

# ニュートリノ

松下千穂里

## 1. 動機

今回の授業で、最近の物理学のトピックについて扱った。その中で、ニュートリノ振動という言葉聞いた。2015年、ニュートリノ振動を研究されていた梶田さんがノーベル賞を受賞されている。私の好きな分野でもあるのでそれについて詳しく調べてみたいと思った。

## 2. ニュートリノ

### 2-1 ニュートリノとは

素粒子やその相互作用についてまとめた標準理論と呼ばれる理論の中の17種類の粒子の中の3種類とその反粒子（電荷が反対になっている素粒子）の3種類を合わせた6種類の粒子の総称である。宇宙の4つの基本相互作用（電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、重力相互作用）の影響を受けにくいことで知られる。

ニュートリノは2つの方法で分類可能である。一つ目は、「フレーバー」に基づいた分類で、それぞれ、電子ニュートリノ、 $\mu$ ニュートリノ、 $\tau$ ニュートリノといい、強い相互作用が働きにくい、つまり素粒子同士で集まって中性子や陽子などを構成すること

のでできないレプトンと呼ばれる種類の素粒子に分類される。原子核を構成する中性子の $\beta$ 崩壊の際のエネルギー保存則（エネルギーの総量は変化しない）を成り立たせるため、ヴォルフガング・パウリにより提唱された。素粒子のほとんどが持つと考えられている（自転運動のようなものとして説明されることが多い）スピンは $1/2$ で、フェルミ粒子と呼ばれる種類であるため、2つ以上のフェルミ粒子とは同じ状態にあることができないというパウリの排他原理に当てはまる。2つ目は、質量によって分類され、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ というそれぞれ異なった質量を持つニュートリノに分類される。フレーバーによる分類と質量による分類は互いに混ざり合っている（つまり、電子ニュートリノは、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ のニュートリノが混ざり合っ構成されているということ＝ニュートリノ混合）

非常に軽い質量を持ち、光速では移動しないということが判明している（標準理論ではニュートリノは質量を持たないと考えられていた）。

Standard Model of Elementary Particles



また、粒子のニュートリノは全て左巻きであり、右巻きのニュートリノはまだ見つかっていない。しかし、ニュートリノが質量を持つことは判明しているため、ニュートリノより早い物体は存在している。すると、ニュートリノより早い物体から左巻きニュートリノを追い越しつつ、振り返ると、その左巻きニュートリノは右巻きニュートリノに見える。よって、右巻きニュートリノは存在すると考えられている。ニュートリノがマヨラナ粒子（粒子のスピンの向きがである場合に考えられるシーソー機構と呼ばれる機構では、（理由はわからなかったが）左巻きニュートリノの質量が右巻きニュートリノの質量と反比例するとされている。これは、左巻きニュートリノがとても軽いことの説明となる。また、マヨラナ右巻きニュートリノ（対象性が破れていない）が存在するならば、それは左巻きニュートリノ（対称性は破れている）と荷電レプトンとヒッグス粒子に分裂すると考えられる。

## 2-2 ニュートリノの反粒子

ニュートリノの反粒子は全て右巻きである。ニュートリノと反ニュートリノの間に違いがなかった場合、ニュートリノはマヨラナ粒子（粒子と反粒子が同じ状態＝スピンの向きが反対）であると考えられる。東北大学の研究によると、もしニュートリノがマヨラナ粒子であったとすると、2-1で書いたニュートリノのシーソー機構が起こりうるということがわかり、結果として左巻きニュートリノがなぜ軽いのかかわかるとされている。

しかし、ニュートリノ振動について実験を行うT2K実験によると、ニュートリノ振動の反粒子と粒子の間の結果の違いが、95%の確率であると判明した。これはまだ十分な数値では無いとされるが、かなりの可能性でニュートリノのcp対称性は破れていると考えられる。

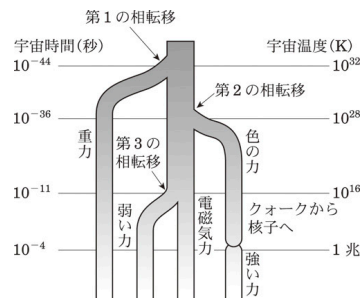
つまり、ニュートリノと反ニュートリノの間に違いがあるかは判明していないということである。

## 2-3 ニュートリノが相互作用を受けにくい理由

先ほどニュートリノは相互作用を受けにくいとしたが、それがなぜかを調べた。

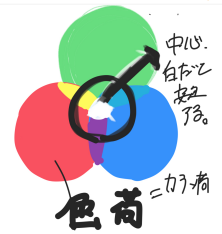
<https://astro-dic.jp/four-forces/> ↓

●強い相互作用-強い相互作用とは、カラー荷と呼ばれる値に比例する力である。カラー荷とは、素粒子が実際に色を持つわけではなく、その性質が非常に色に似ているために名付けられた。これは、二つの規模で働く力である。一つは、クォークと呼ばれる素粒子の間にのみ働く力のことである。もう一つは、複数の原子核や陽子といった核子を結びつける際に、電荷による斥力に打ち勝って結びつけている核力と呼ばれる力である。グルーオンと呼ばれる粒子の媒介によって働く。最も強い力である。



※色荷について一色荷は全部で3種類、赤、青、緑があり、混ぜ合わせて白になると安定する。（右図）

→2-1より、レプトンと呼ばれるニュートリノは、カラー荷を持たないためこの力は働かない。



●電磁相互作用-電磁相互作用とは、電場や磁場が電荷を持ったものに対して与える力である。光子と呼ばれる粒子により媒介される。

→2-1より、ニュートリノの電荷は0であるため、ニュートリノに電磁気力は働かない。

●弱い相互作用-弱い相互作用とは、主に粒子の崩壊をもたらす力である。力が働く範囲が非常に狭い。そのため、狭い範囲で見ると電磁気力と同じくらいの力を持つが、見かけの力の強さは非常に小さい。

→非常に小さい力であるため、ほとんどニュートリノに影響を及ぼさない。

●重量相互作用-未発見の粒子、重力子グラビトンの受け渡しにより発生していると考えられる力。グラビトンは質量を持たないため、重力は無限に届く。地球などの天体やブラックホールなどを作り出すのもこの力。質量のあるところに働く。

→人間の大きさだとその力は強く感じるが、素粒子の質量は非常に小さいため、ほとんどニュートリノに影響を及ぼさない。

以上より、4つの相互作用は全てニュートリノに十分に働くことがないため、ニュートリノは地球や私たちの体などのほぼ全てのものを貫通してしまう。

### 3 ニュートリノの観測

2-3のような理由から、ニュートリノを観測するのは非常に難しい。しかし、日本のスーパーカミオカンデなどの研究施設では実際にニュートリノを観測している。

#### 3-1 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは現代稼働している日本のニュートリノ検知器である。最も大きな成果としては、T2K実験によりニュートリノ振動を観測したことである。このニュートリノ振動はニュートリノに質量があることを証明する現象である。スーパーカミオカンデを使って行われているT2K実験では、茨城県東海村にある大強度陽子加速器J-PARKで陽子を標的に当て、パイ中間子を作り、それが崩壊してできた $\mu$ ニュートリノを打ち出し、295km離れたカミオカンデで観測することで、ニュートリノ振動を観測するという計画だ。 $\mu$ ニュートリノは、この時、ニュートリノ混合(2-1より)の状態になっており、3種類の波の重ね合わせの状態であるため(後述)移動するうちに電子ニュートリノや $\tau$ ニュートリノになる。

また、スーパーカミオカンデの構造について、スーパーカミオカンデのサイトによると「スーパーカミオカンデ検出器は、直径39.3メートル、高さ41.4メートルの円筒形のステンレス製水タンクとその壁面に設置された光電子増倍管と呼ばれる光センサーから構成されています。水タンクは2槽式になっており、5万トンの超純水で満たされています。内側のタンクを内水槽、外側を外水槽と呼んでいます。内水槽と外水槽の間は、光を通さないように仕切られています。内水槽の壁には、タンクの内向きに光電子増倍管が取り付けられており、外水槽の壁には外向きに光電子増倍管が取り付けられています。外水槽は主に、宇宙線ミュオンや岩盤などから放出されるガンマ線などのノイズを判別するために設置されています。」とされている。これについて詳しく調べた。

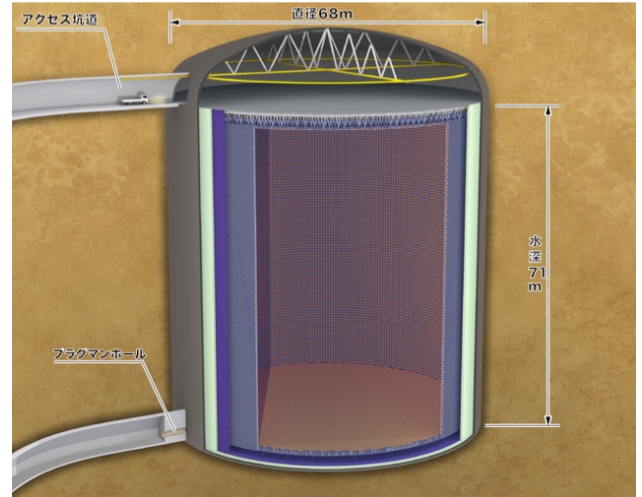
まず、何故超純水を必要とするかという点、ごく稀にニュートリノが水分子にぶつかることによって発生するチェレンコフ光を観測することによって間接的にニュートリノを見るという仕組みであるため、小さな大気中のゴミもノイズになってしまうからだ。また、スーパーカミオカンデは飛騨市の地下650メートルにある。これは、ニュートリノほど透過力が高くない他の宇宙線を避けるためである。さらに、超純水とは、半導体の製造などで使われる汚れの少ない水である。また、2020年、さらに超純水に加えて希少金属の一種であるガドリニウムを入れることで、今まで観測していなかった超新星背景ニュートリノを観測できるようになった。また、検知器の感度を上げることにもつながった。超新星背景ニュートリノとは、宇宙の誕生から今までの超新星によって生まれたニュートリノのことで、これを観測することで、超新星爆発についての知見を深められ、超新星爆発に関わる惑星や生命の誕生についてより詳しく知ることができる。スーパーカミオカンデに最も反応しやすい超新星爆発により生まれるニュートリノは反電子ニュートリノであり、反電子ニュートリノは容姿と反応して陽電子と中性子を生み出す。ガドリニウムは中性子を捕獲しやすく、また捕獲した後にチェレンコフ光を生み出すため、これを入れることでスーパーカミオカンデで超新星背景ニュートリノを観測しやすくなる。

### 3-2 カミオカンデ

スーパーカミオカンデの前身であり、小柴先生により建てられた。そして、超新星爆発（太陽の約8倍以上の質量を持つ恒星が死ぬ時に起きる大爆発）により発生したニュートリノを世界で初めて観測した。カミオカンデは元々「陽子崩壊」を観測するために作られた施設である。陽子は壊れないものだとされているが、実は寿命があつて崩壊するのではという説が1970年代に唱えられた。その崩壊のことを陽子崩壊という。しかし、実験としては結局陽子崩壊を観測することはできなかつたため、施設の使い方を変え、ニュートリノを観測するために使うことになった。研究しようとした題材は「太陽ニュートリノ問題」である。これは、太陽からくるニュートリノの数が予想よりも少ないという問題である。1983年には太陽ニュートリノの観測を開始できる用意が整った。そしてこの年、超新星爆発が起きた。そして、それにより発生したニュートリノの信号を捉えることに成功した。この施設を作る計画を立てた小柴先生は、この功績によりノーベル賞を受賞された。

### 3-3 ハイパーカミオカンデ

ハイパーカミオカンデは、現在建設が開始されており2027年の完成を目指す新しい検知器である。水深71m、直径68mの大きさであり、J-PARKで生産したニュートリノを打ち込むなどの方法によって観測する。この実験を通してニュートリノのCP対称性の破れを見つけることが目指される。また、ニュートリノを生み出す天体についても研究する計画である。



### 3-4 cp対称性の破れ

cp対称性の破れとは、c対称性（粒子と反粒子を入れ替えた時に物理法則が変わらないとき、その物理法則をc対称性を持つという）とp対称性（左巻きの粒子を右巻きにしたとき、またはその逆にした時、物理法則が不変であればその物理法則をp対称性を持つという）の2つの対称性が破れているということである。この2つは、そのまま粒子を反粒子に変換する作業となるので、このcp対称性が破れているとすると、粒子と反粒子の間に違いがあるとわかる。反粒子とは、粒子と電荷が逆の粒子であり、粒子と出会うことによって対消滅し、エネルギーとなる。元々、この反粒子と粒子は同じくらいあったはずだが、現在私たちの宇宙のほとんどを粒子が作っている。反粒子と粒子の間に何らかの違いがあったということである。つまり私たちの宇宙はcp対称性が破れていなければ作られなかったと言える。（先ほどあげた4つの基本相互作用のうち、電磁相互作用と強い相互作用はc対称性を持つとわかっており、弱い相互作用はクォークとレプトンの左巻きの粒子と右巻きの反粒子の間でのみc対称性を持つ。また、p対称性は、やはり電磁相互作用と強い相互作用は持っているが、弱い相互作用は持っていない。）

### 3-5 なぜニュートリノのcp対称性が破れていることがなぜ重要か

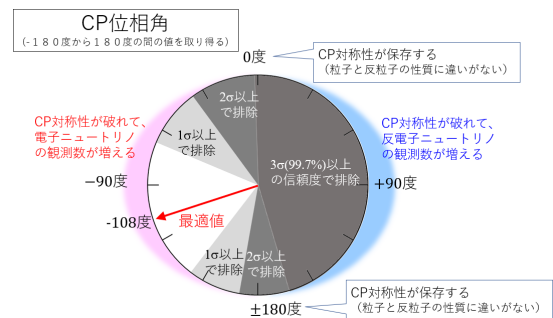
cp対称性が破れた理由はいまだにわかっておらず

さまざまな仮説が立てられている。そのため、

cp対称性の破れを見つける実験は多くある。

先ほどニュートリノのcp対称性が破れていることをハイパーカミオカンデで観測するとしたが、なぜニュートリノのcp対象性が破れている

<https://astro-dic.jp/four-forces/> ↓



ことが重要なのか。それは、ニュートリノの $cp$ 対称性の破れが大きければ、現在残っている物質の多さを説明できるからである。よって $cp$ 対称性の破れの置きさを測定することで物質が反物質よりも多いことを証明できるのである。実際にこれまでも、T2K実験などを利用して、ニュートリノの $cp$ 対称性の破れの大きさを測定しようとしているものがある。例えば、右に貼った図は、 $cp$ 位相角についてのもので、 $cp$ 対称性がどれほど破れているかを説明するものである。0度と180度では $cp$ 対称性が破れず、それ以外の角度では破れる。これをニュートリノに関して求めたところ、-2度から165度の領域は99.7%の確率で排除されることが分かった。また、ニュートリノの $cp$ 位相角としてあり得る可能性の高い範囲も判明した。このような種類の実験をハイパーカミオカンデでも行うことで、 $cp$ 対称性の破れを証明できると考えられる。

(私は、このような実験をハイパーカミオカンデを使って高精度ですることによって、 $cp$ 位相角の値をさらに正確に出していけば、現在このように物質が多く残っていることを証明できるように思う。)

また、前述のように、ニュートリノの対称性が破れていることは、右巻きの重いニュートリノを見つけることでも証明されると考えられている。右巻きの重いマヨラナニュートリノは $2-1$ より、左巻きニュートリノと荷電レプトンとヒッグス粒子に変化する。これは、 $cp$ 対称性を持つ粒子から $cp$ 対称性の破れた粒子が生まれたということである。

(これをレプトン数の生成という。) 右巻きニュートリノは高温の状態で多く存在するため、宇宙初期の高温状態の時に右巻きマヨラナニュートリノが多くあり、それが崩壊して左巻きニュートリノが多く生まれ、現在のように $cp$ 対称性の破れて世界が生まれたと考えられる。

さらに、後述するニュートリノ振動でも、粒子と反粒子の変化の仕方に違いが出れば、 $cp$ 対称性は破れていると考えられる。これについても、ハイパーカミオカンデなどを使用することで調べられると考えられる。

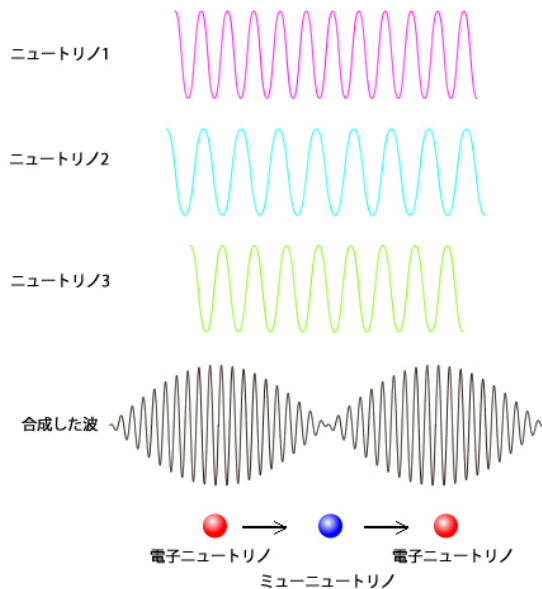
#### 4. ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、フレーバーという状態にあるニュートリノが時間経過によりニュートリノ振動が起きているということは、ニュートリノの時間が経過しており、すなわち粒子が光速で動いていないということ、つまり質量を持っているということである。この現象はスーパーカミオカンデにより観測され、ノーベル賞を受賞した。この現象がニュートリノの粒子と反粒子で同じように起きない場合、ニュートリノの $cp$ 対称性は破れていると考えられる。元々、標準理論ではニュートリノは質量を持たないとされていたため、この発見により標準理論は未完成であることが判明した。

ニュートリノ振動は、ニュートリノが粒という形だけでなく波という形でも存在していることによるものである。先ほど $2-1$ で書いた $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ のニュートリノも全て振動数やそのタイミングの違う波の状態で伝播する。すると、その $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ の重ね合わ

違った状態であるフレーバーにより分類された $\mu$ ニュートリノは、異なる波が重ね合わされた状態ということになる。すると、ニュートリノが飛んでいる間に波の位相が変化し、違うニュートリノに変化するのである。

<http://www.hyper-k.org/neutrino.html>より



## 5. まとめ、感想

私は今回ニュートリノについて調べて、私はまだ素粒子についてほとんど分かっていないということを実感した。私は将来素粒子物理学者になり、様々な理論を知りたいと思う。しかし、短期間でつけた表面的な知識では、表面的な部分しか理解できず、わかりにくい用語を多く使わなくては説明できなかった。いくつか解釈を間違っているところもあると思う。これから勉強しながら正しい素粒子物理学について知っていきたい。（読みにくいレポートを読んでくださりありがとうございました）

## 6. 参考文献

スーパーカミオカンデ「超新星背景ニュートリノの探索」

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/srn.html>

素粒子物理学研究所

<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post>

東北大学 大学院理学研究科・理学部「ニュートリノと反ニュートリノは同じか？～物質優勢の宇宙の謎に迫るカムランド弾実験」

<https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20171215-9458.html>

素粒子宇宙起源研究所 「ビッグバンから100億分の1秒後のニュートリノ (詳しい編)

[https://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2013/09/24/spotlight03\\_1/](https://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2013/09/24/spotlight03_1/)

素粒子の標準模型を初めて超えた大発見 (村山斉)

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/21/2/21\\_2\\_20/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/21/2/21_2_20/_pdf/-char/ja)

一般社団法人 日本物理学会 「物理学70の不思議」

<https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/70wonders.php>

九州大学 大学院理学研究院 大学院理学府 理学部 「ニュートリノ 質量計算が単純化」

[https://www.sci.kyushu-u.ac.jp/koho/qrinews/qrinews\\_100511.html](https://www.sci.kyushu-u.ac.jp/koho/qrinews/qrinews_100511.html)

KEK キッズサイエンティスト

<https://www2.kek.jp/kids/multi/particle/physics.html>

東京都立大学 高エネルギー物理実験室 「DCBA実験」

<https://www-hep.phys.se.tmu.ac.jp/research/dcba/index.html>

物質構造科学研究所 「私にスピンをわからせて！」

<https://www2.kek.jp/imss/news/2020/topics/0331Spin6/>