

原子核理論研究室

研究室構成員

高田健次郎 教授

上村 正康 助教授

清水 良文 助手

《 大学院 博士課程 》

市川 覚 大坪 慎一 肥山詠美子 佐藤 求

間所 秀樹

《 大学院 修士課程 》

安藤 政種 須古井貴弘 藤井新一郎 緒方一介

谷川知憲

今年度の研究テーマと成果

[I] 少数粒子系物理の研究

1) 少数粒子系研究法の開発

量子力学的 3 体 4 体問題の束縛状態を解く方法として、ヤコビー座標系ガウス型基底関数を用いる方法が非常に高速・高精度である。これを普及するため、現在、九大計算センターのライブラリプログラム開発の一環として応用プログラムを作成している。本年度、ミュオン分子 3 体系についてのプログラムをソースプログラムを含め一般に公開した。使用説明書は、「九大計算センター広報 29 巻 (1996 年) 2 号に掲載されている (上村、肥山、木野、Wallenius)。また、本年度末に「現実的核力による 3 核子系プログラム」を登録予定。さらに、この 1 年の大きな進展は、スピン依存力を含む 4 体系束縛状態の計算法開発にあり、これは、我々のガウス型関数ローブ表現形式を用いることによって、新たに可能となった (talks in 4-Body Problem Uppsala Workshop; 肥山、上村)。現在、原子核や (エキゾチック) 原子・分子等の少数粒子系の最前線は 3 体系から 4 体系の (厳密解法による) 研究へと移行しつつある。この九大センターライブラリ開発を役立たせたい。

2) ハイパー核の研究

上記の 4 体系の計算法の開発により、ハイペロン - 核子 (YN) 相互作用とハイパー核構造とを直結させた詳細な研究が可能となった。YN 相互作用は、直接の YN 散乱実験が困難なためハイパー核構造研究からの情報が渴望されている。YN 相互作用のうち、スピンの依存しない力、スピン - スピン力、スピン軌道力を、それを分析するのに適したハイパー核を選び研究した。 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ 、 ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ 、 ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ 、 ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ 、 ${}^{10}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ の結合エネルギーと、YN 有効相互作用 (YNG) のスピンの依存しない項の Odd force 部分との相関規則性を発見し、望ましい odd force を作る事ができた (肥山、上村、元場、山田、山本; 投稿中)。4 体計算に基づく ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ と ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ の研究から、スピン - スピン相互作用の不定性を絞ることができ、また ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ と ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ の研究から、スピン軌道力が従来の常識よりも 2 倍程度は大きいのではないかという知見を得た (物理学会シンポジウム講演、INS Workshop talk; 肥山)

3) ミューオン触媒核融合

高濃度トリチウムと高濃度ミューオンを用いる新しい精密ミューオン触媒核融合実験が理研 - Rutherford 共同でスタートし、興味あるデータが出始めておりその解析に取り組んでいる (木野、Wallenius、上村)。我々が予言した $d^{3,4}\text{He}\mu$ 分子の (X 線崩壊、核融合崩壊以外の)「無 X 線、粒子放出崩壊」と同じタイプの崩壊現象がトリチウムを含む $t^{3,4}\text{He}\mu$ 分子でも観測された。これを含め、一般的に $x^{3,4}\text{He}\mu$ 分子 (ここで $x = p, d, t$) の崩壊形態、即ち、基底状態が原子核で言う Feshbach resonance になっている分子の構造・崩壊形態、についての理論研究の集大成を行っている。

[II] 高速回転・巨大変形する原子核の構造

近年、重イオン加速器と γ -線測定技術の進展によって高い角運動量を持った原子核の励起状態 (高スピン極限状態) を詳細に調べることが可能になってきた。原子核理論の研究グループでは、このような高速回転する原子核構造の微視的立場からの研究を行っている。

1) 超変形回転バンドの研究

一般に、与えられた角運動量に対する最低エネルギー状態をイラスト状態というが、高速回転の効果によって基底状態近傍では現れなかった色々なタイプの変形状態が低い励起エネルギー状態、すなわち、イラスト状態近傍に出現する。特に、慣性率が大きく有利になるので基底状態近傍では想像もつかなかったほど大きく変形した状態 (超変形状態) が実現することがわかっている。このような超変

形状状態ではその巨大変形のために通常変形の場合とは非常に異なった殻構造が出現し、基底状態近傍とは質的に違った素励起モードの出現が期待される。我々は、特に低励起八重極振動運動の存在可能性を指摘しその性質を調べてきたが、最近になってこれらの超変形状態上の低励起八重極振動と思われる回転バンドが続々と観測され、我々の理論的予測が確かめられつつある(中務 (Manchester)、水鳥 (Oak Ridge)、松柳 (京大)、清水)

このようにイラスト近傍の超変形回転バンドは比較的良くわかってきたが、他方、超変形状態の生成・崩壊については未だよく理解されていないことが多い。これは生成・崩壊がイラスト線から離れた「高温」領域で起こるためであり、複雑な compound states の海の中に埋もれた集団運動の研究という興味深い課題を含んでいる。この超変形回転バンドの崩壊機構について、多次元トンネル効果の半古典的取扱いを応用して分析し観測されている特徴を説明できることを示している。現在、更にこの研究を進めて、Dy, Hg 超変形領域での系統的な計算により γ -線強度の定量的比較を目指している(清水、E. Vigezzi(Milano), T. Døssing(NBI), R. A. Broglia(Milano,NBI))

2) High- K アイソマーの崩壊と K 量子数の破れ

良く変形した重い中重核領域 (Hf, W, Os) では大きな K 量子数を持ったアイソマーの存在がよく知られており、軸対称変形が良い近似であることを示す例とされてきた。ところが、最近になって非常に高い K 量子数を持つアイソマー状態からゼロに近い K を持つ基底回転バンドへの電磁崩壊が観測にかかり、どのような機構で K 量子数が破れているのかに興味を持たれている。我々はまず非軸対称変形自由度 (γ 変形自由度) を取り上げ、超変形回転バンドの崩壊で用いたのと類似の方法で分析し、この自由度が特に K の変化の大きな崩壊で重要な役割を果たすことを示した。また、 K を破る機構としてもう一つ重要と思われる、Coriolis 結合効果についても「傾いた cranking 法 (Tilted Axis Cranking, TAC)」の枠組を用いて検討を進めている(清水、静間 (筑波大)、大坪 (D2))

3) 低スピン領域でのクランキング模型の精密化

回転運動を cranking の処方を用いて取り扱う場合の一つの欠点は、その半古典的性格の故に比較的低スピンの状態で電磁遷移確率を正しく評価できないことである。この欠点は集団的回転運動に伴う幾何学的効果 (Clebsch-Gordan 係数) を正確に取り扱うポーアとモッテルソンの統一模型によって救うことができる。最近、この統一模型に現れる内部行列要素を cranking の処方に基づいて計算する一般的処方を与えた。これによって、クーロン励起反応によって選択的に励起される集

团的振動運動に基づく種々の回転バンドの電磁遷移確率をかなり良く予測できるようになった（清水、中務 (Manchester)）。

[III] 原子核の中低エネルギー集団励起状態の微視的構造

1) 中重核における 8 重極集団運動状態

^{146}Gd や ^{148}Gd , さらにこの付近の複数の核において強い 8 重極の集団性を持った励起状態が次々に実験的に観測されてきた。これらは半実験的な particle-phonon coupling model を用いた解析で理解できるが、なぜ 8 重極の集団性がこのように enhance されるのか、真に微視的な意味で理論的に再現することが出来る否か、大変興味深い。

そこで我々は、Dyson boson mapping をこれらの問題に適用して、微視的に出来るだけ正確な解析を試みた。Fermion 相互作用として、粒子対に対しては surface delta 力、粒子-空孔対には octupole-octupole 力を仮定し、前者の強度は pairing 力、後者の強度は ^{146}Gd のスペクトルから定める。この Hamiltonian を解いて集団的 Fermion 空間を構成する集団的フォノンを決定し、この Fermion 空間を Dyson mapping を用いて boson 空間に写像し、そこでエネルギー固有値と $B(E3)$ を求め、実験値と比較して、この領域における octupole collectivity の強い enhancement のメカニズムを明らかにした。

この種の解析は膨大な計算機主記憶容量を必要とする。そこで我々は昨年の年次報告書で述べた簡易型ハッシング法を多用したプログラムを新たに書き下し、 $^{146},^{148}\text{Gd}$ の 8 重極多フォノン励起状態の精密な微視的解析を行った。その結果、中性子対モードと 8 重極粒子-空孔モードとの coupling が ^{148}Gd における 8 重極遷移の enhancement に本質的寄与をしていることを明らかにし、K. Takada and Y.R. Shimizu; Two-Octupole-Phonon States in $^{146},^{148}\text{Gd}$, Prog. Theor. Phys., Vol. 95, No. 6 (1996) 1121-1143 に発表した（清水、高田）。

2) 準粒子表示 Dyson boson mapping の汎用プログラム

上の研究結果から、Dyson boson mapping はかなり複雑な系の微視的解析に十分適用可能であることが明らかとなったので、この手法を閉殻から遠く離れた領域の核に応用出来るよう、Dyson boson mapping の準粒子表示での計算機汎用プログラムの開発に着手した。汎用性を重んじるため、集団運動空間としてかなり多種類のフォノンを取り込むことが出来るよう、新しい定式を作り、計算アルゴリズムを開発した。これにより、広い領域の原子核において、色々な multipolarity の相関を考慮できる Dyson mapping が応用可能となるはずである。

プログラムの開発は最終段階にあるが、現在進行中である（清水，高田）。

3) Holstein-Primakoff 型 boson mapping の展開精度の検討

我々のグループでは、展開の切断近似の必要の無い Dyson mapping を推奨し、現実の原子核の解析に用いて来た。しかし世間一般には、まだ展開の切断近似をしなければならない Holstein-Primakoff 型 boson mapping が良く使われ、しかも 4 次の切断近似ですまされているのが普通である。そこで、近似の必要の無い Dyson mapping と比較することによって、この近似の精度を簡単なモデルと現実の原子核において確かめた。結果は、遷移領域においては、Holstein-Primakoff 型 boson expansion の 4 次の切断近似はかなり精度が悪く、 ^{208}Pb 、 ^{146}Gd や ^{148}Gd における 8 重極集団性を 4 次の切断近似の Holstein-Primakoff 型 boson expansion で解析することは正しくないということを示した（佐藤，高田）

4) 相対論的平均場理論の回転核への適用

相対論的平均場理論は、核物質や有限核の基底状態の性質を良く再現することが分かっている。一方、有限核の励起状態への適用はあまり行なわれていない。そこで、一般相対論の手法（テトラドによる定式化）を用いてモデルを回転系に拡張し、集団回転による励起状態へ適用することを試みた。これについては、現在、論文を投稿中である。さらに、軽い変形核のイラスト状態について、系統的に数値計算を行ない、モデルの有効性を確かめているところである（間所、松崎）

発表論文リスト

《 原著論文 》

- (1) E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto, Three-body model study of $A = 6 - 7$ hypernuclei: Halo and skin structures, Phys. Rev. **C53** (1996), 2075-2085.
- (2) D. Ward, H. R. Andrews, G. C. Ball, A. Galindo-Uribarri, V. P. Janzen, T. Nakatsukasa, D. C. Radford, T. E. Drake, J. DeGraaf, S. Pilotte and Y. R. Shimizu, Rotational Bands in ^{238}U , Nucl. Phys. **A600** (1996), 88.
- (3) K. Narimatsu, Y. R. Shimizu and T. Shizuma, γ -Tunneling Calculations for the Decays of the K Isomers in the Hf, W, Os region, Nucl. Phys. **A601** (1996), 69.
- (4) T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, S. Mizutori and Y. R. Shimizu, Microscopic Structure of High-Spin Vibrational Excitations in Superdeformed $^{190,192,194}\text{Hg}$,

- Phys. Rev. **C53** (1996), 2213.
- (5) K. Takada and Y. R. Shimizu, Two-Octupole-Phonon States in $^{146,148}\text{Gd}$, Prog. Theor. Phys. **95** (1996), 1121.
- (6) Y. R. Shimizu and T. Nakatsukasa, A New Microscopic Approach to the Rotational Intensity Relations — Application of the High-Spin Cranking Formalism — Nucl. Phys. **A611** (1996), 22.

⟨⟨Proceedings⟩⟩

- (1) E. Hiyama, Infinitesimally-shifted Gaussian lobe basis functions for four-body coupled channel calculations: method and applications, Proceedings of Uppsala Workshop on the 4-Body Problems, May 2, 1996, Uppsala, Sweden, pp.28-34.
- (2) M. Kamimura, Coupled rearrangement channel variational method for three- and four-body systems, Proceedings of Uppsala Workshop on the 4-Body Problems, May 2, 1996, Uppsala, Sweden, pp.17-27.
- (3) Y. Kino and M. Kamimura, Muonic atom-nucleus collisions in the energy region of $dt\mu$ resonant states, Hyperfine Interactions **101** (1996), 191-196 (Proceedings of the International Symposium on Muon Catalyzed Fusion and Physics of Exotic Atoms and Molecules, dubuna, Russia, June 19-24, 1995).
- (4) J. Wallenius and M. kamimura, Resonance energies of meta-stable $dt\mu^*$, Hyperfine Interactions **101** (1996), 319-324 (Proceedings of the International Symposium on Muon Catalyzed Fusion and Physics of Exotic Atoms and Molecules, dubuna, Russia, June 19-24, 1995).
- (5) Y. Kino, M.R. Harston, I. Shimamura, E.A.G. Armour and M. Kamimura, Asymptotic form of three-body $(dt\mu)^+$ and $(dd\mu)^+$ wave functions, Hyperfine Interactions **101** (1996), 325-328 (Proceedings of the International Symposium on Muon Catalyzed Fusion and Physics of Exotic Atoms and Molecules, dubuna, Russia, June 19-24, 1995).
- (6) Y. R. Shimizu, Nuclear Structure of High and Very High Spin States, Proceedings of XV RCNP Osaka International Symposium, FRONTIER 96, on *Nuclear Physics Frontiers with Electro-Weak Probes*, March 7-9, 1996, Osaka, Japan, ed. by H. Toki, M. Fujiwara and T. Kishimoto, World Scientific Publishing Co. Ltd., Singapore, 1996.
- (7) Y. R. Shimizu, S-I. Ohtsubo and T. Shizuma, Direct Transitions from High- K

講演

- (1) E. Hiyama, “Three- and four-body structure of light hypernuclei and YN interaction, INS Workshop on YN and YY interactions and Hypernuclear Structures”, November 14-15, 1996, Tokyo.
- (2) 上村正康, 原子分子シンポジウム「ミューオン触媒核融合における原子過程」, “ μ CF 理論とその問題点”, 日本物理学会分科会, 1996年4月, 金沢大学
- (3) 間所秀樹, 松崎昌之, “ $\sigma - \omega$ モデルによる原子核の集団回転運動の記述”, 日本物理学会分科会, 1996年4月, 金沢大学
- (4) 大坪慎一, 清水良文, “Tilted Axis Cranking による θ 方向の energy surface”, 日本物理学会分科会, 1996年4月, 金沢大学
- (5) 高田健次郎, 清水良文, “ $^{146,148}\text{Gd}$ における 8 重極 2 フォノン状態 II”, 日本物理学会年会, 1996年4月, 金沢大学
- (6) 肥山詠美子, 上村正康, 元場俊雄, 山田泰一, 山本安夫, “ $\alpha + \Lambda + N + N$ four-body study of $A=7$ hypernuclei using YNG interactions”, 日本物理学会分科会, 1996年4月, 金沢大学
- (7) 肥山詠美子, “ハイパー核の 4 体構造”, 原子核理論, 原子核実験合同シンポジウム「少数粒子系物理の新展開」, 日本物理学会分科会, 1996年10月, 佐賀大学
- (8) 上村正康, “はじめに”, 原子核理論シンポジウム「計算核物理の新展開」, 日本物理学会分科会, 1996年10月, 佐賀大学
- (9) 肥山詠美子, 上村正康, 元場俊雄, 山田泰一, 山本安夫, “スピン軌道力を含む YNG 相互作用と Λ ハイパー核の 3,4 体クラスター”, 日本物理学会分科会, 1996年10月, 佐賀大学
- (10) 佐藤 求, 高田健次郎, “Holstein-Primakoff 型ボソン展開の近似精度”, 日本物理学会分科会, 1996年10月, 佐賀大学
- (11) 清水良文, 中務孝, “回転核の遷移強度関係式に対する新しいアプローチ”, 日本物理学会分科会, 1996年10月, 佐賀大学
- (12) 大坪慎一, 清水良文, “軸対称原子核の Tilted Axis Cranking による θ 方向の energy surface”, 日本物理学会分科会, 1996年10月, 佐賀大学

- (13) 間所秀樹, 松崎昌之, “ $\sigma - \omega$ モデルによる原子核の集団回転運動の記述 (II)”, 日本物理学会分科会, 1996 年 10 月, 佐賀大学
- (14) 間所秀樹, 松崎昌之, “原子核の回転の一般相対論的な記述について”, 日本物理学会九州支部, 1996 年 11 月, 大分大学
- (15) 佐藤 求, 高田健次郎, “原子核のフォノン励起に対する Holstein-Primakoff 型ボソン展開の近似精度について”, 日本物理学会九州支部, 1996 年 11 月, 大分大学
- (16) 肥山詠美子, 上村正康, “ハイパー核の 4 体構造とハイペロン - 核子相互作用”, 日本物理学会九州支部, 1996 年 11 月, 大分大学
- (17) 須古井貴弘, 上村正康, “2 粒子系 Shroedinger 方程式の高速新メッシュ解法の 3 粒子系への応用”, 日本物理学会九州支部, 1996 年 11 月, 大分大学

修士論文

- 1) 菅将孝: “高密度星における 3α 熱核反応の研究”, 1996 年 3 月
- 2) 佐藤求: “Holstein-Primakoff 型ボソン展開の近似精度について”, 1996 年 3 月
- 3) 間所秀樹: “ $\sigma - \omega$ モデルによる原子核の集団回転運動の記述”, 1996 年 3 月
- 4) 安藤正種: “4 次元ライトフロントリアルスカラーモデルにおける非摂動論的くり込み群”, 1997 年 3 月
- 5) 須古井貴弘: “ラグランジュメッシュ型高速試行関数による多チャンネル散乱変分理論”, 1997 年 3 月
- 6) 藤井新一郎: “Unitary-Model-Operator Approach によるハイパー核 ${}_{\Lambda}^{17}\text{O}$ の構造計算”, 1997 年 3 月