



季刊誌

NO. 12

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

2019

特集

質量は環境で変化するのか？

インタビュー

ハドロンの質量が変わる？ ————— 成木 恵

電子を”見る”検出器の開発 ————— 足利 沙希子

実験を支える電磁石の技術
————— 広瀬 恵理奈 高橋 仁 小松 雄哉

物が生まれるしくみに迫る

～ハドロン物理の夢とアプローチ～

物質はどのように生まれるのか？そのヒントにつながる実験の準備がハドロン実験施設で進んでいる。

2012年にスイスCERNの加速器でヒッグス粒子が見つかった。素粒子の質量はこれで説明できたが、実はこ

れは“もの”の質量の数%でしかない。残りの大部分の質量を説明する、いわゆる「南部理論」は、真空にはクォークと反クォークのペアが充満しているせいで粒子に質量が発生するというもの。シカゴ大・南部陽一郎教授の2008年ノーベル物理学賞受賞対象となった「自発的対称性の破れの機構の発見」は、この理論の考察を通してなされたものである。「南部理論」の詳細を実験で確かめるために、真空とは異なる状態、すなわち温度や密度の高い

環境で、質量が変化するかどうかを調べる。

ハドロン実験施設の高運動量ビームラインでは、地球上で最も高密度の環境である原子核の中でのハドロン(※)質量を測定する実験の準備が2019年度の開始を目指して進んでいる。本号では、この実験や装置の内容、様々な工夫、活気あふれる現場の様子を特集する。(聞き手はJ-PARC広報セクション)

(※) ハドロン：バリオン（クォーク3個）や中間子（クォークと反クォーク）など、クォークから構成される粒子。

このページはARに対応しています。

- ① QRコードや「COCOAR2」でアプリを検索
- ② ダウンロードが完了したらアプリを起動
- ③ アプリでこのページをスキャン
- ④ 動画などのコンテンツが再生されます

動画再生可能期間

2019年6月25日～2019年9月24日

以降は、以下のURLで当該動画をご覧いただけます。

<http://www.j-parc.jp/c/public-relations/publication.html>



本実験の概要と検出器のしくみ

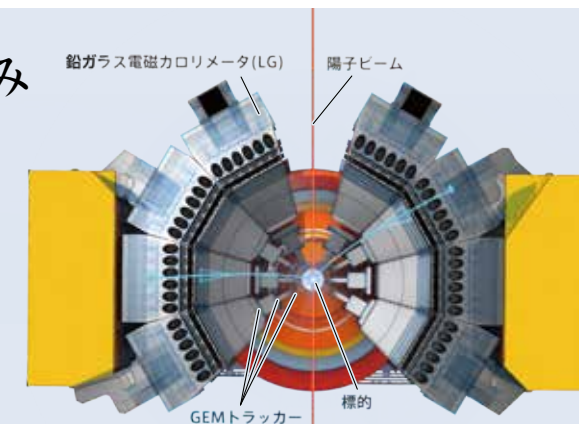
原子核中でハドロンの質量が変化することが理論から示唆されている。本実験では、 ϕ 中間子を使ってこれを確かめる。J-PARC加速器でつくった陽子ビームを原子核標的に入射し、 ϕ 中間子を生成する。 ϕ 中間子が崩壊してできた電子、陽電子を測定すると親の ϕ 中間子の質量が分かる。

図の説明

標的：中央に位置し、陽子ビームが標的の原子核に当たると、 ϕ 中間子が生成される。その ϕ 中間子はすぐに崩壊して電子と陽電子ができる。この電子、陽電子の運動量を測定すると親の ϕ 中間子の質量が分かる。

GEMトラッカー：この領域に強い磁場がかかっている。電子、陽電子が通過する位置を検出する。3層あるので飛跡の曲率半径が分かり、そこから電子、陽電子の運動量がわかる。

LG：多数の粒子の中から電子、陽電子を識別する。



※実験装置全景で水色の枠のような大きな構造物はスペクトロメータ電磁石。上図はこの電磁石の内側に設置される検出器を真上から見たもの。

ϕ 中間子の質量の求め方

以下の関係を用いて、 ϕ 中間子の質量を求める。

$$\phi\text{中間子の質量} = \sqrt{(\phi\text{中間子のエネルギー})^2 - (\phi\text{中間子の運動量})^2}$$

$$\phi\text{中間子のエネルギー} = \text{崩壊後の陽電子のエネルギー} + \text{崩壊後の電子のエネルギー}$$

$$\phi\text{中間子の運動量} = \text{崩壊後の陽電子の運動量} + \text{崩壊後の電子の運動量}$$

(ただし、運動量はベクトル量)

$$\text{崩壊後の(陽)電子のエネルギー} =$$

$$\sqrt{(\text{崩壊後の(陽)電子の質量})^2 + (\text{崩壊後の(陽)電子の運動量})^2}$$

電子・陽電子の質量は、粒子が電子・陽電子であることを識別したうえで、分かっている値を使用する。崩壊後の電子・陽電子の運動量を測定すれば、崩壊後の(陽)電子のエネルギー、 ϕ 中間子の運動量、 ϕ 中間子のエネルギーがわかることになり、 ϕ 中間子の質量が求められる。

電子・陽電子の運動量(の絶対値)は、電子・陽電子の磁場中での飛跡の曲率半径から求めることができる。

ハドロンの 質量が**変わる**？

京都大学 大学院理学研究科
物理学 宇宙物理学専攻

成木 恵 准教授

原子核の高密度環境で、 ϕ 中間子の質量が原子核の外にいるときよりも本当に異なるかを確かめる本実験。成木氏には、本実験の技術上のポイントと、そうした技術開発の先にある究極の目標が何なのかを伺った。

目指す物理を明らかにする ための技術上のポイント

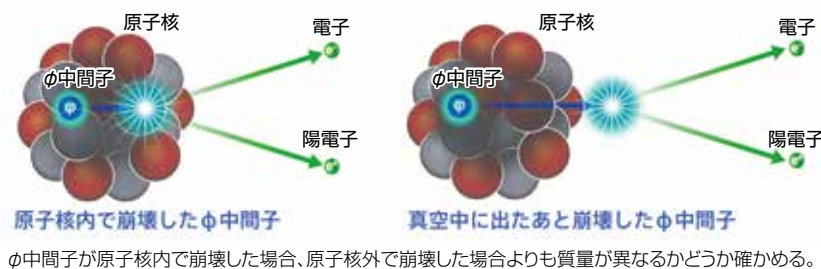
ϕ 中間子は寿命の間に原子核の外まで移動してから崩壊する 경우가多いが、約10%の割合で原子核の中で崩壊する。南部理論が正しければ、 ϕ 中間子の質量を測定すると、原子核の中と外で崩壊した場合に相当する、わずかな質量の差が測定されるはずだ。それを見極めるためには、高い質量分解能(小さな質量の差を識別できる能力)と高い統計量(データ量)が必須となる。

高質量分解能を 実現するための技術

囲み記事「 ϕ 中間子の質量の求め方」から、質量分解能を左右するのは、「曲率半径の測定精度」と「磁場の強さ」であることが分かる。前者を担うのが新規開発したGEMトラッカー。後者については、「飛跡を検出する部分に強い磁場をかける工夫が必要で、電磁石組の技術のおかげで実現しました。」(電磁石組のインタビュー参照)

高統計量(データ量)を 実現するための技術

ϕ 中間子が原子核の中で崩壊する割合



は小さいので、原子核外で崩壊した場合との区別が難しい。「両者の質量の分離には多くのデータが必要で、高いレート(単位時間当たりに受ける粒子数)に対応できる検出器が必要です。その開発が、足利さんが行っている研究です。」(足利さんのインタビュー参照)

技術開発の先に 見据えるものは…

「例えば鉛筆が何からできているのか、どんどん細かく見ていけば、原子にたどり着きます。原子をさらに細かくすると、クォークと呼ばれる素粒子に行き着きます。しかし、クォークから鉛筆がどうやってできているのか、我々は分かっていません。いわば、バラバラにしたおもちゃの部品が目前にあっても、しくみが分かっていないのでおもちゃが組み立てられないというのと同じような状況なのです。」

「クォークから物ができるしくみを解明する第一歩が、原子核中でのハドロンの質量の変化を解明することです。」と成木氏は言う。ミクロの世界のクォーク同士の間に働く力は「強い力」といって、我々の生活するマクロな世界で支配的な力である「重力」や「電磁気力」とは全く違った性質を持つ。この力の性質を説明する理論が「量子色力学(QCD)」だが、この理論から全てが導けるわけではない。クォークから物ができるしくみには、QCDが深くかかわっていると考えられている。電磁石や検出器の開発を着実に一步一步進める先には、「 ϕ 中間子の質量測定を通してQCDを究め、クォークから物ができるしくみを解明したい」という壮大な夢があった。

過去の実験からの 改造のポイント

高エネルギー加速器研究機構(KEK)つくばキャンパスでの先行実験でもLGは使われていた。今回の開発要素は、「高統計量を目指す今回の実験では、過去の実験とレートが全く異なります。過去のままLGを用いたのでは、光電子増倍管が対応できるレートを超えてしまいます。そこで、鉛ガラスのブロックを半分に切ってブロック1個当たりのレートを減らしました。」

改造したLGの性能評価

LGは粒子の入射位置によって応答が違うので、それを詳細に調べる必要がある。「東北大学の電子ビームを使って試験しました。シミュレーションも併用し、性能評価しました。」さらに、電子と誤認しやすい π 中間子に対する応答を調べる試験を、J-PARCハドロן実験施設で行った。電子と π 中間子を適切に区別できる入射角があることが分かったので、それに基づき鉛ガラスブロックの配置を設計した。

光電子増倍管の改良

高レートを受ける位置ではレートに耐えられないため、光電子増倍管そのものの

増幅回路の改良を行った。「どう改良すればレート耐性が上がるのか、抵抗や印可電圧を変えてみて都度テスターで増幅率を調べました。」

支柱の強度計算や クレーン操作も

重い検出器を支える支柱の強度計算も自身で行っている。また、複雑な形に鉛ガラスブロックを配置するのにクレーンを操作する必要があり、そのための資格も取ったそうだ。

どうしてこの実験に携わったのか

「先輩の姿を見て、J-PARCハドロן実験施設は大学院生主体で実験ができると思いました。さらに、大学院生のときにある実験の立ち上げにかかわった方々が今スタッフやボスドクになって、実験を引っ張られているのを見て、この高運動量ビームラインで実験の立ち上げにかかわるのは勉強になると思いました。」足利さんは京大から参加した最初の大学院生で、今では数名の学生仲間がいる。「現場で活躍できるのは学生だと思う。学生がもっと増えてほしい。」今後が楽しみな限りである。

今後の抱負

「年度末の最初のビームで検出器と実験全体の立ち上げを行います。無事に動くように、今、頑張っています。」さらに長期的には、「物理データをとって結果を出すところまでが大事です。この実験で結果を出すことが次の実験にもつながります。」現在は、もっぱら測定のための技術面に打ち込んでいる足利さんだが、その先に見据えているものは、成木氏と同じ、ハドロンの物理であることが、はっきりと伺えた。



京都大学 大学院理学研究科 物理学 宇宙物理学専攻
博士後期課程2年

足利 沙希子

電子を”見る” 検出器の開発

足利さんは、成木氏が所属する研究室の大学院生として、鉛ガラス電磁カロリメータ (LG) の開発を担当。LG の役割は電子、陽電子の識別で、鉛ガラス中で電子、陽電子が起こす光を光電子増倍管で検出することだ。



高エネルギー加速器研究機構(KEK) 素粒子原子核研究所 J-PARCセンター 素粒子原子核ディビジョン ハドロンセクション

小松 雄哉 助教 広瀬 恵理奈 技術副主幹 高橋 仁 准教授

ハドロン実験施設で目指す物理を明らかにするために必要な技術を担う、「電磁石組」の広瀬氏、高橋氏、小松氏。電磁石といえば、小学校の理科でつくった読者も多いだろう。その電磁石と、電磁石組がつくる電磁石の違いを尋ねると、「何でもスケールが大きい!ということ。我々の扱う典型的な電磁石は、大きさ：3メートル。重量：40トン。電流：2000 アンペア、パワー：500 キロワット。コイルとして巻く銅線は2 cm 角。電流による発熱が大きく、もしも空気で冷やすだけだと、コイルの銅線が融けてしまうでしょう。よってコイルになる銅線には、ちくわのように真ん中に穴を開けて、その穴に直接水を流しこんで冷やします。それが、私達のつくる電磁石です。」と話してくれた。

スペクトロメータ電磁石

今回の実験で目指す物理を明らかにするために重要なポイントとなるのが、成木氏が語ったとおり、飛跡を検出する部分である、スペクトロメータの中心付近に強い磁場を発生させることだ。スペクトロメータの電磁石は、もともと東大原子核研究所のサイクロトロン加速器に使われていたものをKEKつくばキャンパスでの先行実験に使用した後、本実験用に改造した。幅5m、高さ5m、奥行2m、重さが300トンの巨大な電磁石。円錐状の磁極を新たに取り付けすることで、先行実験の2.5倍の中心磁場を発生させられる。1個10～

20トンの鉄芯部品約30個を±0.1mmの精度で合わせながら一つ一つ組み立ていき、最終的に上下の磁極位置は0.4 mmの精度で合わせることができた。「円錐状の磁極は後から追加で取り付けただ、位置合わせのための『はめ合い』(軸と穴の組み合わせ)が無く、大変でした。円の部分に十字の印を付け、それを合わせましたが、丸いので、位置合わせのための0.1mmの押し引きが、難しくて…。特に上側の磁極は専用の井桁状の支持台を組み立てて、クレーンで吊りながら位置合わせをしました。」と、広瀬氏が苦労を語ってくれた。

ビームラインの電磁石

J-PARCでは通常、加速した一次陽子ビームを生成標的に当て、そこから発生する二次粒子を集めてビームとして実験グループに供給する。ハドロン実験施設でのこれまでの実験は全て、この二次ビームを利用するものだ。しかし、本実験は、一次陽子ビームの一部を分岐し、それを直接実験に用いる点がユニークだ。分岐電磁石には、電磁石組の技術が結集されていた。高橋氏が、図を見せて、丁寧に説明してくれた。右ページ下の図のように、長丸形の断面をもつビームのうち、大部分

は真っ直ぐ進み、他の実験に使用される。そして長丸形の端の部分の少量だけを本実験用のビームラインに分岐させるのだ。普通の電磁石は、ビームが通る空間に必要な磁場を出すことだけが要求される。しかし、この電磁石には、磁場がない空間と、磁場がある空間の両方が必要となる。そのためには、電磁石の磁極部にビームが当たる部分(断面拡大図で濃い赤色の部分)がどうしてもできてしまう。ビームが磁極に当たると熱や放射線が発生し、物理測定の妨げになったり、発生する放射線量が上昇するので、それをできるだけ減らしたい。その観点では濃い赤色の部分を小さくしたいが、一方で、分岐ビームを曲げるためには強くて分布の様な磁場を発生させないといけないので、濃い赤色の部分にはある程度の厚みが必要となり、その加減が彼らの腕の見せ所である。「磁場計算を繰り返して、ビームの当たる量を抑えつつ必要な磁場が得られる形を追求しました。そういうわけで、こんな形なんです。」と言った広瀬氏は、「こんな変わった形の磁極をつくるのもまた大変です。」と続けた。「角付きのピースを2つ合わせてつくりました。長さ4mにわたって角の先端を精度よく削って合わせるのが大変でした。」

ある程度の放射線の発生があるという前提をふまえ、放射線で壊れない磁石をつくる、さらに、壊れた場合に遠隔操作で交換ができるようにするといった対策も行っている。具体的には、「材料から放射



陽子ビームをスペクトロメータへ輸送するビームライン

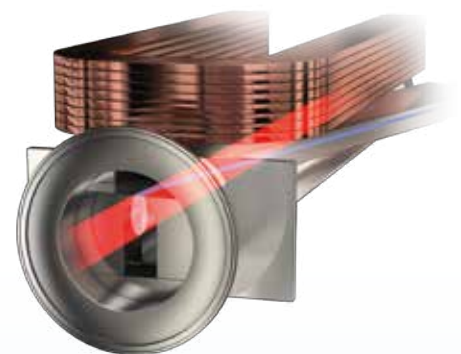
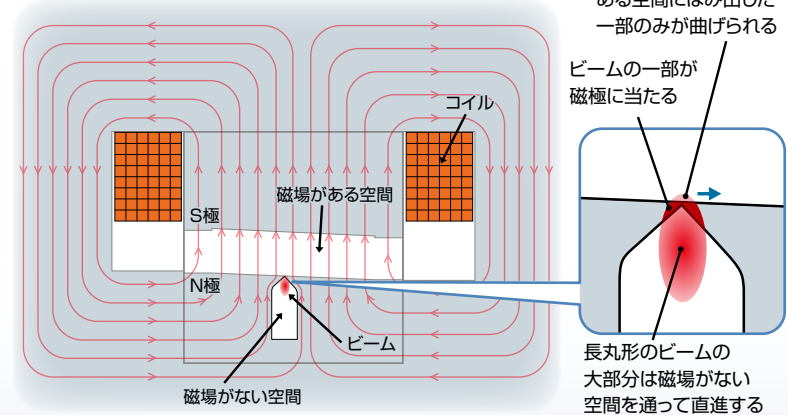
線に弱い有機物を排除します。コイルの絶縁には普通は有機樹脂が使われますが、その代わりに酸化マグネシウムという無機物を使っています。ほかに、冷却水配管に必要なパッキンも普通は有機物なので、炭素やなまし銅に変えています。配管の接続も、ボルトではなくてレバーを使って素早く脱着できるものにしています。これらは通常の世の中には流通していない、特殊なもので、アイデア出しから行って、試作し、試験します。」(広瀬氏)電磁石は、大強度(粒子数が多い)のビームを安定に供給するための様々な試行錯誤の結晶なのだ。

仕事に対する広瀬氏の思い

「知識も技術も何もないところから始めたので、何も考えず頑張るしかないと思ってやってきたんです。そうしているうちに、おもしろくなってきちゃって。師匠の田中万博さん(現 KEK シニアフェ

ロー)の存在が大きかった。」と、謙虚に自身の道のりを振り返る広瀬氏を、「広瀬さんは先人の技術を継承し、今や後輩の育成に尽力しています。」と高橋氏も称えた。技術継承が世の中で課題とされる中、J-PARC ハドロン実験施設では、ビーム強度が上がって膨らむ要求課題に応え、技術の継承、発展ができています。また、ハドロンセクションリーダーである澤田氏は「電磁石の設計・製作からその運転までできるグループは世界的にも希少だ。」と語る。広瀬氏は、「J-PARCは世界で初めてのことがたくさんあって、大強度ゆえに熱、放射線など課題がたくさんあります。おもしろいと思ってどんどん取り組んでいてもらいたいと思います。」と後進への熱い期待を述べ、締めくくってくれた。

ビーム分岐用電磁石の断面図



ビームの大部分は直進して他の実験に使われる(赤色)。端の一部が磁場で曲げられ、本実験に使用する(青色)。



質量の謎に迫る実験と、研究者達の熱い思い— お楽しみいただけましたでしょうか？ ご意見、ご感想を web-staff@j-parc.jp 宛にお寄せください。

< 編集後記 >

しばらく休刊しておりました「季刊誌J-PARC」を再開しました。最新のサイエンスやその探求に必要な技術と、それらを生み出す「人」に密着することで生き生きとお伝えしていきます。引き続きご愛読ください。