

# 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” halmazállapotának, a kvark-gluon plazmának (QGP) megjelenését jósolja. Az Univerzum barionos anyaga ebben a formában létezett az Ősrobbanástól számított  $15 - 20 \mu\text{s}$ -ig. A mai Univerzumban a neutroncsillagok 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 neutroncsillagok, illetve az Univerzum korai állapotainak megfigyelésénél egyszerűbb lehetőséget nyújtanak azok a nagyenergiás nehézion-ütköztető kísérletek, amelyekben elérhető az átalakuláshoz szükséges kritikus energiasűrűség. Ilyen kísérleteket a CERN SPS és a BNL RHIC gyorsítóknál végeznek, de a kvark-gluon plazma előállítására 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 állapotegyenletet. Az állapotegyenlet ismeretében egyensúlyi hidrodinamikai módszerekkel már sikeresen írhatjuk le a nehézion-ütközés időfejlődését. A hidrodinamikai leírás lényeges tulajdonsága, hogy megadja a makroszkopikus mennyiségek tér-időbeli eloszlását és a különböző folyamatok karakterisztikus idejét. Továbbá, a hidrodinamikai leírás időfejlődését visszafelé követve, megismerhetjük a korai állapotokat is. A hidrodinamikai leírásba jól beleilleszthető a QGP megjelenése és egyensúlyi hadronizációja, ezért is aktív e terület kutatása.

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

A kvark koaleszcenciával leírt hadronizáció kezdőállapota tömeges kvarkokból és antikvarkokból álló plazma, melynek megjelenését a fázisátalakuláshoz közeli hőmérsékleteken rács-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 végállapoti hadronok momentumspektrumát. A modell paramétereinek megállapításához tehát érdemes rövid élettartamú, kis kölcsönhatási hatáskeresztmetszettel rendelkező részecskékre illeszteni. Erre példa a csak ritka kvarkokból álló  $\phi$  mezon és  $\Omega$  barion. Érdekes kérdés továbbá, hogy a nehezebb kvarkokból álló, kis intenzitással kölcsönható bájos hadronok (pl.  $D$  és  $J/\psi$ ) keletkezése és impulzuseloszlása leírható-e a kvark koaleszcencia feltételezésével.

Várható, hogy a hosszabb élettartamú és intenzívebben 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. Nehézionütközések transzport modellekkel történő leírására több hadron- illetve partonkaszád létezik. Ezek a programok azonban speciális esetekre vannak kifejlesztve, működésük pedig nehezen 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 alkalmas, akár hadron-, akár partonszinten.

Egy ilyen univerzális kód kifejlesztéséhez több problémát is meg kell oldani. Az egyik ilyen probléma a kaszkád algoritmus Lorentz-invarianciájának biztosítása. Az invariancia-sértés oka az, hogy a kaszkád algoritmusban a részecskék világvonal helyett egy hatáskeresztmetszettől függő sugarú “világcsövet” futnak be, amely a sugár zérustól különböző volta miatt több más részecskét 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 ugyanazokkal a kezdőfeltételekkel, de egy másik vonatkoztatási rendszerben végezzük el. A nagyenergiás nehézionütközéseket modellező hadron- és partonkaszádok többsége a Lorentz invarianciasértést figyelmen kívül hagyja. A közreműködéssel 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 végállapoti hadronspektrumokból.

## 2 Alkalmazott módszerek

1. Jüttner-eloszlás, longitudinális Björken áramlás, konstans transzverzális áramlás és a kétrészecske-koaleszcencia leírására alkalmazott ún. “pick-up” reakció hatáskeresztettségének feltételezésével meghatároztam az összetett részecske keletkezésének teljes illetve impulzusfüggő rátáját, egy fázistérbeli 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 kaszkád nemlokálisából származó Lorentz-invariancia-sértés korrigálására bevezetett részecskefelosztás ( $\lambda$  paraméter) hatását a spektrumokra.
5. A kaszkádprogram alapstrukturáját, 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 histogrammok, kölcsönhatások számlálása és nyomonkövetése inelasztikus esetekben is, stb.
6. A momentumspektrumokra történő görbeillesztések automatizálásának lehetővé tétele érdekében külön programot írtam.

## 3 Eredmények

Az e dolgozatban ismertetett munkám az alábbi eredményekhez vezetett.

1. Nehézionütközésekben keletkező anyag téridőbeli fejlődésének hidrodinamikai leírását vizsgáltam; a tűzgömbök tágulásának leírására feltételezett új típusú megoldásunkban kiszámoltam a tágulást jellemző skálafaktort, valamint az entrópia értékét [1]. A hidrodinamikai egyenletek ezen új megoldásának több nehézionfizikai alkalmazása lehetséges.
2. Kifejlesztettem egy nem-egyensúlyi modellt a nehézionütközésekben keletkező kvarkanyag hadronanyaggá történő visszaalakulásának leírására (MICOR), melynek jóslatait összehasonlítottam más modellekkel is [2]. A modell paramétereknek a  $\phi$  és  $\Omega$  részecskék impulzusspektrumára való illesztésével a kísérlettel egyező jóslatot kaptam a  $\rho$  mezonra is [3]. A hosszú életű, nagy kölcsönhatási hatáskeresztmetszettel rendelkező részecskék (pl. a nukleonok) leírásához azonban szükségesnek bizonyult a másodlagos kölcsönhatások szimulációja is. A modellt megpróbáltam alkalmazni a bájos mezonok ( $D$ ,  $J/\psi$ ) keletkezésének leírására is. Kiderült, hogy ebben az esetben nem tételezhető fel egységes, minden kvark típust

magába foglaló kollektív áramlás; a nehéz, bájos kvarkok “lemeradnak” a könnyű és a ritka kvarkoktól [4].

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

- A “pionszél problémának” nevezett gondolat kísérlet vizsgálata során azt az eredményt kaptam, hogy nagy hatáskeresztmetszetek illetve nagy kezdeti sűrűség esetén a részecskék végső momentumspektruma erősen függnék a  $\lambda$  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 vizsont már jó közelítésnek 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 energiavesztésének vizsgálata RHIC Au+Au ütközésekben,  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV energián. Ebben a problémában a kvarkok és gluonok közötti  $2 \leftrightarrow 2$  szórás és  $2 \rightarrow 2 + \text{végállapot}$  sugárzási folyamatok lettek figyelembe véve. E folyamatok következtében a részecskék momentumeloszlása megváltozik, csökken a nagy impulzusú komponens (“quenching”). A hatáskeresztmetszetektől függő mértékben csökkenni fog a transzverzális energia is. Két különböző hadronizációs mechanizmust tekintettünk, melyek eltérően befolyásolják a végállapot hadroneloszlást. Eredményül azt kaptuk, hogy a Lund string fragmentációs modell használata nagyobb parton hatáskeresztmetszeteket igényel a kísérleti  $\pi^0$  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 modelleket fejlesszünk ki nagyenergiás nehézionütközések leírására.

## Referált folyóiratban megjelent cikkek

- [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:  *$\phi$ ,  $\Omega$  and  $\rho$  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