

Válaszok Vecsernyés Péter kérdéseire

Köszönöm Vecsernyés Péternek körültekintő bírálatát és releváns kérdéseit.

- *Milyen kvalitatív (esetleg kvantitatív) eredményt vár a szerző az AdS/CFT megfeleltetéstől a való világ erős kölcsönhatásának, a QCD-nek a leírásában?*

Reményeink szerint mind kvalitatív, mind pedig kvantitatív eredményeket várhatunk az AdS/CFT megfeleltetéstől.

Az AdS/CFT megfeleltetést szokásos tágabb és szűkebb értelemben is használni. Szűkebb értelemben az $AdS_5 \times S^5$ háttéren mozgó szuperhúr és a maximálisan szuperszimmetrikus Yang-Mills elmélet ekvivalenciájára gondolunk, míg tágabb értelemben egy négy dimenziós mértékelmélet, és egy magasabb dimenziós gravitációs/húrelmélet ekvivalenciájára.

Érdekes módon már a szűkebb értelemben vett AdS/CFT dualitásnak is vannak kvantitatív jóslatai a QCD-re. Ezek főleg a QCD gluon szektorára vonatkoznak, melyek megegyeznek a maximálisan szuperszimmetrikus $SU(N_c)$ mértékelmélettel $N_c = 3$ esetén. Ennek köszönhetően, a gluon-szórási amplitúdók számolhatóak egy hurok szinten az AdS/CFT segítségével. Konkrétan például, a multi Regge kinematikában a gluon keltési amplitúdókat kettes csavarású operátorok anomális dimenzióival lehet kifejezni, melyek így, egy hurok szinten, mind a QCD, mind pedig az $\mathcal{N} = 4$ modellre érvényesek lesznek [1]. Habár ezen eredmények könnyebben származtathatóak a dualitás által, a QCD oldalról is kiszámíthatóak.

Ha olyan eredményeket szeretnénk a dualitás által származtatni, melyeket a QCD-ben magában nem áll módunkban meghatározni, akkor csak kvalitatív várakozásaink lehetnek. Ez azért van, mert a két modell jelentősen eltér egymástól: a QCD egy bezáró elmélet, amely sem nem konform, sem nem szuper szimmetrikus, sőt az anyag részecskéit jelentő fermionok is a fundamentális, és nem az adjungált ábrázolásban vannak – szemben a maximálisan szuperszimmetrikus konform mértékelmélettel. Ha mégis szeretnénk a két modellt összehasonlítani, olyan fizikai helyzetet kell keresnünk, amelynek leírása során mindkét elmélet alkalmazható. Ilyen jelenség a nehézion ütközések során keletkező termális kvark-gluon plazma tágulása a hadronizáció megindulásáig. Ekkor, a QCD oldalról a kvarkok és gluonok nincsenek bezárva, a YM oldalról viszont a véges hőmérséklet miatt mind a szuper, mind pedig a konform szimmetria sérül. Az AdS/CFT dualitás lehetőséget teremt a táguló, erősen kölcsönható anyag húrelméleti duálisának meghatározására. Ez egy olyan fekete lyuk, melynek nagysága/hőmérséklete az ötdimenziós gravitáció által meghatározott törvények szerint változik. Ezen időfejlődés az erősen kölcsönható kvark-gluon anyag nyelvén egy sűrűlódásos folyadék áramlásaként interpretálható [2], melyre példát kísérletileg is láthatunk a nehézion ütközéseket vizsgáló RHIC gyorsítóban.

Kvantitatív és mégis nem triviális eredményeket akkor remélhetnénk, ha a dualitás tágabb értelmében sikerülne a QCD gravitációs duálisát meghatároznunk. Habár jelentős aktivitás jellemzi ezen területet, ezidáig ez még senkinek sem sikerült. A QCD duálisának keresése mégis sok szép modellt eredményezett, melyek jelentősen bővítették az erősen kölcsönható mértékelméletekről gyűjtött ismereteinket. Ezen próbálkozások két elvileg különböző irányból történnek.

Az első esetben olyan szuperhúrelméleti modellt írnak fel, amelynek mértékelméleti duálisa „QCD szerűen viselkedik”. A legismertebb és legsikeresebb a Sakai-Sugimoto modell [3], melyben van bezárás és királis szimmetria sértés. A húr típusú gerjesztések a mezonok, míg a szolitonikus gerjesztések a barionok. Az elmélet hiányossága, hogy vannak benne nem „QCD szerű” gerjesztések, sajnos a hadron tömegek skáláján.

A második megközelítés esetén nem egy húrelméletet próbálnak az ötödik dimenzióban felírni, hanem csak valamilyen gravitációs elméletet. Ezen modellek viszonylag kevés paraméterrel képesek meglepően pontosan leírni a hadronok spektrumát.

Összességében tehát elmondhatjuk, hogy nem triviális kvantitatív eredményeket mostanáig még nem sikerült a QCD-re származtatni, viszont a kvalitatív leírás terén sokat léptünk előre az erősen kölcsönható mértékelméletek megértésében.

- *A szerző megítélése szerint mi az oka annak, hogy egy véges méretű rendszer leírásánál a végtelen rendszerből kiinduló, ahhoz végesméret (akár a méretben exponenciálisan kicsi) korrekciókat számoló közelítés ilyen domináns szerepet játszhat a direkt véges méretben megfogalmazott modell „megoldása” (pl. energiaspektrum kiszámolása) mellett/helyett? Mert ilyen „megoldás” nincs is, csak esetleg numerikusan?*

A végesméret korrekciók sikerüket annak köszönhetik, hogy mind a közelítő, mind pedig az egzakt spektrum meghatározásánál kulcs-fontosságú szerepet játszanak.

Ha a kérdéses kvantumtérelméletet nem tudjuk egzaktul megoldani (véges térfogatban), akkor annak leírására közelítő, esetleg numerikus módszereket használunk.

A Bethe–Yang (BY)-egyenletek, a Lüscher-típusú végesméret-korrekciókkal kiegészítve, a rendszer térfogatának egy széles tartományában ($L > 2m^{-1}$) kvantitatíven is használható energiaspektrumot eredményeznek. Sőt, különösen szerencsés alkalmazás, mint pl. az AdS/CFT megfeleltetés esetén, a BY- és Lüscher-típusú korrekciók elkülönülnek mind egymástól, mind pedig a magasabb rendű korrekcióktól, így egyenként is egzakt leírást szolgáltatnak.

Numerikus megoldás használata esetén a módszerek megbízhatóságát, érvényességi körét ellenőrizhetjük a nagyobb térfogatokra kvantitatíven „működő” BY, illetve Lüscher-korrekciókkal történő összehasonlítás segítségével.

Mindezek mellett a végesméret-korrekciók sikerét az garantálja, hogy az egzakt véges térfogati megoldás megtalálásában és ellenőrzésében is nagyon fontos szerephez jutnak.

Az integrálható kvantumtérelméletek energiaspektrumának véges térfogatú megoldása többnyire egymással csatolt integrálegyenletek felírását illetve megoldását jelenti. Ezen egyenletek származhatnak egy egzaktul megoldott rácsregularizáció kontinuum határesektént, függvényegyenlet-rendszerek rögzített analitikus szerkezetű megoldásaiként, vagy egzakt alapállapotú termodinamikai Bethe-ansatz egyenletek analitikus elfolytatásaiként. A különböző állapotokra vonatkozó integrálegyenletek csak az úgynevezett forrástagokban különböznek egymástól. Ezen forrástagok rögzítésében játszanak fontos szerepet a végesméret korrekciók, hiszen nagy térfogatokra az integrálegyenleteket szisztematikusan ki lehet fejteni, és megoldásaikat az állapotoktól függő BY és Lüscher-típusú korrekciókkal lehet összehasonlítani [4].

Bajnok Zoltán

Hivatkozások

- [1] G.P. Korchemsky, *Review of AdS/CFT Integrability, Chapter IV.4: Integrability in QCD and $N < 4$ SYM*. arXiv:1012.4000
- [2] Romuald A. Janik, *The dynamics of quark-gluon plasma and AdS/CFT*. arXiv:1003.3291
- [3] Toshiya Imoto, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto, *Mesons as Open Strings in a Holographic Dual of QCD*. Prog.Theor.Phys.**124**:263-284,2010.
- [4] János Balog, Árpád Hegedűs, *The finite size spectrum of the 2-dimensional $O(3)$ nonlinear sigma-model*. arXiv:0907.1759