbbi a szilárdtestekre jellemző, melyeknek előnyös tulajdonsága, hogy kompaktak és nagy atomsűrűséggel rendelkeznek.



2. ábra: A fázis-információ rögzítésének és az atomi kvantumállapotokból való kiolvasásának rövid vázlatja. A metastabil állapotok transzverzális eloszlásában tárolt fázis-információ a kiolvasó impulzus transzverzális intenzitás-eloszlásába kerül át. A kiinduláshoz használt fázis-maszk az RMKI betűk képéből készült.

Egy további, kiolvasó lézermimpulzussal, amely az atom metastabil állapotainak a betöltöttségét méri, a fázis-információ visszaállítható. A kiolvasó impulzus az idő függvényében szintén frekvencia-modulált, intenzitása térben homogén eloszlású, ezáltal valamennyi metastabil állapotban lévő atomot átviszi gerjesztett állapotba. A metastabil állapotok populációjában tárolt transzverzális fáziskép a kiolvasó nyaláb transzverzális amplitúdó modulációjában jelenik meg.

G.P. Djotyan, J.S. Bakos, Zs. Sörlei, Phys.Rev.A, **70**, 063406 (2004)

G.P. Djotyan, J.S. Bakos, G. Demeter, Zs. Sörlei, J. Szigeti and D. Dzsotjan. JOSA B, **25**, 166 (2008).

G. P. Djotyan, N. Sandor, J. S. Bakos, and Zs. Sörlei. JOSA B, **26**, 1959 (2009).

Gáztöltésű részecske-detektorok kutatása és fejlesztése

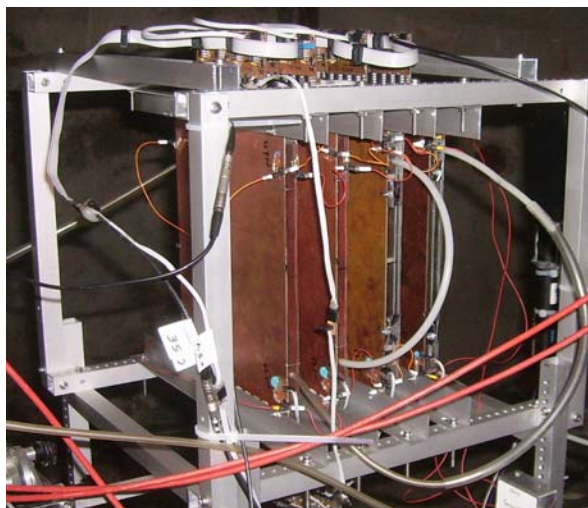
A kísérleti részecskefizikai kutatások központi berendezései a részecske-detektorok. Jelentőségükkel kapcsolatban elegendő megemlíteni, hogy napjainkig öt Nobel-díjat ítéltek oda részecske-detektorok fejlesztéséért, illetve tökéletesítéséért. A fejlesztés továbbra is töretlenül folyik, hiszen a részecskefizikai kutatások előrehaladásával egyre nagyobb az igény ezeknek az eszközöknek a tömeges, relatíve olcsó előállítására, illetve különleges paraméterekkel rendelkező típusok (pl. gyors működés, sugárzás-állóság) kifejlesztésére.

A KFKI RMKI-ban nagy hagyománya van a detektorépítésnek, és Magyarországnak az Európai Részecskefizikai Laboratóriumba (CERN, Genf, Svájc) való belépésével az intézet egyik kiemelt feladatává vált a nemzetközi detektorfejlesztési törekvésekbe való bekapcsolódás. Ezen tevékenységhez kiváló keretet nyújtott a CERN-ben létrejött RD51 jelű nemzetközi kooperáció, amelynek célja mikrostrukturás gáztöltésű részecske-detektorok kutatása és fejlesztése. (E detektortípus az utóbbi években a kutatás és fejlesztés fókuszába került, mivel ezen nagyfelbontású, költséghatékony detektorok széles körben alkalmazhatók és előállításuk elfogadható kihívás még kisebb laboratóriumok számára is.) Ebben a nemzetközi kollaborációban vesz részt a KFKI RMKI és az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) alkotta konzorcium. A fejlesztések anyagi háttérét egy 2009-ben elnyert OTKA-NKTH pályázat biztosítja.

A kutatási-fejlesztési program két részecskefizikai kísérlettel kapcsolatos alkalmazásra épül: a) a CERN LHC ALICE kísérletben a tervezett VHMPID detektorhoz a nagy impulzusú részecskékre triggerelő egység kifejlesztése; b) a CERN SPS NA61/SHINE kísérlet részére hadron-atommag ütközésekben keletkező kis impulzusú részecskék detektálására alkalmas berendezés megépítése. Mindkét kísérletnek az RMKI aktív tagja.

A munka megkezdése óta eltelt viszonylag rövid idő alatt sikerült figyelemre méltó eredményeket elérni.

Kifejlesztésre kerültek az LHC ALICE VHMPID trigger egységének kisméretű, valós körülmények között tesztelhető prototípusai. Egyrészt megépült egy vastag-GEM (Gas Electron Multiplier) alapú eszköz, amelynek tesztelése megtörtént. Másrészt saját ötletek alapján és saját erőből kifejlesztésre került a CCC (Close Cathode Chamber) alapú prototípus (1. ábra), amely innovatív módon egyesíti magában több kamra-típus előnyeit. Kialakult a gyártás-technológia kisméretű ($20 \times 20 \text{ cm}^2$) CCC kamrák előállítására. További cél nagyobb méretű kamrák gyártása, tesztelése, illetve a sorozatgyártás műszaki előkészítése.



1. ábra: A Close Cathode Chamber (CCC) alapú trigger-kamra prototípusa, 4 réteges kísérleti elrendezésben.

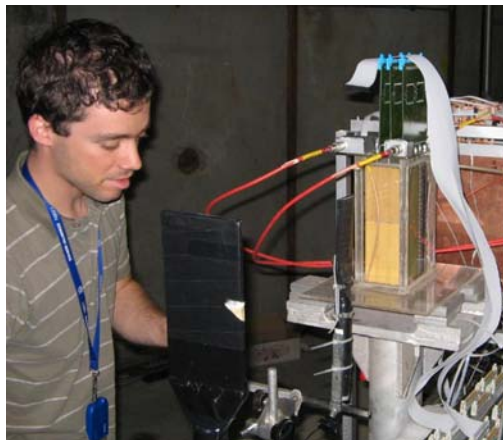
Az SPS NA61/SHINE kísérlethez is elkészült a megépítendő időkivetítő kamra (Time Projection Chamber, TPC) centralitás detektor prototípusa. Ez a kisméretű, de nagy-pontosságú detektor a részecskék pályájának háromdimenziós hely-meghatározásán túl azok energiájára is képes becslést adni.

A megépítendő TPC az ütközési tartományhoz nagyon közel helyezkedik majd el, ezért fontos, hogy kisméretű, de nagy hatékonysággal működő berendezés legyen.

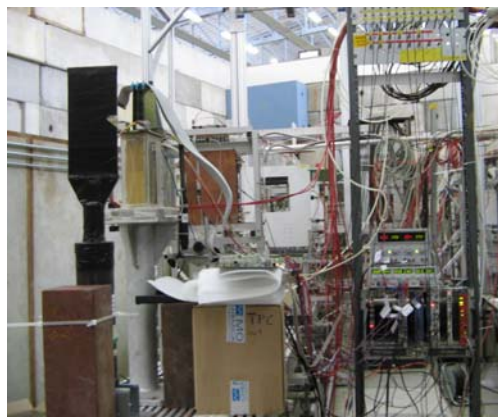
A TPC kamra prototípusának valós méretét illusztrálja a 2. ábrán látható elrendezés.

Mindkét kamra prototípusa sikerrel vizsgázott a CERN-i Proton Szinkrotron (PS) T10-es nyalábjánál 2009 őszén elvégzett teszt-mérésekben (3. ábra). Az 5 GeV/c impulzusú pionokkal végrehajtott kísérletben különböző beesési szögű egyedi részecske pályákat vizsgálva meghatározásra került a kamrák határfoka. A CCC kamrák teljesítették a trigger-detektorral szemben elvárt 98-99 %-os határfokot. A TPC esetében a háromdimenziós pálya-rekonstrukciós teszteken túl lehetőség nyílt valódi nyalábütközéses mérések elvégzésére is.

A részecskefizikai felhasználásokon túl a program része detektorok fejlesztése széles körű ipari alkalmazások céljából is. Ilyen például egy új típusú, olcsó, nagy felbontású kisállat-PET, melynél a cél egy eladható termék megalapozása együttműködésben a magyar MEDISO céggel, mint potenciális ipari partnerrel.



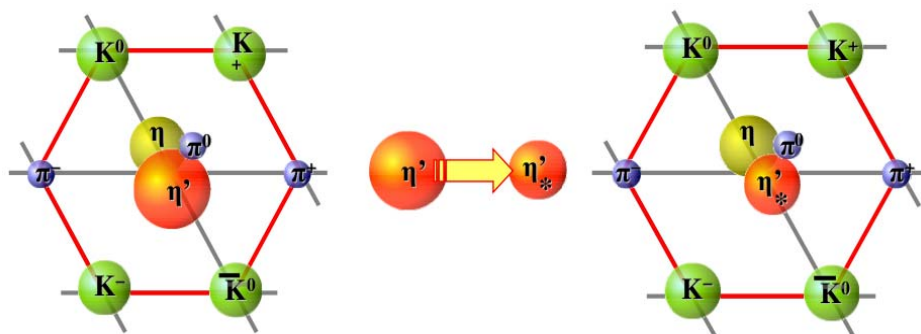
2. ábra: Az NA61/SHINE kísérlethez készült TPC kamra prototípusa, teszt-nyalábos mérésre előkészítve (háttérben a VHMPID trigger-egység prototípusával).



3. ábra: A CERN PS gyorsítónál a pion-nyaládba helyezett CCC és TPC kamrák, a hozzájuk tartozó kiolvasó és adatfeldolgozó elektronikával.

Az $U_A(1)$ szimmetria helyreállása és az η' mezon tömegének közegbeli csökkenése Au+Au ütközésekben a RHIC gyorsítónál

A kvark-modell szerint közelítő $U(3)$ szimmetria teremt kapcsolatot a könnyű u, d és s kvarkok között. Ennek a szimmetriának a spontán sérüléséből 9 könnyű Goldstone bozon létezése következik, amelyeket a kísérletekben megfigyelt könnyű pszeudoskalár mezonokkal azonosíthatunk. Normál körülmények között azonban csak 8 könnyű pszeudoskalár mezon figyelhető meg, míg a 9. pszeudoskalár részecske, az η' mezon tömege 958 MeV, ami a hozzá legközelebb álló η mezon tömegének több mint kétszerese. Ezt az ellentmondást az Adler-Bell-Jackiw $U_A(1)$ anomália oldja fel. Ezen elképzelés szerint az η' mezon nagy vákuumbeli tömegét instantonokkal való kölcsönhatások okozzák. Nagy energiasűrűségnél azonban az instantonok járulékanak jelentősen le kell csökkennie, és ezáltal forró, sűrű közegben az η' mezon tömegének csökkenését és az $U_A(1)$ szimmetria helyreállítását várjuk. Ilyen forró közeg létrehozására a nagyenergiás nehézion-ütközések alkalmasak. Egyes várakozások, rács kvantum-szindinamikai számítások szerint ezen ún. királis fázisátmenet alacsonyabb hőmérsékleteken megy végbe, mint amilyen hőmérsékleten a kvark-gluon plazma kialakul.



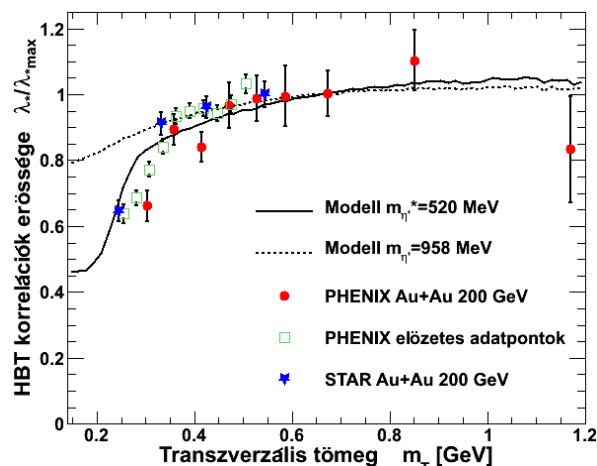
Az η' mezon tömege forró közegben az η mezon tömegének közelébe csökkenhet, ezáltal a közelítő $U(3)$ szimmetria helyreáll. A gömbök nagysága arányos a különböző részecskék tömegével, a szimmetria helyreállása az η és az η' részecskék azonos tömegéhez vezet.

A csökkent tömegű η' mezon csak a forró, hadronikus közegben létezik, és ennek a kifagyásakor az eredeti tömegét visszanyeri, ami csak közvetett módszerekkel mutatható ki. Mivel a könnyű mezonok keltése a növekvő tömeggel exponenciálisan csökken, a tömegcsökkenés az η' mezonok darabszámának jelentős, 3–50-szeres megnövekedését is jelentheti, amit a jelenlegi modellek még nem vettek figyelembe.

Az η' mezonok darabszámának mérésére pl. a Hanbury-Brown–Twiss (HBT) effektus alkalmazható. Ez egy kvantummechanikai impulzustér-korreláció, amely abból ered, hogy a pionok bozonok, kétrészecske-hullámfüggvényük szimmetrikus a részecskék felcserélésére, s emiatt a pionok nagyobb eséllyel keletkeznek egymáshoz közeli impulzussal. A pionok HBT-korrelációjának mérésével le lehet „tapogatni” a rendszer térbeli struktúráját: az elmélet alapján a korrelációs függvény lényegében a pionkeltés téridőbeli eloszlása Fourier-transzformáltjának abszolútérték négyzete. A módszer használhatóságát bizonyítja, hogy a pionforrás méreteire és alakjára így kapott mérési eredmények alátámasztják az elliptikus folyás jelenségével kapcsolatosan megismert tökéletes folyadékképet: a jelenleg kísérletileg előállítható legmagasabb, mintegy 2 Terakelvin hőmérsékleteken az anyag szinte tökéletes, súrlódásmentesen áramló folyadékként viselkedik. A HBT korreláció erőssége érzékeny a

pionra bomló, a rendszer időfejlődésének időskálájánál jóval hosszabb életű rezonancia-részecskék arányára, vagyis közvetve az η' mezonok darabszámára: A megnövekvő η' -darabszám jeleként a HBT-korrelációk erőssége kis p_T -nél lecsökken. A HBT-korrelációk erőssége az úgynevezett tengelymetszeti paraméter (λ^*) segítségével fejezhető ki.

Az RMKI kutatói a közegbeli η' -tömeg meghatározására kiterjedt szimulációt végeztek a PHENIX-Magyarország számítógép-klaszterén. A rezonancia-részecskék spektrumait eddigi sikeres modellek rezonancia-arányokra vonatkozó jóslataiból számították az η' mezonok darabszámát a feltételezett csökkent tömeg (m^*) szerint módosítva, ami modelljükben illesztési paraméter volt. Különböző m^* értékek mellett a tengelymetszeti paraméter mért RHIC (STAR/PHENIX) adatokra való illeszkedésének jóságát (konfidenciaszintjét, illetve χ^2/ndf értékét) vizsgálták.



STAR és PHENIX mérések a HBT-korrelációk erősségének transzverzális impulzustól való függésére. A legvalószínűbb (520 MeV-es) közegbeli tömeghez tartozó modell-számítást a folytonos, a 958 MeV-es tömeghez tartozót a szaggatott vonal mutatja.

Modelljük paramétereit széles tartományban változtatva azt találták, hogy 99.9%-os konfidencia-szint mellett az η' vákuumbeli (958 MeV-es) tömegének legalább 200 MeV-es csökkenése szükséges az adatok leírásához. Az elméleti várakozások szerint szinte minden hadron tömege módosulhat az erősen kölcsönható, forró hadronanyagban. A fenti ábra az első, egy adott hadron tömegének jelentős és szignifikáns megváltozására utaló kísérleti eredmény a nagyenergiás nehézion-fizikában. A tömegcsökkenés korlátjának további pontosításához, a módszer más részecskékre való kiterjesztéséhez, és a tömegbecslés szisztematikus hibáinak további csökkentéséhez a PHENIX és a STAR mérések folytatására, az η' más bomlási csatornáinak vizsgálatára, a jelenség felléptéhez szükséges minimális ütközési energia meghatározására, és további részletek kísérleti tisztázására van szükség.

Ezen kutatásokat támogatta az OTKA (T49466, NK 73143), a Magyar-Amerikai Vállalkozási és Ösztöndíjalap, és az USA Department of Energy PHENIX Visitor Fund.

Significant in-medium eta-prime mass reduction in $\sqrt{s(\text{NN})}^{1/2} = 200\text{-GeV}$ Au+Au collisions.

R. Vértési, (RMKI), T. Csörgő, (RMKI & Harvard U.), J. Sziklai (RMKI)

Plenary talk at Quark Matter 2009: 21st International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM2009), Knoxville, Tennessee, 30 Mar - 4 Apr 2009.

Published in **Nucl. Phys. A830:631C-632C, 2009**

e-Print: [arXiv:0905.2803](https://arxiv.org/abs/0905.2803) [nucl-th]

Téridő-szingularitások vizsgálata a numerikus relativitáselmélet módszereivel

Einstein speciális relativitáselmélete a teret és az időt egymásba ötvözte, és egy merőben új fogalommal, a téridővel helyettesítette. Az általános relativitáselmélet megalkotása során ennél sokkal tovább menve Einstein azt mutatta meg, hogy a gravitációs kölcsönhatás teljes egészében a téridő-geometria dinamikájának segítségével ábrázolható. Ennek megfelelően az általános relativitáselmélet nemcsak az anyag történetének egy egyszer és mindenkorra rögzített geometriai háttéren történő leírására vállalkozik, hanem segítségével követhetővé válnak olyan folyamatok, ahol a téridő geometriájában lényeges változások történnek. Kiváló példa erre a neutroncsillagok és feketelyukak kialakulása, vagy az ilyen típusú objektumokból álló kettős rendszerek keringése és összeolvadása. Bár az elmélet 1916-ban végleges alakot öltött, az ötvenes évek elején született meg az a felismerés, mely lehetővé tette az Einstein-egyenletek nemlineáris hullámegyenletek formájában történő felírását. Ez technikailag a térváltozók megfelelő kirostálása, azaz mértékrögzítés révén érhető el. Kiderült, hogy alkalmasan megválasztott kezdőértékekhez - a fejlődési egyenleteknek megfelelően - az anyag és geometria egyértelmű, szimultán evolúciója tartozik.

Mivel az Einstein-elmélet alapegyenletei nemlineárisak, ezért analitikus módszerek nem, vagy csak nagyon korlátolt mértékben adhatnak segítséget a dinamikai folyamatok tanulmányozásához. Az elméleti fizikában máshol is egyre nagyobb jelentőséggel bírnak azok a modellek, illetve fizikai folyamatok, amelyekben nemlineáris effektusok tanulmányozására van szükség. Ilyen típusú vizsgálatok során, például a csillagok gravitációs összeomlási folyamatának vagy a kapcsolt gravitációs sugárzási jelenségeknek a tanulmányozásakor az analitikus eszközök önmagukban nem biztosítanak kielégítő leírást. Ezért megbízható, az időfejlődést hosszan követni képes numerikus módszerekre van szükség. Ezen igény kielégítésére az MTA KFKI RMKI kutatói kifejlesztették a GridRipper nevű programcsomagot, amely egy általános, a gravitációs sugárzási jelenségek pontos leírására alkalmas, merőben új numerikus eljárás.

A GridRipper egy negyedrendű pontosságú adaptív rácsfinomító kód (Adaptive Mesh Refinement - AMR) és osztálykönyvtár, C++ és Java nyelveken. Eddigi alkalmazásai során különféle dinamikai rendszerek – pl. a kozmológiai infláció, gömbszimmetrikus gravitációs rendszerek összeomlása, mikro-feketelyukak kialakulása és fejlődése, vagy a topológia-váltás kialakulása – vizsgálatára került sor. A kód alkalmas hiperbolikus parciális differenciálegyenlet-rendszerek numerikus megoldására tetszőlegesen választott integrálási sémával (másod- vagy negyedrendű Runge-Kutta- vagy iterált Crank-Nicholson-séma). A kezdőfeltétel megadható képletek formájában, generálhatja programkód, vagy lehet egy közönséges differenciálegyenlet numerikus megoldása.

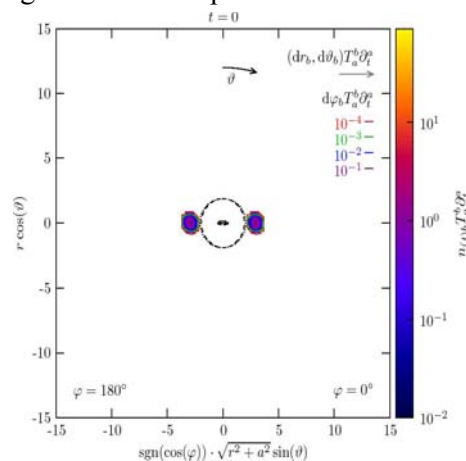
A GridRipper kialakítása során alkalmazott analitikus és numerikus módszer egyedülálló abban az értelemben, hogy a világon elsőként képes az időfejlődést a feketelyuk-tartományon belül a kialakuló téridő-szingularitást tetszőlegesen megközelítve nyomon követni. A numerikus eljárást az intézet kutatói a gravitáció és anyag különféle csatolt gömbszimmetrikus rendszereire alkalmazták. Megmutatták, hogy a görbületi szingularitások megjelenését minden esetben megelőzi az úgynevezett csapdafelületek kialakulása. Ez az eredmény összhangban áll Penrose kozmikus cenzor hipotézisével.

Részletesen megvizsgálták a Ricci-, Kretschmann-skalár görbület, valamint a Misner-Sharp-tömeg szingularitások közelében tapasztalt divergenciájához tartozó kritikus viselkedést. Számos esetet megvizsgálva azt tapasztalták, hogy a Ricci-skalár divergenciája ellenére az Einstein-Hilbert-hatás véges marad. Mindezek -a topológia-váltással kapcsolatos elvi kérdések vonatkozásában elért eredménnyel együtt- nagy jelentőséggel bírhatnak a gravitáció kvantumelméletének vizsgálatára. Az RMKI kutatói kialakították a GridRipper nevű programcsomag szimmetria-feltételektől mentes, általános rendszerek leírására alkalmas változatát is, ami a korábban csak 1+1 dimenzióban alkalmazható GridRipper kód kiterjesztése 1+N dimenziós rendszerekre.

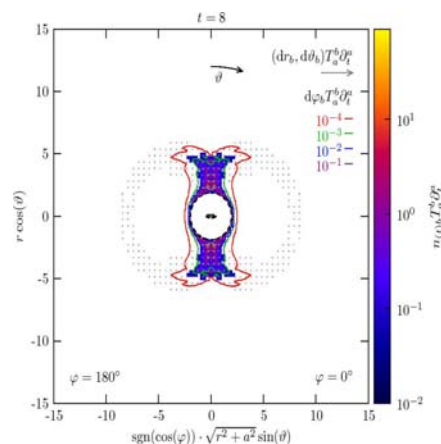
A módszer hatékonyságát jól mutatja, hogy segítségével szuperszámítógépes háttérrel feltételező szimulációk egyszerű asztali számítógépeken válnak megvalósíthatóvá.

Az általános programcsomag első alkalmazása a forgó Kerr-feketelyuk háttérén egy toroidális alakzatban elkent csillagot ábrázoló anyaghalmoz idő-fejlődésének vizsgálata volt. Ahelyett, hogy a fekete lyuk a csillag anyagát a lehető leggyorsabban elnyelné, az ábráknak megfelelően az figyelhető meg, hogy a fekete lyuk az anyag jelentős részét a forgástengely irányába löki ki. Figyelemre méltó, hogy a kialakuló anizotropia az asztrofizikai jetek jellegzetességeit mutatja.

A GridRipper programcsomag különféle fizikai rendszerek dinamikai vizsgálatát teszi lehetővé. Ezek egy jelentős része kapcsolódik az RMKI Virgo tudományos együttműködésben vállalt feladatokhoz, melyben különféle gravitációshullám-keltési folyamatok, majd a kialakuló hullámok terjedésének vizsgálata játszik központi szerepet.



1. ábra: Az energia-és energiaáram-sűrűség eloszlása (középponton átmenő függőleges metszet, kezdetben, $t=0$)



2. ábra: Az energia-és energiaáram-sűrűség eloszlása egy későbbi pillanatban ($t=8$).

P. Csizmadia and I. Rácz: *Gravitational collapse and topology change in spherically symmetric dynamical systems*, Class. Quantum Grav. 27 (2010) 015001

WEB-oldal: <http://www.kfki.hu/~cspeter/gridripper/index.html>