

PhD kutatási beszámoló (2019/2020 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

2020. január 23.

## 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, 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 realisztikus, akár forgó egzakt megoldások feltárása is.

## 2. Kutatási előzmények

Az előző félév végén beküldtünk egy kéziratot az IJMPA folyóirathoz, ami nyár folyamán publikálásra került [1]. A cikkben leírtak szerint sikerült egyszerűsíteni a korábbi félévek során talált hidrodinamikai megoldásunkból (lásd: [2]-es hivatkozás) származtatott pszeudorapiditás eloszlást leíró bonyolult, parametrikus formulát. Az eredeti, parametrikus görbe 4 illeszthető paramétere az új formulában 3-ra redukálódik, amelyek a korábbi 4 paraméter kombinációi. Ez egy gyönyörű megnyilvánulása a hidrodinamikai skálaviselkedésnek.

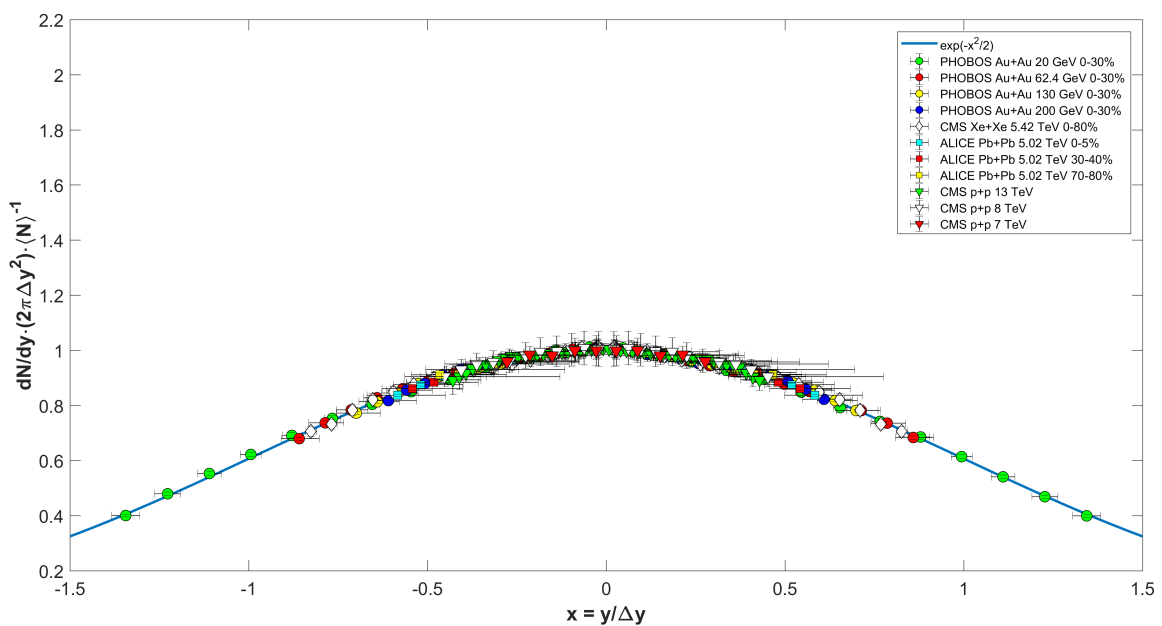
### 3. Az aktuális félévben elvégzett kutatások

#### 3.1. A hidrodinamikai skálaviselkedés megnyilvánulása

A kutatási előzményekben említett egyszerűsített képletet teszteltük is számos mérésen, és az új formula kevesebb paraméterrel, szinte tökéletes leírását adja az adatoknak. Az illesztést az alábbi adatsorokon végeztük el: CMS p+p 7, 8 és 13 TeV; CMS Xe+Xe 5.44 TeV; PHOBOS Au+Au 20, 62.4, 130 és 200 GeV; ALICE Pb+Pb 5.02 TeV. Az eredmények alapján az általunk talált formula egyaránt alkalmas kis (p+p) és nagyobb (A+A) méretű rendszerek leírására, ami a skálaviselkedés megnyilvánulása. Az illesztéseket egy közös ábrán szemléltettük (1-es ábra), ahol a  $dN/d\eta$  pszeudorapiditás eloszlás adatpontjait átranszformáltuk rapiditás eloszlássá, melyet leosztottunk a mid-rapiditásban érvényes értékekkel. Ekkor elméletünk szerint a fentebb felsorolt összes kísérleti adat a skálaviselkedés következtében ugyanazzal a görbével írható le:

$$\left( \frac{dN}{dy} \Big|_0 \right)^{-1} \frac{dN}{dy} = \exp \left( -\frac{x^2}{2} \right), \quad (1)$$

ahol  $x = y/\Delta y$ , amiben  $y$  a rapiditás és  $\Delta y$  a rapiditás-eloszlás szélességét jellemzi. Az ábra meggyőzően szemlélteti az adatok egybeesését, legyen szó nehézion vagy akár p+p ütközésekről. Ez alapján feltételezhető, hogy a p+p ütközések is kollektív rendszerként tárgyalhatók, továbbá az illesztések során meghatározott átlagos hangsebesség alacsony értéke folyadék jelenlétére enged következtetni, vagyis nem zárható ki a QGP létrejötte.



1. ábra. A hidrodinamikai skálaviselkedés szemléltetése p+p és nehézion ütközésekre.

### 3.2. Új, egzakt viszkózus hidrodinamikai megoldások

A félév folyamán a skálaviselkedés vizsgálatán túl viszkózus hidrodinamikai megoldások keresésével is foglalkoztunk. Egyelőre két egzakt, analitikus megoldást találtunk ugyanazzal a feltételezésekkel: a bulk-viszkozitás és a nyomás hányadosa konstans, valamint a sebességtér Hubble-típusú. Utóbbinak előnye, hogy az egyenletekből kiesik a nyírási viszkozitás, tehát ily módon a megoldásaink bármilyen nyírási viszkozitás értékre érvényesek. A két talált megoldás között a különbség, hogy egyikben a kémiai potenciál véges ( $\mu > 0$ ), viszont a másíkról ez nem mondható el, mivel ott a kémiai potenciált közelítőleg 0-nak tekintettük. A megoldásokat az 1-es táblázatban foglaltam össze, amelyben  $\kappa$  =konstans,  $\tau$  a sajátidőt jelöli,  $d$  a térbeli dimenziók száma, az  $s_x$ ,  $s_y$  és  $s_z$  függvények a skálaváltozók,  $\nu$  és  $\bar{\tau}$  tetszőleges skálafüggvények a  $\nu = \bar{\tau}^{-1}$  egyenlőség erejéig, míg  $\zeta_0$  a bulk-viszkozitás kezdeti értéke. A hőmérsékletet ( $T$ ), nyomást ( $p$ ), részecskeszám- és entrópia-sűrűséget ( $n$  és  $\sigma$ ) a szokásnak megfelelően jelöltük.

E két megoldás fő érdekessége a  $\tau \rightarrow \infty$  határesetben látható igazán, ugyanis nagy  $\tau$  értékekre az exponenciális faktorok  $\tau$ -függése lecseng, és a termodinamikai változók kezdeti értékének átskálázásával tökéletes folyadék megoldásokat kapunk. Ez alapján elképzelhető, hogy a hadronikus végállapotból nem határozható meg egyértelműen, hogy a tűzgömb magasabb kezdeti hőmérsékletből indulva tökéletes folyadékként fejlődött, vagy kezdetben alacsonyabb kezdeti hőmérséklettel rendelkező és viszkózus folyadékként tekinthettünk rá.

$\mu = 0$	$\mu > 0$
$\varepsilon = \kappa p$	$\varepsilon = \kappa p$
$u^\mu = \frac{x^\mu}{\tau}$	$u^\mu = \frac{x^\mu}{\tau}$
$s_x = \frac{r_x}{t}, s_y = \frac{r_y}{t}, s_z = \frac{r_z}{t}$	$s_x = \frac{r_x}{t}, s_y = \frac{r_y}{t}, s_z = \frac{r_z}{t}$
$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^d \exp\left(\frac{\zeta_0 d^2}{(1+\kappa_0)p_0} \left[\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right]\right) \nu(s_x, s_y, s_z)$	$n = n_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^d \nu(s_x, s_y, s_z)$
$T = T_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{\frac{d}{\kappa_0}} \exp\left(\frac{\zeta_0 d^2}{(1+\kappa_0)\kappa_0 p_0} \left[\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right]\right) \bar{\tau}(s_x, s_y, s_z)$	$T = T_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{\frac{d}{\kappa_0}} \exp\left(\frac{\zeta_0 d^2}{\kappa_0 p_0} \left[\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right]\right) \bar{\tau}(s_x, s_y, s_z)$
$p = p_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{d\left(1+\frac{1}{\kappa_0}\right)} \exp\left(\frac{\zeta_0 d^2}{\kappa_0 p_0} \left[\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right]\right)$	$p = p_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{d\left(1+\frac{1}{\kappa_0}\right)} \exp\left(\frac{\zeta_0 d^2}{\kappa_0 p_0} \left[\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right]\right)$

1. táblázat. Új viszkózus hidrodinamikai megoldások Hubble-típusú sebességtérrel.

## 4. Publikációk

A félév során egy kéziratot jelentettünk meg:

- G. Kasza, T. Csörgő: *Lifetime estimations and a non-monotonic initial energy density in heavy ion collisions at RHIC and LHC*, Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei (Proceedings Supplement of WPCF 2019)  
Preprint verzió: arXiv:1910.03428 [nucl-th]

## 5. Tanulmányi tevékenység

A félév során három kurzust végeztem el:

- Bevezetés az általános relativitáselméletbe I.
- Lineáris és nem-lineáris MHD hullámok
- Az erősen kölcsönható anyag fázisszerkezete

## 6. Előadások

A félév során két nemzetközi konferencián vettem részt (2. és 3.), ahol angol nyelvű előadásokat tartottam, továbbá egy ismeretterjesztő előadásom volt magyar nyelven (1.):

1. Simonyi-Nap 2019, Budapest, 2019. október 18.  
Az esemény programja: <https://wigner.mta.hu/hu/simonyi-nap-2019-oktober-18>
2. 5th Day of Femtoscopy, Gyöngyös, 2019. október 31.  
A konferencia honlapja: <https://indico.cern.ch/event/858268/>
3. Zimányi School'19: Winter Workshop on Heavy Ion Physics, Budapest, 2019. december 2-6.  
A konferencia honlapja: <http://zimanyischool.kfki.hu/19/>

## Hivatkozások

- [1] G. Kasza and T. Csörgő, Int. J. Mod. Phys. A **34** (2019) no.26, 1950147  
doi:10.1142/S0217751X19501471 [arXiv:1811.09990 [nucl-th]].
- [2] T. Csörgő, G. Kasza, M. Csanád and Z. Jiang, Universe **4** (2018) 69