

【参加者】松柳研一, Mario Stoitsov(学振長期招聘), Nicolas Michel(外国人特別研究員), 吉田賢市 (PD), 日野原伸生 (D3), 小笠原弘道 (D2), 相場浩和 (光華女子短大), 水鳥正二郎 (関西女子短大)

当グループは“有限フェルミ多体系における集団現象”のダイナミクスを微視的に理解することを主眼としつつ、核構造の多体問題の多様なテーマに取り組んでいる。教室外からも定常的に参加者がいるが、ここでは教室発表会の主旨に従い教室メンバーの仕事に限って報告する。

●大振幅集団運動理論による変形共存現象のダイナミクスの微視的記述

[日野原, 中務(理研), 松尾(新潟大), 松柳]

昨年度定式化に成功した“ゲージ不変な Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate (ASCC) 法”を  $^{68}\text{Se}$  領域の陽子過剰核で見ついているオブレート変形状態とプロレート変形状態の間の多体トンネル現象に適用した。平均場の異なる平衡点を結ぶ大振幅集団運動の経路を自己無撞着に決定し、微視的に導出された集団ハミルトニアンを量子化して励起スペクトルと電磁遷移確率を計算した。結果は、角運動量がゼロの場合にはプロレート変形状態とオブレート変形状態が軸対称性を破る集団径路に沿って強く混合するが、回転運動の角速度が増大するにつれて混合は抑制され、“異なる変形をもった2つの回転バンドの共存”というパターンが形成されることを示している。この計算結果は実験データの特徴と一致している。大振幅集団運動の理論を構築する試みは30年以上の歴史を有するが、超伝導状態にある現実の原子核の記述に成功したのはこの計算が世界で初めてである。

●弱束縛の不安定核を記述できる Gamow-HFB 理論の構築 [Michel, Stoitsov, 松柳]

ヒルベルト空間を複素エネルギー面に拡張し、共鳴状態を Gamow 基底を用いて記述する Gamow-HFB 理論の定式化、その数値計算プログラムの開発、典型的な現象への適用を行った。中性子ドリップ線近傍の  $^{84-90}\text{Ni}$  に対する適用例では、通常の予想と異なり、ドリップ線に近づくに従って対相関が増大するという大変興味深い結果を得ている。これは弱束縛状態、共鳴状態および散乱状態にまたがる中性子ペアのコヒーレントな運動の結果であり、ドリップ線近傍の不安定核でユニークな特徴をもった対相関が生じることを示唆している。この研究の過程で HFB 方程式の新しい有用な解法を見つけた。これは、Pöschl-Teller-Ginocchio (PTG) ポテンシャルと呼ばれる固有関数を解析的に求めることのできる基底を用いて HFB 準粒子波動関数を展開する方法である。この方法は変形ポテンシャルへの拡張も容易なので、変形した弱束縛原子核に対する非常に有用な方法になると期待される。

●変形した中性子過剰 Cr, Fe アイソトープにおけるソフト  $K^\pi = 0^+$  モードの予言 [吉田, 山上(理研)]

理研 RIBF で最近実験データが得られつつある変形した中性子過剰  $^{62-70}\text{Cr}$  および  $^{64-72}\text{Fe}$  に対して準粒子 RPA 法に基づく系統的な計算を遂行し、中性子スキンの四重極変形揺らぎと中性子ペア凝縮の非等方的な揺らぎがコヒーレントに結合して、非常に強い四重極ペア遷移強度を持つソフト  $K^\pi = 0^+$  モードが出現する事を予言した。

●中性子過剰 Ne における pygmy 共鳴の微視的構造と集団性 [吉田, N. Van Giai (Orsay)]

軸対称 Skyrme-HFB 計算によって得られた準粒子波動関数と Landau-Migdal 型の有効相互作用を用いた準粒子 RPA 計算によって中性子過剰  $^{26-30}\text{Ne}$  における pygmy 共鳴(1粒子放出の閾付近に現われる低エネルギー「アイソベクトル型」双極振動モード)の微視的構造を分析し、それらの集団性が中性子数の増大につれて変化するメカニズムを明らかにした。

● $^{40}\text{Ca}$  領域の超変形状態の上に現われるソフト 8 重極振動モードとその回転角速度依存性

[小笠原, 吉田, 水鳥(関西女子短大), 松柳]

最近  $^{40}\text{Ca}$  領域の  $N=Z$  核で見ついている超変形回転バンドに対して“回転座標系での RPA”計算を遂行し、集団性の高いソフト 8 重極振動モードが励起する可能性と、それらの集団励起モードが平均場の軸対称性の破れや回転運動の角運動量にどの様に依存するか分析した。 $^{36}\text{Ar}$  では(フェルミ面近傍の総ての核子の角運動量が整列して集団回転運動が消滅する)バンド終結現象が起こる角運動量領域でソフト 8 重極振動モードの励起エネルギーがゼロに近づき、その結果、平均場は空間反転対称性を破る可能性があること、 $^{44}\text{Ti}$  では平均場が軸対称性を破るため、ソフト 8 重極振動モードの(回転軸周りの  $180^\circ$  回転対称性に伴う)シグネチャー二重項の縮退が解け、顕著なシグネチャー分裂が起こる、などの興味ある理論的示唆を得た。

【参加者】松柳研一, Mario Stoitsov(学振長期招聘), Nicolas Michel(外国人特別研究員), 吉田賢市 (D3), 日野原伸生 (D2), 小笠原弘道 (D1), 相場浩和 (光華女子短大), 水鳥正二郎 (関西女子短大)

当グループは集団現象に対する微視的モデルから多体理論まで幅広いテーマに取り組んでいる。教室外からも定期的に参加者があるが、ここでは教室メンバーの仕事に限って報告する。

●変形した中性子過剰核における新しい振動モードの理論的予言

[吉田, 山上(理研), 松柳]

変形した中性子過剰核に対して準粒子 RPA 法に基づく系統的な分析を遂行し, 理研 RIBF で実験可能な中間質量の不安定核において新しい型のソフトモードの出現が期待出来ることを理論的に予言した。この集団励起モードは中性子スキンの四重極変形揺らぎと中性子ペア凝縮の非等方的な揺らぎがコヒーレントに結合することによって形成される。この集団モードを励起する遷移確率は中性子ドリップ線に近づくにつれ(共鳴状態や弱束縛 1 粒子状態の波動関数が空間的に大きく広がるため)極めて大きくなる。特に, 角運動量  $J=2$  に組んだ中性子ペアを移行させる遷移確率が異常に増大することを示した。

●連続状態 HFB 理論と連続状態 QRPA 理論の構築

[Stoitsov, Michel, 吉田, 山上(理研), 松柳]

ドリップ線近傍の不安定核の基底状態と低い励起モードの性質を記述する基本的な理論として, 連続状態 HFB(Hartree-Fock-Bogoliubov) 理論と連続状態 QRPA(Quasiparticle-Random-Phase Approximation) 理論を構築する新しい研究プロジェクトを開始した。自己無撞着に導出した平均場が球対称性を破った(変形した)場合にも連続状態(共鳴状態と散乱状態)への励起を正しく取り扱える実用的な方法を開発することに主眼がある。この目的に向かってまず, 1) 連続状態での対相関(核子ペアの共鳴状態や散乱状態への励起)を取り入れるために, (複素エネルギー固有関数である)Gamow 基底を用いて平均場を self-consistent に導出する新しい平均場理論  $\equiv$  Gamow-HFB 理論を構築し, 続いて, 2) そこで得られた一般化された 1 粒子モード(準粒子モード)を用いて振動励起を微視的に記述する Gamow-QRPA 法を開発する。本年度は 1) の課題を遂行する実用的な計算アルゴリズムを構築することに成功した。

●Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate (ASCC) 法のゲージ不変な定式化

[日野原, 中務(筑波大), 松尾(新潟大), 松柳]

大振幅集団運動の微視的理論である ASCC 法の理論形式を(粒子数ゆらぎ自由度に関する)ゲージ変換不変性を満足するように拡張した。更に, 実際の数値計算に便利なゲージ固定の方法を与えた。この論文はこの課題に対する 3 年間にわたる研究を完成させたものである。

●大振幅集団運動の慣性質量に対する微視的計算

[日野原, 中務(筑波大), 松尾(新潟大), 松柳]

ゲージ不変な ASCC 法を( $^{68}\text{Se}$  領域の陽子過剰核で見ついている)オプレート変形状態とプロレート変形状態の間の多体トンネル現象に適用した。平均場の異なる平衡点を結ぶ大振幅集団運動の経路を微視的に決定し, (平衡点から離れた)径路上の各点で集団運動の慣性質量を self-consistent に計算することに成功した。このような微視的かつ self-consistent な計算は世界で初めてである。計算結果は慣性質量が径路に沿って滑らかに変化することを示している。私達は慣性質量をもたらす微視的メカニズムを分析し, 四重極対相関場の運動量依存(time-odd)項が大振幅集団運動の慣性質量を著しく増大させることを明らかにした。これまで用いられてきたクランキング質量公式はこの効果を無視しており, 慣性質量を過小評価している。

●回転する不安定核に特有な集団励起モードの理論的探求

[小笠原, 吉田, 山上(理研), 水鳥(関西女子短大), 松柳]

回転する変形 Woods-Saxon ポテンシャルの(回転座標系での)固有関数を 3 次元座標空間メッシュ表示によって求め, この 1 粒子基底を用いて回転系での RPA 計算を遂行する計算プログラムを開発した。これを用いて  $^{32}\text{S}$  や  $^{40}\text{Ca}$  の超変形状態の上に軸対称性を破った(バナナ型や正四面体型の対称性をもつ)ソフト Octupole 振動モードが形成される可能性を示した。更に, これらの集団振動モードの性質が角運動量の増大につれて変化する様子を調べた。計算結果は, これらの集団振動モードが高スピン領域で(回転整列した核子を主成分とする)他の励起モードと交差するバンド交差現象が起こることを示唆している。

【参加者】松柳研一, 吉田賢市 (D2), 日野原伸生 (D1), 小笠原弘道 (M2), 相場浩和 (光華女子短大), 水鳥正二郎 (関西女子短大)

当グループは集団現象に対する微視的モデルから多体理論まで幅広いテーマに取り組んでいる。教室外からも定期的に参加者があるが、ここでは教室メンバーの仕事に限って報告する。

●中性子ドリップ線近傍の Mg 同位体におけるソフトな振動モードの発現機構

[ 吉田, 山上 (理研), 松柳 ]

変形した不安定核における新しい集団モードの発現可能性とその発現メカニズムを調べるために、「原子核の変形」、「対相関」、「連続状態への励起」を考慮に入れた準粒子 RPA 法を用いて、中性子ドリップ線近傍の  $^{36-40}\text{Mg}$  における低励起振動モードの性質を分析した。共鳴状態や弱束縛 1 粒子状態の波動関数が空間的に大きく広がっているため遷移確率の極めて大きい低励起モードが現れること、 $^{40}\text{Mg}$  においてはフェルミ面付近の多数の中性子ペアが振動するソフトな  $0^+$  振動モードが現れること、等々、興味ある結果が得られた。

●連続状態しきい値近傍での変形 1 粒子波動関数の性質

[ 吉田, 萩野 (東北大) ]

変形核における  $\Omega = 1/2^+$  状態は束縛エネルギーが小さくなるにつれて  $s$  波成分が dominant になることが指摘されていたが、弱束縛状態が閾値を超えて連続エネルギー領域にどのように繋がっていくかコンセンサスがなかった。そこで、Gamow 状態を用いて共鳴状態を記述し、変形井戸型ポテンシャルにおける 1 粒子波動関数の性質を解析した。その結果、閾値付近では仮想状態や異常な共鳴状態がかかわる豊かな 1 粒子描像が存在し移行は非連続的であるが、漸近的には深い束縛状態と連続エネルギー状態が繋がっていることが分かった。

●大振幅集団運動の慣性質量に対する対相関場の time-odd 項の寄与

[ 日野原, 中務 (筑波大), 松尾 (新潟大), 松柳 ]

オプレート変形とプロレート変形間の多体トンネル現象の簡単なモデル (multi-O(4) model) に Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate (SCC) 法を適用し、四重極対相関場の運動量依存 (time-odd) 項が大振幅集団運動の慣性質量に重要な寄与をもたらすことを示した。

●粒子数ゆらぎモードと大振幅集団モードの分離のための ASCC 基礎方程式の拡張

[ 日野原 ]

ASCC 法の基礎方程式は平均場の平衡点で (粒子数に関する) ゲージ変換不変性をもつが、非平衡点ではこの自由度が消滅することを示した。しかし、集団経路を求めるためには非平衡点でもゲージ固定を行う必要がある。そこで、ASCC 法を拡張し、非平衡点でもゲージ変換の自由度が存在するような枠組みを構築し、非平衡点でもゲージ固定を行えるようにした。

●混合基底 RPA 法を用いた超変形核の 8 重極型ソフトモードの研究

[ 稲倉 (新潟大), 水鳥, 山上 (理研), 松柳, 今川 (ナレッジウエア), 橋本 (筑波大) ]

実空間座標表示による Skyrme-Hartree-Fock 計算で得られた平均場を基底として完全にセルフコンシステントな RPA 計算を系統的に遂行し、 $^{32}\text{S}$  から  $^{44}\text{Ti}$  に至る  $N = Z$  核、および、中性子過剰 Sulfur アイソトープ  $^{36}\text{S}, ^{48}\text{S}, ^{50}\text{S}$  の超変形状態の上に、様々な型の負パリティ・ソフトモードが現れることを示した。この仕事は、エネルギー上限の truncation 不要な (particle を 3 次元座標表示、hole を一粒子固有状態で表現する) 混合表示 self-consistent RPA 法に基づく世界初の現実的計算である。

●回転する変形 Woods-Saxon ポテンシャル問題の座標空間メッシュ表示による解法

[ 小笠原 ]

回転する不安定核における新しい集団励起モードの可能性を「回転座標系での準粒子 RPA」に基づいて研究する準備として、回転する変形 Woods-Saxon ポテンシャル中の 1 粒子スペクトルを座標空間メッシュ表示によって求める数値計算プログラムを作成し、計算結果を用いて高スピン状態におけるバンド終結現象を議論した。

## ◎ 集団運動セミナー

【参加者】松柳研一, 小林将人 (D3), 吉田賢市 (D1), 日野原伸生 (M2), 小笠原弘道 (M1), 相場浩和 (光華女子短大), 水鳥正二郎 (関西女子短大), 萩野浩一 (基研, 4月迄), A. G. Magner (7月迄), Jian-Zhong Gu (7月迄)

当グループは集団現象に対する微視的理論を中心に有限量子系の幅広いテーマに取り組んでいる。教室外からも定常的に参加者がある。ここでは教室メンバーの代表的な仕事に絞って記す。詳しい報告は Web で公開している。

### ● Adiabatic SCC 法による変形共存現象の研究

[ 小林, 中務 (筑波大), 松尾 (新潟大), 松柳 ]

Adiabatic SCC (Self-consistent Collective Coordinate) Method を  $^{72}\text{Kr}$  周辺の陽子過剰核における oblate 変形と prolate 変形の共存現象に適用した。oblate 変形と prolate 変形に対応する (Hartree-Fock-Bogoliubov 平均場の) 異なる平衡点をつなぐ collective path を self-consistent に求める新しい計算アルゴリズムを開発し、大振幅集団運動に対する集団ハミルトニアンを微視的に導出することに成功した。

### ● 変形した中性子過剰不安定核における低励起振動モードの研究

[ 吉田, 山上 (理研), 松柳 ]

中性子ドリップ線近傍の変形核では、弱く束縛された一粒子準位から遠心力障壁近傍の共鳴状態への粒子-空孔励起に伴って、異常に大きい遷移強度をもつ低励起状態が出現する可能性があることを理論的に示した。更に、変形した不安定核に特有な集団励起モードを探求する目的で、対相関と変形、および連続状態への励起を self-consistent に考慮した準粒子 RPA 法の計算コードを構築した。それを用いて中性子ドリップ線近傍 Mg アイソトープにおけるベータ、ガンマ振動、および、負パリティ振動モードの性質を分析した。

### ● 大振幅集団運動の質量に対する平均場の time-odd 項の寄与

[ 日野原, 小林, 中務 (筑波大), 松尾 (新潟大), 松柳 ]

四重極対相関を含む multi-O(4) モデルに Adiabatic SCC 法を適用し、大振幅集団運動の質量 (慣性関数) に対する平均場の運動量依存 (time-odd) 項の寄与を評価した。厳密対角化の結果と比較し、その効果が励起スペクトルの性質に著しい影響を与えることを示した。

### ● 混合基底 RPA 法を用いた超変形核の 8 重極型ソフトモードの研究

[ 稲倉 (新潟大), 水鳥, 山上 (理研), 松柳, 今川 (ナレッジウエア), 橋本 (筑波大) ]

$^{32}\text{S}$  から  $^{44}\text{Ti}$  に至る  $N = Z$  核、および、中性子過剰 Sulfur アイソトープ  $^{36}\text{S}$ ,  $^{48}\text{S}$ ,  $^{50}\text{S}$  の超変形状態の上に負パリティ集団振動モードが現れる可能性を探るため、実空間座標表示による Skyrme-Hartree-Fock 計算で得られた平均場を基底として (particle を 3 次元座標表示、hole を一粒子固有状態で表現する) 混合表示 selfconsistent RPA 計算を遂行した。

### ● High-K アイソマーの上に形成される Precession mode

[ 清水 (九大), 松崎 (福教大), 松柳 ]

対称軸方向に角運動量整列した多準粒子励起状態 (High-K アイソマー) の上に形成される回転バンドは、才差運動モードの多フォノン状態と見なすことができる。また、非軸対称変形核における wobbling motion の軸対称極限と見なすこともできる。私達は「回転座標系 RPA」に基づいて wobbling motion の微視的構造を分析してきたが、今年度はこの課題との関連で、最近の実験で豊富なデータが得られた  $^{178}\text{W}$  における High-K アイソマーの回転スペクトルを分析した。計算結果は多くの才差運動モードの慣性モーメント、 $B(E2)$ ,  $B(M1)$  をよく再現した。

### ● シェル構造の周期軌道理論 - diffuseness 効果の分析

[ 在田 (名工大), Magner (Kiev), 松柳 ]

私達は軌道分岐に伴うシェル構造形成を記述できる半古典論の開発を続けている。Woods-Saxon 型、あるいはその近似として  $r^\alpha$  型の動径座標依存性をもつ球対称ポテンシャルのなかの古典軌道は表面の diffuseness ( $\alpha$ ) の変化につれて分岐現象を起こす。私達は軌道分岐が量子スペクトルに与える効果を半古典周期軌道理論に基づいて評価し、それがシェル構造の形成に重要な役割を果たしていることを示した。

## ◎ 集団運動セミナー

【参加者】松柳研一, A. G. Magner (10月より), Jian-Zhong Gu, 山上雅之 (PD), 稲倉恒法 (D3), 小林将人 (D2), 吉田賢市 (M2), 日野原伸生 (M1), 萩野浩一 (基研), 相場浩和 (光華女子短大), 水鳥正二郎 (関西女子短大),

当グループは集団現象に対する微視的モデルから多体理論まで幅広いテーマに取り組んでいる。教室外からも定期的に参加者があるが、ここでは教室メンバーの仕事に限って報告する。

### ● $^{32}\text{Mg}$ 周辺不安定核の 4 重極励起における対相関の役割 [山上, Nguyen Van Giai(Orsay)]

連続状態への励起と対相関を考慮した Selfconsistent 準粒子 RPA 法を用いて、 $^{30}\text{Ne}$ ,  $^{32}\text{Mg}$  から  $^{38}\text{Ar}$  に至る  $2^+$  励起状態の微視的構造を分析した。その結果、 $N=20$  魔法数の破れと  $2^+$  状態の collectivity の形成に連続状態近傍にある中性子間の対相関が極めて重要な役割を果たしていることが分かった。

### ●混合基底 RPA 法を用いた超変形核の 8 重極型ソフトモードの研究

[稲倉, 水鳥, 山上, 松柳, 今川 (筑波大), 橋本 (筑波大)]

Unrestricted SHF 法 (対称性に制限を課さない 3 次元座標空間表示による Skyrme-Hartree-Fock 法) で得られた平均場を基底として (particle を 3 次元座標表示, hole を一粒子固有状態で表現する) 混合表示 selfconsistent RPA 計算を遂行し、 $^{32}\text{S}$ ,  $^{36}\text{S}$ ,  $^{48}\text{S}$ ,  $^{50}\text{S}$  の超変形状態の上に形成される負パリティ低励起モードの性質を分析した。計算結果は、中性子数の増大につれて中性子の寄与が支配的になること、遷移強度の非常に大きい非軸対称 octupole 型の低励起モードが系統的に現れることを示している。

### ●中性子過剰な超変形 Sulfur isotopes の負パリティ振動モードにおける集団性の形成

[吉田, 山上, 稲倉, 水鳥, 松柳]

変形した不安定核に特徴的な集団運動モード探求の第一歩として、安定核  $^{32}\text{S}$  から中性子ドリップ線近傍  $^{46}\text{S}$ ,  $^{50}\text{S}$  に至る超変形状態上の 8 重極振動モードの性質を調べた。安定核近傍では多数の 1p-1h (one-particle-one-hole) 励起がコヒーレントに重なって集団的なモードを形成するのに対し、中性子ドリップ線近傍では弱結合中性子の関与する特定の 1p-1h 励起の寄与が支配的になることが分かった。

### ●Adiabatic SCC 法による変形共存現象の研究

[小林, 中務 (筑波大), 松尾 (新潟大), 松柳]

Adiabatic SCC (Selfconsistent Collective Coordinate) Method を  $^{68}\text{Se}$  や  $^{72}\text{Kr}$  周辺の原子核における oblate 変形と prolate 変形の共存現象に適用した。oblate 変形と prolate 変形に対応する (Hartree-Fock-Bogoliubov 平均場の) 異なる平衡点をつなぐ collective path を selfconsistent に決定し、このような大振幅集団運動を記述する集団ハミルトニアンを微視的に導出することに成功した。得られた collective path は軸対称性を破る変形自由度 ( $\gamma$  変形) の方向にあり、oblate 変形極小点と prolate 変形極小点に跨る大振幅集団運動における非軸対称変形ダイナミクスの重要性を示している。

### ●チャンネル結合 SCC 法による multi-O(4) モデルの研究 [Gu, 小林, 松柳]

変形共存現象をシミュレートできる multi-O(4) モデルにチャンネル結合 SCC 法を適用し、oblate 変形と prolate 変形の間障壁透過による “parity splitting” の性質を調べている。

### ●Wobbling モードの微視的構造 [松崎 (福教大), 清水 (九大), 松柳]

私達が長年にわたって開発・展開してきた微視的モデルである「回転座標系 RPA」に基づいて、 $^{168}\text{Hf}$ ,  $^{167}\text{Lu}$ ,  $^{174}\text{Hf}$  における (軸対称性を破った超変形核での新しい 3 次元回転モードである) wobbling modes の性質を分析し、このモードが生成される微視的機構を明らかにするとともに、ごく最近得られた実験データと比較した。計算結果は高速回転による準粒子の角運動量整列と非軸対称変形の微妙なバランスで wobbling モードの性質が決定されることを示している。

### ●シェル構造の周期軌道理論 [Magner(Kiev), 在田 (名工大), 松柳]

周期軌道の bifurcation を取り扱うことが可能なシェル構造に対する半古典論の開発を続けている。昨年度までに spheroidal cavity モデルの分析を終え、今年度はそこで無視された表面の diffuseness の効果を分析している。Woods-Saxon 型、あるいはその近似として  $r^\alpha$  型の動径座標依存性をもつ球対称ポテンシャルのなかの古典軌道は diffuseness の変化につれて分岐現象を起こすが、それが量子スペクトルに及ぼす影響とその半古典論による記述を試みている

## ◎ 集団運動セミナー

【参加者】松柳研一, Jian-Zhong Gu, 山上雅之 (10月まで Orsay), 稲倉恒法 (D2), 小林将人 (D1), 吉田賢市 (M1), 相場浩和 (光華女子短大), 水鳥正二郎 (関西女子短大), 吉田光次 (奈良大), 萩野浩一 (基研), 杉田歩 (基研)

当グループは集団現象に対する微視的モデルから多体理論まで幅広いテーマに取り組んでいる。教室外からも定期的に参加者があるが、ここでは教室メンバーの仕事に限って報告する。

### ● 連続状態を考慮した準粒子 RPA による中性子過剰核の低励起モードの研究

[ 山上, E. Khan(Orsay), Nguyen Van Giai(Orsay) ]

グリーン関数法に基づいて連続状態への励起と対相関を考慮した Selfconsistent 準粒子 RPA の計算コードを開発した。最初の適用例として、中性子過剰 O アイソトープを分析し、不安定核の低励起振動モードの記述のためには準粒子間の残留相互作用の selfconsistent な取り扱いが非常に重要であることを示した。

### ● $^{32}\text{S}$ から $^{48}\text{Cr}$ にかけての $N = Z$ 核における超変形バンド [ 稲倉, 水鳥, 山上, 松柳 ]

対称性の制限の無い Cranked Skyrme-HF 法を用いて、 $^{40}\text{Ca}$  周辺の  $N = Z$  核において超変形バンドやハイパー変形バンドがどのように系統的に現れるか、理論的予測を与えた。また、これらの状態が空間反転対称性を破る  $Y_{30}$  および  $Y_{31}$  変形に対して非常にソフトとなる微視的メカニズムを明らかにした。

### ● 中性子過剰 S アイソトープにおける超変形バンド [ 稲倉, 水鳥, 山上, 松柳 ]

超変形状態が中性子ドリップ線近くの不安定核で存在する可能性を探る目的で、中性子過剰 S アイソトープに対する Cranked Skyrme-HF 計算を系統的に遂行した。 $^{50}\text{S}$  周辺が極めて有望。

### ● Adiabatic SCC 法の multi- $O(4)$ モデルへの適用

[ 小林, 中務 (東北大), 松尾 (新潟大), 松柳 ]

変形共存現象に見られる大振幅集団運動を記述する微視的理論の開発の一環として、oblate 変形と prolate 変形に対応する異なる Hartree-Fock-Bogolubov 平衡点をシミュレートできる multi- $O(4)$  モデルに Adiabatic SCC (Selfconsistent Collective Coordinate) Method を適用し、大振幅集団運動の慣性質量の性質を徹底的に分析した。Exact 解と比較し、oblate 変形と prolate 変形の間障壁透過による “parity splitting” の性質がよく再現されていることを示した。

### ● ランダム行列理論に基づく強度関数の揺らぎの研究 [Jian-Zhong Gu(顧建中)]

ランダム行列理論に基づいて強度関数に対する有限サイズ効果や強度関数の揺らぎを分析した。Breit-Wigner 分布からのズレが起こる機構について幾つかの興味ある結論を得た。今後これらの成果を生かして巨大共鳴の幅や非調和性を調べる。

### ● 軸対称性を破った超変形核の Wobbling Motion [ 松崎 (福教大), 清水 (九大), 松柳 ]

軸対称性を破った超変形核での新しい 3次元回転モードである Wobbling Mode が続々と見つかりつつある。私達は「回転座標系シェルモデル+RPA」に基づいて 3つの主軸周りの慣性モーメントを微視的に導出し、高スピン超変形核でこのモードが出現するための物理的条件を系統的に分析している。計算結果は高速回転による準粒子の角運動量整列と非軸対称変形の微妙なバランスで Wobbling Mode の性質が決定されることを示している。

### ● Spheroidal Cavity における超変形シェル構造の周期軌道理論

[Magner(Kiev), 在田 (名工大), Fedotkin(Kiev), 松柳 ]

3年間にわたって、3次元 spheroidal cavity における周期軌道の分岐を取り扱い可能な新しいトレース公式を定式化し、超変形シェル構造の形成機構を理解する研究に取り組んできたが、今年度、この仕事を完成させた。

## ◎ 集団運動セミナー

【参加者】松柳研一、水鳥正二郎(10月から基研)、Jian-Zhong GU (10月から)、山上雅之(9月から Orsay)、稲倉恒法(D1)、小林将人(M2)、萩野浩一(基研)、相場浩和(光華女子短大)、吉田光次(奈良大)、杉田歩(RCNP)、今川博人(筑波大学、1-2月)、A.G. Magner(Kiev,1月)  
 集団運動サブグループは核構造における集団現象の多体論を中心に多彩なテーマに取り組んでいます。当セミナーの参加者は教室内に限られていませんが、以下では教室メンバーの仕事に限って報告します。

### ● $^{40}\text{Ca}$ 領域 $N = Z$ 核における超変形およびハイパー変形バンド[水鳥、稲倉、山上、松柳]

対称性の制限の無い Cranked Skyrme-HF 法を用いて、今年発見された  $^{40}\text{Ca}$  の超変形バンドを分析し、これが空間反転非対称変形 ( $Y_{30}$  と  $Y_{31}$ ) に対して非常にソフトであることを示すとともに周辺の  $^{32}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{44}\text{Ti}$  でも超変形状態が、 $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{48}\text{Cr}$  のより高スピン領域でハイパー変形状態が存在することを理論的に示唆した。

### ●中性子過剰不安定核に於ける超変形バンド[稲倉、水鳥、山上、松柳]

中性子過剰領域で超変形魔法数 (4,10,16,30,42) を持つと期待される  $^{14}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Ne}$ ,  $^{46}\text{S}$ ,  $^{72}\text{Zn}$  に対して Cranked Skyrme-HF 計算を遂行し、これらの核で超変形解を見つけた。現在、中性子スキンの性質が角運動量の増大につれてどのように変化するか分析中。又、不安定核における集団振動モードを研究するために、これらの計算と並行して、Cranked Skyrme-HFB で求めた平均場を基礎に(連続状態との結合を取り入れた) continuum quasiparticle RPA のプログラムを構築中。

### ●Adiabatic SCC 法の multi-O(4) モデルへの適用

[小林、松尾(新潟大)、中務(東北大)、松柳]

最近開発された Adiabatic SCC (Selfconsistent Collective Coordinate) Method の変形共存現象に対する feasibility を調べるために、これを multi-O(4) モデルに適用し、異なる Hartree-Fock 極小点を結ぶ collective path がユニークに求まることを示した。

### ●Quantum mechanical diffusion in complex surroundings [水鳥、Åberg(Lund)]

多重レベル交差モデルを用いて集団運動の散逸のメカニズムを調べている。分布関数は Gaussian でも Lorentzian でもない複雑な振舞いをする。散逸は始め  $t^2$  に比例し、やがて  $t$  に比例。

### ●Fluctuation and finite size effect of strength function [Gu]

ランダム行列理論に基づいて強度関数のゆらきの性質を系統的に分析。また、巨大双極子共鳴の 2 フォノン状態の非調和効果の研究を開始した。

### ●軸対称性を破った超変形核の Wobbling Motion [松崎(福教大)、清水(九大)、松柳]

ごく最近、 $^{163}\text{Lu}$  において、超変形イラスト線近傍に Wobbling Mode が励起したと解釈できる高スピン回転バンドが見つかった。これは軸対称性の破れに伴って出現する 3 次元的新しい回転モードである。我々は「回転座標系シェルモデル+RPA」に基づく数値計算を実行し、実験データに対応する Wobbling 解を得るとともに、高スピン超変形状態において Wobbling Motion が実現するための物理的条件を分析し、positive- $\gamma$  変形をもった原子核で Wobbling Motion が存在する為には準粒子の回転整列 (alignment) が不可欠である、という結論を得た。

### ●Spheroidal Cavity における超変形シェル構造の周期軌道理論

[Magner(Kiev), Fedotkin(Kiev)、在田(名工大)、松柳]

この2年間、3次元 spheroidal cavity に対して、改良された停留位相近似に基づく新しい半古典トレース公式を導出し、超変形シェル構造の形成機構を解明する仕事に取り組んできた。今年度、改良停留位相近似法の2次近似では量子シェル構造の再現に不十分な場合があることが分かり、3次の order まで精度を上げて全面的に計算をやり直した。

## ◎ 集団運動セミナー

【参加者】松柳研一、水鳥正二郎(11月から基研)、杉田歩(9月からRCNP)、山上雅之、稲倉恒法、小林将人、萩野浩一(基研, 12月から)、相場浩和(光華女子短大)、吉田光次(奈良大)

集団運動サブグループは核構造における集団現象の多体論を中心に多彩なテーマに取り組んでいます。当セミナーは京都地区におけるこの分野の研究拠点として重要な役割を果たしていますが、以下では当教室メンバーの本年度の仕事に限って報告します。

### ●対称性の制限のない Cranked HFB 法による変形共存現象とエキゾチック変形の研究[山上、松柳]

昨年度開発した、対称性の制限の無い Cranked Hartree-Fock-Bogoliubov 法の計算プログラムを用いて、 $A = 60 - 80$  領域の  $N \approx Z$  不安定核における変形共存現象とエキゾチック変形の可能性を系統的に調べた。 $^{68}\text{Se}$  のオブレート変形状態は triangular ( $Y_{33}$ ) 変形に対し、 $^{80}\text{Zr}$  の励起球形状態は tetrahedral ( $Y_{32}$ ) 変形に対して不安定であることを示した。

### ●量子状態の複雑性の定義[杉田、相場]

伏見関数の 2 次モーメントの逆数をとって波動関数のカオス性の定義とする方法を提案し、Quartic oscillator モデルを例にとってその有効性を示した。一般化されたコヒーレント状態を用いて、これを多体問題の場合に拡張することを試みている。

### ● $^{36}\text{Ar}$ の超変形およびハイパー変形バンド[水鳥、稲倉、山上、松柳]

対称性の制限の無い Cranked Skyrme-HF 法を用いて、最近発見された  $^{36}\text{Ar}$  の超変形バンドを分析するとともに、より高スピんで期待されるハイパー変形状態とその空間反転非対称変形に対する安定性を調べた。

### ● $^{26}\text{Ne}$ の超変形バンドの高スピン極限[稲倉、水鳥、山上、松柳]

Cranked Skyrme-HFB に基づく 3 次元メッシュ空間での RPA 法によって不安定核の集団励起モードを理論的に探索するプロジェクトの準備をかねて、超変形の二重魔法数核と考えられる  $^{26}\text{Ne}$  のイラスト構造を分析した。計算結果は超変形バンドが高スピン極限でバンド終結現象を起こすことを示唆している。

### ●分岐によるシェル構造形成の半古典論[Magner(Kiev), Fedotkin(Kiev)、在田(名工大)、松柳、Brack(Regensburg)]

2 次元 elliptic billiard モデルを用いた昨年仕事の継続として、3 次元 spheroidal cavity モデルに対する半古典トレース公式を導出した。このトレース公式に基づき古典周期軌道の知識のみを使って計算した準位密度、シェル構造エネルギーと量子スペクトル計算から求めたそれらを系統的に比較し、満足すべき一致を得た。赤道平面の 2 次元軌道から 3 次元軌道が分岐する分岐点近傍でシェル振動の振幅が増幅することを数値計算により示すとともに、この増幅の機構を(改良された停留位相近似に基づく)半古典トレース公式によって解析的に説明し、これが超変形シェル構造の形成メカニズムであることを論じた。

### ●Selfconsistent Collective Coordinate (SCC) Method と Diabatic 準粒子表示による高スピン状態の記述[清水(九大)、松柳]

SCC 法に基づいて回転座標系での Diabatic 準粒子表示を構成する方法を詳述した。rare-earth 変形核の g バンドと s バンドの系統的な数値計算を遂行し、odd-even mass differences と慣性モーメントの角速度依存性を同時に矛盾なく再現するためには doubly-stretched 型の quadrupole-pairing が極めて重要であることを示した。

## ◎ 集団運動セミナー

【参加者】松柳研一、杉田歩、藤田匡、山上雅之、稲倉恒法、吉田光次（奈良大）、水鳥正二郎（阪大理）、松尾正之（基研）、相場浩和（光華女子短大）、山村正俊（関西大）、A.G. Magner

集団運動サブグループは核構造における集団現象の多体論を中心に多彩なテーマに取り組んでいます。当セミナーは京都地区におけるこの分野の研究拠点としても重要な役割を果たしています。世界的に見てもユニークな存在といえます。以下では当教室メンバーの本年度の仕事に限って報告します。

### ●対称性の制限のない Cranked HFB 法によるエキゾチック変形の探索[山上、松柳]

空間対称性に何の仮定もしない 3 次元座標空間表示による Cranked Hartree-Fock 法に基づき、連続エネルギー状態も考慮して対相関を取り扱う Cranked Hartree-Fock-Bogoliubov 法の新しい計算プログラムを構築した。このプログラムの収束性、精度、計算効率の改良を積み重ねた。このプログラムを用いて、 $A = 60 - 80$  領域の  $N \simeq Z$  不安定核におけるエキゾチック変形を理論的に探索し、 $^{68}\text{Se}$  領域で空間反転対称性と軸対称性を同時に破った  $Y_{33}$  変形解を見出した。

### ●位相空間経路積分による周期軌道理論の再定式化[杉田]

位相空間経路積分を用いて、理論の正準不変性を尊重した形で周期軌道理論を定式化した。これにより、多くの概念や計算が分かりやすくなる。今年度は、マシロフ指数に関する研究をまとめ、分岐を含む単純な例として、球対称ポテンシャルの解析を行った。

### ●大振幅集団運動の微視的理論—断熱的 SCC 法の開発—[松尾（基研）、中務（理研）、松柳]

大振幅集団運動の微視的理論として研究されてきた自己無撞着集団座標の方法 (Selfconsistent Collective Coordinate Method) の基本方程式の解法としては、これまで振幅展開法しか知られていなかったが、このたび、新しい解法として断熱近似法を開発した。振幅展開法は非調和振動の記述に有効であったが、今回開発した方法は従来の Adiabatic TDHF 理論の困難を解決するとともに、変形共存現象や超変形状態からのトンネル崩壊など、異なる HF 極小点にまたがる大振幅の集団運動の記述に有効で practical な手段になると期待される。

### ●分岐によるシェル構造形成の半古典論[Magner(Kiev), Fedotkin(Kiev)、在田 (名工大)、松柳]

a) 超変形シェル構造形成の起源を半古典論の観点から理解すること、b) 周期軌道の分岐現象を記述可能な半古典論を構築することを目的として昨年度から Kiev グループとの共同研究を開始し、分岐点での停留位相近似の困難を克服する新しい半古典トレース公式を開発した。ハミルトニアンが含むパラメーターが滑らかに変化するとき周期軌道の性質が劇的に変化する分岐点では通常の停留位相近似で求めた振幅が発散する。私達は分岐点での位相空間の構造を徹底的に分析し、トレース積分を物理的に意味のある有限領域で行なうことによってこの発散を避けることが出来ることを示した。昨年度は 2 次元楕円ベリアードモデルにおける butterfly orbit 群の分岐現象を具体例としてとりあげ、分岐点近傍で分岐軌道に伴う振幅が増大し、分岐に伴ってシェル構造が形成されるメカニズムを明かにした。今年度はこの解析を 3 次元に拡張し、回転楕円体キャビティモデルにおいて赤道面 2 次元軌道群から 3 次元 8 の字形周期軌道群が分岐するに伴って超変形シェル構造が形成される有様を解析した。新しい半古典トレース公式による計算結果はフーリエ変換を用いた量子-古典対応の分析結果ともよく一致している。この研究はあと 1 年で完成させる予定。

◎ 集団運動セミナー【参加者】松柳研一、水鳥正二郎、三須敏幸、田中敏晶、杉田歩、藤田匡、山上雅之、阿武木啓朗、吉田光次 (RCNP)、松尾正之 (基研)、相場浩和 (光華女子短大)、山村正俊 (関西大)

集団運動サブグループでは、核構造における多様な集団現象に興味をもち、現象に密着したモデルの構築から、有限フェルミ系の集団運動に対する多体理論の展開まで、幅広い研究活動を行っています。参加者リストからわかるように、当セミナーは京都地区におけるこの分野の研究拠点としても重要な役割を果たしています (世界的に見てもこの分野の重要な研究拠点の一つと言って過言でないと思います)。しかし、以下では教室発表会の主旨に従い当教室メンバーによる仕事に限って報告します。

● 次数依存写像法の拡張と収束条件の解析[田中]

摂動級数の総和法として近年著しい成功を収めてきた次数依存写像法を、求めたい物理量が複数のスケールに依存する場合への拡張を行った。また、級数論的性質と強結合展開係数の再現性という二つの立場から収束性の必要充分条件の解析を行った。

● 周期軌道理論のマスロフ指数[杉田]

位相空間上の経路積分を用いて周期軌道理論の基礎的部分の整理を試みた結果、マスロフ指数に対して、 $n$ -repetition に対する公式、安定性とマスロフ指数の関係等の新しい結果を得た。

● 多重 Landau-Zener 交差模型の分析[水鳥、S. Åberg(Lund)]

集団自由度から内部自由度へのエネルギーの遷移と内部自由度のカオス性の関連を探る為、多重 Landau-Zener 交差模型で時間依存 Schrödinger 方程式を数値的に解き解の振る舞いを調べた。

● 不安定核の半径と diffuseness [水鳥、Nazarewicz(Oak Ridge/Warsaw), Dobaczewski(Warsaw), Reinhard(Erlangen)]

不安定核の中性子ハロー現象や中性子スキン現象を議論するため、そのような原子核でも有効な半径や diffuseness の定義を提案した。井戸型ポテンシャルでその有効性を確かめ、また Hartree-Fock-Bogoliubov 模型で計算された原子核の密度に対して適用した。

● 対称性の制限のない Cranked HFB 法によるエキゾチック変形の研究[山上、松柳]

1) Skyrme force を用いた cranked HF 法により、 $^{32}\text{S}$  の高スピン・イラスト状態の性質を調べ、a) 超変形バンドが角運動量  $I = 24\hbar$  付近で劇的な内部構造変化を起こしハイパー変形に移っていくこと、b)  $I \approx 10\hbar$  のイラスト領域に空間反転対称性と軸対称性を同時に破った  $Y_{31}$  変形バンドが現れること、c) 平均場の time-odd 成分は主として慣性モーメントの有効質量  $m^*$  依存性を相殺する働きをすることなど、興味ある結果を得た。

2) 連続状態への励起も考慮して対相関を取り扱う Cranked Hartree-Fock-Bogoliubov 法の新しい計算プログラムを作成し、 $A = 60 - 80$  領域の  $N \approx Z$  不安定核におけるエキゾチック変形の理論的探索を開始した。

● 分岐によるシェル構造形成の半古典論[Magner(Kiev), Fedotkin (Kiev), 在田 (名工大)、三須、松柳]

超変形シェル構造の起源について私達は分岐による 8 の字形 3 次元周期軌道の形成が本質的であることを主張してきた。この主張は Fourier 変換を用いた量子-古典対応の分析に基づくものであった。しかし、分岐点は通常の停留位相近似が破綻する点であり、分岐現象の記述には半古典トレース公式の拡張が必要である。この目的に向けて京都グループと Kiev グループの共同研究を開始し、今年度は 2 次元楕円ビリアードモデルにおける butterfly orbits の分岐現象の記述に成功した。

◎ 集団運動セミナー【参加者】松柳、水鳥、三須、吉田 (RCNP)、杉田、藤田、大塚、山上、松尾 (基研)、相場 (光華女子短大)、山村 (関西大)、A.Magner(Kiev)

集団運動グループでは、核構造における多様な集団現象に興味をもち、現象に密着したモデルの構築から、有限フェルミ系の集団運動に対する多体理論の展開まで、幅広い研究活動を行っています。特に、1) 極限状況の原子核 (高速回転、超変形、不安定核など) における新しい集団励起モードの探求と微視的モデルの展開、2) 核子多体系の秩序運動とカオス運動の統一的理解、3) 有限フェルミ系の非線形ダイナミクス、を長期的な課題としています。この基本方針のもとで、近年、「高スピン超変形核の集団モード」、「温かい核の回転運動」、および「変形シェル構造の起源」を中心課題とした研究を行っています。また、重い不安定核に関する新たな研究計画を開始しました。今年度の当教室メンバーによる成果は以下の通りです。

### 対称性の制限のない Cranked Skyrme Hartree-Fock 法による高スピン状態でのエキゾチック変形の研究 [山上、松柳]

(1) 新しい「対称性の制限のない Cranked Skyrme Hartree-Fock 法」の計算コードの開発  
今後の不安定核におけるエキゾチック変形探索のための強力な手段である。

(2)  $^{32}\text{S}$  の高スピン状態の計算

新たに作成した Cranked Skyrme Hartree-Fock 法の計算コードを用いて  $^{32}\text{S}$  の高スピン状態の計算を行った。その結果、超変形状態の回転バンドに加えて、空間反転対称性と軸対称性を同時に破った  $Y_{31}$  変形回転バンドの存在を理論的に示唆した。

### 周期軌道理論によるシェル構造形成機構の解析 [三須、杉田、松柳、在田 (名工大)、Magner]

● Elliptic Billiard における周期軌道の分岐の半古典論 [Magner, 松柳, et al]

古典軌道の分岐点で停留位相近似に基づく半古典論は破綻する。Elliptic billiard での分岐では、対称性 (縮退度) が高い新たな周期軌道群が生まれるために、高次項を取り込む通常の uniform 近似も使えない。この問題の解決を当面の目的とし、長期的には変形シェル構造の起源の解明に向けて、京都グループと Kiev グループの共同研究を開始した。

● 軸対称変形 cavity における周期軌道分岐とシェル構造 [三須]

最近までの研究 (杉田、在田、松柳) により、変形 cavity におけるシェル構造と (対称軸に垂直な平面上の) 2次元周期軌道の分岐との間の相関が指摘されている。これらの関連性の裏付けを行うために、より一般的な軸対称 cavity を使用してシェル構造に寄与する周期軌道の変形依存性を解析し、シェル構造と分岐軌道との相関は超変形近傍で顕著であることを確認した。

● 冪関数型ポテンシャルによる diffuseness の効果の解析 [杉田]

これまでの周期軌道理論による解析は、ほとんどが調和振動子型か cavity に限られていたが、これら二つの描像をつなぎ、系の diffuseness の効果を明らかにする目的で、冪関数型ポテンシャルの解析を開始した。このモデルは簡単なスケール則をもち、フーリエ変換の手法を用いて量子古典対応を調べることができる。今年度はまず球対称の場合を調べ、diffuseness が小さくなるにつれて円形の軌道が分岐して、多角形型の軌道が次々と現れる様子を明らかにした。

### 弱い対相関係での集団振動モード [水鳥、中務 (Manchester)、松尾、清水 (九大)、松柳]

Pairing の相転移点近傍での集団振動モードの性質を研究している。本年度は超変形  $^{150}\text{Gd}$  において強い E2 遷移でイラストに崩壊する励起バンドに注目し、pairing vibration と beta-vibration の結合によって集団性が増大する機構を分析したが、実験で示唆されているような異常に強い遷移確率は得られなかった。また、Lipkin-Nogami 近似にもとづく RPA の理論的枠組みを検討した。

### 量子論的な拡散現象 [水鳥、S. Åberg(Lund)]

多準位系で集団的な自由度が変化したときの量子論的な拡散についての知見を得るため、Landau-Zener 型準位交差が継続的に起こる模型について、遷移確率を数値的に求めた。初期条件として、傾きが最大の準位を占有したものを取った場合には、その準位に残る確率が Landau-Zener 遷移確率の積に等しいという conjecture が成立していることを確認した。また、それ以外の初期条件での遷移確率と Landau-Zener 遷移確率の積との関係を議論した。

## 原子核理論研究室 '96 年度活動報告

◎集団運動セミナー

【参加者】松柳研一、吉田光次、杉田歩、藤田匡、大塚卓、土手昭伸、寺崎順<sup>†</sup>、相場浩和<sup>††</sup>、松尾正之<sup>\*</sup>、在田謙一郎<sup>\*\*</sup>

(<sup>†</sup>Sacley(仏)→KTH,Stockholm, <sup>††</sup>光華女短大, 基研、\*基研、\*\*基研→名工大)

集団運動グループでは、「高スピン状態における核構造」、「有限温度での集団運動」および「集団運動の非線型動力学」を中心課題として、原子核における新しい集団運動モードやその発現・散逸を解明すべく、研究活動を行っています。また、不安定核研究の対象が将来、重い核へも広がることを展望して、平均場近似を出発点とする新たな研究計画を推進しつつあります。私たちは、国内外の実験Gとの協力関係を通じて、世界の最先端の核構造研究プロジェクトに寄与し続けています。

以下に、当教室メンバーによる今年度の研究成果を紹介します;

Hg 超変形核における回転減衰の微視的機構-アラインメント効果 [吉田、松尾]

Hg 超変形核における回転減衰現象を解析し、著しく小さい回転角速度の分散 $\Delta\omega$ が減衰の開始を抑制していることを見極めた。その結果、<sup>192</sup>Hg 超変形核で非常に多くの回転バンドが存在する可能性や、減衰幅が著しく小さくなることを指摘した。また、 $\Delta\omega$ の微視的解析を行い、Hg における一粒子アラインメントの特異性-high- $\Omega$ 軌道の集中が $\Delta\omega$ の平均値からの大きなずれを生じさせていることを見出した。 $\Delta\omega$ におけるアラインメントの殻構造(揺らぎ)に対し、配位混合における一粒子準位の殻構造と並んで、回転減衰に直接的に反映される微視的性質としての明解な理解を与えた。Dy 超変形核の解析と併せて、それら微視的効果の相互関係によって、回転バンド数などの回転減衰の発現が非常に多様な性質を持つことを見出した。

重い不安定核の構造と平均場 [寺崎]

Skyrme 力と密度依存 pairing 力を用い、連続(共鳴)状態との結合を取り入れた Hartree-Fock-Bogoliubov 法により、中性子ドリップ線近傍の Mg および Zr アイソトープの構造を調べた。<sup>36,38,40</sup>Mg が変形すること、<sup>40</sup>Mg がドリップ線上に位置すること、中性子と陽子の変形が異なることなどが分かった。

古典周期軌道の分岐と量子スペクトルのシェル構造 [杉田、在田、松柳]

空間反転対称性を破った軸対称変形キャビティに閉じ込められた粒子の量子スペクトルのシェル構造(固有値分布の揺らぎに現れる規則的な振動パターン)を変形度の関数として系統的に調べた。その結果、四重極変形と八重極変形の一定の組み合わせで、新しい顕著なシェル構造が形成されることを見つけた。その動力的起源を探るため、非可積分ハミルトン力学系に対する半古典論(周期軌道理論)および、スケール系に対するフーリエ変換の方法を用いて、周期軌道の性質の変形パラメータ依存性を解析した。その結果、赤道面上の三角形と四角形の周期軌道群から三次元周期軌道群が分岐する分岐曲線の近傍で上記のシェル構造が急激に成長していることが分かった。この結果は原子核やマイクロクラスターなどの有限量子系にエキゾチック変形が現れる新しい機構を示唆している。

A=190 領域の超変形核における高スピン振動モードの微視的性質[中務(Chalk River)、松柳、水鳥(Oak Ridge)、清水(九大)]

我々は、高スピン超変形核に特有なシェル構造の下では、通常変形核とは異なる性質を持った八重極型の集団励起モードが現れることを理論的に示唆してきたが、最近、超変形<sup>190,192,194</sup>Hg, <sup>194,196</sup>Pb で発見された合計 10 個の励起回転バンドは初めての実験的証拠と考えられる。「回転系での RPA 近似」に基づく微視的モデルを展開し、空間反転対称性と軸対称性を同時に破る Y<sub>32</sub>型の表面変形振動モードと回転整列した準粒子モードの競合によって、実験データの特徴を統一的に説明できることを示した。

見積り、天体現象の $\gamma$ 線バーストとの関連を議論した。エネルギー規模としては充分であるが、他のシナリオと比較してユニークさを明確にする必要がある。また $K^-$ 凝縮下での中性子星冷却も検討中(+鶴田、モンタナ大)。

(ii)  $K^-$ 凝縮体が中性子星誕生過程のいつ、如何にして成長するか、を研究(+岩本、トレド大)。強い相互作用が $K^-$ 励起エネルギーを決定するが、netにストレンジネスを生成するのは弱い相互作用であり、後者の時間スケールが興味深い。kinematicalに記述が可能な相転移直後からの領域に対して、反応速度式を用いて生成過程を取り扱い、緩和時間を見積もった。秩序変数が平衡値の1/10から9/10に達する時間は、 $10^{-(2\sim 4)}$  sec程度であった。温度・密度やニュートリノ透明度などをより現実的な条件での考察が課題。

(iii)  $\pi K$ 共存凝縮可能性の議論は理論的進展として重要であり、着手した(武藤)。 $0^-$ メソンと $(1/2)^+$ バリオンを含む非線形模型で、 $\pi K$ と核子の自由度のみを考慮して計算を行なった結果、まず $\pi$ 凝縮が先に発現し、続いて高密度で $\pi K^-$ 凝縮相が実現する。さらに高密度でも共存相が続くことがわかった。

## I-2. 高励起高密度ハドロン物質の研究(進・巽・藤井)

(i) 媒質中のハドロンの性質変化がレプトン対生成に如何に反映するかを検討中。グリーン関数法を用いて対生成に対する基本的定式を整理した。これは、媒質効果を取り込む見通しを良くし、ゲージ不変性を尊重する方法である。また、従来の定式化はこれに含まれる。この形式を用いて、 $K^-$ 凝縮がある相でのレプトン生成の表式を与えた。擬スカラの凝縮があると、レプトン対分布において「ベクトル」中間子の他に「軸性ベクトル」中間子の質量位置に新しいピークが現れるだろう。

(ii) 特にストレンジネス自由度の現れに注意を払って、重イオン衝突で実現するハドロン物質のモデルを構成している(+丸山、原研)。これは(i)にも関連する。カイラル摂動論と相対論的平均場論に基づいて、 $0^-$  8重項中間子と $(1/2)^+$  8重項バリオンを取り込み、アイソスピン0、ストレンジネス0のハドロン物質の計算を行なった。この自由度での“ $S=+1$ ”粒子は( $K^+$ ,  $K^0$ )のみなので、ストレンジネス自由度の顕在化には、高密度でのハイペロン自由度の振舞いの他に $K^-$ 励起が重要であることが確認された。

## II. バリオン間相互作用

### II-1. ハイペロン-核子相互作用の統一的記述(藤原・仲本\*・鈴木\*)・新潟大

昨年度のRGM-F模型に加えて、クォーク間の中間子交換ポテンシャルを完全に微視的に計算した模型FSS、およびその両者の改良型としてRGM-H模型を完成した。これらの模型ではスカラ中間子、擬スカラ中間子9重項が採り入れられており、少数の $SU_3$ パラメタをサーチすることによって、核力の高い部分波( $L \leq 4$ )までの位相差を、例外を除いて、 $1 \sim 2^\circ$ の精度で再現できた。更に、フレーバー対称性の破れを示す $\lambda = m_s/m_{ud}$ と $\kappa$ 中間子質量およびスカラ中間子の一重項-八重項の混合角 $\theta^S$ を調節することにより、 $\Lambda N - \Sigma N$ 配位の敷居値の差を再現しつつ、現存する実験の $\Sigma^+ p$ 、 $\Lambda p$ 、 $\Sigma^- p$ 散乱の低エネルギー散乱、反応断面積を満足いく精度で全て再現することができた。

### II-2. クォーク模型によるNN、YN相互作用の散乱偏極量(藤田・藤原)

バリオン間相互作用の詳細に敏感であると期待される散乱偏極量について、位相差から偏極量を求める手続きを整理し、現存する現実的模型(一ボソン交換模型、クォーク模型)について振舞を比較した。YN相互作用では、NN散乱では見ることのできない新しい非中心力が現れ、これらの効果・役割に注目している( $LS^{(-)}$ など)。われわれのグループは、クォーク模型によってNNの偏極量、現存するYNの断面積の実験データを再現した。チャンネル結合のないYN系についていくつかの偏極量( $\Sigma^+ p(P_E = 450 \text{ MeV}/c)$ 系でのPolarizationなど)に対する予測値を求め他の模型による結果と比較・検討した。

◎集団運動セミナー【参加者】松柳研一、吉田光次、杉田歩、藤田匡、水鳥正二郎<sup>i</sup>、山村正俊<sup>ii</sup>

相場浩和<sup>\*</sup>、松尾正之<sup>\*\*</sup>、在田謙一郎<sup>\*\*</sup>、Zhang Xi-zhen<sup>§</sup>、Zhang Jing-ye<sup>§§</sup>、中務孝<sup>¶</sup>

(<sup>i</sup>RCNP→Oak Ridge 国立研究所(米)、<sup>ii</sup>関西大学、\*光華女短大、\*\*基研、§中国原子能科学研究院、§§Tennessee大、¶Chalk River 研究所)

集団運動グループでは、「高スピン状態における核構造」、「有限温度での集団運動」および「集団運動の非線型動力学」を中心課題として、原子核における集団運動モードの発現・散逸に注目しながら、研究活動を行っています。

高スピン核分光学では、欧米で稼働中の新世代 $\gamma$ 線測定器が次々と重要なデータを出しており、世界の理論グループは最新のデータの解析に精力を注いでいます。中でも、京大グループは、<sup>190,192,194</sup>Hgの超変形励起バンドの解析を行い、その特徴的な振る舞いを定量的に再現しました。それは、八重極振動モー

ドを考慮した結果であり、超変形核でのそのような集団励起モードの重要性に着目したことによる成果でした。日本国内でも、このような $\gamma$ 線測定器を用いた実験が計画中で、我々も期待を寄せています。より分解能の高い測定器が開発されている一方で、準連続 $\gamma$ 線を統計的に解析する方法 (Fluctuation Analysis Method) が開発され、成果をあげています。我々の行っている回転減衰の研究は、非イラスト (有限温度) での集団的回転バンド構造の喪失をテーマとし、この方法が有効な、非常に準位密度の高い領域を対象としています。我々は実験グループと共同してデータの解析・解釈を行い、実績をあげています。今年度は、Dy 領域超変形核の解析に努め、殻効果の及ぼす影響について研究を行いました。この研究体制で今後更に研究領域を広げ、非イラスト-有限温度現象の解明の担い手となることを目指しています。このような現象に密着した、有限量子多体系の問題に取り組むとともに、半古典論を用いて、集団自由度の起源を、量子-古典対応から理解する試みも行われています。原子核の変形の実現に重要な役割を果たす一粒子スペクトルの殻構造の形成機構の解明もそのひとつです。有限量子多体系の形を量子論、古典論両面から理解する目的から始めた研究は、量子カオスという新しい問題と量子力学の再認識という分野を越えたテーマに発展し、研究分野が広がっています。また、上で述べた八重極振動の重要性や、巨大共鳴の散逸機構の理解にも本質的な洞察を与えるものと期待され、多体問題との関連も今後研究が進むものと思われます。同じく殻構造が本質的な役割を果たすマイクロクラスターも含めて、有限量子多体系の量子 (微視) 的描像と古典 (巨視) 的描像の対応関係の理解をめざし、努力が行われています。以上のように、集団運動グループでは、超変形バンドや八重極振動、回転減衰など、現象に密着した研究と、半古典論的アプローチという有限量子多体系の理論の本質に迫る研究が、並行して、互いに影響し合いながら、発展を続けています。以下に、当教室メンバーによる今年度の研究成果を紹介します;

#### 超変形核での新しい集団励起モード [中務、松柳、水鳥、清水]

1994年から1995年にかけて、新しい世代のガンマ線測定器システム [Gammasphere (米国 Berkeley), Eurogam (フランス, Strasbourg)] を用いた実験により、超変形  $^{190,192,194}\text{Hg}$  の励起バンドが発見された。これらの高スピン回転バンドの動力学的慣性モーメントは、通常の「回転座標系シェルモデル」では説明できない奇妙な性質を示している。我々は、「回転系での RPA 近似」に基づく微視的モデルを展開し、空間反転対称性を破る八重極型の表面変形振動モードと、回転整列した準粒子モードの競合の形態の多様性によって、これらの実験データの主要な特徴を矛盾なく統一的に説明できることを示した。我々は高スピン超変形核に特有なシェル構造の下では、通常変形核とは異なる性質を持った新しい型の振動モードが現れる可能性があることを理論的に予測してきたが、超変形 Hg アイソトープの励起回転バンドは、この種の八重極型振動モードの存在を直接的に支持する初めての実験データと考えられる。

#### 変形 cavity のシェル構造の半古典論 [杉田、在田、松柳]

空間反転対称性を破った、軸対称変形 cavity に閉じ込められた粒子の量子力学的固有値分布のゆらぎに現れる規則的な振動パターン=シェル構造の形成の様子を系統的に調べ、4重極変形と8重極変形が一定の割合で重なり合うとき、顕著なシェル構造が形成されることを見いだした。この量子力学的計算結果の物理的解釈を得る目的で、非可積分ハミルトン力学系に対する半古典論 (経路積分の半古典近似により導かれる Gutzwiller トレース公式とその拡張) およびスケール系に対するフーリエ変換の技巧を用いて、周期軌道の性質の表面変形への依存性を解析した。その結果、8重極変形の成長と (対称軸に垂直な平面上の) 2次元周期軌道の安定性と分岐の性質の間に関連があることが分かった。この結果は、8重極変形の安定性と非対称核分裂やクラスター形成の間に何らかの関係があることを示唆している。

#### 超変形回転バンドの回転減衰 [吉田、松尾]

Dy 領域における超変形核の回転減衰について解析を行い、殻効果の有限温度での影響を分析した。回転減衰とは回転座標系でのハミルトニアンが Coriolis 力などのために回転角速度依存性を持つために、剛体回転的なスペクトル列 (回転バンド) に従う E2 遷移の相関が失われる現象である。超変形核では1粒子準位の殻構造のため、準位密度が低くなり、回転減衰は起こりにくいと考えられる。解析の結果、回転減衰のおこるエネルギーや、回転バンド数に殻効果は反映され、殻効果が強いほど、すなわち、準位密度が低いほど、高いエネルギーで減衰が起こり、バンド数は多いことを見出した。核種によってそれらに格差があるのも超変形核の特徴である。しかも、準位密度が低くてもバンド数は通常変形核とほぼ同数になる場合もあることがわかった。これらの振る舞いを、統計的解析から、模式的な準位密度のモデルを用いて定性的に説明した。また、準位密度をより詳細に分析し、有限温度での殻効果と回転減衰の関係を考察した。

## 2) AMDによる軽イオン反応の研究

[1]  $\Delta$  共鳴領域での  $(p, p'x)$  反応の研究 (Engel・田中・丸山・小野・堀内)

AMD を 1 GeV/u 程度までの反応にも適用可能にするために、 $\Delta(1232)$  の自由度を導入する拡張を行い、800 MeV/u での  $^{12}\text{C}(p, p'x)$  反応を調べた。準弾性ピーク  $-\Delta$  ピークの比や絶対値が再現され、 $\Delta$  のダイナミクスが正しく取り扱われていることが示された。計算結果を 1-ステップのモンテカルロ計算と比較し、多段階散乱過程の影響について議論した。

[2] 連続状態への中間エネルギー  $(p, p'x)$  反応の研究 (田中・小野・堀内・丸山・Engel)

$p+^{12}\text{C}$  (90 MeV/u, 200 MeV/u) 反応と  $p+^{58}\text{Ni}$  (120 MeV/u) 反応の数値計算を行い、直接過程、前平衡過程、複合核過程を統一的に研究した。微分断面積に対する 1-, 2-, 3-ステップの寄与について詳しく分析した結果、二核子衝突断面積依存性は微分断面積には敏感に反映されないが、反応断面積等には明かな差が現れること、その理由が解明された。

[3] フラグメント生成の研究 (降旗\*・岩井\*・小野・堀内) \* 三菱総合研究所

10 ~ 250 MeV/u の  $p+^{12}\text{C}$  及び  $\alpha+^{12}\text{C}$  反応についてフラグメント生成過程を調べた。二核子衝突断面積への依存性や前述の AMD の統計的性質の改良などについて検討中。

## 3) AMDによる核構造の研究

[1] 中性子過剰核の研究

i) Li 及び Be isotopes の研究 (延与・堀内・小野)

昨年度までに実験値の再現が示されていた Li と Be の isotopes の電気的磁気的性質について、特に Li の場合の中性子数依存性について、その原因がクラスター構造の消長という構造変化と関連づけて理解できることを示した。

ii) B isotopes の研究 (延与・堀内)

電気的磁気的性質の中性子数依存性の原因が、Li と同様にクラスター構造の消長にあることを示した。更に Li と B との間の違いについても理解を与えた。

iii) C isotopes その他の研究 (延与・堀内)

Li, Be, B とは異なってほとんどの isotopes で目立ったクラスター構造は現れない。ドリップライン近傍ではオプレート変形が発達し中性子スキンから形成されるという結果を得た。又更に、 $4 \leq Z < N < 30$  の領域についても研究を進めた。

[2]  $^{20}\text{Ne}$  の研究 (延与・堀内)

AMD 波動関数の重ね合わせによるクラスター間相対運動記述の改善、クラスターのくずれの度合とスピン・軌道力の強さの関係の分析など新しい成果を加えて論文にまとめた。

## ◎ 集団運動セミナー

【参加者】松柳研一, 在田謙一郎, 吉田光次, 松尾正之,\* 相場浩和,\*\* 中務 孝†

(\* 基研, \*\* 光華女短大, †RCNP→Chalkriver 研究所)

集団運動グループでは、「集団運動の非線型動力学」および「高スピン状態における核構造」を中心課題として研究活動を行っている。

高スピン核分光学は、新世代  $\gamma$  線測定器が欧米で本格的に稼働し始め、実験の方面では飛躍的發展を遂げ、従来、我々がその重要性に着目し予想していた超変形バンド間の八重極相関を示すデータも得られたことで、我々のグループは大いに活気づいている。同時に、これまでよりも定量的な理論的解析が要求されており、相転移領域の対相関などを統一的に扱う包括的な理論の開発も考える。

また、高スピン有限温度領域についての研究を進め、通常変形、超変形状態の原子核に対して系統的な解析を行った。そこでは、非イラストで回転バンド構造が消滅する機構において殻構造が重要な役割を果たし、超変形状態での準位密度、離散的バンド数などの有限温度的性質に、核種による大きな差があることを明らかにした。実験においても、揺らぎ解析という統計的解析方法が開発され、準連続  $\gamma$  線の解析に力を発揮している。この方法による実験データの解析には、我々の中からも理論計算を介した物理量の抽出に理論家として参加している。これに象徴される理論・実験の緊密な関係は、核分光新時代における新しいスタイルとして、集団運動グループのひとつの研究姿勢になっている。

一方では、大変形の実現に重要な役割を果たす、一粒子スペクトルの殻構造の形成機構を、半古典論による量子 - 古典対応から理解する研究も成果を挙げている。特に、八重極変形を加えた非可積分系の解析から、古典周期軌道の分岐との密接な関係を明らかにした。有限量子多体系の形を量子論、古典論両面から理解する目的から始めた研究は、量子カオスという新しい問題と量子力学の再認識という分野を越えたテーマを含み、今後も発展が期待されている。また、同じく殻構造が本質的な役割を果たすマイクロクラスターにも関心を持っており、ますます研究対象が広がっていくものと思われる。

以上のように、集団運動グループでは、超変形バンドなど、現象に密着した研究と、その礎である殻構造を探る有限量子多体系の理論の本質に迫る研究が、並行して、互いに影響し合いながら、発展を続けている。

以下に、当教室メンバーによる今年度の研究成果を紹介する；

#### 周期軌道理論による殻構造形成機構の解析 [在田・松柳]

軸対称調和振動子に反転非対称な八重極変形ポテンシャルを加えた非可積分模型を用い、変形の微視的要因として重要な意味を持つ殻構造が、非可積分系、特にカオスの運動と正則な運動とが同一エネルギー面上に混在したいわゆる『混合系』に於て形成されるしくみを、半古典論により周期軌道の性質との関連から調べました。可積分な調和振動子に八重極変形を加えると、安定周期軌道の分岐等により新しいトポロジーを持った軌道が次々と生まれ、それに伴って相空間の構造が複雑化していきます。このような古典相空間の構造変化と量子スペクトルの性質の対応を四重極変形と八重極変形とを変化させた二次元パラメータ空間上で系統的に解析しました。一粒子エネルギー準位の大域的な揺らぎである殻構造は比較的短い周期軌道の性質により記述されますが、特に周期軌道の分岐領域で殻効果の著しい成長が一般的に見られることが我々の解析により明らかになりました。特に、有限八重極変形度に於て非常に強い殻効果を呈する領域が存在することが分かりましたが、この顕著な殻構造が、最も短い古典軌道の分岐現象と密接な関係を有することを、古典軌道の安定性と準位密度のフーリエ変換との比較から明らかにしました。

#### 超変形回転バンドの回転減衰 [吉田・松尾]

回転原子核における回転減衰とは回転座標系でのハミルトニアンが Colioris 力などのために回転角速度依存性を持つために、剛体回転的なスペクトル列(回転バンド)に従う E2 遷移の相関が失われる現象である。この現象は非イラストの準位密度の高くなる領域で起こり、E2 $\gamma$  線スペクトルを特徴づけ、回転減衰のエネルギーしきい値は、存在する回転バンドの励起エネルギーの上限を与える。また、一粒子準位 - 準位密度 - 回転減衰の密接な関係より、イラスト状態(基底状態)の性質が反映され、この非イラスト準連続状態の実験データから、基底状態の情報を知ることでもできる。こういった理論・実験の協力による準連続 $\gamma$ 線の解析は、高スピン分光学における新しい手法として期待されている。

超変形核では、現状の測定器では離散的 $\gamma$ 線による解析に限界があり、このような準連続 $\gamma$ 線の解析は有用な手段である。我々は、Dy領域の超変形バンドに対して、回転殻模型に残留相互作用を取り入れた模型を用いて解析を行った。その結果、通常変形核(ND)では見られない特徴を見出した。殻効果によって準位密度が非常に小さいため、NDに比べて高い励起エネルギーで減衰が起き、それ以下の励起エネルギーにある離散的回転バンド数も多い、という結果を得た。しかも、SD間で大きな格差が生ずることもわかった。この結果について、統計的な準位密度の表式を用いてバンド数の評価を行い、定量的にも consistent な結果であることを確認した。

SDでは唯一存在する、 $^{143}\text{Eu}$ のバンド数の実験データと比較してみると、Fission や barrier penetration による影響のないスピン領域で、実験値とほぼ一致をした。この理論計算の結果は $^{143}\text{Eu}$ がSDの中では開殻的な一粒子配位をしていることを示しており、実験との一致によって、このことを裏付けるひとつの根拠を得たと考える。

#### 超変形核の励起バンド [中務・松柳・水鳥・Nazarewicz]

最近、超変形状態における2重閉殻核 $^{152}\text{Dy}$ に5個の励起バンドが発見された。我々は回転系シェル・モデルに基づくRPA計算により、観測された動力学的慣性モーメントの異常な振る舞いの原因を分析し、これらの性質が八重極相関の影響として理解できることを示した。更に、今年度後半、新しく稼働を始めた $\gamma$ 線多重測定器システム(Eurogam II)により、もう1つの超変形2重閉殻核 $^{190}\text{Hg}$ でも、励起バンドが発見された。我々は早速、このデータに対する理論的分析を行い、これが超変形状態の上にソフト八重極振動モードが励起された回転バンドと解釈できることを示した。

◎集団運動セミナー

松柳研一, 中務 孝, 在田謙一郎, 吉田光次,  
松尾正之,<sup>\*</sup> 相場浩和,<sup>\*\*</sup> 水鳥正二郎<sup>\*\*\*</sup>) (\*基研, \*\*光華女短大, \*\*\*RCNP→Lund 大)

集団運動グループでは、「集団運動の非線型動力学」および「高スピン状態における核構造」を二つの中心課題として研究活動を行なっています。高スピン超変形状態に関しては、近年の著しい実験技術の革新により多くの原子核で多数の超変形回転バンドが観測されつつあり、実験と理論との協力によって解析を進めていけるという待ち望んでいた状況が到来しています。我々は特に、超変形状態の殻構造の性質から予想される八重極相関の重要性に着目して回転系での RPA による解析を行なっており、今年には八重極集団励起状態として解釈可能なバンドを初めて同定することに成功しました。同じ手法を用いて通常変形核や不安定核における八重極相関の役割についても解析を進めており、種々の興味深い結果を得ています。また近年、超変形状態の上の励起状態に関するデータも得られるようになり、こうした状況に対処すべく有限温度かつ超変形状態における集団運動の性質、特に回転運動の減衰に関する研究を基研の松尾氏の協力を得て開始しました。超変形核はその見事な回転バンドを特色としていますが、イラスト線から離れるに従ってバンド混合が顕著になり、これらのバンドとしての個性が失われていく「回転減衰」と呼ばれる機構が現れてきます。同時に、超変形状態では励起エネルギーの増大とともに通常変形状態へのトンネル崩壊も重要になり、これら二種のバンド消失機構が角運動量と励起エネルギーの関数としてどのような相互関係にあるのかを、微視的な模型を用いて調べています。一方、巨大変形状態の形成に重要な影響を与えている一粒子スペクトルの殻構造の性質を理解する目的で昨年度より始めた半古典的な解析も大きく進展し、特に共鳴軌道(古典周期軌道の分岐)が一粒子スペクトルの性質に与える影響について興味深い結果が得られました。この結果は非可積分系における量子古典対応や量子カオスの問題とも結び付きを持ち、さらに原子核衝突における分子共鳴や、非対称核分裂、マイクロクラスターといった、有限量子系の形が関与する様々な現象に応用できる問題です。この様に集団運動グループはその研究対象を新しい領域へと広げてきています。

以下に、当教室メンバーによる今年度の研究成果を紹介します;

1) 巨大変形核における集団励起とモード結合 [中務・松柳・水鳥]

回転の効果を実験的に取り込んだ「回転系における殻模型」をもとに、乱雑位相近似、及び粒子・振動結合を用いた解析を行なっている。本年度は主に、Daresbury 研究所(U.K.)の実験グループと連絡を取りながら、超変形<sup>152</sup>Dy の励起バンドに関する最新のデータの理論的解析を実行した。これは、大型γ線測定器(EUROGAM)を用いた実験で、新たに発見されたバンドであり、二重閉殻配位上に初めて励起超変形バンドが見つかった例として、重要なデータである。我々の解析は、観測されたデータが、集団励起効果の現れとして自然に理解できることを示した。

2) 陽子過剰 Zr 領域核の素励起モード [中務・松柳・浜本(Lund 大)・Nazarewicz(ORNL)]

現在、不安定核ビームを用いた実験が世界的に盛んになってきていることから、今後の実験に対する提言として、<sup>76</sup>Sr 周辺の領域における低励起の M1・E3 励起モードを予言することを目的として本研究を開始した。 $N \approx Z$  の良く変形した核において、非常に強い M1 状態が予言され、一方で、これまで集団的な状態と考えられてきた E3 状態は、非常に集団性が弱いことが分かった。また、これらの集団性を観測することで、この不安定核領域での対相関の強さに関する情報が得られることを示唆した。

### 3) 巨大変形核の殻構造とその半古典的解析 [在田・松柳]

#### i) 超変形核の八重極不安定性とスーパーシェル構造

軸対称 2:1 変形調和振動子に  $Y_{30}$  型八重極変形を加えるとエネルギースペクトルにスーパーシェルの様相の顕在化が見られる。エネルギー準位密度の半古典論によると、スペクトルの揺らぎは古典系の周期軌道とその安定性により表されることが知られており (Gutzwiller トレース公式)、スーパーシェル構造は複数の異なる周期をもった周期軌道間の干渉によるうなりの効果として説明される。また、個々の周期軌道の準位密度に対する寄与の大きさは、その安定性と関係している。我々は 2:1 変形調和振動子に八重極変形ポテンシャルを加えた模型を用いて量子古典対応の解析を行なった。古典系は八重極変形とともにカオス的な様相を示してくるが、これにより古典軌道の安定性が変化し、それらの量子スペクトルに与える干渉効果が強まることによってスーパーシェル構造が発達してくることが明らかになった。

#### ii) 非可積分系における殻構造の形成と古典周期軌道の分岐

次に同じ模型で軸比が非整数の場合 ( $\sqrt{3}:1$  変形) について考察を行った。この場合は八重極変形のないとき、可積分ではあるが、軸対称性による縮退を除きレベルは一様に分布しており殻構造は見られない。しかし八重極変形を加えていくと、ある八重極変形度の近傍において顕著な殻構造が出現するのが見られる。古典周期軌道を調べた結果、この八重極変形度の付近でいくつかの単純な周期軌道に分岐が見られ、これらの寄与が著しく増大していることが分かった。この結果は、非可積分系における殻構造の形成機構の一つとして共鳴軌道 (周期軌道の分岐) の果たす役割の重要性を示唆するものと考えられる。

### 4) 超変形回転バンドの消失機構 [吉田・松尾]

原子核の有限温度での性質のひとつとして、回転運動の減衰がある。回転原子核の非イラスト領域では、残留相互作用の効果で「バンド」を特徴づける近似的な量子数が存在しないことがこれまでの研究で分かっている。今回、超変形核という、特殊ではあるが、最も典型的な回転核としての性質を示す系でこの現象を考察した。超変形核には、通常の変形核とは異なる点がある。定性的には、超変形状態から通常変形状態への崩壊があり、回転減衰とともに回転バンドの消失の要素になっている。この現象は、トンネル効果として取り扱う清水氏 (九大) の方法を拡張し、そのスピン、励起エネルギー依存性を考察した。定量的な違いとしては、通常変形核に比べて超変形核では準位密度が非常に小さいことが挙げられる。これは一粒子準位のフェルミ面での大きなギャップによるものである。この結果、超変形核では、回転減衰の始まりが通常変形核に比べて高い励起エネルギーで起こることが予想される。今回の研究で、準位間隔と残留相互作用の平均的な強さとの比較、微視的計算による  $E2$  遷移強度の分岐の考察のいずれからでも、そのエネルギーは 2.5~3.5 MeV で、通常変形核で知られている約 1 MeV という値に比べて高いことが確認された。以上の通常変形状態への崩壊、超変形状態内での回転減衰という、二つの超変形バンドの消失機構の関係をスピン、励起エネルギーの関数として示した。低スピンではトンネル崩壊が重要だが、高スピンでは回転減衰が重要である領域が存在することを示唆する結果が得られた。

## 原子核理論研究室 '92年度活動報告

◎集団運動セミナー

松柳研一, 中務孝, 在田謙一郎, 津江保彦,  
松尾正之<sup>\*</sup>, 相場浩和<sup>\*\*</sup>, 山田和也<sup>\*</sup>, 福井隆裕<sup>\*\*\*</sup> (\*基研, \*\*光華女短大, \*\*\*阪大核物理センター)

我々のグループでは, 原子核の「高スピン状態」, 「集団運動の非線型動力学」の二つを中心課題として研究を行っている。高スピン状態に関しては, 超変形核における八重極相関についての研究がここ数年の我々の特徴となっており, また本年度から超変形核の八重極変形に対する不安定性に題材をとって, 殻構造の半古典的手法を用いた研究を開始した。非線型動力学では, 自己無撞着集団座標法による転移領域核の四重極集団励起の記述 (山田), 有限温度領域における回転運動の減衰メカニズム (松尾) について著しい進展があったが, ここでは紹介を割愛する。当教室メンバーによる今年度の主要な研究成果は以下の通り;

1) 超変形核および不安定核における八重極相関 (中務・水島 [東大核研]・松柳)

## i) 超変形核

巨大変形状態のフロンティアである超変形状態における殻構造の顕著な特徴のひとつとしてソフトな八重極振動の存在を予言し, その性質を回転座標系での RPA を用いて解析している。本年度は, 準粒子-振動結合を取り扱えるよう計算コードを拡張し, 特に  $^{193}\text{Hg}$  における Landau-Zener 交差現象の理解に振動励起と準粒子励起の結合効果が重要であることを示した。

ii)  $A \approx 80$  領域の不安定核

理論的に八重極相関が強いと期待される原子核は不安定核が多く, 不安定核ビームによる実験, 及び測定器システムの進歩により新たな八重極変形領域が発見される可能性も高いと思われる。今年度10月に W. Nazarewicz が当教室に滞在したことを契機に中務が中心となり, これらの不安定核の八重極相関の研究を開始した。

2) 回転非対称な超変形核のスーパーシェル構造とその半古典的解析 (在田・松柳)

軸比 2:1 変形調和振動子ポテンシャルの閉殻配位が, 八重極 ( $Y_{30}$ ) 変形に対して, 偶数番目の主殻まで占有した状態は安定であるが奇数番目までのものは不安定になるという顕著な性質を有することを, Strutinsky 法による殻構造エネルギーの計算により明らかにした。変形核の殻構造にはスーパーシェルと呼ばれるうなりの構造がみられるが, 我々は八重極変形を加えることによりスーパーシェルの性質が顕在化し, これが八重極変形に対する不安定性に上記の偶奇効果をもたらしていることを見出した。さらに半古典的手法を用い, このスーパーシェル構造が八重極変形による古典周期軌道の性質の変化から理解できることを示した。

我々のグループも参加して1988年より始まった, 高速回転する原子核の構造に関する東大核研と Niels-Bohr 研究所との国際共同研究プロジェクトが終了し, その総括として11月に核研で国際シンポジウム "Rapidly Rotating Nuclei 1992" が開催された。国外では EUROGAM, GAMMASPHARE といった新世代の  $\gamma$ 線測定器を用いた実験が始動して, 超変形状態に関する素晴らしいデータを出し始めており, 我々のグループでは中務がこのデータに一早く対応して解析を進行中である。

## ◎集団運動論セミナー

教室内：在田 (M2)、中務 (D1)、福井 (D3)、松柳 (AP)

教室外：相場 [RCNP]、山田 [YITP]

「高スピン状態 (高速回転する原子核の構造)」および「集団運動の非線形動力学」を2つの柱として研究している。前者では核研 - Niels Bohr 研国際共同研究プロジェクトを通じ、後者では基研の長期研究計画を通じて学外の研究者と交流している。今年度、当教室メンバーが行った主な仕事は以下のとおりである。

### 1) 高スピン状態

高スピン巨大変形核におけるモード・モード結合 (中務、水鳥[INS]、松柳)

昨年我々は、長軸：短軸  $\approx 2:1$  に変形した原子核における殻構造は球形近傍のものとは大きく違い、このような超変形状態は空間反転対称性を破る八重極変形に関して非常にソフトであることを示した。今年度はこの仕事の継続として最近の実験データからも示唆されている八重極振動モードと1粒子モードとの結合効果を調和振動子ポテンシャルでの計算 (RPA + 粒子 - 振動結合) によって考察した。その結果として超変形 Open-shell 核では対相関と八重極相関により  $K=1(Y_{31})$  の振動モードのエネルギーが著しく下がり、準粒子モードとの結合が非常に強くなることが分かった。この事実は超変形回転バンドの生成、崩壊や E1 遷移に大きな影響を与えられ、現在これらも含めて現実的な計算を実行中である。

超変形核の動力学的対称性と八重極不安定性 (在田、松柳)

軸比  $2:1$  に変形した調和振動子ポテンシャルでの一粒子スペクトルが示す殻構造は独特な動力学的対称性をもち球形の場合と比べてその性質に顕著な差がみられる。この殻構造の特質と八重極変形に対する不安定性との関係を見るため、Strutinsky 法を用いて殻構造エネルギーの振舞いを八重極変形度および粒子数の関数として調べている。

### 2) 集団運動の非線形動力学

変形共存現象とレベル交差問題 (福井、松尾[YITP]、松柳)

昨年度定式化した diabatic 表示に基づく coupled configuration selfconsistent collective coordinate の方法 (CCSCC 法) を用いて Sn アイソトープの励起変形  $0^+$  状態の構造を分析してきたがこの過程で2~3の問題点に直面し、現在「一時停止」している。

Berry の位相に対する動力学的効果 (福井、津江)

Berry の位相を導出する際、通常断熱近似を仮定するが、我々は一般化されたコヒーレント状態を用いた変分法的取扱いを行うことによって、断熱近似を用いることなしに Berry の位相を議論した。その結果動力学的効果を含んだ位相を導出する事ができ、これが断熱的極限で Berry の位相を再現する事を示した。

チャンネル結合系における WKB 法において Berry の位相とともに現われるもう一つの位相について (福井)

かつて矢花と堀内によりチャンネル結合系に対する WKB 法において、 $\hbar$  のオーダーで Berry の位相と同時にもう一つの位相が現われる事が示された。我々は一般化されたコヒーレント状態を用いた経路積分法を用いることによって、鞍点法によって得られる古典解 (この解によって上に述べた動力学的効果を含んだ Berry の位相が与えられる) に対して量子力学的揺らぎを取り込んだ有効作用を導出し、これが断熱的極限で矢花と堀内のもう一つの位相と一致する事を示した。

集団運動セミナー

{松柳、水鳥、福井、中務、松尾<sup>\*</sup>、山田<sup>\*</sup>、相場、<sup>\*\*</sup>}  
<sup>\*</sup> 基研、<sup>\*\*</sup> RCNP

1988年より「高速回転する原子核の構造」に関する核研とニールス・ボーア研究所との国際共同研究プロジェクトが始まった。また、同年より基研での長期研究計画「原子核集団運動の非線形動力学」を開始して今年で3年目になる。私達はこれらの長期研究プロジェクトの一部として個々の研究テーマを位置づけてきた。前者ではガンマ線分光学を中心とする実験的研究との協力を重視し、この中からでてきた基礎的・理論的課題については後者の研究計画のなかで掘り下げることを目指している。

今年度、当教室メンバーが行った主な仕事：

- 1) 巨大変形核 (superdeformed nuclei) におけるソフトな八重極振動モード  
 (水鳥、清水、松柳) <sup>\*</sup> 九州大

新しく発見されたHg領域の巨大変形核では高スピン状態でも対相関が重要な役割を果たしている為に、(量子数 $K=0$ だけでなく)  $K=1$ および $K=2$ をもつ非常に集団性の高い八重極振動モードが存在しうることを理論的に示唆した(水鳥報告参照)。

- 2) 変形共存現象とレベル交差問題 (福井、松尾、松柳) <sup>\*</sup> 基研

自己無撞着ポテンシャルの2つの極小点に対応する異なった非断熱配位間の動的結合を取り扱うための新しい理論的アプローチを提案し、これに基づき、閉殻核であるSnやPbの励起変形状態と球形状態の相互作用の性質を微視的に分析している。

今年10月に「原子核の集団ダイナミクスにおける新しい研究動向」をテーマとする第5回西宮湯川理論物理学シンポジウムが開催され、私達も研究活動の重要な一環として取り組んだ。このシンポジウムは、「有限量子系における集団運動(秩序運動)と熱的運動(カオス運動)の共存と移行」を統一的に理解する事を目標に掲げて新しい問題意識をもって企画された。私達はこの方向を意識しながら、当セミナーで議論する具体的テーマを選んでいる。

## I. 集団運動の非線型動力学

## a. 変形共存現象と準位交差問題 ( 福井、松尾、松柳 )

・ 変形共存現象の微視的理解を目的として、(通常の断熱近似を仮定しない)diabatic 描像にもとづく集団運動の理論を開発した。更に変形共存現象に対するいくつかの schematic な模型を考案し、上記の理論及び従来の断熱近似を適用、模型の正確な解 (スペクトルなど) と比較した。前者によると2つの異なった変形状態を記述することが可能であるが、後者では1つの変形状態のみしか記述できないことを示した。この結果をもとに Pb、Sn アイソトープに対する現実的な計算を実行中である。

## b. 転移領域核の非調和運動の微視的理論 ( 相場、松柳 )

- ・ Ru、Pd、Ge、Se アイソープの低励起非調和スペクトルの微視的理解を目的としている。本年度は Ru アイソープに対して SCC 法に基づく現実的な計算を行ったが、その結果  $0_2^+$  状態の中性子数依存性を再現することができた。この仕事を通じて非集団自由度とのモード・モード結合の中で対相関振動の果たす役割が重要であること、及びこの結合の度合は一粒子準位の subshell 構造に敏感であることを指摘した。

## II. 高スピン核模型

## a. 超変形状態からの素励起モード ( 水鳥、清水\*\*\*、松柳 ) \*\*\* 九州大

- ・ 素励起モードの変形度、角速度依存性を解明する事を目的として、超変形回転バンドの上に形成されるアイソスカラー E0、E2、E3、アイソベクトル E1、E2 モードの性質を系統的に分析した。その結果<sup>152</sup>Dy に低励起 E3 モードが存在することを示唆する結果を得た。実際にどのようにこのモードが観測され得るかについて電磁遷移強度等を計算している。

## b. 高スピン状態の静的及び動的な非軸対称変形 ( 松崎\*\*\*\*、松柳 ) \*\*\*\* 筑波大

## c. クランキング模型の3次元回転への拡張 ( 清水\*\*\*、松柳 )

## c. 回転系殻模型における diabatic 表示の理論 ( 清水\*\*\*、松柳 )

## I. 集団運動の非線型動力学

## a. 転移領域核の非調和振動の微視的理論

- ・縮退 many j-shell 模型の場合にボソン展開法と自己無撞着集団座標法 (SCC法) を比較することにより、松尾-松柳による SCC法の量子化処方の妥当性を検討するとともに、モード・モード結合効果の分析を行なった。(相場、松柳)
- ・Ru 領域や Se 領域の低励起非調和スペクトルに対する SCC法に基づく現実的な計算の結果が出始めた。(相場、松尾\*、松柳) (\*理化学研究所)

## b. 変形共存現象とレベル交差問題

- ・(通常の断熱近似を仮定しない) diabatic 描象に基づく集団運動の理論を開発することにより変形共存現象を理解することを目指して、今年は coupled  $O(4)$  模型の場合にレベル交差問題を分析した。(福井、松尾\*、松柳)

## II. 高スピン核構造

## a. 超変形回転バンドの殻構造

- ・クランキング模型と Strutinsky 法に基づいて超変形回転バンドの動力的慣性能率を計算し、これらの内部構造と殻構造を分析した。(水鳥)

## b. 超変形状態からの素励起モード

- ・超変形回転バンドの上に形成されるアイソスカラー  $E_0, E_2, E_3$ 、アイソベクトル  $E_1, E_2$  モードの性質を系統的に分析することを目指して、今年は  $E_1$  巨大共鳴に対する初歩的計算を遂行するとともに八重極振動モードについて計算コードを開発中である。

(水鳥、清水\*\*、松柳) (\*\*九州大学)

## c. 高スピン状態の静的及び動的非軸対称変形 (松崎\*\*\*、清水\*\*、松柳)(\*\*\*原子力研究所)

## d. クランキング模型の3次元回転への拡張 (清水\*\*、松柳)

## e. 回転系殻模型における diabatic 表示の理論 (清水\*\*、松柳)

(c.d.e. に関してはそれぞれ、松崎、清水両氏が中心になって仕事を進めている。)

集団運動セミナー [松柳、松崎、相場、水鳥、山口、福井、飯田] (・RCNP)

I. 高スピン殻構造

(1) 高スピン領域での非軸対称変形のDynamics (松崎、清水<sup>・</sup>、松柳) (<sup>・</sup>九大)

近年実験データが得られ始めた、 $N = 90$ 領域のOdd-A核の高スピン状態の電磁遷移確率を系統的に分析し、静的並びに動的な非軸対称変形(ガンマ変形)が $B(E2)$ や $B(M1)$ のシグネチャー依存性にどのような効果を与えるかを明らかにした。いくつかの理論的予想を与えておいたので、今後の実験的研究によってチェックされることが望まれる。この仕事を通じて回転座標系における準粒子-振動結合を取り扱う微視的モデルの発展がはかられた。

(2) 超変形回転バンドの殻構造 (水鳥、松柳)

昨年発見された $152Dy$ の超変形回転バンドの殻構造を分析した。この仕事は、今後超変形回転バンドの微視的構造の研究はもとより、その上に形成される素励起モードの研究に発展させることを目標としている。

II. 集団運動の非線型動力学

(1) レベル交差と量子断熱位相 (倉辻<sup>・</sup>、飯田<sup>・</sup>) (<sup>・</sup>立命)

量子断熱位相(Berry phase)が動力学的過程にどのような役割を果たすかを具体的にみるために、粒子-回転結合モデルにおけるレベル交差現象を分析している。また、量子断熱位相を伴う量子力学系が、特殊な場合として超対称性を持つ量子力学系を含むことを指摘した。

(2) 自己無撞着集団座標の方法(SCC法)の四重極振動への適用 (相場、松柳)

SCC法の転移領域核現象への適用を目指して、そのために必要な準備として、ボゾン展開法との関係の分析、量子化処方の改良などを行なった。

集団運動セミナー [松柳, 松尾, 松崎, 相場, 山口, (倉辻\*, 飯田\*\*)] \* 立命\*\* RCNP

(I) 高スピン核構造 (松崎, 松柳)

回転系での殻模型に基いて高スピンイラスト領域での独立粒子励起モードと集団励起モードの相互作用の研究をおこなっている。今年度は、準粒子-ガンマ振動結合を含むように理論を拡張し、非軸対称変形のダイナミックスが奇核の高スピン状態の電磁遷移の性質に及ぼす効果を分析した。

(松崎, 清水\*\*\*, 松柳)\*\*\*九大

(II) 大振幅集団運動 (松尾, 相場, 飯田\*, 松柳)

自己無撞着集団座標 (SCC) 法に基いた、四重極非線形振動モードの微視的記述や集団部分空間構成法の理論的分析をおこなっている。今年度は、

◦ 稀土類変形核での非調和ガンマ振動の微視的構造の系統的分析

上記に関連して

(松尾, 松柳)

◦ 非調和効果の有効相互作用依存性の分析 (松尾, 松柳)

◦ single  $j$  shell model の場合での SCC 法とボソン展開法の関係、量子化処方の妥当性などのテスト (相場, 松尾, 松柳)

◦ ガンマ振動に伴う十六重極強度の分析 (松尾)

◦ ユニタリ-変換の展開法による量子-古典対応の  $SU(2)$  スピン系の場合での分析 (飯田\*\*)

を行った。

(III) 量子論的平均場理論 (倉辻\*, 飯田\*\*)

内部-集団自由度結合系でのレベル交差に由来する量子断熱位相による dynamical な効果、および、その topological な様相について研究をおこなっている。

◦ single  $j$  粒子-回転結合模型で、量子断熱位相が量子スペクトルに及ぼす効果などを調べクランキング模型への量子補正を検討している。

(倉辻\*, 飯田\*\*)

◦ 量子断熱位相の局所的な表われとして系の位相空間の symplectic 構造が変更を受ける結果、量子系の交換関係が変更を受けることを示した。

(倉辻\*, 飯田\*\*)

◦ 更に、これを場の理論に拡張し、chiral gauge theory における commutator anomaly がこの具体例になっていることを示した。

(倉辻\*, 飯田\*\*)

原子核理論グループ 1985年度活動報告

集団運動セミナー [松柳、安藤、清水、飯田、初田、松尾、松崎、相場、倉辻\*、西崎\*\*] \*立命館, \*\*RCNP

I. 高スピン核構造 (松柳、清水、松崎)

Rotating Shell Model に基いて高スピンの独立粒子励起及び集団励起状態の研究を行なっている。

- 奇核高スピン状態の電磁遷移への非軸対称変形の効果を分析している。(松崎、清水、松柳)
- 自己無撞着集団座標 (SCC) 法に基いて非断熱表示の構成法を開発し、慣性率や alignment の角速度依存性の評価を行なった。(清水、松柳)
- 非軸対称変形核での wobbling modes の解析的性質を調べた。(清水)
- pairing 相転移領域での対振動モードのソフト化に伴う基底状態相関エネルギーの評価を行なっている。(清水)
- 高スピンの電気単極及び四重極共鳴 (アイソスカラー型及びアイソベクトル型) に対する角運動量の効果の分析を行なった。(清水、松柳)

II. 大振幅集団運動・量子論的平均場理論 (松柳、飯田、松尾、相場、倉辻)

SCC法を用いた低励起四重極運動の微視的記述、集団部分空間構成法の理論的分析及び内部-集団自由度結合系でのレベル交差に由来する断熱位相因子の topological な側面について研究を行なっている。

- SCC法に基いて非調和 $\gamma$ 振動の動力学的非調和性の分析を行なった。(松尾、松柳)
- 対回転モードとの結合を取り扱うようにSCC法を拡張した。(松尾)
- SCC法の遷移領域核への適用を開始した。(相場、松柳)
- 古典論と量子論との対応関係の考察を行なっている。(飯田)
- 単純化した粒子-回転子模型における断熱位相因子の効果を分析した。(倉辻、飯田)
- 電磁場中の電子系に対する量子断熱位相の適用により、量子ホール効果を説明した。(倉辻)

III. 相対論的アプローチ (西崎、(鈴木敏男\*\*\*、倉沢\*\*\*)) \*\*\* 基研

$\sigma, \omega$  を考慮した相対論的ハートリー法によって高エネルギー準弾性電子散乱 ( $N = Z$  核) の分析を行なった。NキZ核まで対象を拡げて、RPAでの相関を含んだ取り扱いをめぐっている。

B. 集団運動セミナー [松柳, 倉辻, 安藤, 清水, 飯田, 初田, 松尾, 松崎, (西崎\*)] \*基研

(I) 高スピン(High Spin)状態 (清水, 松崎, 松柳)

"Self consistent Rotating Shell Model + RPA" を理論的方法として, 高スピニラスト状態だけでなくその上に立つ集団励起モードの研究を進めている。粒子-振動結合も含むよう理論を拡張するとともに, 核構造上重要な電磁的性質の分析に着手した。

- H.S. イラストに立つ巨大共鳴( $\Delta T=0.1, \Delta I=0.2$ )の分析 (清水, 松柳)
- 奇核 H.S. 状態での E2-M1 遷移指標依存性の分析 (松崎, 清水, 松柳)

又, "回転系での殻模型" の描像に相応しい独立粒子軌道 (Diabatic basis) の微視的構成法を開発した。(清水, 松柳)。

(II) 大振幅集団運動 (飯田, 松尾, 松柳)

低励起集団状態に顕著な大振幅非線型運動を, 自己無撞着な集団部分空間を TDF 位相空間内に構成する方法により理解する試みを進めている。

- 集団部分空間構成法についての理論的分析 (飯田, 山村\*\*, 栗山\*\*) \*\*関西大
- 中重変形核での非調和的振動の記述 (松尾, 松柳)

又, この方法は(準)古典的であり, 再度"量子化"することが要求される。

- (準)古典論と量子論との対応関係の考察 (飯田及び松尾, 松柳)

その他に非集団自由度の考慮 (山村\*\*, 栗山\*\*, 飯田) なども行われた。

(III) 巨大共鳴状態 (西崎\*, 安藤)

巨大共鳴状態を微視的立場に立ちつつ巨視的に理解するための理論的枠組 (Fluid Dynamical Approach) をさらに拡張した。

- 変形核での Isoscalar 巨大共鳴 ( $\Delta I = 0, 2, \dots$ ) の記述

又, 相対論的 Hartree Model ( $\sigma$ - $\omega$  model) を拡張することにより, 高エネルギー領域での原子核の Dynamical な性質を調べる試みを進めている (鈴木\*, 倉沢\*, 西崎\*)。 \*基研

(IV) 量子論的平均場理論 (倉辻, 初田, 飯田)

"一般化されたコヒーレント状態による経路積分法" を Field として拡張し, その Topological な様相 (Topological Charge etc) を考察した。(倉辻, 初田)

内部自由度と外部(集団)自由度の結合した系において, レベル交差に由来する Topological な位相因子(波動関数の)が, 有効作用として出現し Dynamical な役割を果たすことを見出した。(倉辻, 飯田)

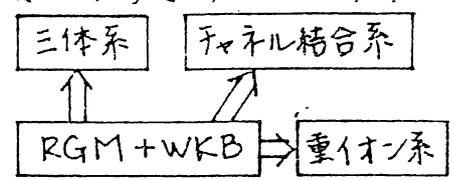
原子核理論グループ '83年度活動報告

[ ]内セミナー参加者 \* \*\*は在外

A. クラスターセミナー [玉垣, 塚内, 青木, 和田, 矢花, (山田\*)] \*阪大

I. 複合粒子間相互作用

共鳴群の方法(RGM)は複合粒子間相互作用を微視的に記述する枠組として非常に優れている。RGMにおいて核間の反対称化の結果生ずる複雑な非局所相互作用をWKB近似により局所化し、その性質を調べ局所ポテンシャル描像に対する理解を深めることが本研究の主要な目的である。本年度はこれまでの成果を基にこの方法をより広い範囲



- (i) 重イオン系 (<sup>16</sup>O-<sup>16</sup>O) (和田)
- (ii) 三体クラスター系 (青木)
- (iii) チャンネル結合系 (局所化の一般論, <sup>Li+α</sup>) (矢花 修士論文) (矢花, 塚内)
- (iv) 入射粒子質量数依存性; 有効核力依存性 (青木, 塚内)
- (v) 核子-核系の分析; 密度依存複素有効核力によるRGM (和田, 塚内)
- (vi) ボソンのハミルトニアンに対するWKB法とoperator ordering (塚内, 青木)

II. 高励起クラスター状態

高励起エネルギー領域においてクラスター状態がどのように出現するかは非常に興味深い。本年度は以下の事項について研究がなされた。

- (i) <sup>12</sup>C+<sup>α</sup>+<sup>α</sup> 三体直交条件模型による<sup>20</sup>Neの励起準位の研究 (塚内)
- (ii) 高励起クラスター状態の分散幅の計算 (塚内)
- (iii) 高スピンクラスター状態 (Yrast 近傍) (和田)

\* RIFP

B. 集団運動セミナー [松柳, 倉辻, 安藤, 清水, 飯田, 初田, 松尾 (鈴木\*, 倉沢\*, 西崎\*)]

I. 巨大共鳴 (Giant Resonance) 安藤, 西崎 - Nuclear Fluid Dynamics -

巨大共鳴の核流体力学的記述は微視的理論に足場を置きつつ柔の巨視的理論を可能にし、またG.Rの弾性的性質の重要性を明らかにしている。

- (i) 使用する有効相互作用の速度依存性の及ぶ影響の分析 (西崎, 安藤)
- (ii) フォノン型励起に対する Surface Symmetry Energy の評価 (西崎, 安藤)
- (iii) Spreading Width の記述 (2p-2h 状態との結合項の NFD による評価)
- (iv) 連続準位の NFD での記述 (→ Escaping Width の計算) (安藤)

II. 高スピン (High Spin) 清水, 松柳 - Rotating Shell Model -

高スピン状態の「回転座標系での殻模型」による記述は集団運動(回転)により変形した一休場から出発し、順次、残留相互作用を取り込む核物理の基本的処方の忠実な拡張であり他の方法に比べて回転の力学的効果を明確に議論できる。

- (i) Yrast に沿った核の形の変化の等方速度分布則に基づく自己無撞着計算

(ii)  $g$  (基底),  $S$  (2準粒子励起) 回転帯上の集団的  $\gamma$ -振動状態の RPA 計算

(iii) Pairing Phase Transition 機構の分析 (準粒子回転整列によるブロック効果)

### III. 大振幅集団運動 飯田, 松尾, 松柳 - 集団部分空間による記述 -

集団部分空間法は原子核の持つ自由度の中から、ごく少数の(集団)座標を系の力学に従って導出し、その中で非線形性の強い大振幅運動を記述する試みで、古典近似下における処方は明確になりつつある。本年度、実際の計算がなされ、適用可能性が分析され始めた事は注目に値する。(詳しくは松尾の修士論文参照)

(i) 集団部分空間決定の一意性及びモデル系での計算 (飯田, 山村<sup>\*\*</sup>, 栗山<sup>\*\*</sup>)

(ii) 変形核 ( $^{168}\text{Er}$ ) 非調和  $\gamma$  振動に対する適用 (松尾, 松柳) <sup>\*\*</sup> 関大

### IV. 量子的平均場とその準古典近似 倉辻, 初田

核物理の重要な概念である平均場の量子論的扱いを目指す倉辻による準古典量子化法は現在、定式化はほぼ完成し、実際の計算手法の開発が課題となっている。また本年度は初田と共にハドロン物理への展開が新しくなされた。(C-I-III)

(i) 準古典量子化における周期軌道の安定性とスペクトル形態の関連

(ii) 一般的なスケリングモードに対する準古典量子化の簡約 (倉辻)

(付) 上の項目別に記した話題には横断的な関係がある。例えば(IV)の準古典量子化に現れる安定指数は G-R の中 (I) や 集団部分空間の安定性(III)の問題と関連すると思われ、また(III)の処方のバンド交差(II)の分析への応用も試みられている。

## C. 高密度核物質セミナー [玉垣, 倉辻, 渡辺, 初田, (国広<sup>\*</sup>)] \* 龍谷大

### I. 原子核におけるクォーク自由度

(i) クォーク ALSF (Alternating Layer Spin Flavor) 構造 (玉垣, 渡辺, 巽<sup>\*\*</sup>)

・ 核子系 ALS 構造 } 中間状態  $\rightarrow$  Chiral Bag Model で記述 <sup>\*\*</sup> 山梨大  
クォーク物質

・ One Gluon Exchange の効果を検討 - ALSF 構造の安定性を導く

(ii) Self-Consistent Mean Field (SCMF) Theory for Nambu-Jona-Lasinio (NJL) Model

・ 真空の相転移 (normal  $\leftrightarrow$  super) を SCMF で定式化 (初田, 国広<sup>\*</sup>)

・ Asymptotic Freedom  $\leftrightarrow$  Chiral Symmetry Breaking の転移に適用

・ 系の soft 化に伴う damping mode を発見 (観測にかかる可能性を示唆)

(iii) Collective Motion of the Bag

- Semi-classical approach to the breathing mode - (初田, 倉辻)

・ Roper Resonance (e.g.  $N^*(1470)$ ,  $\Delta^*(1670)$ ) と Bag の Breathing mode としてとらえる。

・ Semi-classical quantization rule を量子化

### II. 高密度核物質と中性子星 <sup>\*\*\*</sup> 岩手大

(i) 荷電  $\pi$  凝縮による cooling の現実的計算 (巽<sup>\*\*</sup>, 玉垣) (国広, 高塚, 玉垣) <sup>\*\*\*</sup>

(ii)  $(N+\Delta)$  系に拡張した有効核力による対称 ( $N=Z$ ) 核物質での  $\pi$  凝縮  $\uparrow$