



大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻 原子核実験研究室

川畑 貴裕、赤石 貴也、小田原 厚子、清水 俊、福田 光順、三原 基嗣、吉田 斉
大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻



1 はじめに

大阪大学は、学部学生数において、東京大学をしのぎ国立大学のなかでは最大の規模を誇る総合大学です。その創立は1931年にさかのぼりますが、旧帝国大学としては歴史が浅く、1939年に創立された名古屋大学に継いで2番目に新しい旧帝国大学ということになります。当時の大阪市は、関東大震災の発生により人口が減少していた東京市を抜いて日本最大の都市として繁栄期を迎えていたにもかかわらず帝国大学が設置されていなかったため、地元の財界を中心に帝国大学創設を求める機運が高まったそうです。その結果、国庫の負担を求めず、費用の全額を地元の官民が拠出することで大阪帝国大学が創立されたのでした。この地元主導による創立の経緯は現在の大阪大学が掲げる「地域に生き 世界に伸びる」というモットーへとつながっています。

大阪帝国大学の創立とともに設置された理学部は、当初、大阪市内の中之島にありましたが、1964年に豊中キャンパスへ移転し現在に至っています。豊中キャンパスは、大阪府の北部、千里丘陵の西端に位置し、かつて枕草子に「山は…」と紹介された山々のひとつである待兼山に造成

されています。清少納言が待兼山に心を留めたのは、その叙事的な地名ゆえと思われるのですが、以降、待兼山は広く知られるようになり、しばしば悲恋の歌枕にも使われるようになります。

もともと待兼山には旧制浪速高等学校が設置されていましたが、戦後の学制改革により新制大阪大学に継承されました。当時の建物は国の登録有形文化財に登録され、現在は大学会館として豊中キャンパスのランドマークという扱いになってはいますが、京都大学の時計台や同じく登録有形文化財である東京大学の安田講堂に比べると、いかんせん対外的な知名度は低くマイナーな存在であることは否定できません。

筆者から見ると、豊中キャンパスのシンボルは、むしろ「ワニ」であろうと思います。理学部の豊中キャンパスへの移転に伴う理学部校舎建設の現場において、新世代・更新世中期(約45万年前)の地層から、体長7メートルにおよぶ大型のワニの化石がほぼ完全な形で発見され「マチカネワニ」と名付けられました。これをモチーフにした大阪大学のキャラクター「ワニ博士」は、「ゆるキャラグランプリ」へ出場したり、ネットで話題になった某4コマ漫画にインスパイアされて「100日後に入学するワニ」を演じたりと、精力的な広報活動に取り組んでいます。大学の公式設定によると、ワニ博士は大阪大学の11学部および6つの大学院独立研究科の全てにおいて博士号を取得しているとのこと。推定年齢は45万歳で、各学部・研究科にちなんだ衣装をまとったイラストを「○学部の頃」と呼ぶのが定番なので、どうも、順番に学位を取得して来た模様です。大阪大学の創立年を考えると、平均5年でひとつの学位を取得しなければなりません。毎回、各分野における基礎知識の習得から、すなわち、学部入学からスタートしているのだとしたら、これは、相当に優秀であると言わざるを得ません。なお、図1に示したのは「理学部の頃」です。チェックのシャツとチノパンに、牛乳瓶の底が如き分厚いメガネをかけて天体観測を行っている模様ですが、たしかに、かつての理学部には、こんな出で立ちの学生がたくさんいたように思います。筆者にはこの姿が当研究室の某氏に見えて仕方がありません。



図 1: 大阪大学 「ワニ博士」 理学部の頃

2 原子核実験研究室

我々の研究室のルーツは、大阪帝国大学の創立時にまでさかのぼります。当時の物理学教室には、菊池正士や湯川秀樹が着任し、我が国における原子核物理学の一大拠点が形成されていきました。菊池正士が我が国で2台目となるコッククロフト・ウォルトン型加速器とサイクロトロンを中之島に建設し、湯川秀樹は後にノーベル賞を受賞する中間子論の論文を発表しました。ノーベル賞の受賞は大阪大学在職時の業績によるものであるにも関わらず、世間において湯川秀樹と言えば京都大学という印象が支配的であることに、大阪大学はいまひとつ納得していない様子ですが、ともあれ、原子核物理学の黎明期に、大阪帝国大学が大きな役割を果たしたことに疑いはなく、敗戦直後の不幸な中断 [1] はあったものの、大阪大学における原子核研究は若槻哲雄、山部昌太郎、杉本健三らによって引き継がれていきました。その後の物理学教室では、南園忠則、

江尻宏泰、高橋憲明、岸本忠史、下田正らが原子核実験分野の研究室を構え、2019年に原子核実験研究室は現在の体制となりました。

現在の原子核実験研究室では、旧岸本研、旧下田研、旧南園研の3研究室が統合され、教員8名、研究員1名、秘書1名、博士課程5名、修士課程15名、学部学生8名の合計38名という大所帯(口絵)で研究活動を行っています。研究テーマとしては、かつての3研究室を継承する形で、原子核構造グループ、素粒子・核分光グループ、核物質グループの3つのサブグループに分かれています。研究室の行事や学生の居室などはサブグループの垣根を超えた横のつながりを重視して運営しており、毎週火曜日の午前中には構成員が集まって研究室打ち合わせとコロキウムを開いています。修論発表や卒論発表の季節ともなると、これまた、全員が集まってM2やB4の学生の発表練習を行うわけですが、登壇する人数が多いところに、ダメ出しをする人数も多いので、エンドレスの様相を呈し、ちょっとあり得ないくらい長い時間にわたって研究室構成員が拘束されることになります。

2.1 学生生活

研究室へ配属になった4年生たちは学生部屋に机を与えられ、上級生たちとともに、約160 m²の大部屋に20を超える机を並べてにぎやかな研究生生活をスタートさせます。この大部屋制度は、研究活動がサブグループごとに分かれがちな中で、学生たちのつながりを強め、研究室への帰属意識を高めてもらうという意味で上手くワークしているように感じています。

前期のうちは、原子核物理についての輪講や放射線計測実習を行って知識と基礎技術の習得に努めます。夏が近づいてくると、卒業論文のテーマが学生たちの話題にあがり始めます。大阪大学の物理学専攻では、大学院入試の願書に卒業研究テーマについての記載を求めていますので、学生たちも自然とそのことが気になるようです。そこで、当研究室では、6月末から7月のはじめにかけて全ての教員が15分ずつ卒論テーマについてのプレゼンを行う説明会を開き、そのあとで学生たちの希望を聞いて卒論テーマを決定しています。年度によっては、特定のテーマに希望が集中することがありますので、そういうときには、自発的に第2希望のテーマに移ってくれるよう学生に促すなど、ある程度の調整は試みますが、調整が強制とならないよう、学生たちの意志を尊重するよう心がけています。

かくて、若人たちは、覚えたての物理を卒論テーマとして願書にしたためて、院試に臨みます。大講座のスケールメリットを活かし、自主的に学生が集まって大人数で院試のための勉強会を開いているようです。院試が終わった後期以降は、それぞれのサブグループにおいて各教員の指導のもと研究に取り組み、卒業後は多くが大学院へ進学します。学生たちには「学部の卒論テーマと大学院の修論テーマは独立だからね。関係ないからね。」と伝え、大学院進学後には、再び教員による修論テーマ説明会と学生に対する希望調査を行って、サブグループ間の移動を促してはいますが、多くの学生は卒論テーマの継続を望む傾向にあり、研究テーマを変更する学生は毎年1名いるかどうか、という状況で、「卒論修論独立制度」は、残念ながら上手くワークしているとは言えないようです。

当研究室に限ったことではないと思いますが、学生たちの大学院進学意欲は旺盛で、筆者が大阪大学へ着任して以来の4年度で、27名の4年生が研究室へ配属されましたが、そのうちの26名が大学院へ進学し、26名のうち22名が、大学院進学後も当研究室に所属しています。しかし、

この高い大学院進学率にも関わらず、博士進学率となると20%に満たず、極めてお寒い状況と言わざるを得ません。昨今、ようやく、その危機感が政府へと伝わり、卓越大学院プログラム、大学フェロシップ創設事業、次世代研究者挑戦的研究プログラムと言った施策が講じられ、これらのプログラムが採択された機関に属する博士課程学生にとっては、経済的な不安を感じることも無く研究に打ち込める環境が整いつつあります。大阪大学でも3つ全てのプログラムが走り、筆者はいずれの運営にも関わって、その仕事にそれなりの時間を費やしています。筆者にしてみれば、数年前には考えられなかったような恵まれた状況であり、博士進学率にビッグウェーブがやってきても不思議はないと思うのですが、現実には、なかなか甘くはありません。学生たちに聞くと、「博士に進んでも幸せになれると思えない」とのこと。学位取得後の進路に不安を感じているようです。確かに、アカデミックなポジションが増えたわけではなく、業界に残るには、相変わらず、それなりに厳しい競争を勝ち抜かねばなりません。物理学科の就職担当も務めた筆者の印象では、企業からの博士号取得者への評価は総じて高く、学位取得後のことを心配する必要はないと感じています。経済的支援制度が整ったいま、学生の博士進学率を高めることが大学教員として腕の見せどころになるはずと信じ、日々の雑用に励んでいます。

3 研究テーマ

8名もの教員が所属しているだけに、我々の研究室の研究テーマは多岐に渡ります。その研究対象は0.1 eV以下と言われるニュートリノ質量の探索から、大強度陽子加速器研究施設J-PARCにおける30 GeVの陽子ビームを用いた実験まで、実に11桁のエネルギー領域に広がっています。また、原子核研究にとどまらず、原子核物理学的手法を用いた物性研究への展開も図っています。「うちの研究室に来たら、なんでも出来るよ。」が、物理学科での4年生獲得競争における当研究室のキャッチフレーズです。以下では、バラエティに富んだ当研究室の研究テーマについて紹介させていただきたいと思います。

3.1 極端環境下におけるトリプルアルファ(3α)反応率の測定

3α 反応は ^{12}C より重い元素を合成するための戸口反応であり、宇宙での元素合成において最も重要な原子核反応のひとつです。しかし、高温や高密度な環境下における 3α 反応率には大きな不定性が残されています。 3α 反応は、 ^{12}C の 3α 崩壊閾値近傍の 3α 共鳴状態を経由します。これらの 3α 共鳴状態の大半は3つの α 粒子へ崩壊しますが、稀に脱励起して ^{12}C の基底状態へと至ります。このため、 3α 反応率を決定するには、これらの 3α 共鳴状態の脱励起確率を測定する必要があります。

3α 反応の経路を図2に示します。通常環境における 3α 反応は、主に ^{12}C の 3α 崩壊閾値に近い 0_2^+ 状態を経由しますが、 10^9 Kを超える高温環境では、より高いエネルギーを持つ 3_1^- 状態の寄与が重要になります。しかし、これまで 3_1^- 状態の脱励起確率は知られていませんでした。そこで、我々は ^{12}C と陽子の非弾性散乱を用いて 3_1^- 状態を励起し、放出される散乱陽子と脱励起後の ^{12}C を同時計測することで、 3_1^- 状態の脱励起確率を世界で初めて測定することに成功しました[2]。

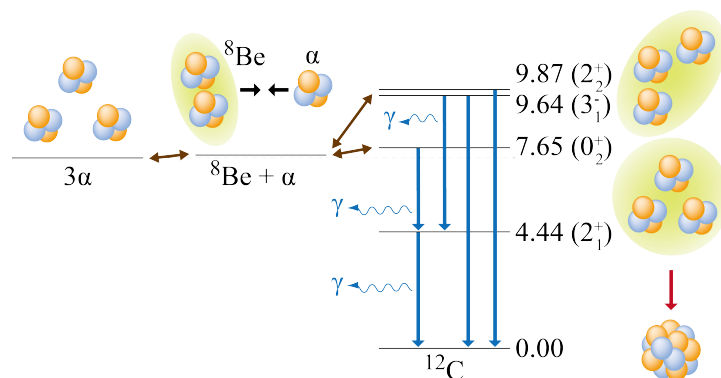


図 2: 3α 反応の経路図

また、 $\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3$ のような高密度環境では、自発的な γ 崩壊に加え、背景に存在する粒子との非弾性散乱による脱励起が増加し、 3α 反応率が劇的に増大すると指摘されています。特に、電荷を持たない中性子はクーロン障壁の影響を受けないため 3α 反応を促進する効果が大きいと考えられます。この中性子による増幅効果を評価するには、中性子と 0_2^+ 状態の非弾性散乱の断面積を決定する必要があります。しかし、 0_2^+ 状態は短寿命の 3α 共鳴状態であるため、これを直接に測定することは不可能です。そこで、我々は、詳細釣り合いの原理に基づいて、時間反転反応、すなわち、 ^{12}C と中性子の非弾性散乱により 0_2^+ 状態を励起する断面積を決定することを目指しています。この研究では、 0_2^+ 状態を励起することができる中性子エネルギーの閾値近傍 ($E_n = 8.3 \text{ MeV}$) における断面積を測定することが重要です。しかし、閾値近傍では終状態における放出粒子のエネルギーが低いため、これを通常の実験セットアップで測定することは容易ではありません。そこで、我々は MAIKo アクティブ標的 [3] を用いた測定に取り組んでいます。すでに、大阪大学強力 14 MeV 中性子工学実験装置 (OKTAVIAN) においてテスト実験を実施し、MAIKo を用いた測定の有効性を立証することに成功しています。さらに、 3α 反応率を決定するうえで重要な $E_n = 8.3\text{--}10 \text{ MeV}$ における本測定を実施するために、東北大学 CYRIC の研究グループと共同で $^{13}\text{C} + p \rightarrow n + ^{13}\text{N}$ 反応を用いた可変エネルギー単色中性子源を開発するとともに、中性子非弾性散乱の検出効率を高めるために MAIKo アクティブ標的の大型化に取り組んでいます。

3.2 原子核における α 凝縮状態の探索

原子核では、核内において 2 個ずつの陽子と中性子が結合した α 粒子が構成要素となり、核構造を劇的に変化させる現象が知られています。このとき、ボソンである α 粒子が最低エネルギー軌道に凝縮し、 α 凝縮状態を形成する可能性があります。 α 凝縮状態では、 α クラスターの運動量分布が 0 付近に集中するため、その空間分布が拡大し低密度になります。通常の原子核では、核種を問わずその密度がほぼ一定であるため、 α 凝縮状態のような希薄密度の原子核の性質は未解明のまま残されています。

α 凝縮状態は、1–3 MeV の低エネルギー α 粒子を放出しつつ軽い核の α 凝縮状態を經由して崩壊すると期待されます。そこで、我々はアルファ非弾性散乱により ^{20}Ne を励起すると同時に、励起状態からの崩壊 α 粒子を測定しました。 ^{20}Ne の励起状態から ^{16}O の $E_x = 14.1 \pm 0.5 \text{ MeV}$ 、

15.1 ± 0.5 MeV、16.1 ± 0.5 MeV のエネルギー領域へと崩壊した事象について、 ^{20}Ne の励起エネルギースペクトルを統計崩壊モデルと比較した結果を図 3 に示します。

^{16}O における 4α 凝縮状態の候補と考えられている 0_6^+ 状態の励起エネルギーは $E_x = 15.1$ MeV であり、この近傍へ崩壊した事象を選択したスペクトル [図 3(b)] では、矢印で示したピークが観測されました。しかし、これらのピークは、他のエネルギー領域への崩壊 [図 3(a)(c)] では観測されませんでした。これらの状態は、 ^{16}O の 4α 凝縮状態と強く結合していると考えられ、 ^{20}Ne における 5α 凝縮状態の有力な候補となっています [4]。

また、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 共鳴散乱の手法を用いて ^{24}Mg における 6α 凝縮状態の探索を行う新しい実験の準備に取り組んでいます。

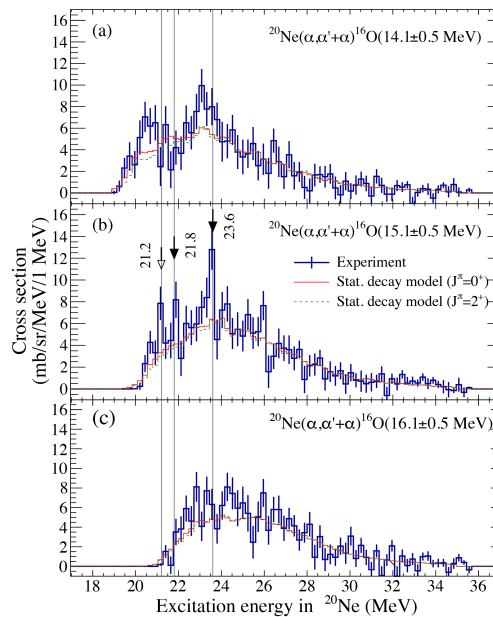


図 3: アルファ非弾性散乱後に ^{16}O の (a) $E_x = 14.1 \pm 0.5$ MeV、(b) $E_x = 15.1 \pm 0.5$ MeV、(c) $E_x = 16.1 \pm 0.5$ MeV へ崩壊する事象を選択して得た ^{20}Ne の励起エネルギースペクトル。赤実線と緑破線は、それぞれ、励起状態のスピン・パリティを 0^+ もしくは 2^+ と仮定した統計崩壊モデルの計算結果。

3.3 スピン偏極した不安定核ビームによる中性子過剰な原子核の構造研究

我々は、カナダの TRIUMF 研究所において、九州大学、高エネルギー加速器研究機構、東京農工大学のグループとともに、国際共同研究を展開しています。日本グループの持つスピン偏極した不安定核の β 崩壊の非対称性から娘核の構造を明らかにする技術と、TRIUMF 研究所が有する大強度不安定核ビーム供給施設とレーザー技術により供給される世界最高偏極度のスピン偏極ビームを融合して、軽い中性子過剰な原子核の特異な構造を解明する世界的にユニークな測定を行っています。

近年では、「逆転の島」と呼ばれる領域 ($N \sim 20$, $Z = 10-12$) において、原子核の構造解明を行っています。「逆転の島」では、安定核近傍では魔法数である中性子数 $N = 20$ が、その性質

を失い、基底状態に変形が生じています。我々は、スピン偏極した Na 同位体の β 崩壊をプローブとして Mg 同位体 ($Z = 12$) の構造を調べました。「逆転の島」の核図表上における「西側境界」、すなわち、中性子数の下限付近に位置する ^{30}Mg 核 ($N = 18$) において、図 4 に示すように、基底状態が球形であっても、低い励起エネルギー領域に様々な形状とその形状に基づくや運動状態 (変形共存) が出現することを明らかにし、Phys. Rev. C 誌において公表しました [5]。

また、「逆転の島」の「北側境界」、すなわち、陽子数の上限付近に位置する Al 同位体 ($Z = 13$) においても同様な変形共存が現れるか否かを明らかにするべく、Mg 同位体の β 崩壊測定を行いました。Mg 同位体のスピン偏極を保ったまま長距離をトランスポートすることは難しく、今回、我々の専用ビームライン「Osaka beam line」への初めてのビーム輸送では、偏極度の低い ^{31}Mg ビームしか得られませんでした。そこで、高偏極度の ^{33}Mg ビームを生成するために、TRIUMF へビームラインの改良を提案し、新規プロジェクトとして採択されました。2022 年度にも新しい実験を行えるよう準備を進めています。

さらに、 β 遅延中性子崩壊の際に放出される数十 keV から数 MeV の中性子に対し高い検出効率とエネルギー分解能を実現するために、図 5 に示すような新しい中性子検出器の開発を行いました。ビームを用いた性能試験を量子医科学研究所 HIMAC にて行い、現在、評価を進めています。

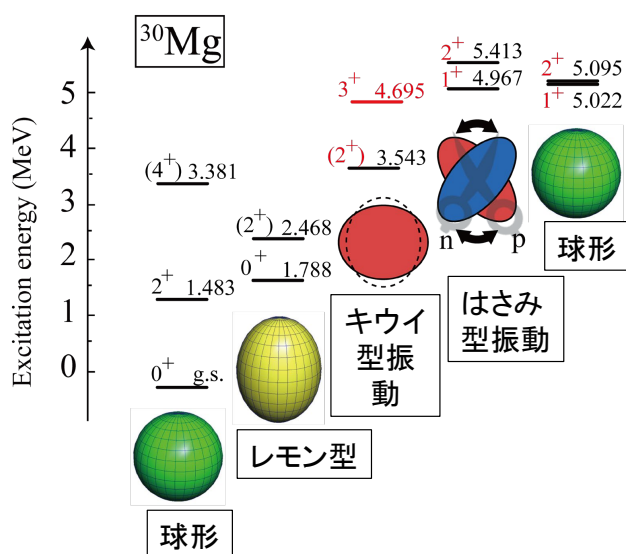


図 4: ^{30}Mg の原子核構造の模式図

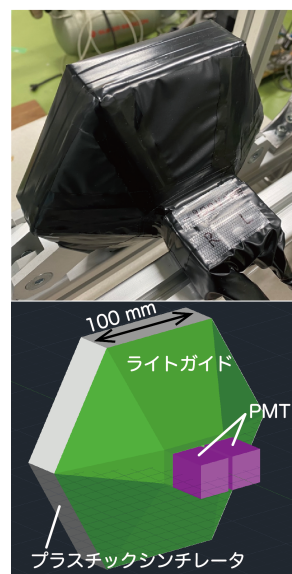


図 5: 新開発の中性子検出器

3.4 質量数 140 領域の中性子過剰核の研究

質量数が 140 周辺中性子過剰核は、宇宙での重元素合成過程である r 過程において中性子捕獲と β 崩壊を繰り返しながら質量数 230 近傍の原子核へと至る経路上にある重要な原子核です。しかし、この質量領域の原子核の生成は非常に難しいため、質量や寿命などの基本的な実験データさえ少なく、シミュレーション計算では理論的予測に基づく計算値が使われています。そこで、

中性子過剰核を世界最高強度で生成可能な理化学研究所 RI ビームファクトリーにおいて、生成限界近傍の原子核のベータ崩壊と数十 ns 以上の半減期をもつ励起状態 (アイソマー) 探査を行う国際共同研究 EURICA プロジェクトに参画し、 β 崩壊するアイソマーを発見しました。このようなアイソマーは、fission recycle (r 過程で生成された原子核が核分裂し、核分裂片からさらに重元素合成が進む過程) で生成される可能性が高いと指摘されていますが、元素合成計算に組み込まれている例は少なく、 r 過程における元素合成のシナリオに影響を与えてしまうかもしれません。

3.5 ストレンジネス核物理

茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設 J-PARC では、ストレンジネスをツールとした核媒質中でのハドロンの性質変化の研究やストレンジクォークを含む核子で構成された原子核による相互作用の研究を行っています。

通常の原子核では、アップクォークとダウンクォークで構成された陽子と中性子が核力によって束縛されています。この核力は、古くから興味深い研究対象であり、実験・理論の両面から精力的に研究が行われてきました。陽子や中性子などのバリオン間に働く核力は、それらの構成要素であるクォーク間の相互作用に由来すると考えられています。このクォーク間に働く相互作用の理解を深めるためには、アップクォークとダウンクォークだけでなく他のクォークも含めた系に拡張した研究が有効な手法です。そこでストレンジネス核物理では、アップクォークとダウンクォーク間に働く核力をストレンジクォークを含んだ世界に拡張することで、より一般的なバリオン間相互作用の理解を目指しています。

J-PARC ハドロン実験施設では、30 GeV/c まで加速した陽子を金標的に照射することで π 中間子や K 中間子を生成し、これらを 2 次ビームとして使用することで、効率的にストレンジクォークを含んだ原子核を生成しています。ストレンジクォークを含む核子はハイペロンと呼ばれ、ハイペロンを含む原子核をハイパー核と呼びます。ハイペロンには、ラムダ粒子、シグマ粒子、グザイ粒子があり、ダブルラムダハイパー核、シグマハイパー核、グザイハイパー核などについての研究がなされています。

我々は、2 個のストレンジクォークを原子核へ持ち込むことの出来る (K^- , K^+) 反応と、ハイブリッド・エマルジョン法を用いたハイパー核生成実験 (J-PARC E07 実験) を行いました。この実験では、原子核乾板中の原子核に Ξ^- 粒子を吸収させ、崩壊粒子の飛跡を原子核乾板で測定しましたが、原子核乾板中に残された飛跡の効率的探索のため、原子核乾板の前後にシリコンストリップ検出器を設置して Ξ^- 粒子の吸収点を特定しました。さらに、光学顕微鏡を用いて原子核乾板中の吸収点付近の飛跡を探索し、 Ξ^- 粒子が ^{14}N に吸収され、その後、 ^{10}Be と ^5He へと崩壊した事象を同定しました。そして、 Ξ^- - ^{14}N 系の不変質量から、この系が引力的な強い相互作用の影響を受けた束縛状態であることを示しました [6]。

また、 K 中間子ビームを ^3He 標的に照射し、(K^-, π^0) 反応によってハイパー・トライトンを生成し、ハイパー・トライトンの寿命を測定する実験にも取り組んでいます。陽子、中性子、ラムダ粒子が 1 個ずつ束縛されたラムダハイパー核であるハイパー・トライトンは、最も単純なハイパー核であるため、その物理量はハイペロン核子相互作用において重要な基本情報となります。しかし、ハイパー・トライトンの寿命と束縛エネルギーの関係について、現在の測定と理論の間

に矛盾が生じており、ハイパー・トライトン・パズルと呼ばれています。近年採用されている寿命測定の方法は、高エネルギー重イオン衝突反応を用いたハイパー・トライトンの飛行距離による間接的な手法です。我々は、 (K^-, π^0) 反応を用い、時間情報から寿命を直接測定する手法による結果を提供することで、ハイパー・トライトン・パズルに明確な結論を示し、ハイパー・トライトンから得られるハイペロン核子相互作用の情報をより明確なものとするを旨としています。

3.6 ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究・宇宙における物質起源の解明

標準理論に従えば、宇宙の初期において同じ量の「物質」と「反物質」が生成されたはずですが、現在の我々の宇宙は、「物質」だけで構成されており「反物質」からなる天体が存在する証拠は見つかっていません。「物質優勢宇宙」の謎を説明する有力な解として、レプトジェネシスシナリオが期待されていますが、このシナリオが成り立つためには、レプトン数を破るプロセスが不可欠です。「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊)」はレプトン数を保存しないプロセスであり、これを発見することができれば、レプトジェネシスシナリオの有力な証拠となり得ますが、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は非常に稀な事象 (半減期が 10^{26} 年以上) であるため、これを観測するには、如何にバックグラウンドを低減させた高感度の検出器を作れるかが鍵となります。

我々は $0\nu\beta\beta$ 崩壊観測を目的として、 ^{48}Ca を標的原子核とした CANDLES 計画を推進しています。 ^{48}Ca は全ての $\beta\beta$ 崩壊原子核のなかで最も崩壊 Q 値が大きく (4.27 MeV)、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象における β 線のエネルギーは、原始放射性核種から放出される β 線/ γ 線の最大エネルギー (γ 線の場合は ^{208}Tl 崩壊における 2.61 MeV、 β 線の場合は ^{214}Bi 崩壊における 3.27 MeV) よりも大きいため、バックグラウンドの少ない測定を実現する上で最も有利と考えられます。我々は、 CaF_2 シンチレータを用いた CANDLES-III 検出器を神岡地下実験施設に設置し、バックグラウンドの少ない高感度測定を実施しています。

近年は、データ解析の高度化にも取り組んでいます。図 6(a) に、CANDLES-III 検出器において 93 個の CaF_2 シンチレータを用いた 130 日間の測定から得られたエネルギースペクトルを示します [7]。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象の信号が期待される崩壊 Q 値の領域 (4.17—4.48 MeV) には、 CaF_2 結晶中の放射性不純物 (^{232}Th 起源の ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊、および、 ^{208}Tl 崩壊) に由来すると推定される多数のバックグラウンド事象が観測されています。我々は、バックグラウンド事象である ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊事象を除去するには、機械学習による信号波形解析が有効であることを突き止め、これまで使用してきたフィッティングによる波形解析を超える除去効率を実現しました。 CaF_2 シンチレータを発光させた全事象 (細実線) から、液体シンチレータ (LS) を発光させた事象と ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊事象を除去すると破線のエネルギースペクトルが得られ、さらに、 ^{208}Tl 事象の除去を行うと太実線のスペクトルが得られました。

図 6(b) に、 ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊と推定された事象のエネルギースペクトルを示します。 ^{212}Bi 崩壊から 50 ns 以上遅れて ^{212}Po が崩壊した事象であれば、容易に ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊と識別できるため、これらの事象の計測数から時間差が 2 ns 以上の ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊事象数を推定し、破線のエネルギースペクトルを得ることができます。このエネルギースペクトルと、機械学習解析によって ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊と推定された事象のエネルギースペクトル (太実線)、フィッティングによる従来の解析手法で得られたエネルギースペクトル (細実線) を比較すると、機械学習解析の導入によって、3.4 MeV 以上のエネルギー領域におけるバックグラウンド事象の厳格な除

去が可能となり、バックグラウンド除去効率が飛躍的に改善していることが分かります。また、 ^{232}Th 起源のバックグラウンドを本質的に除去するために、より ^{232}Th 不純物の少ない CaF_2 結晶の開発にも成功しています。

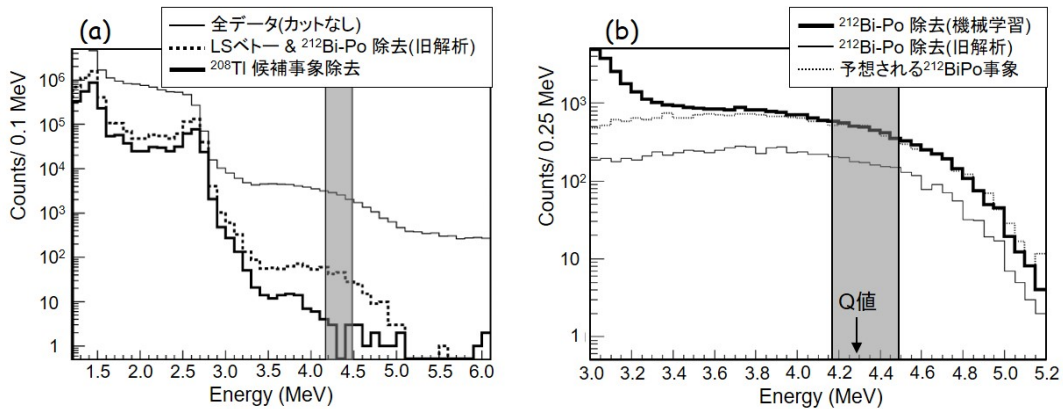


図 6: (a) CANDLE III 検出器で得られたエネルギースペクトル。(b) 機械学習解析による手法 (太実線) と従来の解析手法 (細実線) によって ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊と推定された事象のエネルギースペクトルと、予測されるエネルギースペクトル (破線) の比較。

3.7 レプトン普遍性の破れの探索

我々は、荷電中間子 K^+ から発生する $K^+ \rightarrow e^+\nu$ (K_{e2}) 崩壊と $K^+ \rightarrow \mu^+\nu$ 崩壊 ($K_{\mu 2}$) の分岐比の比 $R_K = \Gamma(K_{e2})/\Gamma(K_{\mu 2})$ を測定することで、レプトン普遍性の破れを探索する実験 (J-PARC E36 実験) を実施し、そのデータ解析を進めています。

J-PARC E36 実験では、 K^+ ビームを、超伝導トロイダル電磁石の中心部分に設置したアクティブ標的に静止させて崩壊粒子を検出する静止 K^+ 法を採用しました。 K^+ 崩壊によって生じた e^+ と μ^+ を、電磁石によって運動量分析し、その飛跡を測定しました。粒子識別は TOF 測定、エアロゲルチェレンコフ検出器、鉛ガラスチェレンコフ検出器を用いて行い、 K^+ 崩壊から生じるガンマ線は、静止標的の回りを囲むように設置された 768 本の CsI(Tl) モジュールで構成されるカロリメータで観測しました。 R_K の決定には、構造依存放射と呼ばれる γ 線を放出する崩壊チャンネル $K^+ \rightarrow e^+\nu\gamma$ ($K_{e2\gamma}$) がバックグラウンドになるので、その寄与を差し引く必要があります。また、ビームに含まれるバックグラウンドによる統計の損失も正確に見積る必要があるため、慎重な解析を行っています。

3.8 原子核における陽子・中性子・核子密度分布の測定

不安定原子核の核構造や核物質の状態方程式を明らかにするため、原子核衝突における相互作用断面積・核子剥離断面積・荷電変化断面積等を利用して、原子核の平均二乗半径である核物質半径や核内における陽子/中性子密度分布を決定することを目指しています。物質中におけるビーム粒子数の減衰を観測する透過法を用いた相互作用断面積の測定を通じて、入射核種の核物質半径を求めることができますが、入射エネルギー依存性を調べることにより、単なる半径だけでなく、核子密度分布まで導出することが可能です。さらに、半径や密度分布を陽子/中性子ごとに

決定できれば、詳細な核構造の情報を引き出せるばかりでなく、そこから得られる中性子分布と陽子分布の差「中性子スキン厚」を通じて、核物質の状態方程式の手がかりを得ることができます。そこで、荷電変化断面積（陽子数が変化する反応の断面積）の測定から陽子分布半径を導出する手法の開発や、核子剥離断面積とスキンの厚さとの関連についても研究を進めています。

我々は、 $^{42-51}\text{Ca}$ 同位体における核物質半径の変化を調べるために、理化学研究所 RI ビームファクトリーにおいて、350 MeV/u に加速された ^{238}U ビームの飛行核分裂反応を用いて生成した $^{42-51}\text{Ca}$ 同位体の相互作用断面積を測定しました。測定された相互作用断面積を解析して得られた核物質半径を図 7 に丸印で示します。この図に見られるように、 $^{42-51}\text{Ca}$ 同位体では、二重魔法数核 ^{48}Ca の中性子数 $N = 28$ を境に核物質半径が急激に増加し始めることが発見され、この増加率はこれまでに知られていた荷電半径の増加率を大きく上回ることを明らかにしました。この核半径増大は、 ^{48}Ca 芯の周りの一粒子軌道に中性子を付加するという単純な描像から期待される核半径の増大率よりも遥かに大きく、付加した中性子が、 ^{48}Ca 芯をあたかもふやけさせたかのように膨らませている (図 8) ことを示唆しています。この発見は、Phys. Rev. Lett. 誌 [8] に掲載されたほか、プレスリリースされ科学新聞 (2020 年 3 月 27 日, 3771 号) にも取り上げられました。

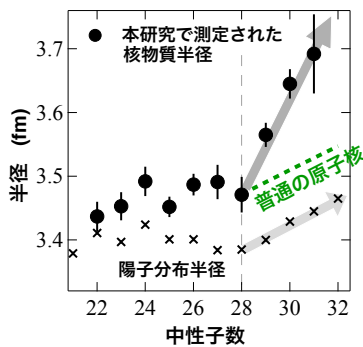


図 7: Ca 同位体の核物質半径

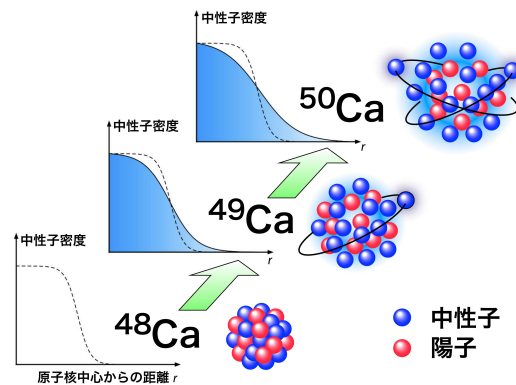


図 8: $N \geq 28$ の Ca 同位体で ^{48}Ca 芯が膨れる様子

中性子過剰核における中性子分布半径と陽子分布半径の差、いわゆる、中性子スキンの厚さは、非対称核物質の状態方程式パラメータと密接な関連があり、このパラメータは、中性子星の構造や超新星爆発メカニズムなどの宇宙物理学の問題を明らかにするための鍵といわれています。そこで、我々は、中性子剥離断面積と中性子スキンの厚さには関係があるはずとの先行研究をもとに、量子医科学研究所 HIMAC において、 $^{13-15}\text{B}$ および $^{14-16}\text{C}$ について Be, C, Al 標的に対する核子剥離断面積の測定・分析を行いました。図 9 に示すように、中性子だけが剥離する反応の断面積 $\sigma(\Delta N)$ と陽子が 1 つ剥離する反応の断面積 $\sigma(-1p)$ の実験値の比 $\sigma(\Delta N)/\sigma(-1p)$ を中性子数ないし中性子スキン厚の理論値の関数としてプロットすると、図 9 の下段から見て取れるように、 $\sigma(\Delta N)/\sigma(-1p)$ は、中性子スキン厚の理論値と非常に良い相関を持ち、中性子スキン厚の測定に有効な観測量であることが明らかになりました。

さらに、核反応の前後で陽子数が変化する反応の断面積 (荷電変化断面積) を測定することで、陽子分布半径を決定することを試みています。しかし、実際に陽子分布半径が既知の $^{7,9,10,11,12}\text{Be}$ や $^{111-126}\text{Sn}$ についての荷電変化断面積を測定し、陽子分布半径と比較してみたところ、必ずし

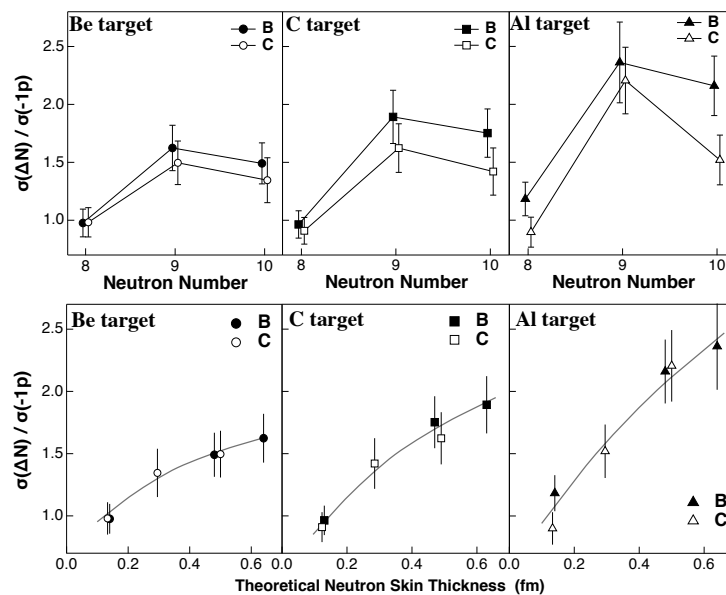


図 9: $\sigma(\Delta N)$ と $\sigma(-1p)$ の比と中性子数 (上段)、中性子スキン厚の理論値 (下段) の関係。左列、中央列、右列は、それぞれ、Be, C, Al 標的に対する測定結果。下段の実線は傾向を見やすくするためにデータ点をなめらかな曲線でフィットしたもの。

も分かりやすい相関は認められませんでした。我々は、これが原子核衝突直後の荷電粒子蒸発過程に起因しているのではないかと着想し、 p , Be, C, Al の 4 種の標的に対する測定を行いました。荷電粒子蒸発を他の標的よりも起こしやすと考えられる p 標的に対する測定結果を用いて、荷電粒子蒸発効果の除去を試みたところ、Be, C, Al 標的に対する実験データを Glauber 計算により系統的に再現することに成功し、荷電変化断面積が陽子分布半径を決定する手法として有望であることを示すことができました。

3.9 β 線検出核磁気共鳴法を用いた物質科学研究

スピン偏極した不安定核から放出される β 線角度分布の非対称性を利用する β 線検出核磁気共鳴 (β -NMR) 法は、従来の安定核を用いる NMR 法に比べ約 10^{10} 倍以上もの高い NMR 検出感度を示します。この特性により、物質中の非常に希薄な不純物原子やイオンの振る舞いなど、他の実験手法では得られない物性データの提供が可能となります。我々は、様々な元素のスピン偏極不安定核ビーム生成法を開発し、これらを用いて β -NMR 法による物質科学研究を行っています。以下に最近の研究について紹介します。

3.9.1 水に打ち込まれた窒素イオンの化学状態

量子医科学研究所 HIMAC において、核子当たり 70 MeV の ^{18}O ビームにより生成した偏極 ^{17}N ($I = 1/2$, $T_{1/2} = 4.2$ s) ビームを水の中に打ち込み、 β -NMR スペクトルの測定を行いました。図 10 に示すように、ニトロメタン中の共鳴周波数からおよそ -200 ppm と 300 ppm シフトしたところに 2 本の共鳴線が観測されました。これより、水に打ち込まれた窒素イオンが少な

くとも2種類の異なる化学状態を形成することを明らかにしました。現在は高分解能化を図り、5 ppm (FWHM) の分解能を実現しています。-200 ppm 付近の成分については、まだ誤差が大きいのですが、水素核 ^1H スピンとのスピン-スピン結合による分裂の可能性を示唆していると考えられています。分裂パターンから化学種同定を目指し研究を継続しています。

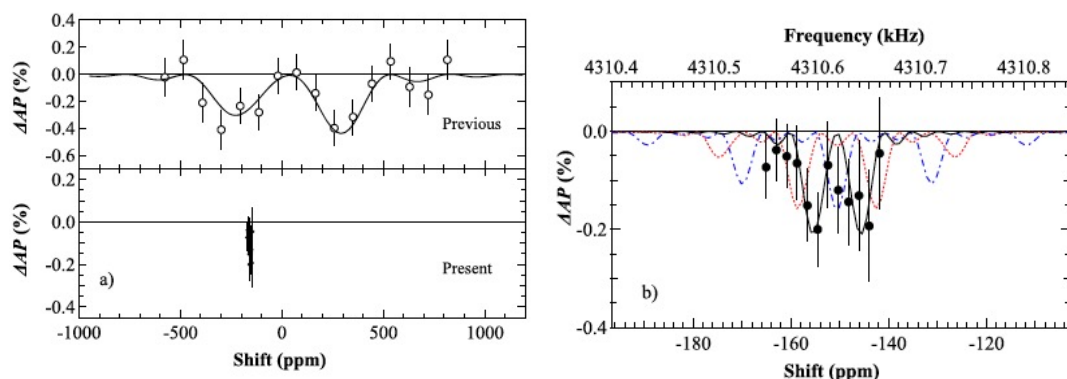


図 10: 水中における ^{17}N の β -NMR スペクトル。横軸はニトロメタン中の共鳴線からのシフト。(a) 分解能 200 ppm (上) と 5 ppm (下) の結果。(b) 分解能 5 ppm のスペクトルの拡大図。実線は doublet を仮定した fitting 結果。点線と一点鎖線はそれぞれ NH_3 および HN_4^+ が形成された場合に予想されるスペクトル。

3.9.2 酸化物形燃料電池材料中の酸素伝導特性

NMR 観測が可能で、即ち核スピンをもつ酸素の安定同位体は、天然存在比 0.038% の ^{17}O のみであり、従来の NMR 分光を行うのは困難な状況にあります。そこで我々は、放射性酸素同位体を活用すべく HIMAC および筑波大学 6 MV タンデム加速器で高偏極 ^{19}O ($I = 5/2$, $T_{1/2} = 27$ s) ビームの開発を行いました。これを用いて酸化物形燃料電池 (SOFC) の電解質材料である Y_2O_3 安定化 ZrO_2 (YSZ) 中の ^{19}O のスピン-格子緩和時間を測定しました。現在、その結果から酸化物イオン (O_2^-) の伝導特性について考察中です。

3.9.3 β -NMR によるイメージング装置の開発

医療現場で不可欠な画像診断法である磁気共鳴撮像 (MRI) 法は、感度の問題によりほぼ水素核 ^1H の利用に限られています。我々は、様々な元素による MRI の実現を目指し、プラスチックファイバーシンチレータによる β 線トラッキング機能を追加した 3 次元イメージング (β -MRI) 装置の開発を行っています。

4 おわりに

本稿では大阪大学大学院理学研究科 物理学専攻 原子核実験研究室を紹介させていただきました。本稿の冒頭部分を執筆して、我々は菊池正士・湯川秀樹以来の原子核物理の系譜に連なる研究室を構えていることを改めて感じ、その重責に身の引き締まる思いがしました。理学部で最も

大きな講義室である D501 講義室には、大阪帝国大学の初代総長である長岡半太郎の揮毫による「勿嘗糟粕」(糟粕を嘗むる勿れ)の額が掲げられています。「すでに誰かが美酒をしばったあとの「糟粕」をなめてはいけない」、すなわち、「古人が残した業績を後追いするようなことはやめ、常に独創的であれ」という訓示であると受け止めています。実に耳に痛い金言であり、普段の研究において、目先の成果にとらわれて糟粕を求めているかと自問せずにはられません。これからも「勿嘗糟粕」の理念を心に留めて、研究室一丸となって、精進していきたいと思います。

参考文献

- [1] 福井 崇時, 原子核研究 **53**(1), 91–104 (2008).
- [2] M. Tsumura, T. Kawabata *et al.*, Phys. Lett. B **817**, 136283 (2021).
- [3] T. Furuno, T. Kawabata *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **908**, 215–224 (2018).
- [4] S. Adachi, T. Kawabata *et al.*, Phys. Lett. B **817**, 136283 (2021).
- [5] H. Nishibata, A. Odahara *et al.*, Phys. Rev. C **102**, 054327 (2020).
- [6] S. H. Hayakawa *et al.* (J-PARC E07 Collaboration), Phys. Rev. Lett. **126**, 062501 (2021).
- [7] S. Ajimura *et al.* (CANDLES Collaboration), Phys. Rev. D **103**, 092008 (2021).
- [8] M. Tanaka, M. Fukuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 102501 (2020).