

Nemegyensúlyi időfejlődés erősen kölcsönható egydimenziós kvantumos soktest rendszerekben

PHD TÉZISFÜZET

SZÁSZ-SCHAGRIN DÁVID

Supervisor: DR. TAKÁCS GÁBOR
Egyetemi tanár
BME Fizika Intézet
Elméleti Fizika Tanszék



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
2024

Bevezetés

Az erősen kölcsönható, egydimenziós kvantum soktest rendszerek nemegyensúlyi időfejlődésének megértése a modern kvantum fizika egyik központi célja, elsősorban az ultrahideg atomos kísérletek rohamos fejlődésének köszönhetően. Egyfelől az elszigetelt kvantumrendszerek sok esetben lassan termalizálódnak, és a dinamikájuk megértéséhez a nemegyensúlyi szituációk kísérleti és elméleti vizsgálatára van szükség. Másfelől sok ilyen rendszer integrálható, és a különleges szórási tulajdonságoknak köszönhetően a dinamika analitikusan is vizsgálható, sok esetben egzaktul. A nemegyensúlyi dinamika leírása kiváltképp nehéz feladat: a rendszerek alacsony dimenzionalitása miatt a kvantum korrelációk szerepe megnő. Ennek következtében az alacsony dimenziós kvantumrendszerek, mint a spinláncok és az $(1+1)$ dimenziós kvantumtérelméletek kiemelt figyelmet élveznek az elmúlt időben. Az egyik legfőbb kérdés ezen rendszerek egyensúlyi helyzetbe való relaxációja, a relaxáció és az egyensúlyi állapot teljes leírása, valamint az integrálhatóság és annak sértésének szerepe a nemegyensúlyi dinamikában.

Ebben a disszertációban erősen kölcsönható egydimenziós kvantumrendszerek dinamikájára koncentrálok. Vizsgálom a *gyenge* típusú integrálhatóságsértést, amikor a sértés a perturbációszámítás magasabb rendjében következik be. Emellett kiemelt figyelmet fordítok különböző $(1+1)d$ relativisztikus kvantumtérelméletek nemegyensúlyi dinamikájára, és vizsgálom a szemiklasszikus közelítések érvényességét és olyan nemegyensúlyi jelenségeket, mint a hamis vákuum bomlása.

Célok

Az első céлом volt annak a demonstrálása, hogy az XXZ spinlánc gyenge integrálhatóságsértése kimutatható a szintkülönbség statisztika vizsgálatával a gyenge és erős integrálhatóságsértő perturbációk összehasonlításával. A gyenge típusú integrálhatóság sértés az integrálhatóságsértés egy új osztálya, sok új eredménnyel és nyitott kérdéssel, elsősorban a különböző osztályokhoz tartozó végesméret skálázás exponensek természetét illetően.

Egy általános cél volt kölcsönható egydimenziós kvantumtérelméletek nemegyensúlyi dinamikájának leírása. A dinamika megértése messze nem triviális, és egy széles körben alkalmazott megközelítés az időfejlődés szemiklasszikus közelítése. Egy határozott célunk volt két különböző szemiklasszikus közelítés, az önkonzisztens gaussi közelítés (SCA vagy átlagtér) és a csonkolt Wigner közelítés (TWA) érvényességének meghatározása. Ehhez a szemiklasszikus időfejlődést egy jól kontrollált numerikus módszerhez, a csonkolt állapottér módszerhez (THA) hasonlítottuk kölcsönható kvantumtérelméletekben.

Harmadikként célunk volt a hamis vákuum bomlás valós idejű szimulációja az $(1+1)$ dimenziós φ^4 modellben, valamint a bomlási állandó pontos meghatározása. Ez az irány kiemelt figyelmet élvez az elmúlt időben mind kísérleti, mind elméleti szempontból, elsősorban a jelenség kozmológiai szerepe miatt.

Végül határozott cél volt a sine-Gordon modell nemegyensúlyi dinamikájának pontos megértése. A modell részleges leírását adja egy csatolt egydimenziós bozonikus kvázikondenzátum párból álló kísérleti rendszernek. A kísérletben lezajló dinamika pontos megértéséhez el-

engedhetetlen a rendszert leíró legegyszerűbb modell ismerete és így a releváns szabadsági fokok meghatározása és a sine-Gordon leírás érvényességének megértése.

Módszerek

Munkám során analitikus és numerikus módszereket is alkalmaztam. Az XXZ lánc gyenge integrálhatóságsértésének vizsgálatára numerikus egzakt diagonalizációval határoztam meg a szintkülönbség statisztikát és a *crossover* csatolás végesméret skálázását. Az $(1+1)d$ φ^4 elmélet nemegyensúlyi időfejlődésének vizsgálatára implementáltam az önkonzisztens gaussi közelítést (SCA), ami egy népszerű szemiklasszikus módszer kölcsönható térelméletek időfejlődésének tanulmányozására. Emellett alkalmaztam a csonkolt állapotter módszer (THA) egyik verzióját, ami összehasonlítási alapként szolgált az SCA és a csonkolt Wigner módszer (TWA) számára. A THA segítségével szimuláltam a hamis vákuum bomlását is, ami a módszer miniszupertér kiterjesztését igényelte. Továbbá egy új, miniszupertér alapú csonkolt konform állapotter módszer segítségével vizsgáltam a sine-Gordon modell nemegyensúlyi időfejlődését és a TWA érvényességét a rendszer dinamikájára.

Új tudományos eredmények

- I. **Megmutattam, hogy a megmaradó áramával perturbált XXZ spinlánc gyenge integrálhatóságsértése kimutatható a perturbált rendszer szintkülönbség statisztikájából.**

Egy integrálható spinláncot perturbálva az egyik megmaradó áramával az integrálhatóság *gyengén* sérül: az integrálható tulajdonságok megmaradnak a perturbációs számítás első rendjében és csak magasabb rendben sérülnek. Ezzel szemben a szokásos *erős* integrálhatóságsértés már a perturbációsértés első rendjében beköveztezik.

Egzakt diagonalizáció segítségével és a szintkülönbség statisztika meghatározásával összehasonlítottam az erősen integrálhatóságsértő másodsomszéd kölcsönhatás és a gyengén sértő áram perturbáció végesméret skálázását és megmutattam, hogy az utóbbi ténylegesen gyengén sérti az integrálhatóságot. Az eredményeimet [1]-ben publikáltam

- II. **Meghatároztam két szemiklasszikus közelítés, az önkonzisztens gaussi közelítés (SCA) és a csonkolt Wigner közelítés (TWA) érvényességét kvantum kvencsek szimulációival az $(1+1)d$ φ^4 elméletben, a szemiklasszikus eredményeket a jól kontrollált csonkolt állapotter módszerhez (THA) hasonlítva.**

Megmutattam, hogy a THA sikeresen alkalmazható a nemegyensúlyi időfejlődés vizsgálatára a tömeg és csatolási paraméterek hirtelen megváltoztatásával (kvencselésével) és az egy pont függvény időfejlődésének a levágásfüggésének a vizsgálatával. Bemutattam továbbá a szemiklasszikus módszerek elromlását a kölcsönhatás növelésével

és egy klasszikus szimmetria-sértett stacionárius állapotnak megfelelő artifaktum megjelenését a TWA-ban amikor a csupasz tömeg negatívvá válik. Az eredményeket a [2]-ben publikáltam.

III. Szimuláltam a hamis vákuum bomlást és numerikusan meghatároztam a bomlási állandót a spontán szimmetriasértett $(1+1)d$ φ^4 elméletben.

A csonkolt állapotter módszer (THA) segítségével szimuláltam a valós idejű bomlást kvantumkvencseket követően egy hamis vákuumhoz közel preparált rendszerben és meghatároztam a bomlási állandót. A numerikus eredmények egyeznek az elméleti jóslattal egy numerikus normálási prefaktor erejéig ami csak a kölcsönhatás erősségét jellemző csatolási állandótól függ. Az eredmények alapján a csonkolt állapotter megközelítés egy hatékony numerikus módszer nem-perturbatív jelenségek pontos vizsgálatára, egyensúlyon kívül is. Az eredményeimet [3]-ban közöltem.

IV. Szimuláltam a sine-Gordon modell nemegyensúlyi időfejlődését, ami két Josephson-csatolt egydimenziós bozonikus kvázikondenzátum dinamikáját írja le. Az eredmények bemutatják, hogy a kísérletileg is elérhető gyengén kölcsönható paraméter tartományban az időfejlődés jól közelíthető egy szemi-klasszikus leírásmóddal és tisztázzák a fonon módusok szerepét a dinamikában.

Egy új, miniszupertér-alapú csonkolt állapotter megközelítést (MSTHA) és a csonkolt Wigner közelítést használva szimuláltuk az egyopnt függvény és a fonon betöltési számok időfejlődését a kölcsönhatás erősségét jellemző csatolási paraméter széles skálájára, valamint egy magas és egy alacsony energiás kvencs protokollra. Az eredmények továbbá bemutatják, hogy az MSTHA pontosan leírja a dinamikát az erősen kölcsönható tartománytól a kísérletileg elérhető gyengén kölcsönható tartományig, mindaddig, amíg a kvencs során injektált energiasűrűség elég kicsi. Az eredményeket a [4] publikáció tartalmazza.

Hivatkozások

- [1] D. Szász-Schagrin, B. Pozsgay, and G. Takacs, „Weak integrability breaking and level spacing distribution,” *SciPost Physics* **11** (2021) 037, arXiv:2103.06308 [cond-mat.stat-mech].
- [2] D. Szász-Schagrin, I. Lovas, and G. Takács, „Quantum quenches in an interacting field theory: Full quantum evolution versus semiclassical approximations,” *Phys. Rev. B* **105** (2022) 014305, arXiv:2110.01636 [cond-mat.stat-mech].
- [3] D. Szász-Schagrin and G. Takács, „False vacuum decay in the $(1+1)$ -dimensional φ^4 theory,” *Phys. Rev. D* **106** (2022) 025008, arXiv:2205.15345 [hep-th].
- [4] D. Szász-Schagrin, I. Lovas, and G. Takács, „Nonequilibrium time evolution in the sine-gordon model,” *Phys. Rev. B* **109** (2024) 014308.