

PhD kutatási beszámoló (2018/2019 1. félév)

Részecskefizika és csillagászat képzési program

## A tűzgömb hidrodinamika új egzakt megoldásainak keresése és az LHC és a RHIC gyorsító mérési adatainak értelmezése

Kasza Gábor

Témavezetők: Csanád Máté, Csörgő Tamás

2019. január 20.

### 1. Bevezetés, kutatási előzmények

A 2000-es évek első felében a RHIC mérései kimutatták, a 2010-es években pedig az LHC kísérletei megerősítették, hogy a nagyenergiás nehézion-ütközésekben, megfelelő körülmények között, létrejöhethet a kvark-gluon plazma (QGP). A RHIC gyorsító négy kísérletének az eredményei igazolták, hogy a QGP tulajdonságainak jelentős része nem írható le a kvantum-színdinamika perturbatív tárgyalásmódjában, illetve a szabad úthossz nem a végtelenhez, hanem a nullához tart ebben az anyagban, amely nem ideális gázként, hanem közel tökéletes kvarkfolyadéként viselkedik.

Kutatásaim fő célja új egzakt és analitikus, relativisztikus hidrodinamikai megoldások keresése, melyek lehetővé teszik a nagyenergiás nehézion-ütközésekben mérhető, hadronikus mennyiségek leírását. Ennek része a rács-QCD állapotegyenlet alkalmazása és további realiztikus, akár forgó egzakt megoldások feltárása is.

A PhD tanulmányaimat megelőző kutatásaim során MSc témavezetőm, valamint Csanád Máté és ZeFang Jiang segítségével egy 10 éve megoldatlan problémának sikerült a végére járunk: az úgynevezett CNC (azaz Csörgő-Nagy-Csanád) egzakt, gyorsuló, 1+1 dimenziós relativisztikus hidrodinamikai megoldás [1] tetszőleges  $\lambda$  gyorsulási paraméter esetére csak speciális, szuper-kemény állapotegyenlettel ismert, ami a kísérleti tapasztalatokat figyelembe véve nem tekinthető realiztikusnak. Ezt a megoldást általánosítottuk tetszőleges, de a hőmérséklettől független, átlagos értékű hangsebességek esetére. Az új megoldást a Universe nevű szakfolyóiratban publikáltuk [2], az alkalmazásairól készült kéziratok jelenleg megjelenés alatt állnak, de preprint formában már elérhetőek [3, 4, 5]. Ezek tekinthetőek a PhD kutatásaimhoz kapcsolódó első publikációknak.

A PhD kutatásaim során az újonnan talált relativisztikus megoldásunk további általánosítására tö-

rekszem. Több lehetőség is adott. Egyik legfontosabb feladatokat képezi, hogy általánosítsam a megoldást hőmérsékletfüggő hangsebességek esetére. Ez lehetővé tenné, hogy a rács QCD állapotegyenlet bevezetésével elemezzük a tűzgömb hidrodinamikai evolúcióját. Az új megoldásunk további általánosításra szorul a tágulás dimenzióját illetően, hiszen jelenleg 1+1 dimenzióban táguló rendszert ír le, így a 1+3 dimenzióra való kiterjesztés lehetőségét is megvizsgáljuk. Továbbá egy új, alapvetően fontosnak tűnő kérdésre is bukkantunk a legutóbbi eredményeink alapján: a RHIC  $\sqrt{s_{NN}}=130$  GeV és 200 GeV energiájú Au+Au reakcióinak kezdeti energiasűrűségének összevetése alapján a modellünk nem-monoton viselkedést jósol az ütközési energia függvényében, ami akár egy kritikus viselkedésre utaló jel is lehet. Ennek részletei a beszámoló következő fejezetében olvashatóak.

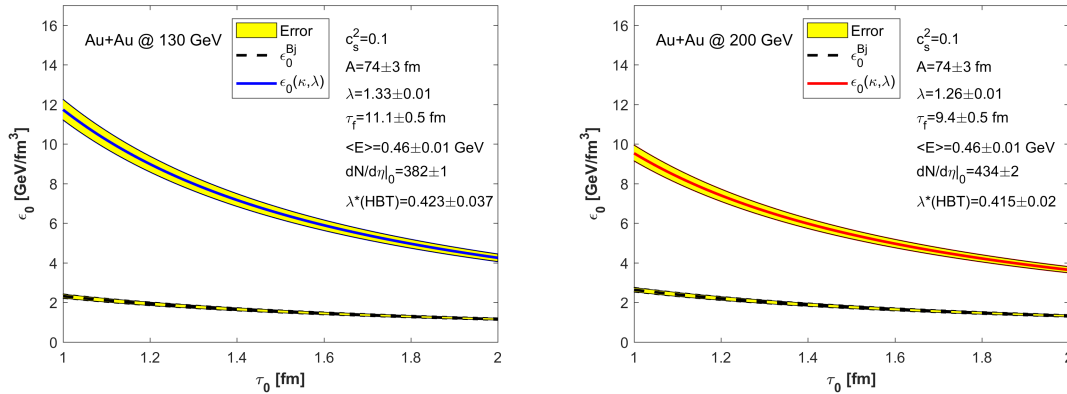
## 2. Az aktuális félévben elvégzett kutatások

Ebben a félévben az előző fejezetben említett új, gyorsuló megoldásunk alkalmazásán dolgoztam. Fő célkitűzésünket képezte, hogy az új megoldással megbecsüljem a nehézion-ütközések során keletkező közeg kezdeti, termalizált energiasűrűségét a kezdeti sajátidő ( $\tau_0$ ) függvényeként. Ennek fő motívációja, hogy a kísérleti adatokból egyértelműen kiderül, hogy a hadronok pszeudorapiditás-eloszlása véges integrállal rendelkezik, és így a hidrodinamikán belül csak gyorsuló megoldások segítségével írható le, ezért nem illeszthető a Hwa-Bjorken boost-invariáns megoldással. Viszont a széles körben használt Bjorken féle kezdeti energiasűrűség becslés ezt a megoldást feltételezi [8], tehát a becslést mindenképpen korrigálni kell. A kezdeti energiasűrűség kísérleti adatokból való meghatározására kidolgoztunk egy módszert, melynek 3 fő lépésének elméleti hátterét már korábban publikáltuk, és az alábbi módon foglalhatjuk össze:

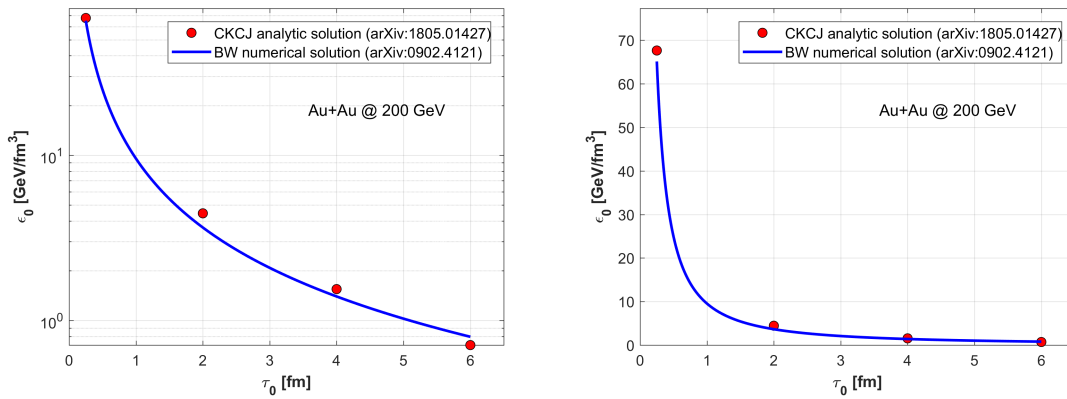
- A pszeudorapiditás eloszlás illesztéséből megadható az gyorsulási paraméter ( $\lambda$ ), a pszeudorapiditás sűrűség a midrapiditásnál ( $dN/d\eta|_{\eta=0}$ ), és az átlagos transzverz tömeg ( $\langle m_T \rangle$ ). [3]
- A longitudinális HBT-sugár  $m_T$  függésének illesztéséből kiszámítható a végállapothoz tartozó sajátidő, vagyis a kifogyási sajátidő ( $\tau_f$ ). [5]
- A kezdeti energiasűrűség  $\langle m_T \rangle$ ,  $dN/d\eta|_{\eta=0}$  és  $\tau_f$  ismeretében tetszőleges  $\tau_0$ -ra megadható. [4]

Az ismertetett módszert egyelőre csak RHIC energiákon teszteltünk, nevezetesen  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV és  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV ütközési energiájú Au+Au reakciókkal dolgoztunk. Az eredmény eltért a várakozásoktól, ahogy azt az 1. ábra is szemlélteti. Látható, hogy a módszerünk alacsonyabb ütközési energiára magasabb kezdeti energiasűrűséget jósol. Természetesen a kapott eredményt több aspektusból is még meg kell vizsgálnunk. Első lépésben összevetettük a  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV-es kezdeti energiasűrűség becslésünket egy numerikus, 1+3 dimenziós hidrodinamikai számítással [7]. A két különböző módszer meglepően azonos eredményre vezet (ahogy azt a 2. ábra is mutatja), így a kidolgozott

módszerünk helyessége megerősítésre került. Ám mindenképpen meg kell ismételnünk az analízist nagyobb ütközési energia-tartományon is, kezdve az LHC által létrehozott nehézion-ütközésekkel. Továbbá figyelembe kell vennünk a modellünk hiányosságait, így a közeljövőben szeretnénk kiterjeszteni a megoldásunkat nagyobb rapiditásoknál fellépő lökéshullámokra, illetve hőmérsékletfüggő hangsebességre, ami lehetővé tenné a rács QCD állapotegyenletének használatát. Ezen felül meg fogjuk vizsgálni az 1+3 dimenzióra történő általánosítás lehetőségét.



1. ábra. Kezdeti energiasűrűség becslés: a folytonos vonal az új megoldásunkból kapott eredmény, amelyet a szaggatott vonallal jelzett Bjorken becsléshez hasonlítunk. Az analízist a RHIC Au+Au ütközésein végeztük, két ütközési energián:  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV (balra) és  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV (jobbra).



2. ábra. Az új megoldásunkból származtatott kezdeti energiasűrűség becslés (folytonos vonal) és egy numerikus számolás (piros pontok) összevetése  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV esetén. Az összevetés balra logaritmus skálán, jobbra normál skálán látható.

### 3. Publikációk

A félév során két kéziratot tettünk közzé preprint formában. Az egyik az Acta Physica Polonica B proceedings kötetben fog megjelenni, a másik jelenleg referálás alatt áll a Universe folyóiratnál:

- G. Kasza, T. Csörgő: *Lifetime estimations from RHIC Au+Au data*, Universe Preprint verzió: arXiv:1811.09990 [nucl-th]
- T. Csörgő, G. Kasza: *A new and finite family of solutions of hydrodynamics: Part III: Advanced estimate of the life-time parameter*, Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement Preprint verzió: arXiv:1810.00154 [nucl-th]

## 4. Tanulmányi tevékenység

A félév során egy, a szakterületemhez kapcsolódó kurzuson vettem részt:

- Nagyenergiás nehézionfizika, avagy a tökéletes kvarkfolyadék

## 5. Konferenciák

A félév során két nemzetközi konferencián vettem részt, ahol angol nyelvű előadásokat tartottam:

- 4th Day of Femtoscopy, Gyöngyös, 2018. október 30.  
A konferencia honlapja: <https://indico.cern.ch/event/762864/>
- Zimányi School'18: Winter Workshop on Heavy Ion Physics, Budapest, 2018. december 3-7.  
A konferencia honlapja: <http://zimanyischool.kfki.hu/18/>

## Hivatkozások

- [1] M. I. Nagy, T. Csörgő and M. Csanád, Phys. Rev. C **77** (2008) 024908 arXiv:0709.3677 [nucl-th].
- [2] T. Csörgő, G. Kasza, M. Csanád and Z. Jiang, Universe **4** (2018) 69 arXiv:1805.01427 [nucl-th].
- [3] T. Csörgő, G. Kasza, M. Csanád and Z. F. Jiang, Acta Physica Polonica B, arXiv:1806.06794 [nucl-th]. (accepted for publication)
- [4] G. Kasza and T. Csörgő, Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement, arXiv:1806.11309 [nucl-th]. (article in press)
- [5] T. Csörgő and G. Kasza, Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement, arXiv:1810.00154 [nucl-th]. (article in press)
- [6] G. Kasza and T. Csörgő, arXiv:1811.09990 [nucl-th].
- [7] P. Bozek and I. Wyskiel, Phys. Rev. C **79** (2009) 044916 arXiv:0902.4121 [nucl-th].
- [8] J. D. Bjorken, Phys. Rev. D **27**, 140 (1983).