

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD Thesis

**A funkcionális renormálási csoport
néhány alkalmazása a
kvantumelméletben**

**Several applications of functional
renormalization group in quantum
theory**

Kovács József

Témavezető/Supervisor: Dr. Sailer Kornél



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája
UNIVERSITY OF DEBRECEN
PhD School in Physics
Debrecen, 2017

1. Bevezetés

Doktori értekezésemben különböző kvantumelméleti modelleket (az egyszerű kvantált anharmonikus oszcillátort, a Caldeira–Leggett-modell egyes változatait, a sine-Gordon-modell nagyenergiás kiterjesztését és a sine-Gordon-modell egyik speciális általánosítását) tárgyaltam a funkcionális renormálásicsoport-módszer (a továbbiakban RG-módszer) segítségével. Amint valamelyest a tárgyalt modellek sokszínűsége is mutatja, a módszer felhasználása rendkívül sokoldalú, az RG szerteágazó alkalmazási köre mind a szilárdtestfizika, mind a részecskefizika tárgykörébe tartozó fizikai rendszereket felölel, lehetőséget nyújtva statisztikus fizikai, kvantummechanikai és kvantumtérelméleti modellek vizsgálatára.

Az RG-módszer kvantumtérelméleti modellekre történő alkalmazása során a Feynman-féle pályaintegrálos kvantálásban alapuló funkcionális formalizmus jelent kiindulópontot. Ez a formalizmus egyrészt lehetőséget nyújt arra, hogy a kvantummechanikai modelleket speciális térelméleti modelleknek tekintsük, melyek térváltozója a klasszikus modellek pályáinak felel meg, másrészt az imaginárius időváltozó bevezetésével kapott, ún. euklideszi téridőben tekintett kvantumtérelméleti modelleket klasszikus statisztikus fizikai rendszerekként tárgyalhatjuk. Ekkor a térelméleti tárgyalás a diszkrét rácspontokban elhelyezkedő, klasszikus módon viselkedő spinváltozókat tartalmazó modellek folytonos általánosításának tekinthető.

A szakirodalom alapján az RG-nek legalább kétféle megközelítést különböztethetjük meg. A történetileg korábbi Wilson–Polchinski-féle megközelítésben többek között a skálafüggő hatásra vonatkozó Wegner–Houghton-egyenletet, míg az effektívhatás-formalizmusban az effektív hatásra vonatkozó Wetterich-egyenletet vezethetjük le. Amellett, hogy a

Wetterich-egyenlet megközelítése a Wegner–Houghton-egyenletnél általánosabbnak tekinthető, a közvetlenül az effektív hatásra vonatkozó egyenlet rendkívül előnyös a vizsgált elmélet jellemzése céljából. Az effektívhatás-formalizmus keretében bizonyos értelemben azt szemlélhetjük, hogy a pályaintegrálos kvantálást fokozatosan figyelembe véve a klasszikus modell hogyan ölti magára a kvantált elmélet tulajdonságait.

A számítások kivitelezése során néhány kivételes esettől eltekintve mindig közelítések alkalmazására kényszerülünk, melynek során a funkcionálra vonatkozó differenciálegyenletet függvényekre vonatkozó differenciálegyenlet-rendszerrel helyettesítjük. A gyakran alkalmazott lokálispotenciál-közelítés során például csupán a hatás potenciális tagjának skálafüggését vesszük figyelembe. A modellt jellemző funkcionálnak azokra a paramétereire, melyek változását figyelemmel kísérjük csatolásokként hivatkozunk. Technikai okokból vizsgálatunkat gyakran a potenciál sorfejtésének vezető tagjai által szolgáltatott, skálafüggő együtthatókra vonatkozó közönséges differenciálegyenlet-rendszer megoldásával végezzük.

Az RG-módszer hatékonysága abban is megnyilvánul, hogy bizonyos esetekben fontos következtetéseket vonhatunk le a vizsgált modellről a csatolásokra vonatkozó differenciálegyenletek teljes megoldása nélkül is, pusztán az egyenletek minőségi viselkedésének leírásával. A fázisszerkezet tanulmányozása során az egyenletek hiperbolikus, ún. Wilson–Fischer-fixpontjának létezését kimutatva két eltérő fázis létezését igazolhatjuk, a fixpont körül linearizált egyenletek viselkedéséből pedig a fázisátalakulást jellemző kritikus exponensek értékére következtethetünk.

Mára a folytonos fázisátalakulások tanulmányozásában elért sikereinek köszönhetően az RG az elméleti kutatások egyik alapvető eszközévé vált. A módszer egyik legnagyobb érdeme, hogy magyarázatot szolgáltatott a folytonos fázisátalakulások során fellépő kritikus jelenségek univerzalitására,

továbbá lehetőséget nyújtott a kritikus exponensek meghatározására és a közöttük fennálló skálatörvények levezetésére.

Az RG-módszer a fázisátalakulások kutatása mellett az alapvető kölcsönhatásokról alkotott szemléletünk fejlődésére is jelentős hatással volt. Az RG szemlélete által ugyanis könnyen belátható, hogy nem elég vizsgálatainkat a perturbatív renormálható elméletekre korlátozni.

2. Célkitűzések

Az RG-módszer alkalmazása a számos eddigi eredmény ellenére több további kutatási kérdést is felvet mind az eljárás további fejlesztésének szempontjából, mind az alkalmazás további modellekre történő kiterjesztését tekintve.

Az első csoportba tartozik a renormálási séma optimalizálásának kérdése. Az RG-módszerrel végzett számítások többféle, elvileg egyenértékű módon elvégezhetőek, ezért a Wetterich-egyenletben szereplő regulátor funkcionál megválasztására számos lehetőség kínálkozik, így a regulátor megválasztása szerint számos renormálási sémát különböztethetünk meg. Ugyanakkor a számítások elvégzése során alkalmazott közelítések következtében az eredmények függenek a renormálási séma megválasztásától, ezért az RG által nyújtott lehetőségek maximális kihasználására törekedve megkezdhetjük a renormálási séma optimalizálásának vizsgálatát.

Értekezésemben egyik célként az optimalizálás kérdésének vizsgálatát tűztem ki, melyre az egydimenziós kvantált anharmonikus oszcillátor viszonylag egyszerű modellje kiváló lehetőséget biztosít. A technikai előnyök mellett az általunk vizsgált ϕ^4 típusú potenciállal rendelkező modell keretében lehetőség nyílik számítási eredményeink pontosan ismert irodalmi értékekkel történő összehasonlítására, lehetőséget

nyújtva az alkalmazott közelítések megbízhatóságának ellenőrzésére. Bár a renormálási séma optimalizálását konvex potenciál esetén vizsgáltam, az egzakt eredményekkel történő összehasonlítás konkáv potenciál esetén is érdekes. Ez az eset kihívást jelent az RG-módszer számára, mert ekkor a kvantummechanikai korrekcióknak köszönhetően a kvantált modell az alapállapot szimmetriája szempontjából a klasszikus modellel eltérő tulajdonságokkal rendelkezik, ezáltal a minőségi leírás a renormálás során alkalmazott közelítésekre érzékenyebbé válik.

Az optimalizálás vizsgálatát időszerűvé teszi, hogy a közelmúltban vált ismertté, hogy az ún. kompakt tartójú folytonosan differenciálható regulátornak (a továbbiakban CSS-regulátornak) a bevezetésével egyes gyakran alkalmazott renormálási sémákra (a Litim-, az exponenciális és a hatványfüggvény regulátor esetére) egyetlen több paraméterrel rendelkező regulátor által definiált séma határeseteként tekinthetünk. Ez azért jelentős, mert így a CSS-regulátornak köszönhetően lehetőség nyílik az előbb említett renormálási sémáknak a legkisebb érzékenységi elve szerint történő összehasonlítására. Ez az elv rendkívül plauzibilis, azonban csupán az azonos funkcionális formával rendelkező regulátorok közötti optimalizálásra alkalmazható.

Az alkalmazások kiterjesztése szempontjából a kvantált Caldeira–Leggett-modell folytonos spektrumú változataiban megjelenő kritikus viselkedés tanulmányozását, a sine-Gordon-modell nagyenergiás kiterjesztésének vizsgálatát, továbbá a bozonizált kvantumszindinamika alacsony-energiás közelítésének vizsgálatát tűztük ki célul.

A kvantált Caldeira–Leggett-modell különböző változatai empirikus modellekként alapvető szerepet töltenek be a nyílt kvantummechanikai rendszerek tanulmányozásában. Az RG-módszer által alkalmazott pályaintegrálos kvantálás nézőpontját tekintve a modellek matematikai formája olyan

klasszikus hatás által definiálható, melyben a releváns alrendszert jellemző tagok mellett az alrendszer és környezete között fellépő kölcsönhatást leíró tag is megjelenik. Ezt a nemlokális tagot a környezetre vonatkozó információkat összefoglaló spektrálfüggvény határozza meg.

Az új tag által a környezet szerepének figyelembevételére alapvető eltéréseket eredményez a zárt alrendszer esetéhez képest, ezáltal egyrészt lehetőséget nyújt a releváns rendszerre vonatkozó mozgásegyenletben disszipatív járulék megjelenésére, másrészt a kvantummechanikai modellek esetén spontán szimmetriasértést tesz lehetővé. Ennek következtében a folytonos spektrumú kvantált modellekben a spektrálfüggvény amplitúdója által kontrollált fázisátalakulás jelenik meg, melyre kvantum-klaszikus átmenetként is hivatkoznak az irodalomban.

Bár a Caldeira–Leggett-modellnek mesterséges ellentag szerepeltetésével értelmezett, tetszőleges frekvenciájú gerjesztést megengedő változata is létezik, a fizikai rendszerek pontosabb leírása megköveteli, hogy figyelembe vegyünk a környezet nagyfrekvenciájú gerjesztéseinek lecsengését. Erre a modell olyan változatai nyújtanak lehetőséget, melyek spektrálfüggvényében frekvencialevágást vezetünk be, elkerülve a fizikai jelentéssel nem bíró divergáló ellentag szerepeltetését. A frekvencialevágás bevezetésére, a levágás értékének megválasztására több lehetőség kínálkozik. Kihasználva az RG-módszernek a fázisátalakulások leírásában megnyilvánuló rendkívüli hatékonyságát célul tűztük ki a fázisátalakulási pont környezetében mutatott kritikus viselkedés tanulmányozását és ezen keresztül a modell különböző frekvencialevágással definiált változatainak összehasonlítását.

Az irodalomban jelentős érdeklődés övezi azokat a tér-elméleti modelleket is, amelyek periodikus önkölcsönhatást tartalmaznak. E modellek közül talán a legismertebb a sine-Gordon-modell, melynek tárgyalásában az RG-módszer már

jelentős sikereket ért el. A modell iránti érdeklődésben szerepet játszanak a modell különleges tulajdonságai (periodicitás, Kosterlitz–Thouless típusú topologikus fázisátalakulás, integrálhatóság) és a szilárdtestfizikai rendszerek által kínált alkalmazási lehetőségek is.

Az RG-módszer korábbi eredményei ellenére a modell nagyenergiás kiterjesztései további megválaszolatlan kérdéseket vetnek fel. Ezek közé tartozik például az aszimptotikus biztonság kérdése. Ennek RG-módszerrel történő tanulmányozása nagyon időszerűnek tűnik, tekintettel a kvantum-Einstein-gravitáció vizsgálatában a közelmúltban elért eredményekre.

Az RG-módszer keretében a sine-Gordon-modell nagyenergiás kiterjesztéséről a skálafüggő csatolásoknak az ultraibolya-tartományban felvett értékeit meghatározva nyerhetünk információt. Ehhez a kiterjesztéshez olyan hatásfukcionál tartozik, amely a térváltozó magasabb rendű deriváltját is tartalmazza, így impulzusfüggő hullámfüggvény-renormálás bevezetése válik szükségessé. Kutatásunk során célul tűztük ki olyan RG-egyenletek levezetését, melyek egy új csatolás figyelembevétele által impulzusfüggő hullámfüggvény-renormálás alkalmazására nyújtanak lehetőséget.

Az irodalomban a sine-Gordon-modell több általánosítása ismert, melyek közvetett módon mértékelméleti modellekhez is kapcsolódnak. Annak ellenére, hogy a fermionikus modelleknek skaláris modelleket megfelelő, bozonizációnak nevezett eljárás csupán kétdimenziós téridőben értelmezett modellek esetén alkalmazható, az ezirányú kutatások is hozzájárulhatnak a természet megismeréséhez, mivel az így nyert skaláris elméletek egyszerűségüknek köszönhetően ideális gyakorlóterepet kínálnak új elméleti módszerek kipróbálására.

Az irodalomban a réteges sine-Gordon-modellnek megfelelő, bozonizált kétdimenziós kvantum-elektrodinamika esetén végzett sikeres vizsgálatok motivációt szolgáltatnak a kétdimenziós euklideszi téridőben értelmezett kvantum-színdinamika (a továbbiakban QCD_2) vizsgálatára. Kutatásunk során célul tűztük ki az alacsony-energiás viselkedésre fókuszálva a réteges modell és a QCD_2 -nek megfelelő bozonikus modell kapcsolatának tisztázását.

Ehhez kulcsfontosságú a bozonizált QCD_2 alapállapotának ismerete. A réteges sine-Gordon-modell esetén sikeresen alkalmazott RG-vizsgálatoknak a bozonizált QCD_2 alacsony-energiás közelítésére történő kiterjesztése triviális alapállapotú térkonfigurációt igényel. A kérdés megválaszolására a Hamilton-sűrűséget minimalizáló térkonfiguráció numerikus meghatározása nyújt lehetőséget.

3. Eredmények

1. A kvantált anharmonikus oszcillátor esetén lokálispotenciál-közelítésben a legkisebb érzékenység elve szempontjából a Litim-regulátornál előnyösebb regulátort határoztam meg, és megadtam ennek a regulátornak az impulzusintegrál analitikus elvégzésére lehetőséget kínáló közelítését és az adott közelítésre vonatkozó RG-egyenletet [1]. Emellett az irodalmi értékekkel történő összevetés által vizsgáltam a renormálás során alkalmazott közelítések megbízhatóságát és a csatolások száma szerinti optimalizálást [1, 2].

2. A Caldeira–Leggett-modell folytonos spektrumú, kvantált változatait vizsgálva meghatároztam a szuszeptibilitás és a korrelációshossz kritikus exponenseit a spektrálfüggvény ultraibolya-levágása esetén és megmutattam, hogy a levágás Debye-féle és Drude-féle bevezetése esetén az expo-

nensek értéke a levágást jellemző frekvencia pontos értékétől független [3]. Vizsgálataim által megmutattam, hogy a Heaviside-féle egységugrás-függvénnyel jellemezhető Debye-féle éles levágás és a Lorentz-függvény típusú lecsengéssel jellemezhető Drude-féle levágás a kritikus exponensek meghatározása szempontjából egyenértékűnek tekinthető.

Emellett az exponensek leolvasására alkalmazott módszer a Caldeira–Leggett-modellnek a levágás mellőzésével tekintett változatára vonatkozó korábbi irodalmi vizsgálatnál pontosabb eredményt szolgáltatott. A Wegner–Houghton-sémában nyert eredményeimet a szuszeptibilitás kritikus exponensére vonatkozóan a Litim-féle renormálási sémában Drude-féle levágás alkalmazásával lokálpotenciál-közelítésben végzett számításaim is megerősítik.

3. Levezettem a magasabb deriváltas csatolással kiegészített kétdimenziós sine-Gordon-modell tárgyalására lehetőséget nyújtó RG-egyenleteket [4]. Ezáltal jelentős módon hozzájárultam a sine-Gordon-modell nagyenergiás kiterjesztésében megjelenő, az általánosan értelmezett aszimptotikus biztonságot sértő új fázis kimutatásához, továbbá a tömeges sine-Gordon-modell és a vizsgált kiterjesztés közötti duális kapcsolat kimutatásához [5].

4. Meghatároztam az egy fermionízzel rendelkező QCD_2 -nek megfelelő bozonizált modell alapállapotát, melynek ismerete a modell alacsony-energiás közelítésének réteges sine-Gordon-modellként történő tárgyalására nyújt lehetőséget. Ezáltal jelentős mértékben hozzájárultam annak igazolásához, hogy az alacsony-energiás viselkedést tekintve a bozonizált modell a Z_2 -szimmetria szempontjából egyetlen fázissal rendelkezik [6].

Összefoglalva téziseimet kutatásaimmal hozzájárultam az RG-módszer tanulmányozásához és alkalmazásának kiterjesztéséhez.

1. Introduction

In my dissertation different quantum theoretical models (the simple quantized anharmonic oscillator, certain variations of the Caldeira-Leggett model, the high energy extension of the sine-Gordon model and a special generalization of sine-Gordon model) were discussed by the help of the functional renormalization group (RG) method. The diversity of the discussed models shows that the application of the method is extremely wide, covering systems both in area of condensed matter physics and particle physics and it allows investigation of statistical physical, quantum mechanical and quantum field theoretical models.

For the application of the RG method for quantum theoretical models the starting point is the functional formalism based on path integral quantization of Feynman. On the one hand this formalism allows one to consider the quantum mechanical models as special quantum field theoretical models where the corresponding field variable is the path of the classical model. On the other hand quantum field theoretical models considered in Euclidean spacetime obtained by introducing the imaginary time variable can be discussed as classical statistical physical systems. In this case the field theoretical discussion can be considered as the generalization of such models which describe classical spin variable in discrete lattice points.

Based on literature at least two main approaches of the RG can be distinguished. Historically the first is the Wilson-Polchinski approach in which framework among others the Wegner-Houghton equation can be deduced for scaledependent action. The other method is the effective action formalism in which we can deduce the Wetterich equation for the effective action. Besides that the approach of the Wette-

rich equation is more general than the Wegner-Houghton equation, the direct equation for the effective action is extremely advantageous for the characterization of the investigated theory. In the framework of the effective action method one is enabled in some sense to consider how the classical model is dressed gradually by the properties of the quantized theory.

Aside from some exceptional cases, during the implementations of the computations approximations are always required, and applying these the differential equation for the functional is replaced by system of differential equations for functions. For example in the case of the often used local potential approximation only the potential term of the action is considered scale dependent. The parameters of the functional whose change is considered are referred to as couplings. For technical reasons our investigations are generally performed by solving the system of ordinary differential equations for the scale dependent coefficients.

The efficiency of the RG method shows itself also therein that in certain cases important consequences can be deduced for the investigated model without the need of the complete solutions for the running couplings only by studying the qualitative behaviour of the equations. During investigation of the phase structure, establishing existence of hyperbolic, so-called Wilson-Fischer fixed point enables one to justify the existence of two different phases and from the behaviour of the linearized equations around the fixed point we can extract the values of critical exponents.

Nowadays RG has become a fundamental device of the theoretical researches due to its successes in the investigation of continuous phase transition. It is one of the greatest merit of the method, that it explains the universality of critical phenomena occurring in the phase transitions, furthermore it enables one to determine the critical exponents and deduce the scaling laws which exist among them.

Besides the description of the phase transition the RG method significantly influenced the development of our view on the fundamental interactions also. Namely in the framework of by the RG approach it can be easily recognized that it is not sufficient to restrict our investigations to the perturbatively renormalizable theories alone.

2. Goals

Despite of the numerous results that have been achieved, the application of the RG method posed more open problems in respect of both its further development and the extension of its applications to further models.

The problem of the optimization of the renormalization scheme belongs to the first group of such problems. Computations by the RG method can be performed in various, theoretically equivalent manner. So numerous possibilities are available for the choice of the regulator occurring in the Wetterich equation and - consequently - numerous renormalization schemes can be distinguished corresponding to various choices of the regulator. However due to the approximations that are made of use during the computations the results depend on the choice of the renormalization scheme. Thereby the optimization of the renormalization scheme cannot be avoided when we endeavour to exploit maximally the possibilities served by the RG.

It is one of my goal in my dissertation, the investigation of the optimization of the renormalization scheme, for which an excellent possibility is ensured in the framework of the relatively simple model of the one-dimensional quantized anharmonic oscillator. Besides the technical advantage the investigated model with ϕ^4 type potential enabled me

to compare the results of my computations with the exactly known values given in the literature, and to keep the applied approximations under control. Though I investigated the optimization of the renormalization scheme in case of convex potential, the comparison with the exact values is interesting in case of concave potential also. The latter is a challenge for the RG method, because in this case the quantized model possesses features with respect to the symmetry of the ground state which are different of those of the classical model due to the quantum corrections, so that the qualitative description will be sensitive to the approximations applied during the renormalization.

The investigation of the optimization has yet its actuality since it has recently been realized that certain often used regulators (the Litim, the exponential, and the power-law regulators) can be considered as limits of a single regulator depending on several parameters, the so-called compact supported smooth (CSS) regulator. This is very important, because it offers the possibility for the comparison of the above mentioned renormalization schemes on the base of the principle of minimal sensitivity by means of the CSS regulator. This principle is extremely plausible, but it can be applied only for optimization among regulators exhibiting the same functional form.

In the respect of extension of the RG method, it was our purpose to investigate the critical behaviour in various versions of the quantized Caldeira-Leggett model with continuous spectrum, the high-energy extension of the sine-Gordon model, and the low-energy approximation of the bosonized two dimensional quantum chromodynamics.

The different versions of the quantized Caldeira-Leggett model as empirical models play a fundamental role in the investigations of open quantum mechanical systems. In the viewpoint of the path integral quantization applied by the RG

method the mathematical form of the models can be defined by such classical action, in which besides the terms characterizing the relevant subsystem also occurs a term which describe the interaction between the relevant subsystem and its environment. This non-local term is determined by the spectral function which summarizes the information about the environment.

By the consideration of the environment's role this new term results in the essentially different behaviour of the open subsystem as compared to the closed one. On the one hand, due to this term a dissipative term occurs in the equations of motion for the relevant subsystem, on the other hand, a phase with spontaneously broken symmetry occurs in the quantum mechanical model. As a consequence, there appears a phase transition in the quantized models with continuous spectrum which is controlled by the amplitude of the spectral function, and referred to in the literature as the quantum-classical transition.

Although there exists a version of the Caldeira-Leggett model allowing for excitations of arbitrary frequencies and defined via the introduction of an artificial counterterm, the more accurate description of physical systems requires to take into account the fall off of the high-frequency excitations of the environment. This is achieved by such versions of the model in which a frequency cutoff is introduced. In this manner one can avoid the introduction of the divergent counterterm which has no physical meaning. There are several possibilities to introduce the frequency cutoff and to choose its value. Exploiting the rather high efficiency of the RG method in the description of phase transitions we proposed to investigate the critical behaviour around the point of the phase transition and to compare the various versions of the model in this way.

In the literature considerable attention is paid to field theoretical models possessing periodic self-interaction. Perhaps among this models the best known is the sine-Gordon model in whose investigation the RG method has achieved considerable successes. This attention to the sine-Gordon has appeared due to its specific features (periodicity, Kosterlitz-Thouless type topological phase transition, integrability) and its applications in condensed matter physics.

Despite of the success of the application of the RG method to the sine-Gordon model, its high-energy extensions pose further unresolved problems, among those asymptotic safety is a rather hot topic. The investigation of this question by the RG method is of great actuality owing to the recent results obtained in the investigation of the quantum Einstein gravity.

In the framework the RG method informations on the high-energy extension of the sine-Gordon model can be obtained by the determination of the values of the scale dependent couplings in the ultraviolet regime. Such an extension is characterized by an action functional which contains terms with higher order derivatives of the field variable, so it demands the introduction of momentum dependent wave-function renormalization. It was my purpose to deduce RG equations taking the momentum dependent wave-function renormalization into account via the introduction of a new coupling.

In the literature several generalizations of the sine-Gordon model are known which are connected to gauge theoretical models in indirect manner. Despite of the fact that the method of bosonization which maps fermionic models to scalar models is applicable only for models defined in two-dimensional spacetime, investigations based on bosonization may also contribute to the better understanding of the na-

ture, since the bosonized models offer an ideal ground to try out new theoretical methods.

The well-known success of the investigations in the framework of the bosonized two-dimensional quantum electrodynamics which corresponds to the layered sine-Gordon model gives the motivation to investigate also the quantum chromodynamics defined in two-dimensional Euclidean spacetime (QCD_2). I focussed my investigation to the low-energy behaviour of QCD_2 , in order to clarify the connection between the layered sine-Gordon model and the bosonized version of QCD_2 .

In this respect the key point is the determination of the ground state of the bosonized QCD_2 . The extension of the known successful RG investigations of the layered sine-Gordon model to the low-energy approximation of the bosonized QCD_2 demands a trivial field configuration in the ground state. The problem of the ground state can be answered by the numerical search for the field configuration which minimizes the Hamilton density.

3. Results

1. In the case of the quantized anharmonic oscillator in the local potential approximation I determined a regulator which is more advantageous than the Litim regulator in respect of the principle of minimal sensitivity. I gave the approximation of this regulator in which the momentum integral can be performed analytically and I gave the RG equation for this approximation [1]. In addition, comparing my results with those in the literature I investigated the confidence of the approximations applied during the renormaliza-

tion and the optimization with respect to the number of the couplings [1, 2].

2. Investigating various versions of the quantized Caldeira-Leggett model with continuous spectrum I determined the critical exponents of the susceptibility and the correlation length including the ultraviolet cutoff of the spectral function. I showed that the values of the exponents are independent of the exact value of the frequency cutoff when the latter is introduced as either the Debye or the Drude type cutoff [3]. By my investigations I showed that the Debye type sharp cutoff characterized by the Heaviside type unitstep function and the Drude type cutoff characterized by the fall off of the Lorentzian function can be considered equivalent in respect of the determination of the critical exponents.

In addition my method applied to the reading off the exponents served more precise results than the previous investigations in the literature where the Caldeira-Leggett model was considered without the inclusion of the frequency cutoff. My results for the critical exponent of the susceptibility obtained in the Wegner-Houghton scheme were affirmed by my computations in the Litim scheme with Drude type cutoff in the local potential approximation.

3. I deduced RG equations which enable one to discuss the sine-Gordon model extended with the inclusion of higher-order derivative terms [4]. In this manner I significantly contributed to establishing the existence of the new phase in the high-energy extension of the sine-Gordon model which breaks asymptotic safety, as well as to establishing the dual connection between the investigated extension of the sine-Gordon model and the massive sine-Gordon model [5].

4. I determined the ground state of bosonized version of QCD_2 with one fermion flavour. The knowledge of that ground state enables one to discuss the low-energy approximation of the model as a layered sine-Gordon model. By this

I contributed significantly to the justification of the existence of a single phase with respect to the Z_2 symmetry, so far the low-energy behaviour of the bosonized model is considered [6].

Summarizing, my results have contributed to the investigation of the RG method and the extension of its application.

A doktori dolgozat témájához
kapcsolódó közlemények listája

List of publications related
to the PhD thesis

1. **J. Kovacs, S. Nagy, K. Sailer**
"Optimized regulator for the quantized anharmonic oscillator"
International Journal of Modern Physics A **30**, 1550058,
(2015), **IF: 1.799**
2. **J. Kovács, S. Nagy, K. Sailer**
"On optimization of the functional renormalization group applied to the quantized anharmonic oscillator"
Acta Physica Debrecina **XLVII**, 77-86, (2013), **IF: -**
3. **J. Kovács, B. Fazekas, S. Nagy, K. Sailer**
"Quantum-classical transition in the Caldeira-Leggett model"
Annals of Physics **376**, 372-381, (2017), **IF₂₀₁₆: 2,465**
4. **J. Kovács, S. Nagy, K. Sailer**
"Momentum dependent wave-function renormalization for the sine-Gordon model"
Acta Physica Debrecina **XLVIII**, 1, (2014), **IF: -**
Csak elektronikusan érhető el./ Available only online:
<http://www.phys.unideb.hu/apd/sites/default/files/content/2014/kovacsjozsef.pdf>
5. **J. Kovács, S. Nagy, K. Sailer**
"Asymptotic safety in the sine-Gordon model"
Physical Review D **91**, 045029, (2015), **IF: 4,506**

6. **J. Kovács, S. Nagy, I. Nándori, K. Sailer**
"Renormalization of QCD_2 "
Journal of High Energy Physics **2011/01**, 126, (2011),
IF: 5,831

Konferencia-előadások

Talks

1. **Statisztikus Fizikai Nap 2012**
Budapest, Magyar Tudományos Akadémia
2012. március 14.
Kovács J., Nagy S., Sailer K.
"Kvantált anharmonikus oszcillátor renormálása"
2. **Complexity from quantum systems to emergent behavior Winter School and Workshop**
Debrecen, 2012. december 12.
J. Kovács, S. Nagy, K. Sailer
"Renormalization of the quantized anharmonic oscillator"
3. **Fizikus Doktoranduszok Konferenciája**
Balatonfenyves, 2013. június 21-23.
J. Kovács, S. Nagy, K. Sailer
"Kvantált anharmonikus oszcillátor renormálása"
4. **Fizikus Doktoranduszok Konferenciája**
Balatonfenyves, 2014. június 12-15.
J. Kovács, S. Nagy, K. Sailer
"Optimalizált regulátor a kvantált anharmonikus oszcillátor esetén"
5. **Fizikus Doktoranduszok Konferenciája**
Balatonfenyves, 2015. június 11-14.
J. Kovács, S. Nagy, K. Sailer
"A Caldeira-Leggett modell vizsgálata funkcionális renormálási csoport módszerrel"

Poszterek

Posters

1. Magyar Fizikus Vándorgyűlés

Debrecen, 2013. augusztus 21-24.

J. Kovács, S. Nagy, K. Sailer

"Kvantált anharmonikus oszcillátor renormálása"



Nyilvántartási szám: DEENK/197/2017.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Kovács József
Neptun kód: TYZSYD
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10058399

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

1. **Kovács, J.**, Nagy, S., Sailer, K.: Momentum dependent wave-function renormalization for the sine-Gordon model.
Acta Phys. Debr. 48 (1), [1-9], 2014. ISSN: 1789-6088.
2. **Kovács, J.**, Nagy, S., Sailer, K.: On optimization of the functional renormalization group applied to the quantized anharmonic oscillator.
Acta Phys. Debr. 47, 77-86, 2013. ISSN: 1789-6088.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

3. **Kovács, J.**, Fazekas, B., Nagy, S., Sailer, K.: Quantum-classical transition in the Caldeira-Leggett model.
Ann. Phys. 376, 372-381, 2017. ISSN: 0003-4916.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aop.2016.12.010>
IF: 2.465 (2016)
4. **Kovács, J.**, Nagy, S., Sailer, K.: Asymptotic safety in the sine-Gordon model.
Phys. Rev. D. 91 (4), 045029-1-7, 2015. ISSN: 1550-7998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.91.045029>
IF: 4.506
5. **Kovács, J.**, Nagy, S., Sailer, K.: Optimized regulator for the quantized anharmonic oscillator.
Int. J. Mod. Phys. A. 30 (12), 1550058-1-11, 2015. ISSN: 0217-751X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0217751X1550058X>
IF: 1.799



6. **Kovács, J.**, Nagy, S., Nándori, I., Sailer, K.: Renormalization of QCD2.

J. High Energ. Phys. 1, 126 [17], 2011. ISSN: 1126-6708.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01\(2011\)126](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01(2011)126)

IF: 5.831

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 14,601

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
14,601**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudománymetriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2017.06.29.





Registry number:
Subject:

DEENK/197/2017.PL
PhD Publikációs Lista

Candidate: József Kovács
Neptun ID: TYZSYD
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10058399

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (2)

1. **Kovács, J.**, Nagy, S., Sailer, K.: Momentum dependent wave-function renormalization for the sine-Gordon model.
Acta Phys. Debr. 48 (1), [1-9], 2014. ISSN: 1789-6088.
2. **Kovács, J.**, Nagy, S., Sailer, K.: On optimization of the functional renormalization group applied to the quantized anharmonic oscillator.
Acta Phys. Debr. 47, 77-86, 2013. ISSN: 1789-6088.

Foreign language scientific articles in international journals (4)

3. **Kovács, J.**, Fazekas, B., Nagy, S., Sailer, K.: Quantum-classical transition in the Caldeira-Leggett model.
Ann. Phys. 376, 372-381, 2017. ISSN: 0003-4916.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aop.2016.12.010>
IF: 2.465 (2016)
4. **Kovács, J.**, Nagy, S., Sailer, K.: Asymptotic safety in the sine-Gordon model.
Phys. Rev. D. 91 (4), 045029-1-7, 2015. ISSN: 1550-7998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.91.045029>
IF: 4.506
5. **Kovács, J.**, Nagy, S., Sailer, K.: Optimized regulator for the quantized anharmonic oscillator.
Int. J. Mod. Phys. A. 30 (12), 1550058-1-11, 2015. ISSN: 0217-751X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0217751X1550058X>
IF: 1.799



6. **Kovács, J.**, Nagy, S., Nándori, I., Sailer, K.: Renormalization of QCD2.

J. High Energ. Phys. 1, 126 [17], 2011. ISSN: 1126-6708.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01\(2011\)126](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01(2011)126)

IF: 5.831

Total IF of journals (all publications): 14,601

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 14,601

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of Web of Science, Scopus and Journal Citation Report (Impact Factor) databases.

29 June, 2017

