

I V. 原子核理論グループ

教授 香村俊武
助教授 矢花一浩
講師 宇根 司、橋本幸男
技官 牟田 淳
大学院生 10名

【1】原子核の動的集団遷移の場の理論的研究（香村俊武）

原子核をハドロン多体系として扱い、動的集団遷移の場の理論的研究を進めた。まず、有限核について定常的準安定状態を相対論的平均場理論で記述する。相対論的平均場近似の計算結果を理解するために、原子核が正エネルギー核子からなる描像で、正エネルギー核子間の中間子交換力が核子-反核子励起型の真空偏極により受ける補正を計算した。核内では真空偏極のために中間子の質量と結合定数が変化して、核子間の中間子交換力は結合定数が小さく、到達距離が長くなる。繰り返された真空偏極は核子密度に比例する。このため、真空偏極による中間子交換力の補正は、二核子系では極めて小さいが、核内では顕著になり、媒質効果として現れる。真空偏極補正を取り入れた中間子交換力を真空偏極関数について展開すると、補正項は斥力型の核子間有効三体、四体、五体力になる。このように核内の中間子交換力は核子-核子散乱から得られる核力と異なり、補正を受けて弱くなる。原子核内の核子間相互作用には三体力が必要であることが唱えられているが、これらの現象論における三体力の大きさと比較して、核内の中間子交換力の真空偏極効果補正が現象論から導かれた三体力と同程度の大きさであることが判った。

次に、ハドロン多体系の動的集団遷移を場の理論に基づいて定式化した。上述の準安定平均場状態で表される複数の Hartree 極値状態の間の動的集団遷移を扱う。それぞれの極値状態について、中間子の平均場が決まる。これらの状態間の遷移について、中間子の平均場が線形に変化すると考え、変化する中間子場を遷移を推進する中間子場と名づけて、これを扱う。この近似で、遷移の過程における中間子平均場が決まり、核子の一粒子状態が決まる。中間子場が変化する間に、これら核子の一粒子準位がなめらかに第二の平均場状態に変化するものと、交差して励起準位になるものがある。一般的に推進中間子場は回転対称でないので、これに共変な中間子場成分を考慮すると、これは集団遷移の過程で、推進中間子場だけでは励起してしまう準位を下げ、平均場状態にする効果がある。しかし、滑らかに平均場状態間を移行していた一粒子準位を励起する要因にもなる。このように、推進場とその共変場は集団状態遷移において、相補的な働きをする。遷移推進中間子場、共変中間子場と核子系との相互作用を取り入れた Hamiltonian を開発して、動的集団遷移の基本的かつ典型的な特性を解明した。この系は状態遷移の過程でエネルギーの高い中間状態を経るため、多体系の集団運動のトンネル現象の本質を表している。この理論を拡張して、準安定な平均場状態間の遷移において集団運動がとる道筋の領域をより広く扱うことができる。このようにして、乱雑位相近似 (RPA) 以上の高次補正項が関与する状態遷移の機構を解明した。系の状態変化の時間発展性、遷移確率や崩壊幅などの定式化を行っている。

【2】不安定原子核の反応（矢花、軽部、中務（理研））

(1) 吸収境界条件を用いた核反応理論

中性子数と陽子数が極端に異なる原子核では、幾つかの弱く束縛した核子群が核表面に現れる。それ

らを記述するため、弱く束縛した原子核の構造・反応を記述する理論が必要とされている。我々は、化学反応分野で最近発展している吸収境界条件のアプローチが、弱く束縛した原子核の核反応の記述に有効であることに着目した。重陽子の分解反応に対して吸収境界条件の方法を適用し、既存の連続状態を離散化したチャンネル結合法の計算結果と一致することを確認した。さらに、ハロー構造を持つ原子核の反応に対する予備的な結果を得た。

(2) 不安定核の理論研究のまとめ[矢花]

不安定原子核の反応に関して、最近 10 年間にわたる理論的發展のレビューを共著で著した。また、不安定原子核の構造と反応に関する単行本の執筆を分担した(核反応部分)。

【3】有限フェルミオン多体系のダイナミクス

(矢花、牟田、永野(新潟大)、岩田、乙部、中務(理研)、G.F. Bertsch(Univ. Washington))

原子・分子・原子クラスターなどの系は、孤立した量子多体系として原子核に共通する面がある。特に電子ダイナミクスが本質的な役割を果たす現象は、フェルミ粒子多体系としての共通性から原子核物理で発展してきた概念・手法がしばしば有効である。我々は、原子核研究で広く用いられる時間依存平均場理論の実時間実空間解法を電子系に応用し、電子励起や応答、衝突ダイナミクスの研究を行ってきており、今年度は以下の発展があった。

(1) 時間依存密度汎関数法による電子・振動結合

分子の光吸収スペクトルに見られる電子・振動結合による遷移に対して、時間依存密度汎関数法を用いた研究を行った。ベンゼン分子の電子励起状態の幅や双極禁止遷移の振動子強度を分析し、良い精度で説明されることを明らかにし、時間依存密度汎関数法の電子・振動結合に対する有効性を示した。

(2) 分子の非線形応答

分子の超分極率に対して、時間依存密度汎関数法に基づく、基底関数を用いない新しい計算法の開発を行ってきた。様々な分子に対して超分極率の計算を行い、既存の基底関数を用いた計算と一致することを確認した。従来の基底関数を用いた方法では収束した結果を得ることが困難な大きなサイズの分子に対しても、収束した結果が得られることを示した。また、超短パルスレーザーと分子の相互作用に対する実時間シミュレーションを検討した。

(3) 液体ヘリウム中の原子スペクトル

液体ヘリウム中に原子・分子やクラスターを打ち込み、極低温での光応答を調べる実験が進んでいる。ヘリウムと原子・分子の相互作用は非常に弱いですが、電子状態に応じてスペクトルに特徴的な影響が現れることが知られている。われわれは、将来の分子・クラスター系への応用の準備として、ヘリウムの原子スペクトルに及ぼす影響を調べる簡易な理論的取り扱いを検討した。

(4) RPA 固有値方程式の新しい実空間解法

フェルミ粒子多体系の励起状態や応答を調べる上で RPA は最も基本的な枠組みである。RPA 方程式には様々な定式化があるが、低励起状態を調べるのに最も適した表現は、RPA 固有値方程式である。空間対称性を持たない有限系に対しては、大次元の固有値問題となる。我々は、実空間で RPA 固有値方程式を直接解く、大きな系に有効な方法を開発した。原子核に対する簡単なモデルや分子に対して、その方法の有効性を確認した。

【4】原子核の回転運動 (宇根 司)

回転を半古典論的に扱うクラッキング模型を射影後変分法の視点から検討する仕事を引き続き進めている。射影後変分法は、回転対称性を破った内部状態から角運動量の固有状態への射影を行って対称性を回復させた後で、内部状態について変分をとる量子論である。クラッキング模型は時間反転対称性を破る状態を前提にしているが、その正当性を射影後変分法の視点から調べるために、単純な系について、時間反転対称性を破る内部状態を用いた射影後変分法の数値計算プログラムを開発し、その有効性について検討を加えている。予備的計算で非物理的な見せかけの状態が出現することがわかったので、その除去について考察している。

【5】原子核集団運動の非線型理論 (橋本幸男)

橋本は原子核の集団運動の生成・変化・減衰の力学について平均場を用いた半古典論的な方法と量子論的なモデルによる方法とで調べている。いずれの方法も基本的な考え方は古典力学的な相空間の構造と量子力学的な固有状態の集合とに存在する一定の対応関係を利用して集団運動の変化の力学について統一的な視点を得ることにある。

原子核の集団運動は時間依存平均場 (TDHF) の枠組を利用して記述される。TDHF 軌道は一粒子波動関数の変化を表現しその方程式は古典的な正準方程式である。この方程式は一般に非線形であり TDHF 軌道は規則的なものから乱雑なものまで含まれる。その規則・不規則転移は TDHF 相空間の構造で決定される。また、TDHF 相空間の構造は系の固有状態の内容をも反映する。

橋本は、津久間秀彦 (広島大・医療情報)、坂田文彦 (茨城大・理) の各氏と協力して量子力学的な固有状態の構造変化 (安定性) を解析する方法を展開してきた。主な注目点は、古典力学との対応も考慮に入れて量子力学的な非線形共鳴状態の存在である。非線形共鳴状態には、TDHF 相空間の一連の周期軌道群が対応していることは既に確かめた。周期軌道には安定な周期軌道と不安定な周期軌道とが存在することが知られている。量子力学的な固有状態にも楕円点的な安定な状態と双極点的な不安定な状態があることがわかっている。これらのタイプの固有状態の安定性を調べるために共鳴座標に対応する”共鳴基底”を導入し固有状態をこの新たな基底で表現した。古典力学の場合は、共鳴間の距離と共鳴自身の”幅”との関係で相空間の安定性がおおよそ決まることが知られている。共鳴基底で固有状態を展開すると、古典力学の場合からの類推を用いることができるようになる。まず、共鳴基底による表現でひとつの基底に圧倒的に重みが集中する場合がある。このときは、エネルギーの異なる一連の固有状態群についてその構造はエネルギーの変化に対してほとんど変化しない。たとえば双曲点的状態についてもそうである。次に、主成分のほか二次的な成分が小さいながらも必要になる場合がある。これは、古典力学では二つの共鳴が重なり始めた状況に相当する。この二次的な成分の特徴は、主成分とはタイプの異なるものも混合することである。例えば、楕円点的な主成分に対して双曲点的な状態が混合する等。この場合は、さらに二種類の分類ができる。ひとつは、主成分が”符号規則”により安定で混合してきた共鳴成分の影響が少ない場合。他は、主成分が符号規則により不安定で、さらに、タイプの異なる混合成分が干渉する場合。後者の場合に、固有エネルギーで並べた一連の固有状態はその内部構造が大きく変化していく。これは、古典力学の双曲点近傍の軌道の複雑な構造に相当すると考えられる。

これらの分類と構造変化の解析は”伏見関数”と” μ ν 基底”及び共鳴基底によって簡単なモデルについて続けてきた。これまでに得られた μ ν 基底と共鳴基底の考え方は平均場中の一粒子波動関数の構造変化についても応用が可能であるので、時間依存平均場計算に適用していく。

一方、平均場を用いた方法では、今川博人 (D3)、坂田文彦の各氏と共同で TDHF 波動関数の変化とエネルギー移動 (散逸) との関係を理解する枠組みを考察中である。TDHF 相空間における周期軌道の安定性を調べることにより TDHF 波動関数の構造変化を捉えることがアイディアの発端である。

周期軌道の一例である回転系での波動関数について密度依存力を用いた安定性行列の計算が進行中である。

<学位>

1. 理学博士：高橋和孝
Disordered Systems with Chiral Symmetry

<発表論文>

1. G.F. Bertsch, J.-I. Iwata, A. Rubio, K. Yabana
Real-space, real-time method for the dielectric function
Phys. Rev. B62 (2000) 7998-8002.
2. R. Nagano, K. Yabana, T. Tazawa, Y. Abe
Time-dependent mean-field description for multiple charge-transfer processes
in Ar⁸⁺-Ar collisions
Phys. Rev. A62 (2000) #062721.
3. T. Nakatsukasa, K. Yabana
Photoabsorption spectra in the continuum of molecules and atomic clusters
J. Chem. Phys. 114 (2001) 2550-2561.
4. J.-I. Iwata, K. Yabana, G.F. Bertsch
Dynamic hyperpolarizability calculation without basis functions
Nonlinear optics 26 (2000) 9-16.
5. Y. Ogawa, T. Kido, K. Yabana, Y. Suzuki,
Microscopic theories for the reactions of halo nuclei
Prog. Theor. Phys. Supple, in press.
6. A. Schnell, G.F. Bertsch, K. Yabana
Application of time-dependent density functional theory to electron-vibration
coupling in benzene
J. Chem. Phys, submitted.
7. J.-I. Iwata, G. F. Bertsch, A. Rubio, K. Yabana
Real-space, real-time method for the dielectric function
Proceedings of the 3rd Japan-Korea Joint Workshop on First-Principles
Electronic Structure Calculations, p.73-76 (2000).
8. T. Nakatsukasa, K. Yabana
Real-space calculation of the continuum response: Photoabsorption in molecules

Proceedings of the 3rd Japana-Korea Joint Workshop on First-Principles
Electronic Structure Calculations, p.112-115 (2000).

9. J.-I. Iwata, K. Yabana, and G. F. Bertsch

REAL-SPACE METHOD FOR NONLINEAR RESPONSE OF MOLECULES AND CLUSTERS
Trans. Materials Res. Soc. of Japan Vol.26 (2001), in press.

10. K. Takahashi (Univ. of Tsukuba) and S. Iida (Ryukoku Univ.)

Energy-level correlations in chiral symmetric disordered systems:
Corrections to the universal results
Phys. Rev. B63(2001)214201 (cond-mat/0011003).

11. K. Takahashi (Univ. of Tsukuba) and S. Iida (Ryukoku Univ.)

QCD Vacuum as a Disordered System
Prog. Theor. Phys. (Invited Paper) in preparation.

12. 高橋 和孝

乱れた系における有効場の理論
素粒子論研究(2001) in press.

13. S. Yan, F. Sakata, Y. Hashimoto, Y.-Z. Zhuo and X.-Z. Wu,

Microscopic Dynamics of Dissipation in Nuclear Collective Motion,
Proceedings of the International Workshop on Frontiers of Theoretical Physics
(Ed. F. Sakata, K. Wu, E.-G. Zhao, World Scientific(2001))

<口頭発表>

K. Yabana

Giant resonances in atomic clusters
Int. Conf. on Giant Resonances, Osaka, 2000 June.

K. Yabana

Time-dependent mean-field dynamics in electronic systems
Tours Symp. on Nuclear Physics IV, Tours, France, 2000 Sept.

K. Yabana

Real space-time method for electronic dynamics
Computational Science Workshop 2001, Tsukuba, 2001 March

J.-I. Iwata

A Real-Space, Real-Time Method for the Dielectric Function
The 3rd Japana-Korean Joint Workshop on First-Principles
Electronic Structure Calculations
(Tsukuba, Japan, October 30, 2000)

矢花一浩

「Nuclear methods in electronic systems」

京大基研研究会「核構造及び低-中エネルギー核反応における動的過程」

2000年4月20-22日

岩田潤一

実空間法による動的超分極率の新しい計算法

2000 計算化学討論会 江東区文化センターホール(東京都) 2000年6月1日

矢花一浩

「金属クラスターにおける電子ダイナミクス」

領域1シンポジウム「金属クラスターのダイナミクス」

日本物理学会年会(新潟大学) 2000年9月22-25日

中務孝、矢花一浩

「連続スペクトルの実空間計算法」

日本物理学会年会(新潟大学) 2000年9月22-25日

G. F. Bertsch, 岩田潤一、A. Rubio, 矢花一浩

「実時間-実空間法による誘電関数の第一原理計算」

日本物理学会年会(新潟大学) 2000年9月22-25日

中務孝、矢花一浩

「3次元実空間におけるグリーン関数RPA法」

日本物理学会年会(新潟大学) 2000年9月22-25日

牟田淳、矢花一浩、橋本幸男

「Floquet formulationの3次元RPA方程式解への適用」

日本物理学会年会(新潟大学) 2000年9月22-25日

岩田潤一

実空間法による分子・クラスターの非線形光学応答の計算

第12回日本MRS学術シンポジウム セッションG: クラスターの孤立系と凝縮系

神奈川サイエンスパーク(神奈川県) 2000年12月7日

岩田潤一

誘電関数の実時間-実空間計算法

物性研究所短期研究会 物性研究における計算物理

東京大学物性研究所 2000年12月12日

矢花一浩

「弱く束縛した系の新しい核反応理論」

理研研究会「不安定核物理に向けて」2001年3月24-26日

Kazutaka Takahashi (Univ. of Tsukuba) and Shinji Iida (Ryukoku Univ.)
Supersymmetric Analysis of the Disordered Systems with Chiral Symmetry
4th CREST Workshop 'Disorder, Random Matrix and Quantum Chaos'
東京大学 2000 年 9 月 13-15 日

高橋 和孝、飯田 晋司 (龍谷大理工)
Disordered Systems with Chiral Symmetry
日本物理学会第 55 会年次大会
新潟大学 2000 年 9 月 22-25 日

高橋 和孝
乱れた系における有効場の理論
「場の量子論の基礎的諸問題と応用」
京都大学基礎物理学研究所 2000 年 12 月 20-22 日

橋本幸男
集団運動の生成・変化・減衰の理解に向けて
— 平均と揺動の interplay —
(200 年 8 月 11 日、理研ワークショップ ” 原子核の平均場理論
による計算物理学的アプローチ ”)

今川博人、橋本幸男、坂田文彦 (茨城大)
原子核の回転状態の変化とモノドロミー行列
日本物理学会第 55 会年次大会
新潟大学 2000 年 9 月 22-25 日

太田寛史、香村俊武、橋本幸男、丸山政弘 (東北大)
四重極変形状態間遷移と Y_{2m} 型中間子場
日本物理学会第 55 会年次大会
新潟大学 2000 年 9 月 22-25 日

今川博人
Nuclear Structure Change and Stability Matrix,
(Kyoto Informal Workshop on Nuclear Structure and Unstable Nuclei
京都大学基礎物理学研究所 2001 年 2 月 19-20 日)

太田寛史、香村俊武、橋本幸男、丸山政弘 (東北大)
四重極状態間遷移における中間状態の構造
日本物理学会 中央大学 2001 年 3 月 28 日