

ニュートリノ振動について

2015年ノーベル物理学賞は、「ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見」により、梶田隆章氏（東京大学宇宙線研究所）と Arthur B. McDonald 氏（Queen's University）に授与されます。梶田氏は、埼玉大学理学部物理学科の卒業生（1981年卒）です。以下では、受賞理由になっているニュートリノ振動について解説します。

ニュートリノとは

ニュートリノは、原子核のベータ崩壊などの際に生成される電荷がゼロの素粒子です。太陽の核融合反応や超新星爆発によっても作られます。（1987年の超新星爆発によるニュートリノの観測により、小柴昌俊氏が2002年ノーベル物理学賞を受賞しました。）ニュートリノは3種類あり、それぞれ、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 とよばれます。また、それらの反粒子は、反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ 、反ミューニュートリノ $\bar{\nu}_\mu$ 、反タウニュートリノ $\bar{\nu}_\tau$ とよばれます。

素粒子には、下の表の12種類の粒子とその反粒子があります。（これ以外にも、光子のような力を媒介するゲージ粒子や、粒子の質量を生み出すヒッグス粒子もあります。）これらは、強い相互作用をしない6種類のレプトンと強い相互作用をする6種類のクォークに分けられます。また、この表の同じ行に並ぶ3つの粒子は互いによく似た性質をもっているため、各列を、それぞれ、第1世代、第2世代、第3世代とよびます。ニュートリノの3種類は、この3つの世代に対応します。

	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ
	e^- 電子	μ^- ミュー粒子	τ^- タウ粒子
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム

ニュートリノの一つの特徴は、他の物質との相互作用が非常に弱いことです。素粒子の間に働く基本的な力には、重力相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の4種類がありますが、重力相互作用はどの素粒子に対しても極端に弱いので無視することができます。ニュートリノに対しては、レプトンであるため強い相互作用は働かず、また、電荷がゼロであるため電磁相互作用も働きません。したがって、ニュートリノには弱い相互作用による力だけが働いています。この力は非常に弱く、たとえば、地面に入射したニュートリノは、地球を作っている物質からほとんど影響を受けないため、地球を通り抜けて反対側に出て行ってしまふほどです。

ニュートリノのもう一つの特徴は、他の素粒子に比べて質量が非常に小さいことです。ニュートリノの質量の値そのものは現在でもわかっていませんが、実験データから許される質量の上限値が見積もられています。たとえば、電子ニュートリノの質量の上限値は $2 \text{ eV}/c^2$ ($1 \text{ eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36} \text{ kg}$) です。ニュートリノ以外の素粒子で（ゼロでない）質量が一番小さいのは電子で、その質量は約 $0.5 \times 10^6 \text{ eV}/c^2$ です。ニュートリノの質量はその10万分の1以下です。素粒子の中には光子のように質量がゼロの粒子もありますが、ニュートリノの質量はゼロなのか、それとも、非常に小さいがゼロではないのかは、ニュートリノが発見されて以来、長年の間未解決の問題でした。ニュートリノがゼロではない質量を

持つことを実験的にはっきり示して、この問題に答えを出したのが、今回のノーベル物理学賞の対象となった研究です。これらの研究は、ニュートリノがゼロではない質量を持つときに起きるニュートリノ振動という現象を利用しています。

ニュートリノ振動

ニュートリノには ν_e, ν_μ, ν_τ の 3 種類があります。このニュートリノの種類が時間とともに変化する現象がニュートリノ振動です。たとえば、初め電子ニュートリノ ν_e だったものが、時間がたつとミューニュートリノ ν_μ やタウニュートリノ ν_τ に変わるというものです。ニュートリノの種類は

$$\nu_e \longrightarrow \nu_\mu \longrightarrow \nu_e \longrightarrow \nu_\mu \longrightarrow \dots$$

のように周期的に変化し、1 周期の時間がたつとまた元の状態に戻るので、ニュートリノ振動とよばれます。

少し専門的になりますが、ニュートリノ振動の起こる原理は次のようなものです。ニュートリノ振動は、原子核のベータ崩壊などの反応によって生成されるニュートリノの状態（フレーバーの固有状態）が、決まった質量を持つ状態（質量の固有状態）と異なる場合に起こります。（このような場合、世代間の混合があるといえます。）フレーバーの固有状態は ν_e, ν_μ, ν_τ ですが、質量の固有状態も 3 種類 ν_1, ν_2, ν_3 あります。フレーバーの固有状態のそれぞれは、3 つの質量の固有状態の「量子力学的重ね合わせ」（波の重ね合わせのようなもの）で表されます。 ν_e, ν_μ, ν_τ の違いは、 ν_1, ν_2, ν_3 を重ね合わせるときの「重み」の違いに対応します。質量の固有状態は時間がたつてもその種類は変化しませんが、重ね合わせの重みは変化し、そのため、フレーバーの固有状態の種類が変化します。

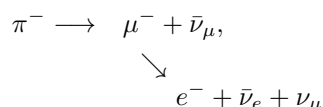
このような考え方をを使うと、ニュートリノ振動の周期を理論的に計算することができます。簡単のため 2 種類のニュートリノ（たとえば、 ν_e と ν_μ ）だけを考えることにします。質量の固有状態も 2 つ（ ν_1 と ν_2 ）あり、その質量を、それぞれ、 m_1 と m_2 とします。ニュートリノのエネルギーが E のとき、この場合のニュートリノ振動の周期を計算すると、

$$T = \frac{4\pi\hbar E}{\Delta m^2 c^4}$$

となります。ここで、 c は真空中の光の速さ、 $\hbar = h/(2\pi)$ はプランク定数で、 $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ です。ニュートリノ振動が起きていることを実験的に確認できれば、 Δm^2 がゼロでないこと、したがって、少なくともどちらかの質量がゼロでないことがわかります。また、その周期から Δm^2 の値がわかります。ニュートリノ振動が実際に起こっていることは、今回のノーベル物理学賞の対象である 2 つの実験的研究：大気ニュートリノ実験と太陽ニュートリノ実験によって確かめられました。

大気ニュートリノ実験

地球には宇宙から常にたくさんの宇宙線（高エネルギーの陽子など）が降り注いでいます。宇宙線が大気に入射した結果生成されるニュートリノを大気ニュートリノといいます。宇宙線が地球の大気の原子核と反応を起こすと、パイ中間子や K 中間子という粒子が生成されます。これらの中間子はすぐに崩壊します。たとえば、パイ中間子 π^- は、

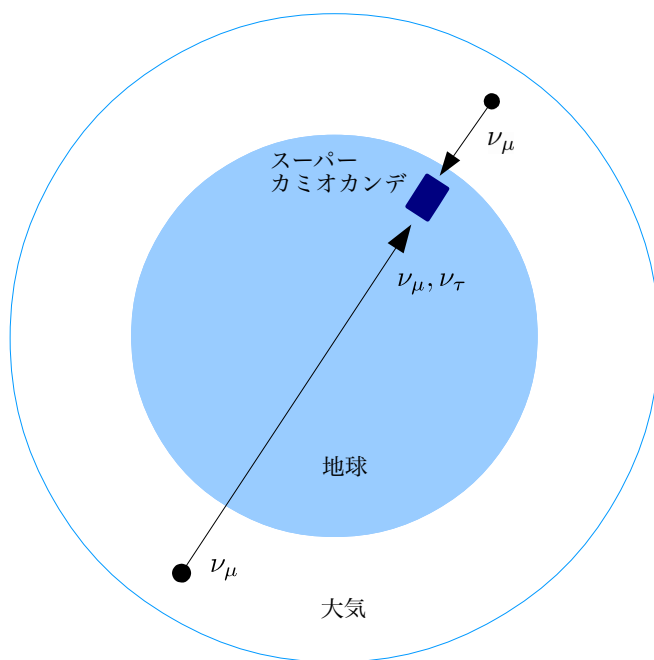


のように、まずミュー粒子 μ^- と反ニュートリノ $\bar{\nu}_\mu$ に崩壊し、さらにこのミュー粒子が電子 e^- と（反）ニュートリノ $\bar{\nu}_e, \nu_\mu$ に崩壊します。この反応では、最終的に（ニュートリノと反ニュートリノ

を区別しないと) ミューニュートリノが2個と電子ニュートリノが1個生成されています。他の中間子の崩壊でも同様で、生成されるミューニュートリノと電子ニュートリノの個数の比は2:1になります。ところが、地上で大気ニュートリノを観測するとミューニュートリノの個数がこの理論的予測よりも少ないという結果が、1980年代中頃からいくつかの実験グループによって報告されていました。梶田氏らのグループもその一つで、カミオカンデという装置を使った実験で、ミューニュートリノの不足を示しました。

その後、梶田氏らのグループは、スーパーカミオカンデという新しい実験装置を使って観測の精度を上げ、このミューニュートリノの不足がニュートリノ振動によるものであることを示しました。スーパーカミオカンデは、岐阜県神岡の地下1,000mにある実験装置で、5万トンの水の入ったタンクの壁の内側にたくさんの光検出器(光電子増倍管)を取り付けたものです。ニュートリノがこの装置に入射すると、電荷を持つ電子やミュー粒子が生成され、それらが水中を進むときに光(チェレンコフ光)が放射されます。この光を壁にある検出器で検出することにより、ニュートリノが入射したことがわかります。ニュートリノの種類(ν_e, ν_μ)や入射方向を特定することもできます。

この実験のデータを使って、上方から入射するニュートリノの個数と下方から入射するニュートリノの個数が比較されました。上方からのニュートリノは神岡の上空の大気で生成されたもので、下方からのニュートリノは地球の裏側の大气で生成されたものが地球の中を通り抜けてスーパーカミオカンデまで届いたものです。ニュートリノ振動を考慮しなければ、上方からと下方からは同じ個数のニュートリノが来るはずですが、解析の結果、ミューニュートリノについては、上方から入射するニュートリノよりも下方から入射するニュートリノが少ないことが確かめられました。これは、下方からのニュートリノは、上方からのニュートリノよりも地球を通り抜ける間だけ長い時間飛行しているため、その間にニュートリノ振動によって別の種類のニュートリノに変化したためと考えることができます。電子ニュートリノについては、上方からと下方からの違いはありませんでした。このことから、ミューニュートリノはタウニュートリノに変化していると考えられます。(この実験では、タウニュートリノは見えていません。)このようにして、ニュートリノ振動が実際に起きていることが確かめられました。この結果は、1998年の国際会議で梶田氏により発表されました。

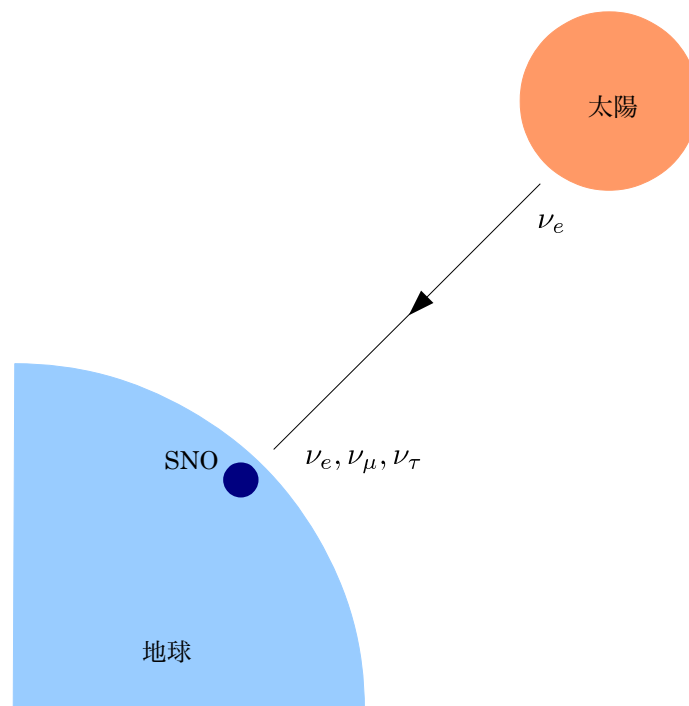


太陽ニュートリノ実験

太陽の中で起こっている核融合反応により電子ニュートリノが生成されます。このようなニュートリノを、太陽ニュートリノといいます。太陽ニュートリノの強度（単位時間当たり単位面積を通過する個数）は、太陽内部の様子を説明する標準太陽模型によって理論的に計算することができます。太陽ニュートリノの観測は1960年代の終わりころから R. Davis, Jr. 氏（2002年ノーベル物理学賞受賞）らのグループによって行われていますが、その強度は標準太陽模型による値よりも小さいという結果が得られました。

McDonald 氏らのグループは、1999年からカナダのサドバリーにあるサドバリー・ニュートリノ観測所（SNO）で太陽ニュートリノの観測を行いました。（スーパーカミオカンデでも太陽ニュートリノの観測が行われています。）SNOの実験装置は、スーパーカミオカンデと基本的には同じ仕組みですが、水の代わりに重水を使っています。入射ニュートリノと重水の反応の仕方には何種類もあり、電子ニュートリノだけが関与する反応や3種類のニュートリノ全てが関与する反応があります。それらの反応を区別して検出することにより、入射した電子ニュートリノの個数と全ニュートリノの個数をそれぞれ測定することができます。

測定の結果は、電子ニュートリノの個数は標準太陽模型による予想値よりも少ないが、全ニュートリノの個数は予想値とよく一致するというものでした。この結果は、太陽内で生成された電子ニュートリノが地球まで飛行する間に、その一部がニュートリノ振動によってミューニュートリノやタウニュートリノに変化したことを示しています。このようにして、太陽ニュートリノについても、ニュートリノ振動が起きていることが実験的に確かめられました。



その後の発展

これらの実験によって、ニュートリノ振動が実際に起きていて、ニュートリノがゼロでない質量を持つことが確かめられました。また、世代間の大きな混合があることもわかりました。その後もニュートリノに関係したいろいろな実験が行われています。たとえば、

- 長基線実験：加速器で生成されたニュートリノを何百 km も遠く離れた地点で観測する実験（たとえば、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）の加速器から岐阜県神岡のスーパーカミオカンデまで飛ばす K2K 実験）
- KamLAND 実験：原子力発電所の原子炉で発生するニュートリノを神岡にある検出装置 KamLAND で観測する実験
- IceCube 実験：南極の氷の中に検出器を設置して、宇宙から来る高エネルギーのニュートリノを観測する実験

などがあります。

また、ニュートリノ振動の発見は、理論的研究にも大きな影響を与えています。素粒子の基礎理論として「標準模型」とよばれる理論があります。この理論は多くの素粒子現象を矛盾なく説明する確立した理論ですが、不十分な点もいくつかあります。その一つは、ニュートリノの質量をゼロとしている点です。ゼロでない質量を持つニュートリノを説明するためには、標準模型を拡張する必要があります。そのような「標準模型を超える理論」について、現在、活発な研究が行われています。