



九州大学 大学院理学研究院 物理学専攻 理論核物理研究室



題字：境祐二



九大核理メンバー(2009年7月)

Kyushu University

web : <http://www.nt.phys.kyushu-u.ac.jp/>

## 1. うちの自慢の研究室

昭和 41 年、丸森寿夫教授の九州大学着任と共に当研究室が発足しました。戦後の米軍ジェット機墜落に端を発する大学紛争にも怯まなかった、根性のある研究室です。その気概は、丸森研から理論核物理研究室へと移り変わった現在まで受け継がれ、九大核理論グループとしてその存在感を誇示し続けています。研究内容としては、狭義の核物理とハドロン物理を取り扱っており、九大核理の愛称で学内外から親しみを込めて呼ばれます。

研究室はスタッフ 3 名、大学院生 12 名、学部 4 年生 5 名で構成されており、文献紹介の時間にはもう数人のゲストメンバーが増えることとなります。セミナー室を兼ねたお茶部屋では、他愛無い話から研究内容まで、様々な話の花が咲きます。スタッフも含めたこの和やかな雰囲気は、九大核理の特徴のひとつです。特に院生はみな非常に仲が良く、しばしば無理な理由をこじつけては行きつけのお店でグラスを傾けます。九大周辺の飲食施設は非常に充実しており、九州自慢の美味しいものが揃っています。

研究活動はハドロン・核構造・核反応の 3 つのグループに分かれて行っています。入りたての M1 は最初に 3 つの分野それぞれの基礎的な事柄を学んだ後、専門分野および研究テーマを決定することとなります。M2 からは、のびのびと自分のペースで研究が行える環境が整っていると言えるでしょう。

研究活動以外の週間行事として、毎週金曜日は、午前中に文献紹介と研究室会議、午後には九大原子核セミナーが行われます。文献紹介では、**Physical Review** や **Nuclear Physics** といった核物理に関する学術雑誌から発表者の興味に従って論文の紹介がなされます。研究室メンバーからの“詰問”をかわすには、研究の背景から結果の考察まで詳細に調べることが必要です。また、発表は全体を通して英語で行われるため、準備にはかなりの時間を要します。負担は大きいですが自分の研究分野を知るのに非常に役立ちます。M1 は後期から発表を担当することになっており、10 月は M1 にとって最初の試練の月です。筆者は、M1 の頃、それはもうけちよんけちよんにやられました。九大原子核セミナーについては後述とします。

年間行事は非常に多く、例えば M1 を迎える新歓遠足では、毎年、九州・山口の各所を巡ります。今年(2009 年)は熊本の阿蘇近辺を訪れ動物たちと触れ合いました。九大内の他研究室との合同コンパも定期的に行われており、楽しいイベントには事欠きません。研究に関連ある行事としては、九州の核理論研究者が集い語らう九州・山口核理論懇談会などが行われています。院生が他大学のスタッフと接することのできる貴重な機会のひとつです。

最近では研究会、ワークショップも盛んに行われるようになりました。今年 3 月には反応の微視的光学ポテンシャルの専門的な話題に絞ったワークショップが開かれ、また、昨年 12 月には量子色力学の相構造に関する若手研究会が催されました。どちらにおいても活発な議論がなされ、盛会に終わったものと思います。これらの研究会は今後も継続して行われる予定です。

## 2. 研究だって頑張ってます

当研究室には核反応・核構造・ハドロンの 3 つのグループが存在し、その研究体制にはそれぞれ特徴があります。今回は、学生の研究テーマを中心に各グループを紹介します。

### 核反応グループ

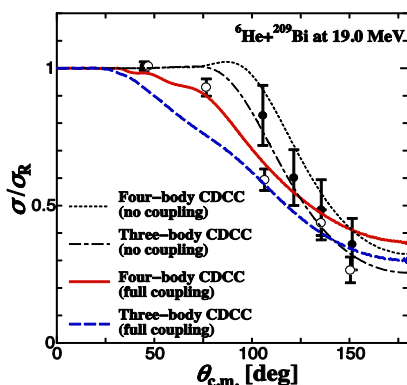
スタッフ：八尋、緒方

院生：江上、角、花田、蓑茂、濱田

九大核反応グループは、八尋・緒方を中心として反応の様々なテーマに取り組んでいます。特に不安定核の物理に大変強い興味を持っており、不安定核の特徴的な構造や反応機構、また宇宙元素合成における不安定核の役割を解明するのが目標です。これまでは離散化チャンネル結合法(CDCC 法)を中心に据えた多数のアプローチを試みていましたが、最近では CDCC 法の応用のみに留まらず、手広く研究が行われています。理化学研究所の RI ビームファクトリー(RIBF)の物理を想定し、核子あたり数百 MeV という、より高いエネルギー領域の反応にも注目し始め、研究室内に様々なテーマが存在するようになりました。グループ内で複数のテーマを扱うと、研究の連携を取り難くなるのが難点ですが、不安定核物理という一大テーマに対して多角的なアプローチを試みることは非常に有意義なことと考えています。ただ、どの研究も九大核反応グループの理念である「実験を意識した定量性・予言性のある理論」を目指している点は共通です。

### CDCC 法による分解反応の記述 (八尋、緒方、江上)

離散化チャンネル結合法(CDCC 法)は、弱結合系の反応を正確かつ簡便に記述することに重きを置いた、極めて有用な反応モデルです。分解反応で特に重要とされる連続状態との結合を、模型空間を縮約することによって高精度かつ効率的に取り入れている点に特徴があります。九大で開発されたこの手法は、様々な改良を取り入れつつ、今日に至るまで核物理の最前線で活躍し続けています。最近の発展では、例えば、幾何光学 CDCC 法の開発や 4 体分解反応への拡張が挙げられます。CDCC 法を用いた解析によって、新たな不安定核の特性が明らかにされていくものと期待されます。また近年、CDCC 法は天体核物理や核データ研究にも盛んに応用されており、研究対象は着実に広がりつつあります。



クーロンバリア近傍のエネルギー(19MeV)における  ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$  散乱の弾性散乱微分断面積。実線が 4 体 CDCC 法による計算結果、破線が 3 体 CDCC 法による計算結果であり、前者がより良く実験データを再現していることが見てとれる。点線および一点鎖線は、4 体 CDCC 法および 3 体 CDCC 法での 1 チャンネル計算( ${}^6\text{He}$  の分解状態を無視した計算)の結果である。

### 歪曲波に対する局所半古典近似を用いた( $p,2p$ )反応の DWIA 解析 (緒方、角)

歪曲波インパルス近似(DWIA)を用いて陽子ノックアウト( $p,2p$ )反応を解析することにより、原子核の1粒子状態を調べます。核内の1粒子状態は核構造と密接に結びついているため、これを調べることによって、魔法数に関する不安定核の構造を解明していくのが本研究の目的です。これまで、偏極分解能に対する解析を行うことにより、核内における2核子の運動学を正確に取り扱うことの重要性を明らかにしました。さらに、スピン軌道相互作用による歪曲効果が偏極分解能の振る舞いと密接に関わることも見出しました。今後はより詳細な解析を行っていく予定です。

### 中高エネルギー核反応に対する微視的理論の構築 (八尋、緒方、蓑茂)

不安定核は入射粒子としてしか利用できず高強度のビームを得ることが困難なため、実験での観測は極めて前方に限られており、その実験から光学ポテンシャルの探索を行うのは困難です。従って、2核子間相互作用に基づく、いわゆる微視的な反応理論が必要とされます。九大では、Glauber理論を軸に据えこの研究を進めており、多重散乱理論を基にGlauber理論の再定式化を行いました。今後はこの新しいGlauber理論に用いる有効相互作用を決定するのが課題です。本研究は、今まさにRIBFで行われようとしている実験の解析を目標としており、これからの成果が大変楽しみとされる研究です。

## 核構造グループ

スタッフ：清水

院生：田上、小野

九大原子核構造グループは平均場近似に基礎を置き、より高次の相関を取り込んだ多体論的手法を用いて原子核構造の研究を行なっています。現在は主として、巨大変形・高速回転という極限状況での原子核の構造を微視的立場から研究しています。具体的には、巨大変形した回転状態である超変形回転バンドにおける新しい殻構造や集団的振動状態、また、回転軸が主軸から外れたような新しい回転様式に従う集団的回転状態など、基底状態近傍では見られない励起状態の研究を進めています。

最近では不安定核の研究が世界的にも進展してきており、不安定核での集団運動にも興味を持っています。特に、ドリップライン近くの中性子過剰の不安定核では、中性子の密度分布が陽子の分布とはかなり違って外側に広がっていること、また、中性子の粒子的励起状態はほとんど原子核に束縛していない連続状態になっていることから、安定核とは全く違った性質が発現すると期待されます。連続状態との結合は多体論としてもチャレンジングなテーマであり、我々はこのような不安定核の理論的な研究も始めています。

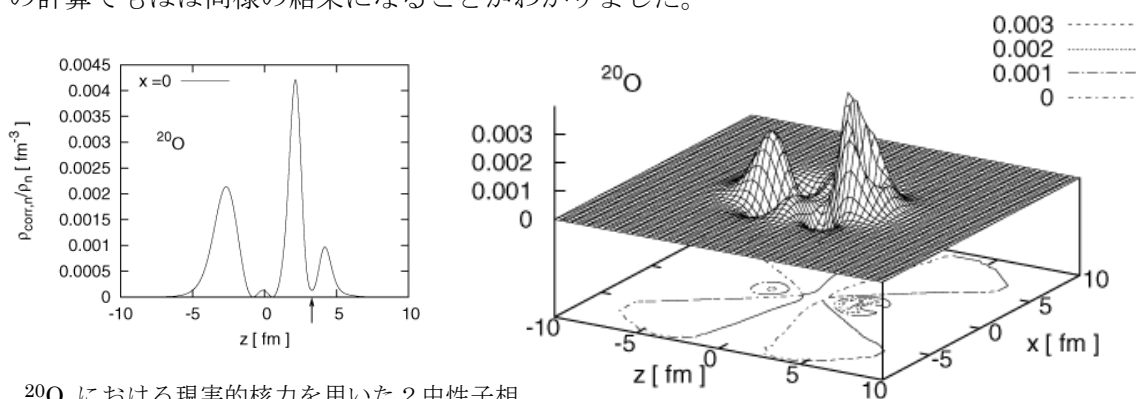
### 原子核におけるエキゾチック変形の研究 (清水、田上)

近年の理論計算によって、エキゾチックな変形状態の存在が示唆されています。その中で

も特に興味深いのは四面体型の変形であり、多数の原子核の安定な変形として実現するのではないかと予想されていますが、その確かな証拠は見つかっていません。本研究では、四面体変形をした原子核の存在を探るため、原子核のエネルギースペクトルや電磁遷移確率等の物理量を量子数射影法や生成座標法といった理論手法によって計算し、その結果と実際の実験値と比較することを試みています。また現実の原子核との定量的な比較を行うためには、対相関とともに平均場が回転している効果を正しく取り扱う必要があります。そのため、対相関ポテンシャルと回転している平均場から得られる状態に対して、角運動量射影と粒子数射影が同時に可能な計算プログラムを作成しました。現在はその計算プログラムを用いて、エキゾチックな変形状態の解析を行っています。

### Gauss 基底関数展開法による対相関の研究 (清水)

Gauss 基底関数展開法を平均場計算へ応用し、不安定核の研究を行っています。これまでの卒学生の努力により、球形核に対して、有限レンジの Gogny 型有効核力を用い、対相関を取り入れた Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 計算が可能になっています。最近 BEC (Bose-Einstein 凝縮)-BCS クロスオーバー現象との関連で、注目を集めている 2 中性子相関を調べ、よく発達した 2 中性子相関が出現することが確かめられました。さらに、九大グループが開発した Gauss 基底関数展開法を用いた計算方法の長所を活かし、HFB 近似の範囲内で、現実的な核力を用いて有限核における対相関を調べています(新潟大 松尾氏との共同研究)。対相関については、有効核力を用いるべきか、現実的な核力を用いるべきか、長年議論されており、ミラノ大学グループの計算では、現実的な核力のみでは、実験的に引き出されたペアリングギャップの 6 割程度しか出ないという結果が得られていますが、我々の計算でもほぼ同様の結果になることがわかりました。



$^{20}\text{O}$  における現実的な核力を用いた 2 中性子相関密度の断面図( $x = 0$ )。片方の中性子を矢印の位置に置いており、そこでの凹みは強い斥力芯の効果となっている。

$^{20}\text{O}$  における 2 中性子相関密度の 3 次元プロット。斥力芯の効果がはっきり見える。

### 連続状態の効果を考慮した Strutinsky 法の応用 (清水、小野)

不安定核の理論的な記述はチャレンジングな課題のひとつであり、不安定核を取り扱うためには束縛状態に加えて、連続状態の効果を適切に取り扱う必要があります。しかし連続

状態を考慮した現実的ポテンシャルを用いて **Strutinsky** 計算を行うと、殻エネルギーが模型空間の取り方に大きく依存するという問題が古くから知られており、連続状態の効果を正しく取り入れた計算法が望まれていました。そこで我々は、物理量の計算で自由粒子の効果を引き去る **Kruppa** の方法を拡張することにより、**Strutinsky** の殻補正エネルギーや対相関エネルギーに対し、**Woods-Saxon** ポテンシャルを用いて、連続状態の効果を正しく取り込んだ計算ができることを確認しました。現在、この方法論を用いて、ドリップライン近傍に至る原子核の基底状態に対する系統的な解析を進めています。半現象論的質量公式として有名な **Möller-Nix** の計算では、連続状態の効果が正しく取り入れられていないため、我々の計算結果との比較は非常に重要であると思われます。また、この **Kruppa** の方法をクランキング計算に応用することによって、不安定核に特有の回転状態の存在を調べることができ、これも興味深い研究課題のひとつとなっています。

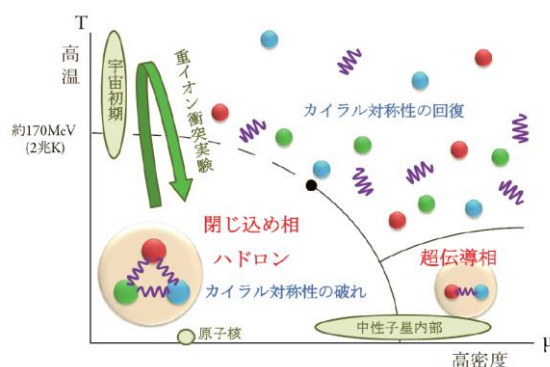
## ハドロングループ

スタッフ：八尋

院生：柏、境、甲斐、松本、小田、佐々木

ハドロングループは、有限温度( $T$ )・有限化学ポテンシャル( $\mu$ )における **QCD** 相図について研究しています。

低温低化学ポテンシャル領域において、クォークはハドロン内に閉じ込められており、そこではカイラル対称性が破れています。高温高化学ポテンシャル領域において、クォークはハドロン内から解放されクォーク・グルーオン・プラズマ状態として存在するようになります。そこではカイラル対称性は回復しています。さらに、低温高化学ポテンシャル領域ではクォークが **Cooper** 対を形成し、カラー超伝導状態として存在すると考えられています。このように温度や密度によって **QCD** は多様な相構造を形成します(右上図)。



クォークの閉じ込めは非摂動的な現象ですから、**QCD**相図の研究には、当然非摂動的な手法が必要になります。**QCD**を非摂動的に直接扱う手法として格子**QCD**がありますが、有限密度領域では符号問題といわれる数値計算上の問題が生じてしまい、計算を行うことができません。符号問題を避けるひとつの方法として、符号問題が存在せず格子計算を実行できる領域(化学ポテンシャルが純虚数の領域)で相転移線を求め、これを実数の化学ポテンシャル領域(現実の世界)へ解析接続する方法があります。今までに行われていた解析接続の方法は、相転移線を零化学ポテンシャルでTaylor展開し、係数を虚数化学ポテンシャル領域における格子**QCD**の結果を再現するように決め、その関数によって直接実数化学ポテンシャル領域へ外挿するというものでした。このような単純な外挿法は化学ポテンシャルが小さい領域では信頼できますが、化学ポテンシャルが大きい領域ではその信頼性は失われま

す。

我々のグループでは、有効模型に基づく解析接続を用いて、実化学ポテンシャル領域の相図をより信頼できる形で得ようとしています。有効模型はQCDの近似理論であり、化学ポテンシャルが実数でも純虚数でも計算できるからです。信頼できる相図を得るためには、まず虚数化学ポテンシャル領域における格子QCDを再現するような有効模型が必要です。虚数化学ポテンシャル領域において、QCD分配関数 $Z$ はRoberge-Weiss (RW)周期性という化学ポテンシャル方向の周期性を持つようになります( $Z(\theta + 2\pi/3) = Z(\theta)$ ;  $\theta = \mu/T$ )。これは $Z_3$ 変換と虚数化学ポテンシャルのシフト( $\theta \rightarrow \theta + 2\pi/3$ )を同時に行うextended  $Z_3$ 変換に対して理論が不変となっているためです。

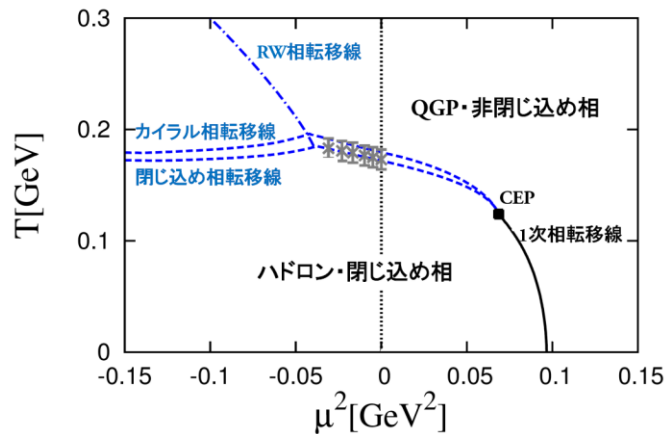
我々は昨年、Polyakov-loop Nambu-Jona-Lasinio (PNJL)模型がこのextended  $Z_3$ 対称性を持った模型であること、また、虚数化学ポテンシャル領域における格子QCDの結果を再現することを発見しました。PNJL模型はカイラル対称性の破れと閉じ込めを同時に扱うことができる模型で、零化学ポテンシャルにおける格子QCDの結果をうまく説明することができます。今のところ、extended  $Z_3$ 対称性とカイラル対称性の両方を持った有効模型はPNJL模型のみです。PNJL模型では、相互作用としてベクター型相互作用を考えることができます。この相互作用は熱力学ポテンシャルに密度効果をもたらし、有限密度領域における相図を大きく変化させます。その他に考えられる相互作用として、より高次のスカラー型8点相互作用などがあります。

右図は、虚数及び実数化学ポテンシャル領域における相図です。

$\mu^2 < 0$ の領域が虚数化学ポテンシャル領域、 $\mu^2 > 0$ の領域が実数化学ポテンシャル領域です。虚数化学ポテンシャル領域にあるエラー付きの点が格子QCD計算から得られる相転移線です。この結果を再現するようにベクター型およびスカラー型8点相互作用の結合定数を

決めます。そうして得られたパラメータを用い、実数化学ポテンシャルにおける相図を得ました。その結果、ベクター型相相互作用が加わっても高化学ポテンシャル領域に1次相転移線が現れることがわかりました。

以上、我々のハドロングループでは格子QCD計算が可能な虚数化学ポテンシャル領域に注目し、QCD相図をより信頼のできる形で求めようとしています。今のところ解析接続には格子間隔やクォーク質量が大きい格子QCD計算を用いていますが、本年度より中村純教授(広島大学)と共同研究で格子間隔やクォーク質量の小さい格子計算を始め、この格子計算に基づき、より信頼できるQCD相図を解明しようとしています。



### 3. 九大原子核セミナーで学ぶ

九大原子核セミナーでは、学内外の核物理に携わる研究者を招き、1時間半程度の講演をお願いしてします。九州は僻地なので、九大原子核セミナーは、理論・実験の両面について最先端の研究成果を聴くことができる貴重な機会のひとつです。記念すべき第1回は、1976年4月に故高田健次郎先生による講演が行われました。以来、その伝統は脈々と受け継がれ、今日では860回を数えるほどになっています。テーマによっては、九大核理のメンバーだけでなく、原子核実験の研究室や素粒子研究室のメンバー、他大学の先生方も参加され、大変な賑わいを見せることもあります。本セミナーは、経験豊かな研究者によるレビュー講演や若手の研究紹介など様々な場面で活用されてきました。

研究を宣伝したい方、九大核理に興味をお持ちの方の参加を歓迎いたします。是非私たちと一緒にお酒を飲み、もとい、議論しましょう。

参考までに、今後の予定は

九大原子核セミナーのページ：<http://www.nt.phys.kyushu-u.ac.jp/qs/>  
に挙げられています。ご意見・ご質問等は、

セミナー係アドレス：[kyu-semi@nucl-th.phys.kyushu-u.ac.jp](mailto:kyu-semi@nucl-th.phys.kyushu-u.ac.jp)  
までよろしく申し上げます。

### 4. おわりに

九大核理論グループは今日も、研究に、飲みに、明け暮れています。40年を超えるこの歴史は、きっとこれからも続いていくことでしょう。この独特の雰囲気は是非一度味わっていただきたいものです。九大核理は、あなたのお越しをお待ちしています。

文責

全体・反応グループパート：蓑茂 工将

構造グループパート：小野寿哉

ハドロングループパート：境祐二