

学 位 論 文 題 名

Nuclear Four-Body Systems with Complex Scaled Siegert Method
in Harmonic Oscillator Asymptotic Representation

（調和振動子漸近形表現を用いた複素スケーリング・ジーゲルト法
による核子4体系の研究）

学位論文内容の要旨

最近、核子4体系の研究についての広範な編集がティリイ、ウエラー及びヘイルによって報告された。これは、1973年のファイアマンとメリアホッフによる編集から実に19年ぶりの編集である。この間に核子4体系についての豊富な実験データが蓄積された。

今日、核子4体系の研究は ${}^4\text{He}$ の基底状態にとどまらず励起状態も含めた広範な研究が課題となりうる段階に達した。よく知られている様に核子4体系の状態は ${}^4\text{He}$ の基底状態を除いてすべて共鳴状態である。それらは、アイソスピン $T=0$ の低励起状態 0^+ 、 0^- 、 2^- のみが孤立した共鳴状態として観測可能な巾の狭い状態であり、その他の状態は、隣合った状態が、互いに重なりを持つ巾の広い状態である。ファイアマン達は一単位ブライトーウイグナーの枠組みで位相差から共鳴パラメータを引き出した。しかしながら、これらの状態についての一単位ブライトーウイグナー型の仮定は、妥当性が明らかでない。

ティリイ等は新たに多単位R-行列の方法を用いたパラメータ化を行った。しかしながら、彼ら自身が論文の中で述べているように、多単位ブライトーウイグナーの処方を用いてもなお、散乱行列の真の性質を与えない。これらの系の多くの状態、特にアイソスピン $T=1$ を持つ状態は特にブライトーウイグナー型ではない。

核の共鳴状態の理解の仕方としてもう一つの不十分な点は、ダイナミクスの欠如である。R-行列による実験解析は共鳴パラメータを与える。しかしながら我々の目的

は単に共鳴パラメータを決定するだけではなく系における力学を調べることである。歴史的見地からすれば核物理の初期の段階で共鳴状態は複合核状態として発見された。複合核状態は全ての粒子自由度が励起した極めて複雑な状態であるため、それらの状態の解析の方法として相互作用、波動関数を直接扱わず、系の物理量を共鳴パラメータ、換算巾など数個のパラメータに押し込める、いわゆるブラックボックス的扱いが発達した。一方、核の研究がすすむにつれ核共鳴にはポテンシャル描像で扱うことの出来る直接反応的なものも存在することが明らかになってきた。従って原子核には少なくとも2種類の共鳴状態が共存していることになる。我々はこの意味で4体系の励起状態の力学に興味を持っているのである。

この論文で我々は新しい方法複素スケーリング・ジーゲルト法を提案する。この方法によって我々は相互作用に基づき巾の広い共鳴状態を扱うことが可能になる。この方法で我々は、ブライトウイグナー型の仮定を導入せずに、観測される位相差を再現する相互作用から直接共鳴エネルギーを引き出すことが出来る。

複素スケーリング法は共鳴状態を扱う上で強力な方法である。ある適当なスケーリングパラメータの下で、外向き散乱波の漸近形を持つ共鳴状態を自乗可積分の波動関数に変換することが出来る。この変換によって我々は共鳴状態を通常対角化の手続きで、束縛状態と同様求めることが出来る。しかしながら、核子4体系の励起状態にみられるような巾の広い共鳴状態に対しては、有限な数の基底を用いて解き上げるのには、ある種の困難があることがしだいに明らかになってきた。

巾の広い共鳴状態の波動関数が通常対角化で容易に解けない理由は次のようである：ある与えられたスケーリングパラメータのもとで、巾の広い共鳴状態の波動関数の漸近形は巾の狭いもののそれに比べて緩やかな減衰を示す。一方調和振動子の基底はその最も大きい量子数 n_0 に対応する古典的転回点より遠くは十分に記述できない。従って、切断された空間では、巾の広い共鳴状態の漸近的振舞いを記述することは困難である。さらに、対角化の手続きにおいては、展開係数に余分な境界条件 $C_{n_0+1}=0$ が課せられ、この境界条件が本来のスケールされた共鳴状態の境界条件を覆い隠してしまう。

この10年間フィリポフとオクリメンコ等は、調和振動子を用いた代数的共鳴群法を展開してきた。この方法で彼等は調和振動子表示で束縛状態だけでなく散乱状態を

も記述している。よく知られているように調和振動子による運動エネルギーの行列要素は対角成分とその隣の部分のみの帯行列をなす。従って量子数の大きい漸近領域では展開係数は簡単な三項漸化式を満たす。それらは球ベッセル、球ノイマン関数に対応する正則、非正則解を持つ。展開係数の漸近解のこれらの性質を用いて彼らは散乱状態を調和振動子を用いて記述する。

もし我々がこの方法を複素スケールされた共鳴状態にたいして拡張し漸近領域での展開係数を予め計算することが出来るなら、それを使って共鳴状態の正しい境界条件を表わす新しい基底を導入することが出来る。そしてさきに述べた巾の広い共鳴状態を求める上での困難をのりこえることができるであろう。

この論文では、このアイディアによる、巾の広い共鳴状態を扱う新しい方法、複素スケーリング・ジゲルト法を提案し核子4体系の状態を $3N+N$ クラスター模型に基づき研究する。そしてそれらのレベル構造、性質について $3N-N$ クラスターと N 間の現象論的相互作用に基づき議論する。この方法により我々は相互作用と共鳴エネルギーとその波動関数を同時に扱う道を開いたことになる。

${}^3\text{He} + p$ 、 ${}^3\text{He} + n$ 、 $t + p$ の散乱実験データから引き出した位相差を再現する現象論的相互作用から複素スケーリング・ジゲルト法で得られた共鳴状態は R -行列解析によるものと量子数の対応する単位が得られ定性的な一致が見られた。これは核子4体系の共鳴状態は $3N+N$ クラスター模型と簡単なポテンシャル描像で理解しうることを示している。

アイソスピン $T=1$ 、スピン三重項の 1^- 状態のみが R -行列解析との定量的な一致を示さない。我々はここで、この状態のレベル構造、特徴ある位相差の振舞いの理解の為に、スピン三重項の 1^- との反対称スピン軌道力による結合が重要であることを指摘した。しかしながら、この状態の巾を狭くする機構については $2N-N-N$ チャネルの配位を考慮に入れるべき可能性がある。

この研究により、我々は核の多体的な共鳴状態をそれらの力学に立脚して研究していく道を開いた。また、ここで現象論的に求めたクラスター間の相互作用は、軽い核による核反応の理論的取扱いのために重要な役目を演じると同時に、その性質の理解は核子-核子相互作用に基づく微視的な理解の対象として今後の課題を与えるものである。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	石 川 健 三
副 査	教 授	坂 下 志 郎
副 査	教 授	藤 井 寛 治
副 査	教 授	和 田 宏
副 査	助教授	加 藤 幾 芳

学 位 論 文 題 名

Nuclear Four-Body Systems with the Complex Scaled Siegert Method in Harmonic
Oscillator Asymptotic Representation — 調和振動子漸近複素スケーリング・ジーク
ルト法による4核子系の研究 —

$A = 4$ の原子核は励起状態を持った最も軽い原子核であり、原子核構造研究にとって最も基本となる原子核である。この $A = 4$ の原子核に関する実験データの包括的編纂が、最近では20年ぶりに刊行され、 $A = 4$ の原子核 (${}^4\text{H}$ 、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^4\text{Li}$) の理論解析が重要な課題となった。

$A = 4$ の原子核は ${}^4\text{He}$ の基底状態だけが安定で、他の全ての状態は粒子放出を伴う寿命が短い共鳴状態である。それらの状態の性質を解明する理論が現在まだ確立しておらず、共鳴幅が大きな状態を扱う理論を作ることが急務な課題である。申請者は、共鳴状態を扱う有力な方法として複素座標スケーリング法に着目し、調和振動子波動関数を基底系とする複素座標ジークルト法の開発を行った。この方法の特徴は、複素座標スケーリング法を用いることによって共鳴状態を自乗可積分状態に変換し、その漸近形を調和振動子波動関数の運動エネルギー演算子の行列要素が持つ性質に基づく簡単な漸化式を用いて表わす所にある。実エネルギー軸上の散乱状態の漸近波動関数を、調和振動子波動関数を用いて代数的に求めることは、ソ連キエフの理論グループによって提案された。しかし、彼らの方法は自乗可積分でない状態を自乗可積分の状態で展開するために実用上多くの問題を伴っていた。申請者は複

素座標スケーリング法を用いることによってそれらの問題を解決し、この方法の適用性を拡大することに成功した。この新たな方法の開発によって、幅の広い共鳴状態を含む $A = 4$ の原子核の励起状態の理論的研究が可能になった。

${}^4\text{H}$ 、 ${}^4\text{Li}$ 核の基底状態はそれぞれ ${}^3\text{H} + n$ 、 ${}^3\text{He} + p$ に崩壊するシキイ値エネルギーより高い所にあり、 ${}^4\text{He}$ 核の最初の励起状態も ${}^3\text{H} + p$ シキイ値より高い所に観測される。申請者は $A = 4$ 核の $3N + N$ シキイ値近傍 ($3N = {}^3\text{H}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、 $N = n$ 、 p) の励起状態に注目し、それらの状態の分析のため $3N + N$ クラスタモデルを提案した。その根拠は、軽い原子核の励起構造に関する経験則として知られているシキイ値則 (シキイ値エネルギー領域に対応するクラスタ構造が現われると考える原子核における分子的構造に関する経験法則) にあるが、その正当性は $A = 4$ 核の実験データがこの模型で説明できるかどうかで判断されるべきところのものである。申請者は、 $3N - N$ (${}^3\text{H} - n$ 、 ${}^3\text{H} - p$ 、 ${}^3\text{He} - n$ 、 ${}^3\text{He} - p$) 系についての最近の散乱データを説明する $3N - N$ 間ポテンシャルが存在するかどうか調べた。その結果、極めて一般的な $3N - N$ 間ポテンシャルを中心力、 $L \cdot S$ 力、テンソル力の形で得られることが明らかにされた。さらに、申請者は $T = 1$ の 3P_1 、 1P_1 状態についての実験データを説明するために、通常の核子間力には存在しない $3N - N$ 間の反対称 $L \cdot S$ 力が必要なことを新たに指摘した。そこで得られた $3N - N$ 間ポテンシャルと申請者によって開発された複素座標ジーゲルト法を用いて $A = 4$ 体系の励起状態についての共鳴エネルギーと共鳴幅が求められ、 ${}^4\text{He}$ 核の基底状態を含めて重陽子崩壊のシキイ値エネルギー (${}^4\text{He}$ 核において約 24 MeV) までの全ての $A = 4$ の状態が説明されることが示された。

以上の研究において、申請者は原子核の共鳴状態を扱う極めて有力な方法を新たに開発し、それを用いて $A = 4$ の原子核の励起共鳴状態の包括的解析を行なった。その結果、 $A = 4$ の原子核における $3N + N$ クラスタモデルの有効性を示しただけでなく、従来の共鳴状態の解析を越えた現実的ポテンシャルを通じた共鳴エネルギー・共鳴幅を求める理論解析の道を開いた。これらの成果は、この分野の今後の発展に重要な寄与をなすだけでなく、原子核研究の新たな道を開いたものとして評価される。本論文の主要な内容は、まもなく学術誌に掲載公表される予定である。

以上の研究業績により、審査員一同は、申請者が博士 (理学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。