

学位論文題名

Brueckner-AMD Method and Its Applications
to Light Nuclei

(Brueckner-AMD 法の提唱及び軽い原子核への適用)

学位論文内容の要旨

核子(陽子・中性子)の間に働く核力には特異性の強い斥力芯と状態依存性の強い非中心力があるため、原子核を記述するモデルにそのままの核力(現実的核力)を直接適用することはできない。原子核の基底状態及びその近傍の励起状態は調和振動子の平均場である shell model でよく記述できることが古くから知られ、そのモデルと現実的核力の関係は Brueckner 理論によって説明されている。一方で、主に励起状態において、原子核があるサブユニットに分解し、それらが緩く束縛した cluster 状態が出現することが示唆されている。特に α 粒子 (${}^4\text{He}$ 原子核) 2 つ分である ${}^8\text{Be}$ 原子核においては Tamagaki らによる $\alpha + \alpha$ cluster の研究に始まり、Bando らの cluster model に Brueckner 理論を適用する研究があり、その性質が現実的核力と関係付けられて理解されている。

最近では、現実的核力から出発した様々な第一原理的 (*ab initio*) な手法が提案され原子核に適用されるようになった。こうした第一原理計算により現実的核力の性質に基づいて原子核の状態を議論することが期待されるが、現段階の第一原理計算では励起状態に現れると考えられる cluster 状態の記述が不十分である。一方で、最近の cluster model の発展の 1 つとして antisymmetrized molecular dynamics (AMD) 法がある。この手法は配位を仮定せずに shell model 状態と cluster model 状態のいずれも取り扱い可能であり、工夫次第では第一原理計算で記述不十分な励起状態も記述できることが示されている。しかし、AMD 法では現象論的な核力が用いられ、これまで現実的核力に基づいた議論はされていなかった。

そこで著者は、cluster model に Brueckner 理論を適用した Bando らの研究を参考に、AMD 法に Brueckner 理論を適用し現実的核力に基づいた AMD 法である「Brueckner-AMD」法を提唱した。Brueckner 理論では Bethe-Goldstone 方程式を用いて 2 核子の核内散乱を解きあげ、現実的核力の斥力芯や状態依存性に由来する核子-核子の相関を相互作用に繰り込んで G -matrix と呼ばれる有効相互作用を作る。Brueckner 理論を適用するために

は1粒子軌道が定義される必要があるが、AMD法ではDoteらが提唱したAMD+Hartree-Fock法により自然に1粒子軌道が定義できる。また、AMD法では様々な空間的配位が記述できる代わりに、原子核が有するべき対称性が破れることがあり、projectionによりそれらの対称性を回復する必要がある。実際のprojectionでは波動関数の重ね合わせを行うことになり、異なる配位間の相互作用が必要となる。この場合、異なる配位の間で共通の1粒子軌道を定義できないので直接Brueckner理論を適用できない。そこで著者はBethe-Goldstone方程式の解から得られる相関関数を用いて異なる配位間の*G*-matrixを計算することでこの問題を解決した。

今回、著者はこの「Brueckner-AMD」法を質量数10程度の軽い原子核に適用し、その波動関数やエネルギースペクトルを計算した。その結果、実験データや他の第一原理計算とほぼ矛盾のない結果が得られた。今後、この手法を用いることで核力の性質に基づいて原子核の性質を理解できると期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 加 藤 幾 芳
副 査 教 授 石 川 健 三
副 査 准教授 大 西 明
副 査 准教授 羽 部 朝 男
副 査 教 授 岡 部 成 玄 (情報基盤センター)

学位論文題名

Brueckner-AMD Method and Its Applications to Light Nuclei

(Brueckner-AMD 法の提唱及び軽い原子核への適用)

原子核は有限個の核子（陽子・中性子）からなり、核子間力で互いに相互作用して自立的に束縛する量子多体系である。これまで、ごく少数の少数核子系を除いて、核子間力から原子核の解き上げてその性質を研究されることはなく、殻模型に代表される模型を用いた研究が行われてきた。また、模型研究において核子間の相互作用は、現実の核子間力ではなく有効相互作用が用いられてきた。その理由は、量子多体系を模型に頼らずに計算する方法を持たなかったことに加え、現実の核子間力は特異性の強い斥力芯と状態依存性の強い非中心力があるため、それらの特異性と状態依存性を生かした計算が出来なかったことによる。

しかし、模型計算に適用するのは難しい現実的核力から有効相互作用を構成する理論研究は古くから行われてきた。その代表的理論は Brueckner による G-行列をつくる Brueckner 理論(1955 年) と呼ばれる枠組みである。この理論は現実の核子間力から原子核を記述する可能性を持つものとして、多くの研究がなされてきているが、質量数が 40 以下の軽い原子核の励起状態に観測されるクラスター構造の記述が出来ていないことが問題視されてきていた。

一方、軽い核に観測されるクラスター構造状態は殻模型とは異なるクラスター模型によって良く現象が理解されることが明らかにされてきた。すなわち、殻模型を用いた Brueckner 理論では、模型空間が狭いために、現実的な核子間力から殻的状态は記述できてもクラスター構造を持った状態は記述できないと考えられる。

最近、反対称化分子動力学 (Anti-symmetrized Molecular Dynamics, AMD) と呼ばれるアプローチが提案 (1995 年) され、軽い原子核の殻的状态とともにクラスター構造を持つ状態のどちらも説明することに始めて成功した。この AMD アプローチは、特定の模型を仮定しないことが大きな特徴であり、殻的構造を持つ状態であるかクラスターの構造を持つ状態であるかは、エネルギー変分の 1 つである摩擦冷却法と呼ばれる運動方程式を解くことによって決定される。その意味

で、1つのシミュレーション・アプローチであると考えられる。しかし、この AMD アプローチは有効相互作用を用いたもので、現実的な核子間力を用いたものではない。

そこで、著者は AMD 波動関数がガウス波束であらわされる一粒子波動関数のスレーター行列で与えられることに注目して、Brueckner 理論の適用を試みた。そのアイディアは、クラスター波動関数が分子軌道型一粒子波動関数のスレーター行列式であらされるときに Brueckner 理論を適用できること示した Bando (坂東) 等の考え (1971 年) に基づくものである。すなわち、Brueckner 理論の基本的考えは、核内の核子対 (2 核子) が他の核子を媒質として核内散乱するとして、その散乱行列 (G-行列) を Bethe-Goldstone 方程式と呼ばれる式を解いて求めるところにある。その際、一粒子波動関数とそのエネルギーが必要になるが、AMD アプローチにおいて Dote (土手) 等による AMD+Hartree-Fock 法と呼ばれる方法 (2000 年) を用いることによって容易に一粒子波動関数とそのエネルギーを得ることができる。

これらの方法を用いて、著者は現実的な核子間力を用いて AMD アプローチが実行できる方法を提唱した。この方法を「Brueckner-AMD」と呼び、現実的な核子間力を用いて厳密に解くことができる 4 核子系 (${}^4\text{He}$) の結合エネルギーを計算し、厳密に計算した結果と非常に近い値を得ることに成功した。さらに、質量数 $A=12$ までの軽い原子核にこの方法を適用し、現実的な核子間力から結合エネルギーや励起スペクトルを第一原理的に計算できることを示した。

これを要するに、著者は、現実的な核子間力を用いて原子核の性質を解明する新しい理論である「Brueckner-AMD」を提案し、その方法を軽い原子核に適用して有効性を示したことは、原子核物理学の研究の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格あるもの、と認めるものである。