

# Az erősen kölcsönható kvark-gluon plazma fázisszerkezetének vizsgálata

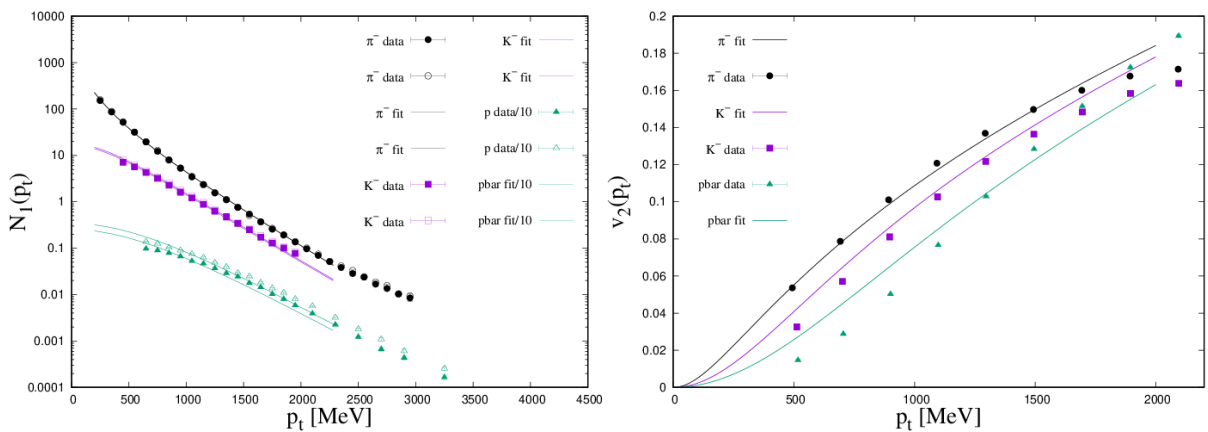
Beszámoló a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj keretében végzett kutatómunkáról

A nehézion-ütközésekben létrejövő kvark-gluon plazma, ami egyes elméleti várakozásokkal ellentétben nem a kvarkok és gluonok gázaként viselkedik, hanem közel tökéletes folyadékként, számos meglepő tulajdonsággal rendelkezik [1-6]. Az itt bemutatott kutatási irányok középpontjában ez az anyag állt.

Az ösztöndíj lehetőséget adott két fő kutatási irányban való munkára: egy hidrodinamikai modell alkalmazhatóságának vizsgálatára, illetve a keletkező rezonanciák eloszlásainak vizsgálatából a részecskekeltés termodinamikai tulajdonságaira való következtetésre.

Prof. Boris Tomášikkal vizsgáltuk a Buda-Lund hidrodinamikai modellt, mely azon a kísérleti megfigyelésen alapszik, hogy a kvark-gluon plazma tökéletes (perfekt), azaz szinte nulla viszkozitással rendelkező folyadékként viselkedik. Ezt a feltevés elfogadva, a nehézion-ütközésben létrejövő közeg végállapotának adja egy parametrizációját, azaz megad egy eloszlásfüggvényt, ami azt írja le, hogy a hadronok hol és mekkora impulzussal keletkeznek a plazmából. Az eredeti Buda-Lund modell számolt egy rövid keletkezési időtartammal is, de a multipólus modell ezt már nem veszi figyelembe, azaz pillanatszerű kifagyást feltételez.

Minden olyan feltevésünket, amely a részecskekeltő forrásra vonatkozik a forrásfüggvényben kódoljuk, így az aszimmetriákra vonatkozókat is. A modell egy korábbi verziója [7-11] ellipszoidális szimmetriát írt le. Először a modellnek ezt a verzióját teszteltük le adatokkal való összevetés révén. Korábban születtek már ilyen vizsgálatok, de a mi szempontunkból nem voltak elég részletesek [11]. Azt vizsgáltuk meg, hogy lehetséges-e a modellel mindkét töltés spektrumát és több részecskefajta elliptikus folyását illeszteni. Az eredmények a 1. ábrán láthatóak.

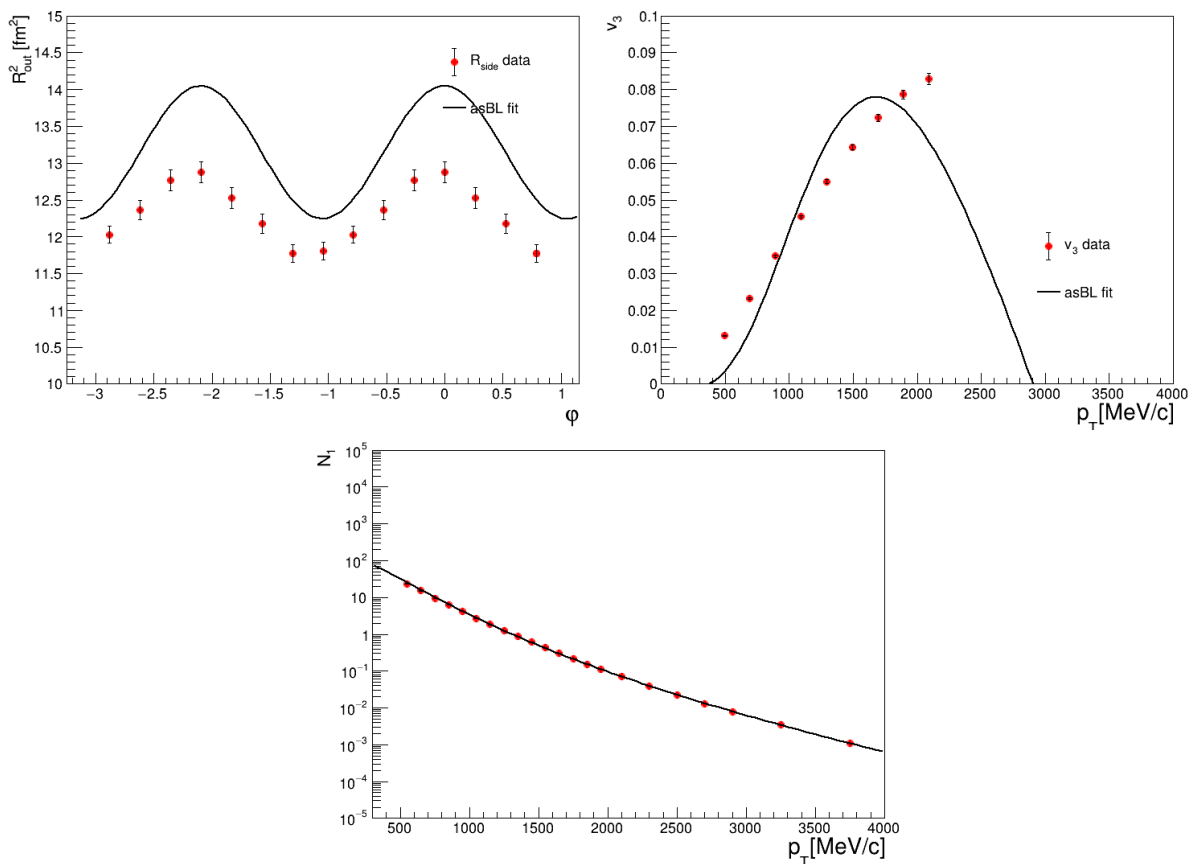


1. ábra Az elliptikus Buda-Lund modell illesztése az adatokhoz.

Az illesztésekből nyerhető paraméterértékek nem voltak realiztikusak. A plazma kifagyási hőmérsékletére  $T_{FO} \approx 170$  MeV adódott, ami az elméletileg jósoltnál és más modellekből kapottnál magasabb. A forrás mérete és a kifagyás időpontja sem volt összhangban egymással.

Az illesztés jóságának szempontjából a legproblémásabb mennyiség az antiproton elliptikus folyása. A jobb oldali ábrán láthatóak a mérési adatok (zöld háromszögek) és az is, hogy a zöld görbe, ami az illesztett függvényt hivatott mutatni, sok hibaegységre elkerüli a pontokat.

A modell multipólus kiterjesztésének [7] illesztése az adatokhoz technikailag nehézkesnek bizonyult. A forrásfüggvényből különböző változókra vett integrálásokkal kaphatóak meg a megfigyelhető mennyiségek. Ezen integrálok csak numerikusan számíthatók ki, amely gépidő-igényes. Több numerikus technikát is kipróbáltunk (pl. BAT [12]), de nem tudtuk a futási időt jelentősen javítani. Mindazonáltal a vizsgálatok során sikerült együtt illeszteni a pionok spektrumát, trianguláris folyását és az egyik oszcilláló HBT sugarat. Az eredményeket a 2. ábra mutatja be.



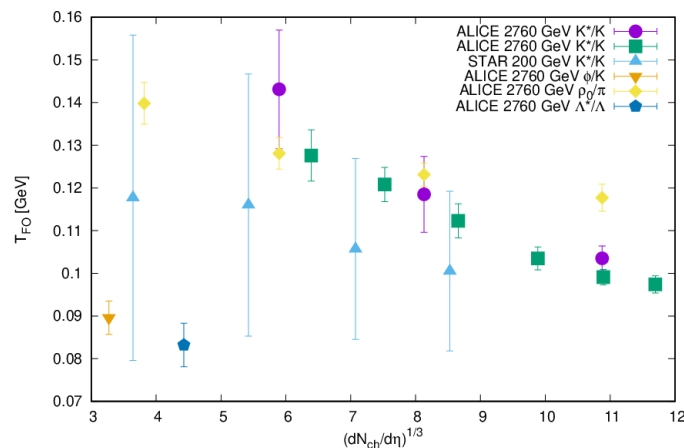
2. ábra A multipólus Buda-Lund modell illesztése adatokhoz.

A 2. ábráról jól látszik, hogy a spektrum pontos beillesztésének az ára, hogy az oszcilláló HBT sugarat és a harmadrendű folyást csak kvalitatívan lehet leírni. A modell alapvető finomítása lehetővé teszi, hogy az adatokat pontosabban írja le. A kutatást ebben az irányban nem folytattuk.

A közös munkánk másik nagy témája, mely két altémára bontható, a rezonanciák köré épült. Rezonanciák alatt olyan részecskéket értünk, amelyek rövid ideig léteznek, és esetünkben az erős kölcsönhatás tartja össze őket. Minkét kutatási irány a részleges kémiai egyensúly (partial chemical equilibrium, PCE) [13] elvére épült. Egyrészt kiszámítottuk a hadron rezonancia

gázmodellből (HRG) [14] az egyes rezonanciák arányát a stabil partnerükhöz képest. Nekünk a  $\varphi(1020)$ ,  $K^*(892)^0$ ,  $\rho^0(770)$ ,  $\Lambda^*(1520)$ ,  $\Xi^*(1530)$ ,  $\Sigma^*(1385)$  rezonanciák voltak az érdekesek, ugyanis ezeknek a keletkezési arányát a stabil partnerükhöz (rendre  $K, K, \pi, \Lambda, \Xi, \Lambda$ ) képest megmérték (egy összefoglalás található [15] hivatkozás 3. ábráján).

A részecskekeltés mechanizmusa korántsem tisztázott a kvark-gluon plazma időfejlődése során. Rezonanciáknál a helyzet bonyolultabb lehet, mint stabil részecskék esetén például a bomlás utáni újra keletkezésük vagy a szóródásuk miatt. A stabil részecskékhez képesti arányuk információt adhat ezen folyamatok dominanciájáról, de modellszámításokkal összehasonlítva arról is, hogy milyen hőmérsékleten fagyhatnak ki ezek a részecskék. Mi ez utóbbit vizsgáltuk meg az elérhető adatok alapján. Az elméleti számolás nem minden esetben volt kompatibilis a kísérleti eredményekkel. Ennek oka a modell feltételezéseinek pontatlanságában keresendő. Az eredmények a 3. ábrán láthatóak. Megfigyelhető, hogy bár sok  $\varphi/K$  kísérleti pont érhető el, mégis csak egyhez sikerült meghatározni a kifagyási hőmérsékletet. Ennek az lehet az oka, hogy a PCE feltételezi, hogy rezonanciák könnyen keletkeznek és gyorsan elbomlanak így fenntartják a kémiai egyensúlyt. Ez a  $\varphi$  esetén nem feltétlenül teljesül, mert relatíve nehezen keletkezik viszont összehasonlítva a többi vizsgált rezonanciával meglehetősen hosszú élettartamú ( $40\times$ -szer hosszabb ideig létezik, mint a  $\rho_0$ ). Azonban az esetek nagy részében sikerült reális eredményeket kapni, amint az a 3. ábrán is látható. Ez a munka hamarosan tudományos közleményben jelenhet meg.



3. ábra A kifagyási hőmérsékletek különböző rezonanciák és ütközési energiák esetén.

A másik, rezonanciákkal kapcsolatos témakör, amelyben kutatást végeztünk, a barionszám-sűrűségbeli fluktuációk. A kísérletben a barionok számsűrűség-eloszlását ugyan közvetlenül nem lehet megmérni, mert a neutronokat nem vagy csak nagyon nehezen és pontatlanul lehet detektálni, de a protonok számsűrűség-eloszlását igen. Ez egyfajta proxyként szolgálhat a megfigyelendő fluktuációkhoz. Több effektus is befolyásolhatja azt, hogy mit lehet végülis megfigyelni és hogy mennyire pontosan lehet az eredeti fluktuációkra visszakövetkeztetni, azonban ezek az elméleti modellek által követhetőek (ld. pl. [17]).

Jelen kutatásban a PCE-et alapul véve vizsgáljuk a fluktuációkat. A modell logikai felépítése a következő: számsűrűség-fluktuációkat szeretnék több rendben kiszámítani. Ehhez a számsűrűség-eloszlást kell meghatároznunk, ami a HRG modell generátorfüggvényével adható meg. Ehhez szükségünk van termodinamikai mennyiségekre. A termodinamikai mennyiségek kiszámításánál azt is figyelembe kell venni, hogy egyes mennyiségekre megmaradási törvények

érvényesek. Az entrópia csak részben ilyen mennyiség: felbontható megmaradó és keletkező részre. (Eltűnő rész a termodinamika második főtétele szerint nincs.) A HRG modellben a teljes entrópia szerepel. Kutatásunk tárgya tehát az, hogy létezik-e olyan felbontása az entrópiának a nehézion-fizikában, ami érvényesnek tekinthető a PCE és HRG vonatkozásában, valamint beépíthető a modell nyújtotta keretek közé. Prof. Tomášikkal egy olyan hidrodinamikai modellt kísérletünk meg használni erre a célra, amiben explicit módon megjelenik az entrópia ilyen jellegű szétválasztása, az is világos, hogy a generáló tag a viszkozitástól függ és hogy egy nem túl nagy korrekciót jelent [18]. A munka egyelőre folyamatban van, a hidrodinamikai modell numerikus beillesztése fejlesztés alatt áll.

Boris Tomášikkal kitűnő munkakapcsolatot alakítottunk ki, jelen témák lezárása után is tervezünk közösen dolgozni a nagyenergiás nehézion-fizika kérdésein.

## Hivatkozások

- [1] Adcox et al., Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 022301
- [2] Adler et al., Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 072303
- [3] Adare et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 172301
- [4] Adamczyk et al., *Nature* 548 (2017) 62
- [5] Adare et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 162301
- [6] Adare et al., Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 132301
- [7] Lökös et al., Eur. Phys. J. A (2016) 52: 311
- [8] Lökös et al., Acta Phys.Polon.Supp. 9 (2016) 269
- [9] Csanád et al., JCEGI 4(4) pp 46-52 (2016)
- [10] Cimerman et al., Eur. Phys. J. A (2017) 53: 161
- [11] Ster et al. Eur.Phys.J. A47 (2011) 58-66
- [12] <https://bat.mpp.mpg.de/>
- [13] Bebie et al., Nucl.Phys.B 378 (1992) 95-128
- [14] R. Hagedorn, Astronomy and Astrophysics, Vol. 5, p. 184 (1970)
- [15] A. Badalá, arXiv:1910.12528
- [16] ALICE Coll., Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 032301
- [17] Braun-Münzinger et al., Nucl. Phys. A 1008, 122141 (2021)
- [18] Gribov-90 Memorial Volume (World Scientific), pp. 275-296 (2021)