

## Ⅱ 平成 30 年度の特筆すべき取組／令和元年度の計画

【平成 30 年度実績】

# 1. 電子光理学における共同利用・共同研究拠点活動の推進

No.33 ②-4 国際共同利用・共同研究拠点及び共同利用・共同研究拠点の機能強化

実績報告

1)本センターは平成 23 年度より共同利用・共同研究拠点(電子光物理学研究拠点)として認定され、拠点活動を推進してきた。拠点活動開始直前の東日本大震災によって主要実験設備である大型電子加速器が大きく損傷を受け、運転停止を強いられたが、全てのセンター構成員をあげて施設全体の復旧作業に取り組み、本格的な加速器共同利用を平成 26 年度より開始した。平成 30 年度は、公募型の共同利用・共同研究課題採択数は 22 件(内国際共同研究 2 件)であり、採択率は 92%であった。採択課題は 2 年間有効であるが、実施課題数はセンター長裁量枠も含めて 30 件(内継続課題数 5 件)であった。平成 29 年度と比較すると 6 件実施課題が減少しているが、1ヶ月以上に渡る長期実験も積極的に推進しているので実施課題数は重要ではない。共同利用者の年間延べ人数は 1173 人に昇り、拠点活動開始後で最大となった。このうち学生および外国人研究者はそれぞれ 30%および 3%であった。震災以降は電気料金が高騰し、長時間の加速器運転は財政的に極めて難しくなったが、センター内のすべての機器の消費電力を調査し、それぞれを効率的な動作条件を課すことで消費電力を制限するプロトコルを開発したことから、年間運転時間を徐々に増やす事ができ、平成 30 年度は震災後最大の 2200 時間を達成した。しかしながら電力単価の値上げは続いており、またセンターは単独で特別高圧を受電していることから他部局に比べ 1 割以上高いこともあり、これ以上の運転時間増加は見込まれない。そのため、以前から構想を練ってきた加速器の省電力化改造を実現するために財務部・理学研究科に請願して必要経費を借入することができ、平成 31 年 3 月に実施した。これにより平成 31 年度から契約ピーク電力を下げるができるため、平成 30 年度と同等以上の運転時間を確保できると期待している。

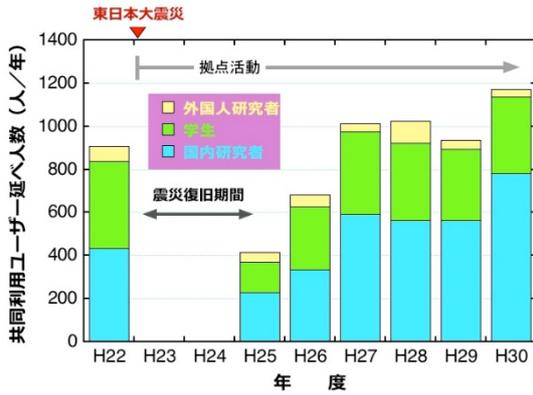


図1. 年間延べユーザー数

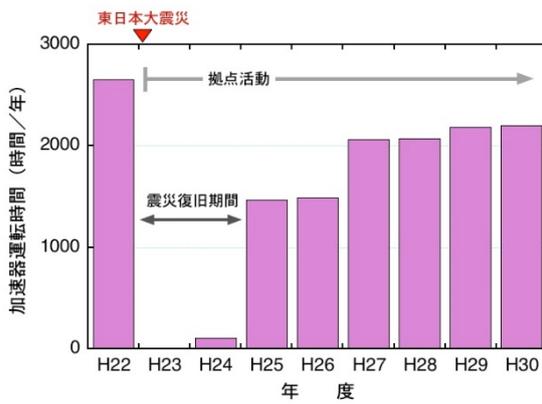


図2. 年間加速器運転時間(ビーム出力時間)

2) 共同利用・共同研究者の異分野間の交流を更に推進するために、平成 31 年 3 月に第2回拠点シンポジウム(共同利用成果発表会)を開催し、約 100 名のセンター利用者が集った。利用者会(UC-ELPH)も同時に行い、センターの加速器次期計画を議論した。センターの加速器は単なる老朽化のみならず先端的なビーム性能を維持できないことも明らかであることから、より研究を高度化し、また新たな課題開拓に最も相応しい超伝導電子加速器の設置可能性等について意見交換を行った。また、新放射光施設における入射器からの 3GeV ビームを用いるハドロン物理の可能性も議論した。

3) 拠点シンポジウムではユニークな研究活動を展開している大学／研究所等から講演者を迎え、2回目の「挑戦的拠点フォーラム」を開催した。昨今はセンターの電子加速器を用いて製造した放射性同位元素を様々な分野に提供する機会が増加していることから、東京大学特認教授の中西友子先生(現星薬科大学学長)を招いて、生物学における放射線利用に関する講演を拝聴し、この放射線科学分野の広い連携をセンターを中心として形成して行く方向性を見いだした。

4) 平成 30 年度は第2期共同利用・共同研究拠点の中間評価が行われた。今回は相対評価で行われ、約 30%の拠点がB以下の評価となる中で、活発な研究活動と分野コミュニティへの貢

(25：電子光理学研究センター)

献が大きく評価されAを頂く事ができた。また、中間評価による拠点経費(認定に伴う機能強化経費)が傾斜配分されることになったが、センターは僅かであるが増額を得る事ができた。

[取り組み H30-1.jpg](#), [取り組み H30-2.jpg](#)

## 2. 技術職員のキャリア形成・スキルアップ

### No.29 ①-4 技術系研究支援者のキャリア形成の促進

#### 実績報告

1) 本学は多彩な研究力を引き出す環境・支援体制の整備による機能強化を掲げているが、加速器施設である当センターにおいて技術系研究支援者(技術職員)は極めて重大な役割を果たしており、単なる技術支援に留まらず学生教育にも大きく貢献している。技術職員のキャリア形成およびスキルアップは、センターの研究・教育活動はもちろん、共同利用・共同研究拠点活動の質の向上に直接関わるものである。センターではかねてから技術職員に国内学会・研究会のみならず国際ワークショップ・会議への参加を推奨している。平成30年においては11月にタイ・チェンマイで開催された第1回「International Conference on Radiation and Emission in Materials」に2名の技術職員が参加し、それぞれ英語による口頭発表を行った。電子線による放射性同位元素製造の現状およびチェレンコフ光を利用した電子ビーム診断の研究(技術職員自らが研究代表者として科研費を獲得している)に関する発表であるが、世界的にユニークな研究活動であるため多くの質問もあり、それらに対しても英語によるきちんとした受け答えを行う事ができた。尚、日本加速器学会の年会(例年8月上旬に開催、平成30年度は新潟県長岡市)にはセンターの技術職員4名が全員参加しており、2名がポスター発表を行った。

2) センターでは海外研究機関との交流を推進しており、JSPSの2カ国間交流事業を通じて中国との交流を深めてきたが、平成30年度では教員2名と大学院生2名に加え技術職員1名で中国科学技術大学および華中科技大学を訪問し、大学および施設の見学等を行った。ここでも技術職員は英語での意見交換をおこない、加速器のみならず大学における技術支援に関する知見を得ることができた。

3) 加速器の基本原理や先端技術を学ぶ機会の提供と技術継承および人材育成に役立てる講義 ATUS (Accelerator Technology Update School) を高エネルギー加速器研究機構大学等支援事業の資金・人材提供を受け、理学研究科技術職員および大学院生を対象に、技術職員チームが毎年開催している。平成30年度は、全国の加速器施設の研究者と技術者に声かけをして加速器の維持・改良および超伝導技術等について通算5回目の ATUS を実施した。参加機関の内訳は、大学共同利用機関2、国立大学附置研究所4、県立研究機関1、民間企業3であり、計50名以上の参加者があった。



### 3. 基礎研究における国際共同研究体制の推進

No.19 ①-1 長期的視野に立脚した基礎研究の充実

実績報告

1)平成 28 年度より日本学術振興会の二国間交流事業共同研究／セミナー(相手国:中国)に、京都大学エネルギー理工学研究所とともに参画した。相手国の中心機関は中国科学技術大学であるが、平成 30 年度では大学院生の研究発表を中心とした研究会を中国科学技術大学(合肥市)と華中科技大学(武漢市)で開催した。センターからの参加者は 5 名であったが、精華大学や北京大学の若手研究者や大学院生とも交流した。中国科学技術大学では新しい軟X線放射光源計画が認められ、今後も協力関係を維持して行く事を確認した。

2)タイ・チェンマイ大学プラズマビーム物理研究所およびタイ国立電子コンピューター技術研究センター(NECTEC)と、テラヘルツ波の生成・産業利用に関する研究協力を更に推進した。平成 30 年 10 月に、NECTEC から2名の研究者が訪れ、センターの光源加速器を用いてテラヘルツ波による危険薬物検出のテスト実験を行った。

3)新たに開始する低エネルギー電子ビームによる精密電子散乱実験における陽子半径測定研究を国際共同研究として開始した。日本学術振興会外国人研究者招へい(長期)プログラムによる米国ハンプトン大 Michael Kohl 博士の今年度末より 10 ヶ月滞在が予定されている。

4)フランスの放射光研究所である SOLEIL を訪問し、次世代加速器とされるレーザープラズマ加速に関する意見交換を行い、今後の開発研究の協力について意見交換を行った。国内では電子光センターも参画していた内閣府 ImPact 事業が平成 30 年度で終了し、その大部分が JST の未来社会創造事業に引き継がれることもあり、これからの協力体制は更に重要であると互いに確認した。

3)他研究機関との間で行っている国際共同研究のテレビ会議のみならず他大学の留学生を交えたミーティング等も英語会話で行っており、大学院生や技術職員の国際的なコミュニケーション能力の涵養を図っている。加えて、教員や技術職員あるいは学生を問わず、海外での会議／研究会等出席から帰国後には、研究関連に留まらず衣食住環境や習慣・風土などについても広い話題の報告会を開催してグローバル視点の育成環境を形成している。

## 4. 自然科学の面白さの発信

No.36 ②-2 知縁コミュニティの創出・拡充への寄与

実績報告

1)当センターが保有する大型電子加速器群・大型粒子検出器を中心に、地域市民及び小中高生を中心とした一般向けの自然科学の面白さを発信する施設公開事業を隔年で行っている。平成30年度は4月に開催したが、天候に恵まれない寒い日であったにもかかわらず200名以上の来客を迎えた。加えて、先端研究機器を配した大型加速器を間近にして自然科学研究の機会を提供するために、東北大学理学部の学部学生を対象とした見学会を随時開催した。



図1 一般公開の案内ポスターと見学風景

2)「理科離れ」という言葉が知られているが、近年は増々中学生、高校生の理科教育が問題視されている。平成30年度の全国学力・学習状況調査(全国学力テスト)のアンケート調査でも中学生が学年があがるとともに理科を敬遠している状況が顕著になっている。センターでは”自然科学研究の人材育成は小中高から始まるべきである”という考えをもって一般公開の他にも公開講座や特別授業、出前授業等を精力的に推進し、自然科学の面白さを社会に発信している。平成30年度では、一般市民を対象とした公開講座を3回(「最も軽い水素から最も重いニホニウムまで」、「凝縮系核反応 一研究開発の現状と市民の暮らし」、「電子光物理学研究センターの科学」)、高校生を対象にした授業形式講座を3回(「我々の身体は何からできているか」、「元素と原子核」、「電子光物理学研究センターの科学」)、中学生を対象にした授業形式講座を2回(「宇宙での元素合成」、「元素をつくる」)開催した。センターで行う場合は加速器見学会も同時に行い、出前授業では教諭も聴講できるようにしている。

取り組み H30-4.jpg

## 5. ハドロン物理学の新展開

No.33 ②-4 国際共同利用・共同研究拠点及び共同利用・共同研究拠点の機能強化

実績報告

クォークが強い相互作用で結びつけられた核子や中間子等のハドロンの未知の共鳴励起状態や崩壊を電子光ビームで精密に探り、強い相互作用の基本理論である量子色力学を検証することで、物質の質量とその起源の謎を解き明かす研究が世界各地の基礎科学研究施設で推進されてきた。電子光物理学センターが運用している 1.3GeV 電子シンクロトロンを用いて発生する高エネルギー制動放射  $\gamma$  線を用いたハドロンの光反応研究が進行中である。平成 29 年度には、これまで知られていなかった 6 個のクォークの結合したダイバリオン粒子の存在を明らかにし、関連分野の大きな注目を浴びており、研究グループの中心である石川貴嗣助教は平成 29 年に由緒ある東北大学理学研究科物理系同窓会賞(森田記念賞)を授与された他、関連分野の国際会議等で頻繁に招待講演を行っている。生成確率が非常に小さいダイバリオンの精密な構造を調べるために 2000 時間以上のマシンタイムが配分され、実験データが蓄積されている。一方、エネルギー領域が異なるハドロン研究が大阪大学核物理研究センターとの拠点間連携事業として SPring-8/LEPS2 ビームライン(放射光ビームラインとは異なる)における推進されており、電子光物理学研究センターで開発し世界最高エネルギー分解能を持つ  $\gamma$  線検出器(BGOegg)が平成 28 年から本格的に稼働しており、ハドロン質量起源の解明に向けた実験が継続中である。電子光物理学研究センターを中心にしたハドロン物理研究活動が世界的に支持されその新展開が期待されており、また宇宙誕生の瞬間に物質がどのように質量を得たのか等の解答を求める研究は人々の自然科学探究心の育成に貢献すると考えられる。

1 [press20190107\\_dibaryon.pdf](#)

平成 31 年 1 月 7 日

報道機関 各位

東北大学電子光物理学研究センター

### 重陽子の励起状態の観測に成功 クォークの閉じ込め問題に迫る！

#### 【発表のポイント】

- 本研究で 6 つのクォークからなる重陽子の励起状態(ダイバリオン共鳴)<sup>(注1)</sup>の観測に成功
- クォークの閉じ込め問題に新たな知見

#### 【概要】

東北大学電子光物理学研究センターの石川貴嗣助教、清水肇名誉教授、笠木治郎太名誉教授、東北大学大学院理学研究科の前田和茂名誉教授、高エネルギー加速器研究機構の小沢恭一郎准教授らによる同センターでの共同研究において、大強度の高エネルギー光子ビームを重水素標的に照射することで、6 つのクォークからなる重陽子の励起状態(ダイバリオン共鳴)の観測に成功しました。

この成果は強い力の重要な性質である「クォークの閉じ込め問題<sup>(注2)</sup>」について新たな知見を与えます。さらにダイバリオン共鳴の観測は、複数のクォークと反クォークから構成されるハドロンの中で新たな形態の存在を明らかにしただけでなく、原子核を束縛する核力の理解を深めるとともに、未だよく理解されていない核物質の状態方程式や中性子星の内部構造に対して極めて重要な情報をもたらします。

本研究の結果は、2019 年 1 月 4 日に国際的な物理専門誌「Physics Letters B」にオンライン出版されました。

6 クォークからなる  
ダイバリオン

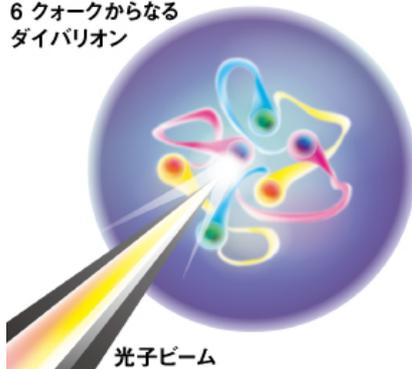


図: 高エネルギー光子ビームによる重陽子標的からのダイバリオンの生成

## 【詳細な説明】

### 1. 背景

世の中のすべての物質は素粒子であるクォークと反クォーク、およびレプトンと反レプトンからできています。そのうち強い力を受けるクォークと反クォークは、単体としては存在せず、複数が集まってハドロンという粒子の形で存在しています。ハドロンのなかでは原子核を構成する陽子や中性子（これらをまとめて核子と呼ぶ）が最も身近な粒子ですが、これらの中に働く核力ですら未だよく理解されているわけではありません。1つの陽子と1つの中性子の弱い束縛系として知られる重陽子に、原子核としての励起状態はありませんが、より高エネルギー状態にすれば1つの粒子の中で6つのクォークが激しく動き回るエキゾチックな「ダイバリオン」（図1右）に変化すると期待されています。ダイバリオンのバリオン数<sup>(注3)</sup>はバリオン数1/3のクォークが6つなので2です。しかしながらバリオン数が2であっても単に2つのバリオン(クォーク3つで構成されるハドロン)が近くにあるだけではダイバリオンとは見なされず、1つの粒子として振る舞っている(6つのクォークが相互作用し続けている)必要があります。

一般にダイバリオンを生成するには、2つのバリオンの系が0.5~1.5 GeV（5億~15億電子ボルト）といったエネルギーをもつ（高励起状態になる）必要があります。またダイバリオンは非常に不安定な粒子であり、生成とほぼ同時に崩壊します。そのため核子どうしの衝突では中間状態としてダイバリオンが生成されているかどうかを判断するのは非常に難しくなります。高エネルギーの光子ビームやメソンビームを重陽子に入射する場合には、重陽子中の核子を標的とし、あたかも自由空間の核子を標的した反応過程である「準自由過程」（バックグラウンドとなる事象）が起こりやすく、このとき標的とならなかったもう一つの核子は傍観者として反応に関与しません（図1左）。すなわち高励起のバリオンと核子が単に近くにあるだけの状態ができやすくなっています。

中性子星の中心部などの高密度状態で現れると期待されるエキゾチックなダイバリオン状態が本当に存在するのかわからないのか、存在するときどのような性質—特に質量、幅（寿命に対応）、空間的な広がり—となっているかが強い力が織りなす世界を知る上で非常に重要な情報となります。

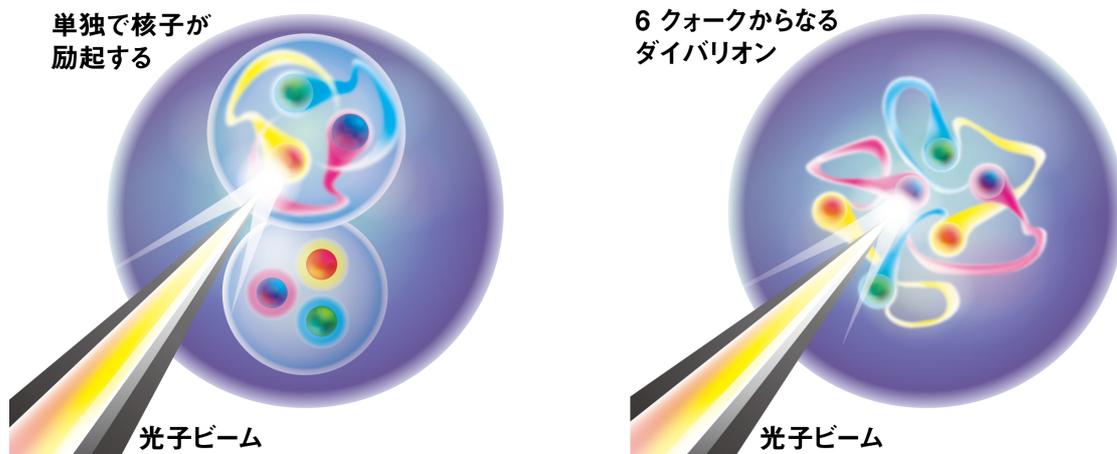


図1: 高エネルギー光子ビームによる重陽子標的からのダイバリオン生成。

左は光子ビームを照射することで重陽子のうち、一つの核子が単独で励起している状態（高励起バリオン）を表します。この場合には、高励起バリオンと残った核子は相互作用し続けられないのでダイバリオンとは見なされません。

右は光子ビームを重陽子の照射することで、6つのクォークが相互作用し続けているダイバリオンを表します。

## 2. 研究手法と成果

東北大学電子光理学研究センターの大強度エネルギー標識化光子ビームを液体重水素標的に照射し、重陽子の励起状態を生成し、崩壊して発生した2つの $\pi^0$ メソンと重陽子すべてを検出すること ( $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応) でダイバリオンの観測に成功しました。 $\pi^0$ メソンは、生成してすぐに2つのガンマ線に崩壊するので、合計5つの粒子を検出しなければならず、これには同センターの光子ビームラインIIに設置された基幹検出器である大立体角電磁カロリメータ FOREST(図2)が有効に活用されています。光子ビームを重陽子に照射し、重陽子と2つの $\pi^0$ メソンを終状態として検出する反応に対する全断面積あるいは微分断面積（反応の起こりやすさの指標）の測定は、2017年に先行的に発表した成果報告を含めて世界初となっています。

先行的に発表した成果報告:

T. Ishikawa *et al.*, Physics Letters B 772, 398 (2017).

<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.physletb.2017.04.010>

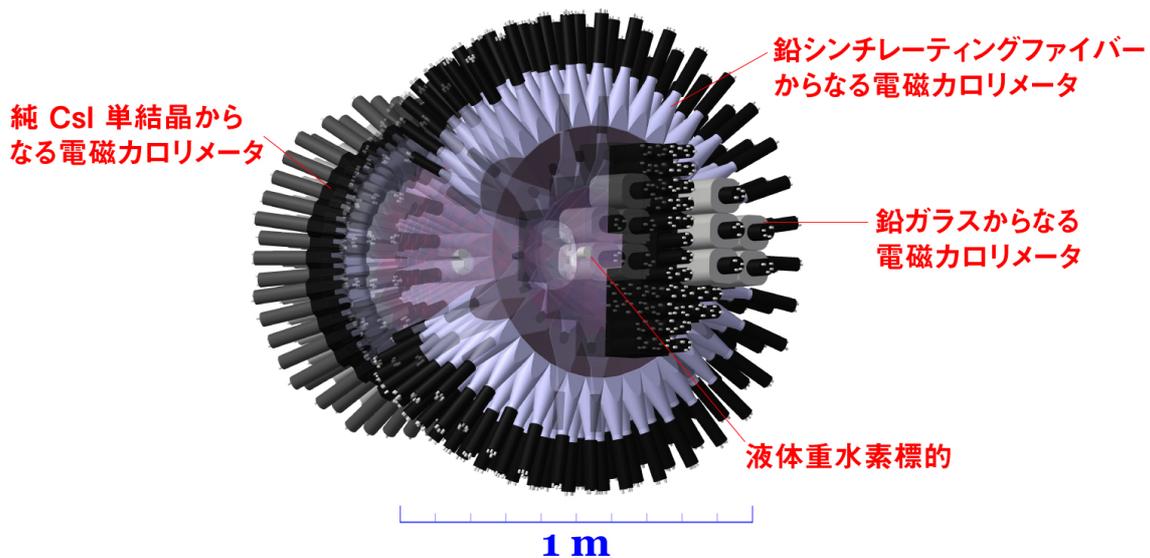


図2: 大立体角電磁カロリメータ FOREST。純 CsI 単結晶、鉛シンチレーティングファイバー、鉛ガラスからなる3つの電磁カロリメータを組み合わせた検出器であり、各電磁カロリメータの前面には荷電粒子を識別するための薄いプラスチックシンチレータが複数枚配置されています。

私たちがダイバリオンの観測に成功した  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  反応では、終状態に重陽子と2つの中性メソンが含まれることが最大の特徴であり、準自由過程が抑制され、ダイバリオン生成を浮き彫りにする条件になっていました。準自由過程で  $\pi^0$  メソンが2つ生成される反応や1つ生成される反応では、重心系での重陽子の角分布がそれぞれ強い後方ピークや側方ピークを示します。しかしながら実験で測定された角分布はほぼフラットであり、アイソスピン<sup>(注4)</sup>  $I = 0$  の  $R_{IS}$ 、 $I = 1$  の  $R_{IV}$  なるダイバリオンを中間状態として

$$\gamma d \rightarrow R_{IS} \rightarrow \pi^0 R_{IV} \rightarrow \pi^0 (\pi^0 d)$$

なる順次過程(図3上)が支配的であるということがわかりました。  $R_{IS}$  として質量 2.47 GeV、幅 0.12 GeV および質量 2.63 GeV、幅 0.13 GeV のダイバリオン (図3左下)、  $R_{IV}$  として質量 2.15 GeV、幅 0.09 GeV のダイバリオン (図3右下)の観測に初めて成功したことになります。  $R_{IS}$  とのダイバリオン2つについてはこれまで理論的に全く予言されていない新規のものとなります。  $R_{IV}$  のダイバリオンについては、これまでいろいろな実験でヒントは見られてきましたが、はっきり観測されたのは初めてとなります。今回、観測された  $R_{IV}$  とは、質量が  $\Delta$  バリオンと核子 N の質量の和より 0.02 GeV 低く、幅も  $\Delta$  バリオンの幅 0.12 GeV よりも細いことから  $\Delta N$  の束縛状態に対応すると考えられます。

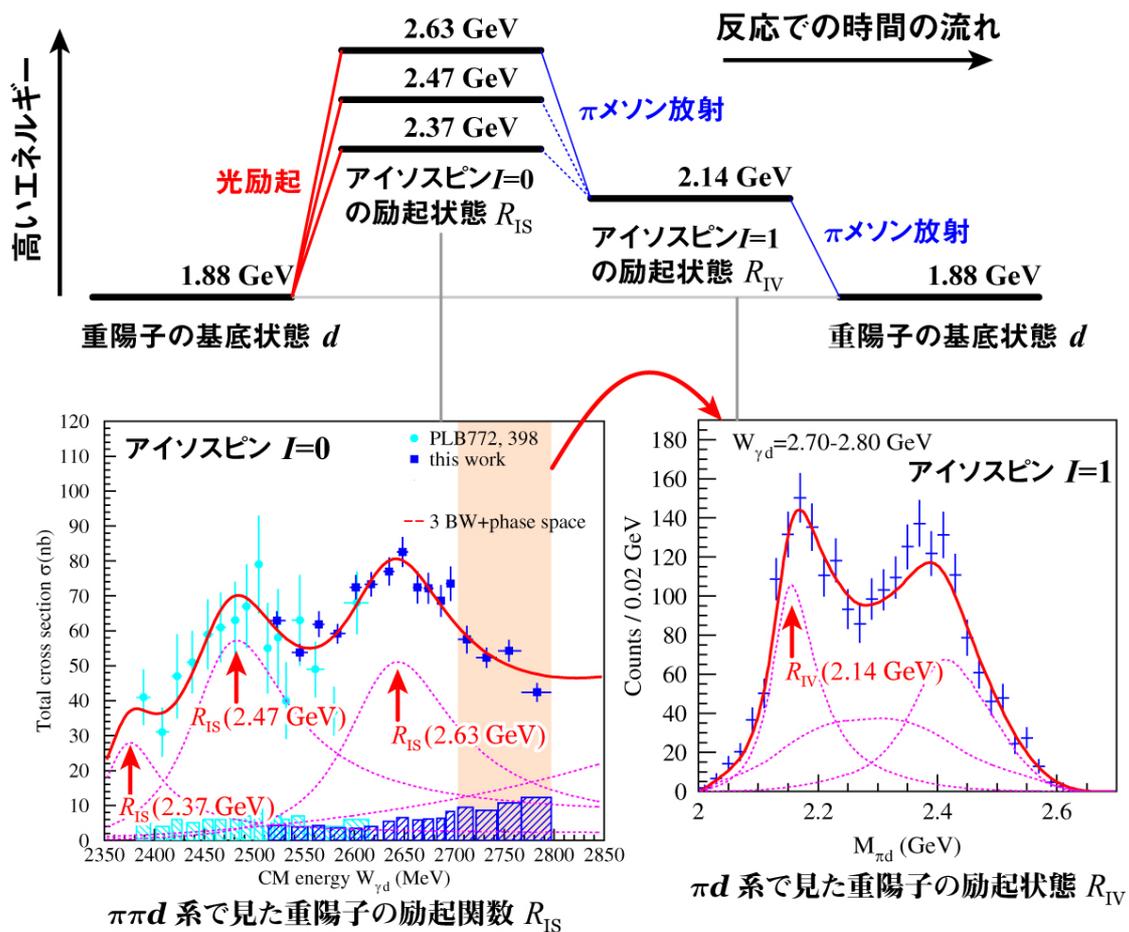


図3: 重陽子のエネルギー状態と励起と崩壊の過程 (上)と $\pi^0\pi^0d$ 系と $\pi^0d$ 系で見た重陽子の励起状態 (下)。左は $\gamma d \rightarrow \pi^0\pi^0d$ 反応の全断面積であり、横軸は $\gamma d$ 重心エネルギーで中間状態の質量に対応します。矢印で記したアイソスピン  $I = 0$  のダイバリオンが3つ観測されています。右は $\pi^0d$ 不変質量分布であり、左のピークが  $I = 1$ 、質量 2.15 GeV、幅 0.09 GeV のダイバリオンの存在を表します。右のピークは終状態の3つの粒子 $\pi^0$ 、 $\pi^0$ 、 $d$ のうち間違った組み合わせの $\pi^0$ と $d$ で形成されたフェイクのピークです。データ点の縦棒は統計的な揺らぎ、棒グラフは測定方法に起因する不定性を表します。赤の線は実験データをフィットした質量スペクトルで、紫の線でダイバリオンとバックグラウンド過程に対応する個々のスペクトルを表します。

### 3. 今後の展望

新たなダイバリオン状態を発見することで、複数のクォークと反クォークから構成されるハドロンの中で新たな形態の存在を明らかにしました。どのような形態のハドロンが存在しうるかという観点で、強い力の重要な性質である「クォークの閉じ込め問題」

についての情報を与えます。それに加えて原子核を束縛する核力の理解を深めるとともに、未だよく理解されていない核物質の状態方程式や中性子星の内部構造に対して極めて重要な情報をもたらします。

また終状態に重陽子と2つの中性メソンが含まれることが、ダイバリオン生成を浮き彫りにする条件になっていることがわかりました。測定された重陽子の角分布は、ダイバリオン状態の存在がなければ全く説明がつかず、まず反応理論のモデルを改良する必要があります。それに加えて、引き続き、終状態に重陽子と2つの中性メソンが含まれる反応で、その他のダイバリオン分光を行うと共に、すでに見つかっているダイバリオンについても性質を明らかにしていきます。

本研究における実験は、東北大学電子光物理学研究センターの加速器ビーム物理研究部や技術職員らの協力のもとで行われました。また科学研究費(19002003, 24244022, 26400287, 16H02188)のサポートを受けています。

#### 【論文情報】

雑誌名 : Physics Letters B

論文タイトル : Non-strange dibaryons studied in the  $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$  reaction

著者 : T. Ishikawa *et al.*

DOI : 10. 1016/j. physletb. 2018. 12. 050

URL : <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.12.050>

#### 【用語説明】

(注1) 重陽子の励起状態(ダイバリオン共鳴)

エネルギーが最低の定常状態を基底状態、そうでない状態を励起状態といいます。陽子と中性子が緩く結合した重陽子は、最も小さな原子核の一つですが、原子核としての励起状態はありません(エネルギーを高くすると陽子と中性子にすぐに分裂します)。しかしながら極端にエネルギーを高くした時には準安定な共鳴状態となります。このような共鳴状態はクォーク数が6つの状態なので、バリオン(クォーク数3つのハドロン)2つ分ということでダイバリオンと呼ばれます。

(注2) クォークの閉じ込め問題

クォークや反クォークは単独で取り出すことができず、つねに複数のクォークと反クォークで構成される粒子の中に閉じ込められています。この事実を「クォークの閉じ込め」とよび、複数のクォークと反クォークで構成される粒子の総称を「ハドロン」と呼びます。「クォークの閉じ込め」は実験の技術的な問題によるのではなく、強い力の本質に

根ざす原理的問題と考えられています。量子色力学とよばれる場の量子論の枠組みで説明できると考えられていますが、その機構は未解決問題の一つとなっています。

(注3)バリオン数

粒子の中に含まれるクォークの数に対応する量であり、バリオン数 $B$ はクォークの数 $n_q$ 、反クォークの数 $n_{\bar{q}}$ に対して $B = \frac{1}{3}(n_q - n_{\bar{q}})$ で与えます。基本的にバリオン数は反応の前後で保存します。クォーク3つで構成される陽子や中性子などのバリオンはそれぞれバリオン数が1となっています。クォークと反クォークで構成されるメソンのバリオン数は0です。

(注4)アイソスピン

スピン(粒子がもつ固有の角運動量、自転の速さみたいなもの)の類似で導入されたハドロンを特徴づける量であり、陽子と中性子が同じ粒子(核子)の異なった状態として考えた時のこれらを区別するための量となります。

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

東北大学電子光理学研究センター

教授 大西 宏明(おおにし ひろあき)

電話: 022-743-3423

E-mail: [ohnishi@lms.tohoku.ac.jp](mailto:ohnishi@lms.tohoku.ac.jp)

<報道に関すること>

東北大学大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室

電話:022-795-5572、022-795-6708

E-mail: [sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp](mailto:sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp)