

RELATIVISZTIKUS HIDRODINAMIKA A NEHÉZION-ÜTKÖZÉSEKBEN

Kurgyis Bálint
ELTE, fizikus hallgató

Bevezetés a nehézion-fizikába

A körülöttünk lévő látható világot a hétköznapi atomos anyag alkotja. Ha ezen anyag felépítését vizsgáljuk, megtalálhatjuk az atommagot és a körülötte lévő elektronokat. Az atommagot vizsgálva pedig felfedezhetjük annak belső szerkezetét, a protonokat és neutronokat. Közöséges körülmények között ennél tovább nem jutunk, azonban kellően nagy energiájú részecskékkel bombázva a protonok és neutronok belső szerkezetéről is képet kaphatunk. Így eljutunk az erősen kölcsönható kvarkokhoz és gluonokhoz, amelyeket hétköznapi körülmények között szabadon nem tudunk megfigyelni, csak az általuk alkotott részecskék, azaz hadronok formájában találkozunk velük. Kellően nagy hőmérséklet és sűrűség mellett viszont a hadronok képesek felbomlani, és így a kvarkok és gluonok forró egyvelegét kapjuk. Ilyen körülmények uralkodtak az Univerzumban közvetlenül az Ősrobbanás után – kevesebb, mint egymilliomod másodperccel. E nagyon rövid időszakban egész világunkat az erősen kölcsönható részecskék ősleve, a kvark-gluon plazma töltötte be. Ezen igen érdekes időszak vizsgálatát laboratóriumban kísérhetjük meg véghezvinni, „csupán” arra van szükségünk, hogy megfelelően reprodukáljuk az Ősrobbanás utáni Univerzumot. Ehhez „mini-ősrobbanásokat” hozunk létre, olyan módon, hogy elektronjaitól megfosztott, nehéz atommagokat gyorsítunk fel közel fénysebességre, majd e nehézion-nyalábokat összeütköztetjük. A nagyenergiás nehézion-fizika egyik legfontosabb eredménye az ütközésekben létrejövő kvark-gluon plazma felfedezése volt [1].

A maganyag ezen különleges, megolvadt halmazállapotát azóta is folyamatosan nagy erővel kutatják. Az egyik fontos kísérleti eredmény az volt, hogy kimérték, a nehézion-ütközésekben létrejövő közeg folyadékhoz hasonlóan viselkedik. Ezek után megmérhetjük e folyadék folyékonyságát, azaz viszkozitásának nagyságát. A kísérleti eredmények alapján a kvark-gluon plazma viszkozitása kisebb, mint bármilyen

más ismert folyadéké, így ez a lehető legtokéletesebb folyadék, amivel eddig a természetben találkoztunk. Ezen eredmények tükrében kézenfekvőnek tűnik a nehézion-ütközések időfejlődésének leírására a hidrodinamikát, mint effektív modellt alkalmazni, de hatáskörét szükséges tisztázni. A nehézion-ütközések időbeli lefolyását az 1. ábra illusztrálja. Az atommagok összeütközését gyorsan követve termalizálódik a közeg, és e pillanattól érvényes a hidrodinamikai időfejlődés mindaddig, amíg a közeg le nem hűl annyira, hogy a kvarkok és gluonok hadronokká álljanak össze, ez a folyamat a „kifagyás” vagy a hadronizáció. Ezután a létrejövő részecskéket tudjuk detektálni az ütközési pontok köré telepített hatalmas detektorrendszerekkel [1].

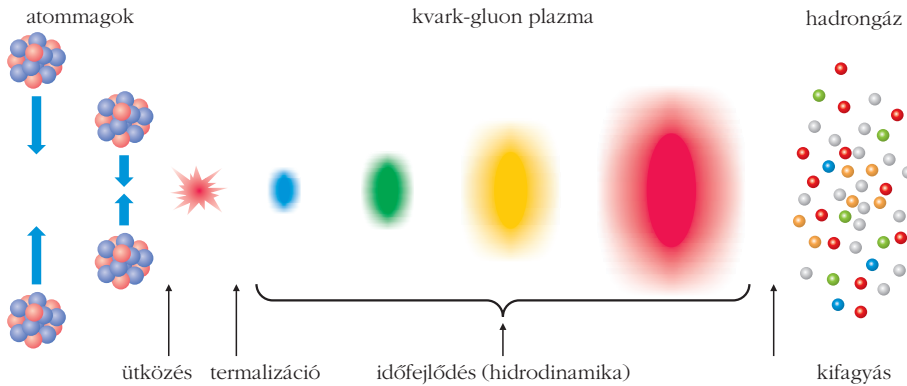
Relativisztikus hidrodinamika

A nehézion-ütközések leírásához a relativisztikus hidrodinamika egyenleteit kell megoldanunk. Ezek nehézsége miatt a legtöbb megoldás a rendszert modellező numerikus szimuláció. Azonban az időfejlődés mélyebb megértése miatt az analitikus megoldások is nagyon fontosak. Az analitikus megoldások keresésekor általában azzal a közelítéssel élhetünk, hogy tökéletes folyadékkal van dolgunk, azaz elhanyagoljuk az egyébként is nagyon kicsi viszkozitás hatását. Történetileg az első ismert megoldások *Lev Davidovich Landau* (1908–1968) és *Isaak Markovich Khalatnikov* (1919–), valamint *Rudolph C. Hwa* (1931–) és *James Bjorken* (1934–) nevéhez fűződnek. Ezek egy tér- és egy idődimenziót leíró megoldások voltak. Léteznek azonban három térdimenziót leíró megoldások is. Ezek közül az első realiztikus geometriájú, a nehézion-fizikában is fontos megoldás a relativisztikus Hubble-folyás volt [2], ami a kozmológiai Hubble-táguláshoz hasonló sebességprofillal rendelkező hidrodinamikai megoldás. A Hubble-folyás a nehézion-fizikában mért fotonok és hadronok eloszlásait is jól leírja [3], illetve többpólusú geometriájú általánosítása is létezik. Ebben a táguló rendszerben azonban nincsen gyorsulás és nyomásgradiens, amely a nehézion-ütközésekben egyes várakozások szerint jelen van. Így érdemes a Hubble-folyás olyan általánosítását keresni, ahol a rendszerben a nyomásgradiens és a gyorsulás hatását is tudjuk vizsgálni.

Ehhez a fizika egyik legszéleskörűbben alkalmazott módszerét, a perturbációs számítást alkalmaztuk. A perturbációs számítás során minden esetben egy ismert, már leírt rendszerből indulunk ki, majd a rendszerbe bevezetett kis zavar, azaz a perturbáció hatását és viselkedé-



Kurgyis Bálint 2016-ban kezdte meg egyetemi tanulmányait az ELTE TTK Fizika szakán. Nem sokkal ez után kezdett nehézion-fizikai témájú kutatást végezni *Csanád Máté* témavezetésével. 2017-ben ennek eredményeképp született a relativisztikus hidrodinamika témájú TDK dolgozata. Emellett az ELTE természettudományos szakkollégiuma, a Bolyai Kollégium és a PHENIX-Magyarország kutatócsoport tagja.



1. ábra. A nehézion-ütközések időbeli lefolyása.

használtunk, ahol a nyomás és az energiasűrűség között konstans együtthatós, lineáris kapcsolat van.

A fenti összefüggésekből általános esetben a perturbált egyenleteket kaphatjuk meg, majd egy konkrét, már ismert megoldást kiválasztva és behelyettesítve az adott rendszer perturbációjára vonatkozó egyenleteket kaphatjuk, ezek megoldásával megtalálhatjuk a keresett perturbációkat.

sét vizsgáljuk. A módszer nagy előnye, hogy egy egyszerű rendszerből kiindulva a bonyolultabb rendszer viselkedését is megérthetjük. Ilyen módon például álló folyadék esetén könnyedén megkaphatjuk a folyadékban terjedő nyomás és sűrűség hullámokat, mint az eredeti megoldáson terjedő perturbációkat. A perturbációszámítás rendje azt határozza meg, hogy a perturbációban milyen magas rendű tagtól kezdve tekintjük elhanyagolhatóan kicsinek a mennyiségeket. Ennek megfelelően elsőrendű perturbációszámítás esetén a perturbációban másod-, vagy magasabb rendű tagokat elhanyagolhatóan kicsinek tekinthetjük. Mi a relativisztikus Hubble-folyáson, mint alapmegoldáson terjedő elsőrendű perturbációkat vizsgáltuk.

A hidrodinamika nem tartalmaz belső skálát, vele ugyanúgy le lehet írni az Univerzum tágulását, mint a nehézion-ütközésekben keletkező kvark-gluon plazma folyását. Az elmélet kiindulópontja az a feltételezés, hogy a rendszerben az energia és az impulzus megmarad. Ha tökéletes folyadékot szeretnénk modellezni, akkor azzal a további feltételezéssel élhetünk, hogy a rendszerben nincsen viszkozitás és hővezetés. A hidrodinamika egyenletei a közeg nyomása, energiasűrűsége és sebessége között teremtenek kapcsolatot. Ha ezen egyenleteket csak önmagukban próbáljuk meg megoldani, hamar kiderül, hogy a rendszer még alulhatározott: a közeget jellemző mennyiségek közötti további összefüggésekre van szükségünk.

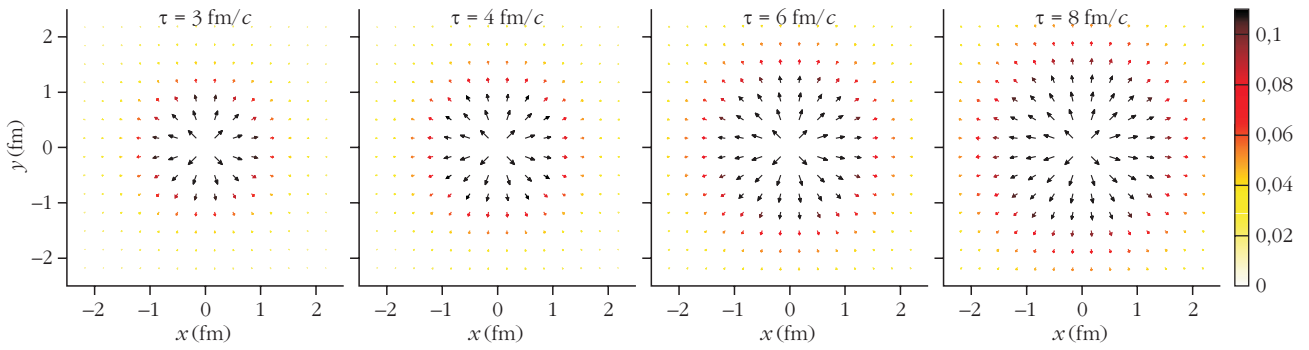
Az egyik ilyen lehetséges további összefüggés a közegebeli részecskék számának megmaradása lehet. Ekkor a részecskeszám-sűrűség és a részecskeáram között tudunk relációt felírni; az ilyen típusú megmaradási törvények gyakran előkerülnek a fizikában és a kontinuitási egyenlet nevet viselik. További egyenleteket kaphatunk termodinamikai összefüggésekből, ilyen lehet például a nyomást és az energiasűrűséget összekötő állapotegyenlet. Ez az egyenlet az, amely az adott anyagra vonatkozó mikroszkopikus információkat hordozza, ennek megfelelően a nehézion-ütközések hidrodinamikai modellezéséhez olyan állapotegyenletet kell használni, amely az erősen kölcsönható maganyagra jellemző. Erre az állapotegyenletre különböző numerikus számolások léteznek, azonban az általunk vizsgált esetben egy egyszerű, a nehézion-ütközésekre közelítőleg érvényes állapotegyenletet

A Hubble-folyás és annak perturbációi

A nehézion-ütközések leírására a már korábban is használt relativisztikus Hubble-folyást választottuk alapmegoldásnak, ami egy gyorsulásmentes és saját-időben önhasonló tágulást ír le. A hagyományos idő-koordináta helyett bevezettük a sajátidőt, amely a folyadék minden pontjában az adott ponttal együttmozgó rendszerben eltelt időt méri. A perturbációk vizsgálatával ezen a táguló kvark-gluon plazmacsoppon terjedő hullámokat tudjuk vizsgálni, amelyek révén a perturbált rendszerben már fellép gyorsulás. Ez hozzásegít minket ahhoz, hogy a gyorsulás hatását vizsgáljuk egy, a Hubble-folyáshoz közeli rendszerben. A megoldás természetesen csak perturbáció, így az a várakozásunk, hogy az ilyen módon bevezetett gyorsulás hatása kicsi lesz. A talált megoldások egy megoldásosztályt alkotnak, néhány szabad paraméterrel és függvénnyel. A perturbáció hatásának valós vizsgálatához egy konkrét esetet kell kiválasztanunk közülük.

Egy konkrét megoldás vizsgálata

Vizsgálódásunk tárgya a megoldás egy egyszerű, gömbszimmetrikus esete. A különböző mezőket vizsgálva általánosan azt találjuk, hogy a sajátidő-fejlődés során kicsi radiális távolságok és nagy sajátidőértékek esetén a perturbatív megoldás igen nagy járulékot ad az eredeti megoldáshoz, amely valamilyen szinten eltér az eredeti várakozásainktól. Azonban nagyon fontos, hogy ezen mezőket nem tudjuk közvetlenül megfigyelni, kísérletileg csupán a hidrodinamikai megoldásból származtatott mérhető mennyiségeken keresztül tudjuk vizsgálni az időfejlődést. A továbbiakban olyan modellparamétereket használtunk, amelyeket az eredeti Hubble-folyásból számolt mérhető mennyiségek kísérleti adatokra való illesztésével kaphatunk meg [3]. A perturbatív megoldásosztálynak ezen felül kettő paramétere van, a δ perturbációs paraméter (ez szabályozza a perturbáció „kicsinységét”) és a c dimenziótlan paraméter, amely integrációs állandóként került a rendszerbe. A négysebesség-



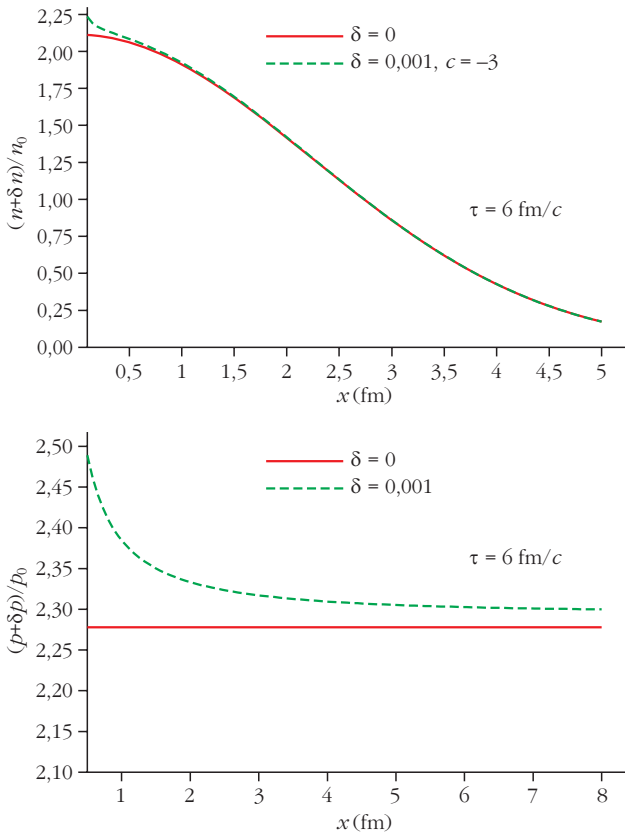
2. ábra. A négyessebesség-mező perturbációjának sajátidő-fejlődése. A perturbáció az időben láthatóan egyre növekszik.

mező perturbációjának sajátidő-fejlődését a 2. ábra illusztrálja. Látható, hogy a megoldás gömbszimmetrikus, illetve a perturbáció növekszik az idő előrehaladtával. A 3. ábrán pedig láthatjuk az eredeti, illetve a perturbált mezőket a nyomás és a részecskeszám-sűrűségek esetén. Ebben az esetben jól látható, hogy a perturbációk kis radiális távolságokon nagymértékben megváltoztatják a megoldást.

Mérhető mennyiségek

A megoldásból kiszámolhatjuk a kísérletileg is meghatározható mérhető mennyiségeket. Ebben az esetben ezt a számolást is analitikusan, közelítőleg végezzük el.

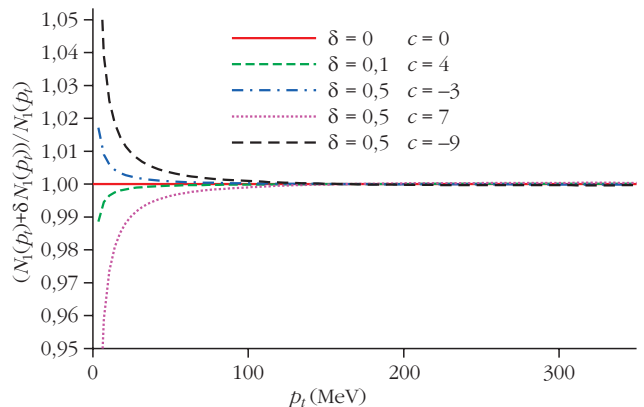
3. ábra. Fölül az eredeti és a perturbált részecskeszám-sűrűség, alul pedig az eredeti nyomásmező és a perturbált mező rögzített sajátidőnél. Látható, hogy a perturbációk kis radiális távolságokon igen nagy járulékot adnak az eredeti megoldáshoz.

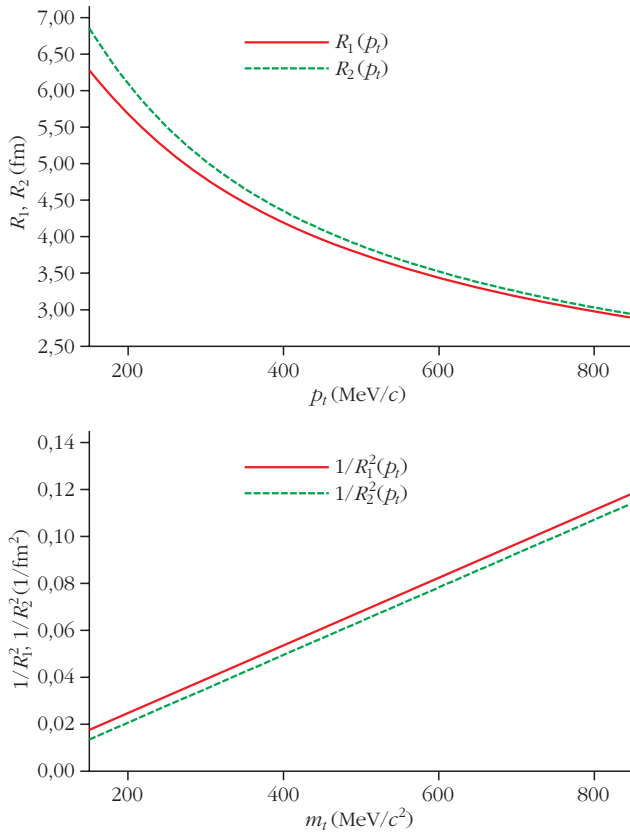


zük el. Ehhez a relativisztikus, termalizált közegre jellemző eloszlásnak (Jüttner-eloszlás) megfelelő forrásfüggvényt írhatunk fel, illetve feltesszük azt, hogy a kifagyás sajátidőben pillanatszerűen történik. A perturbációkat a hidrodinamikai egyenletekhez hasonló módon vesszük figyelembe. Az általános alakot behelyettesítve csak az elsőrendű tagokat tartjuk meg. Ez után az $N(p)$ egyrészecske impulzuseloszlást olyan módon kaphatjuk meg, hogy a forrásfüggvényt kiintegráljuk a téridő-koordinátákra. Az integrál elvégzéséhez Gauss-féle nyeregponthoz közelítést alkalmazhatunk, amelynek segítségével olyan szorzatalakú integrálokat tudunk kiszámolni, amelyek egyik tagja egy éles csúccsal rendelkező, míg a másik egy lassan változó függvény. Ezután a kapott impulzuseloszlást összehasonlíthatjuk az eredeti megoldásból számolt impulzuseloszlással. A 4. ábrán az eredeti és a perturbált eloszlások arányát láthatjuk különböző perturbációra jellemző paraméterek, valamint a korábban is használt, illesztésből származó modellparaméterek mellett. Ebben az esetben a perturbáció valóban csak kis járulékot ad az eredeti megoldásból számolt, megfigyelhető mennyiséghez képest.

A forrás méretét, azaz a nehézion-ütközésben létrejövő kvark-gluon plazmacsepp geometriai méretét jellemzi az úgynevezett HBT-sugár. Ez a mennyiség Robert Hanbury Brown (1916–2002) és Richard. Q. Twiss (1920–2005) után lett elnevezve, akik a róluk elnevezett HBT-effektust a rádiócsillagászatban fedezték fel, ahol intenzitáskorrelációkat vizsgáltak. Ké-

4. ábra. A perturbált és az eredeti egyrészecskeimpulzus-eloszlás aránya különböző modellparaméterek mellett.





5. ábra. Fölül a hidrodinamikai megoldásból származó HBT-sugarak az impulzus függvényében. Alul pedig a sugarak transzverz tömeggel való skálázása.

sőbb optikai távcsövek segítségével meg tudták határozni egy távoli, pontszerűnek látszó csillag (a Szíriusz) látszólagos méretét. Nagyjából ugyanekkor egy ezzel analóg módszert alkalmaztak a nagyenergiás fizikában is. Ez ma már gyakran használt módszer a nehézion-ütközések során létrejövő kvark-gluon plazma geometriájának feltérképezésére. A hidrodinami-

kai megoldásból is kaphatunk egy HBT-sugarat, amit – a korábbi esethez hasonlóan – összehasonlíthatunk az eredeti megoldásból származó sugárral, ezt mutatja az 5. ábra felső része. Alsó felén pedig a HBT-sugarak transzverz tömeggel való skálázását láthatjuk, amelyhez hasonló skálázást tapasztalunk a kísérleti adatokban részecskétől, centralitástól és ütközési energiától függetlenül. A transzverz tömeg egy részecskefizikában használatos kinematikai változó, amelyet az adott részecske tömegéből és a nyaláb-irányra merőleges síkban (transzverz irányban) mért impulzusából kaphatunk meg.

Összefoglalás

A fent tárgyalt perturbatív megoldásosztály segítségével, relativisztikus Hubble-folyás esetén vizsgálni tudjuk a gyorsulás és a nyomásgradiens szerepét a nehézion-ütközésekben. A talált megoldásosztály igen általános, ebből itt csak egy konkrét eset került bemutatásra, amiben láthattuk, hogy a kísérletileg is mérhető mennyiségek esetén a perturbációk csak kis járulékot adnak az eredeti megoldáshoz. Fontos továbbá, hogy a Hubble-folyásra alkalmazott módszer egy általánosabb megoldáskeresési módszer, amelyet a későbbiekben más hidrodinamikai megoldásosztályok perturbációinak keresésére is alkalmazhatunk.

Irodalom

1. Csanád Máté: A PHENIX detektorral az ősrobbanás nyomában. *Természet Világa* 2013. I. különszám 76
2. T. Csörgő, L. P. Csernai, Y. Hama, T. Kodama: Simple solutions of relativistic hydrodynamics for systems with ellipsoidal symmetry. *Heavy Ion Phys.* *A21* (2004) 73–84, arXiv:0306004
3. M. Csanád, M. Vargyas: Observables from a solution of 1+3 dimensional relativistic hydrodynamics. *Eur. Phys. J. A* *44* (2010) 473, arXiv:0909.4842