



In Laboratory Now

研究室訪問 1

ニュートリノの神秘を追い求めて 久世 正弘 研究室～基礎物理学専攻



久世 正弘 准教授

物理学は、物の理（もののことわり）と言われるように物質を対象とする学問である。物理学の分野には、原子を構成している核子やさらに小さいクォークなど、微視的な視点を対象にする「素粒子物理学」と、宇宙全体の大規模構造から小さなところまでを巨視的な視点で研究を行う「宇宙物理学」という分野がある。これらは両極のスケールを研究対象にしているが、お互いに影響しあっている。今回は極小スケールの素粒子物理学のうちニュートリノに関する研究を行っている久世研究室の紹介をしていく。



ニュートリノの歴史

不安定な原子核が他の原子核に変わる放射性崩壊のうち、アルファ崩壊やベータ崩壊は20世紀初頭には発見されていた。当時、アルファ崩壊とは原子核がアルファ粒子（He原子核）を放出する崩壊現象、ベータ崩壊とは原子核中の中性子（ n ）がベータ粒子（高速で飛ぶ電子）を放出し陽子（ p ）になる現象であると認識されていた。しかし、これらの研究が進むうちに、アルファ崩壊ではエネルギー保存則が守られているが、ベータ崩壊では破られていることが確認された。原子核崩壊において、崩壊時に放出されるエネルギー（質量差）は崩壊後の粒子の運動エネルギーに転換される。ところが、ベータ崩壊をした原子核とベータ粒子が新たに得た運動エネルギーを測てみると、そのエネルギーの合計は毎回異なる値になっており統計をとってみると連続的に分布をしていた。ベータ崩壊で放出されるエネルギーはいつも一定値なので、理論的には崩壊後に粒子が得る運動エネルギーは決まった値になるはずである。

この原因について多くの物理学者がさまざまな考察をしてきた。中には「原子の世界ではエネルギー保存則が成り立たなくてもよい」といった解

決案を唱える人さえ出てきた。しかし、1930年にスイスの物理学者のパウリは「ベータ崩壊でエネルギーが保存していないように見えるのは、未知の中性微子がエネルギーの一部を持ち去ることが原因であり、それが観測されていないだけで実際にはエネルギー保存則は成り立っている」という仮説を発表した。

この中性微子は「電氣的に中性で透過力が非常に強く物質と反応しない粒子」と仮定された。この粒子がベータ崩壊時にさまざまな大きさの運動エネルギーを持っていくと考えれば、これまでの観測結果を説明することができる。これは当時としては大胆な考えであった。そして、1933年にイタリアの物理学者であるフェルミによってベータ崩壊の仮説がついに完成した。その仮説とは「ベータ崩壊は原子核内の中性子が陽子と電子を放出し、さらに中性の粒子も放出する」というもので、この中性微子はニュートリノ（ ν ）と名づけられた（図1左）。なお、現在ではこのときに放出されるニュートリノは反ニュートリノ（ $\bar{\nu}$ ）であることが分かっている。

ニュートリノという粒子を採用することにより

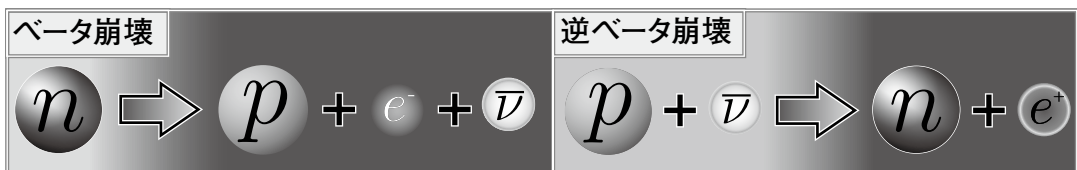


図1 ベータ崩壊と逆ベータ崩壊

ベータ崩壊の説明をすることができたが、しばらくの間、その存在を実証することはできなかった。しかし1950年代に入ると、アメリカのライナスとコーワンの行った実験によりニュートリノの存在は確認された。彼らは、理論的に予測されていた逆ベータ崩壊(図1右)を、原子炉のベータ崩壊により出てきている $\bar{\nu}$ を利用し、陽子との反応を観測することにより、ニュートリノが存在することの証明に成功した。これによって、それまで理論上の粒子とされていたニュートリノが実在することが認められた。

また、当時は宇宙線に含まれるパイ中間子(π)がミュー粒子(μ)に崩壊する際にも、ニュートリノが放出されることが知られていた。

$$\pi \rightarrow \mu + \nu \quad (1)$$

しかし、このとき発生するニュートリノがベータ崩壊で生じるニュートリノと同種のものなのかどうかは分からないままであった。その後、1962年にアメリカの物理学者であるレーダーマンが、加速器から得られた π の崩壊によって生成される

ニュートリノについて研究を行った。ところが π 由来のニュートリノでは、原子炉由来の時とは異なり、電子は生成されることはなく、 μ のみが生じた。このことから、ベータ崩壊由来のニュートリノと π 由来のニュートリノは別のものであり、ニュートリノは複数の異なる種類が存在することが分かった。そして1998年に日本のグループにより、タウ粒子(τ)に付随するニュートリノも発見された。現在では、ニュートリノには電子ニュートリノ(ν_e)、ミューニュートリノ(ν_μ)、タウニュートリノ(ν_τ)と、それぞれの反粒子の計6つが存在すると考えられている。

当初はエネルギー保存則(運動量保存則)の破れを避けるために便宜的に採用されたニュートリノであるが、現在ではさまざまな観測によりその存在は間違いないものになっている。しかし、存在は確認されたもののニュートリノに関する研究課題は山のように残っている。ここでは久世研究室でも取り組んでいるニュートリノ振動実験の話題を扱う。

～キーワード～

反物質

高エネルギーの光子から物質が生成するときに付随して生成される物質。なお、陽電子は電子の反物質である。宇宙が誕生した時に物質・反物質は同数生成されたはずだが、現在は反物質がほとんど存在しないという「対称性の破れ」は物理学の未解決問題の一つである。

標準模型

正確には量子色力学、電弱統一理論、小林・益川理論を組み合わせたもの。ニュートリノに関する記述が観測事実と異なっている他、力の統一が完全にできていないため、完全な理論ではない。

強い力

その名の通り、4つの力のうち最も強い力。電磁気力の100倍強く、この力により原子核内の粒子同士が電磁気力の斥力によりバラバラになるのが抑えられている。

弱い力

重力を除くともっとも弱い力。強い力は粒子同士を束縛させる力であるのに対し、弱い力は放射性崩壊を起こさせる力である。ニュートリノは弱い力と重力しか感じないので相互作用をしにくく、検出が困難である。また弱い力で対称性の破れが観測されている。



ニュートリノ振動

自然界には4つの基本的な力が存在する。このうち、重力を除いた3つの力(強い力, 弱い力, 電磁気力)を統一的に記述する標準模型(標準理論)が完成している。この理論にはニュートリノに関する記述も含まれており、これまでの長い間、ニュートリノに関する現象を矛盾なく説明し、実験の予測を精度良く行ってきた。標準模型によるとニュートリノは質量が0の粒子として定義されている。しかし、ニュートリノが質量も電荷も持たないならば、なぜそれらが ν_e, ν_μ, ν_τ と3つの異なる粒子に区別できるのか、と疑問視されていた。今では、ニュートリノに質量があるという実験結果が出てきているため、ニュートリノの質量を0としている標準理論に欠陥があることが明らかになっている。

その証拠となったのはニュートリノ振動という現象だ。これは、仮にニュートリノに微小な質量があるとすれば、ニュートリノが自由粒子として飛んでいる間に他の種類のニュートリノに変化するというものである。ニュートリノの存在確率が、生まれたときから波のように変化することから、その名がつけられた。ニュートリノ振動は理論的に予言されているため、これを観測することに成功すれば、ニュートリノに質量があることを示すことができるのだ。

ニュートリノ振動は、1998年にスーパーカミオカンデで大気ニュートリノの測定実験を行うことにより初めて確認された。なお、大気ニュートリノとは、式(1)のように、宇宙線のうち π が大気に衝突して μ になるときに発生する ν_μ のことを指している。以下ではこの現象を例にあげてニュートリノ振動の測定実験の説明をする。

ニュートリノは相互作用が小さく地球を容易に突き抜けていくため、観測装置ではその上方で発生した大気ニュートリノのほかにも、地球の裏側で発生したものも観測することができる(図2)。スーパーカミオカンデでは、大量の水をニュートリノの標的にすることにより、より多くの反応を観測することが可能になっている。ここで得られたデータを解析すると、上空からの ν_μ の数と地球の裏側からの ν_μ の数が異なっていることがわ

かった。また、さまざまな角度からのニュートリノの数を調べてみると、その値は連続的に増減していた。この連続的な変化は、ニュートリノ振動の理論予測値と一致した。

ここで、ニュートリノのエネルギーを E とすると、2粒子間のニュートリノ振動を与える方程式は以下で与えられる。

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu; L) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{(m_1^2 - m_2^2)L}{4E} \quad (2)$$

これは、飛行距離 L について ν_e が ν_μ に変化する確率を示している。これに含まれる変数のうち、 θ と m については理論的に導くことができないため、測定実験により決定する必要がある。この方程式には、質量の2乗差が含まれており、これが L の係数になっていることから、ニュートリノ振動を観測し距離に関する変化を調べれば、質量差の値が得られるのだ。

また、 θ はニュートリノ振動の混ざり具合を表す混合角というパラメータであり、3種類のニュートリノ組の間に3つ存在する(図3)。なお、式(2)をみて分かるように、 θ は確率を波と見たときにその振幅を与えるため、混合に関する角、つまり混合角と呼ばれている。

これまでに3つの混合角のうちの θ_{12} と θ_{23} は、

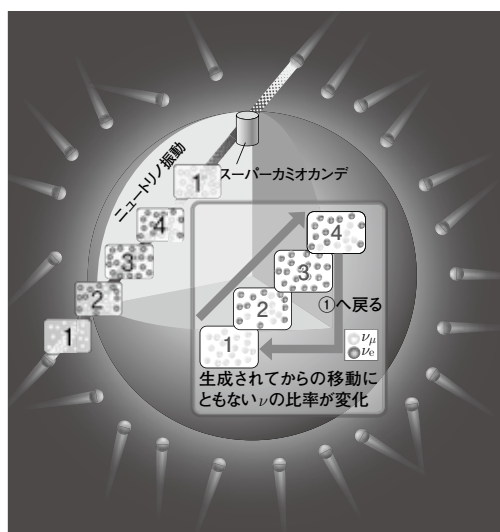


図2 大気ニュートリノの振動

太陽ニュートリノの観測と大気ニュートリノの観測により決定された。太陽ニュートリノとは太陽の内部で起きている核融合で生じる電子ニュートリノ (ν_e) のことである。しかし第3の混合角 θ_{13} については、0なのか、またそうでないのなら数値はいくらなのかは未だに分かっていない。 θ_{13} を決定するには、 ν_e 、 ν_τ 間のニュートリノ振動の振幅の大きさを測ればよい。しかし θ_{13} が小さくなればなるほど、その振幅は小さくなるため測定

することは困難になってしまう。そして、実際に θ_{13} は値が小さいため、最後まで残ったのだ。また、3つの混合角の間には、図3のような関係がある (KASKA に関しては後述)。この図に含まれる δ は宇宙の粒子・反粒子の対称性の破れにも関係しており、これは全ての混合角を測定しないと決定できないものである。そのことから、最後の混合角である θ_{13} を決定することが、現在のニュートリノ研究において最重要課題になっている。



原子炉ニュートリノ実験

素粒子物理学には「理論」と「実験」の分野があるが、久世研究室では主に実験を行い、理論の検証や新現象の発見を目指している。一口にニュートリノの測定実験といっても、太陽ニュートリノや、大気ニュートリノの測定、さらには加速器から打ち込まれたニュートリノや原子炉ニュートリノの測定など、測定対象は多岐に渡る。その中でも久世研究室では、ライナス・コワンが行ったような原子力発電所から出てくる原子炉ニュートリノの測定実験に力を入れている。

先にあげた混合角 θ_{13} の測定方法として、始めは原子炉ニュートリノの測定も検討されたが、測定精度が悪いこともあり加速器実験だけで十分と考えられていた。しかし、複数の太陽ニュートリノの実験結果を検証した結果、加速器実験による

ニュートリノの測定では大きな理論的不定性が存在するため、これだけでは θ_{13} を正確に決定できないことがわかった。そこで、日本の研究グループが原子炉による θ_{13} の測定と加速器実験の結果を組み合わせることによりこの不定性を解くことが可能であると提唱し、原子炉ニュートリノの測定の重要性が認識されるようになった。

この方法でニュートリノ振動を測定するには、原子炉のすぐそばと数 km 離れたところに検出器を置き、その反応数を比較すればよい。原子炉から離れれば離れるほど、検出器を貫く粒子の数は減っていくが、それを計算した上で、もしニュートリノの測定数に違いが見られなければ、混合角は0になる。しかし、ほんの少しでも違いがあれば値は小さいが混合角があることが分かる。

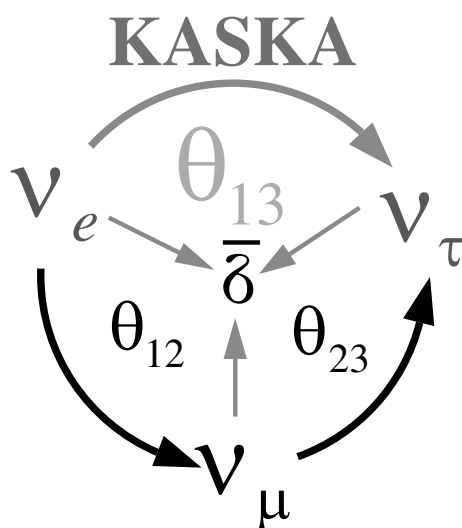


図3 混合角の概念図 (KASKA 計画ロゴ)



写真1 光電子増倍管

2009年に始まるニュートリノ振動の共同実験にフランスのChooz（ショー）村にある原子力発電所を利用するものがある。この実験にはヨーロッパとアメリカ、日本などの8ヶ国から150人程度が参加しており、各国が分担して実験の準備を行っている。日本からは東京工業大学の他に東北大学、新潟大学、首都大学東京、神戸大学、宮城教育大学、大阪大学、広島工業大学、高エネルギー加速器研究機構（KEK）から25人程度が参加する。二つの検出器を用いて測定実験を行うことから実験の名前はDouble Chooz（ダブルショー、以下DChooz）と呼ばれている。なお、この実験では、ニュートリノを液体シンチレーターと微弱な光を感受する光電子増倍管（写真1）を用いて検出する。液体シンチレーターは有機溶媒の一種であり、その中を高エネルギーの粒子が通過すると励起され、光を放射する。この光はとても微弱なため、光電子増倍管を用いて測定する必要がある。光電子増倍管では1つの光子でも増幅させ電気信号として取り出すことができる。

久世研究室ではDChoozでの多国籍実験に参加しており、光電子増倍管の開発・性能検査などを担当している。光電子増倍管は、国内のメーカーで製造され、約400本を一本一本研究室で検査している。ニュートリノの反応で発生するわずかな信号を検出する際に、個々の光電子増倍管による誤差をなくし、正確な検証を行いたいからだ。誤差の原因として、検出器の外から飛び込んでくる他の種類の宇宙線によるものが大半であるが、その他にも検出器自体によるものがある。例えば身の回りに飛んでいる埃の中にも必ず不純物がミク

ロのレベルで入っているが、その不純物の中にはウランやトリウムなどの地球が生まれたときから存在する放射性元素が、ごくわずかであるが含まれている。これらは半減期が10億年程度のものなのだが、1日で見ると数発の崩壊が起きており、そこから発生する放射線により光電子増倍管が反応してしまう。

宇宙線や、土に含まれる放射性元素によるバックグラウンドの誤差については、次の方法で区別することができる。図1のように、ニュートリノが陽子に当たると陽電子と中性子に変化するが、陽電子は少し進むと物質中の電子と対消滅し2本の γ 線になる。また、中性子はしばらく進んだ後、止まりかけたところで液体シンチレーター中の添加物のガドリニウムに吸着され、非常に大きなエネルギーの γ 線を放出する。ニュートリノの反応では、このように2つの γ 線が数十 μ 秒の差で放出されるという特異な反応をするため、他の宇宙線による発光と区別することができる（図4）。これは、先に出てきたライナス・コーワンが用いた手法と同様なものである。

このように、原子炉を用いるニュートリノ振動の測定実験では、バックグラウンドを極力排除して正確なデータを集めることが要求されている。また、先の説明から、現在の実験物理学の分野では施設や規模が過去のものとは比べものにならないほど大きくなっており、もはや個人や少人数のグループで研究することは難しくなっている。そのため、DChoozのプロジェクトのように世界中から研究者が集まり、それぞれが協力する共同実験が今後も増えていくだろう。

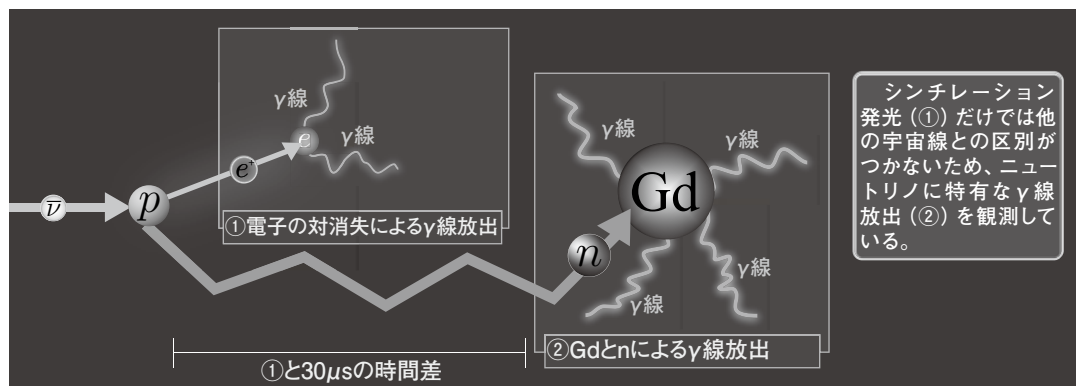


図4 反電子ニュートリノ検出の原理



ニュートリノ振動実験のこれから

標準理論の限界の1つとして、任意の定数が多すぎることがあげられる。理論を組み立てるうえで力の相互作用の大きさを決める結合定数や、クォークやレプトンの質量などの定数を導入する必要があるが、これは理論から導くことができないため、実験的に決定をしなければならない。ニュートリノに関しては、質量 (m_1, m_2, m_3) や、混合角 ($\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$)、また、対称性の破れを引き起こすパラメータ (δ) の計7つの任意定数があるが、これまでの実験からこのうちの4つの組み合わせに関しては既に測定されている。しかし、先ほども述べたように、ニュートリノに関する研究でまず解決しなければならないのは、最後の混合角 θ_{13} の決定である。 θ_{13} の大きさは素粒子の統一理論を構成する際の有用な情報になるだけでなく、粒子と反粒子の対称性の破れに関連するパラメータ δ (レプトンの対称性の破れ) が測定可能かどうかにもかかわってくる。これは2008年度のノーベル物理学賞にも関係しているもので、今後の研究のためにも重要となる値である。

DChoozの実験では、まずは θ_{13} が発見できるかどうか大きな分かれ目になる。なぜなら θ_{13} がある程度の大きさを持てば、パラメータ δ が、今後の加速器実験で測定が可能であると分かっているからである。逆に、 θ_{13} が小さい場合には、今あるような加速器では検証ができないため新たな方法を考える必要が出てくる。

現在はフランスのDChoozでの実験を中心に各国が動いているが、DChoozの次は日本国内で実験プロジェクトが行われるかもしれない。2003年に原子炉ニュートリノを用いた測定の必要性が認識されてから、日本のKASKA計画をはじめ8つの計画が世界各地から立案された。これらは統廃合されて行き、現在ではフランスのDChooz、中国のDayaBay、韓国のRENOと3つのプロジェクトが同時並行している。

KASKA計画では、新潟県の柏崎刈羽にある、日本最大であり、また世界最大である原子力発電所を利用したニュートリノ振動の測定実験を計画している。原子炉から発生するニュートリノの数は原子炉の出力にほぼ比例するため、同じ検出器を用いても、より精度の高いデータが得られる点で他の計画より優れている。構想段階ではあるがDChoozの結果によっては、より精密な測定が必要となるため、KASKAを用いてより進んだ研究を行うことを計画している。現在日本のグループはDChoozのプロジェクトに合流したが、今でもKASKAに関する研究に力を入れている。KASKAのロゴマーク(図3)には「 θ_{13} という最後のニュートリノ振動パラメータを測定し、CP非保存パラメータ δ の測定に道を拓く」という願いがこめられている。これまでに発見された混合角 θ_{12}, θ_{23} は日本の実験で測定されているため、最後の θ_{13} についても日本のグループが発見できるように日々努力し続けている。

先ほども述べたように、標準理論は重力を除いた3つの力に関するすべての実験結果をかなりの精度で予言している。しかし、物理学者はこれが究極の理論だとは考えていない。より究極の理論に近づくためには、より多くの実験を行い、それをもとに理論を構築する必要がある。そのためにもニュートリノの研究・実験がとても重要になってくる。ニュートリノ振動実験は、記事中で何度も「日本」という単語が出ていることから分かっており、日本のお家芸ともいえる分野である。また2002年のノーベル物理学賞を受賞した小柴先生の受賞理由がニュートリノの観測によるものであり、ニュートリノの研究は注目されていることがわかる。さらに2008年には、日本人が素粒子分野でノーベル賞を受賞していることから、日本国内においても素粒子の研究はますます盛り上がってくるだろう。

今回の取材では、初学者の私たちにも分かりやすく説明して下さいありがとうございました。ノーベル賞で話題になったニュートリノですが、

ニュートリノ振動に関しての受賞はまだされておらず、久世先生を始め日本のグループの今後に期待したい所存でございます。(横山 真之介)