
Az erősen kölcsönható anyag statisztikus fizikai és termodinamikai vizsgálata

Tézisfüzet

Horváth Miklós

Témavezető:
Biró Tamás Sándor

Konzulens:
Jakovác Antal

Budapest Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem
2016

1. Bevezetés

Kétségtelen, hogy az utóbbi évtizedekben az erősen kölcsönható anyag került a nagy-energiás fizika fókuszába. Meggyőzően bizonyítást nyert az ún. kvark–gluon-plazma kialakulása nagy energiasűrűsége. Az anyagnak ezt az állapotát teljes egészében az erős kölcsönhatás uralja. A kialakulás részletei, a plazma anyagi tulajdonságai (mint pl. a transzportegyütthatók) és nemegyensúlyi dinamikája azonban még javarészt feltáratlan területek.

A szokásos elméleti keret az erős kölcsönhatás tanulmányozására a kvantum-színdinamika (QCD). A QCD egy különleges tulajdonsága, hogy a fundamentális szabadsági fokok, a kvarkok és a gluonok, „be vannak zárva”, az általuk kialakított dinamikában teljesen rejtve maradnak. Az elméletalkotás szempontjából remek kihívás az olyan módszerek kifejlesztése, melyek kezelni tudják a QCD nem-perturbatív természetét. A legpontosabb kvantitatív leírást az ún. rác-QCD, a QCD téridő-rácson diszkretizált változata adja. Nemegyensúlyi szituációk kezelésére azonban ez sem képes. Ezért az elméleti fizikusoknak effektív modelleket kell alkotniuk, melyek képesek megragadni a QCD különböző energiaskálákon mutatott egészen sokszínű viselkedését.

A kísérleti oldalról a figyelem főként a nagy-energiás részecskegyorsítókra irányul. Ezen kísérletek célja az anyagot minél szélsőségesebb körülményeknek kitenni, és megfigyelni mi is történik ilyenkor. A RHIC és az LHC kísérletek az ütköző részecskenyalábok kinetikus energiájának növelésével érik ezt el, de a nukleonok sűrűséget növelve is extrém energiasűrűség érhető el, ahogyan azt a FAIR kísérletben tervezik. Minden új kísérleti megállapítás egy új tartományát fedi fel az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramjának. Jelenleg is van elképzelésünk az erősen kölcsönható anyag fázisairól, de sok részletet nem ismerünk még. Vajon kritikus végpontban végződik a „kiszabadulási” (deconfinement) átalakulás fázishatára, ahogyan a QCD különböző nem-perturbatív vizsgálá-

latai sugallják? Ha így van, a hőmérséklet és kémiai potenciál milyen értékei tartoznak ehhez a kritikus végponthoz? Egyáltalán milyen fajta kritikus viselkedést várunk megjelenni egy ütközési kísérletben? Ehhez hasonló kérdések hajtják manapság a nehézion-ütközések vizsgálatát. A fizika ezen a még relatív fiatal területén feltűnő jelenségek megértése és interpretációja nagyszerű feladatot az elméletalkotás szempontjából.

2. A disszertáció célkitűzései

Ebben a disszertációban három különálló témáról esik szó, melyek mind a nehézion-ütközések fenomenológiájához kapcsolódnak.

Az első téma a több komponensű módosított Boltzmann-egyenlet hosszú idejű viselkedése. Ez a kinetikus elméleti analízis a kvázi-részecskéket körülvevő anyag hatásának egy egyszerű figyelembe vételét mutatja be. Erre úgy is tekinthetünk, mint a kinetikus leírás egy lehetséges kiterjesztésére sűrű rendszerek esetében.

Az analitikus és numerikus vizsgálatok kimutatták, hogy a módosítás általában a részletes egyensúlyi megoldás elvesztéséhez vezet. Ezt a problémát a módosító paraméterek energiasűrűségeen keresztüli visszacsatolásával lehet megoldani.

A második téma a nehézion-ütközések részecskehozamainak elliptikus aszimmetriájáról, az ún. „elliptikus folyásról” (elliptic flow) szól. Egy nem-centrális ütközési esemény kezdeti geometriai aszimmetriáját kötjük össze az elliptikus aszimmetria-faktorral egy lehetséges mikroszkopikus mechanizmust javasolva, mely lassuló dipólus-szerű sugárzó párok rendezett sokaságát használja. Az így keletkező sugárzás – legalábbis részben – a környező plazma hatására keletkezik. Az ilyenfajta elrendezés keltette sugárzási minta jelentős járulékot adhat az elliptikus folyáshoz. A sugárzási forrás geometriai kiterjedésének becslésére is sort kerítünk. Sajnos nem tudjuk megadni az effektus mikroszkopikus okait a QCD szabadsági fokainak a szintjén. Az említett sugárzási minta feno-

menologikus forrásának lehetséges gyökerét kutató részletes vizsgálatra van szükség.

A harmadik téma egy spin nélküli kvantum-csatorna folyékonyságának effektív térelméleti leírása. Ez legalaposabban körüljárt kérdés a disszertáción belül. Arra vagyunk kíváncsiak, hogy a kvázi-részecske spektrum milyen mikroszkopikus tulajdonságai teszik az anyagot folyékonyabbá – a transzportegyütthatók szempontjából. Először a kvázi-részecske koncepciójának általánosításával felépítünk egy effektív térelméletet. Ezt követően modell-spektrálfüggvényekkel demonstráljuk, hogy

- i)* nem csak a kvázi-részecske élettartamának rövidülése csökkenti az η/s folyékonysági mértéket.
- ii)* A töbrészecske-szórások kontinuum járulékanak megjelenése, és ezzel párhuzamosan a kvázi-részecske-pólus reziduumának csökkenése a folyékonysági mérték jelentős csökkenéséhez vezet.
- iii)* Még a legegyszerűbb, tulajdonképpen átlagtér közelítésben is alsó korlátot kapunk az η/s arányra, habár az nem univerzális, hanem az entrópia-sűrűség által megszorított.

A disszertációban feldolgozott három téma több okból is különálló: A nehézion-ütközés időfejlődésének különböző szakaszaihoz kapcsolódnak. A releváns fizika megragadásához is különböző eszközöket használnak. Van azonban egy közös vonás, ami mindhárom téma esetében kiemelhető: a felvázolt mikroszkopikus okok mindegyik esetben a közeg jelenlétéből eredeztethetők. A fenomenologikus kép mindhárom esetben az, hogy a kvázi-részecske-szerű mikroszkopikus szabadsági fokok valamiféle „közegen” haladnak keresztül, aminek a dinamikai leírását nem kívánjuk belevenni a modellünkbe. Az ebből kiemelkedő makroszkopikus viselkedés annak eredménye, ahogyan a mikroszkopikus szabadsági

fokok "próbára teszik" a közeget a mozgásuk során. A „közegbeli módosulás” koncepciója gyakran felbukkan a nehézion-ütközések elméletében. Egyelőre azonban sem a kvark–gluon-plazmát (a közeget), sem annak a részecskeszerű objektumokkal (pl. nagy-energiás partonokkal) való kölcsönhatását nem tudjuk első elvekből származtathatóan leírni. Az elméleteink csak a gyenge jet–közeg-csatolás esetén elfogadhatóak, vagyis nagy η/s esetén. Ebben a tartományban a partonikus szabadsági fokok kvázi-részecske jellege nem módosul számottevően. Folytatnunk kell tehát az effektív modell-alkotást, így haladva tovább azon a még meglehetősen hosszú úton, amely az erősen kölcsönható anyag még alapvetőbb megértése felé vezet.

3. Új tudományos eredmények – tézispontok

Most a disszertáció fő eredményeinek összefoglalása következik. Minden itt említett eredmény az általam egyénileg elvégzett kutatómunka eredménye, vagy olyan közös kutatásból származik, melyhez jelentősen hozzájárultam. Jeleztem a tézispontokhoz tartozó tudományos publikációkat is.

I. A részletes egyensúly vizsgálata több komponensű módosított kinetikus egyenlet esetén.

Megvizsgáltam a részletes egyensúlyi megoldás létezésének feltételeit a Boltzmann-egyenlet egy nem-extenzív módosításának esetében. A módosítás motivációját a közeg-effektusok figyelembe vétele adja.

A részletes egyensúlyi megoldás esetében az ütközési integrál nullával egyenlő minden fázistércella esetében. Egy komponensű rendszer esetében részletes egyensúly mindig létezik, összhangban a Jaynes-elvvel (vagyis ez a megoldás maximalizálja az entrópiát).

Az általam használt módosítás megváltoztatja a kétrészecske-ütközések

kinetikus energia kényszerét egy „kölsönhatási” tag hozzáadásával: $E_1 + E_2 + aE_1E_2 = \text{konst.}$

Két komponens (pl. A és B részecskefajták) esetén három fajta ütközési folyamatot kell kiegyenlíteni az egyensúlyhoz: AA , BB és AB . Megmutattam, hogy nem-egyenlő módosítási paraméterek esetében (pl. a_{AA} , a_{BB} és a_{AB}) nem létezik részletes egyensúlyi megoldás. Az ütközési integrál abban az esetben válhat nullává, ha a módosító paramétereket visszacsatoljuk a dinamikához, és az időfejlődés során azok kiegyenlítődnek, végső soron egy effektíve egy komponensű rendszert eredményezve.

II. A két komponensű rendszer numerikus analízise, skálázó megoldások termodinamikai interpretációja.

Az I-es pontban tett megállapítások alátámasztásához numerikus vizsgálatokat is végeztem. A két komponensű módosított Boltzmann-egyenlet numerikus vizsgálata során a megoldások egy skálázó seregét találtam, melyek alakja stacionárius. Egy rövid izotropizációs időt követően mindkét gázkomponens olyan időfüggő eloszlás ír le, mely csak az átlagos kinetikus energián keresztül függ az időtől. (Az átlagos kinetikus energia időfüggő ebben a modellben.)

Analitikus eszközök segítségével is megmutattam ennek a megoldásnak a létezését. Az eloszlásfüggvény stacionárius alakja arra utal, hogy a rendszer elő-termalizált: $f(E, t) = \frac{1}{\langle E \rangle(t)} \phi(E/\langle E \rangle)$. Ezért a változó összenergiájú gázkomponensek úgy interpretálhatóak, mint melegedő ill. hűlő termodinamikai testek, melyek termális kapcsolatban vannak a környezettel valamilyen kölcsönhatáson keresztül (melyet ebben az esetben a módosított energia-kompozíciós szabály reprezentál).

Az I-es és II-es tézispontokhoz tartozó publikáció az [1]-es.

III. Nem-centrális nehézion-ütközések elliptikus aszimmetri-

ájának fenomenologikus leírása

Kutatótársaimmal olyan fenomenologikus modellt készítettünk, amely képes a nem-centrális nehézion-ütközésekben keletkező részecskehozamok azimutális asszimmetriáját (elliptikus folyását) leírni. A modell fő eleme az a megfigyelés, hogy két töltött, egymás felé lassuló részecske olyan foton-spektrumot ad, mely hasonló a proton-proton és proton-nukleon ütközésekben megfigyelhetőhöz.

Lassuló részecske-párok geometriailag rendezett statisztikus sokaságát tekintve, mint a foton- vagy könnyű részecske-hozam forrását, egyszerű formulát adtam az elliptikus folyásra, mellyel kísérleti adatok is illeszthetők (három független illesztési paraméter felhasználásával). Fotonok és töltött hadronok elliptikus aszimmetriáját is elemeztem a kapott formula segítségével. Megbecsültem a fékezési sugárzás indukálta elliptikus asszimmetria mintázathoz tartozó kibocsátási tartomány geometriai paramétereit. Megfigyeléseinket a [2]-es publikáció foglalja össze.

IV. Transzportegyütthatók levezetése lineáris válasz közelítésben egy effektív térelméleti leírásból.

Egy, teljes egészében a kétrészecske korrelációs függvények által paraméterezett térelméleti modell segítségével levezettem a transzportegyütthatók lineáris válaszelméletbeli alakját a Kubo-formula felhasználásával. Ezt a fenomenologikus leírást a közegben mozgó sokrészecske-rendszer dinamikájának módosulása motiválja. Ugyancsak hasznos lehet a kritikus pont közelében fellépő nagy, hullámhosszú gerjesztések leírására.

A Keldyh-formalizmus segítségével zárt formulákat adtam a termodinamikai mennyiségekre és a transzportegyütthatókra.

V. Folyadék-gáz átmenet kiterjesztett kvázi-részecske képben.

Megvizsgáltam az η nyírási viszkozitás és az s entrópiasűrűség

hányadosát az effektív térelméletből kapott formulákkal. η/s jellemzi a nyírási deformációk relaxációjának gyorsaságát a fluiduum lokális termodinamikai egyensúlyához, vagyis az anyag folyékonyságának mérőszáma.

Különböző modell spektrálfüggvényeket használtam a folyadék-gáz átmenet parametrikus vizsgálatára. Azt találtam, hogy a spektrálfüggvény kontinuum-része, a kvázi-részecske-pólus mellett, fontos szerepet játszik a rendszer folyékonyságának kialakításában. Ha a kvázi-részecske-pólus kevésbé dominálja a spektrumot (a kontinuum járulék relatív súlyát növelve), a rendszer „folyékonyabban” viselkedik (η/s értéke csökken).

VI. Termodinamikai alsó korlát a nyírási viszkozításra az általánosított kvázi-részecske képbén.

Az előző két pontban is említett effektív térelmélet segítségével megvizsgáltam a nyírási viszkozítás alsó korlátját az entrópiasűrűség rögzített értéke mellett, valamint elemeztem az η/s -t minimalizáló spektrális állapotossűrűséget. A skalármező esetében az elérhető állapotok a nulla impulzus körül halmozódnak fel.

A IV, V és VI tézispontokban említett megfigyeléseket mind a [3]-as publikáció tartalmazza.

Publikációk listája

- [1] M. Horváth and T. S. Biró, Eur. Phys. J. Plus **129**, 165 (2014).
- [2] M. Horváth, T. S. Biró, and Z. Schram, Eur. Phys. J. A **51**, 75 (2015).
- [3] M. Horváth and A. Jakovác, Phys. Rev. D **93**, 056010 (2016).