

J-PARCで新しい超原子核とクォーク6個の新粒子をつくる

今井 憲一 ハドロン物理研究グループ
Kenichi IMAI Research Group for Hadron Physics

素粒子クォークには6種類があり、原子核をつくる陽子と中性子は、それぞれアップ・クォーク2個とダウン・クォーク1個およびアップ・クォーク1個とダウン・クォーク2個、つまりクォーク3個ずつからできている。「それらより少し質量が大きいストレンジ・クォークを入れることで、クォーク4個以上の新粒子をつくることのできる可能性があります。私たちは大強度陽子加速器施設 J-PARC で、クォーク6個の新粒子をつくることを目指しています」。こう語る今井憲一グループリーダーは、ストレンジ・クォークが入った新しい原子核(「ハイパー核」あるいは「超原子核」)を多数つくり、その性質を調べるいくつかの実験も計画している。クォークからなる粒子を総称して「ハドロン」と呼ぶ。J-PARCでハドロン物理の新しいステージが始まろうとしている。

核力がまだよく分らない

「京都大学理学部の物理学科へ進んだのは、湯川秀樹さんがいたからです」と、今井憲一グループリーダー(GL)は振り返る。「私が理学部を卒業した翌年、1970年に湯川さんは京都大学を退官されました。私は湯川さんの講義を受けた最後の世代です」

原子核はプラスの電荷を持つ陽子と、電氣的に中性な中性子からなる。プラスの電荷を持つ陽子同士は反発し合うはずだ。その反発力に打ち勝って、陽子と陽子、そして陽子と中性子を結び付ける「核力」が必要だ。その核力は π 中間子という未知の粒子を交換することで働くという「中間子論」を1935年に提唱したのが、湯川博士だ。その後、1947年に宇宙線の観測から π 中間子が発見され、1949年に湯川博士は日本人初となるノーベル賞(物理学賞)を受賞した。

1950~60年代になると、加速器実験により、陽子と中性子に似た粒子や、 π 中間子に似た粒子が次々と発見された。そして陽子や中性子、中間子は、クォークと呼ばれる粒子が集まってできていることが分かった。クォークが集まってできた粒子を総称して「ハドロン」という。陽子と中性子は3個、中間子は2個のクォークからなる。このクォーク同士を結び付ける力が「強い相互作用」だ。強い相互作用を説明する理論「量子色力学(QCD)」が1970年代に確立した。

「QCDは完成された理論だと考えられています。しかし、陽子や中性子を結び付ける核力など、ハドロンの世界のさまざまな現象をQCDの方程式に基づい

て厳密に計算することは、計算が難しいため技術的にできませんでした。そこで核力やハドロンを説明する理論は、これまでの膨大な実験データとつじつまが合うように現象論的につくられてきました」

つまり、人類は核力をいまだに完全には理解できていないのだ。そして、ハドロンの世界には未知の現象が潜んでいる。

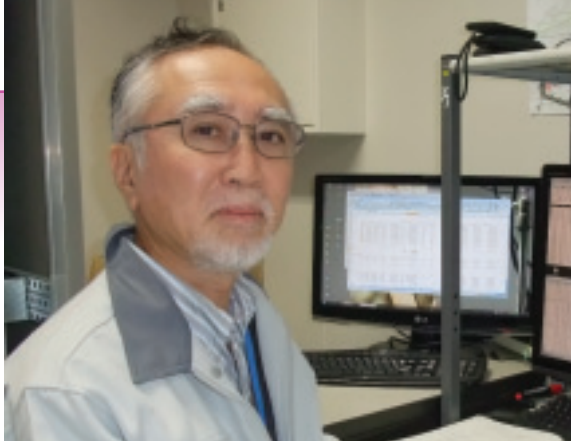
クォークからなる新粒子をつくる

現在では、クォークは6種類あることが確かめられている。陽子や中性子は、その中で最も軽いアップ(u)とダウン(d)クォークからなる(図1)。

陽子と中性子に働く核力は、長距離では引力、至近距離では斥力として働く。このため原子核では陽子と中性子は少し離れて存在している。「uとdよりも質量の少し大きいクォークをストレンジ(s)クォークといいます。sが2個入ると、対称性やQCDのスピン依存力などのために至近距離でも核力が引力として働き、クォークが高密度に集まった“クォーク物質”ができるかもしれないと、理論的に予測されていました」

QCDは、クォーク物質の存在を否定していない。しかしクォーク4個以上からなる粒子は発見されていなかった。「私たちは、sを含む6個のクォーク(uuddss)からなる“Hダイバリオン”という新粒子を加速器でつくる実験を1980年代半ばから始めました」

sクォークを含む中間子を「K中間子」と呼ぶ。今井GLたちは、日本の高エネルギー加速器研究機構



今井 憲一 (いまい けんいち)

1946年、大阪府生まれ。理学博士。1974年、京都大学大学院理学研究科博士課程修了。京都大学助手、助教授、教授を経て、2010年4月より現職。専門は原子核物理学。

(KEK)の陽子シンクロトロン(KEK-PS)や米国・ブルックヘブン国立研究所(BNL)の陽子シンクロトロン(BNL-AGS)を使って、K中間子ビームを原子核に衝突させることにより、Hダイバリオンをつくる実験を進めた。「しかし、Hダイバリオンは見つかりませんでした。少なくとも寿命が長く安定なHダイバリオンは存在しないことを、私たちは証明したのです」

ストレンジ・クォークを含んだ原子核の世界

私たちの身の回りにある物質をつくる原子核は、陽子と中性子の数がほぼ同数の安定核だ。安定核は約300種類が知られている。さらに、陽子あるいは中性子の数が過剰で、寿命の短い不安定核が存在する。現在までに加速器などにより約3000種類の原子核がつかられている。

「ただし、原子核の世界はそれだけではないんです」と今井GLは指摘する。「sクォークを含んだ原子核の世界が広がっています」

sを含むクォーク3個からなる粒子を「ハイペロン」

という。ハイペロンには4種類があり、それらは1960年代までに加速器実験で発見された。

ハイペロンのうち、sを1個含む安定な粒子が2種類あり、それぞれ「ラムダ(Λ)」、「シグマ(Σ)」と名付けられている。現在までに、 Λ を1個含む原子核が39種類、 Σ を1個含む原子核が1種類、つまりsクォークを1個含む原子核が計40種類見つかった。

さらに1980年代末、今井GLたちはKEK-PSやBNL-AGSを使って、 Λ を2個含む原子核(ダブルハイパー核)を同定することに世界で初めて成功した。sクォークを2個含む原子核の世界を、今井GLたちは切り開いたのだ。現在までに Λ を2個含む原子核は3種類見つかった。

そして今井GLたちは2001年、KEK-PSを用いて、ダブルハイパー核の質量を決定することに世界で初めて成功した(図2)。

J-PARCで10年間独走する

日本原子力研究開発機構(JAEA)とKEKが共同で建設した大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) が、2008年に稼働を始めた(図3・図4)。J-PARCは大強度の陽子ビームを原子核に衝突させることで、大強度の中中性子やミュオン、ニュートリノ、そしてK中間子のビーム

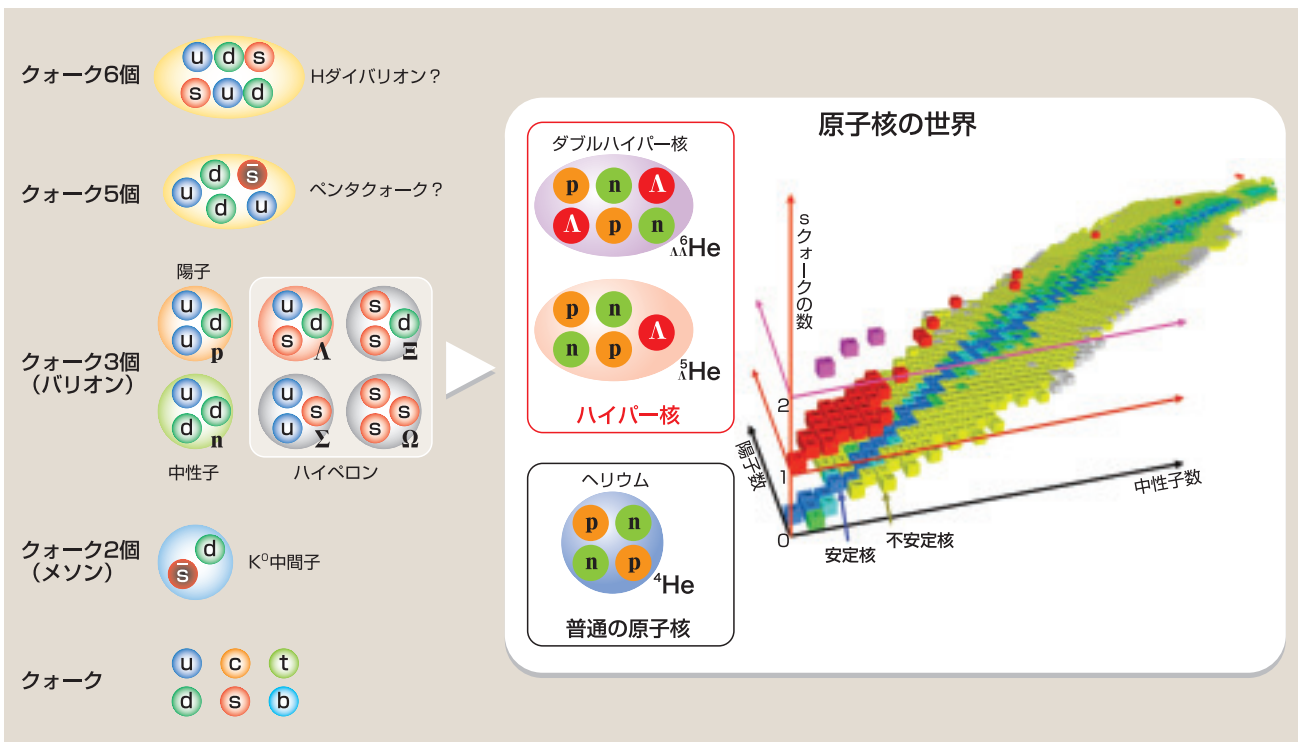


図1 ハドロンの世界

を発生させることができる。

「私たちが実験を進めてきた KEK-PS の 100 倍の強度の K 中間子ビームを、J-PARC では生み出すことができます。大まかにいえば、KEK-PS で 100 日もかかってやっと 1 個つくることのできる粒子を、J-PARC では 1 日で作ることができます」

J-PARC が完成することから、KEK-PS は 2007 年に閉鎖された。そして BNL でも、ほかの実験に集中するため K 中間子のビームラインがすでに閉鎖されている。「ドイツの重イオン研究所 (GSI) には、J-PARC に近い加速器施設 (FAIR) の将来計画がありますが、稼働するまで最低でも 10 年はかかるはずだ」

つまり J-PARC は、K 中間子ビームを使った実験において、少なくとも 10 年は独走することのできるのだ。今井 GL は 2010 年 3 月に京都大学を定年退官、同年 4 月、JAEA 先端基礎研究センターにハドロン物理グループを立ち上げた。今井 GL たちは、J-PARC を使ってどのような実験を行おうとしているのか。

ペンタクォークの存在を検証する

JAEA と理化学研究所 (理研) が建設した大型放射光施設 SPring-8 による実験で 2002 年、大阪大学の中野貴志教授たちのグループが、s クォークの反粒子 1 個を含むクォーク 5 個からなる「ペンタクォーク」を発見したと発表した。この発見はほかの複数の研究グループによって検証が行われ、存在が確かめられた。クォーク 4 個以上からなる粒子の発見は史上初だ。

中野教授には、2003 年度の仁科記念賞が贈られた。

ところがその後、ペンタクォークが確認できなかった、という研究結果が多数報告されるようになった。「最近では、ペンタクォークは存在しない、という意見の方が多くなっています。実は、中野さんは、私が最初に指導した学生の一人です。私たちは 2010 年秋、J-PARC を使ってペンタクォークの検証実験を行います」

KEK-PS における最後の実験は、今井 GL たちによるペンタクォークの検証実験だった。「そのとき、ペンタクォークかもしれないエネルギーのピークが質量スペクトルの中に見えたのです。しかしエネルギー分解能が悪く、イベント数も少なかったので、統計的にはっきりしたことはいえませんでした。J-PARC ではビーム強度が大きいだけでなく、検出器のエネルギー分解能も高いので、実験を始めて数日目にペンタクォークの存在を確認できる可能性があります」

さらに今井 GL たちは、J-PARC で H ダイバリオンのようなクォーク 6 個の粒子をつくる実験も進める計画だ。「一般的にはクォーク 4 個は 2 個と 2 個に、5 個は 2 個と 3 個に、6 個は 3 個と 3 個に、すぐに分かれてしまいます。しかし、クォークが 4 個以上集まった粒子が安定して存在する条件、法則がきっとあるはずだ、と私は信じています。その法則を理解するために、J-PARC でクォーク 6 個からなる新粒子を、ぜひつくりたいのです」

原子核の世界を拡張する

原子核の世界をさらに拡張する実験も続けられている。その一つは陽子の個数の多い原子核、つまり新しい元素をつくる実験だ。現在までに 118 番元素までがつくられたと報告されている。

陽子や中性子がより過剰な原子核をつくる実験も進行中だ。理研では 2007 年、新世代の加速器施設「RI ビームファクトリー (RIBF)」が稼働を始め、次々と新しい原子核をつくり始めている。RIBF では、新しい原子核 1000 種類を含む 4000 種類の不安定核をつくり出し、その性質を詳しく調べる計画だ。

一方、今井 GL たちは、J-PARC を使って s クォークを含む新しい原子核 (ハイパー核) をたくさんつくる実験を計画している。「s クォークを含むことにより、陽子と中性子だけの組み合わせでは存在しない原子核が現れます。例えば、普通の原子核では水素原子の同位体は質量数 3 までしか存在しません。しかし Λ を 1 個含むことで、質量数 4 の水素同位体が見つかっています。J-PARC では、 Λ を 1 個含む質量数 7 の水

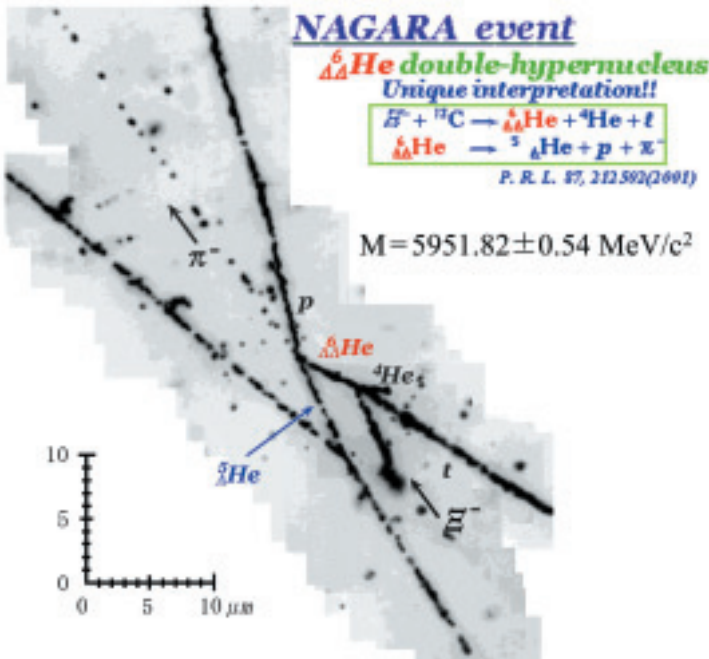


図2 $\Lambda\Lambda$ He の質量を決定 KEK-PS において測定した原子核乾板中の荷電粒子の飛跡により、ダブルハイパー核の質量を世界で初めて決定した。



図3 大強度陽子加速器施設J-PARC(茨城県那珂郡東海村)



図4 J-PARC内のハドロン実験施設で実験をするハドロン物理グループの研究者たち

素を生み出すことも可能でしょう。さらに私たちは Λ を2個含む原子核をできるだけたくさんつくり、質量やそのほかの性質を詳しく調べることを目指しています」

普通の原子核は理研のRIBFにより、sクォークを含む原子核は、J-PARCにおいて今井GLたちの手により、新しい種類のものがつくられていく。2010年代、日本の加速器施設によって、原子核の世界が大きく拡張されようとしているのだ。

一方、理論研究も大きく進展し始めた。「計算速度が飛躍的に高速化したスーパーコンピューターを用いて、格子QCDという手法により、QCDの方程式を厳密に計算することが可能になり始めました」

東京大学の初田哲男教授たちの研究グループは2007年、6個のクォークに働く強い相互作用を格子QCDで厳密に計算することにより、陽子と中性子に働く核力を導き出し、長距離では引力、至近距離では斥力として働く様子を再現することに世界で初めて成功した。

従来の原子核理論は、約300個の安定核という“特殊な”原子核の現象を説明できるようにつくられた。ところが加速器によって陽子あるいは中性子が過剰な不安定核が約3000個つくられ、従来の原子核理論では説明できない現象が次々と見つかっている。

ただし、それはuとdという2種類のクォークだけからなる“特殊な”原子核の世界だ。「私たちは理論研究とも連携しながら、sクォークを含むさまざまなクォークの組み合わせからなる原子核をつくり、その性質を詳しく調べる計画です。そのような研究により、核力や原子核の構造において何が特殊で何が普遍的なのか、それが初めて見えてくるはずです」

さらにその先の夢

クォーク4個以上のハドロンの存在が確かめられ

れば、私たちは、クォーク2個と3個という“特殊な”ハドロンの世界しか知らなかったことになる。

宇宙には中性子だけからなる中性子星がある。それは平均密度が 1cm^3 当たり10億トンという超高密度天体だ。宇宙にはさらに密度が高く、無数のクォークが高密度に結び付いた「クォーク星」も存在するかもしれないと考えられている。クォーク4個以上の新粒子の発見を目指す今井GLたちの研究は、このような極限天体の理解にも貢献する。

今井GLには、さらに夢がある。「sクォークを3個含む原子核をつくりたいですね。それはとても困難で、実験のアイデアすらありません。若い人たちにアイデアを出してくれと言っているのですが……。もう一つの夢は、sクォークより質量の大きいチャーム(c)クォークを含む原子核をつくることです。チャミングな原子核をつくりたいのです(笑)」

ハドロン物理の世界には、まだ広大なフロンティアが残されている。

(取材・執筆:立山 晃)

●参考文献

- [1] Quark and Nuclear Matter with Strangeness. K. Imai, Nucl. Phys. **A527**, 181(1991).
- [2] Observation of a $\Lambda\Lambda^6\text{He}$ double hypernucleus. H. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 212502(2001).

For the discovery of new hypernuclei and hadrons consisting of 6 quarks at J-PARC

We now know 6 species of quarks as elementary particles. Particles consisting of quarks are called hadrons. Protons and neutrons, which are building blocks of nuclei, consist of 3 quarks; two up (u) and one down (d) quarks for a proton and two d- and one u-quarks for a neutron. Dr. Imai, a leader of hadron physics group, says, "By introducing strange (s) quarks, we can produce new nuclei with s-quarks and will be able to produce new hadrons with more than 4 quarks. We like to discover a new hadron consisting of 6 quarks at J-PARC." Dr. Imai and his group plan several experiments at J-PARC to search for new nuclei with s-quarks and new hadrons with 6 quarks. A new epoch of the hadron physics has just started at J-PARC.