

PhD kutatási beszámoló (2018/2019 2. 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. június 14.

## 1. Bevezetés

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, létrejöhét 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 realisztikus, akár forgó egzakt megoldások feltárása is.

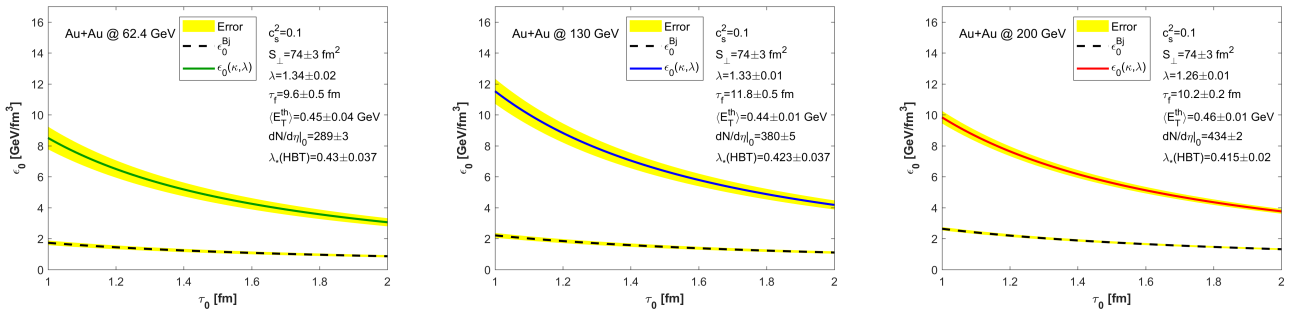
## 2. Kutatási előzmények

Az előző félévben kidolgoztunk egy módszert, amely lehetővé teszi, hogy az általunk, nemrégiben talált relativisztikus, analitikus hidrodinamikai megoldással [1, 2], kísérleti adatokra alapozva megbecsüljem a nehézion-ütközések során keletkező közeg kezdeti, termalizált energiasűrűségét a kezdeti sajátidő ( $\tau_0$ ) függvényeként. Ennek fő motivációja, hogy Bjorken széles körben elfogadott kezdeti energiasűrűség becslése a Hwa-Bjorken boost-invariáns megoldást feltételezi [3], melynek formuláival nem illeszthető a részecskék pszeudorapiditás eloszlása, hiszen a kísérleti adatok szerint az egyértelműen véges integrállal rendelkezik. A kezdeti energiasűrűség becslésére kidolgozott módszerünket az

előző félèves jelentésemben részletesen ismertettem. Az eljárást RHIC energiákon teszteltünk, nevezetesen  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV és 200 GeV ütközési energiájú Au+Au reakciókkal dolgoztunk. Az  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV energiához kapcsolódó analízis eredményét összevetettük egy 1+3 dimenziós, numerikus hidrodinamikai számolással [4], és számunkra is meglepő egyezést mutattak, ezzel megerősítve a kidolgozott módszerünk helyességét. Ezen felül meghökkentő eredményre bukkantunk, nevezetesen 130 GeV-en a kezdeti energiasűrűséget hibán kívül magasabbra becsültük, mint a 200 GeV-es reakció esetében, amely arra enged következtetni, hogy a kezdeti energiasűrűség nem-monoton viselkedést mutat az ütközési energia függvényében. Erre utaló jeleket később más publikált írásban is találtunk [5], de azok nem foglalkoztak a jelenséggel. Ebben a félévben az imént leírtakat több új fejleménnyel tudtam bővíteni, melyeknek egy részét preprint formájában már közzé tettünk és az írásunk jelenleg referálás alatt áll az IJMPA folyóiratban. A főbb eredményeinket a következő részben összefoglalom.

### 3. Az aktuális félévben elvégzett kutatások

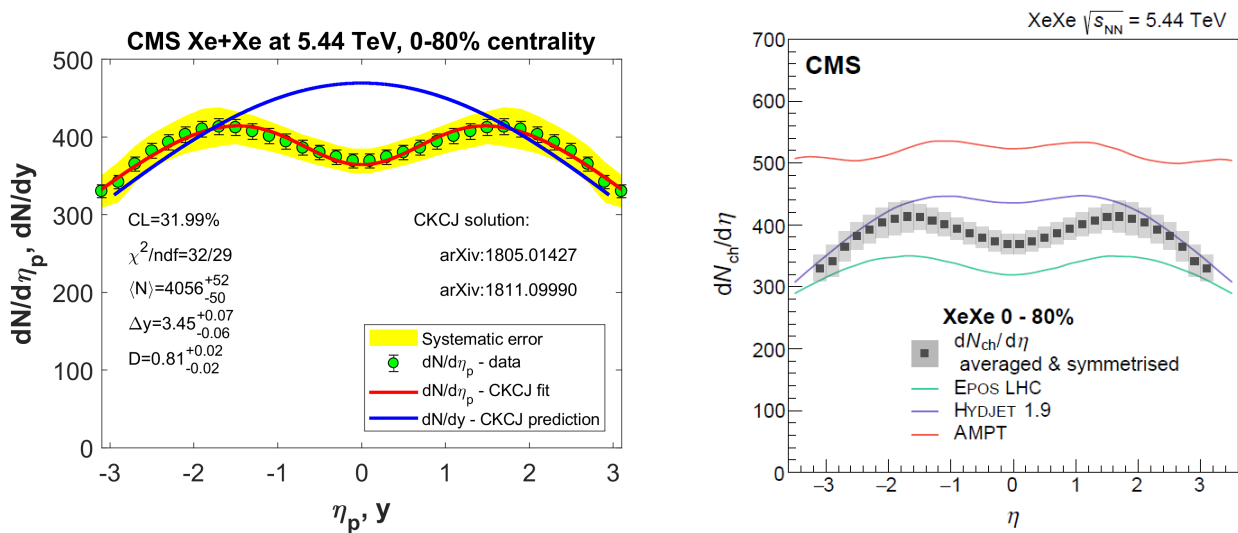
Az előző félévben RHIC,  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  és 200 GeV-es arany-arany reakciókkal végzett munkámat idén a 62.4 GeV-es arany-arany ütközések elemzésével folytattam. Az analízis eredményét az 1. ábra szemlélteti. Látható, hogy a módszerünk  $\sqrt{s_{NN}}=62.4$  GeV-en alacsonyabb kezdeti energiasűrűséget jósol, mint a korábban megvizsgált, magasabb ütközési energiák esetében. Ebből előzetesen arra következtethetünk, hogy a kezdeti energiasűrűség egy lokális maximummal rendelkezik az  $\sqrt{s_{NN}}$  62.4 GeV-től 200 GeV-ig terjedő intervallumban.



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 ütközéseink végeztük. A legfrissebb munkánk, a  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  GeV-es reakciók vizsgálatának végeredménye balra látható.

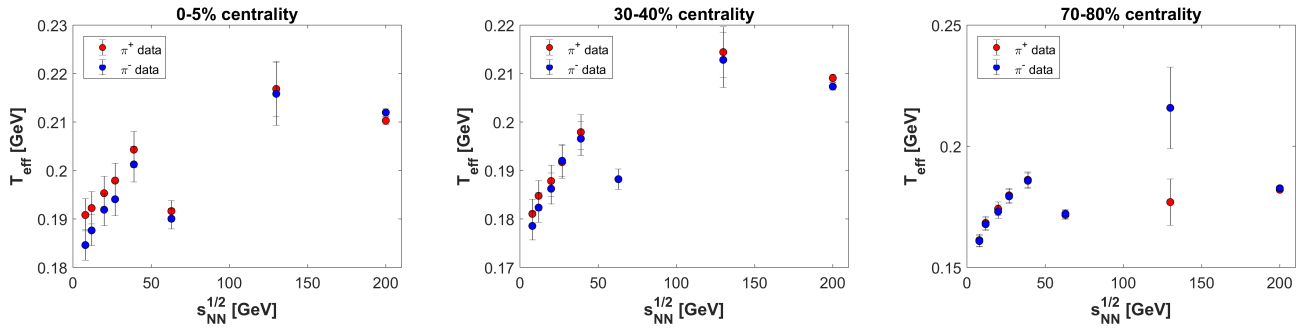
A félév folyamán sikerült egyszerűsíteni a hidrodinamikai megoldásunkból származtatott pszeudorapiditás eloszlást leíró bonyolult, parametrikus formulát. Az új képletnek hamar megmutatkozott a szépsége és hasznossága egyaránt. Az eredeti, parametrikus görbe 4 illeszthető paramétere az új formulában 3-ra redukálódik, amelyek a korábbi 4 paraméter kombinációi. Ez egy gyönyörű meg-

nyilvánulása a hidrodinamikai skálaviselkedésnek. Ezt, az egyszerűsített képletet teszteltük is számos mérésen (CMS p+p, 7, 8, 13 TeV; CMS Xe+Xe, 5.44 TeV; PHOBOS Au+Au, 20, 62.4, 130, 200 GeV; ALICE Pb+Pb, 5.02 TeV), és az új formula kevesebb paraméterrel, szinte tökéletes leírását adja az adatoknak. Különösen fontos eredményként tekintünk a Xe+Xe adatok elfogadható (CL=32%) leírására, mivel a [6] alapján legjobb tudomásunk szerint numerikus hidrodinamikai szimulációkkal még nem tudták leírni a szóban forgó reakció pszeudorapiditás eloszlását.



2. ábra. Balra: a megoldásunkból származtatott három-paraméteres formula illesztése (piros görbe) a CMS kísérlet Xe+Xe 5.44 TeV-es, 0-80% centralitású ütközéseiből mért pszeudorapiditás eloszlásra. Az ábrára szemléltetés céljából a rapiditás sűrűséget is ábrázoltuk kék vonallal. Jobbra: a CMS kollaboráció által közölt [6] ábra, melyen jól látszik, hogy a feltüntetett szimulációk nem képesek leírni az adatokat. A két ábrán található adatpontok természetesen megfelelnek egymásnak.

A kezdeti energiasűrűség vizsgálatát szeretnénk további ütközési energiákra, kezdve a RHIC, Au+Au reakcióival. Ehhez szükségünk van ún. effektív hőmérséklet ( $T_{\text{eff}}$ , a transzverz impulzus eloszlás slope paramétere) legalább közelítőleges értékére, azonban az  $\sqrt{s_{NN}}=130$  és 200 GeV-es méréseket leszámítva nem találtunk publikált  $T_{\text{eff}}$  adatokat, emiatt ezt nekem kellett meghatároznom a STAR és PHENIX által közzétett transzverz impulzus eloszlások illesztésén keresztül. Miután ábrázoltam a  $T_{\text{eff}}$  értékeket az ütközési energia függvényében, a pionok esetében egy érdekes jelenséget találtam, amit a 3. ábra szemléltet három különböző centralitási osztályban. Jól látható az effektív hőmérséklet nem-monoton viselkedése, ami akár a kritikus jelenségek megnyilvánulása is lehet. A kutatásom következő szakaszában ennek részletesebb vizsgálatára komoly hangsúlyt tervezünk fektetni.



3. ábra. A pionok effektív hőmérséklete az ütközési energia függvényében, periferiális, mid-centrális, valamint centrális ütközésekben.

## 4. Publikációk

A félév során egy kéziratot jelentősen kibővítettünk, és közzé tettük preprint formában. Jelenleg referálás alatt áll az IJMPA folyóiratnál:

- G. Kasza, T. Csörgő: *Lifetime estimations from RHIC Au+Au data*, IJMPA  
Preprint verzió: arXiv:1811.09990 [nucl-th]

## 5. Tanulmányi tevékenység

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

- Jet-fizika hadron-hadron és nehézion ütközésekben
- Kompakt csillagok szerkezete

## 6. Konferenciák

A félév során részt vettem egy nemzetközi konferencián (1.), ahol angol nyelvű előadást tartottam, továbbá meghívást kaptam egy nyári iskolába (2.):

1. XIV Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Dubna, 2019. június 3-7.  
A konferencia honlapja: <http://theor.jinr.ru/~wpcf2019>
2. International School of Subnuclear Physics, Erice, 2019. június 21-30.  
Az iskola honlapja: <http://www.ccsen.infn.it/>

## Hivatkozások

- [1] T. Csörgő, G. Kasza, M. Csanád and Z. Jiang, *Universe* **4** (2018) 69
- [2] T. Csörgő, G. Kasza, M. Csanád and Z. F. Jiang, *A. Phys. Pol. B*, arXiv:1806.06794 [nucl-th].
- [3] J. D. Bjorken, *Phys. Rev. D* **27**, 140 (1983).
- [4] P. Bozek and I. Wyskiel, *Phys. Rev. C* **79** (2009) 044916
- [5] J. Ze-Fang, Y. Chun-Bin, M. Csanad and T. Csorgo, *Phys. Rev. C* **97** (2018) no.6, 064906
- [6] A. M. Sirunyan *et al.* [CMS Collaboration], arXiv:1902.03603 [hep-ex].