Bírálat

Dr. Nagy Sándornak az MTA-doktora cím elnyerésére benyújtott

A renormálási csoport alkalmazása kvantumelméletekben

című értekezéséről

A doktori értekezés tartalmának és eredményeinek a nyilvános védésen ismertetésre szánt összefoglalása

A megfigyelhető fizikai mennyiségek értékét módosító kvantumos és/vagy termikus fluktuációk számítási módszereinek fejlesztése a kvantumfizikai és a statisztikus fizikai rendszerek kutatásának élvonalához tartozó feladat. A kutatás fogalmi rendszerét K. Wilson alakította ki az 1970-es évtizedben. Az ún. egzakt renormalizációs csoport egyenletek (ERCSE) módszerét nagyjából három évtizede használják a fizikai mennyiségek energiaskálát követő változásainak kiszámítására a kvatumtérelméletek teljes körében. A többféle megfogalmazású alkalmazott eljárások mindegyike tartalmaz pontatlan eredményekre vezető közelítő lépéseket.

Nagy Sándor az ERCSE számos megfogalmazását tesztelte munkássága során. Dolgozatában világos értékelést közöl mindegyik változat erényeiről és hiányosságairól. Az MTA doktora cím elnyerésére benyújtott műben elsősorban a Wegner és Houghton által javasolt, Wilson felfogását a legközvetlenebbül követő WH-egyenletet használta, alkalmanként összevetve a C. Wetterich által javasolt, a kutatók legszélesebb körében alkalmazott egyenletből számított eredményekkel.

A WH-egyenlet keretei között különböző elméleti modellekre egységesen alkalmazható önálló fogalmi rendszert alakított ki a szimmetriasértés mozzanatának megragadására. Központjában a *kvantum-cenzúra* általa bevezetett fogalma áll. A WH-egyenlet magjának szingularitásához a szimmetrikus fázisból közeledő skálafejlődés leállásának ütemét jellemző exponenseket eredményesen azonosította a Wilson-Fisher fixpont körüli kritikus exponensekkel. Elsőként arra is rámutatott, hogy a csatolások nem-lineáris transzformációjával a skálaváltozás szinguláris pontja *infravörös fixpont*ba képezhető le. A WH-egyenletet *bilokális potenciáltag*gal egészítette ki, amelynek révén tárgyalni tudta az elmélet kinetikus tagja együtthatójának skálaváltozását is (hullámfüggvény renormalizáció).

Módszerével megvizsgálta a gravitáció Einstein-Hilbert elmélete azimptotikus biztonságosságának kérdését. Az EH-hatás különféle kiegészítéseire igazolta az aszimptotikusan biztonságos viselkedést garantáló fixpont stabil létezését.

Módszerfejlesztési tanulmányai közül kiemelten említendők még a renormalizációs csoport egyenletek kiterjesztésére vonatkozó javaslatai környezeti kölcsönhatásoknak kitett nyílt térelméletek esetére, illetve a Minkowski metrikájú valós időfejlődésre. Ez utóbbi vizsgálatai nem vezettek egyértelmű konklúziókra, de az *ultraibolya és az infravörös módusok összefonottságából származó bilokális csatolás* felismerése lényegesen hozzájárult a WH-egyenlet említett bilokális kiegészítésének gondolatához.

Kérdéseim

1. A sine-Gordon elmélet sérült szimmetriájú fázisában az eredeti csatolásokat használó elemzésben az egyetlen felharmonikussal megjelenített klasszikus potenciál skálafüggő változásának követésével jut el a blokkolt hatás eltűnésének megállapításáig a k=0 határesetben.

Nem lehetne-e minden infinitezimális lépésben a klasszikus ansatz-ot a tér helyfüggő átlagára vonatkozó megkötésként értelmezni és ehhez viszonyítva az ú.n. megszorított effektív potenciálhoz kvantumfluktuációs járulékot számolni? Létezik-e RG-egyenlet az ún. constrained effctive potential-ra?

Úgy vélem, ezt a felvetésemet megerősíti egy, a dolgozat későbbi részében közölt további eredmény is. Az SG-elmélet bilokális potenciállal kiegészített WH-egyenletére a sérült szimmetriájú tartomány egy részében kimutatta periodikus nyeregponti (azaz klasszikus) megoldás létezését!

2. Az értekezés 35. oldalán a szinguláris viselkedés helyén generált IR fixpontról megállapítja: "A fixpontban az exponensek $s1 = 1$ és $s2 = 3/2$-nek adódnak, amelyek szerint az IR fixpont vonzó." Ezt követően azonban a skálakitevők számolásának standard útját mellőzve visszatér a spinodális tartományt határoló hullámszámnak a negyedfokú csatolási állandó kezdeti értékválasztásával finoman hangolt skálázó viselkedéséhez, amiből jó minőségű korrelációs kritikus exponenseket olvas le.

Kérem fejtse ki a korrelációs exponens kiszámítására javasolt eljárásának kapcsolatát a szokásos, azaz fixpont körül linearizált RG-egyenletek sajátértékein alapuló eljárással.
A konkrét modellre fókuszáltan megfogalmazva a kérdést: Miért lehet a negyedfokú csatolás UV-kezdőértékeinek változtatását redukált hőmérséklet változtatásként értelmezni?

3. Mi a jelenlegi helyzet a Reuter-fixpont adatainak (helyzete és skálajellemzése) fizikai értelmezhetősége kapcsán? Van-e olyan tulajdonsága a standard részecskefizikai modellnek, amelyre ezek hatással bírnak?

4. A dolgozatban nem idézett munkájának (S. Nagy, J. Polonyi: Renormalizing open quantum field theories, Universe 8, 127 (2022)) összegző részéből idézek, amellyel a nyílt rendszerekre vonatkozóan nyert saját eredményei további ellenőrzésének szükségességét rögzíti:
These results obviously raise further questions. An obvious issue is the systematic extension of the ansatz space for the action and the check of the stability of these results. This direction requires the use of multi-local actions and the increase of the order of the truncation in the field amplitude.

Kérem, ismertesse mennyiben sikerült előrelépni a nyílt rendszerek valós idejű skálafejlődése területén az ***univerzális*** *elméleti tárgyalás felé?*

Kritikai megjegyzések

Miután a gravitáció esetében nem szokvány térelméletről van szó, fontos lett volna expliciten bemutatni azt a metrikus tenzorból felépített mértékinvariáns változót, amelynek korrelációs hosszára vonatkoznak bemutatott eredményei.
A gauss-i fixpontból induló szeparatrix-szal kettéválasztott csatolási állandó sík tartományait a fázisátalakulási modellekre megszokott terminológiával sérült szimmetriájúként és szimmetrikusként említi. Azonban, nem ad emmiféle fogódzót az olvasónak, vajon van-e olyan szimmetria és sérülését megvalósító kondenzátum, amely alapján ennek megfeleltetésnek gravitációs tartalom adható?
Továbbá, a fixpontok körül linearizált RG-egyenletek RG-idő változóját leképezi alkalmas kezdő csatolásnak a Reuter fixpontot jellemző értékétől mért különbségére, amelyet hőmérsékletnek nevez. Konzisztens-e egyáltalán véges hőmérsékletről beszélni a gravitáció modellje esetében? Mi az adekvát intenzív változó a gravitáció elméletében?

A fentiek tükrében legalább a konformálisan redukált gravitációs modell dilatációs szimmetriájának megfigyelhető következményeit illett volna érinteni. Hiányolom, hogy az eredményeket ez esetben sem fogalmazta át megfigyelhető gravitációs jelenségekre. Legfontosabb lenne annak tisztázása, hogy (a statisztikus fizikai rendszerek hőmérsékleti fejlődésének analógiájára) mi hajtja az Univerzum skálafejlődését? Lehetséges-e hogy a hőmérséklet helyére a referencia(háttér)-metrika tágulása lép? Hogyan kell ezt fogalmilag integrálni a kvantumtérelmélet formalizmusába?

Kérem, hogy téziseinek a nyilvános védés során tartandó ismertetésében teljes mértékben szabaduljon meg azoktól a statisztikus fizikai analógiáktól, amelyeknek nincs gravitációs jelentése. Kizárólag gravitációelméleti mennyiségeket és koncepciókat használva mutassa be a skálafüggő hatásokat a gravitáció kvantumtérelméleti modelljének esetében!

Összefoglaló értékelés

A fentebbi összefoglalóm alapján Tézisei 1. és 2. fejezetének 5 tézisét teljes egészében, a harmadik fejezet 3.1 és 3.3, továbbá a negyedik fejezet 4.1 tézisét új és eredeti megközelítést tükröző eredményekként fogadom el. A 3.2, 3.4, 3.5, továbbá a 4.2 és 4.3 tézisek alapját adó speciális modellszámításokra alapozott következtetéseit *tudományos igényű sejtésekként* értékelem, amely konklúziók univerzális érvényességét tovább kell vizsgálni.

Nagy Sándor tematikusan sokszínű, koherensen egyéni megközelítésű kutatásait összefoglaló doktori disszertációját méltónak tartom az MTA-doktora cím odaítélésére, amennyiben a nyilvános vitán fentebbi kérdéseimre és kritikámra érdemi megfontolást bizonyító reflexiókat ad. Javaslom a nyilvános vita kitűzését.

Budapest, 2025. január 8.

Patkós András

Az alább következő részletes értékelést bírálatom része! Kérem a rövid összefoglalással együtt a bírálati dokumentumok között elhelyezni! P.A.

Nagy Sándor MTA-doktori disszertációjának részletes elemzése

A **bevezető** fejezetben a kölcsönhatások erősségének folyamatos skálafüggését (a renormalizációt) a fizikai jelenségkör egészét átfogó gondolati keretként mutatja be. Egyetértve a történeti vázlat kiindulópontjának megválasztásával és a szerző kutatásaiban használt funkcionális renormalizációs egyenletekig elvezető út bemutatásával, megjegyzem, hogy a dinamikai változók (kvantumterek) skálafüggő átváltozását megvalósító továbbfejlesztéseket is célszerű lett volna említeni (pl. az elemi részek kötött állapotainak leírására alkalmas kiterjesztett egyenletek konstrukcióját).

A **2. fejezet** bevezeti a csatolások skálaváltozását leíró egyenletek általa használt két variánsát (a Wegner-Houghton--egyenletet és a Wetterich--egyenletet) és kritikai összehasonlításukat is megadja. Tartalmában a prezentáció korrekt, a formalizmust ismerők számára jól követhető.

Ám több értelmet zavaró felületesség miatt nem ajánlható a témával ismerkedni vágyóknak.

Példák (piros színnel jelezve a kifogásolt helyeket):
1. a 10.oldalon a kvantumtér Fourier-előállítási p változójának összekeverése a blokkosítási skálával:
"Ennek érdekében a φ térváltozót két részre bontjuk, $\varphi \to \varphi + \phi$, ahol a φ a $k \in [0, k - \Delta k]$ közötti impulzussal jellemezhető, a ϕ-t pedig olyan impulzussal, melyekre $k \in [k - \Delta k, k]$."

2. A 11.oldalon, a (2.5) képletben az integrálási változó eltérése az integrandus argumentumaitól
$\int_p \; \delta(q-k) \ln S_q'' \; [\varphi]$

3. A 13. oldalon az effektív hatás (2.19) gradiens kifejtésében a magasabb deriváltakat tartalmazó tagok együtthatóiból hiányzik a k skálafüggés explicit indexszel történő feltüntetése. Ami súlyosabb az, hogy magyarázat vagy kommentár nélkül egy Lorentz invarianciát sértő tag is megjelenik:
$H1(\varphi(x))(\partial_\mu\varphi(x))^4$

Még egy példát hozok a későbbi fejezetekből
4. 52.oldalon bizonyára rossz rövidítés szerepel:
"A GFP az UV-ben egy tömegtelen szabad elmélethez tartozik, ezért aszimptotikusan szabadnak nevezzük."

A doktori művet (megfelelő előzetes felkészültséggel) elbírálhatónak találtam, ám esetleges nyilvános közlése előtt alapos átfésülését ajánlom.

A **3. és 4. fejezetekben** alacsonyabb dimenziós skalárelméletek színes sokaságának fázisdiagramja jellemzésére alkalmazza az RG-egyenleteket. A nagyszámú publikációval dokumentált aktivitásból a dolgozat e fejezeteinek vizsgálatait alapvetően motiváló, klasszikus szinten periodikus potenciállal definiált elméletek fázisdiagramjának jellemzésre kidolgozott eljárást kívánom értékelni. Ezen elméleteket a periodicitáshoz tartozó belső eltolási szimmetria jellemzi. Ennek sérülése osztja két tartományra a csatolások terét.

A fejezetek fő eredménye a *kvantum cenzúra* jelenségének felismerése, ami frappáns elnevezése annak a tapasztalásnak, hogy a WH-egyenlet alkalmazásakor a sértett fázisba vezető RG-fejlődés a fázishatárhoz közeledve leáll. Oka a fejlődést leíró integro-diferenciál operátor magjának, egy effektív propagátornak szingulárissá válása a spinodális instabilitást mutató skálatartomány k_c határára érve. Az instabilitás kondenzátum képződését jelzi, azaz az eddig használt dinamikai változók lecserélését/kiegészítését igényli. Az elemzés folytatásaként megmutatja, hogy a csatolásokban jelentkező szingularitás "kisimítható": nem-lineáris transzformációval bevezetett új csatolásokban az RG-egyenletek megoldása $k=0$-ig folytatható, viszont egy új (abszolút vonzó) fixpont jelentkezik, amelyre generikusan az *IR-fixpont* elnevezést javasolja.

Bár a Z_2 szimmetriájú (Ising-jellegű) elméletekben mód van a kondenzátum kollektív változóként való bevezetésével a sérült szimmetriájú fázisban is folytatni az RG-futást, a fenti forgatókönyv generikusságának demonstrálására homogén kondenzátummal jellemzett modellekben (pl. 3D egykomponensű valós skalártér elmélete) is megmutatja a spinodális instabilitás és az infravörös fixpont létezését.

Kérdéseim a 3. és 4. fejezethez:
A sine-Gordon elmélet sérült szimmetriájú fázisában az eredeti csatolásokat használó elemzésben a klasszikus potenciál (egyetlen felharmonikussal) skálafüggő változásának követésével jut el a blokkolt hatás eltűnésének megállapításáig a k=0 határesetben.

Nem lehetne-e minden infinitezimális lépésben a klasszikus ansatz-ot a tér helyfüggő átlagára vonatkozó megkötésként értelmezni és ehhez viszonyítva az ú.n. megszorított effektív potenciálhoz kvantumfluktuációs járulékot számolni? Létezik-e RG-egyenlet az ún. constrained effctive potential-ra?

Ezt a kérdést megerősíti, az SG-elmélet bilokális potenciállal kiegészített WH-egyenletének a sérült szimmetriájú tartomány egy részében jelentkező periodikus nyeregpontja.

Az értekezés 35. oldalán az IR fixpontról megállapítja
"A fixpontban az exponensek $s1 = 1$ és $s2 = 3/2$-nek adódnak, amelyek szerint az IR fixpont vonzó." Ezt követően azonban a skálakitevők számolásának standard útját mellőzve visszatér a spinodális tartományt határoló hullámszámnak a negyedfokú csatolási állandó kezdeti értékválasztásával finoman hangolt skálázó viselkedéséhez, amiből jó minőségű korrelációs kritikus exponenseket olvas le.

Kérem fejtse ki a korrelációs exponens kiszámítására javasolt eljárásának kapcsolatát a szokásos, azaz fixpont körül linearizált RG-egyenletek sajátértékein alapuló eljárással.
A konkrét modellre fókuszáltan megfogalmazva a kérdést: Miért lehet a negyedfokú csatolás UV-kezdőértékeinek változtatását redukált hőmérséklet változtatásként értelmezni?

Az értekezés legizgalmasabb részének az **5. fejezet**et tartom. Ez a kvantumgravitáció elméletének azt a megközelítését vizsgálja a funkcionális renormálási csoport egyenleteivel, amely a legközelebb áll a további három elemi kölcsönhatás kvantum térelméletéhez. A funkcionális renormalizáció kvantumgravitációra alkalmazásának kiemelt bemutatása indokolt, hiszen itt nem egy "játék"- modell vizsgálatáról van szó.

A funkcionálisan renormalizált kvantumgravitáció konzisztens értelmezése révén mód nyílna a Standard Modell standard folyamataira gyakorolt kvantumgravitációs hatások vizsgálatára. Ez az egyetlen elképzelhető útja annak, hogy a Planck-skála kísérletileg elérhetetlen nagy energiaskálájú tartományáról információkat kapjunk.

A kulcs észrevétel, amely kijelöli a vizsgálatok fő kérdését az, hogy a csökkenő távolság skálán négyzetesen növekvő Newton-csatolásban kifejeződő katasztrófa elkerülhető az ú.n. *aszimptotikusan biztonságos* kvantumgravitációval. A disszertáció e fejezete elsőként felidézi a kozmológiai állandóval kiegészített Einstein-Hilbert hatás renormalizációs egyenleteit, bemutatja az M. Reuter által 1989-ben felfedezett nem-gaussi UV fixpontot. Az irodalomban szélesen diszkutált első kérdés ennek a fixpontnak az univerzalitása, azaz függetlensége az RG-egyenletekben használt regularizációtól. A második vizsgált kérdés az, hogy további tagok bevezetésével az EH-hatásba miként változik a fixpont-szerkezet?

Az 5.1 alfejezetben a Wetterich-egyenlet használatával ezekre a kérdésekre keresett választ. Az eredmények értékelése előtt hiányérzetemet kifejező megjegyzéseket teszek a disszertáció terminológiájáról.

Kritika 1.

Miután a gravitáció esetében nem szokvány térelméletről van szó, fontos lett volna expliciten bemutatni azt a metrikus tenzorból felépített mértékinvariáns változót, amelynek korrelációs hosszára vonatkoznak bemutatott eredményei. A gauss-i fixpontból induló szeparatrix-szal kettéválasztott csatolási állandó sík tartományait a fázisátalakulási modellekre megszokott terminológiával sérült szimmetriájúként és szimmetrikusként említi. Nem ad fogódzót az olvasónak, vajon van-e olyan szimmetria és sérülését megvalósító kondenzátum, amely alapján ennek megfeleltetésnek gravitációs tartalom adható? Végül a fixpontok körül linearizált RG-egyenletek RG-idő változóját leképezi alkalmas kezdő csatolásnak a Reuter fixpontot jellemző értékétől mért különbségére, amelyet hőmérsékletnek nevez. Konzisztens-e egyáltalán véges hőmérsékletről beszélni a gravitáció modellje esetében? Mi az adekvát intenzív változó a gravitáció elméletében?
Kérem ezeknek a kérdéseknek a tisztázását a nyilvános védésen tartandó előadásában!

Az 5. fejezetben bemutatott eredmények:

A csökkenő gravitációs állandóval jellemzett gyenge csatolási tartományban az infravörös felé tartó RG-trajektória szingularitásba fut, amelyet sikeresen transzformált nem-lineáris leképezéssel IR fixponttal rendelkező egyenletrendszerbe. Az IR fixponthoz közeledve ebben a rendszerben is fellép spinodális instabilitás. Határhullámszámát a korrelációs hossz inverzével azonosítva megállapította skálázását az UV-fixponttól induló csatolások speciális kezdő kombinációjának az UV kritikus ponttól vett távolsága függvényében. Az exponens értéke egyezik a gauss-i fixpont körüli linearizált RG-futásból számolt értékkel, de eltér a Reuter-fxpont körül linearizált egyenletből származótól.

Az euklidészi téridőtérfogat V (ezt hívja potenciálnak a disszertáció anélkül, hogy megmondaná a definícióját, ami az eredeti publikációban megtalálható) különböző funkcionáljaival kibővített hatással kapott FRG egyenletekre is változatlan exponenssel kapja meg a releváns irány IR-skálaviselkedését.

Talált olyan kiterjesztést, amelyben nem jelenik meg sem a gauss-i, sem az IR fixpont. Tehát a figyelembe vett csatolásokkal változik a fixpont szerkezet. Elkerülhetetlenül fel kell tenni akérdést, hogy lehet-e ilyenkor fizikai (univerzális) következtetésre jutni?

Az 5.2 alfejezetben a Reuter-pont körüli skálaexponens regulátor függését vizsgálta A kapott erősen regulátorfüggő eredmények tovább bővítik az előző kérdéskört, azaz lehet-e fizikai információt nyerni erről a fixpontról.

A fentieket összefoglaló kérdésem:

Mi a jelenlegi helyzet a Reuter-fixpont adatainak (helyzete és skálajellemzése) fizikai értelmezhetősége kapcsán? Van-e olyan tulajdonsága a standard modellnek, amelyre ezek hatással bírnak?

Az 5.3 alfejezet az ún. konformálisan redukált gravitációs modellt elemzi, amely közvélekedés szerint a teljes gravitációs modellel azonos kvantumjellemzőkkel rendelkezik, de egyszerűbben kezelhető. Ugyanis az (5.12) hatás alakjából világos, hogy a dinamikai változó egy valós skalár tér, ami lokálisan átskáláz egy rögzített referencia metrikát. A skalártérnek az EH-hatásból kinyerhető az effektív térelmélete. Bár explicit kijelentést nem tesz a dolgozat, nyilvánvaló, hogy a korrelátort a skalár tér definálja, illetve a szimmetriasértés annak nem-nulla várható értékével társítható.

Kritika II.
A dilatációs szimmetria (sérülésének) megfigyelhető következményeit illett volna érinteni.

A vizsgálathoz a kinetikus tagban különválasztotta az idő és a tér szerinti második deriváltakat. Szándéka az volt, hogy az idő szerinti második derivált előjelét megváltoztatva Lorentz-szignatúrára is megvizsgálja az euklidészi elmélet fázisszerkezetét.

A konformálisan redukált modellt számos kutatás vizsgálta a Wetterich-egyenletet használva. A szerző vizsgálatának sajátossága, hogy a skálafejlődést a Wegner-Houghton-egyenlettel vigyekezett feltárni. Gömbi és henger-koordinátás változatban integrálva, valamint az anomális dimenziót a kinetikus, illetve a potenciális energiatag fejlődési rátájából számolva jellemezte a Reuter-fixpontot. Kvalitatív szinten reprodukálta a Wetterich-egyenlettel az irodalomban közölt eredményeket. A tárgyalásban releváns operátorként megjelent a potenciáltagban egy bilokális operátor. (E tag eredetének és szerepének általános elemzését a disszertáció 6. fejezetének első felében nyújtja.) A fixponthoz tartozó releváns exponens értéke a számítási eljárás függvényében erős ingadozást mutat, ami megkérdőjelezi a közelítés kvantitatív fizikai értelmezhetőségét.

A Lorentz-invariancia sérülése esetleges bekövetkezésének detektálására a Lorentz-szignatúrájú modellben két új csatolást vezetett be, amelyek speciális értékei felelnek meg a Lorentz-invariancia teljesülésének. Az infravörös tartományban jelentkező eltérés viszont a Lorentz-invariancia sérülését jelzi.

Változócserével elérte az eredeti két változóra vonatkozó RG-egyenlet szeparálódását. A Reuter-fixpontot Lorentz-szignatúra esetén is megkapta. Az IR irány felé haladva jelentkezett a spinodális instabilitásnak megfelelő futásleállás is. Az új vonás a Lorentz-aszimmetriát jellemző csatolás függvényében egy újabb UV fixpont megjelenése és a Reuter-fixpont helyett annak lassú sodródása. Az idő-koordináta szerinti derivált együtthatójának az új UV-fixpontbeli lenullázódásával adódó statikus korrelátor a Lorentz-szimmetria sérülését jelzi.

Az UV-tartományban szimmetriasértéstől függetlenül egységes RG-trajektóriát követ a skálaváltozás. Az infravörös irányban a szimmetriasértéstől függően a fejlődés szétválik. A Lorentz-invariancia a szimmetrikus tartományban helyreáll, a sérült szimmetriájú tartományban viszont a sérülés mértéke lineárisan változik egy szinguláris skálánál felvett értékhez képest.

Összefoglalva a konform redukált kvantumgravitáció vizsgálatánál számos érdekes megállapítást tett a fixpont szerkezetre, továbbá az egyes csatolások skálázására. Nem világos azonban, hogy a Lorentz invariancia sérülését adó UV-fixpont és a Reuter fixpont vele járó megszűnése mennyire stabil az effektív potenciál további bővítésével szemben?

A gravitáció kvantumtérelméletét vizsgáló fejezetről az az általános véleményem, hogy a csatolások skálafüggését leíró csatolt egyenletrendszer globális elemzésére és numerikus megoldására koncentrál. Ezekre eredeti eredményeket közöl.

Kritika II. (folytatás)
Ugyanakkor hiányolom, hogy az eredményeket nem fogalmazza át megfigyelhető gravitációs jelenségekre. Legfontosabb lenne annak tisztázása, hogy (a statisztikus fizikai rendszerek hőmérsékleti fejlődésének analógiájára) mi hajtja az Univerzum skálafejlődését? Lehetséges-e hogy a hőmérséklet helyére a referencia(háttér)-metrika tágulása lép?

Kérem, hogy téziseinek a nyilvános védés során tartandó ismertetésében teljes mértékben szabaduljon meg a statisztikus fizikai analógiáktól és kizárólag gravitációelméleti mennyiségeket és koncepciókat használva mutassa be a skálafüggő hatásokat.

A **6. fejezet** azokat a munkákat mutatja be, amelyekben nyitott (környezeti csatolással rendelkező) kvantumtérelméleti rendszerekre általánosította az infinitezimális renormalizációs transzformációt megvalósító egyenletet. Megjegyzendő, hogy a környezeti változókat a "csúszó" levágással értelmezett térelméletek esetében az integrálására kerülő ultraibolya változók rétegével azonosította.

Általános elemzését a valós idejű viselkedés tárgyalására alkalmas két időtengelyes megfogalmazásban végezte el. Megállapította, hogy a környezeti szabadsági fokok infinitezimális rétegére történő integrálás összefonódást hoz létre a két időtengelyen definiált térváltozók között. Ennek egyszerűsített figyelembevételére javasolta a két térváltozótól egyidejűleg függő *bilokális potenciál* bevezetéését.

A bilokális potenciál hatását a hagyományos RG-egyenletek technikáját alkalmazva is részletesen tesztelte a háromdimenziós skalártér, továbbá a kétdimenziós sine-Gordon elmélet Werner-Houghton egyenletének e potenciállal kibővített operátortérben konstruált megoldásaival. Felismerte, hogy az infravörös tartomány egy általános konfigurációja effektív forrástagként jelenik meg az ultraibolya változók *klasszikus* téregyenletében, azaz a fluktuációs járulék mellett van egy nyeregponti járulék is az infravörös változók renormalizációs skálaváltozásának egyenletéhez. A bilokális tag nem-triviális skálafüggése e nyeregpponti járulékkal függ össze. Az ultraibolya-infravörös összefonódás ebben az egyszerűsített oprátortérben a nyeregponti hatás révén valósul meg.

A vizsgálatból levont konlúziója szerint a renormalizációs trajektóriák radikálisan deformálódhatnak a bilokális operátor hatására. Pl. a kétdimenziós SG-modell esetében a Wilson-Fischer fixvonal eltűnik. Ennek ellenére, miután a kritikus exponenseket a spinodális instabilitás határ-hullámszámának skálázásából állapítja meg, a WH-egyenlet keretei között ez esetben is be tudja mutatni a Kosterlitz-Thouless átalakuláshoz tartozó exponenciális skálázást.

Példájából általánosítható sejtése, hogy az eredeti WH-egyenletből hiányzó hullámfüggvény renormalizáció helyén bilokális potenciált használva teljessé tehető a térelméletek fázisszerkezetének feltérképezése. Értelmezésében a bilokális potenciál felösszegzett gradiens sorfejtés. A konklúziót további tanulmányozásra érdemes sejtésként fogadom el.

A 6. fejezet második részében vázlatosan beszámol a valós időfüggés esetére általánosított RG-egyenletek vizsgálatában 2016 és 2022 között elért eredményeiről. A komplex csatolási állandók skálaviselkedésének összevetése az euklidészi metrika mellett nyert eredményekkel regulátorfüggő következtetésekre vezet, amelyek (egyelőre?) *nem jeleznek univerzális elméleti keretet*. E fejezetben bemutatott munkáit a helyzetnek megfelelően a nyílt kvantumtérelméletek valós időbeli fejlődésének nem-perturbatív tárgyalási módszerét kereső, úttörő próbálkozásokként értékelem.

Kérdés:
A dolgozatban nem idézett munkájának (S. Nagy, J. Polonyi: Renormalizing open quantum field theories, Universe 8, 127 (2022)) összegző részéből idézek:
These results obviously raise further questions. An obvious issue is the systematic extension of the ansatz space for the action and the check of the stability of these results. This direction requires the use of multi-local actions and the increase of the order of the truncation in the field amplitude.
Kérem ismertesse, mennyiben sikerült előrelépni a nyílt rendszerek valós idejű skálafejlődése területén az univerzális elméleti tárgyalás felé?

Budapest, 2025. január 8.

Patkós András