Bírálat Nógrádi Dániel
"Composite Higgs models on the lattice"
című MTA doktori disszertációjáról

Az ELTE TTK Elméleti Fizika tanszékén folyó rácstérelméleti kutatások kétségkívül a terület élenjáró kutatásai közé számítanak. Az elmúlt évtizedben Nógrádi Dániel ezen csoport oszlopos tagjává vált és ezáltal a terület egyik nemzetközileg is elismert vezető kutatója lett.

A dolgozatban tárgyalt munkát (az O(3) modell területére tett kitérő kivételével, amelyen egyedül dolgozott), állandó társszerzőivel (melyeket Kuti Gyula és Fodor Zoltán neve is fémjelez) végezte.

A dolgozat témája a Higgs bozon összetett részecskeként történő leírása, amely lehetőség meglepő módon a Higgs részecske CERN-beli felfedezése után is megmaradt, sőt, ez lenne a Standard Modellen Túli fizika elvben legkönnyebben kimutatható megnyilvánulása.

A dolgozat első két fejezete általános, illetve technikai bevezető, amelyben először a kompozit Higgs-részecske alapgondolata, majd ennek konkrét, kiterjesztett technicolor modellként való realizációja, illetve az egész konstrukció alapjául szolgáló "sétáló", vagyis közel-konform mértékelméletek ismertetése, végül pedig mindennek rácstérelméleti módszerekkel történő vizsgálata kerül ismertetésre. Egy adott mértékcsoporttal jellemzett elméletcsaládban a fermionábrázolások fajtája és ezek száma határozzák meg, hogy az adott modell még a közel-konform, vagy már az aszimptotikusan konform (infravörös fix ponttal rendelkező) osztályban van-e. Ennek eldöntése egy adott modellre rendkívül fontos és ugyanakkor rendkívül nehéz feladat is. A kérdés eldöntésére alkalmas pl. a tömegspektrum vizsgálata, de bevezettek különböző futó csatolásokat is a kérdés tanulmányozására.

A dolgozat későbbi fejezeteiben részletesen megvizsgált modellek az SU(3) mérték-elmélet két szextett-ábrázolású "kvark"-térrel, ill. N_f db. fundamentális "kvark"-térrel. A tömegspektrumon kívül az ú.n. gradiens-folyam csatolás az a mennyiség, amelynek vizsgálata a közel-konform vs. aszimptotikusan konform kérdés megválaszolására szolgál. Ez utóbbi azért rendkívül célszerű eszköz, mert a csatolás energiaskáláját az inverz térfogat adja, tehát nem szükséges a termodinamikai limeszbe extrapolálni az adatokat. Ugyanakkor a módszer lehetővé teszi zérus tömegű fermionok használatát, ami egy újabb extrapolációt megspórol. Ebben a fejezetben egy pontatlanságot is felfedeztem: a 18. oldal alján az általános ismertetésben a [127] hivatkozásban SU(4) kétindexes, szimmetrikus fermionábrázolást ígér, de a hivatkozásban antiszimmetrikus ábrázolást tárgyalnak.

A következő fejezetben, még a dolgozat tulajdonképpeni eredményeinek tárgyalása előtt, egy kétdimenziós "játék"-modellről van szó, a θ-taggal kibővített O(3) szigma-modellről. Ez a modell a $\theta = \pi$ pont közelében közel-konform viselkedést mutat. Itt az eredeti motiváció az volt, hogy a valódi fizikát leíró 4-dimenziós esetekben nehezen tanulmányozható szisztematikus effektusok, valamint a statisztikai hibák és rács-effektusok is sokkal kontrolláltabban vizsgálhatók ebben a modellben, elsősorban az alacsony dimenziószám, de a kevesebb és egyszerűbb szabadsági fok miatt is. A modellnek viszont mindenekelőtt jóldefiniáltnak kell lennie, ami nem volt teljesen nyilvánvaló, mivel a szabad energia θ-paraméter szerinti második deriváltja, a topológiai szuszceptibilitás, divergál a kontinuum limeszben. Ebben a fejezetben a szerző megmutatja, hogy ezen divergens mennyiséget levonva, egy jóldefiniált renormált effektív hatás definiálható, amelynek a θ szerinti, az elsőtől eltekintve minden magasabb Fourier-együtthatója véges. Tehát a modell jóldefiniált, a θ-paraméter releváns és a $\theta = \pi$ pont közelében (feltehetőleg) közel-konform. Az eredeti motivációban szereplő kérdéseket azonban a szerző a későbbiekben nem vizsgálta.

A dolgozat legfontosabb eredményei a két utolsó fejezetben találhatók. A negyedik fejezetben egy (csaknem) realisztikus, az SU(3) szextett technifermionokra alapozott kompozit Higgs modell tárgyalását találjuk, míg az utolsó fejezetben a szintén a "sétáló" technicolor által motivált, sok flavor-ös SU(3) fundamentális ábrázolású modellek 4, 8 és 12 flavor-szám esetén.

A negyedik fejezet első része a 2-flavor-ös, szextett ábrázolásban lévő tehnikvarkok által meghatározott modell spektrumával foglalkozik. Az analízis itt még nem végleges (pl. csak 2 rácsállandó értéket vizsgáltak) és ezért az olvasót külön figyelmeztetik, hogy a rezonancia-spektrumot mutató 4.5 ábra óvatosan kezelendő. A második részben a véges térfogatot energia-skálának használó gradiens-folyam csatolás van a vizsgálat középpontjában. Szép eredemény a (4.4) normálási állandó megadása, amelynek segítségével a fenti csatolás kis térfogaton az $\overline{\mathrm{MS}}$ csatoláshoz illeszthető. A 2 flavor további technikai komplikációkhoz vezet: mivel a rácson használt, optimális számításigényű staggered fermionok valójában 4 flavort írnak le, a fermion determinánsnak a négyzetgyökét kell venni. Ez a "rooting". A fejezetben az ezzel kapcsolatos nehézségek is be vannak mutatva. A szisztematikus hibák megbecslése és a kontinuum extrapoláció elvégzése után a konklúzió az, hogy ez a 2-flavoros modell a közel-konform tartományban van és mint ilyen, szóba jöhet mint egy kiterjesztett technicolor modell kiindulópontja.

Végül az utolsó fejezetben a sok-flavor-ös fundamentális ábrázolásokra épülő modellek szerepelnek. Időközben ezek jelentősége, mint realisztikus technicolor modellek, csökkent, viszont a kérdés, hogy ezek mely N_f értékek esetén tartoznak még a közel-konform osztályba, továbbra is nehezen megválaszolható, érdekes kérdés, nem utolsósorban az eltérő válaszokat adó, de egyaránt tiszteletreméltó kutatócsoportok miatt. Ebben a fejezetben az $N_f = 4, 8$ és 12 eseteket vizsgálják, vagyis a flavorök száma 4-gyel osztható és a rooting probléma nem lép fel. Fellépnek viszont egyéb szisztematikus hibák és rács-effektusok és a fejezet nagy része arról szól, hogyan kell ezeket kontrolláltan figyelembevenni és a kontinuum-modellre vonatkozó érvényes következtetésekre jutni. Külön szeretném kiemelni az 5.6 alfejezetben a szisztematikus hibák részletes és kimerítő tárgyalását. Az alapos és meggyőző vizsgálatok arra az eredményre jutnak, hogy az $N_f = 4, 8$ modellek biztosan nem konformak még és nincsen infravörös fixpont a gradiens-folyam csatolási állandó 6.0 és 6.4 értéke között 12 flavor esetén sem. Ez azért fontos eredmény, mert más vizsgálatok fixpontot találtak ebben az intervallumban. (Később a feltételezett fixpont kitolódott 7.0 közelébe.)

A tézisfüzetben a szerző eredményeit 5 tézispontban foglalta össze, amelyek mindegyikét új tudományos eredménynek fogadom el. Ezek a tézispontok 10, rangos folyóiratban, ill. mérvadó konferenciakiadványban megjelent közleményen alapszanak. Külön kiemelem az első két tézispontot, mivel ezek kapcsolatot teremtenek a dolgozatban tárgyalt elvont rácstérelméleti megfontolások és a kisérletekkel ellenőrizhető fenomenológia között.

A dolgozattal kapcsolatban a következő négy kérdésem van:

1) A dolgozat alapfeltevése, hogy a 2012-ben felfedezett skalár részecske egy Higgs-imposztor és valójában egy összetett techni-f_0 részecske. De hogyan lehet leleplezni az imposztort? Van-e olyan, legalább elvileg kiszámítható és mérhető Higgs-csatolás, amely megkülönbözteti az elemi Higgs-részecskétől?

2) Az SU(3) szextett-dublett modellnél talált $m_\sigma/F \sim 2$ és $m_\sigma/m_\rho \sim 1/4$ arányok jó irányba mutatnak, de azért még kb. 500 MeV-es Higgs tömegnek felelnek meg. A 19. oldalon történik utalás arra, hogy elektrogyenge korrekciók (t-kvark loop) jelentősen lecsökkenthetik ezt az értéket, de ha ilyen jelentősek az elektrogyenge korrekciók, akkor nem félő, hogy más mennyiségek is megváltoznak?

3) Az 5.6 alfejezetben találkozunk a g_X^2 csatolással. Mint az 5.15 ábrán látható, az SSC és a WSC csatolások (improved vagy anélküli változatban) különböző rács-korrekciókat tartalmaznak. Naivul azt várnánk, hogy X értékét megfelelően megválasztva elérhetjük, hogy az $\mathrm{O}(a^2)$ korrekciók eltűnjenek és csak $\mathrm{O}(a^4)$ és magasabb tagok maradjanak. Ezzel szemben itt azt látjuk, hogy a g_X^2 csatolásban az $\mathrm{O}(a^2)$ tagok megmaradnak, viszont az $\mathrm{O}(a^4)$ tagok eltűnnek (és ezáltal az $\mathrm{O}(a^2)$-es skálázási tartomány megnövekszik). Van-e e mögött valami Symanzik-féle elmélet?

4) Az $N_f = 10, 12$ esetén felépő ellentétes konklúziót Hasenfratz Anna és munkatársai az univerzalitás megsérülésével magyarázzák. Lehetséges-e ez, és ha igen, melyik regularizáció a "helyes"?

A fentiek alapján, a kérdésekre adott válaszoktól függetlenül, a dolgozat nyilvános vitára bocsátását és az MTA doktora fokozat odaítélését feltétlenül javasolom.

Budapest, 2018. november 4.

Dr. Balog János

MTA Wigner FK RMI