

RCNP 連続講義 2010

反応実験屋のための核構造学

講義の主旨

- 多様で複雑な核構造現象を統一的に理解するために有用な視点と概念的枠組みについてできるだけ易しく解説する。
- 原子核という極めて不思議な量子多体系の性質を深く理解するという目標に向かって、最も基本的な少数の現代的概念(キーワード)の意味を最新の実験事実に基づいて具体的に理解することを目指す。
- シェルモデル、平均場モデル、集団運動モデル、クラスターモデル、液滴モデル、複合核モデルなどの相互の関係と位置づけについて議論する。

以下のテーマについて対話型の講義をする。

質問に応じて適宜 追加ないし省略する

1. 量子多体系の集団現象
多様で複雑な核構造・核反応現象の統一的理解をめざして
2. 超低温での集団励起スペクトル
有限量子系における対称性の自発的破れと回復
3. 安定核および不安定核での対相関
真空とその励起モード、密度汎関数理論
4. 高速回転する原子核と超変形状態
高スピフロンティア、高スピン・イラスト分光学、
回転系シェルモデル、超変形シェル構造
高速回転に伴う新しい集団励起モード
5. 大振幅集団運動の微視的理論
時間変化する平均場の理論
量子相転移・変形共存現象
Bohr-Mottelson モデルの微視的導出
6. 不安定核(エキゾチック核)研究の将来
束縛状態と連続状態の統一的記述にむけて

講義の日程

9月3日 13:30 - 17:00 (連続6回のうち第1,2回)

(アナウンス)

多様で複雑な核構造現象を統一的に理解するために有用な視点と概念的枠組みについてできるだけ易しく解説する。原子核という極めて不思議な量子多体系の性質を深く理解するという目標に向かって、最も基本的な少数の現代的概念(キーワード)の意味を最新の実験事実に基づいて具体的に理解することを目指す。シェルモデル、平均場モデル、集団運動モデル、クラスターモデル、液滴モデル、複合核モデルなどの相互の関係と位置付けについて議論する。

10月28日 13:30 - 17:00 (連続6回のうち第3,4回)

(アナウンス)

この講義では、原子核という極めて不思議な量子多体系の性質を深く理解するという目標に向かって、最も基本的な少数の現代的概念(キーワード)の意味を最新の実験事実に基づいて具体的に理解することを目指します。お話しするテーマとしては

1. 量子多体系の集団現象, 2. 超低温での集団励起スペクトル, 3. 安定核および不安定核での対相関, 4. 高速回転する原子核と超変形状態, 5. 大振幅集団運動の理論, 6. 不安定核(エキゾチック核)研究の将来を予定していますが、対話型の講義ですので、寄せられた質問や希望に応じていろいろな話題を追加(ないし割愛)します。

12月16日(木) 13:30 - 17:00 (連続6回のうち第5,6回)

(アナウンス)

この講義では、原子核という極めて不思議な量子多体系の性質を深く理解するという目標に向かって、最も基本的な少数の現代的概念(キーワード)の意味を最新の実験事実に基づいて具体的に理解することを目指しています。今回は、高スピン状態での新しい集団モード、さまざまな核領域での超変形状態の特徴、変形シェル構造の形成と量子・古典対応、弱束縛不安定核の低励起スペクトルなどを例題として、「大振幅集団運動」と「対称性の破れを回復する集団運動」の

基礎的な概念について出来るだけ分かりやすく解説したいと思っています。
ただし、対話型の講義ですので、寄せられた質問や希望に応じて
いろいろな話題を追加（ないし割愛）します。

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。

寄せられた質問

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。

答えの要旨

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での1粒子運動」の概念といえます。これまで見出された集団現象は実に多様ですが、この概念が当てはまらない現象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

○ 高スピフロンティアでは

- ・「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
- ・「高スピイラスト分光学」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。

Q&A

Q この50年間は核構造論にとってどのような時代であったか

- A 安定核どうしの衝突によって、高い励起状態、高スピ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
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」

そして今、不安定核ビームをもちいた新しい時代が始まろうとしている
この状況は、構造論と反応論を統一する新しい課題を提起している

まとめ

この 50 年間に実験も核構造論も著しい進展を遂げたが、
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ない。
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ある。
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ある。

これからチャレンジしたい魅力的なテーマの例

現代的な密度汎関数に基づく大振幅集団運動理論の構築

- Bohr-Mottelson 集団ハミルトニアン of 微視的導出
- さまざまな量子相転移や変形共存現象への系統的適用
- 高スピン状態への拡張：高スピンでの大振幅集団運動への適用
- 弱束縛不安定核への拡張：連続状態と束縛状態の統一的記述
- Odd-A 核への拡張：大振幅集団運動と 1 粒子モードの相互作用
- 自発核分裂のダイナミクス：集団質量の自己無撞着・微視的導出