

4. félévi beszámoló

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Fizika Doktori Iskola
Részecskefizika és Atommagfizika Program

Rácstérelméleti módszerek véges kémiai potenciálon

Pesznyák Dávid (david.pesznyak@gmail.com)
Témavezető: dr. Pásztor Attila

Bevezető

Számos euklideszi kvantumtérelmélet rácstérelméleti megfogalmazásakor az első elvekből való kutatást az ún. előjelprobléma hátráltatja [1]: az előjelprobléma következtében egy megfigyelhető mennyiség kiszámításakor a rendszer szabadsági fokaiban exponenciálisan kicsi jel-zaj arány lesz tapasztalható. Ezek közül az egyik legismertebb az erős kölcsönhatást leíró kvantum-színdinamika (QCD) elmélete nem-nulla bariokémiai potenciál mellett. Szintén előjelprobléma lép fel kvantummechanikai rendszerekben Minkowski-féle időfejlődés esetén, vagy erősen korrelált elektronokat leíró szilárdtestfizikai modellekben is. Az utóbbi két évben azt vizsgáltam, hogy különböző módszerekkel milyen hatékonyan kerülhető el vagy javítható meg az előjelprobléma.

Az elvégzett kutatások ismertetése

Az utóbbi két évben elvégzett kutatási tevékenységeimet az alábbi listákban mutatom be röviden.

Komplex kontúrdeformációs módszerek

A komplex kontúrdeformációk módszere a Cauchy-féle integráltétel sokdimenziós általánosításán alapul. A pályaintegrál integrálási sokaságának komplexifikációja után gépi tanulási módszerekkel olyan deformált integrálási sokaságot találhatunk, amely mentén a megfigyelhető mennyiségek nem változnak, de az előjelprobléma exponenciálisan gyengébb [2].

- Alkalmaztam a komplex kontúrdeformációk módszerét egy királis véletlen mátrix modellben [3], megfigyeltem különböző deformációs *ansatzok* esetén az előjelprobléma javulását (ld. az 1. publikációt).
- Ehhez saját szimulációs, a gépi tanulási algoritmust megvalósító és analíziskódot írtam modern C++ és python nyelveken.
- Saját szimbolikus algebra kódot írtam, amellyel a királis véletlen mátrix modell megfigyelhető mennyiségei analitikusan kiszámíthatók adott mátrixméret esetén, így összehasonlításokat tehettünk a szimulációs és egzakt eredmények között.
- Elkészült a nagy kvarktömeg és -sűrűség határesetében vett QCD-t szimuláló kód is. A közeljövőben ebben a teljes QCD-re (a véletlen mátrix modellhez képest)

jobban hasonlító modellben fogjuk vizsgálni kontúrdeformációk hatását az előjelproblémára.

Hamilton-limesz vizsgálata mértékelméletekben

A kvantumszámítógépek megoldást adhatnak az előjelproblémára, azonban az elérhető qubitek véges száma és a megépíthető kvantumáramkörök mélysége limitálni fogja a közeljövőben az alkalmazásokat. A memóriahatékonyság növelésének érdekében a folytonos mértékcsoporthelyett érdemes vizsgálni azok diszkrétizációinak bevezetését [4], illetve azok ún. Hamilton-limeszét (értsd: az időszerű rácsállandó nullához, míg az időszerű kiterjedés végtelenhez tart), amihez időben anizotróp rács bevezetésére van szükség [5].

- Vizsgáltam az $SU(3)$ egy diszkrét részcsoportjának, a $S(1080)$ csoportnak, a kifagyási fázisátalakulását tiszta mértékelméletben. Ez a kifagyási átmenet a csoport diszkrét mivoltának következménye. A párhuzamos temperálás (*parallel tempering*) módszerével meghatároztam a fázisátalakuláshoz tartozó kritikus mértékcsatolást.
- Vizsgáltam az $S(1080)$ fázisdiagramját időben anizotróp rács esetén az időszerű és térszerű mértékcsatolások síkján.
- Vizsgáltam az $U(1)$ és $Z(N)$ csoportok Hamilton-limeszeinek viszonyát. Ehhez három különböző limeszt kell numerikusan kiszámítani: a zérus hőmérsékleti limeszt, a Hamilton-limeszt, majd az $N \rightarrow \infty$ limeszt.

Taylor-módszer QCD-ben

QCD-ben zérus bariokémiai potenciál esetén nem lép fel előjelprobléma, így előállítható a nyomás zérus kémiai potenciál körüli Taylor-sora [6]. A Taylor-sor segítségével extrapolálhatunk kicsi, de nem-nulla bariokémiai potenciálokra. A sorban a QCD megmaradó töltéseinek (barionszám, elektromos töltés és ritkaság) kumulánsai jelennek meg, és segítségével megkísérelhetünk korlátokat megadni a QCD kritikus pontjára vonatkozóan.

- A Wuppertal-Budapest kollaboráción belül közreműködtem a fenti Taylor-együtthatók kontinuum limeszének kiszámításában a bariokémiai potenciálban nyolcadrendig.
- Szimbolikus algebra kódot írtam, aminek a segítségével kiszámíthatók a barionszám kumulánsai a rácsszimulációkban kiszámolt numerikus eredményekből. Ezeket a kumulánsokat kiszámítottam a fenomenológialag releváns ritkaságsemleges feltétel esetén is. Ehhez kiszámoltam ritkaság kumulánsokat és barionszám-ritkaság korrelációkat is. A bizonytalanságokat jackknife hibaelemzéssel becsültem meg.
- A Lee-Yang-zérusok módszerének segítségével naiv becslést adtam a QCD kritikus pontjának hőmérsékletére.

Publikációk

Az utóbbi két év publikációi:

1. S. Borsányi, Z. Fodor, J. N. Guenther, S. D. Katz, P. Parotto, A. Pásztor, D. Pesznyák, K. K. Szabó, C. H. Wong. *Continuum extrapolated high order baryon fluctuations*. (elfogadva publikálásra a Physical Review D-ben) [arXiv:2312.07528 [hep-lat]]

2. M. Giordano, A. Pásztor, D. Pesznyák, Z. Tulipánt. *Alleviating the sign problem in a chiral random matrix model with contour deformations*. Phys. Rev. D 108 (2023) no.9, 094507

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

Ebben a félévben az alábbi kurzusokat végeztem el:

- FIZ/2/001E, *Haladó térelmélet* (jeles), dr. Matteo Giordano;
- FIZ/2/002E, *Standard modell* (jeles), dr. Trócsányi Zoltán.

Konferenciák és előadások

Az utóbbi két évben az alábbi konferenciákon és iskolákon vettem részt:

- *23rd Zimányi School Winter Workshop on Heavy Ion Physics*, 2023. december 4-8., Budapest, Magyarország (15 perces előadás).
- *AIME23 - Academia-Industry Matching Event*, 2023. november 6-7., Budapest, Magyarország,
- *63. Cracow School of Theoretical Physics, Nuclear Matter at Extreme Densities and High Temperatures - őszi iskola*, 2023. szeptember 17-23., Zakopane, Lengyelország (20 perces előadás),
- *Methods of Effective Field Theory and Lattice Field Theory - nyári iskola*, 2023. július 9-21., Bad Honnef, Németország („flash talk” előadás és poszter),
- *GPU Day 2023 - Massive parallel computing for science and industrial application* 2023. május 15-16., Budapest, Magyarország
- *22nd Zimányi School Winter Workshop on Heavy Ion Physics* 2022. december 5-9., Budapest, Magyarország (15 perces előadás)
- *SIGN22 - Flagship Workshop: 8th International Workshop on the Sign Problem in QCD and Beyond* 2022. szeptember 5-9., Tel-Aviv, Izrael (45 perces előadás)

A nyár folyamán részt fogok venni a *School on Continuum Foundations of Lattice Gauge Theories* nyári iskolán a CERN-ben 2024. július 22-26. között, illetve a *Lattice 2024* nemzetközi konferencián Liverpoolban 2024. július 28. - augusztus 3. között. Továbbá 2022 és 2023 tavaszán angol nyelvű szeminárium előadást tartottam az eredményeimről az Elméleti Fizikai Tanszék által szervezett részecskefizikai ELFT szemináriumon. Az előadásaim diasorai: https://bodri.elte.hu/seminar/pesznyak_20230411.pdf és https://bodri.elte.hu/seminar/pesznyak_20240430.pdf.

Elismerések

A 2023/24-es tanévre elnyertem az Új Nemzeti Kiválóság Program ösztöndíját.

Hivatkozások

- [1] P. de Forcrand. *Simulating QCD at finite density*. PoS LAT2009 (2009) 010
- [2] A. Alexandru, G. Basar, P. F. Bedaque, N. C. Warrington *Complex paths around the sign problem*. Rev. Mod. Phys. 94 (2022) no.1, 015006
- [3] M. A. Stephanov. *Random matrix model of QCD at finite density and the nature of the quenched limit*. Phys. Rev. Lett. 76 (1996), 4472-4475
- [4] A. Alexandru *et al.* [NuQS]. *Gluon Field Digitization for Quantum Computers*. Phys. Rev. D 100 (2019) no.11, 114501
- [5] M. Creutz. *Quarks, Gluons and Lattices*. Oxford University Press, 1983.
- [6] C. R. Allton, S. Ejiri, S. J. Hands, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, C. Schmidt, L. Scorzato. *The QCD thermal phase transition in the presence of a small chemical potential*. Phys. Rev. D 66 (2002) 074507