

# カイラル有効場理論による重い原子核の研究

宮城 宇志 (筑波大学計算科学研究センター miyagi@nucl.ph.tsukuba.ac.jp)

読者の皆様は原子核構造の物理学と聞いてどのような話題を想像されるだろうか。物理学専攻の一般的な学部の講義では液滴模型や殻模型など、直感的に重要と思われる自由度に基づいた現象論的模型が導入され、それらはよく機能しているように見える。読者の方々の中には、それ以上に原子核物理に踏み込んだことのない方もいらっしゃるのではないだろうか。

原子核物理学の目標の一つは、原子核の性質を理解・予測することと言える。残念ながら、前述の液滴模型・殻模型では、未知の量を正確かつ精密に予測することは難しい。したがって、より基本的な自由度から出発して模型を構築する必要がある。

原子核は強い相互作用が支配的な系で、究極的には量子色力学 (QCD) を解けばその性質は再現されるはずである。しかし、QCD が持つ複雑な構造によって、クォークとグルーオンの自由度から出発して核子 (陽子と中性子) の数が 200 程度の原子核の性質を実験と同程度の精度で計算することは今のところ現実的ではない。

低エネルギー原子核物理の分野では、核子を出発点とする近似が広く受け入れられている。当然ながら、核子自由度を出発点とすれば、本来の意味での第一原理計算とは呼べない。しかし、近年では**カイラル有効場の理論 (ChEFT)** による研究が進み、核子自由度を出発点とした理論はより強固なものになっている。さらに**量子多体問題**の解法の発展と組み合わせることで、原理的には、任意精度での計算が可能である。これを根拠に ChEFT から核子自由度による演算子を構築して量子多体問題を解くという枠組みを**原子核の第一原理計算**と呼ぶことにする。

原子核第一原理計算の欠点は、高次に行くにつれて演算子の導出、実装が加速度的に複雑になり、また数値計算で多体問題を解くのにも膨大な計算コストが必要になっ

てしまうことである。しかしながら、これらの困難を乗り越えて第一原理計算を実現することは、原子核の分野だけでなく周辺分野からも強く望まれている。

$^{208}\text{Pb}$  の中性子分布と陽子分布の平均二乗根半径の差で定義される中性子スキン厚はその一例である。比較的測定が容易な陽子分布に対して、中性子は電氣的に中性であるため、その分布を実験的に測定することは非常に難しく、高精度の理論計算が求められている。中性子スキン厚は原子核内部の中性子と陽子の分布の相対関係を反映しており、無限に大きい原子核の性質と結びついている。中性子星は無限に大きい原子核の実現形と考えることができ、電磁波・ニュートリノに加えて重力波による観測が可能になった現在、最も注目を集める研究対象の一つと言えるであろう。 $^{208}\text{Pb}$  の中性子スキン厚を精密に計算することができれば、中性子星の性質の解明へと繋げていくことができる。また、中性子分布は弱い相互作用の形状因子と関わっており、コヒーレント弾性ニュートリノ-原子核散乱や暗黒物質の検知などの研究でも重要となり得る。そのほかにも原子核の正確かつ精密な計算が求められる場面は多く、不定性の評価も含めて高い予言力が期待できる原子核第一原理計算の需要は以前にも増して高まっている。

数年前では第一原理計算の適用範囲は核子数 100 程度の原子核までに限られていたが、最近では技術的な工夫によりその適用範囲が核子数 200 程度の領域へと広がっている。これにより、核子間相互作用・量子多体問題解法による両方の不定性の評価と合わせて実験的に測定の難しい量、例えば  $^{208}\text{Pb}$  の中性子スキン厚などの議論が可能になっている。このように、原子核第一原理計算を用いて周辺分野への応用も見据えた研究が行われつつあり、非常にエキサイティングな時代を迎えている。

## 用語解説

### カイラル有効場の理論:

QCD の低エネルギー有効理論。カイラル対称性とその破れに基づいてラグランジアンが構築されている。運動量の冪乗でラグランジアンに現れる項を制御しており、各次数で多核子相互作用を含む核子間相互作用の導出が可能。

### 量子多体問題:

ここでは非相対論的な多体シュレーディンガー方程式を解くことを指す。最近では、高精度で重い原子核まで解くことができるようになった。

### 原子核の第一原理計算:

通常は QCD から直接原子核を計算する方法として定義されるべきだが、ここでは ChEFT 相互作用と量子多体問題の解法を組み合わせた枠組みを指す。下はその概念図。青い矢印は核子を自由度として ChEFT から核子間相互作用を導出すること、橙色の矢印は導出された相互作用に基づいて量子多体問題を解くことを示している。

