

OTKA T043455
Tematikus OTKA Pályázat
Zárójelentés

Kvantumszindinamikai effektusok vizsgálata
relativisztikus nehézion ütközésekben

Időtartam: **2003-2006**

Kutatóhely: **MTA KFKI RMKI, Részecske és Magfizikai Kutatóintézet**
Elméleti Főosztály

Témavezető: **Lévai Péter (MTA KFKI RMKI)**

Résztevő kutatók: **Barnaföldi Gergely Gábor (MTA KFKI RMKI)**
Csizmadia Péter (MTA KFKI RMKI)
Gogohia Vahtang (MTA KFKI RMKI) [2006-ban]
Papp Gábor (ELTE TTK Fizikai Intézet)
Zimányi József (MTA KFKI RMKI)

A kutatás 4 éve alatt az erős kölcsönhatás és a kvantumszindinamika (QCD) témakörének több olyan problémájával foglalkoztunk, melyek vizsgálatának szükségességét egyrészt az erősen kölcsönható kvark és gluon anyag elméleti leírása, másrészt a genfi CERN-ben és a brookhaveni RHIC gyorsítók mellett végzett nehézion fizikai kísérletek adták. A kutatásaink eredményességét mutatja, hogy **38 publikációnk** született az OTKA támogatásával a fenti időszakban. Ebből **27 cikk referált folyóiratban** jelent meg, illetve áll megjelenés alatt (ezek össz impakt száma 48), 5 cikk konferencia proceedings formájában jelent meg és további 4 cikk került elektronikus publikálásra. A fenti időszakban 2 nagy konferenciát rendeztünk Budapesten, melyek témája szorosan kapcsolódott az OTKA témához: a Quark Matter 2005 világkonferencián mintegy 600-an vettek részt, a „Quarks, Hadrons, and Strong Interaction: Gribov-75 Memorial Workshop” rendezvényen pedig mintegy 60-an. Ezek az események is hozzájárultak ahhoz, hogy eredményeink széles körben ismertté váltak, a fent említett publikációkra eddig **410 független hivatkozás** érkezett.

Az alábbiakban, témakörökbe rendezve összefoglaljuk a legfontosabb eredményeinket, rámutatunk az eredmények kapcsolódására, utalunk azok felhasználására. Miután az eredményeinket angol nyelven lepublikáltuk, ezért a részletes ismertetés helyett a megfelelő publikációra fogunk utalni a Publikációs jegyzék számozását felhasználva.

1. Az erősen kölcsönható anyag tulajdonságainak elméleti vizsgálata

[1, 6, 9, 15, 18, 19, 25, 26, 36]

A nagyenergiás nehézion ütközésekben az anyag új, extrém nagy sűrűségű és energiasűrűségű állapotait kívánjuk előállítani, melyek az Univerzum nagyon korai állapotában léteztek. A korábbi elméleti számolások szerint a kritikus $1-2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ energiasűrűség elérése után az összeütköző atommagok protonjaiból és neutronjaiból kiszabadulnak a kvarkok, antikvarkok és gluonok, és az így létrejövő kvark-gluon plazma állapot jelenti az anyag új halmazállapotát. Ekkor a gyengén kölcsönható részecskék között fellépő kölcsönhatást perturbatív módszerekkel is leírhatjuk, a sok-részecske rendszer állapotegyenletét és egyéb tulajdonságait ily módon meghatározhatjuk. Az utóbbi évek elméleti vizsgálataiban azonban megmutatták, hogy a fázisátalakulás közelében a kvarkok és gluonok nagyon intenzíven hatnak kölcsön és egy erősen korrelált részecske-rendszer keletkezik a nehézion ütközésekben. Erre utalnak a RHIC gyorsítónál mért kísérleti eredmények is. Ezt az erősen korrelált kvark-gluon rendszert vizsgáltuk a kvantumszindinamika és más effektív elméletek segítségével. Egyrészt feltérképeztük, hogy a kritikus hőmérséklet környékén a tömeges kvark és antikvark szabadsági fokok dominálják a rendszert és kvázi-részecskékkel sikeresen leírható a kvark-antikvark anyag [26]. A tömeges kvarkok és antikvarkok bevezetése lehetőséget nyújt arra, hogy molekuláris dinamikai módszerekkel, kvark-kvark potenciálok bevezetése mellett meghatározzuk a kölcsönható anyag több jellemzőjét. A kvarkok közti pár-korrelációs függvény azt mutatja, hogy egy klaszterizációra erősen hajlamos rendszerünk van, amelyben a nem-ábeli kölcsönhatás eredményeként rezonancia-jellegű folyamatok lépnek föl, s ez nagyon gyors termalizációt eredményez [25]. Ugyanebben a modellben a fázisátalakulási hőmérséklet közelében meghatároztuk a kvarkanyag viszkozitását, ott ahol a perturbatív térelméleti módszerek már nem működnek [36]. A kvázi-részecske modellben a kvarkoknak hőmérsékletfüggő tömegük van és egy maradék kölcsönhatás lép fel közöttük. Ezt a modellt kiterjesztettük abba az irányba, hogy tömegspektrum kialakulását tételeztük fel a kvarkoknál és a maradék kölcsönhatást ezzel a kvark-spektrummal helyettesítettük. Állapotegyenletet így is létrehozhatunk, sőt a rács-QCD számolásokban kapott energiasűrűség és nyomás értékekből meghatározhatjuk a kvark-spektrumok alakját [15]. Ez a kiterjesztés lehetővé teszi a kvark-koaleszcenciás folyamat általánosabb bevezetését.

Az erősen kölcsönható kvarkanyag tulajdonságait egyes asztrofizikai objektumok (neutroncsillagok, kvarkcsillagok) tulajdonságain keresztül is vizsgálhatjuk, feltételezve, hogy azok belsejét alacsony hőmérsékletű kvarkanyag tölti ki. A Tollman-Oppenheimer-Volkov egyenletet megoldva megvizsgáltuk a hibrid csillagok szerkezetét és feltételeket kaptunk a nehezebb (strange, charm, bottom, top) kvarkok megjelenésére, valamint a csillagok stabilitására [9]. Tanulmányainkba bevontuk a makroszkópikus méretű extra dimenziók megjelenésének vizsgálatát is [1,6]. Ezzel olyan területre tettünk kirándulást 2004-ben, amely az utóbbi egy esztendőben nagyon erős publicitást kapott, nevezetesen a QCD erős szektora és a string elmélet kapcsolatának, analógiáinak feltérképezése.

2005-ben Budapesten került megrendezésre a Quark Matter 2005 világkonferencia, ahol 600 résztvevő ismertette a nehézion fizika és az erősen kölcsönható anyag kutatásainak legújabb elméleti és kísérleti eredményeit (Zimányi J. volt a konferencia tiszteletbeli elnöke, Lévai P. az elnöke). Az esemény budapesti megrendezése az elmúlt években ezen a területen elért nemzetközi eredményeinknek is szólt [18,19].

2. Gluon-sajátenergia meghatározása Yang-Mills elméletben

[13, 20, 22, 23, 24, 34]

Az erősen kölcsönható kvark-gluon plazmában a tömeges kvázi-kvarkok mellett jóval nehezebb tömegű kvázi-gluonok megjelenését látjuk a kvázi-részecske modellekben. Ez felveti azt a kérdést, hogy a gluonok hogyan tesznek szert ekkora tömegre, egyáltalán mi történik a gluonok sajátenergiájával és miként határozhatjuk meg ezt az értéket térelméleti úton. Witten és Yaffe bizonyításra váró állítása szerint minden Yang-Mills térelméletben a tömegtelen gluonok kölcsönhatása egy tömeg-ugrás („mass-gap”) kialakulásához vezet. Nem-perturbatív módszereket alkalmazva ezt a kérdést zérus hőmérsékletű gluon-rendszerben vizsgáltuk és bizonyos feltételezések bevezetése mellett sikerült is a tömeg-ugrás értékét meghatároznunk [22, 23, 24, 34]. A tömeg-ugrás létezése befolyásolja a gluonok és a kvarkok bezárásáról alkotott nézeteinket is és új megközelítés bevezetését teszi lehetővé [22, 34]. Ezen eredmények fényében a nem-perturbatív vákum szerkezete is más megvilágításba kerül és így a kvark-gluon plazma állapotegyenletében szereplő vákumenergia tag („bag-konstans”) meghatározására is új lehetőség nyílik [13].

2005-ben „Quarks, hadrons, and the strong interactions” címmel nemzetközi workshopot rendeztünk Budapesten, amelyre a terület szakértői, köztük sok orosz és nyugat-európai kolléga ellátogattak és ismertették a legújabb elméleti eredményeket. Ezek az előadások nagy érdeklődésre tartottak számot a nehézion fizikával foglalkozó kollégák részéről is. A konferencia anyagát könyv formájában megjelentettük [20].

3. Partonok koaleszcenciája, mint hadronizációs folyamat

[3, 4, 12, 15, 17, 29]

Az erősen kölcsönható anyag kvázi-részecske képben történő leírása, a kvázi-kvarkok tömegének 300-350 MeV körüli értéke felkínálja annak a lehetőségét, hogy a hadronok additív kvark-modelljének sikerére hivatkozva a kvarkanyag hadronizációját a kvarkok és antikvarkok koaleszcenciáján keresztül írjuk le. Természetesen ez egy effektív modell, amely nagyon sok kérdést vet föl. Azonban a modell alkalmazásának sikere, a kísérleti eredmények reprodukálása a kvark-koaleszcenciás folyamatok elméleti tanulmányozását teszik szükségessé. Egyrészt továbbfejlesztettük a korábban létrehozott, az alacsony impulzus tartományban alkalmazott koaleszcencia modellünket, s alkalmaztuk azt a CERN SPS és RHIC energián mért kísérleti spektrumok elemzésére. Így meghatározhattuk a kvark fázisban létrejövő transzverzális áramlások nagyságának energiafüggését [12]. Másrészt bevontuk a nehéz bájos kvarkot is a koaleszcenciás vizsgálatokba és jóslatokat készítettünk a D mezon és a J/psi részecske momentum eloszlására különböző energiákon [17]. Megvizsgáltuk a nehezebb barion rezonanciák keletkezési hozamát is, különös tekintettel az eltérő paritású állapotokra [29]. Megkezdtük a kiszélesedett spektrál függvénnyel leírható tömeges kvarkok alkalmazását és fontos eredményeket kaptunk a könnyebb mezonok és barionok keletkezésének vizsgálata során [15].

Legfontosabb eredményeink a magasabb impulzus tartományban mért kísérleti eredmények, speciálisan a proton/pion hozam anomális megnövekedésének sikeres értelmezéséhez kapcsolódik. Kiderült, hogy a kvark-koaleszcencia, vagy másnéven kvark rekombináció a korábbi $p_T < 2-3$ GeV/c ablakon túl is domináns folyamat marad és a hadronok jelentős része egészen $p_T < 6-7$ GeV/c impulzusig ezen folyamattal keletkezik, s nem pedig a korábban tekintett, pQCD kereteiben leírt jet-fragmentációval [3,4].

4. Nukleáris effektusok proton-atommag ütközésekben

[2, 8, 10, 11, 30, 32, 35]

A nehézion ütközésekben megjelenő kollektív jelenségek, így a kvark-gluon plazma állapot megjelenésének pontos meghatározásához azoknak a nukleáris effektusoknak a pontos ismerete is szükséges, amelyek akkor is előfordulnak atommag ütközésekben, amikor nem alakul ki plazma állapot. Ilyenek az atommagokban fellépő nukleáris árnyékolás, a hideg maganyagon áthatoló partonok többszörös szóródása, valamint alapvető geometriai effektusok, amelyek az atommagok átfedéséhez kapcsolódnak. Ezeket a folyamatokat legtisztábban proton-atommag ütközésekben vizsgálhatjuk. Ebből a célból a RHIC-nél a deuterium-arany ütközéseket végzik kísérletileg. A kutatásaink egyik fő súlypontja a proton-proton, proton-atommag (dAu) és a periférikus atommag-atommag ütközések szisztematikus vizsgálata volt egy perturbatív QCD-t alkalmazó parton modellt felhasználva. Miután sikerült vezető (LO) és eggyel magasabb (NLO) rendben reprodukálnunk a proton-proton ütközésben keletkező pionok spektrumát, utána megvizsgáltuk RHIC energián a dAu ütközéseket és kvantitatíve meghatároztuk a nukleáris árnyékolás és többszörös szórás nagyságát [2]. Vizsgálatainkat kiterjesztettük a nagyobb rapiditás tartományok felé, s így széles tartományban letapogathattuk a nukleáris árnyékolási függvény nagyságát [8,10,11]. Létrehoztunk egy tág energiatartományban működő modellt, amellyel jóslatokat készíthettünk az LHC energián tervezett dPb ütközésekre [30]. Továbbá, így biztos alappal rendelkezünk a legintenzívebb, centrális Au+Au ütközések tanulmányozásához (lásd következő pont). Vizsgálataink során kiderült, hogy a centrális dAu ütközésekben olyan nagy részecske sűrűség jöhet létre, amely olyan végállapoti hatásokat eredményezhet, amiket eddig nem vettünk figyelembe. Ilyen például az indukált jet-energia veszteség. Megfigyelésünket a legújabb kísérleti eredmények is alátámasztották, ezért megkezdtük ezen jelenség részletes vizsgálatát [32, 35].

5. Jet-tomográfiai eljárás alkalmazása nehézion ütközésekben

[5, 7, 16, 28, 31]

A centrális nehézion ütközésekben létrejövő színes partonanyag sűrűségét a forró zónán áthaladó kvarkok és gluonok energiaveszteségének meghatározásán keresztül határozhatjuk meg. Ez az eljárás az ún. jet-tomográfia, amelynek kifejlesztésében korábban mi is részt vettünk. Miután rendelkezünk az előző pontban ismertetett és letesztelt pQCD-alapú parton modellel, amely sikeresen írja le a pp és pA ütközéseket, megkezdhettük a nehézion ütközések kísérleti eredményeinek szisztematikus elméleti vizsgálatát [5,7], kiterjesztve az analízist magasabb rapiditás tartományokra is [16]. Az AuAu és a CuCu ütközések elemzése megmutatta, hogy az energiaveszteség az ütközési térfogattól, egyben a résztvevő nukleonok számától függ, azaz egy térfogati effektusról van szó [31]. Ez azért fontos eredmény, mert több elemzés mellett érvelt, hogy a jet-energia veszteség egy felületi effektus, azaz annyira fekete a forró zóna közepe, hogy onnan semmi nem jön ki, csak a zóna felületéről származnak nagy energiás részecskék. Folytatjuk a jelenség vizsgálatát. Kiterjesztettük az analízist a pionokon túl a kaonokra is, így ellenőrizhetjük a jetek energia-veszteségére kapott korábbi eredményeink helyességét [28].

6. Di-hadron korrelációk vizsgálata proton-proton ütközésekben

[21, 27, 33, 37]

Az egy-részecske spektrumok részletes vizsgálatán túl a két-részecske korrelációk vizsgálata is fontos eredményekhez vezet, ha a részecske keltési mechanizmusokat akarjuk megérteni. Miután megjelentek az első idevágó kísérleti eredmények, kifejlesztettünk egy Monte-Carlo alapú modellt a hadron-hadron korrelációk vizsgálatára, a mérési eredmények kvantitatíve elemzésére. Jelenleg a proton-proton rendszerre érvényes a modellünk. Elemeztük az ISR és a RHIC energián kimért kísérleti korrelációs adatokat és meghatároztuk a fragmentációs kiszélesedés nagyságát [21,27]. Tanulmányoztuk a „back-to-back” korrelációt és meghatároztuk a p+p ütközésekben az ún. ’intrinsic- k_T ’ paraméter értékét, amely a 2-2 folyamatokon túlmutató, részben véletlen, részben korrelált részecskekeltési folyamatok nagyságáról tartalmaz információt [33, 37]. A következő lépés a dAu ütközésekben mért korrelációs függvények elemzése, amelyhez az eddigi számolásaink és modell alkotásaink megfelelő alapot nyújtanak. Ezekon a szisztematikus lépéseken keresztül juthatunk el a nehézion ütközésekben fellépő korrelációs adatok elemzéséhez.

7. Részecskekeltés időfüggő intenzív terekben

[14, 38]

A perturbatív-QCD alkalmazásán alapuló modelleken túl foglalkoztunk egyéb részecske keltési mechanizmusok vizsgálatával is. Így például feltételezhető, hogy a nehézion ütközések kezdeti pillanatában olyan erős chromo-elektromos és chromo-mágneses terek jönnek létre, hogy az intenzív térből fermion-antifermion illetve bozon-párok keletkeznek. Egy kinetikus párkeltési modellben megvizsgáltuk, hogy az erős terek intenzitásának időbeli változása miként befolyásolja a keletkezett részecskék eloszlását. A vizsgálatot elvégeztük erős ábeli terekre [14], majd megismételtük a számolásainkat SU(2) nem-ábeli tér kialakulása esetén is [38]. Azt az eredményt kaptuk mindkét esetben, hogy realiztikus időfejlődést feltételezve polinomiális transzverzális impulzus spektrum alakul ki a fermionokra, illetve a bozonokra. Ez azért érdekes, mert így nehéz elkülöníteni a pQCD által leírt jet-fragmentációs folyamatokban és a párkeltési folyamatokban keletkező részecskéket, azaz elképzelhető, hogy nagyon magas impulzusnál ez a két folyamat versengeni fog egymással. Megkezdjük az SU(3) terek vizsgálatát is, amely még realiztikusabb a kvarkok és a gluonok keletkezése szempontjából..

Az itt összefoglalt eredményeket értük el a kutatás négy éve alatt. Meggyőződésünk, hogy a kvantumszindinamikai effektusok nagyon fontos szerepet játszanak a nehézion ütközésekben részecske-keltési és hadronizációs folyamatok helyes leírásában. Ezért ezen jelenségek elméleti tanulmányozását folytatni kívánjuk. Amennyiben 2008-ban elindul a CERN LHC gyorsító, s az ALICE és a CMS kísérletek megkezdik a nehézion ütközések vizsgálatát az ultra-nagy ütközési energia tartományban, akkor a mérési adatok megértésében a QCD alkalmazásának szükségessége még erőteljesebben fog jelentkezni. A mellékelt beszámolóval azt is szerettük volna alátámasztani, hogy az MTA KFKI RMKI Elméleti Főosztályon rendelkezünk a szükséges elméleti háttérrel a közeljövőben megjelenő kísérleti adatok megértéséhez.