

# Nagyenergiás atommagütközések téridőbeli szerkezete

MTA DOKTORI DISSZERTÁCIÓ TÉZISEI



Csanád Máté  
Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Atomfizikai Tanszék  
Budapest, 2019

# 1. A kutatások előzménye

Világunkat ma csillagok, galaxisok, galaxishalmazok és szuperhalmazok alkotják; nem volt ez azonban mindig így. A Világegyetem nagyjából 13,7 milliárd éve egy „ősrobbanásban” keletkezett, és az előbb említett struktúrák csak pár száz millió évvel ez után kezdtek kialakulni. Az ősrobbanás utáni első pillanatokra visszatekintve igen érdekes jelenségeket láthatunk. Ezek megértéséhez fontos tudni, hogy a közönséges anyagban jelen lévő protonok és a neutronok nem elemi részecskék – kvarkok és gluonok alkotják őket. Az őket leíró elmélet az erős kölcsönhatás, avagy más néven kvantum-színdinamika (quantum chromodynamics, QCD), amely szerint a kvarkok és gluonok hétköznapi körülmények között nem figyelhetőek meg, kizárólag protonokba és hasonló részecskébe (hadronokba) zárva. Ugyanakkor extrém nagy hőmérsékleten és nyomáson a kölcsönhatás erőssége lecsökken, így ilyenkor kiszabadulhatnak a kvarkok és gluonok hadron-börtönükből. Ilyen szélsőséges körülmények uralkodtak a Világegyetemben egy milliomod másodperccel az ősrobbanás után, amikor a kvarkok és gluonok ősleve (a kvark-gluon plazma, avagy QGP) töltötte ki a világegyetemet [Weinberg, 1977]. Ahhoz, hogy ezt az őslevest megfigyeljük és kísérletileg vizsgálhassuk, az akkor jelenlévőhöz hasonló körülményeket kell teremteni. Ez extrém hőmérsékletet és nyomást jelent, amelyet ultra-relativisztikus sebességre gyorsított atommagok (nehézionok) ütköztetésével érhetünk el. A keletkező anyag egyfajta „kis ősrobbanást” létrehozva hűl és tágul, majd hadronok kölcsönhatásmentesen táguló gázává alakul. Az ütközési pont köré rendezett detektorainkba érkező részecskéket vizsgálva érdemi információt kaphatunk arról, hogy milyen is volt az anyag, amely közvetlenül az ütközés után létrejött. Ezt vizsgálandó szerte a világon óriás részecskegyorsítókat építettek (és építenek ma is), amelyek közül kiemelkedik a Nagy Hadronütköztető (LHC) és a Relativisztikus Nehézion-ütköztető (RHIC). A RHIC kísérletei a 2000-es évek elejére igazolták [Adcox et al., 2005, Adams et al., 2005a, Back et al., 2005, Arsene et al., 2005], hogy atommagütközésekben létrejön a QGP, még hozzá szinte tökéletes folyadék formájában. Ez a kvarkfolyadék tágulása és hűlése nyomán „közönséges” anyaggá alakul, és ennek részecskéit (a hadronokat) észleljük detektorainkkal.

Felmerül tehát a kérdés, hogy milyen jellegű az átmenet, azaz hogyan tér vissza a kvarkanyag a hadronos formába, miként történik a kifagyás. Elméleti és kísérleti eredmények szerint [Aoki et al., 2006, Adler et al., 2004a] az átalakulás a legnagyobb ütközési energiákon nem elsőrendű fázisátmenet, hanem „cross-over” típusú, folytonos átalakulás. Egyes várakozások szerint lényegesen kisebb ütközési energia esetén elsőrendű fázisátmenetre kerülhet sor, és az ezen fázisátmenetet a fázisdiagramon kijelölő határvonal egy kritikus pontban érhet végét. Ezért a RHIC igen széles tartományban tervezi változtatni az ütközési energiát, az LHC Szuper Protonszinkrotron gyorsítója is vizsgálja ezt a tar-

tományt, és világszerte (Németországban, Oroszországban és Japánban is) gyorsítókat és kísérletet terveznek a fázisdiagram vizsgálata céljából.

A kísérleti adatok értelmezésének fontos eszköze a hidrodinamika és a termodinamika, amelyekkel a keletkező kvarkfolyadék dinamikáját írhatjuk le. Ezek alkalmazhatóságának feltétele a lokális termalizáció, illetve az, hogy az alkotórészek szabad úthossza a közeg méreténél lényegesen kisebb legyen. A nagyenergiás részecskeütközésekben keletkező részecskék statisztikus leírására először Fermi tett javaslatot [Fermi, 1950], majd Landau mutatott rá a közeg áramlásának szerepére, amelynek vizsgálatához kidolgozta a relativisztikus hidrodinamika alapegyenleteit, és megtalálta azok egy egzakt megoldását [Landau, 1953, Khalatnikov, 1954, Belenkij and Landau, 1956]. A RHIC kísérleteiben kiderült [Adler et al., 2004b], hogy a kis (legfeljebb 1-2 GeV/c) impulzusú részecskék eloszlásai termoisztikus és hidrodinamikai módszerekkel jól leírhatóak. Ez azt jelenti, hogy a kifagyáskor keletkező hadronok és a folyamatosan létrejövő fotonok és leptonok termoisztikus eloszlásaiból a közeg tulajdonságai meghatározhatóak. Ezen felfedezések nyomán a hidrodinamika nagyenergiás fizikai alkalmazásának területe kibővült, és sok új egzakt megoldás, numerikus vagy közelítő modell született [Csanád et al., 2004a, Csanád et al., 2004b, Csanád et al., 2008a, Csörgő et al., 2008, Csanád et al., 2008b].

A femtoszkópia [Lednicky, 2001] szintén a nagyenergiás mag- és részecskefizikai kutatások fontos területe, ugyanis kísérleti technikaként betekintést enged a femtométer skálájú folyamatok téridőbeli szerkezetébe. A terület születése Hanbury Brown és Twiss csillagászati [Hanbury Brown et al., 1952, Hanbury Brown and Twiss, 1957], Glauber kvantumoptikai [Glauber, 1963, Glauber, 2006a, Glauber, 2006b] és Goldhaber részecskefizikai [Goldhaber et al., 1960] kutatásaihoz köthető. A módszer lényege, hogy az impulzuskorrelációk Fourier-transzformációs kapcsolatban állnak a részecske kibocsátó forrás téridőbeli eloszlásával, és így rajtuk keresztül mérhető a közeg mérete, élettartama, a kibocsátás hossza, és egyéb tulajdonságai [Adams et al., 2005b, Adler et al., 2004a]. A RHIC első mérései nyomán az is kiderült, hogy a forrás alakja a diffúzió és a Boltzmann-eloszlások sugallta Gauss-közelítésnél bonyolultabb szerkezetű [Csanád, 2006, Csanád et al., 2007, Adler et al., 2007, Afanasiev et al., 2008].

## 2. Célkitűzések és módszerek

Bár már egy évtizede is szerteágazó, kísérletileg is bizonyított tudás állt rendelkezésre a nagyenergiás atommag-ütközésekben létrejövő kvarkfolyadékról, még sok kérdés maradt nyitva. Mivel az analitikus hidrodinamikai megoldások köre igen szűk volt, ezért nem tudtunk közvetlen, analitikus kapcsolatot teremteni az ütközés első pillanataiban létrejövő kezdeti állapot, a közeg dinamikáját jellemző transzport együtthatók, illetve a részecskeeloszlásokból rekonstruálható végállapot között. A jelen

disszertációban összegzett munkám célja az volt, hogy a hidrodinamika és femtoszkópia módszerei segítségével részletesebben megismerhessem a nagyenergiás ütközésekben keletkező kvarkanyag dinamikáját és téridőstruktúráját. A következő kérdésekre kerestem a választ:

1. Szükséges-e bonyolult numerikus szimulációk használata az atommagütközésekben keletkező közeg leírásához, avagy egyszerű, egzakt és analitikus hidrodinamikai megoldások is leírják-e a keletkező részecskék eloszlásait? Lehetséges-e a relativisztikus hidrodinamika segítségével analitikus kapcsolatot teremteni a kezdeti állapot és a megfigyelhető hadroneloszlások között?
2. A hadronikus végállapot hidrodinamikai leírása milyen megszorítást ad a kezdeti állapotra? Mire van szükség az időfejlődés mélyebb megértéséhez?
3. Leírhatóak-e az áthatoló részecskék eloszlásai analitikus hidrodinamikai számolásokkal, segít-e ez az időfejlődés (avagy a transzport együtthatók) részletesebb megismerésében?
4. Korábban csak a hőmérséklettől független állapotegyenletű relativisztikus megoldások voltak ismertek. Lehetséges a relativisztikus hidrodinamika egyenleteinek olyan egzakt megoldása, amely hőmérsékletfüggő hangsebességet is megenged? Mi következik ebből a megfigyelhető mennyiségekre?
5. A korábban ismert megoldások legfeljebb elliptikus anizotrópiát írtak le: kiterjeszhető-e az analitikus hidrodinamika magasabb rendű anizotrópiákat is tartalmazó tágulásra? Ha igen, leírhatóak-e a megfigyelések ilyen új megoldások segítségével?
6. Az eddigi ismert, legalább elliptikus anizotrópiát is leíró relativisztikus hidrodinamikai megoldások kizárólag Hubble-tágulás, azaz térben állandó nyomás esetére voltak érvényesek. Tudunk-e analitikusan ennél tovább lépni, le tudjuk-e írni a kezdeti nyomásgradiens hatását numerikus szimulációk nélkül is?
7. Hogyan függ az említett anizotrópiák időfejlődése a viszkozitástól? Mely rendű anizotrópiák eltűnését gyorsítja jobban a viszkozitás? Azonosan viselkednek-e a sebesség- és a nyomásmező anizotrópiái?
8. A közeg anizotrópiái nem csak az impulzus- vagy sebességtérben, de a koordinátatérben is megjelennek. Kiszámítható-e ezen két jelenség összjátéka analitikus hidrodinamikai modellekből? A mérések elegendő eszközt adnak-e a kezünkbe, hogy külön meghatározzuk a közeg egyes jellemzőinek anizotrópiáit?
9. Milyen térbeli alakkal írható le a részecske kibocsátó forrás? A részletes kísérleti analízis megerősíti-e a korábbi, lassan lecsengő eloszlásra utaló jeleket? Milyen kapcsolatban van ez a hidrodinamikai eredményekkel? Hogyan pontosítja a nem-Gauss eloszlást is megengedő analízis a korábbi, femtoszkópiai méréseket?

10. Femtoszkópiai mérések szerint a korrelációk erőssége nem mond ellent a királis  $U_A(1)$  szimmetria részleges helyreállításának. Van-e mód annak kísérleti tesztelésére, hogy tényleg az  $\eta'$  mezon tömegének változása okozza-e a femtoszkópiai korrelációk erősségének változását?

Ezen kérdések megválaszolása érdekében elméleti (fenomenológiai) és kísérleti kutatásokkal is foglalkoztam. Előbbi munkám elsősorban a hidrodinamika egyenleteinek megoldásaira, illetve az ezekből számolható megfigyelhető mennyiségekre vonatkozott. Kísérleti munkám fókuszában a femtoszkópia állt, méréseimet a RHIC PHENIX kísérleténél végeztem, az általam vezetett PHENIX-Magyarország együttműködés keretében.

### 3. Új tudományos eredmények

A fenti témákban a következő eredményeket értem el:

1. Az egyetlen ismert 1+3 dimenziós, ellipszoidális szimmetriájú, relativisztikus megoldásból elsőként számítottam ki a hadronikus végállapot jellemzőit, és összevettem az ebből adódó megfigyelhető mennyiségeket az adatokkal: azt derült ki, hogy a modell megfelelően leírja azokat. Megmutattam ugyanakkor, hogy a hadronokat leíró megfigyelhető mennyiségek csak a kifa-gyáskori állapotot adják meg, és az időfejlődés egyetlen pontját tudjuk így rögzíteni, hiszen a hadronok ekkor keletkeznek, és ezzel a kezdeti állapotra igen csekély megszorítást tehetünk csak. Bebizonyosodott tehát, hogy az időfejlődés korábbi szakaszainak feltérképezéséhez új módszerekre van szükség. [T1,T2,T3]
2. Az első pontban használt relativisztikus megoldásból ezért megadtam egy lehetséges fotonkeletkezési forrásfüggvényt, és kiszámítottam ebből a termikus fotonok eloszlásait. Ezeket is összevettem a PHENIX-nél elvégzett mérések nyomán rendelkezésre álló adatokkal, és azt találtam, hogy az adatok nem cáfolják feltételezéseinket. Az összehasonlításból információt nyertem az átlagos állapotegyenletre és a kezdeti hőmérsékletre vonatkozóan is, amely összhangban volt másfajta számításokból kapott értékekkel is. A számításokat leptonpárok eloszlásaira is kiterjesztettem, és ezen egyszerű modell alapján, mikroszkopikus dileptonkeltés feltevésével az adatokat leírtam. [T4,T5,T6,T7]
3. A jelentős hőmérsékletbeli változásokon átmenő anyagban konstans állapotegyenletet feltenni nem feltétlenül realizisztikus. Ezért megvizsgáltam, hogyan módosulnak a hidrodinamika egyenletei általános, hőmérséklet- vagy nyomásfüggő állapotegyenlet esetén. Több lehetséges egzakt, analitikus megoldást találtam, amelyek segítségével aztán megvizsgáltam egy, a rács-QCD segítségével kapott állapotegyenlettel a hőmérséklet időfejlődését is. [T8,T9]

4. Ismert, hogy az azimut szögbeli eloszlásokban magasabb rendű anizotrópiák is megjelennek, ezek eredete pedig a kezdeti geometria és energiasűrűség eseményenkénti fluktuációja. Ezen anizotrópiákat egzakt, analitikus modellekkel korábban nem vizsgálták. Ezért a relativisztikus hidrodinamika fentebb említett 1+3 dimenziós megoldásoztályát kiterjesztettem multipoláris szimmetriák esetére, amelynek segítségével a mért, magasabb rendű anizotrópiákat is le lehet írni. Az új, egzakt, analitikus modell eredményei a mérésekkel kompatibilisek, ami azt jelenti, hogy a megfigyelések leírásához nem feltétlenül szükséges bonyolultabb eszközök igénybevétele, ezek megérthetőek egyszerű, egzakt, multipoláris hidrodinamikai tágulás alapján. [T10,T11]
5. Az előző tézispontban említett megoldás kizárólag a nyomásgradiens-mentes esetben realizisztikus. Mivel ettől eltérő egzakt megoldás egyelőre nem ismert, ezért megvizsgáltam a relativisztikus hidrodinamika perturbatív egyenleteit is. A Hubble-tágulás kis nyomásgradiens vagy gyorsulás nyomán adódó perturbációira analitikus megoldást találtam, és egy konkrét esetet részletesen is megvizsgáltam. A módszer alkalmas a gyorsulás hatásainak analitikus vizsgálatára, noha úgy tűnik, ezek (rögzített kezdeti állapot mellett) nincsenek jelentős hatással a hadronikus megfigyelhető mennyiségekre. [T12,T13]
6. Azt is megvizsgáltam, hogy a nagyenergiás atommagütközésekben keletkező anyag kezdeti anizotrópiái hogyan fejlődnek az időben, különféle viszkozitások és állapotegyenleti paraméterek esetén. Mivel az egzakt hidrodinamikai megoldások egyelőre nem írják le ezt megfelelően (szabályozható módon anizotrop hőmérsékleti mezőt tartalmazó relativisztikus megoldás nem ismert), ezért numerikus számolást alkalmaztam, a korábbiakban ismerttetett multipoláris megoldás sűrűségeloszlását használva kezdeti feltételnek (de megengedve a Hubble-áramlástól való eltérést). Az derült ki, hogy a nyomásanizotrópiák eltűnését a kis viszkozitás és a nagy hangsebesség segíti elő, a sebességanizotrópiákkal azonban éppen ellentétes a helyzet. Ez azért is érdekes, mert ezen kérdéskört ilyen módon korábban nem vizsgálták, ugyanakkor a megfigyelhető anizotrópiák mértékéből messzemenő következtetéseket szokás levonni az anyag tulajdonságaira nézve. [T14]
7. A sebesség- és a sűrűségter anizotrópiái mind az impulzuseloszlások, mind a korrelációs sugarak azimutális anizotrópiájában megjelennek. Ezért a Buda–Lund hidrodinamikai modell segítségével kiszámítottam a korrelációs sugarak azimut szögtől való függését, és összevettem ezek aszimmetriáját az impulzuseloszlás azimutális anizotrópiájával, konkrétan az úgynevezett elliptikus folyással. Azt találtam, hogy a Buda–Lund-modellben az elliptikus folyás teljes egészében a végállapot sebességtér-aszimmetriából adódik, míg a korrelációs sugarak azimut oszcillációját a koordinátater-beli és sebességtérbeli anizotrópia egyfajta keveredése okozza. [T15]
8. Az időfejlődés, illetve a hadronkeletkezés téridőszerkezetének további aspektusait vizsgálva a

Buda–Lund-modell alapján előrejelzést tettem a Bose–Einstein-korrelációs sugarak részecsketípusától való függésére. Megmutattam, hogy ezek nem függenek külön a részecske típusától és a transzverz impulzustól, hanem csak a kettő egyfajta kombinációjától, a transzverz tömegtől – ez is a hidrodinamikai skálaviselkedés egy példája. A Buda–Lund-modell ezen jóslatát az adatokkal összevetve az derült ki, hogy a transzverz tömeg szerinti skálázás az időközben a PHENIX-nél megmért kísérleti eredményekben is jelen van. [T16]

9. A hadronkeltő forrás alakját vizsgálándó kétpion Bose–Einstein-korrelációkat mértem a RHIC PHENIX kísérletének 0–30% centralitású  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au+Au ütközésekben felvett adatait felhasználva. Arra jutottam, hogy az adatok nem írhatóak le a szokásos Gauss-feltevessel, de a Lévy-eloszlásokkal történő általánosítás megfelelő feltevésnek bizonyult, és az adatok statisztikailag elfogadható leírását adta. Erre építve meghatároztam a forrás Lévy-paramétereit és azok transzverz tömegtől való függését. A Lévy-exponens a Gauss-esettől és a kritikus pontra vonatkozó jóslattól is távolinak bizonyult, de a Cauchy-forrás esetétől is eltérés mutatkozott. Mindezek ellenére a Gauss-közelítésben kapott, a transzverz tömegre vonatkozó hidrodinamikai skálázás érvényesnek bizonyult. Fontos eredmény volt az is, hogy kis transzverz tömeg esetén a korreláció erősségének statisztikailag szignifikáns csökkenését mutatták az adatok, amelyek nem inkonzisztensek az  $\eta'$  mezon közegbeli tömegcsökkenésével. Végezetül egy érdekes, előre nem jelzett, empirikus skálázást találtam, amely szerint egy újonnan bevezetett paraméter lineárisan függ a transzverz tömegtől, és lényegében korrelálatlan a többi Lévy-paraméterrel. Ezen skálázás eredete jelen pillanatban ismeretlen. [T17,T18,T19,T20]
10. A királis szimmetria és a Bose–Einstein-hatás kapcsolatát vizsgálva kiderül, hogy korreláció mag-glória modellben értelmezett erőssége (azaz a  $\lambda$  paraméter) direkt kapcsolatban van az  $\eta'$  részecskék számával, amely viszont erősen függ a királis szimmetria esetleges helyreállításától. A fent is említett vizsgálatokból kiderül, hogy a  $\lambda$  paraméter mért impulzusfüggése összeegyeztethető az  $\eta'$  tömegcsökkenésével. Nem világos ugyanakkor, hogy utóbbi okozza-e a megfigyelt jelenséget. Ezért megvizsgáltam egy módszert, amellyel csökkenthető az  $\eta'$  bomlástermékeinek aránya az adott kísérleti mintában. A módszer a szimulációkkal történt ellenőrzés alapján hatékonynak mondható. [T21,T22]

Ezen eredmények elérése után is maradtak természetesen nyitott kérdések, és újabb kutatásaim többek között az anyag viszkozitásának meghatározására, a forgás okozta vorticitás elemzésére, illetve a kvark-hadron átalakulás kritikus pontjának keresésére irányulnak. Ezen kérdések megválaszolása érdekében a fentiekén túl új technikák alkalmazására, és új kísérleti programokba való becsatlakozásra volt szükség – mindez azonban túlmutat disszertációm keretein.

## Hivatkozások

- [Adams et al., 2005a] Adams, J. et al. (2005a). Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions. *Nucl. Phys.*, A757:102–183.
- [Adams et al., 2005b] Adams, J. et al. (2005b). Pion interferometry in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Phys. Rev.*, C71:044906.
- [Adcox et al., 2005] Adcox, K. et al. (2005). Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration. *Nucl. Phys.*, A757:184–283.
- [Adler et al., 2004a] Adler, S. S. et al. (2004a). Bose-einstein correlations of charged pion pairs in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Phys. Rev. Lett.*, 93:152302.
- [Adler et al., 2004b] Adler, S. S. et al. (2004b). Identified charged particle spectra and yields in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Phys. Rev.*, C69:034909.
- [Adler et al., 2007] Adler, S. S. et al. (2007). Evidence for a long-range component in the pion emission source in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Phys. Rev. Lett.*, 98:132301.
- [Afanasyev et al., 2008] Afanasiev, S. et al. (2008). Source breakup dynamics in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV via three-dimensional two-pion source imaging. *Phys.Rev.Lett.*, 100:232301.
- [Aoki et al., 2006] Aoki, Y., Endrődi, G., Fodor, Z., Katz, S. D., and Szabó, K. K. (2006). The order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics. *Nature*, 443:675–678.
- [Arsene et al., 2005] Arsene, I. et al. (2005). Quark gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The Perspective from the BRAHMS experiment. *Nucl.Phys.*, A757:1–27.
- [Back et al., 2005] Back, B. B. et al. (2005). The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC. *Nucl. Phys.*, A757:28–101.
- [Belenkij and Landau, 1956] Belenkij, S. Z. and Landau, L. D. (1956). Hydrodynamic theory of multiple production of particles. *Nuovo Cim. Suppl.*, 3S10:15.
- [Csanád, 2006] Csanád, M. (2006). Measurement and analysis of two- and three-particle correlations. *Nucl. Phys.*, A774:611–614.
- [Csanád et al., 2004a] Csanád, M., Csörgő, T., and Lörstad, B. (2004a). Buda-Lund hydro model for ellipsoidally symmetric fireballs and the elliptic flow at RHIC. *Nucl. Phys.*, A742:80–94.



- [Csanád et al., 2004b] Csanád, M., Csörgő, T., Lörstad, B., and Ster, A. (2004b). Indication of quark deconfinement and evidence for a Hubble flow in 130 GeV and 200 GeV Au+Au collisions. *J. Phys.*, G30:S1079–S1082.
- [Csanád et al., 2007] Csanád, M., Csörgő, T., and Nagy, M. (2007). Anomalous diffusion of pions at RHIC. *Braz. J. Phys.*, 37:1002–1013.
- [Csanád et al., 2008a] Csanád, M. et al. (2008a). Universal scaling of the elliptic flow and the perfect hydro picture at RHIC. *Eur. Phys. J.*, A38:363–368.
- [Csanád et al., 2008b] Csanád, M., Tomášik, B., and Csörgő, T. (2008b). Interplay among the azimuthally dependent HBT radii and the elliptic flow. *Eur. Phys. J. A*, 37:111–119.
- [Csörgő et al., 2008] Csörgő, T., Nagy, M. I., and Csanád, M. (2008). A new family of simple solutions of perfect fluid hydrodynamics. *Phys. Lett.*, B663:306–311.
- [Fermi, 1950] Fermi, E. (1950). High-energy nuclear events. *Prog.Theor.Phys.*, 5:570–583.
- [Glauber, 1963] Glauber, R. J. (1963). Photon correlations. *Phys. Rev. Lett.*, 10:84–86.
- [Glauber, 2006a] Glauber, R. J. (2006a). Nobel Lecture: One hundred years of light quanta. *Rev. Mod. Phys.*, 78:1267–1278.
- [Glauber, 2006b] Glauber, R. J. (2006b). Quantum Optics and Heavy Ion Physics. *Nucl. Phys.*, A774:3–13.
- [Goldhaber et al., 1960] Goldhaber, G., Goldhaber, S., Lee, W.-Y., and Pais, A. (1960). Influence of bose-einstein statistics on the antiproton proton annihilation process. *Phys. Rev.*, 120:300–312.
- [Hanbury Brown et al., 1952] Hanbury Brown, R., Jennison, R. C., and K., D. G. M. (1952). Apparent Angular Sizes of Discrete Radio Sources: Observations at Jodrell Bank, Manchester. *Nature*, 170:1061–1063.
- [Hanbury Brown and Twiss, 1957] Hanbury Brown, R. and Twiss, R. Q. (1957). Interferometry of the intensity fluctuations in light - i. basic theory: the correlation between photons in coherent beams of radiation. *Proc. R. Soc. A*, 242(1230):300–324.
- [Khalatnikov, 1954] Khalatnikov, I. M. (1954). *Zhur. Eksp. Teor. Fiz.*, 27:529.
- [Landau, 1953] Landau, L. D. (1953). On the multiparticle production in high-energy collisions. *Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Fiz.*, 17:51–64.
- [Lednicky, 2001] Lednicky, R. (2001). Femtoscopy with unlike particles.
- [Weinberg, 1977] Weinberg, S. (1977). *The First Three Minutes*. Basic Books, New York.

## 4. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [T1] Csanád M., Vargyas M., Observables from a solution of 1+3 dimensional relativistic hydrodynamics, *Eur. Phys. J. A* **44**, 473 (2010), [arXiv:0909.4842](#)
- [T2] Csanád M., Initial conditions, equations of state and final state in hydrodynamics, *Acta Phys. Polon. B* **40**, 1193 (2009), [arXiv:0903.1278](#)
- [T3] Csanád M., Initial temperature of the strongly interacting Quark Gluon Plasma created at RHIC, *Gribov-80 Memorial Volume (World Scientific)*, 319 (2011), [arXiv:1101.1282](#)
- [T4] Csanád M., Májer I., Equation of state and initial temperature of quark gluon plasma at RHIC, *Central Eur.J.Phys.* **10**, 850 (2012), [arXiv:1101.1279](#)
- [T5] Csanád M., Májer I., Initial temperature and EoS of quark matter from direct photons, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **8**, 1013 (2011), [arXiv:1101.1280](#)
- [T6] Csanád M., Direct photon observables from hydrodynamics and implications on the initial temperature and EoS, *PoS WPCF* **2011**, 035 (2011), [arXiv:1202.5974](#)
- [T7] Csanád M., Krizsán L., Dilepton creation based on an analytic hydrodynamic solution, *Central Eur.J.Phys.* **12**, no. 2, 132 (2014), [arXiv:1305.6558](#)
- [T8] Csanád M., Nagy I. M., Lökös S., Exact solutions of relativistic perfect fluid hydrodynamics for a QCD equation of state, *Eur. Phys. J. A* **48**, 173 (2012), [arXiv:1205.5965](#)
- [T9] Csanád M., Time evolution of the sQGP with hydrodynamic models, *EPJ Web Conf.* **70**, 00011 (2014), [arXiv:1208.4683](#)
- [T10] Csanád M., Szabó A., Multipole solution of hydrodynamics and higher order harmonics, *Phys. Rev. C* **90**, no. 5, 054911 (2014), [arXiv:1405.3877](#)
- [T11] Csanád M., Szabó A., Lökös S., Bagoly A., Higher order anisotropies in hydrodynamics, *JCEGI* **4**(4), 46-52 (2016), [arXiv:1504.07932](#)
- [T12] Kurgyis B., Csanád M., Perturbative accelerating solutions of relativistic hydrodynamics, *Universe* **3**, no. 4, 84 (2017), [arXiv:1711.05446](#)
- [T13] Kurgyis B., Csanád M., Observables from a perturbative, accelerating solution of relativistic hydrodynamics, *Acta Phys. Polon. Supp.* **12**, no. 2, 169 (2019), [arXiv:1810.05402](#)

- [T14] Bagoly A., Csanád M., Time evolution of the anisotropies of the hydrodynamically expanding sQGP, *Int. J. Mod. Phys. A* **31**, 1645016 (2016), [arXiv:1507.05005](#)
- [T15] Csanád M., Csörgő T., Tomasik B., Interplay among the azimuthally dependent HBT radii and the elliptic flow, *Eur. Phys. J. A* **37**, 111 (2008), [arXiv:0801.4434](#)
- [T16] Csanád M., Csörgő T., Kaon HBT radii from perfect fluid dynamics using the Buda-Lund model, *Acta Phys. Polon. Supp.* **1**, 521 (2008), [arXiv:0801.0800](#)
- [T17] A. Adare *et al.* [PHENIX], Lévy-stable two-pion Bose-Einstein correlations in  $\sqrt{s_{NN}} = \text{GeV}$  Au+Au collisions, *Phys. Rev. C* **97**, 6, 064911 (2018), [arXiv:1709.05649](#)
- [T18] Csanád M. [PHENIX], Lévy femtoscopy with PHENIX at RHIC, *Universe* **3**, no. 4, 85 (2017), [arXiv:1711.05575](#)
- [T19] Csanád M. [PHENIX], Femtoscopy via Levy sources with PHENIX at RHIC, *Nuovo Cim. C* **40**, no. 6, 195 (2018), [arXiv:1711.05605](#)
- [T20] Csanád M. [PHENIX], Two- and three-pion Levy femtoscopy with PHENIX, *J. Phys. Conf. Ser.* **1070**, no. 1, 012026 (2018), [arXiv:1806.05745](#)
- [T21] Csanád M., Kőfaragó M., Tagging of  $\eta'$  decay products to analyze chiral restoration, *Eur. Phys. J. A* **47**, 76 (2011), [arXiv:1101.1276](#)
- [T22] Csanád M., Kőfaragó M., A method of  $\eta'$  decay product selection to study partial chiral symmetry restoration, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **8**, 944 (2011), [arXiv:1101.1192](#)