九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Reweighting method for nuclear effective field theory on a lattice on the basis of renormalization group analysis

佐々部, 悟

https://doi.org/10.15017/1806808

出版情報：九州大学, 2016, 博士（理学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

氏　名　：　佐々部　悟

論文名　：　Reweighting method for nuclear effective field theory on a lattice on the basis of renormalization group analysis
(格子上の核子系有効場理論に対する繰り込み群解析に基づいた再加重法)

区　分　：　甲

論　文　内　容　の　要　旨

実験技術の向上により，中性子ドリップライン近傍の不安定核においてハロー構造やスキン構造が次々に発見されている．また, 2010, 2011 年に 2 倍の太陽質量をもつ中性子星が発見された [1,2]．これらの有限核および有限密度核物質を研究する最善の方法は，強い相互作用の基礎理論である QCD を格子上に定義し Monte Carlo 計算を実行する 格子 QCD (Lattice QCD; LQCD) 法であるが，有限核を記述する際にはその格子の大きさから計算量が増大するために，有限密度核物質を記述する際には化学ポテンシャルが引き起こす符号問題の為に，その実行は極めて困難である．

そこで，低エネルギーにおいて QCD と等価な核子系有効場理論 (Nuclear Effective Field Theory; NEFT) を LQCD と同様に格子上に定義し Monte Carlo 計算を実行する代替的な方法, Lattice NEFT (LNEFT) が考えられる. LNEFT は，運動量切断に対応する格子間隔が大きいために有限核を収容可能な大きさの格子についても LQCD に比べて計算量が少なく，化学ポテンシャルによる符号問題が起きないために有限密度系に容易に適用可能であるという利点がある．一方で, NEFT は有効場理論であるために，よりエネルギーの高い系に適用する場合には微分をより多く含む高次の演算子やπ中間子などの他のハドロンとの結合を導入する必要があり，それらの演算子によって符号問題が起きてしまうという問題がある．

本論文では, LNEFT の符号問題に対する解決方法として繰り込み群解析に基づいた再加重法 (Reweighting 法; RW 法) を開発し，その有効性を検証した．その為，本論文の内容は LNEFT の繰り込み群解析とその結果に基づいて RW 法を適用した格子計算とに大別される．具体的には，π中間子を含まない Next-to-Leading Order (NLO) の NEFT に対してこの一連の解析を実行した．この理論は，π中間子を含む NEFT とは異なり，特定のパラメタ領域において符号問題が発生しないという特徴をもつ為, RW 法を適用した結果と RW 法によらない結果とを比較できるという利点がある．

連続な時空間に定義されたπ中間子を含まない NLO の NEFT に対する繰り込み群は，解析計算によって既に調べられている [3]．しかし, RW 法に必要な繰り込み群の情報は臨界指数のような普遍的な量ではなく，非自明固定点の位置およびその近傍での繰り込み群の流れの振る舞いなどの正則化に依存する量である．その為，格子上で定義された理論に対して繰り込み群解析を実行する必要がある．そこで，格子上で定義されたπ中間子を含まない NLO の NEFT の Hamiltonian を 2 核子状態に対して数値的に対角化し，基底状態(束縛状態)の束縛エネルギーと漸近規格化係数を低エネルギーの物理量として固定することにより，強結合領域の繰り込み群の流れを求めた [4]．また，その結果と近似的な解析計算 [5] を用いて得られた格子上での繰り込み群の流れとを比較した．これにより，両者の非自明固定点の位置は非常に近いことが判明した．一方で，非自明固定点から離れるにつれて繰り込み群の流れの様子に差異が見て取れた．

繰り込み群解析の結果から，低エネルギーの物理に大きく寄与する拡大的演算子とあまり寄与しない非拡大的演算子とに分離することができる．そこで，非拡大的演算子を除いたフェルミオン行列式を確率分布関数として用いる RW 法を考える．この RW 法において，非拡大的演算子の寄与は加重因子によって取り込まれる．また，この RW 法の有効性を調べる為，確率分布関数に含まれる拡大的演算子とは別の拡大的演算子の寄与を加重因子によ

って取り込んだ場合と比較した．その結果，拡大的演算子に比べて非拡大的演算子の寄与は加重因子を大きく変化させることがなく，RW 法としての収束性に優れることが明らかになった．繰り込み群解析から期待されたこの結果は，零密度系だけでなく有限密度系の場合でも保持されることが分かった．

以上のことから，ある種類の LNEFT においては，繰り込み群解析に基づいた RW 法によって符号問題を回避し効率的に格子計算を実行することが可能であることが示された．また，π 中間子と核子との結合は非拡大的であるので，本論文で提案した RW 法は π 中間子を含む NEFT に対して適用可能であると考えられる．

参考文献

[1] P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts, and J. W. T. Hessels, Nature (London) 467, 1081 (2010).

[2] J. Antoniadis, *et al.*, Science 340, 123232 (2013).

[3] K. Harada, K. Inoue, and H. Kubo, Phys. Lett. B 636, 305 (2006).

[4] K. Harada, S. Sasabe, and M. Yahiro, Phys. Rev. C 94, 024004 (2016).

[5] R. Seki and U. van Kolck, Phys. Rev. C 73, 044006 (2006).