

Nagy energiasűrűségű állapotok kialakulásának elméleti vizsgálata nehézion-ütközésekben — a doktori értekezés tézisei —

Csizmadia Péter

1 Bevezetés

Az erős kölcsönhatás elmélete, a kvantumszíndinamika (QCD) nagy energiasűrűségeken az anyag egy “új” halmazzállapotának, a kvark-gluon plazmának (QGP) megjelenését jósolja. Az Univerzum barionos anyaga ebben a formában létezett az Osrobbanástól számított $15 - 20 \mu\text{s}$ -ig. A mai Univerzumban a neutroncsilagok magjában létezhet hideg, nagy sűrűségű kvarkanyag.

A kvark-hadron átalakulás (*confinement*) részletei a QCD téregyenletek megoldásának nehézségei miatt nem ismeretesek, így a kísérletek különleges jelentőséggel bírnak. A jelenség kísérleti vizsgálatára a neutroncsilagok, illetve az Univerzum korai állapotainak megfigyelésénél egyszerűbb lehetőséget nyújtanak azok a nagyenergiás nehézionütközetű kísérletek, amelyekben elérhető az átalakuláshoz szükséges kritikus energiasűrűség. Ilyen kísérleteket a CERN SPS és a BNL RHIC gyorsítókban végeznek, de a kvark-gluon plazma előállítása lesz az egyik fő kutatási terület a 2008-ban induló CERN LHC-ben is.

Elméleti oldalról a kvark-hadron átalakulás rács-QCD módszerekkel vagy fenomenologikus modellekkel közelíthető meg. Rács-QCD-ből megkaphatjuk az erősen kölcsönható anyag energiasűrűségét és nyomását, vagyis az állapotegyenleteket. Az állapotegyenlet ismeretében egyensúlyi hidrodinamikai módszerekkel már sikeresen írhatjuk le a nehézionütköz időfejlődését. A hidrodinamikai leírás lényeges tulajdonsága, hogy megadja a makroszkopikus mennyiségek téridőbeli eloszlását és a különböző folyamatok karakterisztikus idejét. Továbbá, a hidrodinamikai leírás időfejlődését visszafelé követve, megismérhetjük a korai állapotokat is. A hidrodinamikai leírásba jól beleilleszthető a QGP megjelenése és egyensúlyi hadronizációja, ezzét is aktív e terület kutatása.

A nehézionütközések részletes vizsgálata azonban rámutatott, hogy az egyensúly kialakulásához általában nem áll rendelkezésre elegendő idő, ezért indokolt a kvark-hadron fázisállapotnak nemegysúlyi leírása. A hadronizáció térelméleti modellzése mellett (lásd pl. Nambu-Jona-Lasinio modell) egy másik lehetőség a kvarkok kvantummechanikai koaleszcenciájának feltételezése és vizsgálata. Az ily módon megalapozott nemegysúlyi leírásokra példa, az általam kifejlesztett MICOR (Microscopic Coalescence Rehadronization) modell.

A kvark koaleszcenciával leírt hadronizáció kezdőállapota tömeges kvarkokból és antikvarkokból álló plazma, melynek megjelenését a fázisátalakuláshoz közelí hőmérőkletéken rácس-QCD eredmények támasztják alá. A hadronizáció végállapota szintelen "prehadronokból" álló gáz. Az alkalmazott mikroszkopikus koaleszcencia mechanizmus off-shell hadronok és hadron rezonanciák keletkezéséhez vezet. E részecskék koaleszcenciafolyamattal kapott spektrálfüggvénye nagyon közel van az ismert rezonanciákat leíró Breit-Wigner eloszlásokhoz. A MICOR által generált rezonanciagázból bomlásokkal keletkeznek a kísérletileg detektálható, stabil részecskék. Ha elhanyagoljuk a másodlagos kölcsönhatásokat, akkor megjósolhatjuk a végállapotú hadronok momentumspektrumát. A modell paramétereinek megállapításához tehát érdemes rövid élettartamú, kis kölcsönhatási hatáskeresztmetszettel rendelkező részecskékre illeszteni. Ere példa a csak ritka kvarkokból álló ϕ mezon és Ω barión. Érdekes kérdés továbbá, hogy a nehezebb kvarkokból álló, kis intenzitással kölcsönható bájós hadronok (pl. D és J/ψ) keletkezése és impulzuseloszlása leírható-e a kvark koaleszcencia feltételezésével.

Várható, hogy a hosszabb élettartamú és intenzívben kölcsönható részecskék (pl. pionok és nukleonok) impulzuseloszlásának realiztikus leírásához a másodlagos kölcsönhatások figyelembe vétele is szükséges. Erre a feladatra általánosan alkalmazott módszer a hadronok kölcsönhatásait leíró Boltzmann-egyenlet numerikus megoldása. Nehéziontűközések transzport modellekkel történő leírására több hadron- illetve partonkaszakad létezik. Ezek a programok azonban speciális esetekre vannak kifejlesztve, működésük pedig nehézen áttekinthető, a szerzőn kívül bárki más csak fekete dobozként használhatja őket (lásd pl. RQMD). Ez a problémám a jelenleg létező kódokkal természetesen nem egyedi, általános igény van egy olyan programra, amely könnyen bővíthető és tetszőleges transzport modell szimulációjára alkalmás, akár hadron-, akár partonszinten.

Egy ilyen univerzális kód kifejlesztéséhez több problémát is meg kell oldani. Az egyik ilyen probléma a kaszkád algoritmus Lorentz-invariánsjának biztosítása. Az invariancia-sértés oka az, hogy a kaszkád algoritmusban a részecskék világvonalon helyett egy hatáskeresztmetszettel függő sugarú "világcsövet" futnak be, amely a sugar zérustól különböző volta miatt több más részcskét is érinthet egymástól térszerűen szeparált pontokban. Ekkor vonatkoztatási rendszertől függ, hogy időben melyik esemény következik be először, vagyis hogy a több lehetséges kölcsönhatás közül melyik az az egy, amelyet figyelembe kell vennünk. A szimuláció tehát különböző eredményt adhat, ha ugyanazonként a kezdőfeltételekkel, de egy másik vonatkoztatási rendszerben végezzük többsége a Lorentz invarianciasértést figyelmen kívül hagyja. A közreműködésemmel kifejlesztésre kerülő kódnak ezt a problémát is kezelnie kellett.

A másik fő probléma a hadronizációs leírás (esetünkben a MICOR modell) és a másodlagos hadron-hadron kölcsönhatásokat kezelő kaszkád kód (GROMIT) együttes alkalmazása; a kezdeti kvarkanyag tulajdonságainak meghatározása a kísérletileg is mért végállapotú hadronspektrumokból.

2 Alkalmazott módszerek

1. Jüttner-eloszlás, longitudinális Björken áramlás, konstans transzverzállis áramlás és a kétrészeske-koaleszcencia leírására alkalmazott ún. “pick-up” reakció hatáskeresztzettsének feltételezésével meghatároztam az összszett részecské keletkezésének teljes illetve impulzusfüggő rátáját, egy fázisérbeli eloszlásfüggvényeket tartalmazó integrál formájában.
2. Az integrálokat Monte Carlo szimulációval számítottam ki, melyet a saját készítésű C++ programmal végeztem.
3. A másodlagos kölcsönhatások szimulációját a Boltzmann-egyenletek egy numerikus megoldási módszerével, a kaszkád algoritmussal végeztem el.
4. Tanulmányoztam a kaszrád nemlokálitásából származó Lorentz-invariancia-sértés korrigálására bevezetett részecskefelosztás (λ paraméter) hatását a spektrumokra.
5. A kaszkádpogram alapstruktúráját, illetve több kölcsönhatást, analízis rutint és egyéb modulokat írtam meg. Pl. rezonancia-formációs csatorna, melyben a bejövő részecskék között is lehet rezonancia, nukleon-nukleon és nukleon-kaon hatáskeresztmetszetek, spektrumokat tartalmazó hisztogrammok, kölcsönhatások számlálása és nyomokkövetése inelasztikus esetekben is, stb.
6. A momentumspektrumokra történő görbeillesztések automatizálásának lehetővé tétele érdekében külön programot írtam.

3 Eredmények

Az e dolgozatban ismeretett munkám az alábbi eredményekhez vezetett.

1. Nehéziontűközésekben keletkező anyag téridőbeli fejlődésének hidrodinamikai leírását vizsgáltam; a tüzgömbök tágnálásának leírására feltételezett új típusú megoldásunkban kiszámoltam a táglást jellemző skálafaktort, valamint az entropia értékét [1]. A hidrodinamikai egyenletek ezen új megoldásának több nehézionfizikai alkalmazása lehetséges.
2. Kifejlesztettem egy nem-egyensúlyi modellt a nehéziontűközésekben keletkező kvarkanyag hadronanyaggá történő visszaalakulásának leírására (MICOR), melynek jósolatait összehasonlítottam más modellekkel is [2]. A modell paramétereinek a ϕ és Ω részecskék impulsusspektrumára való illesztésével a kísérlettel egyező joslatot kaptam a ρ mezónra is [3]. A hosszú életű, nagy kölcsönhatási hatáskeresztmetszettel rendelkező részecskék (pl. a nukleonok) leírásához azonban szükségesnek bizonyult a másodlagos kölcsönhatások szimulációja is. A modell megpróbáltam alkalmazni a bájos mezonok (D , J/ψ) keletkezésének leírására is. Kiderült, hogy ebben az esetben nem tételezhető fel egységes, minden kvark típust

magába foglaló kollektív áramlási; a nehéz, bájos kvarkok "emaradnak" a könnnyű és a ritka kvarkoktól [4].

3. A hadronok közötti másodlagos kölcsönhatásokat leíró Boltzmann-egyenlet numerikus megoldására részecskeaszkád programot fejlesztettem [5, 6, 7], amely azonban jóval általánosabb az általam vizsgált problémánál. Tetszőleges transzport modell szimulálható vele, partonkaszakkádként is használható, továbbá támogatja a Lorentz-invariancia-sértés korrekciójára szolgáló részecskefelosztásos módszert. A GROMIT program segítségével az alábbi problémákat oldottam meg:

- A "pionszel problémának" nevezett gondolatkísérlet vizsgálata során azt az eredményt kaptam, hogy nagy hatáskeresztmetszetek illetve nagy kezdeti sűrűség esetén a részecskék végső momentumspektrumai erősen függnek a λ részecskefelosztástól. Konstans 40 mb hatáskeresztmetszetekkel számolva, a naiv $\lambda = 1$ esetben a nukleonok transzverzális impulzusspektrumának inverz meredeksége kb. 20%-kal kisebb, mint amennyit a Boltzmann egyenlet egzakt megoldásával, vagyis a Lorentz-invariáns határesetben kapnánk. A $\lambda = 16$ eset viszont már jó közelítésekre vehető.
- A MICOR hadronizációs modell által adott rezonanciagáz másodlagos kölcsönhatásainak szimulációja. A fő eredmény itt az, hogy a koaleszcencia modell a hadronok egymás közötti kölcsönhatásaival kiegészítve a pion és a proton spektrumát is jól leírja. Egy lényeges részeredmény pedig a részecskefelosztásra vonatkozik. A kvark koaleszcenciával keltett rezonanciagázban az ütközések elég ritkák, illetve a legtöbb kölcsönhatás hatáskeresztmetszete elég kicsi ahhoz, hogy a kaszkád algoritmus Lorentz-invariancia-sértése elhanyagolható legyen. Részecskefelosztás alkalmazására, így ebben a problémában nincs szükség.
- Partonok energiaveszteségeinek vizsgálata RHIC Au+Au ütközésekben, $\sqrt{s_{NN}} = 130 \text{ GeV}$ energián. Ebben a problémában a kvarkok és gluonok közötti $2 \leftrightarrow 2$ szórási és $2 \rightarrow 2 + \text{végállapot} \text{ sugárzási}$ folyamatok lettek figyelembe véve. E folyamatok következetében a részecskék momentumeloszlása, megváltozik, csökken a nagy impulzusú komponens ("quenching"). A hatáskeresztmetszetektől függő mértékben csökken a transzverzális energia is. Két különböző hadronizációs mechanizmust tekintettünk, melyek eltérően befolyásolják a végállapot hadronelezést. Eredményül azt kaptuk, hogy a Lund string fragmentációs modell használata nagyobb parton hatáskeresztmetszeteket igényel a kísérleti π^0 spektrum reprodukálásához, mint a független fragmentációs modell [7].

Ezen vizsgálatokat az RTTC együttműködés (RHIC Transport Theory Collaboration) tagjaként végeztem. Célunk az, hogy az általunk kifejlesztett univerzális kód felhasználásával transzport modellekkel fejlesszünk ki nagyenergiás nehézioniumtűzök leírására.

Referált folyóiratban megjelent cikkeim

- [1] P. Csizmadia, T. Csörgő, B. Lukács: *New analytic solutions of the non-relativistic hydrodynamical equations*, Phys. Lett. **B443** (1998) 21-25
- [2] P. Csizmadia, P. Lévai, S. E. Vance, T. S. Biró, M. Gyulassy, J. Zimányi: *Strange hyperon and antihyperon production from quark and string-rope matter*, J. Phys. **G25** (1999) 321-330
- [3] P. Csizmadia, P. Lévai: *ϕ , Ω and ρ production from deconfined matter in relativistic heavy ion collisions at CERN SPS*, Phys. Rev. **C61** (2000) 031903
- [4] P. Lévai, T. S. Biró, P. Csizmadia, T. Csörgő, J. Zimányi: *The production of charm mesons from quark matter at CERN SPS and RHIC*, J. Phys. **G27** (2001) 703-706
- [5] P. Csizmadia and P. Lévai, *The MICOR hadronization model with final state interactions*, J. Phys. **G28** (2002) 1997-2000
- [6] S. Cheng, S. Pratt, P. Csizmadia, Y. Nara, D. Molnár, M. Gyulassy, S. E. Vance, B. Zhang: *The effect of finite-range interactions in classical transport theory*, Phys. Rev. **C65** (2002) 024901
- [7] Y. Nara, S. E. Vance, P. Csizmadia, *A study of parton energy loss in Au+Au collisions at RHIC using transport theory*, Phys. Lett. **B531** (2002) 209-215

