

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 》

大坪 慎一 肥山詠美子 佐藤 求 間所 秀樹

藤井新一郎

《 大学院 修士課程 》

緒方一介 谷川知憲 濱畑善行 平谷彰俊

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

3 体系束縛状態を解く方法として、九大グループの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普遍的・高速・高精度であるが、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。昨年度の「ミュオン分子」プログラムに続き、本年度には、任意中心力を用いる 3 体系についてのプログラムを公開した。使用説明書は、「九大計算センター広報 30 巻(1997年)2号に掲載されている。また、4 体系についても、複雑な相互作用の場合のコード作りが進展し、これをハイパー核の研究に応用している。(肥山、上村)。

科研費総合研究班「少数多体系の厳密解とその応用」の代表者として、国際シンポジウム「原子核多体問題における革新的計算法—有限量子多体系の新世代物理に向けて—」を主催した(上村)。

2) ハイパー核

スピン・スピン力やスピン軌道力、テンサー力などを含む 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急速に進んだ。具体的には、(i) ${}^4_{\Lambda}H$, ${}^4_{\Lambda}He (= 3N + \Lambda)$ において、現実

的な ΛN , YN 相互作用を用いた世界で初めての4体計算実行し、スピン・スピン力と $0^+ - 1^+$ レベルのsplittingの関係を分析した。従来提案されているNijmegenグループのND, NF型の ΛN 力は、スピン・スピン力が望ましい強さの数分の1の大きさしかないこと、Ehimeグループの ΛN 力は、結合エネルギーはほぼ再現するが、スピン・スピン力の強さは、 $2/3$ の大きさであることを示し、各グループの YN 相互作用の改良の指針を示し、(ii) ${}_{\Lambda}^{13}\text{C}(=3\alpha + \Lambda)$ の $3/2^- - 1/2^-$ のエネルギーsplitting実験値を4体模型によって説明するとともに、この小さなsplittingは、 ${}^{12}\text{C}$ 核のクラスターの励起によるものであって、必ずしも元の2体 YN スピン・軌道力が小さいことを意味しないという新しい知見を示し、(iii) ${}_{\Lambda}^7\text{Li}(= \alpha + 2N + \Lambda)$ において、スピン・スピン力とスピン・軌道力が競合的に存在していることを明らかにし、同一ハイパー核から2つの力の情報が同時に得られる可能性を指摘した。(肥山、上村)

ハイペロン-核子(Y-N)相互作用から、ラムダハイパー核内におけるラムダ-核子有効相互作用を求める方法をUnitary-Model-Operator Approach (UMOA)の枠組を拡張することにより定式化した。また、実際にYN相互作用としてNijmegen Soft-Core (NSC)ポテンシャルを用い、 ${}_{\Lambda}^{17}\text{O}$ について計算を行った(S. Fujii, R. Okamoto and K. Suzuki, Prog. Theor. Phys. **99** (1998), No.1に掲載決定)。計算はadjustable parameterを用いずに行うため、用いるYN相互作用の性質を直接的に反映した結果を得る事が出来る。現在、複数のYNポテンシャルを用いた計算を行っており、不定性の大きいその性質の違いや問題点について明らかにしているところである(藤井、岡本、鈴木)。

3) エキゾチック原子・分子, ミューオン触媒核融合

反陽子ヘリウム原子($\bar{p}^3, {}^4\text{He}^+ = {}^3, {}^4\text{He}^{++} + e^- + \bar{p}$ の3体系)の異常な長寿命状態($J = 32 - 36$)の精密レーザー実験データを、ガウス型基底関数組み替えチャンネル変分法を用いて解析した。この系では、相互作用角運動量が非常に大きいことが従来の計算を困難にしてきたが、本計算法により、状態間遷移の光子の波長を6桁の精度で計算を実行し、7個のレーザー実験データ(精度6桁)の説明に成功した。また、最も大きい共鳴幅を複素座標回転法によって求め、良い一致を得た。これらにより、この異常な長寿命状態の存在様式の理論的解明が進み、今後の実験をガイドする理論的予測も行なうに至った。(上村、木野、工藤)

高強度ミューオンと高濃度トリチウム(β 崩壊 ${}^3\text{He}$ 除去)を用いる従来にな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、新しいタイプのデータが出始めており、その解析に取り組んでいる。特に、純粋 $t\mu$ 系の核融

合率と $\mu^4\text{He}$ 付着率を計算中である(上村、肥山、木野)。また、ミューオン触媒核融合に関する review paper を書き、Advance in Nuclear Physics 24 (1998) に印刷中である(上村、永嶺)。

4) 半古典歪曲波模型による前平衡過程反応

半古典歪曲波模型(SCDW)は、前平衡過程を記述するのに有効な量子力学的模型であり、実験値をかなり良く再現することができる。しかしこの模型には理論的にいくつかの問題があり、そのため模型の正当性に対して疑問が残る。そこで我々はこの問題を解決すべく、これまでは片手落ちの状態で取り扱っていた exchange term の厳密な取扱いを行い、また、衝突を起こす2核子の運動エネルギーが保存しない散乱(off-shellの散乱)を考慮した。これにより、これまでのSCDWが抱えていた理論的問題はほぼ解決し、より理論的に正当な模型へと改良することができた。また、今回の改良に伴ってスピン量を指定した計算が可能となったため、偏極量の計算が期待されている(緒方、河合)。

[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

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。このような巨大変形回転状態では基底状態近傍とはかなり違った核構造が発現する。この数年本グループで研究している課題としては、(a) 超変形回転バンド上の低励起集団振動運動、特に最近では実験的に注目を集めている八重極振動運動(中務(Manchester)、水鳥(基研)、松柳(京大)、清水)、(b) 超変形回転バンドの低スピン領域での崩壊現象(清水、T. Døssing(NBI), E. Vigezzi(Milano), R. A. Broglia(Milano,NBI))がある。

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、強い K 量子数の破れが存在することがわかってきた。このように K 量子数を破る機構として考えられるものは、非軸対称変形自由度 (γ 変形自由度) と角運動量ベクトルの傾きの自由度 (Coriolis 結合効果) が考えられる。前者については簡単な模型によるこれまでの研究で重要な役割を果たすことがわかってきたが、本年度は後者の効果について、斜向クランキング法による分析を行なった。角運動量を止めて傾き角に対するポテンシャル面を計算することは容易なことではなく現在も計算の方法を改良中である (清水、大坪 (D3))。

3) 斜向クランキング法による回転運動

高速回転する原子核の研究では、原子核全体の平均場描像に基づくクランキング模型 (強制回転模型) が基本的な道具立てとなる。通常のクランキング模型では、回転の軸は変形の慣性主軸の回りにとられるが、最近になって慣性主軸から傾いた軸の回りの回転の自由度がイラスト近傍でも重要な役割を果たすことが示唆されてきている。最も簡単なアプローチは定常回転を仮定するクランキング模型を傾いた軸に対して拡張するものでこれは斜向クランキング法 (Tilted Axis Cranking/Tilted Axis Rotation) と呼ばれる。本グループでもこの方法を用いて、変形核の回転状態の研究を行なっている。まず、手始めとして1準粒子が回転子と結合した厳密に解ける模型の場合に、この斜向クランキング法がどのような近似を行なっているかをしらべ通常の主軸の回りのクランキング法に比べ角運動量ベクトルの力学的運動の効果をうまく取り込んでいることをチェックした。現在はより現実的な原子核への適用を試みている (清水、大坪 (D3))。

[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) Boson 展開法の新展開 — Boson 展開法の精度の検討, Holstein-Primakoff 型 boson 展開法の新しい方法 —

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 (HP) 型 boson mapping 法がよく使われ、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。

過去の多くの経験から，単純な Holstein-Primakoff 型 boson 展開を 4 次で切断近似をすることは良い近似でないことが明らかであるので，如何にして normal-ordered HP 型 boson 展開を求めるかが問題である．これまでこの問題は我々のグループや Holzwarth や 岸本・田村等によって研究されて来たが，今回この問題に対する最終決定版と言える方法を提案することが出来た．この方法は理論的に厳密で，かつ取り扱いが容易である（求めた展開の結果は，岸本・田村の linked-cluster 展開と同等である．）

この方法を用いて normal-ordered HP 型 boson 展開を実行し，近似の必要の無い Dyson mapping と比較することによって，この近似の精度を次のような場合について数値計算を行って確かめた．

- i) 簡単な 3-level model (SU(3) model) .
- ii) Quadrupole correlation が強い ^{112}Sn , ^{114}Cd の場合.
- iii) Octupole correlation が強い ^{208}Pb の場合.

i) の結果から，遷移領域の many-phonon states (従って高い励起エネルギーの状態) においては，HP 型 boson expansion の 4 次の切断近似はかなり精度が悪いと考えられ，厳密な計算を目指すならば Dyson mapping を用いるべきであると言える．

しかし ii), iii) の結果から現実的な原子核 (特に球形から遷移領域における核) の割合低い励起状態の概略的な構造を知るためには normal-ordered HP 型 boson 展開の 4 次の切断近似がかなり良いことが明らかになった．6 次まで採ることが理想的であるが，それならば Dyson mapping を用いるべきで，normal-ordered HP 型 boson 展開が Dyson mapping より優れた点は皆無である (佐藤，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 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が求められる．我々は昨年よりこの課題に着手した．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できるよう，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，メンバーの一人が学部運営に多忙で進行が遅れている (清水，高田) ．

3) 相対論的平均場理論による原子核の集団回転運動の研究

相対論的平均場理論は、原子核を、核子と中間子からなる相対論的多体系として記述するもので、これまでに原子核の基底状態の性質などをよく再現することが分かっている。このモデルを原子核の回転による励起状態に適用する試みも、ドイツのグループによって既に行なわれているが、彼らの定式化には問題があった。そこで我々は、一般相対論の手法を用いて、全く新しい形で再定式化を行なった。さらに、独自の数値計算プログラムを作成し、 ${}^{62}\text{Zn}$ について得られた新しい実験データを含む質量数 60 領域核の超変形回転バンドについての系統的な計算を現在行なっている(間所、松崎)。

4) 核物質中の対相関に対する相対論的アプローチ

近年の相対論的平均場理論の成功を背景に、対相関の記述の精密化が求められている。我々はその方向での研究テーマとして、核物質中の対相関を扱っている。手始めに、有限密度におけるハドロン質量減少を考慮した現実的核力を用いた計算を行った。その結果、中間子の質量減少が対ギャップの減少に大きく効くことがわかった。また、不安定核実験技術の進歩に伴い中性子-陽子間の対相関が再び注目されつつあるが、核物質におけるその取り扱いについて現在検討を進めている(谷川、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- and Four-Body Models of Hypernuclei Using the G-Matrix ΛN Interactions — ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$, ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$, ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ and ${}^{10}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ —", Prog. Theor. Phys. **97** (1997), 881-899.
- (2) M.R. Harston, S. Hara, Y. Kino, I. Shimamura, H. Sato and M. Kamimura, "Effects of the finite size of the ion $(dd\mu)^+$ on the energy levels of the molecules $(dd\mu)e$ and $(dd\mu)dee$ ", Phys. Rev. **A56** (1977), 2685-2691.
- (3) S. -I. Ohtsubo and Y. R. Shimizu, "Tilted Axis Cranking Applied to a System of One-Quasiparticle Coupled to a Triaxial Rotor", Prog. Theor. Phys. **98** (1997), 1099-1121.
- (4) G. Gervais, D.C. Radford, Y.R. Shimizu, M. Cromaz, J. DeGraaf, T. E. Drake, S. Fibotte, A. Galindo-Uribarri, D. S. Haslip, V.P. Janzen, M. Matsuzaki, S. M. Mullins, J. M. Nieminen, C.E. Svensson, J.C. Waddington, D. Ward

- and J. N. Wilson, “Collective γ -vibrational bands in ^{165}Ho and ^{167}Er ”, Nucl. Phys. **A624** (1997), 257-274.
- (5) T. Shizuma, G. Sletten, R.A. Bark, I.G. Bearden, S. Leoni, M.Mattiuzzi, S.Mitarai, S.W.Ødegård, S.Skoda, K.Strähle, J.Wrzesinski and Y.R. Shimizu, “Multi-Quasiparticle States and K -forbiddenness in ^{177}W ”, Nucl. Phys. **A626** (1997), 760-798.
- (6) H. Madokoro and M. Matsuzaki, “General Relativistic Mean Field Theory for Rotating Nuclei”, Phys. Rev. **C56** (1997), R2934-R2937.

《Proceedings》

- (1) E. Hiyama, “Three- and four-body structure of light hypernuclei and YN interactions”, Proceedings of INS Workshop on *YN and YY Interactions and Hypernuclear Structures*, Tokyo, November 14-15, 1996, p.41.

講演

- (1) M. Kamimura, “Is muon catalyzed $\text{D-}^3\text{He}$ fusion possible?”, The Seventh RCNP International Workshop on *Polarized ^3He Beams and Gas Targets and Their Application* (HELION97), Osaka, January 20-24, 1997. (invited talk)
- (2) M. Kamimura, “High accuracy 3-body coupled-channel calculation of metastable states of antiprotonic helium atoms”, International Conference on *Few-Body Problems in Physics*, Groningen, Netherlands, July 21-25, 1997.
- (3) M. Kamimura, “Three- and four-body structure of light hypernuclei and YN interactions”, The First Sino-Japan Symposium on *Strangeness Physics—Hadrons and Nuclei with Strangeness* (HNS’97), Beijing, China, September 24-29, 1997. (invited talk)
- (4) E. Hiyama, “Four-body calculation of $^4_{\Lambda}\text{H}$ and $^4_{\Lambda}\text{He}$ with realistic ΛN interactions”, the International Conference on *Hypernuclear and Particle Physics*, Upton, USA, October 13-17, 1997
- (5) M. Kamimura, “Four-body model study of competition between YN spin-spin and spin-orbit interactions in light hypernuclei”, International Conference on *Hypernuclear and Particle Physics*, Upton, USA, October 13-17, 1997.
- (6) E. Hiyama, “Four-body calculation of $^4_{\Lambda}\text{H}$ and $^4_{\Lambda}\text{He}$ with realistic ΛN interac-

- tions”, XVII RCNP International Symposium on *Innovative Computational Methods in Nuclear Many-Body Problems – Towards a new generation of physics in finite quantum systems*, Osaka, November 10-15, 1997.
- (7) M. Kamimura, “Gaussian basis coupled-channel variational calculations of various three- and four-body systems”, XVII RCNP International Symposium on *Innovative Computational Methods in Nuclear Many-Body Problems – Towards a new generation of physics in finite quantum systems*, Osaka, November 10-15, 1997.(invited talk)
- (8) S. Fujii, R. Okamoto and K. Suzuki, “Unitary-Model-Operator Approach to $^{17}_{\Lambda}\text{O}$ and Lambda-Nucleon Effective Interaction”, XVII RCNP International Symposium on *Innovative Computational Methods in Nuclear Many-Body Problems – Towards a new generation of physics in finite quantum systems*, Osaka, November 10-15, 1997.
- (9) Y. R. Shimizu, “Topics on Nuclear Structure at Large-Deformation and Rapid-Rotation”, in Abstracts of the 3rd Japan China Joint Nuclear Physics Symposium on *Recent Topics in Nuclear Physics*, July 24-29, 1997, Sendai, Ogatsu, Niigata, Japan, p.63.(invited talk)
- (10) Y. R.Shimizu and S. -I. Ohtsubo, “Application of Tilted Axis Cranking to the Decay of K -Isomers”, in Abstracts of the Symposium on *New Spectroscopy and Nuclear Structure 1997, dedicated to Aage Bohr and Ben Mottelson*, September 16-20, 1997, Copenhagen, Denmark, p. 26.
- (11) T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, S. Mizutori and Y. R.Shimizu, “Collective Modes of Excitations in High-Spin Superdeformed States”, in Abstracts of the Symposium on *New Spectroscopy and Nuclear Structure 1997, dedicated to Aage Bohr and Ben Mottelson*, September 16-20, 1997, Copenhagen, Denmark, p. 43.
- (12) Y. R.Shimizu and S. -I. Ohtsubo, “Decay of K -Isomers Studied by the Tilted Axis Cranking” , in Proceedings of the 3rd INFN-RIKEN Meeting on *Perspectives in Heavy Ions Physics*, October 13-15, 1997, Padova, Italy, to be published.
- (13) Y. R.Shimizu and S. -I. Ohtsubo, “Break-down of K -quantum number and the decay of K -Isomers” , in Proceedings of the 3rd Korea-Japan Joint Symposium on *Nuclear Structure and Related Physics*, November, 8-9, 1997, Seoul, Korea, to be published.

- (14) M.Sato and K. Takada, “Convergence of Boson Expansion Theory”, The Third Korea-Japan joint symposium on *Nuclear Structure and Related Physics*, November 7-8, 1997, Seoul, Korea
- (15) H. Madokoro and M. Matsuzaki, “A Relativistic Investigation on Superdeformed bands in the $A = 60$ Mass Region”, The Third Korea-Japan Joint Symposium on *Nuclear Structure and Related Physics*, November 8-9, 1997, Seoul, Korea.
- (16) H. Madokoro and M. Matsuzaki, “Relativistic Mean Field Description of Nuclear Collective Rotation”, XVII RCNP International Symposium on *Innovative Computational Methods in Nuclear Many-Body Problems – Towards a new generation of physics in finite quantum systems*, Osaka, November 10-15, 1997.
- (17) 肥山詠美子, 上村正康, 元場俊雄, 山田泰一, 山本安夫, “ ΛN spin-spin interaction and hypernuclear phenomena”, 日本物理学会年会, 1997年3月, 名城大学
- (18) 肥山詠美子, 上村正康, 元場俊雄, 山田泰一, 山本安夫, “YN スピン・スピニカと ${}^4_{\Lambda}\text{H}$, ${}^4_{\Lambda}\text{He}$, ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$, ${}^{10}_{\Lambda}\text{Be}$ の 4 体構造”, 日本物理学会年会, 1997年3月, 名城大学
- (19) 肥山詠美子, 上村正康, 元場俊雄, 山田泰一, 山本安夫, “軽いハイパー核における YN スピン・スピニカとスピニ軌道力の競合”, 日本物理学会分科会, 1997年9月, 東京都立大学
- (20) 肥山詠美子, 上村正康, “Realistic YN, NN interaction を用いた $A=4$ ハイパー核の精密 4 体計算”, 日本物理学会九州支部例会, 1997年11月, 福岡工業大学
- (21) 肥山詠美子, 上村正康, “軽いハイパー核における YN スピン・スピニカとスピニ軌道力の競合”, 日本物理学会九州支部例会, 1997年11月, 福岡工業大学
- (22) 上村正康, 木野康志, 工藤博司, “反陽子ヘリウム原子の 3 体理論と実験の超精密比較”, 日本物理学会九州支部例会, 1997年11月, 福岡工業大学
- (23) 藤井新一郎, 岡本良治, 鈴木賢二, “ユニタリー変換法による ${}^{17}_{\Lambda}\text{O}$ の ΛN 有効相互作用”, 日本物理学会分科会, 1997年9月, 東京都立大学
- (24) 大坪 慎一, 清水 良文, “Tilted Axis Cranking 模型と粒子回転子模型による非軸対称原子核の遷移確率の比較” 日本物理学会年会, 1997年3月, 名城大学
- (25) 大坪 慎一, 清水 良文, “Tilted Axis Cranking 模型による θ 方向のエネルギー面と θ トンネリング”, 日本物理学会分科会, 1997年9月, 東京都立大学
- (26) 佐藤求, 高田健次郎, “ ${}^{208}\text{Pb}$ で見る Holstein-Primakoff 型ボソン展開の近似精度”, 日本物理学会年会, 1997年3月, 名城大学
- (27) 佐藤求, 高田健次郎, “現実的核モデルに対する Holstein-Primakoff 型ボソン展

- 開の近似精度”, 日本物理学会分科会, 1997 年 9 月, 東京都立大学
- (28) 佐藤求、高田健次郎, “linked-cluster の方法によるボソン展開の近似精度”, 1997 年 11 月, 日本物理学会九州支部例会, 福岡工業大学
- (29) 間所秀樹、松崎昌之, “一般相対論的クランキング模型による軽い変形核の回転運動の記述”, 日本物理学会分科会, 1997 年 3 月, 名城大学
- (30) 間所秀樹、松崎昌之, “General Relativistic Mean Field Theory and a Systematic Calculation for Rotating Nuclei”, 日本物理学会分科会, 1997 年 9 月, 東京都立大学
- (31) 間所秀樹、松崎昌之, “ $A=60$ 領域核の超変形回転バンド”, 日本物理学会九州支部例会, 1997 年 11 月, 福岡工業大学
- (32) 谷川知憲, 松崎昌之, “核物質中の対相関に対する中間子質量変化の効果”, 日本物理学会九州支部例会, 1997 年 11 月, 福岡工業大学

修士論文

- 1) 緒方一介: “核子 - 核散乱に対する半古典歪曲波近似 (SCDW) における exchange 及び有効相互作用の off-shell 行列要素の効果”, 1998 年 3 月
- 2) 谷川知憲: “核物質中の対相関に対する相対論的アプローチ”, 1998 年 3 月

博士論文

- 1) 肥山詠美子: “Three- and Four-Body Structure of Light Hypernuclei and Hyperon-Nucleon Interactions”, 1998 年 3 月