

自然の基本法則をニュートリノで探る

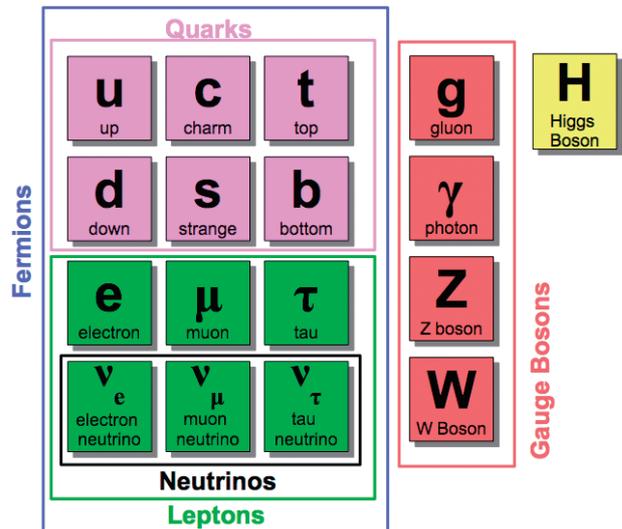
素粒子の標準模型は、宇宙の基本的な構成要素と物質の間の相互作用を記述します。標準模型に含まれる素粒子には、物質自身に伴う素粒子であるフェルミオン、相互作用に伴う素粒子であるゲージボゾン、そして質量を発生させる役割を果たす素粒子であるヒッグスボゾンが含まれます。また、標準模型には粒子と電荷が反対であり、粒子の鏡像である反粒子が含まれます。宇宙に存在する通常の物質は標準模型の粒子からできていますが、私たちは反粒子が存在するのを知っています。なぜなら、反粒子は自然界である種の物理的過程により生成され、また実験室で生成することができるからです。標準理論に現れる素粒子を図1にまとめておきます。ニュートリノは標準模型で独特の地位を占めるフェルミオンです。電氣的に中性で、最も弱い種類の相互作用しかせず、他のフェルミオンよりはるかに小さい質量をもっています。実際、ニュートリノの質量は小さ過ぎて、まだ正確な値は分かっていません。しかし、ニュートリノの質量は2番目に軽いフェルミオンである電子の質量の約100万分の1であると言うことはできます。なぜ他のフェルミオンに比べてニュートリノの質量がそんなに小さいのかという謎を解くことは、私たちの自然に対する理解を現在の標準模型を超えて拡張することによってのみ可能と

なります。

どうしてニュートリノが質量をもつことが分かるの だろう?

ニュートリノの質量が正確には知られていないなら、質量をもたない光とは違い、ニュートリノが質量をもつことがどうして分かるのでしょうか？ ニュートリノ質量の発見は、過去半世紀における科学上の偉大な物語の一つです。それは、ノーベル賞受賞者レイモンド・デイビスに率いられた有名なホームステイク実験により1960年代の末に始まります。この実験では、太陽の内部で生成された太陽ニュートリノがアメリカの南ダコタ州にある鉱山の地下深くで検出されました。そのニュートリノの検出率が予想されたものよりかなり少なかったため、研究者は太陽の内部の物理の模型が間違っている可能性を考えました。1980年代に、日本のカミオカンデ-IIなどの検出器で、宇宙線が地球の大気中で相互作用して発生する「大気ニュートリノ」と呼ばれるニュートリノにも不足があるという兆候が見出されたため、謎は更に深まりました。これらのニュートリノの不足は、恐らくニュートリノの生成過程よりもニュートリノの振る舞いにより説明できるのではないかと考えられました。ニュートリノに

図1 素粒子の標準模型に現れる素粒子。ピンクで表される素粒子、クォークと、緑で表される素粒子、レプトンを併せてフェルミオンと呼びます。レプトンのうち、黒い線で囲まれた素粒子がニュートリノです。一方、赤で表される素粒子がゲージボソンで、ヒッグスポソンは黄色で表されています。ニュートリノは最も軽いフェルミオンで、Z及びWボソンが媒介する弱い力によってのみ相互作用します。



は、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの3種類があります。太陽の内部では電子ニュートリノが生成され、一方、大気ニュートリノは主としてミューニュートリノと電子ニュートリノです。ホームステイク実験では電子ニュートリノだけを検出し、カミオカンデ-II 実験ではミューニュートリノと電子ニュートリノだけを検出します。従って、もし電子ニュートリノがミューニュートリノあるいはタウニュートリノに変身したとするとホームステイク実験では検出できないことになります。同様の理由で、電子ニュートリノとミューニュートリノがタウニュートリノに変身するとカミオカンデ-IIでは検出されないことになります。「ニュートリノ振動」と呼ばれるこの現象は観測されたニュートリノの不足を説明できませんが、一方でニュートリノが質量をもつことを要求します。

なぜニュートリノ振動はニュートリノが質量をもつことを意味するのだろうか？

ニュートリノ振動は、なぜニュートリノが質量をもつことを要求するのでしょうか？ 電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという名

前の由来は、それぞれのニュートリノの反応の仕方にあります。電子ニュートリノの反応には電子の生成が伴い、ミューニュートリノの反応はミュー粒子、タウニュートリノの反応はタウ粒子を生成します。物理学者はニュートリノのこの性質をフレーバーと名付け、ニュートリノは決まったフレーバーの状態で記述されると言います。もう一つのニュートリノの性質に質量があります。質量は、特定のエネルギーのニュートリノが2点間をどのように伝播するかを規定します。決まったフレーバーの状態が存在するのと同様に、決まった質量の状態があり得ます。量子力学の不思議な世界では、決まったフレーバーのニュートリノ状態それぞれが、決まった質量のニュートリノ状態の異なる組み合わせから成るということが可能です。決まったフレーバーのニュートリノが生成された場合、その各成分の決まった質量のニュートリノは、質量が異なるため異なる伝播をします。その結果、ニュートリノが伝播するに従い、各質量成分の相対的な比率が変化します。ある距離を伝播した後、ニュートリノはもはや最初のフレーバーをもっているわけではなく、図2に示すように3種類のフレーバー全部の組み合わせとなります。ニュートリノ振動過程は、ニュートリノ質量

$\nu_1, \nu_2, \nu_3 = \text{states of definite mass}$

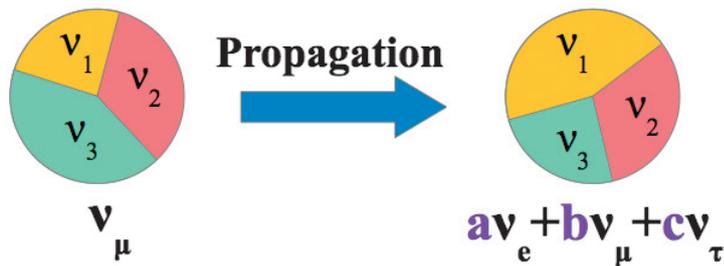


図2 決まったフレーバーであるミューニュートリノ、 ν_μ は決まった質量のニュートリノ、 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 の組み合わせです。それが伝播するに従い、質量状態の相対的比率が変わり、ニュートリノはフレーバー状態の組み合わせとなります。 ν_e 、 ν_μ 、あるいは ν_τ として反応する確率は、 a 、 b 、 c の大きさに依存します。

が存在し、かつ異なることを要求します。なぜなら、ニュートリノ質量による伝播の違いが振動効果を引き起こすからです。

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノ振動仮説は1990年代末と2000年代初めの2つの実験によって華々しく確認されました。最初、カミオカンデ-IIを大型化したスーパーカミオカンデ実験が、大気ニュートリノの不足は事実で、ニュートリノが検出器に達するまでに進んだ距離に依存すること、その依存性はニュートリノ振動と一致することを示しました。その後すぐに、SNO実験が太陽からやって来る電子ニュートリノの検出率と電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの検出率の総和の両方を測定しました。そして、全フレーバーからの検出率の和が太陽模型の予言と一致することを見出し、一方、電子ニュートリノは不足していることを確認しました。これは、電子ニュートリノの不足の原因が、電子ニュートリノからミューニュートリノとタウニュートリノへの振動のためであることを示すものでした。スーパーカミオカンデの梶田隆章、SNOのアーサー・マクドナルド両博士が2015年ノーベル物

理学賞を受賞したのは、これらの発見によるものです。

T2K実験によるニュートリノ振動の精密測定

ニュートリノ振動が確立して以来、素粒子物理実験は今やこれらの振動の性質の精密測定に携わっています。精密測定のために、私たちは人工ニュートリノ源に方向を転換しています。これには原子炉で発生するニュートリノと粒子加速器で作られるニュートリノがあります。筆者はKavli IPMUでグループを作り、加速器ニュートリノを用いるT2K実験に参加しています。加速器ニュートリノを発生させる過程は、大気ニュートリノを発生させる過程と同じですが、自然の宇宙線を用いる代わりに、粒子加速器によってほとんど光速まで加速された陽子を用います。これにより、ビームの方向、エネルギー、フレーバーの内訳がコントロールされた高強度のニュートリノビームを発生させることができます。T2Kとは「Tokai-to-Kamioka (東海から神岡へ)」を意味します。図3に示すように、日本の東海岸にある東海村のJ-PARCにおいて加速器で発生させたニュートリノが、地中を295 km通過して神岡に到達し、そこでほんの一部が先に述べたスーパーカミオカンデ検出器の中で反応するからです。



図3 T2K実験は日本の東海岸にある東海村のJ-PARC 施設で発生させたニュートリノビームを使用します。295 km離れたスーパーカミオカンデ検出器により、そのニュートリノのほんの一部が検出されます。

ニュートリノがスーパーカミオカンデの中で反応した場合、これをニュートリノ事象と呼びます。ニュートリノの反応確率は非常に低いため、T2K実験の全期間中にスーパーカミオカンデを10億個の10億倍以上の加速器ニュートリノが通過する計画ですが、スーパーカミオカンデで私たちが検出するのはたった数百個のニュートリノ事象です。

T2K実験のニュートリノビームの成分は、ほとんど100%ミューニュートリノです。私たちが測定したいと思っている主要な過程は、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動です。私たちはスーパーカミオカンデでミューニュートリノと電子ニュートリノの違いを検出できます。電子ニュートリノの反応は電子を、ミューニュートリノの反応はミュー粒子を生成することを思い出して下さい。スーパーカミオカンデはニュートリノ反応からの電子とミュー粒子を、測定器の壁面に光のリングを生じるチェレンコフ放射と呼ばれる過程によって検出します。電子は輪郭のぼやけたリングを生じるのに対し、ミュー粒子ははっきりした輪郭のリングを生じ、この違いを用いて電子とミュー粒子を区別することができます。図4に、スーパーカミオカンデでミュー粒子と電子に対して観測されるパターンの例を示します。

ミューニュートリノから電子ニュートリノへ振動する過程が興味深いのは、2つの理由があります。第1に、この過程を検出すると、あるフレーバーのニュートリノが別の特定のフレーバーのニュートリノに振動する初めての直接的証拠を得たことになります。第2に、この振動過程は物質であるニュートリノと、その反物質パートナーである反ニュートリノに対して異なっている可能性があります。自然の法則で物質と反物質に対して非対称な現象を探することは、どのようにして宇宙が今の宇宙になったかを理解することに結びつきます。もし物質と反物質が同じ法則に従ったとすると、宇宙は同じ量の物質と反物質から成り立っているものと予想されます。しかし、宇宙は物質から成り立っていますから、私たちはこの不均衡を創り出すことのできる物理過程を探しています。ニュートリノ振動は、このような不均衡が生じる可能性のある過程の一つです。

東北大震災により一時的にT2K実験の実施が停止された後の2011年6月に、T2Kグループはミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動の初めての兆候を論文として発表しました。ニュートリノ振動以外の原因によるものとして僅か1.5個の事象が予測されるところ、6個の事象を観測したのです。観測された

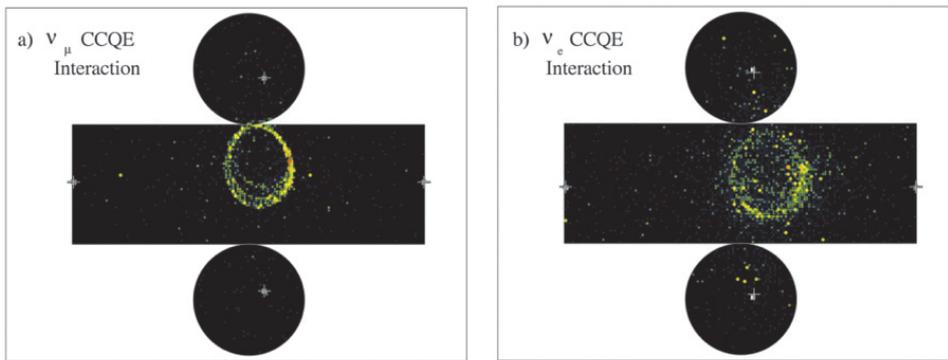


図4 スーパーカミオカンデでニュートリノが反応した場合に観測されるパターンのシミュレーション結果。左はミュー粒子、右は電子が生成された場合の例を示しています。ミュー粒子は輪郭のはっきりしたリングを生じ、電子は輪郭のぼやけたリングを生じるので、区別できます。

6事象全部がニュートリノ振動以外の原因によるものである確率は0.7%でした。J-PARCの加速器とT2K実験は、多大な努力により東北大震災から1年後に復旧することができ、実験が再開されました。2014年2月に、T2Kグループは電子ニュートリノへの振動の観測事象数を積み増した最新結果を論文として発表しました。新しい結果によれば、ニュートリノ振動以外の原因によるものとしてたった4.9個の事象が予測されるところ、28個の事象が観測されたのです。これだけの観測事象数が全てニュートリノ振動以外の原因によるものとして説明される確率は10億分の1以下となり、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動過程発見を主張する十分強い証拠となりました。観測された28事象のエネルギー分布を図5に示します。

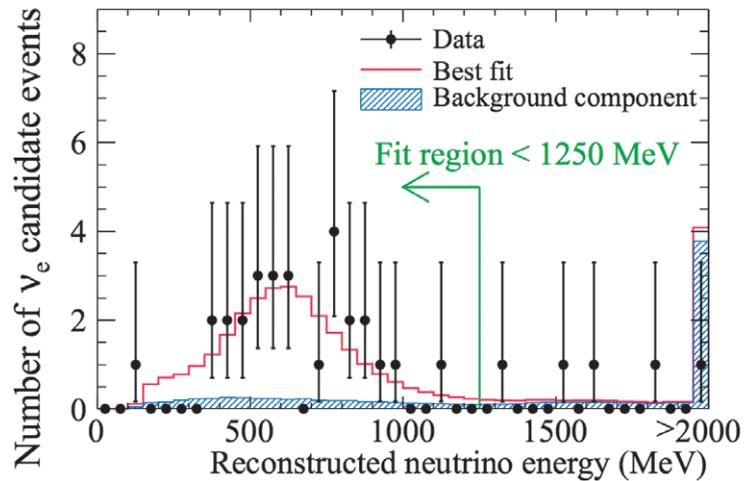
T2Kの将来とさらにその先

T2K実験はミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動を発見したため、現在では反ミューニュートリノのビームに切り替えて反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへの振動を調べています。ニュートリノと反ニュートリノの両方に対してニュー

トリノ振動の事象検出率を測定することにより、T2K実験は先に述べた物質と反物質の非対称を探ることが可能となります。2015年夏に、T2K実験は反電子ニュートリノの出現について最初の結果を発表しましたが、予想される1.8事象のバックグラウンドに対して3事象が観測されました。これだけのデータ数では反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへの振動を発見したと主張するには余りに少な過ぎますが、T2K実験はさらにデータの取得を続けています。

T2K実験は全実験期間を通じて数百個の電子ニュートリノと反電子ニュートリノ事象を収集すると予想されています。もし運が良ければ、私たちは物質と反物質の非対称を99%の信頼度で観測できるかもしれません。ニュートリノと反電子ニュートリノの反応は非常に弱いため、その事象の収集には非常に時間がかかります。物質と反物質の非対称を徹底的に調べてその性質を正確に測定するには、数百どころではなく数千事象が必要です。事象の発生率を増やすには2つの方法があります。第1に、ニュートリノ検出器の質量を増やすことができます。現在のスーパーカミオカンデ検出器では5万トンの水がニュートリノ反応の標的となります。Kavli IPMUを含む日本および世界各国から

図5 T2K実験で観測された電子ニュートリノ事象の候補のエネルギー分布。赤いヒストグラムはニュートリノ振動で予想される分布、青い斜線の部分は振動とは関係の無い原因によるバックグラウンド事象の見積もりを示しています。データはニュートリノ振動の予想と一致しています。



の研究者は、スーパーカミオカンデの近くにハイパーカミオカンデと呼ばれる新しいニュートリノ検出器を建設することを提案しています。ハイパーカミオカンデは、スーパーカミオカンデの20倍の100万トンの水をニュートリノの標的とします。これにより、検出器内のニュートリノ反応検出率は20倍に増加します。ニュートリノの反応検出率を増やす第2の方法は、もっと強度の強いニュートリノビームを発生させることです。J-PARCのニュートリノビームの強度は、ハイパーカミオカンデの建設が終わるまでには少なくとも3倍に増やすことが可能と期待されています。高強度のニュートリノビームと超巨大検出器が組み合わさることにより、ハイパーカミオカンデはニュートリノ振動で物質と反物質の非対称を調べる世界で最も感度の高い実験となります。

まとめ

ニュートリノは質量が非常に小さいため、素粒子の標準模型でユニークな役割を果たします。その質量の小ささは、まだ解明されていない物理を示すものです。特に、ニュートリノの振動はニュートリノの質量

について情報をもたらし、さらに物質と反物質の非対称の新たな起源を秘めているかもしれません。それが見つければ、なぜ宇宙が等量の物質と反物質からではなく、物質から成るのかを理解する上での助けとなり得るでしょう。現在、Kavli IPMUの研究者が参加しているT2K実験では、高強度のミューニュートリノと反ミューニュートリノビームを用いてミューニュートリノから電子ニュートリノ、および反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへの振動を研究しています。もし運が良ければ、T2K実験はこれらの測定によりニュートリノ振動における物質と反物質の非対称の形跡を初めて発見できるかもしれません。ニュートリノ振動を精密に測定し、その物質と反物質の非対称を徹底的に調べるには、少なくともT2K実験の10倍のニュートリノ事象が必要とされます。この感度を得るために、世界各国からの研究者が現在のスーパーカミオカンデ検出器の20倍の大きさのハイパーカミオカンデ実験を提唱しています。もしハイパーカミオカンデ検出器が実現すれば、カミオカンデとスーパーカミオカンデ実験のノーベル賞受賞で確立した日本のニュートリノ物理実験の伝統を引き継ぐものになると期待しています。