



季刊誌

2017

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

NO.09

| 特 | 集 |

CP対称性

解説
J-PARC

CP対称性って何？

ニュートリノの世界で
CP対称性を調べる

interview

「ニュートリノにおけるCP対称性の破れ」

中家 剛

CP対称性の破れ



「反物質」は、まるで鏡に写したように、「物質」とは電荷（あるいはスピン）以外の性質がまったく同じです。

ニュートリノの「CP対称性の破れ」

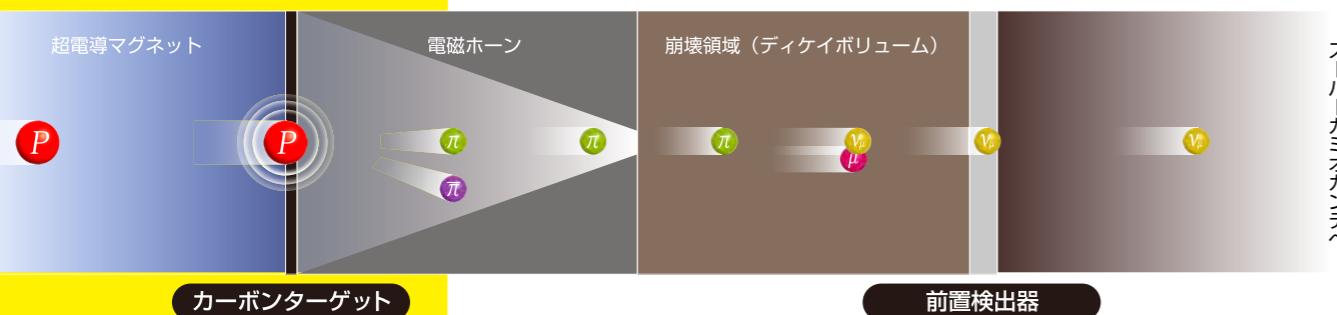
残りの6種類の素粒子（レプトン）のうち、ニュートリノについて「CP対称性の破れ」を検証するのが、T2K実験です。

T2K実験では、J-PARCから295km離れたスーパーカミオカンデにニュートリノを打ち込んでいます。2013年には、ミュー型のニュートリノが電子型のニュートリノに変わったニュートリノ振動「電子型ニュートリノ出現現象」を世界で初めて観測しました。

ニュートリノのCP対称性が破れている場合、ミュー型と反ミュー型でニュートリノ振動の頻度に差が出てきます。

2017年の夏までに、95%の確率で、ニュートリノのCP対称性が破れている可能性を示すことができました。

J-PARCで加速された陽子がカーボンターゲットに衝突し π 中間子ができる。崩壊領域（ディケイボリューム）を飛行中に π 中間子はミュー型ニュートリノとミュー $\bar{\nu}$ と崩壊し、このうちミュー型ニュートリノだけがスーパーカミオカンデに向かって飛んでいきます。

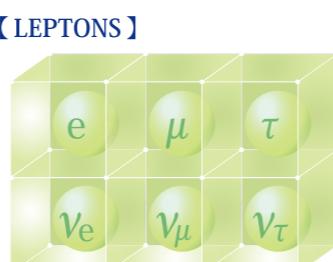
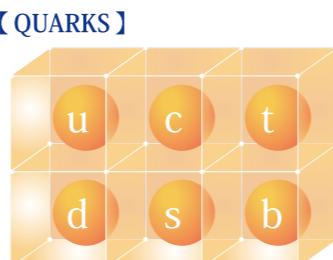


138億年前のビッグバンで宇宙が誕生したときに、「物質」と「反物質」は同じ数だけ生成されたと考えられています。しかし現在の宇宙では「反物質」はほとんど存在せず、「物質」だけが存在しています。なぜ、この宇宙には「反物質」がほとんど存在しないのか…？ いまだ解明されていないこの謎は、現代物理学の大きな謎の一つになっています。「物質」だけが存在するためには、「物質」と「反物質」に何らかの違いがある、すなわち「CP対称性が破れている」必要があります。

クォークの「CP対称性の破れ」

「物質」を構成する12種類の素粒子（クォーク6種、レプトン6種）のうち、クォークについては、「CP対称性の破れ」を説明する理論が小林・益川によって提唱され、KEK B加速器によるBelle実験などによって検証されています。

しかし、小林・益川理論の「CP対称性の破れ」だけでは、現在の宇宙の成り立ちを説明するのは難しいと考えられています。



素粒子には6種類の「クォーク」と、6種類の「レプトン」があります。このそれぞれに「反物質」が存在します。

クォークの「CP対称性の破れ」

ノーベル賞受賞に繋がった「理論」と「実験」

クォークのCP対称性の破れは、1973年に小林誠と益川敏英により提唱された理論をもとにBelle実験などで詳細な検証が行われました。第3世代のクォークからできているB中間子と反B中間子の崩壊率に違いがあることから、クォークのCP対称性の破れが確立し、2008年のノーベル物理学賞受賞につながりました。



上／クォークのCP対称性の破れの検証に用いられたBelle実験装置（高エネルギー加速器研究機構・つくば市）

左／京都大学理学部助手時代の小林（後列左端）・益川（前列左）の両氏

レプトンの「CP対称性の破れ」

世界が注目する「理論」と「実験」

これまでの実験で観測されたクォークのCP対称性の破れだけでは「反物質」がなくなったことを定量的に説明できないことが分かりました。一方で、1986年に福来正孝と柳田勉により宇宙初期のレプトジェネシスというシナリオが提唱されました。そこで生成されたレプトンが起源となって「反物質」がほとんど存在しない今の宇宙ができたとするもので、そこではニュートリノの質量やCP対称性の破れが大きな役割を果たします。

ニュートリノのCP対称性の破れは、ニュートリノと反ニュートリノでのニュートリノ振動の起こる確率の差に現れます。ニュートリノ



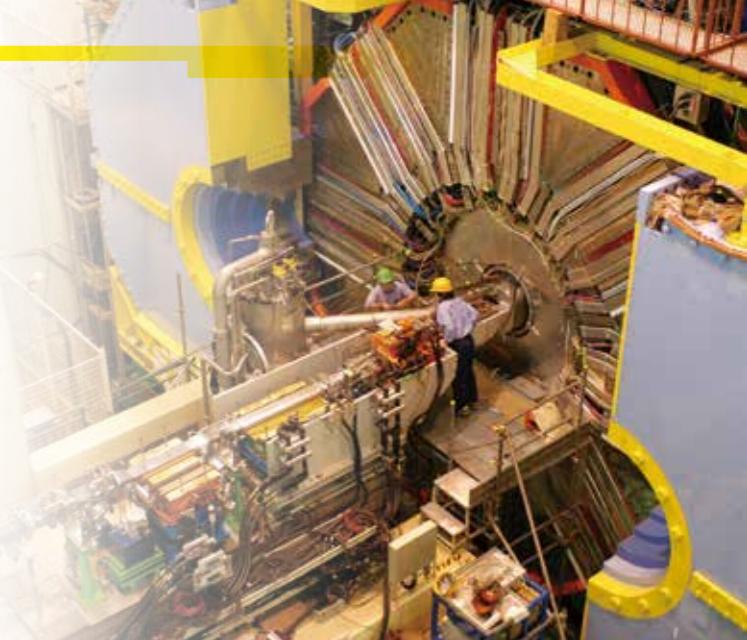
当時の名古屋大学素粒子論研究室。牧・中川・坂田氏らが議論している。（写真提供：名古屋大学理学部）



現在T2K実験によって、ニュートリノにおけるCP対称性の破れを調べているJ-PARCニュートリノ実験施設

宇宙の成り立ちの解明に迫る「CP対称性の破れ」。CP対称性の破れについて、日本は世界の最先端の研究を行っています。

「理論」と「実験」



ニュートリノにおけるCP対称性の破れ

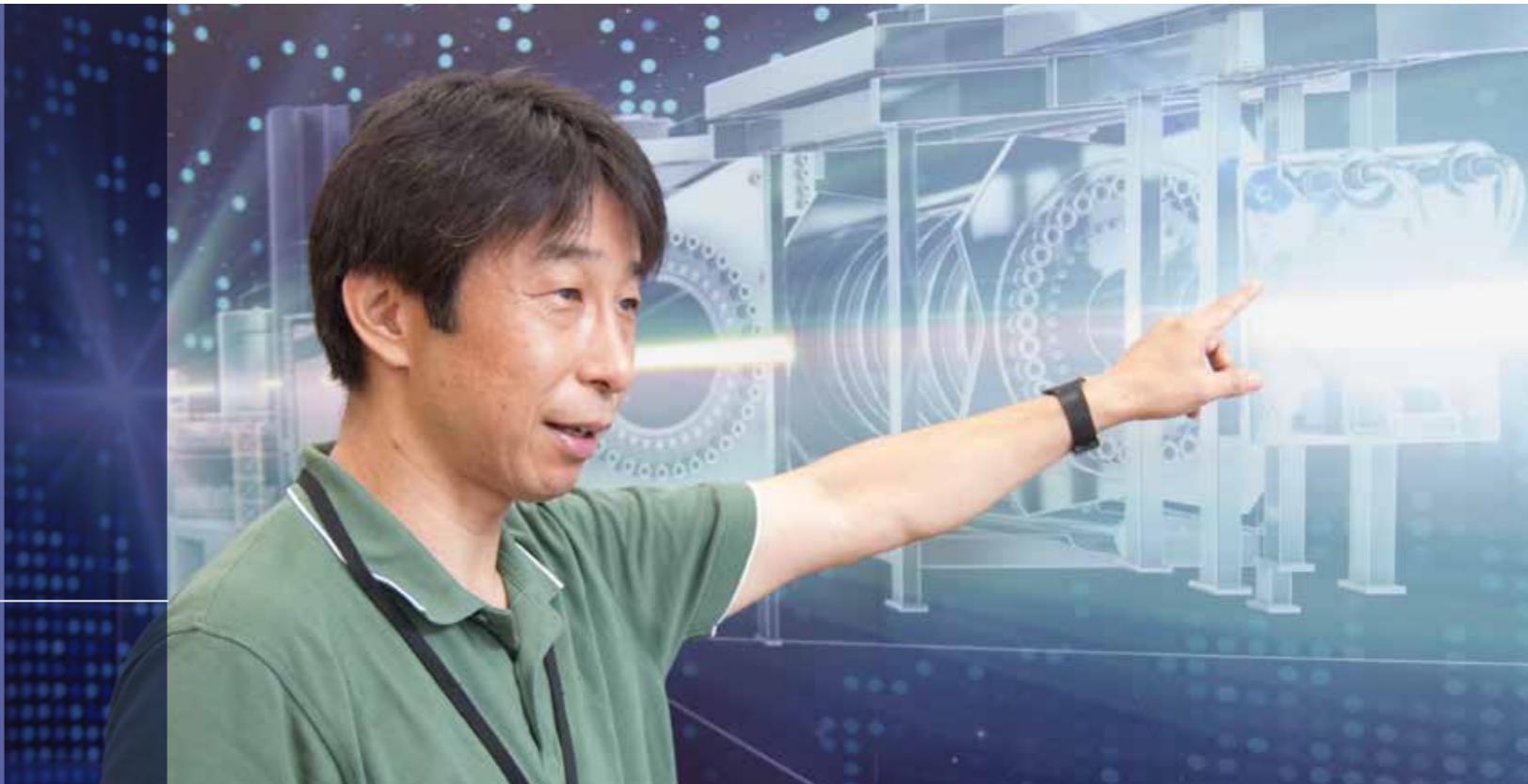
ニュートリノにおけるCP対称性について最新の状況はどのようにになっているか、また今後の研究の発展について、京都大学大学院理学研究科の中家教授に話を伺った。

interview

中家 剛

Tsuyoshi Nakaya

京都大学大学院理学研究科 教授



ニュートリノの「CP対称性の破れ」って何？

粒子と反粒子の性質の「ずれ」

宇宙が誕生したときは正の粒子と負の粒子、たとえばマイナスの電荷を持った電子とプラスの電荷を持った陽電子が同時に生まれているはずです。正の粒子と負の粒子は鏡に映したように、電荷の符号以外は全く同じ性質を持っています。ところが現在の宇宙には負の粒子、陽電子はほとんど存在しません。どこかで粒子の性質がずれて、全く同じではなくなっている。こういうズレを**CP対称性の破れ**と言います。

CP対称性が破れているということは、実際の宇宙には負の粒子からできた反物質がほとんど残っていないという事実から想像できるのですが、どのように破れているのかはよくわかつていません。ひとつだけわかっているのは、2008年にノーベル賞を受賞した小林誠・益川敏英両博士の、クォークでのCP対称性の破れです。メカニズムがわかるとそこから宇宙の進化を説明できますが、クォークのCP対称性の破れだけでは現在の宇宙を説明できないことがわかりました。宇宙から反物質がなくならないのです。

ニュートリノ振動でCP対称性の破れを調べる

そこで、クォークとは別の素粒子、レプトンの一種であるニュートリノのCP対称性の破れを研究することになりました。それにはニュートリノと反ニュートリノ

J-PARCも大きな被害を受け、実験を継続できなくなりました。このため4月頃にそれまでのデータを調べたところ、電子ニュートリノ、ミューオンニュートリノ、タウニュートリノがあります。これらはお互いに、ミューオンニュートリノが電子ニュートリノやタウニュートリノに変化したり、元に戻ったりする。行ったり来たりするのでニュートリノ振動と言います。梶田隆章博士が発見して2015年にノーベル賞を受賞したのですが、このときの発見はミューオンニュートリノからタウニュートリノへの変化で、電子ニュートリノへの変化はわかつていませんでした。

そこでT2K実験ではまず、J-PARCからスーパーカミオカンデへ向けてミューオンニュートリノを発射し、ニュートリノ振動によってタウニュートリノに変化しているだけでなく、一部は電子ニュートリノにも変化していることを発見しました。タウニュートリノ95%に対して電子ニュートリノ5%といった比率です。この発見によって電子ニュートリノへの変化は小さすぎて検出できないかも

しないという説は否定され、この比率を比較することでCP対称性の破れを検証できる可能性が出てきました。これがT2K実験の最初の成果です。本格的な実験を始めたのは2010年ですが、1年間実験を続けた2011年3月11日に東日本大震災が発生して

反ニュートリノのニュートリノ振動を調べる

ニュートリノ振動を確認できたら、反ニュートリノのニュートリノ振動と比較することで、ニュートリノのCP対称性を検証することができます。

J-PARCでは、加速器からの粒子を収束させてニュートリノのビームを形成する電磁ホーンに流す電流を逆にすると、反ニュートリノのビームを発生させることができます。こうしてニュートリノと反ニュートリノのニュートリノ振動を比較し、違いがあればCP対称性が破れて

いることがわかります。

2.5秒おきに数百兆個のニュートリノを発射しますが、スーパーカミオカンデで検出できるのは多くても1日に数個、年間で100個ほどしかありません。その中にタウニュートリノや電子ニュートリノ、変化していないミューオンニュートリノがいくつ含まれているかを数えます。

ニュートリノと反ニュートリノのニュートリノ振動で、電子ニュートリノが生まれる確率に違いがあるかを調べます。確率とはサイコロを振るようなもので、必ず理論通りの数になるというものではありません。2つのサイコロを振ったとき、1の目が出る確率が同じと言えるかどうかは、統計学の考え方が必要です。数多く繰り返して確からしさ、信頼度を高めています。

ニュートリノのCP対称性の破れ、信頼度95%に

2016年8月に、当初目標としていたデータ量の20%の実験を終えた結果、「90%の信頼度で、ニュートリノと反ニュートリノのニュートリノ振動の確率が異なる」という発表をしました。ニュートリノのCP対称性が破れていることを示唆することができたのです。

ただ、これは10%の確率で破れていない、結論が間違っている可能性がまだあるということでもあります。そこでさらに実験を続けて2017年8月、当初目標の30%の実験を終えた結果から、信頼度が95%に高まったという発表をしました。今後はさらに当初

予定の2.5倍、これまでの9倍のデータを取得する予定です。これには10年程度かかる予定ですが、そうなると信頼度は99.7%まで高まります。そのためJ-PARCの加速器を改良して、現在より多くのニュートリノを発射できるようになります。

一方でスーパーカミオカンデの10倍の容量があるハイパーカミオカンデの建設が提案されており、信頼度を99.9999%まで高めることを最終目標と考えています。ハイパーカミオカンデを使うとデータの取得量は10倍になりますから、99.7%の信頼度の結果を一年で検証し、さらに高い信頼度の測定に進むことができます。

加速器の技術が日本の科学技術を高める

CP対称性の破れの発見が、すぐに技術として産業や生活の役に立つかというと、それはないと思います。しかし、このような科学研究に必要な技術は応用が期待できます。

加速器は素粒子を光速近くまで加速する装置ですが、数十メガワットというとても大きな電力が必要です。ただ、大電力で加速したあと、使った電力を回収することができれば、次の加速には不足分を電力会社から補うだけで済みます。こういった大電力の蓄電システムを開発していますが、このような技術は風力発電など自然エネルギーと組み合わせて使うことができるかもしれません。また加速器本体には超伝導磁石が使用さ

れていますが、これはリニアモーターカーや医療機器のMRIにも使用されているものです。加速器には既製品ではなく専用に開発した最先端機器が必要不可欠ですが、その技術は社会に蓄積されて基盤技術となっていきます。そういういろんな技術があることで、日本は科学技術で世界的に進んでいるという優位性を保てるのだと思います。

宇宙の物理法則を解き明かす研究が人類にもたらすもの

素粒子の研究は、宇宙の最も基本的な法則を解き明かすことです。しかし将来、もし宇宙の物理法則が全部わかったとしても、自然の全てを説明できることはありません。

ひとつひとつの粒子のふるまいがわかつても、天気予報が完璧に当たるわけではない。コンピューターの進歩やビッグデータの解析など、全体のふるまいを理解することによって、天気予報は進歩しているわけです。科学の進歩はまた新しい科学を作っていくと思います。

また、科学の進歩は科学者だけのものではありません。現代では一般の人でも、この世界は3次元で、時間も合わせると4次元だと、宇宙はビッグバンから始まっていたことを知っています。さらにそれがインターネットを通じて世界中の人と共有されている。

人間が認識できる領域がどんどん広がって、どう進化をおぼすかはわかりませんが、科学者はそういうことを追い求めていく面白い仕事だと思っています。

「T2K実験」と「CP対称性の破れ」

