

RCNP 講義 2013

核構造の基本概念_最新版

今日の目的

最新の実験データに照らしながら、現代的な核構造論の最も基本的な概念を精選して解説します。原子核の形とは何か、平均場とは何か、1粒子運動とは何か、集団運動とは何かなど、みなが日常的に使っているけれどそれらの概念の意味をあまり深くは考えていないと思われ、また、ほとんどの教科書にも書かれていないキーワードの深い意味について丁寧に説明します。極めて豊富で一見矛盾した様に見える原子核現象を統一的に理解するためのキーポイント、他の物理分野と比較して、この分野が如何に深く挑戦的な課題に取り組んでいるか、について議論したいと思います。

先ず、原子核に対する最初の描像を思い起こそう

核分裂発見の衝撃：

ゼロエネルギーの中性子によって容易に原子核を破壊できる！

→ 原子核は体積を保存しながら容易に形を変える

→ 密度の飽和性、表面エネルギーの起源の問題を提起

・もちろん、現代の核構造論はこの概念を包摂しなければならない

・核分裂は量子・非線形・非平衡ダイナミクスの宝庫であり、
本来、基礎物理なのに.....

・原子核の存在も励起運動も集団現象

→ 集団現象に対する微視的理論、
大振幅集団運動を記述できる理論の必要性

オープニングクイズ

ヒグス粒子とは.....

「万物に質量を与えた」(水飴のように)

「何もないように思っているこの真空に実はぎっしり詰まっている小さな粒粒」

「この小さな粒粒に邪魔されて弱い力は遠くに届かない」

コメント

- ・いかに素人向けとはいえ古典的粒子描像によるこのような説明はおかしい
- ・対称性が破れるダイナミクスについても質量が生成される機構についても凝縮系や原子核の集団現象についてはるかに高度な研究が進んでいる。

最初に伝えたいこと

ナイーブな平均場描像を乗り越えよう

- 1) 飽和性 → 運動量依存項、密度依存項、有効質量
- 2) 対称性の自発的破れが不可欠
- 3) 形の量子揺らぎが必ず存在
- 4) 平均場の運動(時間依存性) を考えるということの意味
- 5) 有限量子系と無限量子系の関係

最初の問い

「シェルモデルで1粒子運動の質量として核子の裸の質量が使われますが、それでよいのでしょうか? 凝縮系の理論では通常、電子の質量として裸の質量でなく有効質量が用いられています。量子多体系の理論では媒質効果を考慮した有効質量を用いるべきではありませんか」

その他の問題提起

- 「球形ポテンシャル+残留相互作用」という伝統的シェルモデルの枠組みのなかで「原子核の形とその変形」をどのように定義しているのでしょうか
- 原子核の形を実験的にどのようにして測るのでしょうか、
B (E2)から決められますか
- 平均場と一粒子ポテンシャルは同じことですか、違うとしたら何が違いますか
一粒子運動という描像はどのようにして導かれるのでしょうか
- 「一粒子運動と集団運動はコインの表と裏のように切り離せない」とはどういうことでしょうか
- 「集団運動の慣性」とは何のことでしょうか、これを実験的に決められれば何が分かるのでしょうか、
このことを示すよい実例がありますが、それは何でしょうか
- 「軸対称から非軸対称への拡張」は「特殊相対論から一般相対論への拡張」とアナログな側面をもっています。それは何でしょうか

今日の講義のポイント

1. 「平均場と1粒子運動モード」は集団現象である。
 - 平均場は強い相互作用している核子集団が生み出す秩序である
その基底状態は量子場の理論の真空に対応し、
量子多体系を記述するための出発点を与える
2. 有限量子系で1粒子運動モードの描像を得るためには対称性を

破った平均場を導入する必要がある。

- より高次の対称性が破れるにつれて1粒子運動の概念が拡張される。
核構造論の歴史はより良い1粒子運動モードの発見の歴史でもあった。
 - ・球対称性の破れ → 変形シェルモデル
 - ・粒子数（ゲージ対称性）の破れ → 超伝導 BCS モデルの準粒子
 - ・時間反転対称性の破れ → 回転座標系シェルモデル

3. 集団現象が1粒子描像を作る（創発する）」ことを端的に教えてくれたのが超伝導の BCS 理論であった。

- Bogoliubov 準粒子はクーパーペアーの凝縮という集団現象のもとでの1粒子励起モードである。

4. 対称性を破った平均場の基底状態は縮退している。

- 破られた対称性が連続対称性の場合、この縮退を解き、破られた対称性を回復する運動が（一般化された）回転運動である。
 - ・有限量子系ではこの運動が実際に起こり、様々なタイプの回転スペクトルとして観測される。
 - ・軸対称性の破れ → Wobbling 回転バンド
- 破られた対称性が離散対称性の場合には多重項が出現する。
 - ・空間反転対称性の破れ → -パリティ 2 重項
 - ・カイラル対称性の破れ → カイラル 2 重項

5. 平均場は時間変化する。この運動が振動モードとして観測される。

- 有限量子系の平均場の固有関数はそれぞれが多様な個性をもっているため、きわめて多彩な振動自由度がある。

6. 現実の多くの核は平均場の量子相転移の近傍にある。

更に、異なった平均場が共存/競合する変形共存現象が広範に知られている。

- このような大振幅振動も「（一般化された）時間に依存する平均場近似」に基づいて記述することが可能と思われる。

RCNP 研究会 2012 「リングサイクロトロン施設の将来」で強調したこと

○ 核構造物理学の存在意義

量子液滴としての原子核の本性(character)を理解することを目指す。

このこと自体の（基礎科学としての）価値を主張することが大切。

原子核の本性を理解するために、原子核をいろいろな方法で励起させ、それらに対する応答を調べる。原子核を高速回転させることはたいへん魅力的で、かつ、原子核のダイナミカルな性質を明らかにするのにとても有効な手段である。

○ 低振動数の四重極振動とは

有限な超流動系（原子核）の形の量子的ゆらぎのノーマルモードである。
その性格は古典液滴の表面振動とは本質的に異なる。
このような集団現象が何故、どのように生成されるか、
その理解を目的とする微視的理論の構築は量子多体系物理学のなかでも
最も困難でチャレンジングな課題である。

○高スピンの集団ダイナミクス

例えば、1970年代以降の高スピンのフロンティアの著しい拡大にもかかわらず、
高スピンの振動モードはごく僅かしか見つかっておらず未開拓の
研究領域に留まっている。

低振動数の振動モードが高スピンの存在するかどうか、これは自明な問題ではない
open shell の superfluid nuclei では pairing gap, closed shell 核では shell gap の
存在が低振動数の振動モード(2+と 3-)の出現に決定的な役割を果たしているが、
高スピンの場合にはこれらの条件が失われると予想されるから

○集団運動の質量の重要性

原子核の本性（ダイナミカルな性質）は集団運動の質量パラメーター（慣性関数）に
反映される。これらの値を実験で調べることによって系の性質について理解を深める
ことができる。これらをパラメーターとしてその正当性も考えずに実験データをフィッ
トしても理解を進めたことにならない。

良く知られている例

軸対称変形核の回転スペクトルを特徴づける慣性モーメントの値が剛体値と渦なし流
体値の間であることから原子核が超流動状態にあることが分かった。慣性モーメン
トの微視的起源を考えずに、単なる fitting パラメーターとして取り扱っている限りこ
のような認識には到達できない

RCNP 連続講義 2010 「反応実験屋のための核構造学」で受けた質問

問い

新しい実験データが次から次へと出てくる今日、原子核について理論的に統一的な理解
が得られるどころか、より複雑になったような気がします。そんな中、現時点で、どの質
量領域の原子核において、どういう理論模型が実験データをよく説明できているか、それ
ぞれの理論模型の善し悪しについて整理して頂けたらありがたいです。

答

極めて多様で豊富な現象が続々と見つかってきた一方で、それらの総体に対する統一的
な理解が進展してきたし、このことが「現代の核構造論」の最も大事な点であると私は考
えています。「多様な現象の羅列」は理論とは言えません。「その場限りの適当な説明」も

理論とは言えません。理論家の目標は「これらの複雑な現象を簡明な概念に基づいて総合的・統一的に理解すること」です。原子核の現象はとても複雑で、それらを理解することがとりわけ困難であり、長期にわたる地道で膨大な努力が必要とされます。だから、この研究の価値を研究者の広いコミュニティーに理解してもらうことも大変で、私たちは苦勞しています。しかし、このような難しい課題にチャレンジしていることが私たちの誇りでもあります。

「かつて経験したことのない複雑な量子系」と取り組むにあたって、「統一的な描像」というとき「矛盾する概念の相補性」や「自然の階層構造」（時間スケールと空間スケールを変えると異なった様相が姿を現すこと）を常に念頭に置いておく必要があることは勿論です。統一的な描像を描くためには、まず、骨格をデザインすることが必要です。とりわけ、背骨をはっきりさせることが大切です。背骨となる概念は「運動する平均場とその中の1粒子運動」の概念といえます。これまでに実に多様な振動運動や回転運動が発見されていますが、この概念が当てはまらない例はないのではないのでしょうか。もちろん、集団モードも1粒子モードも実に豊富ですから、それに応じて、適切な平均場を見つけなければなりません。

核構造論の歴史は、より適切な1粒子モードと、より適切な平均場を発見し、これらの概念を拡張し深化させてきた歴史であるともいえるでしょう。例えば、高スピニラスト分光学の進展のおかげで、「シェルモデル」も「回転系における準粒子シェルモデル」にまで拡張されてきました。「シェル構造」の概念自体が著しく一般化され深められています。

このような研究の中で、「量子相転移」と「大振幅・非線形のソフトモード」、「対称性の自発的破れ」と「破られた対称性を回復する集団運動」といった概念が発見されてきました。もちろん、この骨格に肉付けし、色づけして素晴らしい絵が出来上がるものだし、この骨格自体が成長を続けています。

こう言ったからといって、原子核現象のすべてがこの概念の枠内に収まるということを主張している訳ではありません。高励起・高温領域での複合核状態は原子核のもうひとつの顔であり、普遍的現象です。しかし、ここでも、平均場描像で捉えられる運動を「秩序運動」と定義し、捉えられない運動を「カオス運動」と定義することによって、両者の共存と移り変わりを統一的に理解するための有効な枠組みを設定することが出来ます。この具体例が「巨大共鳴の減衰」や「回転運動の減衰」メカニズムに対する微視的理解の進展です。幾つかの具体例をあげると

○ 高スピニフロンティアーでは

- ・「バックベンディング現象」の発見と「回転系準粒子シェルモデル」の展開
- ・「超変形状態」の発見と「変形シェル構造の半古典論」の進展
- ・「高スピニラスト分光学」による「高速回転による新しい集団モードや対相転移」の発見とそれらに対する微視的モデルの展開

○ 高励起状態に関して

- ・複合核状態の「レベル統計」に基づく
「量子カオス」理論（ランダム行列理論）の展開
 - ・「巨大共鳴や回転運動の減衰」メカニズムに対する微視的理解の進展
 - ・多様なクラスター構造や分子共鳴の発見と
それらに対する微視的モデルの展開
- 弱束縛不安定核に関して
- ・「中性子ハローやスキン」の発見を契機とする
「連続状態での対相関」、「ソフト双極モード」
「核物質の対称エネルギー」に対する研究の新展開。
 - ・不安定核における変形の新しいメカニズム
(シェル構造の変化、弱束縛状態と連続状態の結合など)
 - ・核構造論と核反応論の融合の時代を切り開く。

問

この50年間は核構造論にとってどのような時代だったのでしょうか

答

安定核どうしの衝突によって、高い励起状態、高スピン状態など極限状況の原子核をつくりだし、量子多体論にもとづく核構造論がおおいに進展し、原子核という不思議な物質に対する描像が革新した時代でした。あえて一言でいえば「微視的モデルと微視的理論が著しく発展した時代」と言えるでしょう。そして今、不安定核ビームをもちいた新しい時代が始まっています。今や構造論と反応論は統一され、ともに核子多体系の新しいダイナミクスを追求しています。

この50年間に実験も核構造論も著しい進展を遂げました、まだ私達は核構造の豊富で深い真実のほんの一部を垣間見たにすぎません。核構造の多様な現象を統一的に記述できる微視的理論の建設はまだ始まったばかりでこの大きな目標を果たすには長期にわたる地道な努力が不可欠です。