



季刊誌

NO.04

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

2016

特集

ハドロン実験施設 研究者インタビュー

素粒子・原子核の 標準理論

その先を知りたい

小松原健 山本剛史 高橋俊行

目で覚える

素粒子・ハドロン・原子核

原子核

ハドロン

グザイ粒子

シグマ粒子

ラムダ粒子

中性子と陽子

K中間子

パイ中間子

素粒子(クォーク)

ボトムクォークとトップクォーク

ストレンジクォークとチャームクォーク

ダウンクォークとアップクォーク

目で👁️覚える

素粒子・ハドロン・原子核

クォークは現在6種類が見つかっており、それらが複数組み合わせざったのが「ハドロン」です。「ハドロン」には様々な種類がありますが、私たちの身近な世界(地上)の物質は「陽子と中性子」からできています。(ハドロンの表、下段左の2つ)陽子や中性子以外のハドロンは、宇宙線で生成されても短い時間しか存在しないので、実験に使用するには向いていません。これらのハドロンを実験に用いるためには、加速

器を用いて人工的に大量に作り出す必要があります。加速した陽子のビームを金標的に当てると、様々な粒子が発生します。この中から実験に必要な粒子を選び出して使用します。粒子によっては生成確率が非常に小さなものもあるので、大量の粒子を生成できるJ-PARCの大強度陽子ビームが必要なのです。ハドロン実験施設では特に、ストレンジクォークを含むハドロンの研究を行っています。

素粒子・原子核の標準理論

その先を知りたい

現在 J-PARC のハドロン実験施設には 3 本のビームラインが設置されており、様々な実験研究が行われています。大強度の陽子ビームからは K 中間子、 π 中間子が作られ、これら中間子を利用して素粒子や原子核の世界を研究し、私たちの知の領域を拓けようとしています。

Interview 1 小松原 健

J-PARC素粒子原子核ディビジョン 副ディビジョン長
中性K中間子稀崩壊実験 (KOTO=K0 at TOKai)

粒子の数を増やして世界で勝負

—— ハドロン実験施設というのは何をするところですか？

目的は、素粒子と原子核について調べることです。

物質は全て原子からできています。でも原子がこの世界の最小構成単位ではなくて、原子はさらに、中心の原子核と周りの電子に分かれます。原子核の中には陽子と中性子があって、それぞれ、クォークと呼ばれる素粒子3つで構成されています。そのほかクォーク2つでできている中間子というものもあります。

これまでの研究によって、素粒子や原子核の振る舞いについては、大体のことは分かっています。それでもまだ良く分かっていないことがたくさんあります。それを実験によって確かめようとしているのがこの施設です。

—— どうやって実験をするんですか？

まず難しいのは、実験で使う「材料」が日常生活の中には無いということです。化学の実験であれば、ビンの中の試薬が使えます。でも、私たちの実験に必要な粒子は、寿命が極めて短いということもあって、普段その辺に存在しているわけではありません。なので、実験の材料を創るところから始めることになります。

そのために必要なのが加速器という装置で

す。J-PARCの敷地内には直径500mもの大きな円形加速器があって、その中で陽子をグルグル回して加速。30GeV(※)まで加速したところで加速器リングから取り出して、標的にぶつけます。このときに生まれるのが、K中間子などの粒子。これを複数のエリアに導いて、様々な実験を同時に行っています。

※GeV=ギガ電子ボルト。エネルギーの単位で、これが大きいほど高速。

—— 加速器と言えば欧州のLHCが有名ですね。

エネルギー的にはLHCの方が3桁も上ですが、J-PARCの加速器には、粒子の数がすごく多いという特徴があります。エネルギーを高くするためには加速器を大きくする必要があって、LHCは山手線のような巨大サイズになっています。日本でそんなものは作りにくいですが、リングが小さくても、工夫すれば粒子の数は増やせるんです。

宝くじに当たるよりも難しい？

—— 粒子が多いと、どんなメリットがあるのでしょうか。

粒子が多ければ、それだけたくさんの反応を起こすことができます。すると、起こる割合が低い現象でも見つけやすくなります。たとえば、100回に1回しか起きないような現象でも、

1000回やれば10回、10000回やれば100回見ることが出来ます。

私が行っている「中性K中間子の稀崩壊実験」は、まさにそういうものです。中性K中間子(※)が崩壊するとき、大体は3つの中性パイ中間子に変わったりするパターンなのですが、極めてまれに、中性パイ中間子とニュートリノ2つに変わるパターンがあると考えられています。※電荷がゼロのK中間子(K0)。K中間子には、電荷がプラスのK+とマイナスのK-など合計4種類がある。

この割合は、数100億回～数1000億回に1回。気が遠くなるほどの低さです。私の実験では、この現象を見つめようとしているんです。

—— そんなに滅多に起こらないことが、なぜ重要なのですか？

現在、素粒子や原子核の世界をうまく説明できる理論として「標準理論」というものが確立しています。この理論によると、私が探している現象が起きる割合は 3×10^{-11} (約333億分の1)のはずです。でも、実際に実験で割合を調べてみて、それより大きかったり小さかったりしていたら、どうでしょうか。

—— 標準理論が間違っている？

正しくは、標準理論にプラスアルファの何かがある、ということです。もしかしたら、未発

見の粒子が関係しているのかもしれませんが。起こる割合にズレがあるかどうかはまだ分かりませんが、私たちはあるだろうと思っています。

実はこれと同じようなことが、以前にもありました。1964年、K中間子の崩壊において、「CP対称性の破れ」と呼ばれる、粒子と反粒子(※)の振る舞いの違いが見つかったときです。この事象は、それまでの理論では全く説明できませんでした。

※素粒子に働く4種の力のうちのひとつ「弱い力」がわずかにCP対称性を破ることが発見された。

当時、クォークはまだ3種類しか見つかっていなかったのですが、もし6種類あればこの事象をうまく説明できるとしたのが、1973年に提唱された小林・益川理論です。そしてその後、本当にこれらのクォークが発見され、標準理論に繋がっていきました。

ノーベル賞を目指して

—— しかしそこまで起こる割合が低いと、見つけるのは大変そうですね。

はい。少なくとも、数百億回以上の崩壊をさせる必要があります。まだ本格的にデータを取り始めてから1年くらいしか経っていませんが、これには3~5年くらいかかりそうです。ちなみに今までの実験結果から、割合が10のマイナス8乗より小さいことは分かって

います。

数百億回もやるとなると、データの取り方には工夫が必要です。全ての反応データを収集すると処理が追いつかなくなってしまうので、「本物」らしい現象だけを上手に選択しなければなりません。条件を厳しくし過ぎると本物を取りこぼす可能性があるし、逆に甘すぎると処理がオーバーフローする。これをうまくやるのが腕の見せ所です。

—— 苦勞してやっと見つけても、1回だけだと「たまたま」と言われませんか？

まず確実に1つ見つけたいとは思いますが、1つだけでは十分ではありません。統計学的に意味のあるものにするのであれば、少なくとも10回、将来的には100回くらいのデータが欲しいところ。実験としては、長丁場になります。

—— さらに粒子の数を増やすようなアップグレード計画は？

加速器の強化や測定器の大型化も考えていますが、まずは現在の加速器と測定器で10のマイナス11乗くらいまで調べて、見つかるかどうか調べたいです。まだ1回も見つかっていません。信用してもらえません。どうしても大きなお金がかかるので、段階を踏んで進める必要があります。

—— もし新粒子が見つかったら、またノーベル賞も有り得る？

標準理論と違うものを発見できたらそれはノーベル賞クラスだとは思いますが、時間はかかるでしょう。小林・益川理論にしても、理論を実験で確かめて、受賞までに30年以上かかっています。私たちの場合も、実験で新粒子を見つけたと言っても、それを確認するのにさらに何年もかかるでしょう。ノーベル賞は、あくまでその結果です。

—— 最後に、若い人へのメッセージをお願いします。

研究者のイメージとはかけ離れているかもしれませんが、実験は結構ハードです。加速器の実験が始まると、24時間連続運転になるため、8時間交替のシフトを組んで臨みます。体力的には厳しいし、苦勞も大きいけど、自分の作った装置がうまく働くと、本当に嬉しい。この仕事は、好きであればすごく楽しめる分野だと思います。

体力的にきついこともあって、この分野は女性が少ないのですが、いつまでもそんな研究分野でいいのかと話されていて、みんな改善しようとしています。このことに限りませんが、前の世代の方々が我々にしてくれたように、次の世代のために研究の環境を整えるのが私の役目だと思っています。ぜひ一緒に仕事をしましょう。

未知の領域を知りたい

Interview 2. 山本 剛史



ハドロン実験施設では、様々な実験が行われている。そのうちの1つ、「ハイパー核ガンマ線分光実験」(E13 実験)では、昨年、世界初の大きな発見があったという。どんな実験だったのか、研究メンバーであり東北大学博士研究員(インタビュー時/現在は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)の山本剛史氏に話を聞いた。

—まず実験のタイトルにある「ハイパー核」とは何か教えてください。

私たちの身近に存在する原子の原子核は、すべて陽子と中性子からできています。たとえばヘリウムの原子核は、陽子と中性子が2個ずつといった感じですね。ハイパー核と対比する意味で、これは通常核と呼ばれます。でもハイパー核には、陽子と中性子以外に別の粒子が混じっているんですよ。

混じる粒子としては、たとえばラムダ粒子があります。この粒子は、陽子や中性子と同じクォーク3個で構成されますが、アップ(u)クォークとダウン(d)クォークだけの組み合わせである陽子や中性子と違い、ストレンジ(s)クォークを含んでいます。sクォークが入った原子核がハイパー核ということになります。

—ハイパー核を使って、何が分かるのでしょうか。

陽子と中性子がバラバラにならず、原子核としてまとまっていられるのは、粒子が核力(強い力)によって束縛されているからです。この核力は、ありふれた存在の陽子と中性子の間の相互作用についてはかなり正確に分かっているのですが、クォークの種類を変えた粒子だとどうなるのか、あまり分かっていませんでした。

私たちの研究の目的は、この核力をより深く理

解することです。そのためのツールがハイパー核。uクォークとdクォークのほかに、sクォークも入れることで、別の角度から核力を調べられるようになるんです。ただsクォークの寿命は、10のマイナス10乗秒程度と極めて短い。すぐに崩壊してしまうため、実験が難しくなっています。

—どんな実験を行ったんですか？

私たちの実験では、液化したヘリウムにK中間子をぶつけて、原子核の中性子を1つラムダ粒子に入れ替えたヘリウム4ラムダというハイパー核を作りました。ここから放出されるガンマ線のエネルギーを調べることで、中性子・陽子とラムダ粒子との間の相互作用を精密に測定することができました。

この結果、面白いことが分かりました。ヘリウム4ラムダの陽子と中性子を入れ替えただけのハイパー核である水素4ラムダについては、以前行われた実験の結果があるのですが、それとの間に明確な違いが見られたのです。従来、陽子と中性子は核力としては同じと考えられていて、私たちも変わらないだろうと思っていたため、こんなに大きな差があったことにショックを受けました。

—従来の常識を覆す発見ですね。でもどうしてなんでしょう。

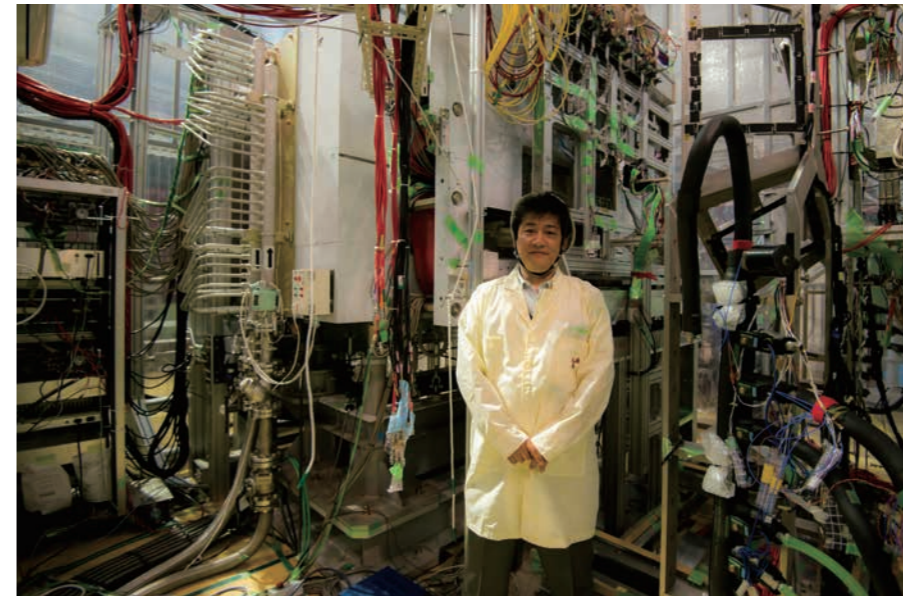
違いがある理由については現在議論中で、まだ結論は出ていません。今回はヘリウムを使いましたが、今後、もっと大きな原子核で同様の実験を行おうと考えています。大きな原子核になると、陽子/中性子とラムダ粒子の間の距離が離れるので、距離によって核力がどう変わるか調べられます。それにより、この謎を突き詰めて行きたいですね。

—山本さんはまだ若いですが、いつからこの実験に関わっているのですか？

大学4年生からです。実験そのものを行ったのは昨年ですが、プロジェクトとしては10年くらい前から始まっていて、私が研究者としてのスタートを切ったのはちょうどその頃でした。それからずっと準備してきたので、実験が非常に待ち遠しく、昨年はついに念願が叶って本当に嬉しかったです。

—研究者になったきっかけは何かありますか？

大学の講義で、原子核にはいまだに分からないことが多いと知ったのが大きかったですね。そんなに分からないものなら、その道に進んで未知の領域を楽しみたいなど。私たちの研究は、自分達で検出器を作って、自分達で実験するスタイルです。それが肌に合っていたということもありますね。



ハイパー核の研究は、宇宙の“ある天体”にも密接に関わっているという。ハイパー核の研究はこの先どう進んでいくのか。将来の展望について、J-PARC 素粒子原子核ディビジョン ハドロンセクションの高橋俊行氏に話を聞いた。

予想外のことが起きて欲しい

Interview 3. 高橋 俊行

—ハイパー核について、これからどんな実験を行う予定ですか？

J-PARCではこれまで、ストレンジ(s)クォークが1個だけ入ったハイパー核が対象になっていましたが、加速器や検出器の整備が進んできて、ようやく、これが2個になったダブルハイパー核について実験できるようになってきました。今まさに始まったばかりで、5月末から検出器を立ち上げているところです。

実はダブルハイパー核を実験で確認した例は世界的にもほとんどなくて、ヘリウム原子核にラムダ粒子が2個入ったヘリウム6ダブルラムダが唯一確実と言われています。歴史的に、ハイパー核は日本の得意分野になっていて、独壇場とも言えるんですが、このダブルハイパー核も、J-PARCの前身である筑波の加速器で確認できた成果なんです。

—ラムダ粒子が2個になると、何が分かるのでしょうか。

ラムダ粒子が1個だけだと、ラムダ粒子同士に働く核力は分かりませんね。2個になって初めて調べることができます。実験で確認するまで、引力なのか斥力なのかすらも分かっていませんでしたが、これにより引力であることが確認できました。

またダブルハイパー核を作る方法は、ラムダ粒子を2個入れるだけではありません。sクォークを2個含むグザイマイナス粒子を1個入れる方法もあります。このハイパー核はなかなか観測できなかったのですが、以前筑波の実験で使った写真乾板を新手法で再解析したところ、窒素の原子核にグザイマイナス粒子が束縛された状態が見つかりました。

—グザイマイナス粒子とはどんな粒子ですか？

陽子や中性子よりも重く、マイナスの電荷を持った粒子です。ちょっとややこしいですが、これが窒素の原子核に入っているため、原子核の電荷は1つ減って、化学的には炭素と同じになっているはずですが、ただし寿命が極めて短いので、原子の化学的性質を調べる間もなく崩壊してしまうのですが。

—sクォークが安定して存在することはないのでしょうか。

太陽よりもっと大きな恒星が超新星爆発を起こしたときにできる中性子星は、宇宙で最も高密度な物質です。従来、中性子星は中性子だけの集まりだと考えられていましたが、最新の理論では、中心部の超高密度などところには、sクォークが現れてくると言われています。ここには、安定して存在しているはずですが。

ただその理論では、太陽の2倍も質量があった場合、潰れてブラックホールになってしまうはずなのですが、最近、宇宙で2倍質量の中性子星が見つかりました。これは理論とは合わないもので、もしかしたら超高密度のところではラムダ粒子やグザイマイナス粒子の間に強い斥力が働くのかもしれない。これを議論するためにはもっと実験が必要です。

—宇宙まで関わってくるとは面白い研究ですね。

はい。1つの実験で全ての謎が解ける学問ではないので、今後も、対象を変え、切り口を変えて、様々な実験を行っていきます。現実的に今できるのはsクォークが2個までですが、将来的には3個4個とさらに増やしていきたいですね。それによって、核力の起源や性質の理解に繋がるといいですね。

原子核の分野では、まだまだ予想通りにならないことの方が多いですが、だからこそ面白い。山本さんが紹介したE13実験の結果を初めて聞いたときには、本当にワクワクしました。やればやるほど謎が増えていく感じではありますが、これからもたくさん予想外のことが起きて欲しいですね。

