

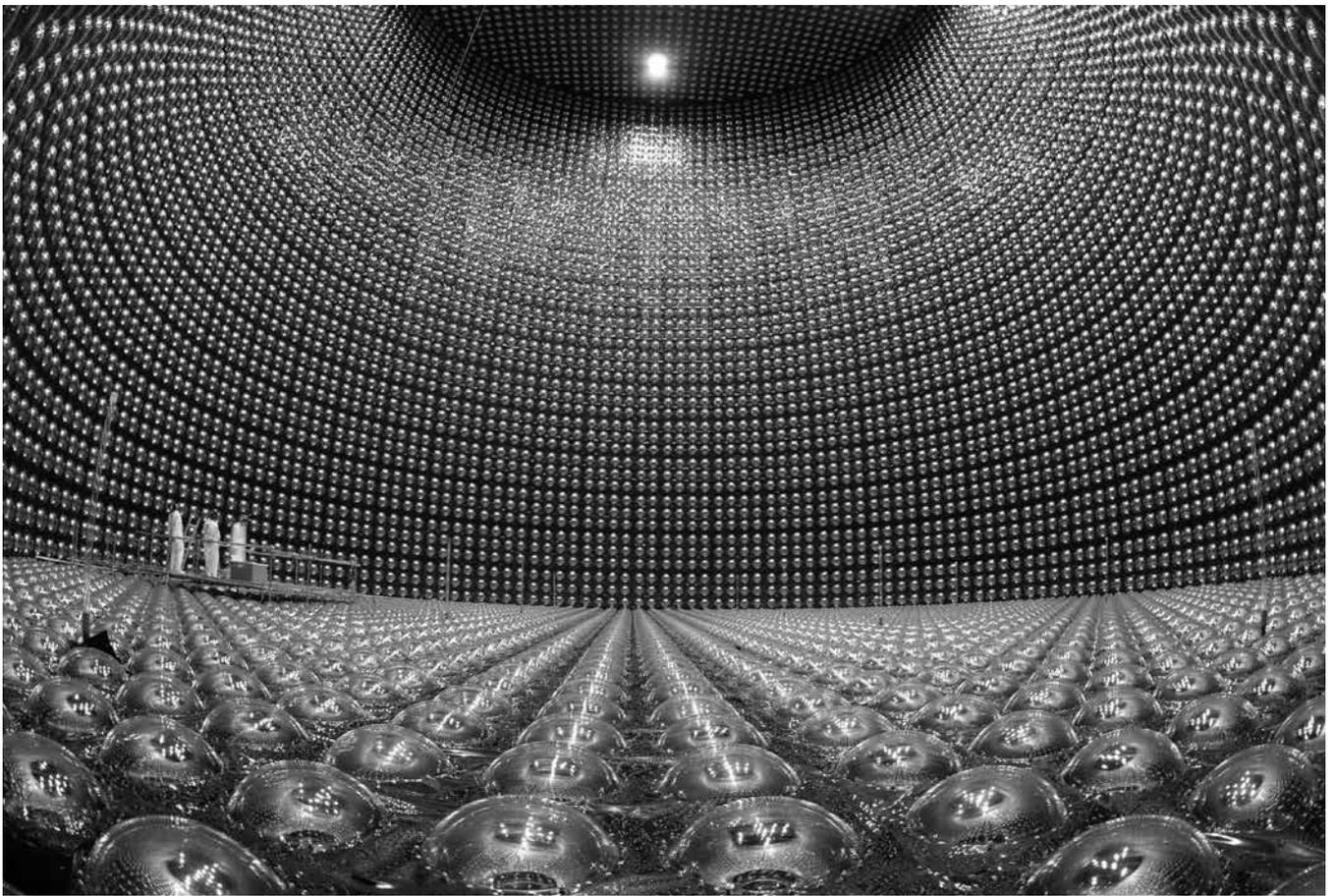
とやまと自然

第39卷春の号

No.153 2016

ニュートリノ^{しんどう}振動の発見について

なかはたまさゆき
中畑雅行



ニュートリノ^{しんどう}振動を発見し、梶田^{かじ たかあき}隆章先生のノーベル物理学賞に寄与したスーパーカミオカンデ^{けんしゆつき}検出器。神岡^{かみおかこうざん}鉱山の地下 1,000メートルの場所に^{せっち}設置された水タンクには 50,000トンの超純水^{ちようじゆんすい}が蓄えられ、約 11,000本の^{だいこうけいこうでん しぞうばいかん}大口径光電子増倍管が水中で起こるニュートリノ^{ほんのう}反応を捉えている。写真は 2005-2006年に^{けんしゆつき しゅうふく}検出器の修復工事を行った際^{さい}に撮ったもの。

(写真提供：東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設^{ていきやう ちゆうせんけんきゆうじよかみおか ちゆうそりゆうしけんきゆうしせつ})

ニュートリノ振動の発見について

なかはたまさゆき (東京大学宇宙線研究所) かみおか う ちゅうそりゅうしけんきゅうしせつ
中畑雅行 (東京大学宇宙線研究所) 神岡宇宙素粒子研究施設)
(スーパーカミオカンデ実験グループ代表)

富山に住み、神岡の地下で研究を進めてこられました梶田隆章先生が昨年ノーベル物理学賞という素晴らしい賞を受賞されました。

受賞理由は、ニュートリノという素粒子が「振動」し、それによってニュートリノが質量を持つことがわかったというものです。「振動」と言ってもニュートリノがブルブルと震えるわけではなく、飛んでいるうちに種類が変化してしまうことをいいます。果物に例えるならば、リンゴを投げたら飛んでいるうちにミカンに変わってしまい、またすこし様子を見ていたら元のリンゴに戻る、といった具合です。(もちろん、果物ではそんなことは絶対に起こりません。)「ニュートリノが質量を持つ」ということはそんなにすごいことなのでしょうか？

私たちの身の回りの物はすべて質量を持っていますので、ニュートリノが質量を持っても当たり前ではないかと思われるかもしれませんが、しかし、この発見は今まで50年近い年月をかけて築き上げてきた素粒子の標準的な理論に間違いがあることを示すものであり、新たな理論が存在することを示す画期的なことでした。

この解説では、ニュートリノ振動がどのように発見されたのか、ニュートリノが質量を持つことの意義、についてわかりやすくお話ししたいと思います。

1. 素粒子の標準モデルとニュートリノ

ニュートリノについてお話しする前に、素粒子とは何か、現在の物理学ではどのように素粒子を理解しているのかについてお話しします。

物質を構成する最小の単位を「素粒子」とよびます。例えば、水は水素原子と酸素原子からできていますが、それぞれの原子は中心に原子核があり、その周りを電子がまわっています。原子核は陽子と中性子から構成されていますが、その陽子や中性子の中に何か構造がないかと加速器を使った実験で調べてみたところ、それぞれは3つのクォークで構成されていることが分かりました。

今までの素粒子研究では、このクォークの中には更なる構造はみつかっておらず、クォークが最小単位、つまり素粒子であると考えられています。原子核の周りをまわっている電子についてもその中に構造が見つかっておらず、素粒子だと考えられています。

20世紀には宇宙から飛んでくる粒子や加速器で高いエネルギーに加速された粒子を使って、たくさんの素粒子がみつかってきました。今までに発見された素粒子をまとめると図1のようになります。陽子や中性子を構成するクォークは、アップクォーク、ダウンクォークという種類ですが、その仲間はさらに4つあって、全部で6種類のクォークがあります(図1の3段目、4段目)。電子はレプトンとよばれる分類に属しますが、電子のように電気を持っているレプトンは他にミュー粒子(ミューオン)、タウ粒子があり、全部で3種類です。

ニュートリノはレプトンに分類されますが、電子のように電気を持っていません。図1に示すようにニュートリノには3つの種類があり、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よばれています。その名前の通り電気をもっているレプトンと対になって

	第一世代 (First)	第二世代 (Second)	第三世代 (Third)
LEPTON レプトン	● 電子ニュートリノ ν_e electron neutrino	● ミューニュートリノ ν_μ muon neutrino	● タウニュートリノ ν_τ tau neutrino
	● 電子 electron e	● ミューオン muon μ	● タウ tau τ
QUARK クォーク	● アップ up	● チャーム charm	● トップ top
	● ダウン down	● ストレンジ strange	● ボトム bottom

図1. 標準モデルにおける素粒子のリスト

おり、電子ニュートリノが反応すると電子が生まれ、ミューニュートリノが反応するとミュー粒子が生まれ、タウニュートリノが反応するとタウ粒子が生まれます。

クォーク、レプトンといった素粒子の分類はそれらに働く力が関係します。クォークの間には「強い力」が働きます。電荷を持った素粒子間には「電磁気力」が働きます。すべての素粒子には「弱い力」が働きますが、ニュートリノは電荷を持たないため弱い力しか働きません。この力はその名前のおり非常に弱いいため、ニュートリノはなかなか物質と反応しないわけです。他の力として「重力」もありますが、素粒子の世界では非常に小さいのでここでは無視しましょう。

素粒子とそれらに働く力を説明する、「素粒子標準モデル」という理論が1970年頃に提唱され、当時から盛んに行われてきた加速器による実験はその理論を強くサポートしてきました。

ニュートリノの発見の歴史についてすこし紹介しておきます。1930年頃に物理学者ヴォルフガング・パウリはニュートリノの存在を理論的に予言しました。原子核が電子を放出してその種類を変えてしまう現象をベータ崩壊とよんでいます。その飛び出す電子のエネルギーが大きかったり小さかったりすることから、未知の粒子もいっしょに生まれているに違いないと考えました。それがニュートリノです。

ニュートリノを初めて実験的に捉えたのは

1956年にライネスらが原子炉でおこなった実験でした。その時に捉えたニュートリノは反電子ニュートリノ(陽電子(電子の反粒子)を生み出すニュートリノ)でした。1962年にアメリカのブルックヘブン国立研究所で行われた実験では、反応した際に μ 粒子が生まれるニュートリノが見つかりました。これはライネスらが見つけたニュートリノとは異なる種類でした。1975年、パールらが電子の仲間であるタウ粒子を見つけました。それに対応して、タウニュートリノがあると考えられてきましたが、実際にそれが発見されたのは2001年に名古屋大学の丹羽氏らがアメリカのフェルミ研究所でおこなった実験でした。

ライネスらのニュートリノ発見以降、ニュートリノの質量を測ろうとする実験がいくつも行われましたが、質量の有限値を示す測定結果は現れませんでした。

素粒子は「スピン」とよばれる性質を持ちます。コマの回転のようにクルクルと回っている様子をイメージされるかもしれませんが、振る舞いがそれによく似ているというだけであって実際に回転しているわけではありません。走る方向に対して反時計回りに回る場合を「左巻き」と定義し、時計回りを「右巻き」と定義します。

ニュートリノ以外の素粒子は「右巻き」も「左巻き」も、両方とも存在します。しかし、ニュートリノについては、いろいろな実験を行っても「左巻きのニュートリノ」しかみつからず、「右巻きのニュートリノ」はまだ見つから

ていません(これについては5章でも紹介し
ます)。

ちなみに、すべての素粒子には反粒子が存在
します。ニュートリノの反粒子は「反ニュート
リノ」です。反ニュートリノでは「右巻きの反
ニュートリノ」はみつっていますが「左巻きの
反ニュートリノ」はまだみつかりません。

スピンの性質と質量とは重要な関係がありま
す。スピンが変わるためには質量が必要です。
アインシュタインの相対性理論によれば、光
の速度を超えて走ることはできません。また、
質量を持った粒子は光速より遅く走ること
になります。

私たちの目の前に図2に示すように左巻きの
質量を持って走るニュートリノがいるとしま
す。そのニュートリノと同じ方向にニュートリ
ノよりも速い速度で飛ぶロケットに乗ってその
ニュートリノを眺めたとしましょう。私たちの
前方に向かって走っていたニュートリノはこの
ロケットから見ると後方に向かって走っている
ようにみえます。このとき、ニュートリノのス
ピンの方向は変わらないのですが、巻き方は
「右巻き」になって見えます。

右巻きのニュートリノが観測されていないこ
とから、「ニュートリノの質量はゼロである」
と理論的には考えられたのです。そのため、
素粒子標準モデルではニュートリノの質量がゼ
ロであるとされています。

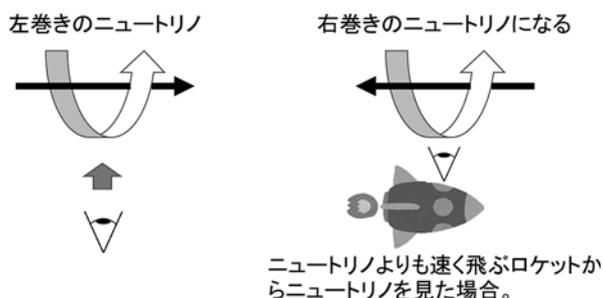


図2：ニュートリノのスピンの関係(本文参照)

2. ニュートリノ振動とは？

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが飛ん

でいる間に他の種類のニュートリノに変わっ
てしまうことです。3種類のニュートリノ(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)をこれからは記号を使って、 ν_e 、 ν_μ 、
 ν_τ (図1参照)と書くことにしましょう。こ
れらの呼び名はニュートリノが物と相互作用し
た際にどのような粒子が作られるかという観点
で分類分けをしたものであり、「相互作用の固
有状態」とよんでいます。

ニュートリノが質量を持つとすると3つの異
なる質量の状態が存在しますが、そうした状態
を「質量の固有状態」とよび、 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 と
表記します。ここですこしばりくくりするよう
な仮定をしないとイケません。ニュートリノ振
動が起こるためには、 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ (それぞれが
自分固有の質量を持つのではなく、 ν_1 、 ν_2 、
 ν_3 が適当に混じっている(それを「混合」と
よぶ)必要があります。例えば、 ν_e は68%が
 ν_1 、30%が ν_2 、2%が ν_3 混合した状態である
といった具合です。

ニュートリノは生まれる時には相互作用の固
有状態として生まれますが、その時には異なる
質量の状態が混じっているということです。な
んとなく気持ちが悪いように思われるかもしれ
ませんが、現代物理学の基礎となっている「量
子力学」という理論体系ではそれが許されます。
量子力学では「不確定性原理」という原理があ
り、ある範囲内ならば質量やエネルギーが揺ら
いでいることが許されます。ニュートリノが飛
んでいる間、異なる質量の状態は異なった振動
数で伝搬していくため、走っている間に ν_1 、
 ν_2 、 ν_3 の割合がずれてきてしまい、ある時
に観測してみると最初とは異なる「相互作用の
固有状態」になってしまいます。これがニュ
ートリノ振動の原理です。

3. 大気ニュートリノ振動の発見

1980年代初頭、「カミオカンデ」という名
前の実験装置が岐阜県神岡の地下に建設され、
1983年からデータを取り始めました。カミオ
カンデは3,000トンのタンクに約1,000本の

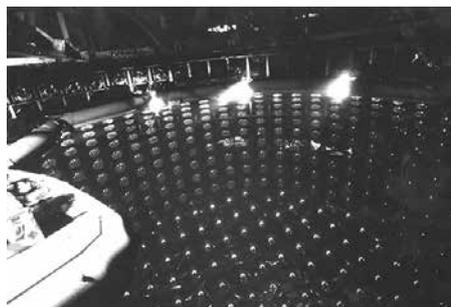
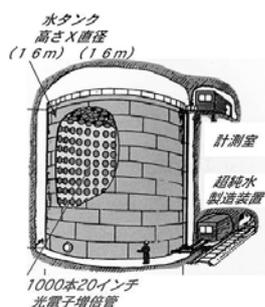


図3：カミオカンデ実験装置の概念図(左)と内部の写真(右)

大口径光電子増倍管を取り付けた装置でした(図3参照)。設置された場所は富山県と岐阜県の県境にある池ノ山(標高1,368 m)の山頂直下1,000 mのあたりです。

カミオカンデの当初の目的は陽子の崩壊を探ることでした。前節に書きましたように素粒子の間には強い力、弱い力、電磁気力が働きますが、それらを統一する理論が1970年代に提唱されました。その理論が正しければクォークと電子は仲間だということになり、クォークでできている陽子が陽電子などに壊れてしまう可能性が示唆されたのです。

しかし、カミオカンデでは陽子崩壊現象はみつきりませんでした(現在のスーパーカミオカンデでもまだ見つかっていません)。そこで、1984年末ごろから1985年にかけて太陽からのニュートリノを観測できるようにとカミオカンデが改造されました。よりエネルギーの低い現象も捉えることができるようにノイズを落とす機能が付加されたのです。そんな折、1987年には、大マゼラン星雲での超新星爆発にとも

なうニュートリノを捉えることができました。1989年には太陽ニュートリノの観測にも成功しました。これらの観測によって、ニュートリノを使って天体をみるという新たな研究分野(「ニュートリノ天文学」)が開拓されました。

その業績によりカミオカンデ実験を率いられた小柴先生が2002年にノーベル物理学賞を受賞されました。

梶田先生は1981年に修士課程の学生として東京大学の小柴研究室に入り、カミオカンデの建設時期から実験に参加しました(ちなみに筆者は梶田先生の1年後輩で1982年から小柴研究室に入りました)。陽子崩壊を探索するうえでバックグラウンドとなる事象は宇宙線が大気中で反応して発生するニュートリノ(「大気ニュートリノ」とよばれる)でした。そのため梶田先生はバックグラウンドをより良く理解するという目的で大気ニュートリノの研究を始めました。

宇宙線が大気中で反応すると荷電パイ中間子(π^\pm)が生まれ、それが $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$ と崩壊して

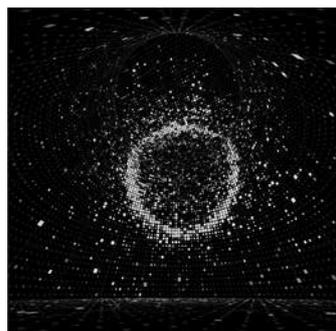
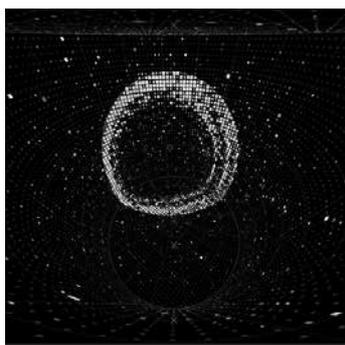


図4：典型的なミュオン粒子事象(左)と電子事象(右)。
(スーパーカミオカンデで取得された事象のイベントディスプレイ)

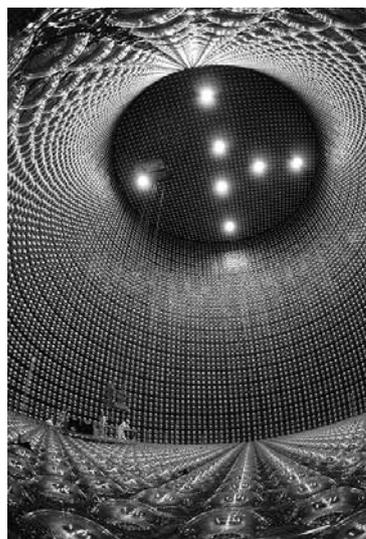
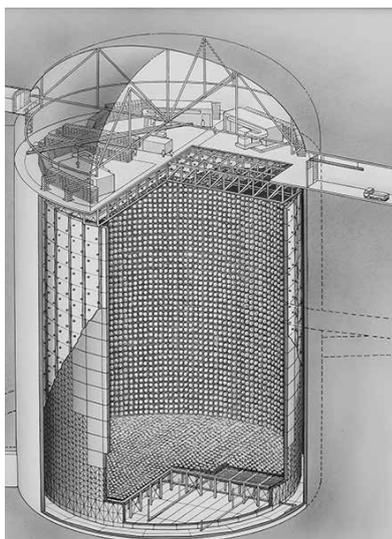


図5：スーパーカミオカンデ実験装置の概念図(左)と内部の写真(右)

ミュー粒子とミューニュートリノになり、この崩壊で生まれたミュー粒子がさらに $\mu \rightarrow e\nu_\mu \nu_e$ と崩壊して電子とミューニュートリノ、電子ニュートリノが生まれます。このようにして荷電パイ中間子から ν_μ が2個と ν_e が1個生まれるため、大気ニュートリノの $\nu_\mu:\nu_e$ の比は2:1になるはずですが。ところがカミオカンデがとったデータをみたところ、およそ1.2:1ぐらいの比だったのです。

ここで重要なのはカミオカンデが ν_μ と ν_e の違い(観測上はミュー粒子(μ)と電子(e)の違い)を見分けることができたことです。図4に典型的なミュー粒子(μ)と電子(e)の事象を示しましたが、 μ は輪郭がくっきりしたリングパターンを作るのに対し、 e の方はぼやけた輪郭になります。

そもそもカミオカンデは、粒子が非常に速く走った時に発生するチェレンコフ光という光を使って観測しました。チェレンコフ光は電気を持った粒子が進むときにその進行方向に対して約 42° の角度で発生する光です。水中で頻りに反応して2次粒子を生む電子はぼやけたパターンになるのです。

カミオカンデにおける大気ニュートリノの問題は、もしそれがニュートリノ振動であるならばものすごく重要なことであり、一方カミオカンデで捉えたニュートリノの数は高々277事

象(1988年の論文の時点)と数が少なかったため、すべての物理研究者がニュートリノ振動を認めるところまでには至りませんでした。

スーパーカミオカンデ(SK)は50,000トンの水タンクに約11,000本の大口径光電子増倍管を取り付けた装置ですが(図5参照)、有効質量(実際、観測に使える質量)が22,500トン、カミオカンデの約25倍ありました。

SKがとった圧倒的に多いデータを使って、詳しいデータ解析がおこなわれました。 ν_μ 、 ν_e それぞれに対してニュートリノが飛んでくる方向の分布を作ってみました。その結果、上から飛んでくる ν_μ は(それは20-30km程度しか飛ばずに検出器に到達します)ほぼ期待通りの数が観測されましたが、地球の反対側から飛んでくるニュートリノ(それは数千~1万km飛んでくる)は、 ν_e (タウニュートリノ)に振動してしまい、数が約半分になってしまっていることがわかりました(図6参照)。

この結果は、1998年に日本の高山で開催されたニュートリノ国際会議で梶田先生が世界に発表し、それがニュートリノ振動の最初の発見となりました。会議での梶田先生の発表の後は長いあいだ拍手が止みませんでした。

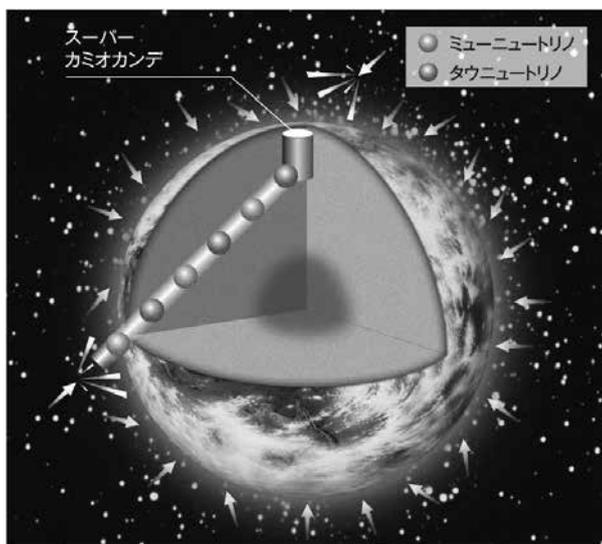


図6：大気ニュートリノ振動の様子。地球の裏側でできたミューニュートリノが長距離飛んでくる間にタウニュートリノと振動する様子を示す。

4. 太陽ニュートリノ振動の発見

今回、梶田先生とともにノーベル物理学賞を受賞されたアーサー・マクドナルド先生がおこなった研究は、太陽ニュートリノを使ったニュートリノ振動の研究です。

太陽のエネルギー源は中心核でおきている核融合反応ですが、核融合の際には ν_e が発生します。太陽ニュートリノを最初に観測した実験はアメリカのデービス先生（2002年ノーベル物理学賞受賞）が1960年代から始めた実験でした。この実験では塩素がニュートリノと反応して発生するアルゴンの数をカウントしましたが、観測された太陽ニュートリノの強度は標準太陽モデルが予想する値に比べて1/3程度しかなく、「太陽ニュートリノ問題」として1970年頃から議論されてきました。

カミオカンデは1989年に太陽ニュートリノの観測に成功し、やはり観測されたニュートリノの数が標準太陽モデルからの予想に比べて少ないことを確認し、太陽ニュートリノ問題を確認しました。

この問題の原因のひとつとしてニュートリノ振動も議論されてきましたが、ニュートリノ振動が原因であることを示すためには標準太陽モデルに依らない観測方法が必要でした。

カナダのSNO実験は1,000トンの重水(D₂O)を用いた実験であり、 ν_e が重陽子D(陽子(p)1個と中性子(n)1個からできている)と反応して重陽子の中性子を陽子に変えて電子を生む反応($\nu_e + D \rightarrow e^- + p + p$; CC反応とよばれる)、ニュートリノが重陽子を陽子と中性子に分解する反応($\nu + D \rightarrow \nu + n + p$; NC反応とよばれる)の両方を捉えました。CC反応は ν_e のみを捉えるのに対して、NC反応は全種類のニュートリノを捉えるといった特徴があります。

一方、SKは太陽ニュートリノを電子が散乱する反応($\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$; ES反応)によって捉えました。ES反応では ν_e と $\nu_\mu + \nu_\tau$ の1/6が寄与するといった特徴があります。SKは1996年から観測を開始し、2001年までには非常に精度の良いES反応の頻度を測定していました。

SNOは1999年に観測を開始し、2001年にはまずCC反応の結果を発表しました。この時点でSKの結果とSNOの結果に有意な違いがあり、それはニュートリノ振動が太陽ニュートリノ問題の答えであることを示す最初の発見となりました。その後、2002年にSNO実験はNC反応の結果を発表し、独自にCC反応とNC反応の頻度を比較し、太陽ニュートリノ

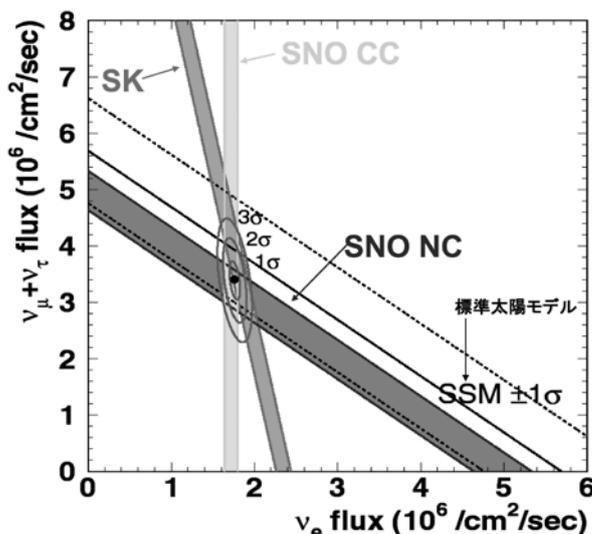


図7：SNO実験、スーパーカミオカンデ実験が測定した太陽ニュートリノ強度を横軸が ν_e 、縦軸が $\nu_\mu + \nu_\tau$ の強度にまとめた図。

振動を確実なものとししました。

それぞれの反応の頻度から求めた ν_e の強度と $\nu_\mu + \nu_\tau$ の強度の関係を図7に示します。 $\nu_\mu + \nu_\tau$ の強度がゼロから大きく離れていることがニュートリノ振動の証拠です。また、こうしたニュートリノ振動の効果を補正して求めた太陽ニュートリノの強度は太陽モデルが予想する値と非常に良く一致し、これによって太陽ニュートリノ問題は解決しました。

5. その後の研究の進展と今後

大気ニュートリノ、太陽ニュートリノとも自然界に存在するニュートリノですが、人工的に作ったニュートリノを使った実験が世界に先駆けて1999年に日本ではじまりました。つくばの高エネルギー加速器研究機構で作った ν_μ を250km離れたスーパーカミオカンデでとらえるという実験(K2K実験)でした。K2K実験は2004年には ν_μ が減っていることを示し、大気ニュートリノ振動を確認しました。

3種類ニュートリノがある関係で振動のパターンも3種類存在します。大気、太陽ニュートリノ振動に加えてもうひとつ振動モードがあるはずでした。それが2009年からスタートしたT2K実験(東海村J-PARC加速器施設からスーパーカミオカンデへ295km飛ばす実験)によって2011年にみつけられました。具体的には ν_μ ビームを飛ばして ν_e に変えることを調べたのですが、2011年までにその証拠となる事象を6個みつけたのです。その後も研究は続けられており、さらに詳しい研究が進行中です。

ニュートリノ振動が確立し、ニュートリノ研究は次のステップへ進もうとしています。ニュートリノが質量をもつことは分かりましたが、その値は電子と比べて100万分の1以下です。同じ素粒子の仲間なのになぜこれほど違うのでしょうか? 質量を持つからには「左巻きのニュートリノ」だけでなく「右巻きのニュートリノ」(第1章参照)が存在するはずですが、その質量はいくつなののでしょうか?

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構の柳田

勉先生は、それを説明するために「シーソー機構」という理論を提唱されています。その理論は右巻きニュートリノはものすごく重い粒子であることを予言しています。この右巻きニュートリノは現代の宇宙論に残された重要な疑問にも答えることができます。

私たちの宇宙はビッグバンによって生まれました。しかし、ビッグバンで生まれた宇宙には「物質」と「反物質」が同数存在するはずですが、今の宇宙を見渡しても反物質が存在しません。何らかの非対称性がビッグバン以降にあったおかげで反物質が消えてしまったのです。

柳田先生、福来先生は重い右巻きニュートリノが宇宙の初期に壊れる際に、粒子と反粒子の違いを生んだのだという説を提唱されています。それが正しければニュートリノの振動と反ニュートリノの振動に違いがあるはずであり、それを検証したいと考えています。そのためにはスーパーカミオカンデよりもっと大きな実験装置が必要であり、「ハイパーカミオカンデ」という実験が計画されています。また、同じ目的のためにアメリカでは液化したアルゴンを使った大規模実験も準備されています。

陽子崩壊をさぐるうえでノイズであった大気ニュートリノから始まったニュートリノ研究ですがこの30年間に大躍進を遂げてきました。ニュートリノの研究において、日本は世界のトップを走ってきました。これからも世界最先端のニュートリノ研究を神岡の地で進めていきたいと考えています。

今後ともご理解、ご支援の程、よろしくお願ひ致します。