

Holográfia a részecskefizikában és a húrelmélet

Cikkünkben arra a kérdésre keressük a választ, hogy milyen elemi részekből épül fel a világ, és hogyan lehet ezek kölcsönhatásait egységes keretbe foglalni. Ismertetjük az egydimenziós elemi objektumokon alapuló húrelméletet, amely konzisztensen magában foglalja a négy alapkölsönhatást. A gravitáció kvantummos leírása szükségszerűen a húrelméletre vezet, amely az AdS/CFT sejtésen keresztül holografikus kapcsolatot teremt a gravitációs és mértékelméletek között. A holografikus dualitást kvantitatívan is használhatjuk olyan erősen csatolt rendszerek leírására, mint például a nehézion-ütközésekben kutatott kvark-gluon plazma.

Az anyagi világ elemi építőkövei már a görögöket is foglalkoztatták. Démokritosz úgy gondolta, hogy minden anyag elemi, oszthatatlan atomokból áll [1]. Ezzel szemben Zénon azt a nézőpontot képviselte, miszerint minden anyagdarab a végtelenségig tovább osztható: ahogy a folytonosan sűrű számegyenesen is minden szám között végtelen sok szám van. A görögöknek nem volt lehetőségük a vita eldöntésére, hiszen nem rendelkeztek megfelelő technikai apparátussal az anyag belső szerkezetének vizsgálatára. Ha lenne egy végtelenül erős nagyítónk, a görögök vitájában könnyen állást foglalhatnánk: csak vennénk egy tetszőleges tárgyat, ráfókuszálnánk, és onnan olvasnánk ki a választ. Habár a nagyítók tudománya sokat fejlődött az ókortól napjainkig, a kérdés megválaszolása korántsem ilyen egyszerű.

Az anyag belső szerkezetének feltárása szisztematikusan megközelíthető a következőképpen:

- első lépésként próbáljuk meg homogén összetevőkre bontani az anyagot,
- majd osztályozzuk ezen összetevőket tulajdonságaik alapján,
- végül az így elének táruoló rendet magyarázzuk meg elemi összetevőkből és azok kölcsönhatásaiból.

Nézzük meg konkrétan, hogyan lehet ezt végrehajtani. Az anyag kémiai módszerekkel homogén összetevőkre, elemekre bontható. Ezen elemek tömegük, kémiai tulajdonságaik alapján a Mengyelejev-féle periódusos rendszerbe foglalhatóak. Ezek lennének Démokritosz oszthatatlan atomjai? De hátha Zénonnak van igaza, és az atomok tovább oszthatóak. Mi állhat a periódusos rendszer hátterében? Megdöbentő módon, anélkül, hogy belenézni az atomokba, a periódusos rendszert levezethetjük csupán abból a feltetésből, hogy az atomok pozitív töltésű magból és velük elektromosan kölcsönható elektronokból állnak, amelyek a kvantummechanika törvényeinél tesznek eleget.

De homogén-e az atomok magja? Hányféle atommag van? Az atommagokat szintén lehet osztályozni tömegük és töltésük alapján. Ezen „atommagtáblázatot”, ismét nagyon egyszerűen levezethetjük feltételezve, hogy minden atommag pozitív töltésű protonból és semleges neutronból áll, és a magerők tartják egyben. A hidrogénatom például egy protonból és egy elektrontól áll. De lehet-e csak neutronból építkezni? Nem. A neutron önmagában nem stabil, a gyenge kölcsönhatásnak köszönhetően elbomlik protonra, elektrorra és anti-elektron-neutrínóra. *Neutrínó*, már meging egy újabb elemi részecske! De hányan vannak még?

Extrém körülmények között, pl. gyorsítóknak képesek vagyunk

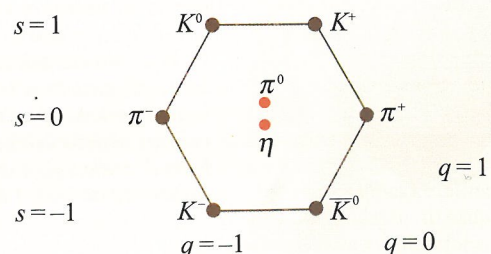
sok új elemi részecskét kelteni, *barionokat*, *mezonokat*. Ezeket ismét rendszerezhetjük, tömegük és töltéseik alapján. De értjük-e, hogyan magyarázható meg a mezonok táblázata (1. ábra) még elemibb összetevőkből és azok kölcsönhatásaiból?

Igen vonzó elképzelés volt a mezonokat olyan nyitott húroként elképzelni, mint a gitár húrja. Ezt a húrt megpörgetve kvantumosan csak diszkrét fogási lehetőségei lennének, amelyek mind más mezonnak felelnének meg. Egyre gyorsabb forgásokhoz egyre nagyobb tömegű részecske tartozna, és a részecskék tömegének négyzete arányos lenne perdületükkel (2. ábra). Az elmélet hibája, egyrészt, hogy megjósol egy kettes spinű, nulla tömegű mezont, amelyet eddig még nem láttak, másrészt, hogy a mezonok nincsenek pontosan rajta a lineáris trajektóriákon.

A részecskefizika *Standard Modellje* minden eddig talált részecskét (barionokat, mezonokat stb.) fel tud építeni három alapvető részecskecsaládból és azok antirészecskéiből. Az első család vesz részt a minket körülvevő anyag megformálásában, amelyet a felső és alsó kvarkok (up/down), az elektron és az elektron-neutrínó alkotnak. Ehhez járul még két másik család is, úgy, hogy a három családot ismét egy táblázatba rendszerezhetjük. Ezen részecskék úgy alakítják világunkat, hogy kölcsönhatást hordozó részecskéket cserélnek. Az erős kölcsönhatás részecskéi a *gluonok*, a gyengéé a W és Z bozonok, míg az elektromágneses kölcsönhatásé a *photonok* [3]. Mindezen kölcsönhatások egy-egy mértékkelmélettel írhatóak le, amelyekhez rendre az SU(3), SU(2) és U(1) csoportok tartoznak.

A részecskefizika Standard Modellje ugyan megmagyarázza az anyag felépítését, de az erősen kölcsönható folyamatokat már nem tudjuk kiszámolni. Ha például a Nagy Hadronütköztetőben

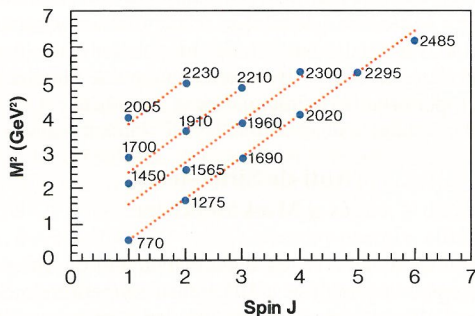
1. ábra. Mezon-oktett. Mezonok töltéseik szerint rendszerezve



összelövünk két nehéz iont, akkor nem tudjuk az összetevők erős kölcsönhatása alapján megjósolni, hogyan fog lezajlani az ütközési folyamat.

A legérdekesebb nyitott kérdés azonban az, hogy a „részecskefizikai periódusos rendszer” [3] már a démokritoszi oszthatatlan „atomokat” tartalmazza-e, vagy megint Zénonnak van igaza, és ezen táblázat is levezethető valami elemibb összetevőkből és azok kölcsönhatásaiból. Sajnos, erre az izgalmas kérdésre még nincs válaszunk, de ennek megválaszolása minden elméleti részecskefizikus álma. Ilyen elméleten dolgozott többek között Einstein is utolsó éveiben. Szeretnénk hinni, hogy a Standard Modell nem a végső elmélet, ugyanis az elmélet egyik legkompaktabb felírására is egy sűrűn írt A4-es lapra van szükségünk. Ezzel szemben a Standard Modellből kimaradt gravitáció einsteini megfogalmazása egyetlen sor. Szeretnénk egy olyan esztétikus, konzisztens kvantumelméletet találni, amely egyszerűbb a Standard Modellnél és a gravitációt egyesíti az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatással egy kvantumos elmélet keretei között.

Miért fontos kérdés, hogy a Standard Modellt és a gravitációt egy „szuperelméletbe” rendezzük? A Standard Modell kölcsönhatásai a kvantummechanikán, illetve az abból kifejlesztett kvantumtérelméleten alapulnak, amely a részecskék kis skálájú kvantumos leírására épül. A gravitációs terek elmélete, a relativitáselmélet a téridő geometriájára épül, amely nagy skálákon dominál az Univerzumban. A csillagok és galaxisokon kívül olyan egzotikusabb objektumokat is leír, mint például a Világegyetemben nagy



2. ábra. Mezonok tömegnégyzete perdületük függvényében [2]

számban megfigyelhető fekete lyukak. A fekete lyukak közelében a gravitációs terek erőssége olyan nagy, hogy a klasszikus fizika törvényei szerint minden részecske, amely eléri a fekete lyukat körülvevő eseményhorizontot, a fekete lyukba folytatja pályáját. Stephen Hawking azonban kimutatta, hogy a kvantummechanika törvényei szerint az eseményhorizont közelében a vákuumfluktuációk következtében keletkező részecske-antirészecske párok feketetest-sugárzást generálnak. A fekete lyuk hőmérséklete e Hawking-sugárzáshoz rendelhető hőmérséklet.

A fekete lyukak fizikája tehát olyan terület, ahol a részecskefizika törvényeit erős gravitációs terek esetében kell megértenünk, és az alapkölcsönhatások egységes elméletbe foglalása elsődleges fontosságúvá válik. Annál is inkább így van ez, mert a fekete lyukak belsejében a téridő görbülete egyre nagyobb lesz, végül a végtelenhez tart, azaz szingulárisává válik. A szingularitás közelében fellépő nagyon kis skálán pedig a klasszikus geometria, amelyre az általános relativitáselmélet épül, többé nem jól definiálható. Itt belépünk abba a tartományba, ahol a geometria is a kvantummechanika törvényeinek, mint például a Heisenberg-féle határozatlansági relációnak kell, hogy engedelmesskedjen, vagyis meg kell értenünk a gravitációs terek kvantumos leírását. A kvantumgravitáció leírására az egydimenziós fundamentális objektumok elmélete, a hürelmélet szolgáltat keretet.

A húrok elméletét eredetileg a mezonok spektrumának és szóródásainak magyarázatára dolgozták ki. A modell szerint egy húr feszül a mezonokat leíró kvark és anti-kvark pár között. Amint ezen húrok a téridőben száguldanak, egy felületet síroznak. A pont-részecske téridőbeli mozgása során úgy halad át egyik pontból a másikba, hogy a világvonalának hossza minél kisebb legyen. Ezzel párhuzamban a húr úgy mozog, hogy a világlepedőjének felülete legyen minimális. Ezen hürelmélet legnagyobb hibája nemcsak az volt, hogy megjósolt egy nulla tömegű, kettes spinű mezont, hanem, hogy konzisztens kvantumelmélete csak 26 dimenzióban lehetséges.

Az első probléma egy zseniális megoldása az, ha a kettes spinű részecskét a gravitáció kvantumának képzeljük. Érdekes módon a zárt (befőttes gumi alakú) húrok alacsony energiás – a mi világunk energiaskáláján látható – viselkedése megegyezik Einstein általános relativitáselméletének 26 dimenziós általánosításával. Ezen modell azonban nem tartalmaz fermionokat és alapállapota egy tachionikus részecske, amelynek tömegnégyzete negatív és a fénysebességnél gyorsabban halad.

A hürelméletet fermionokkal való kibővítésének a legszebb módja, ha a bozonok és a fermionok szimmetrikus szerepet kapnak. Ezen *szuperszimmetria* lehetővé teszi, hogy a tachiontól megszabaduljunk, sőt a kritikus dimenziót is 10-re csökkenti.

Összefoglalva tehát ezen szuperhürelmélet elegáns választ ad a görögök dilemmájára: Eszerint csak egyféle elemi részecske van, ami nem pontszerű, hanem egydimenziós nyílt vagy zárt húr. Minden részecske, legyen az anyagi részecske vagy kölcsönhatást szállító, ezen elemi húr különböző rezgése. Ahogy a gitárhúr rezgése különböző hangoknak, úgy az elemi húr rezgése különböző részecskéknek felelnek meg. Az elmélet szépségét az adja, hogy sikeresen egyesíti az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatást a gravitációval egyetlen kvantumelmélet keretei között. A hürelmélettel mind Démokritosz, mind pedig Zénon elégedett lehetne. A húr maga az elemi oszthatatlan objektum, viszont egyre nagyobb energiákon (egyre kisebb távolságskálán) ránézve mindig találunk új részecskéket, amelyek a felharmonikusoknak felelnek meg. A hürelmélet hátránya, hogy az elmélet belső konzisztenciája rögzíti a világ dimenziószámát tíznek (kilenc térbeli és egy idő).

Eddigi tapasztalataink alapján a világ négydimenziós (három térbeli és egy idő). A hürelmélet keretein belül tehát meg kell magyaráznunk, mi történt a másik hat dimenzióval. Egy szemléletes elképzelés, hogy ez a hat dimenzió egyfajta nagyon kicsi kompakt felületre van felcsavarodva, ahová mi nem tudunk méretünknel fogva behatolni. Sajnos, erre a kompaktifikációra nagyon sok, szinte végtelen számú matematikai lehetőségünk van, és a hürelmélet egyik aktívan kutatott területe a lehetséges konzisztens világok feltérképezése.

Kvantumgravitáció mint hürelmélet

Ha megkíséreljük a gravitációs terek kvantumelméletének felépítését, bevezethetünk egy kettes spinű részecskét, a *gravitont*, amely a gravitációs kölcsönhatást közvetíti. Két részecske gravitációs kölcsönhatása például leírható a részecskefizikából jól ismert Feynman-diagramok segítségével. A kölcsönhatás erőssége a *G* newtoni gravitációs állandóval arányos, melynek mértékére bevezethetjük a Planck-tömeget

$$G = 1/M_p^2.$$

Dimenziós okokból könnyen láthatjuk, hogy az első kvantumgravitációs korrekció nagyságrendje (dimenziótlan egységekben) $(E/M_p)^2$, vagyis a Planck-tömegnél magasabb energiákra a perturbációs számítás érvényét veszti. Minden további graviton hozzá-

adásával pedig az amplitúdók egyre erősebben divergálnak, vagyis a gravitáció ilyen, konvencionális módon definiált kvantumelmélete nem renormálható [4].

A fizikában ilyenkor a természetes magyarázat az, hogy egy adott energiaskála után az eddig használt gravitációs elmélet érvényét veszti, és új fizika kerül a látókörünkbe. A gravitáció kvantálásának problémája olyan elvi kérdés, amelynek feloldásához valamely eddigi fizikai alapfeltevésünket meg kell változtatnunk. A húrelmélet szerint a részecskék kis skálán való pontszerű leírását kell elvetnünk.

A húrelmélet szerint az elemi részecskék kis skálán egydimenziós objektumokkal, húrokkal írhatók le, amelyeknek nagyságrendi skálája a Planck-hosszúság

$$l_p = 1/M_p = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m.}$$

Az elmélet fundamentális szabadsági fokai a nyílt és zárt húrok, amelyek kölcsönhatnak egymással. Az elemi részecskék a fundamentális húrok kvantummechanikai spektrumában jelennek meg. E spektrum a többi részecske mellett természetes módon tartalmaz egy kettes spinű részecskét, a gravitont, tehát a gravitáció a többi kölcsönhatással természetes módon egységes leírásban jelenik meg. A húr hosszúságskála bevezetése pedig a gravitáció pontszerű képből adódó divergenciákat törli el, a gravitáció ilyen módon kvantálhatóvá válik. Más, konzisztens módszer jelenleg a gravitáció kvantummechanikai leírására nem létezik. A húrelmélet a jelenleg ismert *egyetlen* elmélet a kvantumgravitáció leírására.

Húrelmélet és holográfia

A jelenlegi húrelmélet olyan szerteágazó elméleti konstrukció, amelynek területe a matematikai kérdésektől (mint például a Calabi-Yau-terek matematikája, vagy a csomóinvariánsok elmélete) terjed a térelméleteken át az alkalmazásokig. Húrelméleti sejtéseket alkalmaznak a RHIC kvark-gluon plazma kísérleteinél, a húrelmélet használható a hidrodinamikai egyenletek tanulmányozására [5], és a mai húrelmélet a kondenzált anyagok fizikájának határait feszegeti [6].

A húrelmélet hatókörének ilyen mértékű tágulása egy olyan elméleti felfedezésen alapul, amely méltán nevezhető az elméleti fizika egyik legjelentősebb eredményének [7]: *Az AdS/CFT¹ sejtés kimondja, hogy a húrelmélet a tér egy tartományában leírható a tartomány határán lévő duális térelmélettel.*

A sejtés a *holográfia* gondolatán alapul. Ahhoz, hogy erről képet nyerjünk, térjünk vissza a fekete lyukak fizikájához. Ahogyan említettük, a fekete lyukak a Hawking-sugárzásból adódó hőmérséklettel jellemezhetők, és mint termodinamikai rendszerek, entrópia is rendelhető hozzájuk. Ha valamely anyag a fekete lyukba esik, a fekete lyuk felülete növekszik. Így a fekete lyuk Bekenstein-Hawking-entrópiája az eseményhorizont felületével arányos

$$S = A/4G,$$

ahol G a gravitációs állandó. Az entrópia a statisztikus fizikában a mikroállapotok számát (n) méri,

$$S = \log n.$$

Képzeld el, hogy ezt az entrópiát egy, a tartományon definiált lokális kvantumelmélettel szeretnénk leírni. Azonban egy ilyen elmélet entrópiája mint extenzív mennyiség a térfogattal arányos, nem a tartomány felületével. Gondoljunk itt például egy ideális gázra, melynek entrópiája a térfogattal arányos, $S \sim VT^3$, ahol T a gáz hőmérséklete. Tehát a gravitációs rendszer leírása nem képzelhe-

tő el a tartomány belsejében lévő lokális kvantumelmélettel. Ha azonban egy, a d -dimenziós *tartomány határán* élő lokális kvantumelméletre gondolunk, ennek entrópiája az eggyel alacsonyabb dimenziós térfogattal skálázik, vagyis arányos $V_{d-1} \sim A_d$ -vel. Ez a *holográfiai elvre* [8] enged következtetni, miszerint *A gravitáció kvantumelmélete valamely térfogatban leírható egy annak határán lévő lokális kvantumelmélettel, amelyben kevesebb mint egy szabadsági fok van Planck-felületenként.*

Az AdS/CFT-sejtés a holográfiai elv konkrét megvalósítása, hiszen a tartományon definiált húrelmélet alacsony energiákon Einstein típusú gravitációs elméletre redukálódik. A kapcsolat a határon lévő térelmélettel *duális*, vagyis a térelméleti leírást akkor használhatjuk, ha annak csatolási állandója kicsi, és a perturbációs számítás szerint Feynman-diagramokkal sorba fejthetjük. Ebben a tartományban a térfogatunk belsejében élő duális gravitációs leírás erősen csatolt, vagyis a klasszikus gravitációs tartományon kívül vagyunk, ahol a gravitáció kvantumelméletét, a húrelméletet kell alkalmaznunk. Ha azonban a tartományunkban a klasszikus gravitáció határesetben számolunk, ez a térelméletek erősen csatolt tartományának felel meg.

Ilyen módon kettős eszköz került a kezünkbe, hiszen a sejtést egyrészt alkalmazhatjuk erősen csatolt fizikai rendszerekre, amelyek duális leírását a klasszikus gravitáció eszközeivel megkonstruálhatjuk. Ezen alapulnak például a kondenzált fizikai rendszerek erősen csatolt tartományait megcélzó duális gravitációs modellek. Másrészt a térelmélet gyenge csatolásnál a húrelmélet szerkezetére enged rálátást abban a tartományban, amelyre a húrok perturbációs számítása már nehezen kiterjeszhető. Nem utolsósorban pedig a sejtés elvi jelentősége is nagy, hiszen nem kevesebbet mond ki, mint azt, hogy a teljes húrelmélet *ekvivalens* egy a határon lévő térelmélettel. Ilyen értelemben a térelmélet a húrelmélet nem-perturbatív definíciójának is tekinthető.

Anti-de Sitter-terek és a Minkowski-tér

A gravitációs elmélet a sejtés alapesetében anti-de Sitter-tereken definiált, egészen pontosan a IIB típusú szuperhúrelméletet tekintjük egy olyan téren, ahol a tér minden pontján egy ötdimenziós gömb helyezkedik el, vagyis a tér $\text{AdS}_5 \times S^5$.

Erre azért van szükség, mert a szuperhúrelmélet matematikai konstrukciója tíz dimenzióban konzisztens. A gravitációs elmélet azonban effektíven leírható az ötdimenziós anti-de Sitter-téren, amely egy hatdimenziós sima térbe ágyazott

$$ds^2 = -dy_0^2 - dy_5^2 + dy_1^2 + dy_2^2 + dy_3^2 + dy_4^2$$

hiperbolaként definiálható:

$$-y_0^2 - y_5^2 + y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2 = -R^2,$$

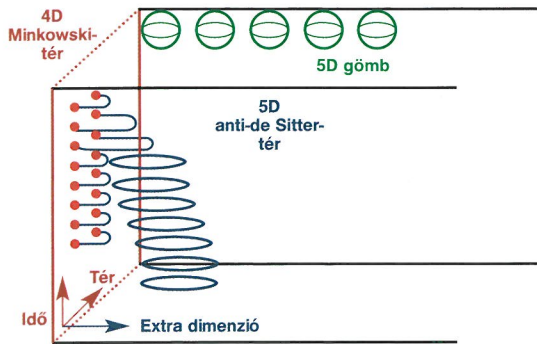
ahol R a tér sugara. Hasonlóan, ahogy az ötdimenziós S^5 gömböt is beágyazhatjuk a hatdimenziós euklideszi térbe:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 + x_6^2 = R^2.$$

Az AdS-tér (Poincaré-tartományának) határa négydimenziós Minkowski-térrel reprezentálható. Tehát az AdS-tér gravitációs elméletének duális térelmélete a jól ismert négydimenziós Minkowski-téren definiált. Az anti-de Sitter-terek szimmetriacsoportjából következően ez a térelmélet konform szimmetriájú, és mivel a szuperhúrelmélettel duális, szuperszimmetrikus (3. ábra).

A sejtés köre azonban az alapesetnél ma már jóval tágabban értendő, és léteznek olyan alkalmazásai, amelyekben a szóban forgó térelmélet nem konform és nem is szuperszimmetrikus. Például a hőmérséklet és a kémiai potenciál bevezetése a térelmélet megsejtíti a szuperszimmetriát, és ez a duális gravitációs elméletben is elvégezhető (itt egy bizonyos típusú hőmérsékletű fekete lyukat tanulmányozunk).

¹ AdS/CFT az anti-de Sitter/Conformal Field Theory (anti-de Sitter/konform térelmélet) rövidítése.



3. ábra. Az AdS/CFT-sejtés szemléltetése. Minden pont fölél egy ötdimenziós (zöld) gömböt kell képzelnünk. A négydimenziós (piros) Minkowski-tér az extra (kék) dimenzióval kiegészítve alkotja az anti-de Sitter-teret. A nyílt hurok végei a peremes világ részecskéi. A zárt hurok effektív elmélete a gravitáció

D-bránok

Eddig még nem szóltunk arról, az AdS/CFT-sejtés milyen módon bizonyítható. A dualitási kapcsolat miatt a sejtés közvetlen matematikai bizonyítása rendkívül nehéz probléma. Matematikai bizonyításának akadálya, hogy sem a szóban forgó húrelmélet, sem a releváns térelméletek teljes, minden csatolásnál érvényes nem-perturbatív leírását nem ismerjük. Azonban az AdS/CFT-sejtés a húrelmélet nem-perturbatív szabadsági fokai, a *D-bránok* segítségével levezethető. A *D-brán* kép megértéséhez tudnunk kell, hogy a fundamentális hurok lehetnek nyíltak vagy zártak is. A zárt hurok természetesen periodikusak, a nyílt hurokhoz azonban többféle határfeltételt is választhatunk. Rögzíthetjük végüket például a tér egy *p*-dimenziós hiperfelületén. A kvantumelméletben ez a hiperfelület fluktuál, és egy nem perturbatív objektumot, a *D_p-bránt* írja le.

Az AdS/CFT-sejtés levezetésében nagy számú, *N* darab *D-brán* veszünk, és vizsgáljuk a *D-bránok* alacsony energiás effektív elméletét. A nyílt hurok szempontjából, egy, a *D-bránok* térfogatán lévő szuper-Yang-Mills-elméletet kapunk, *SU(N)* szimmetriacsopottal.

Másrészt ugyanezeket a *D-bránok*at leírhatjuk a zárt hurok szempontjából is, ahol az alacsony energiájú közelítésben szoliton jellegű szuperszimmetrikus megoldásokként jelennek meg. A zárt hurok alacsony energiás elmélete Einstein-gravitációt tartalmaz tenzorterekhez csatolva, melyek alatt a brán töltött. Így ez az elmélet effektíven egy gravitációs elmélet lesz. A bránok száma itt a releváns geometria, az anti-de Sitter-tér sugarában kódolt. A nyílt és zárt hurok közötti duális kapcsolat az AdS/CFT-sejtés fizikai származtatásának alapja.

A *D-bránok* a húrelmélet más alapkérdésiben is fontos szerepet játszanak. A fekete lyukak termodinamikájánál megemlítettük, hogy entrópiájuk mikroállapotokból írható le. Ezek a mikroállapotok egyes szuperszimmetrikus fekete lyukak esetében egzaktul megszámlálhatóak *D-brán* állapotok segítségével, ami a húrelmélet egyik legfontosabb általános érvényű eredménye [9].

A holografikus sejtés alkalmazásai

A sejtés forradalmasította a húrelméletet, és hangsúlyoznunk kell, hogy a gravitációs és a térelméletek közötti holografiai kapcsolat az egész elméleti fizika számára nagy jelentőséggel bír. Napjaink egyik legérdekesebb kutatási irányzata olyan konkrét, *kísérletekkel is tanulmányozható* fizikai rendszerekre keresi a sejtés alkalmazhatóságát, melyek *erősen csatolt térelmélettel* írhatóak le. A fizikában az erős kölcsönhatások tipikus példája mellett igen sok más erősen csatolt rendszert is találhatunk. A kondenzált anyagok fizikájában releváns rendszerek például a szupravezetők, az ala-

csony dimenziós fémek, vagy akár olyan, hosszú ideje tanulmányozott hidrodinamikai jelenségek, mint a turbulencia.

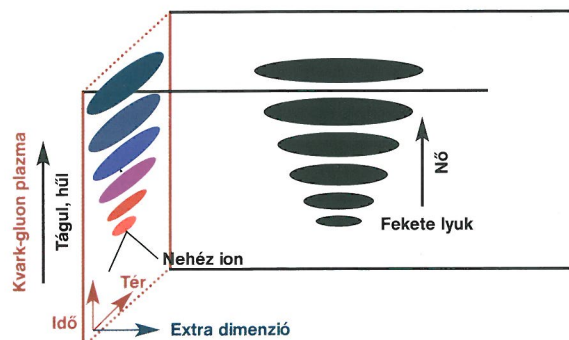
Habár ennek a kutatási irányzatnak nemzetközi szinten alig néhány éves a múltja, máris olyan fontos, kísérletekhez kapcsolódó eredmények születtek, amelyek például hasznos intuíciót nyújtanak a brookhaveni nehézion-ütközésekkel előállított új anyagállapot [10] hidrodinamikai leírásában [11].

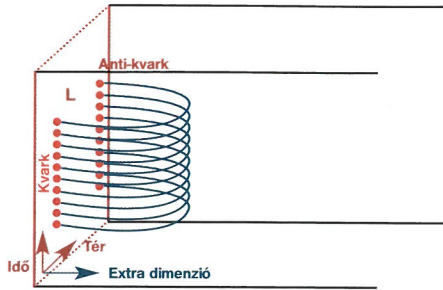
Az AdS/CFT-sejtésben az ötdimenziós anti-de Sitter-tér és az ötdimenziós gömb szorzatán definiált húrelmélet ekvivalens az ezen tér határára előálló négydimenziós mértékelmélettel. A négydimenziós elmélet hasonlít a standard modellbeli erős, gyenge és elektromágneses elméletekre abban az értelemben, hogy ebben is vannak kvarkok, gluonok, sőt még a Higgs-bozonhoz hasonló skalárok is. Korábbi megjegyzésünknek megfelelően a szuperhúr 10 dimenziója közül 5 egy ötdimenziós gömbre van felcsavarva. A maradék öt dimenzió nagy, amelyből négyet a Minkowski-tér foglal el. Viszont ami meglepő, hogy az utolsó extra dimenzió is nagy, de oda csak a hurok és a gravitáció tud behatolni, a nyílt hurok végei – a kvarkok, gluonok és skalár bozonok – már nem. A Minkowski-tér tehát az ötdimenziós anti-de Sitter-tér pereme, míg a rajta élő 4 dimenziós térelmélet az 5 dimenziós húrelmélet hologramjának tekinthető. Mindkét leírást használhatjuk a fizikai folyamatok kiszámítására, az eredménynek ugyanannak kell lennie.

Ez a holografikus megfeleltetés duális abban az értelemben, hogy ha a négydimenziós modell erősen kölcsönható, akkor az ötdimenziós világban a gravitáció klasszikus. Ha viszont a gravitáció kvantumos, akkor a négydimenziós elmélet gyengén csatolt. Mivel mind a klasszikus gravitációt, mind pedig a gyengén csatolt mértékelméleteket jól ismerjük a dualitás eszközt ad a kezünkbe ez idáig elérhetetlen tartományok kvantitatív leírására.

Nézzük például a Nagy Hadronütköztetőben keletkező „forró” kvark-gluon plazma állapotot! Mint korábban említettük, az erős kölcsönhatás „erős” volta megakadályoz bennünket abban, hogy a plazma dinamikáját leírassuk. Magas hőmérsékleten a kvarkok és gluonok viselkedése az AdS/CFT-sejtésben megfogalmazott modellben nagyon hasonló a kísérletekben megfigyelt nehézion ütközésekben létrejövő plazmaállapotra. A holografikus dualitás segítségével leképezhetjük a 4-dimenziós peremen lezajló folyamatot egy 5-dimenziós gravitációs folyamatra. Két nehézion ütközése, a kvark gluon plazma létrejötte és annak tágulása és hűlése a gravitációs képen azt jelenti, hogy két gravitációs lökeshullám találkozásakor egy fekete lyuk keletkezik, amely az idő múlásával növekszik (4. ábra). A leírás kvantitatív is tehető. Az 5-dimenziós gravitációs Einstein-egyenletek a holografikus peremen a sűrűdésos relativisztikus hidrodinamika egyenleteinek felelnek meg. Ezek ugyanazok az egyenletek, amelyeket a genfi vagy brookhaveni ütköztetőben a kvark-gluon plazma tágulásának és folyásának leírására használnak.

4. ábra. Nehézionok ütközése a holografikus képen. A 4-dimenziós peremen az ütközés során kvark-gluon plazma keletkezik, amely tágul és hűl. Az extra dimenzióban eközben egy fekete lyuk formálódott, amely egyre nő





5. ábra. Mezon a holografikus képben. A kvark-antikvark pár energiáját a közöttük feszülő húr minimális felületének nagysága adja

Érdekes visszalátogatnunk a mezonok húrelméleti leírásához. Korábban úgy képzeltük, hogy a mezonok négydimenziós nyílt hurok gerjesztett állapotai. Majd láttuk, hogy kvark és antikvark párokból épülnek fel. A holografikus képünk a két leírást ötvözi. Eszerint a mezonok igenis kvark-antikvark párokból állnak, de ezek nem mások, mint nyílt hurok végződésai. De míg korábban a nyílt hurok a Minkowski-téren feszültek, addig a holografikus leírásban azok az extra ötödik dimenzióba nyúlnak be. A kvark-antikvark pár energiája úgy fog függni a távolságtól, ahogy azt az extra dimenziós húr megszabja. Vagyis a téridőben a nyílt húr olyan alakot vesz fel, hogy a felületét minimalizálja (5. ábra). Ezen minimális anti-de Sitter-térbeli felület nagysága adja meg a kvark-antikvark pár energiáját.

Különböző érdeklődésre tart számot a kondenzált anyagok erősen csatolt rendszereinek húrelméleti, AdS/CFT-holográfián alapuló leírása. Az e téren felmutatott eredmények a kondenzált anyagok fizikája szempontjából azért lehetnek jelentősek, mert az AdS/CFT-sejtésen alapuló duális elmélet éppen abban a tartományban ad új eredményeket, mely konvencionális térelméleti módszerekkel nem közelíthető meg. Ezáltal a kondenzált anyagok fizikájának leírásába új módszereket vezetünk be, amelyek új rálátást és eredményeket nyújtanak. Az AdS/CFT-sejtés és a hozzá kapcsolódó húrelmélet szempontjából pedig igen nagy jelentőségű a kísérletekkel való kapcsolatteremtés és a sejtés esetleges kísérleti igazolása.

Általánosságban elmondható, hogy a szilárdtestfizikai rendszerek kvantum-fázisátalakulása során a kritikus pont környéki rendszer erősen csatolt. E rendszerek tehát nem írhatóak le gyengén csatolt szabadsági fokokkal, elméleti leírásuk ezért nem ismert, és modellezésük a gyakorlatban nagy jelentőségű. Gondoljunk csak a magas hőmérsékletű szupravezetők [12], vagy a mostanában nagy érdeklődéssel kísért ultrahidegatom-kísérletekre [13]. A kvantum-kritikus pont környékén a rendszer skálainvariáns, és ez az a tartomány, ahol a szimmetriák alapján az AdS/CFT-holográfiáival a rendszer gravitációs leírását kereshetjük.



Bajnok Zoltán (1967) az MTA Lendület Holografikus Kvantumtérelmélet Csoport vezetője. 1991-ben szerzett diplomát az ELTE fizikus szakán. 1997-ben lett a fizikai tudományok kandidátusa, 2011-ben az MTA doktora. Fő kutatási területei a kvantumtérelméletek, Casimir effektus, rács modellek, AdS/CFT megfeleltetés különös tekintettel ezek integrálható aspektusaira. E-mail: bajnok.zoltan@wigner.mta.hu



Sinkovics Annamária jelenleg az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékének tudományos főmunkatársa. PhD-fokozatát 1999-ben szerezte a University of Michiganon, ezt követően posztdoktori kutatóként dolgozott a University of Wales-en (2000–2002), a University of Amsterdamon (2002–2005) és Marie Curie európai posztdoktori ösztöndíjként a Cambridge-i Egyetemen (2005–2008). 2008–2012-ig a Cambridge-i Egyetem Alkalmazott Matematika és Elméleti Fizika tanszékének (DAMTP) tagja, és az egyetem Newnham Kollégiumának oktatója volt. 2012 szeptemberétől az Elméleti Fizikai Tanszék akadémiai kutatócsoportjának tagja. Kutatási területe a húrelmélet, és annak matematikai és térelméleti vonatkozásai. Kutatásainak témája jelenleg a topologikus húrelmélet, mely a húrelmélet matematikai szerkezetére nyújt rálátást. Kutatásainak további iránya a húrelmélet azon gravitációs megoldásainak elméleti megalapozása, amelyek a kondenzált anyagok fizikájában erős csatolási jelenségeket modellezhetnek.

Az utóbbi években a húrelméletben ez irányban áttörés történt: húrelméleti, AdS/CFT-holográfián alapuló modellek születtek a kondenzált anyagok olyan jelenségeinek leírására, mint a magas hőmérsékletű szupravezetés [14] vagy a nem-Fermi-folyadékok [15]. Kvalitatívan modellezhetővé vált például a II. típusú szupravezetők fázisátalakulása, transzportegyütthatóinak számítása, és a szupravezetés olyan jelenségeinek vizsgálata, mint a Cooper-párok képződése [16].

Természetesen az előttünk álló legnagyobb feladat a kísérletekkel való közvetlen kapcsolatteremtés, tehát a kísérleti eredmények nemcsak kvalitatív, hanem kvantitatív leírása és predikciója.

Összefoglalás

Cikkünkben motiváltuk a húrelméletet, mint az összes kölcsönhatást és részecskét magában foglaló kvantumelméletet, amely a kvantumgravitáció jelenleg ismert egyetlen lehetséges konzisztens leírása. Eddigi elméleti eredményei tartalmazzák a fekete lyukak entrópiájának mikroállapotokból való számítását, és a gravitációs és térelméletek közötti dualitási szimmetriát, az AdS/CFT-sejtést. Megmutattuk, hogyan származtatható a AdS/CFT-sejtés a húrelméletből, mely az anti-de Sitter-tér gravitációs elméletét felelteti meg a tér határára négy dimenziós mértékelméletnek. Ezen holografikus kapcsolat lehetőséget teremt olyan erősen kölcsönható rendszerek leírására, mint például a kvark-gluon plazma, a kvark-antikvark potenciál, vagy akár a kondenzált fizika rendszerei. ☯

HIVATKOZÁSOK

1. Lendvai Endre: A részecskefizika kialakulása, Mikrovilág, 2000.
2. A. V. Anisovich et al. Physics Letters B Volume 471, No. 2–3, 30 December 1999, pp. 271–279.
3. Takács Gábor, Fizika a standard modellen innen és túl, Mikrovilág, 2012.
4. J. Polchinski, String Theory, vol. 1 (Cambridge Monographs on Mathematical Physics).
5. M. Rangamani, Gravity and Hydrodynamics: Lectures on the fluid-gravity correspondence, Class. Quant. Grav. 26, 224003 (2009).
6. S. A. Hartnoll, Lectures on holographic methods for condensed matter physics, Class. Quant. Grav. 26, 224002 (2009).
7. J. M. Maldacena, The Large N limit of superconformal field theories and supergravity, Adv. Theor. Math. Phys., 2, 231 (1998).
8. G. 't Hooft, Dimensional reduction in quantum gravity, gr-qc/9310026.
9. A. Strominger, C. Vafa, Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy, Phys. Lett. B 379, 99 (1996).
10. M. J. Tannenbaum, Results from RHIC with Implications for LHC, arXiv: 1006.5701.
11. P. Kovtun, D. T. Son, A. O. Starinets, Viscosity in strongly interacting quantum field theories from black hole physics, Phys. Rev. Lett. 94, 111601 (2005).
12. E. W. Carlson, V. J. Emery, S. A. Kivelson, D. Orgad, Concepts in High Temperature Superconductivity, arXiv:cond-mat/0206217.
13. I. Bloch, J. Dalibard, W. Zwerger, Many-body physics with ultracold gases, Rev. Mod. Phys. 80, 885-964 (2008).
14. S. A. Hartnoll, C. P. Herzog, G. T. Horowitz, Building a Holographic Superconductor, Phys. Rev. Lett. 101, 031601 (2008).
15. S. A. Hartnoll, J. Polchinski, E. Silverstein and D. Tong, Towards strange metallic holography, JHEP 1004 (2010) 120.