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

Nucleon-nucleon scattering on the basis of Wilsonian renormalization group analysis in nuclear effective field theory

榮田, 達也

https://doi.org/10.15017/1398272

出版情報：九州大学, 2013, 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・(本籍・国籍)	さかえだ　たつ　や 榮　田　達　也（沖縄県）
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	理博甲第１２１３号
学位授与の日付	平成25年5月31日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当　理学府　物理学専攻
学位論文題目	Nucleon-nucleon scattering on the basis of Wilsonian renormalization group analysis in nuclear effective field theory（核子系有効場理論におけるWilson流くり込み群に基づく核子-核子散乱の解析）
論文調査委員	（主　査）教　授　原　田　恒　司 （副　査）教　授　八　尋　正　信　　教　授　野　呂　哲　夫

論　文　内　容　の　要　旨

核子の主な相互作用は強い相互作用であり、QCDで記述されるが、低エネルギーでは非摂動論的なので、核子-核子散乱をQCDに基づいて第一原理から解析することは困難である。そのため通常は、potential模型で解析されるが、系統的には取り扱えない。系統的な核子-核子散乱の解析をするためには有効場理論を用いなければならない。

一般に有効場理論には無限種類の相互作用が含まれるが、有効場理論を使って物理量を求める際、無限個ある相互作用のそれぞれの大きさを見積もる必要がある。相互作用が寄与する大きさを決定することは次数勘定と呼ばれる。核子系の場合、全ての相互作用を非摂動的に扱う、Weinbergの次数勘定をすると、ある次数で現れるカットオフ依存性をより高い次数の演算子で吸収しなければならなくなる、という問題が起こる。そのためKSWの次数勘定と呼ばれる別の次数勘定が提案された。それは接触相互作用のうちある一つの相互作用は非摂動的に扱い、残りの接触相互作用は摂動的に扱うような次数勘定である。KSWの次数勘定ではパイ中間子の寄与を摂動的に扱う。

パイ中間子を含む核子系有効場理論を用いたKSWの次数勘定による核子-核子散乱の位相のずれの

解析が、Flemingらによって行われた。この研究によってS波のスピン3重項のNNLOで、有効理論としての展開が破綻するという結果が得られた。これは3重項のテンソル型のパイ中間子交換の短距離における特異性に起因すると考察されている。

一方、核子系有効場理論のWilson流のくり込み群の解析(K.Harada, H.Kubo, Y.Yamamoto(2011))により、次数勘定の決め方が議論された。パイ中間子の短距離の寄与は核子同士の接触相互作用に含まれていると考えられる。解析の結果、核子間の接触相互作用のうちの一つが、S波ではrelevantな相互作用であるという結論が得られている。このrelevantな相互作用は非摂動的に取り扱う必要があり、それ以外の接触相互作用は摂動的である。接触相互作用の次数勘定はKSWに一致するが、パイ中間子の寄与に関しては異なる。すなわち短距離の寄与の一部は非摂動的に、長距離の寄与は摂動的になるため、二つの寄与を分離して解析すべきであるという結論が得られた。

本研究では、くり込み群の考えに基づき、パイ中間子の寄与を短距離と長距離に分けて、核子-核子散乱の位相のずれの解析をした。解析の具体的な方法として、パイ中間子を含まないプロセスでは次元正則化を使い、パイ中間子を含むプロセスではカットオフによる正則化を使う、2種類の正則化によるHybrid regularizationを提案した。Hybrid regularizationを使うことによって、LOの相互作用が一つの演算子で書け、カットオフだけを使う場合より簡単にかつ、パイ中間子の長距離の寄与だけを取り入れて計算できるようになった。また、Wilson流くり込み群の解析の結果から、パイ中間子の短距離の寄与をrelevantな相互作用に含めなければならないので、1重項と3重項の両方に現れるスカラー相互作用と、3重項だけに現れるテンソル相互作用についてそれぞれ考察した。

以上の方法を用いて陽子-中性子散乱の位相のずれをS波のスピン1重項と3重項に関してNNLOまで求め、得られた結果をNijmegenの部分波解析にフィットした。1重項ではFlemingらと同様の結果になり、フィットで得た結合定数の値は自然な大きさで、展開の次数を上げても変化が小さくなり、良い展開になっていることが確認された。3重項に関してはFlemingらの論文で見られたような破綻はなかった。KSWの次数勘定に近い次数勘定を使うことにより、位相のずれの解析的な計算が実行でき、カットオフ依存性は接触相互作用で吸収でき、カットオフに依存しないことが確認された。

論文審査の結果の要旨

強い相互作用の基礎理論はＱＣＤと呼ばれるクォークとグルーオンを基本的な自由度とするゲージ理論である。それゆえ、強い相互作用をする粒子（ハドロン）の相互作用はすべてＱＣＤによって記述されるはずである。この考えに基づく格子ＱＣＤのような第一原理計算は、世界最高速のスーパーコンピュータを用いた大規模な計算によって行われているが、原子核物理の研究に直接用いられるレベルには未だに達していない。

理論核物理の分野では、伝統的に核子（陽子、中性子）を基本的な自由度として、これらの間の核力ポテンシャルを精密化させてきた。しかし、このポテンシャルを用いたアプローチでは、ＱＣＤとの関係が明らかでなく、また、系統的な改善が行えないという問題がある。つまり、いくら精密ではあっても、モデルでしかないという欠点がある。

これに代わるアプローチとして、核子系有効場理論がある。核子系有効場理論は、場の理論の一般的な原理に基づき、はっきりと決まった適用限界を持つが、カイラル対称性を通じてＱＣＤとの関係が明らかであり、また、系統的に改善可能である。核子系有効場理論は、今後核理論の出発点になりうる可能性を持った枠組みである。

核子系有効場理論は、対称性で許される無限個の演算子を含んでいる。このような理論から意味のある計算結果を導くためには、どの演算子がどの程度重要であるかを決める次数勘定のルールが重要である。与えられた精度を達成するためには、この次数勘定ルールに従って、有限個の演算子を系統的に考慮して計算を進めればよい。

核子系有効場理論の次数勘定は、現在に至るも議論が続いている。もともとの Weinberg の次数

勘定は、現在数値計算で広く用いられているが、次数勘定に関しては矛盾があることは以前から指摘されている。一方、Kaplan らは矛盾のない次数勘定ルール(KSW 次数勘定ルール)を提案した。しかし、Fleming らは、KSW ルールに基づく Next-to-next-to-leading order (NNLO)の計算を行い、有効場理論として収束しないことを示した。

原田らは、Wilson 流繰り込み群の解析を行い、パイ中間子の交換の短距離部分を分離して扱えば、問題は生じず、KSW ルールに近い次数勘定が得られることを示した。

榮田氏の研究は、この理解に基づき、S 波での核子-核子散乱の位相差に対して解析的な NNLO の計算を行うものである。榮田氏は、Wilson 流繰り込み群の解析で、パイ中間子の長距離での寄与と、短距離での寄与を分離することが重要であることから、hybrid 正則化という新しい手法を提案した。この方法では、短距離部分は PDS と呼ばれる次元正則化の一種で取り扱い、長距離部分はガウス型の damping factor を導入する。彼の計算は、まだ多少の問題点は残るものの、Fleming らが見出した有効場理論としての破綻は回避されることを示している。さらに、実験値にフィットして得られる低エネルギー定数の値は、計算の次数を上げても大きく変わらず、その値は次元解析から期待される自然な値になっていることが示された。これは次数勘定の正しさを示すものとして大変重要な性質であり、Weinberg の次数勘定による数値計算では得られないものである。

以上の結果は、長い間 KSW のルールでは収束する有効場理論が作れないとされてきた学会の常識を覆すものであり、その学術的な価値は極めて高いと判断される。また、審査委員が全員出席のもとで行われた公聴会における質問に対しても適切な応答を行い、問題に対する十分な理解を示した。

よって、本研究者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。