

## 粒子宇宙論

## 理論核物理研究室

Nuclear Theory Laboratory

HP : <https://sites.google.com/view/kyushu-nucl-th/>

コアタイム：研究室会議の日時以外、特になし

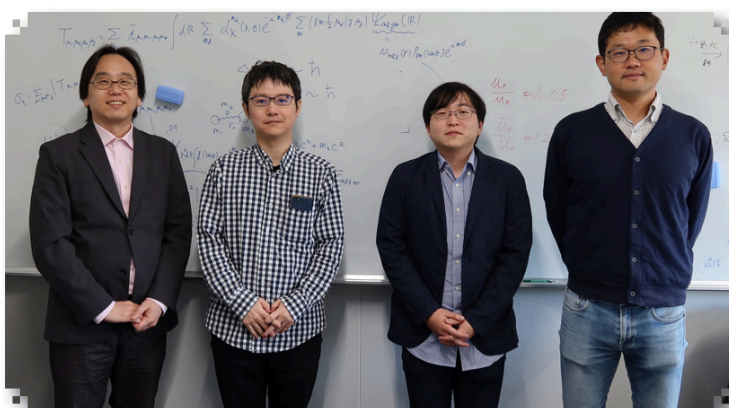
研究キーワード： 原子核・ハドロン



## Member

教授	緒方 一介
准教授	湊 太志
スタッフ	小川 翔也 茶園 亮樹
博士3年	中田 響 (大阪大学より指導委託)
修士2年	木田 浩樹
修士1年	宇都宮 颯斗 浦津 源 田中 峻
学部4年 (特別研究生)	立石 諒汰 平原 颯太 吉岡 真陸

## 教員プロフィール



## 緒方 一介 教授

研究室主宰者の緒方一介（おがた かずゆき）です。九大出身（2000年度博士課程修了）で、一昨年、しばらくぶりに母校に戻ってきました。私は原子核を中心に、量子系のダイナミクスを研究しています。見えない粒子どうしをぶつけたときに起きる現象の理解が目的です。9割は原子核が研究対象ですが、ハドロンの反応も扱っています。量子反応研究は、基本的には実験で測定される「粒子の数」を計算対象とするもので、量子力学特有のモヤモヤしたところが少なく、理解の足場が作りやすいと思います。私自身の経験からいっても、ミクロの世界に興味をもちつつ、量子力学アレルギーに悩まされている人には、量子反応研究がお勧めです。趣味は動物との触れあいです。最近の推しはヒドジョウです。

## 湊 太志 准教授


准教授の湊太志（みなと ふとし）です。生まれは北海道です。福岡に来たので、北海道出身者がいるとうれしくなります。専門は原子核構造の理論研究です。特に、原子核の中で弱い相互作用が引き起こす現象の研究に興味があり、 $\beta$ 崩壊やミュオン・電子捕獲、ニュートリノ原子核反応などの研究をしています。これらの研究テーマは宇宙物理や工学・基礎物理などへ幅広く応用でき、様々な分野の人と交流できる充実した（忙しい？）研究生活を過ごしています。趣味はボルダリングです。今年の冬は「強傾斜」集中月間とし、背中と胸の筋肉痛がハンパないです。昨年のニュートン祭パンフレットに書いた目標の結果、2024年1月は鹿児島へ旅行に行きました！今度は1級を登れたら沖縄旅行に行きます。

## 小川 翔也 特任助教

特任助教の小川翔也（おがわ しょうや）です。私は学部・大学院ともに九州大学で、所属していた研究室は今いる理論核物理研究室です。一昨年の春に学位を取得後、縁あって改めて九大に所属することになりましたが、皆さんにはあまり認識されていないと思います。研究分野は原子核反応で、原子核構造がどのように観測量に反映されるか核反応理論を用いて調べています。これについては後にある「研究内容」を読むと良いと思います。普段は7階の居室か院生部屋にいますので、研究分野に興味がある方は気軽にお尋ねください。最近は紙の本の精読をなんとかしたいと思いつつ、Kindleで本を読むことにはまっています。

## 茶園 亮樹 特任助教

特任助教の茶園亮樹（ちゃぞの よしき）です。生まれてから2022年3月に博士号を取得するまで、ずっと大阪にいました。その後、2年ほど埼玉の理化学研究所でポストドクをさせていただき、縁あって今年の5月に理論核物理研究室に着任しました。研究分野は原子核反応で、特に原子核の構成要素を明らかにすることに適したノックアウト反応の理論を主軸として活動をしています（下記の【研究内容】をご覧ください）。また、九州大学に来てからは、3体核力に関連する研究にも取り組んでいます。物理以外では、各地域の神話や伝説などに興味があり、身近なものとの意外なつながりを楽しみながら、少しずつ勉強しています。



## アピールポイント

### 理化学研究所や大阪大学 RCNP などの研究機関との共同研究

理論核物理研究室はその名の通り“理論”的に原子核を研究する理論物理のグループです。理論物理と聞くと1人で机に向かって黙々と計算している姿を浮かべるかもしれませんが、必ずしもそうとは限りません。本研究室では加速器施設を持つ大阪大学核物理研究センター(RCNP)や理化学研究所、九州大学総合理工学研究所との共同研究も行っています。理論研究で閉じることなく実験の研究者とも議論し、理論・実験が互いに刺激しながら原子核物理を推し進めています。

### 工学への応用

原子核物理は基礎研究の側面が強く見えるかもしれませんが、【研究内容】に記載してあるように工学分野へ応用することも私たちの重要な課題です。理学部は基礎研究を行う場所という見方もあるかもしれませんが、「応用研究をしたい」、「社会貢献に直結する研究がしたい」と考えている学生も少なくないと思います。そのような人たちに是非、ここを配属希望研究室のひとつに選んでもらえたらと思います。(もちろん、基礎研究がしたい人も大歓迎です。)



## イベント

### 年間スケジュール

4月	新入生歓迎会
9月	物理学会
10月	博士論文構想
11月	修士論文中間報告
2月	博士論文公聴会／修士論文発表／卒業研究発表
3月	追い出しコンパ／物理学会

### 定例イベント

隔週水曜日	研究室会議 インフォーマルセミナー (文献紹介や研究成果の報告)
不定期開催	九大原子核セミナー

隔週で「研究室会議」があり、主に研究室の今後の予定や運営について話し合います。その後、文献紹介や研究報告などの「インフォーマルセミナー」を行います。また、「九大原子核セミナー」が不定期に行われ、外部の研究者から最新の研究成果を紹介していただきます。さらに、基本的には年に1回「集中講義」があり、他大学の先生に専門的な内容を基礎から話していただきます。



## 実績

### 最近の論文

- K. Ogata, K. Yoshida, Y. Chazono, "pikoe: A computer program for distorted-wave impulse approximation calculation for proton induced nucleon knockout reactions", Comp. Comm. Phys. 297, 109058 (2024).
- T. Shizuma, M. Omer, T. Hayakawa, F. Minato, S. Matsuba, S. Miyamoto, N. Shimizu, and Y. Utsuno, "Parity assignment for low-lying dipole states in Ni-58", Phys. Rev. C 109, 014302 (2024).
- K. Yoshida, Y. Chazono, and K. Ogata, "Significance of the refraction effect on the p-d elementary process in the (p,pd) reaction", Phys. Rev. C 110, 014617 (2024).
- H. Nakada, S. Nakayama, K. Yoshida, Y. Watanabe, and K. Ogata, "Difference in peripherality of the inclusive (p,p') and (d,d') reactions and its implications for a phenomenological reaction model", Phys. Rev. C 110, 014616 (2024).
- P. J. Li+, "Spectroscopy of deeply bound orbitals in neutron-rich Ca isotopes", Phys. Lett. B 855, 138828 (2024).
- S. Watanabe, Y. Suzuki, M. Kimura, and K. Ogata, "Uncovering the sign of nuclear deformations: Determination of prolate or oblate shape via low-energy  $\alpha$  inelastic scattering", Phys. Rev. C 110, 034618 (2024).
- F. Minato, O. Iwamoto, "Fission Fragment Yields Of  $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$  Evaluated By The CCONE Code System", Phys. Rev. C, to be published.

### 講演

- S. Ogawa, "Description of the dineutron knockout reaction", 5th International Workshop on Quasi-Free Scattering with Radioactive-Ion Bream 2023, Lefkada, Greece, Oct. 1-6 (2023) [Invited talk]
- F. Minato, "Nuclear structures observed from global beta-decay predictions and measurements", Advancing Physics at next RIBF (ADRI24), Jan. 23-24, 2024, Wako, Japan. [Invited talk]
- K. Ogata, "Some perspectives on direct reaction theories", The 12th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2024), Jun. 24-28, 2024, Wiesbaden, Germany. [Keynote talk]
- Y. Chazono, "Maris polarization in deuteron knockout reactions", The 12th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2024), Jun. 24-28, 2024, Wiesbaden, Germany.
- F. Minato, "Transitions To Door-way States And Nuclear Responses Against 2-body External Fields", Jul. 8-12, 2024, Wien, Austria. [Invited talk]
- K. Ogata, "Reaction theory developments for breakup and quasifree knockout reactions", 14th Nucleus-Nucleus Collisions Conference (NN2024), Aug. 18-22, 2024, Whistler, Canada. [Invited talk]
- 緒方氏, 湊氏, 小川氏, 茶園氏, 中田氏, 木田氏, 浦津氏, 田中氏が日本物理学会第79回年次大会(北海道大学)で講演

### 進学先 (学部卒)

九大や他大学の大学院／公務員／IT系の民間企業／etc.

### 修士卒

企業の研究所・研究部門／国家公務員  
ソフトウェア会社の開発部門 etc.

### 博士卒

各地の大学教員・研究員／高専・高校の教員  
国家公務員 etc.

### 就職先 (例)

富士通／HITACHI／NSソリューションズ西日本  
東洋ビジネスエンジニアリング／楽天証券／NEC  
SCSK／共立出版／気象庁／理化学研究所  
高エネルギー研究所／日本原子力研究開発機構 etc.

理論核物理研究室自体は昔からありますが、一昨年度、教員が入れ代わって全く新しい研究室になりました。研究室を立ち上げたばかりのため学生の研究実績は少ないですが、新たに入ってくる皆さんたちと盛り上げていきたいと思っています。





## 研究内容

### 理論核物理が目指すもの

まず、理論核物理の基本的な目標を明確にしておきましょう。それは、陽子と中性子(総称して核子)からなる複合粒子系の在りよう(構造)と変転(反応)を解明することです。ただそう聞くと、次のような疑問をもつ人がいるかもしれません。

陽子や中性子がクォークからできていることはとくに知られているのに、なぜそれらを基本粒子として扱うのですか? それに、核子と核子の相互作用はよくわかっているのだから、単にそれらが集まっただけの原子核に謎なんてないのではないですか?

答えは簡単です。基本構成要素と基本相互作用が完璧にわかっている、その構成要素が複数集まったときの振る舞いは予想できないからです。たとえば、バナナやハートの形を

した原子核の存在が予言されていますが、誰もそれが本当かどうか知りません(そもそも原子核が存在する極微のスケールで形をどう定義するのかということ自体が、面白い問題です)。あるいは、原子核の中に、葡萄の房のような小さな原子核(クラスター)がたくさん浮かんでいるという説もあります(図1)。こういった姿は「核子が単に集まっているもの」とはまったく異なることがわかんと思います。このように、核子という単一の構成要素が多数集まった系は、大変豊かな物理と未知の性質を内包した、とても興味深い研究対象なのです。

原子核は我々の身近なところにも関係します。夜空を彩る星たちを輝かせているのは、原子核の変化です。我々のまわりにある元素は、主に星の中で、宇宙の始まりから現在までの間に、原子核の反応によって生み出されたものなのです。さらに、危険性の高い放射性廃棄物を現実的な時間とコストで消滅処理する、いわゆる核変換の研究も、突き詰めれば原子核の変転の解明に他なりません。原子核の研究は、天の物理とも社会の物理とも繋がっているのです。

### 最近の研究から

では、本研究室が取り組んでいる具体的な研究テーマをいくつか紹介しましょう。

#### 1. 量子だるま落とし反応を用いた原子核の全貌解明

先ほど述べた、原子核の豊かな構造を解明する手段として近年注目されているのが、ノックアウト反応です(図2)。これは、量子的世界におけるだるま落としにたとえられる反応で、主に高いエネルギーをもった陽子のハンマーで原子核を勢いよく振り抜き、原子核の構成要素(様々な粒子)を叩き出して捕まえます。観測した粒子の運動量分布を量子力学で分析すると、もとの原子核の中にその粒子がどのくらい存在して、どのように運動していたかがわかるのです。ごく最近、重い原子核の中にある $\alpha$ 粒子( $4\text{He}$  原子核)を初めて観測した仕事がScience誌に掲載されました。一連のノックアウト反応研究は「おのころプロジェクト」と名付けられ、実験・理論の協力の下、推進されています。この名前は、古事記の国生み神話で日本発祥の地とされる「自凝島」からとられています(図3)。私たちのグループは、このプロジェクトで、ノックアウト反応の理論的な分析を担当しています。特に力を入れているのが、脆い粒を原子核から叩き出す反応の記述です。ガラス製のだるま落としを叩いたらどの程度ガラスは砕けるのか? また、砕けたガラスから、どうやってもとのガラスパーツの情報を引き出すのか? 量子力学的反応理論を駆使して、これらの問題に取り組んでいるところです。

#### 2. 核変換と元素合成への挑戦

原子力発電所でつくられる核廃棄物、特に10万年を超える期間にわたって管理が必要な長寿命放射性廃棄物の処理は、人類にとって極めて重要な課題です(図4)。この問題に対して、原子核反応を利用して核廃棄物の放射性レベルを低減化する試みがなされています。特に近年注目されているのが、重陽子を用いた処理です。重陽子は電荷をもっているため、加速器でのコントロールが比較的容易である上、陽子と中性子に分解しやすいという特徴を有しています。周回型の加速器で重陽子をコントロールし、標的核に何度も入射させると、やがて重陽子は陽子と中性子に分解します。中性子は電荷をもたないため、標的核に深く侵入し、高い確率で核変換をおこすことができると考えられているのです。

理論的には、分解の自由度を含めた重陽子の反応の記述が不可欠になります。九大グループが独自に開発した研究手法「連続状態離散化チャネル結合法(CDCC)」はこの手の分解反応を最も精度よく記述できるものですが、核変換に必要な反応(標的核が様々な核種に変化する過程)に直接適用することはできません。CDCCをベースとしつつも、抜本的な反応モデルの改良が必要とされています。

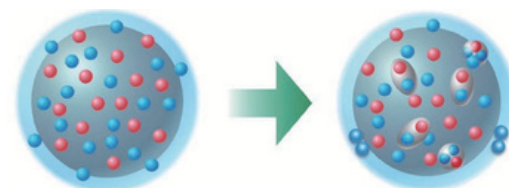


図1: 原子核は「核子の一様な集団」ではなく、核子の海の中で、粒状のミニ原子核が浮かんで消えているのではないか? この新しい仮説の検証が進められています。



図2: 量子的世界のだるま落とし反応で、原子核の全貌を暴きます。「叩けばわかる!」がキャッチフレーズです。



おのころじま  
自凝島

図3: 自凝島は古事記に伝わる日本発祥の地です。その漢字が意味する Self-Clustering というのは、このプロジェクトを象徴する重要な概念です。

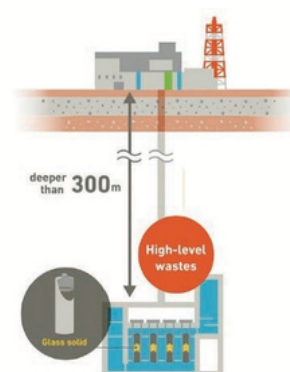


図4: 現時点での核廃棄物の処理法は「地中深く埋める」です。その実行可能性については未だ議論中です。

### Message

緒方一介: 原子核の世界で、量子力学と楽しく遊びましょう。

湊太志: 無課金おじさんが今年の流行語大賞にノミネートされなかった(´・\_・`)

小川翔也: 量子力学の問題は解けるけど何かモヤモヤする人、そういう人ほど原子核という具体的な系を例にして理解を深めてみてほしいです。

茶園亮樹: 反応・構造・核力という原子核研究の主要分野の研究者が一堂に会する、日本でも数少ない研究室です。とにかく原子核について知りたいという学生さんは是非、私達の研究室に来てください。

他方、宇宙における元素合成に目を向けてみましょう。地上にある金(の一部)やウランは、原子核による中性子の捕獲と $\beta$ 崩壊が、短時間で繰り返される過程によって生成されたと考えられています。その過程がおきる場所に関する学説が、この10年で大きく変わりました。現在、この過程は、中性子星同士の合体時におきると考えられているのです。しかし考えてみてください。中性子星の合体時、その場所には大量の中性子がいるはずです。原子核が中性子を捕まえる反応において、周辺の中性子はどんな役割を果たすのでしょうか？ 私たちはごく最近、この環境中性子は反応中性子を加速し、元素合成の確率を有意に変化させ得ることを突き止めました。この結果をより一般化し、宇宙元素合成ネットワーク計算に組み込むことが今後の課題です。



図5：中性子星合体（イメージ）。宇宙で重元素が生成される場所と考えられています。そこはまさに中性子の海です。

### 3. 原子核反応を基軸とした量子系の時間階層進化の研究

最後に、少し毛色の違う話を紹介しましょう。一口に原子核反応といっても、実はその対象は千差万別で、時間スケールでいえば10-23秒から10-16秒という極めて広い範囲にわたる現象を研究の対象としています。この時間の開きは、1秒と1年に相当します。反応のプロセスは、経過時間(反応の進行度)に応じて、直接過程、前平衡過程、複合核過程に大別されます。ここで面白いのは、直接過程から前平衡過程に至るとき、系の量子性が一部失われているようにみえることです。具体的には、放出粒子がどの角度にどの程度飛んできたかをみたとき、直接過程では干渉縞模様がみられ、前平衡過程ではこれが消失するのです。縞模様は、原子核の異なる場所で反応がおきるプロセスが干渉していることの証左ですから、縞模様が消失するという事は、この干渉性(量子力学の重要な特質)が失われているということです。さらに反応が進行した複合核過程となると、系の時間発展は古典的なランジュヴァン方程式によく従うことが知られています。このことを以て系が古典化したといえるかどうかには慎重な分析が必要ですが、少なくとも系の量子性に何らかの変化が生じていることは間違いないでしょう。反応の進行度(時間の経過)に応じて系の量子性が変化していく様子を、私たちは「時間階層進化」と捉え、原子核の階層だけに閉じず、多くの研究者たちとこの物理について議論しています。

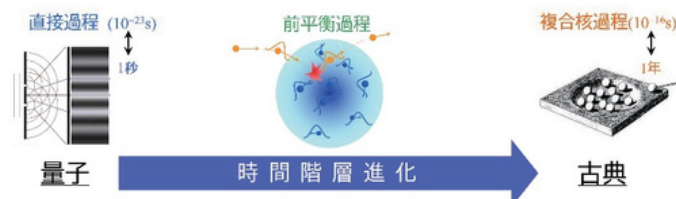


図6：原子核反応の進行度に応じて、系の量子性は大きく変化すると考えら

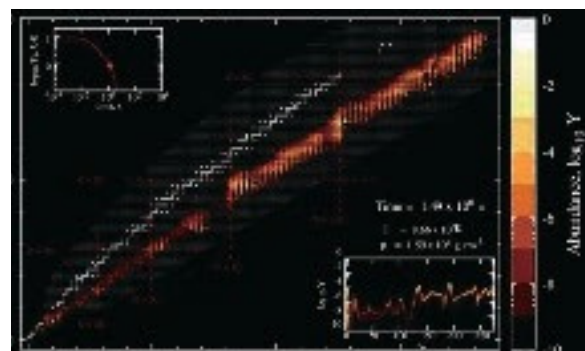


図7：星の中の元素合成(r-process)を示した核図表。縦軸が原子番号で横軸が中性子数となっている。星の爆発的变化の1.49秒後にどのような原子核ができたかを示している。

### 4. 原子核の中での弱い相互作用

基本相互作用の一つである弱い相互作用は、強い相互作用や電磁相互作用に比べると、その名の通りとても弱いものです。しかしこの理解は、あくまでも一つの粒子（バリオン）に着目した場合です。複数の陽子・中性子から構成される原子核が、弱い相互作用を通して反応を起こす場合、どのような変化が得られるでしょう？ 典型的なもののひとつは $\beta$ 崩壊です。例えば $^{132}\text{Sn}$ という原子核は約40秒で $\beta$ 崩壊して $^{132}\text{Sb}$ になります。これは中性子が単体で存在した場合の寿命の約15分より圧倒的に早いスピードです。なぜこのような違いが生まれるのか？ その答えは、異なる原子核で束縛エネルギーの違いがあることと、陽子と中性子が複数集まったときに生まれる「集団性」の効果が関与しています。このことは昔から定性的に理解されていましたが、理論モデルを用いて原子核の $\beta$ 崩壊率の実験データを再現できるようになってきたのは最近のことです。『(2)核変換と元素合成への挑戦』では、中性子星の合体時に中性子捕獲と $\beta$ 崩壊が繰り返されることで重い元素が作られていることを紹介しました。図7は、中性子星合体後1.49秒後の原子核の分布を示しています。原子核の分布は、中性子数が多い領域に集中していることが分かります。そのような中性子過剰核の性質を実験で測定することは難しいですが、 $\beta$ 崩壊率を理論的に予測できるようになったことで、宇宙における元素合成のメカニズムの理解が進みつつあります。

より身近な原子核の弱い相互作用には、二次宇宙線であるミューオンを原子核が捕獲する反応があります。このミューオンは、1分間あたり1 cm<sup>2</sup>に1個飛んできています。そのため、ミューオン捕獲反応は身の回りのあちこちで起きており、電子機器を故障させたり、鉱物に当たってその元素量を変化させたり、と様々な問題を起こしています。これらの問題点の解決には、原子核の知識が必要とされており、我々は世界をリードする研究を行っています。

### まとめ

本研究室では、原子核をはじめとする量子多体系の性質を、反応現象を通じて研究しています。特に重視しているのが、実験で観測されるデータを正しく解釈することです。新しい物理を高い確度で引き出すべく、反応理論を日々磨いています。量子力学という“凄そうだけどなんだか得体の知れない奴”が、ミクロの散乱実験で得られた結果を見事に記述する、“信頼できる友人”であることを体感できる研究室だと思います。国内外の実験研究者との議論も活発です。また、核変換という、社会に役立つ研究や、我々の身のまわりにある物質の起源に迫る宇宙元素合成研究もカバーしています。さらには、反応系の量子性の変化といった根源的な課題にも取り組んでいます。皆さんと一緒に研究できる日を、楽しみにしています。

### Message

中田響: 落ち着いて研究ができるととてもよい環境です。

木田浩樹: 原子核理論では量子力学の具体例がたくさん出てきます。実際に触れることで量子力学への理解がきっと深まるはず。

宇都宮颯斗: 困基打てる人、興味がある人募集します 浦津源: 比較的自由に研究を進めることができる楽しい研究室です。

田中峻: 面白い研究ができる研究室です!! 立石諒汰: 一緒に活発な議論をしましょう! 平原 颯太: たのしんで学びましょう!

吉岡 真陸: 物性と素粒子の中間のスケールである原子核の物理を研究できます。理論の研究室なのでコンピュータによるシミュレーションを行いますので、数値計算に興味がある人にもおすすめです。