

「ニュートリノ振動」 をとらえる 質量発見までの長い道のり

梶田 隆章

東京大学宇宙線研究所教授、宇宙ニュートリノ観測情報融合センター長

ニュートリノは長年にわたって研究者を引きつけてきた謎の素粒子です。

長い間ニュートリノには質量（重さ）がないと思われてきました。

近年、このニュートリノに他の素粒子とは比べ物にならないくらい

わずかな質量があることが発見されました。

観測されたごく小さな質量は、

ビッグバン直後のような超高エネルギーの世界の

自然法則と関係していると考えられています。

そのニュートリノの質量は、

「ニュートリノ振動」の発見によりあきらかにされました。

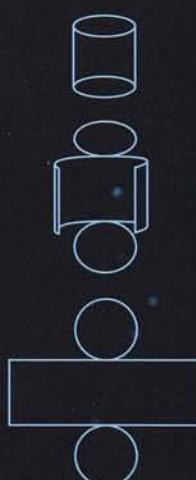
ニュートリノ振動とはなにか。

どのような観測や実験によって

ニュートリノ振動の発見にいたったのか。

ニュートリノから見える素粒子の世界を

解説していただきました。



ニュートリノを観測するスーパーカミオカンデの展開図。スーパーカミオカンデは直径・高さともに40メートルの円筒形で5万トンの純水を貯めている。飛来するニュートリノが純水と反応するとリング状に光を出す。円筒の内面には11,146本の微弱な光をとらえる光電子増倍管が取り付けられている。図示されているのは宇宙線が大気中の原子核に衝突して発生したミュニュートリノの観測データ。

地球をも素通りする素粒子 ニュートリノ

発見まで四分の一世紀

ニュートリノは、元々原子核のベータ崩壊の際に、運動エネルギーなどが保存しないかのように見える観測結果を説明するため、一九三〇年にパウリによつて導入された粒子です（図1）。

この粒子が実際に存在することは、一九五〇年代にライネスとコーウンが原子炉で生成されるニュートリノを観測することで確かめました。

彼らは核分裂反応にともなつて原子炉から大量のニュートリノが放出されていることに着目し、ニュートリノと物質との反応がわずかな数起つていてることを観測したのです（図2）。ライネスは、この発見から約四〇年後の一九九五年に、ニュートリノの発見によりノーベル物理学賞を受賞しました。

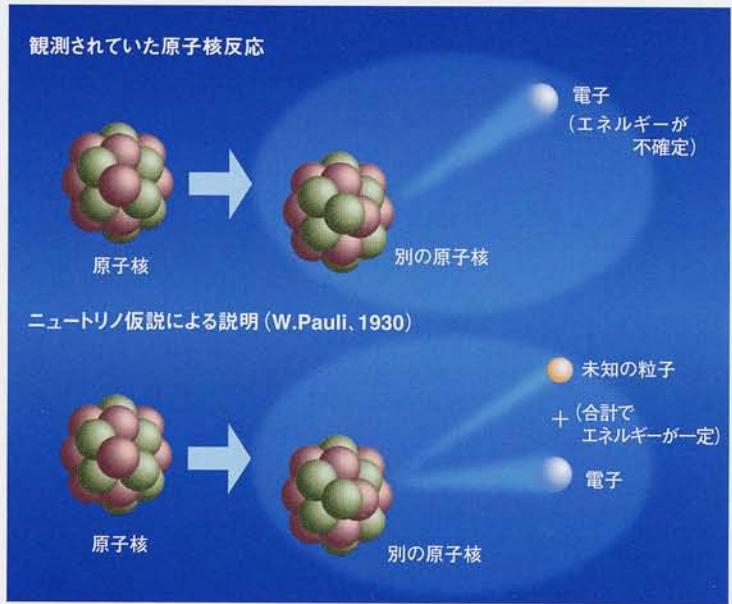
存在の予言から発見まで、四分の一世紀もかかったことからも推測できるかと思いますが、ニュートリノは観測することが非常にむずかしい粒子です。たとえば、これから述べる太陽で生成されるニュートリノを例にると、一個のニュートリノを反応させるには、地球を一〇〇億個程度縦に並べてニュートリノを通す必要があります。言いかえれば、一個の地球の中を一〇〇億個のニュートリノが通り抜けるとき、そのうちの一個がたまたま反応することになります。さらにニュートリノの数が多ければ、地球より小さな実験装置内でも反応するニュートリノがまれにあつ

●図1 原子核のβ（ベータ）崩壊

β崩壊とは、原子核からβ線、つまり高速の電子が放出される現象です。

この反応で電子だけが飛び出してくれるとすれば、エネルギー保存則により電子が一定の運動エネルギーをもつはずです。しかし観測された電子の運動エネルギーは、一定の値をとらず、理論予測値を上限としてさまざまな値をとっていたので、エネルギー保存則が成り立たないかに思いました。

この現象を説明するためにパウリ（Pauli, Wolfgang 1900-58スイス）はβ崩壊の際に、光量子（光のこと）のように、エネルギーをもつが質量をもたない、あるいは質量があつても非常に小さい未知の粒子が生成されて、エネルギーをもって飛び去るという仮説を立てました。のちにこの粒子はフェルミ（Fermi, Enrico 1901-54イタリア）によってニュートリノと命名されました。



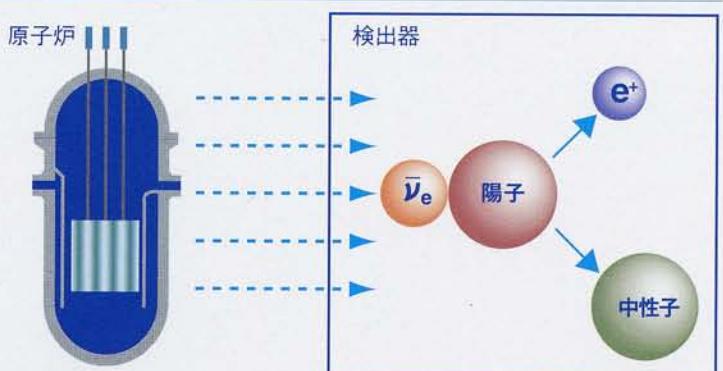
●図2 原子炉で生成されるニュートリノが検出される

原子炉の中では中性子がウランに衝突して原子核が2つに壊れるような反応がくり返されています。このとき生成される原子核は中性子が多く不安定で



とβ崩壊します。

ここでXは元々の原子核、カッコ内のAは陽子と中性子の数の和、ZやZ+1は陽子の数を示します。このとき、反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)が放出されます。その数はたいへん多く、原子炉から1km離れた所でも、1cm²当たり毎秒約10億個のニュートリノが突き抜けていきます。



原子炉から飛び出した反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)は、陽子と反応して陽電子(e^+)と中性子となります。陽電子は電荷をもった粒子なので、素粒子の測定器で観測できます。とくにこの反応の測定には放射線が当たると発光する物質（シンチレーター）を用いた検出器が多く用いられます。

て、それを観測することができるはずです。

ニュートリノ自体の研究は、素粒子物理学と呼ばれるミクロの世界の自然法則を探求する学問の一分野です。現代の素粒子物理学があつかう素粒子について、別掲パネル（10ページ）に示しました。

太陽ニュートリノの謎 観測された数は理論値の三分の一

太陽の中心部は、非常に高温高密度のプラズマです。太陽の中心部では、水素原子核どうしがくついて核融合を起こす反応が起こっています。そして、最終的にヘリウム原子核が生成されます。これが太陽のエネルギー源です。

この核融合の際に、低エネルギーの電子ニュートリノが生成されます。これらのニュートリノを太陽ニュートリノと呼んでいます（図3）。太陽ニュートリノの観測をすれば、太陽の中心部で起こっている核融合の様子を直接観測し、太陽内の核融合によるエネルギー生成の様子を直接調べることができます。

一方、太陽表面の光は、中心部で生成されたエネルギーが數十万年という長い時間をかけて表面まで到達し、初めて光るので、いくら精密にこの光を観測しても直接中心部分の様子を知ることはできません。

このようにニュートリノを使った天体の観測は、光学的観測では得られない情報を得られる非常にユニークなものです。こうしたことから太陽ニュートリノの観測は、すでに一九六〇年代後半からアメリカのデイビスの

図3 太陽中心部での核融合反応とニュートリノの生成

太陽の中心部では、まず陽子が2個融合する反応が起こり重水素（陽子1つ、中性子1つの原子核）ができます。このときに電子ニュートリノが1つ生成されます。引き続いでさまざまな核融合反応が起こりますが、最終的にはヘリウム原子核ができます。この間にいろいろなエネルギーをもった電子ニュートリノが生成されます。



*1
正確には反電子ニュートリノ、つまり電子ニュートリノの反粒子。
*2
プラズマとは、高温中で原子から電子が電離し、自由に運動する正、負の荷電粒子が共存している状態をいう。

ニュートリノ仮説

● 1930年、原子核から飛び出す電子のエネルギーが不連続に観測されることを説明するために、パウリは未知の粒子仮説を提唱した。

● 1934年、フェルミは、原子核から電子が飛び出す現象(ベータ崩壊)を理論化し、未知の粒子に「ニュートリノ」と名づけた。

ニュートリノの発見

● 1950年代、ライネスとコーウンが原子炉から放出される大量のニュートリノを用い、検出が不可能だと思われていたニュートリノを初めて検出した。

「太陽ニュートリノの謎」発生

● 1960年代後半、デイビスは600トンの塩化化合物を用い、太陽からのニュートリノの観測に成功したが、理論値の3分の1しか観測されなかった。「太陽のニュートリノの謎」と呼ばれる大問題となる。

太陽ニュートリノ問題は ニュートリノ振動で説明されるのか?

● 1984年、太陽ニュートリノの観測のためにカミオカンデの改造を開始。

● 1986年ミケーエフとスマルノフが「物質中のニュートリノ振動」の理論を用いて、混合角が小さくても、ニュートリノ振動によって電子ニュートリノが大きく減ることを示した。

● 1987年1月、カミオカンデで太陽ニュートリノの観測を開始。
2月、超新星ニュートリノを観測する。ニュートリノ天文学が始まった。

● 1989年、カミオカンデグループが太陽ニュートリノ観測結果を発表。予想値の半分しかなかった。謎は残ったが、これでデイビスの実験がまちがっていないことが支持された。

● 太陽ニュートリノ問題はニュートリノ振動に結びついでいるのではないかという、真剣な議論が開始される。

太陽ニュートリノの謎解明。 電子ニュートリノの振動であることが確定した。

● スーパーカミオカンデグループが太陽ニュートリノ観測を発表。カミオカンデでの観測結果を補強する。

● 2001年、SNOが、スーパーカミオカンデのデータも用いて、太陽からのニュートリノの総数は理論値と同じであるが、電子ニュートリノの数が理論値より減少しているという観測結果を発表する。

● 2002年、カムランドグループが『テキサシンポジウム』で、原子力発電所からのニュートリノに振動があると発表。「太陽ニュートリノの謎」は、ニュートリノ振動によるものと決定づけられる。

1930

1940

1950

1960

1980

1990

2000

ニュートリノの仮説から、ニュートリノ振動の確定まで

この年表では、本文で解説している「ニュートリノの仮説」から「ニュートリノ振動の発見」までの過程を理解していただくために、「大気ニュートリノ」「太陽ニュートリノ」などのグループに分け、それらのグループを色の丸で示して互いの関係を表しています。そしてこれら2種類のニュートリノの観測によってニュートリノ振動が証明されたことを示しています。

大気ニュートリノの数欠損が、
ニュートリノ振動で証明された。

1960年代半ば、インドと南アフリカの鉱山の
地下深くで大気ニュートリノを検出した。

1962年、牧・中川・坂田
「ニュートリノ振動」を予言。

1970年代、ジョージアイ、グラショウが「大統一理論」を発表。この理論では「陽子崩壊」を予言。1980年代初頭から、世界中で陽子崩壊の観測を開始。1983年、カミオカンデで陽子崩壊の観測を開始する。しかし、陽子崩壊をとらえることができなかった。

陽子崩壊の現象と区別するために、
大気ニュートリノ反応が注目される。

1988年、カミオカンデグループが最初の大気ニュートリノの観測結果を発表。ミュニュートリノ粒子は予想の60%。その理由にニュートリノ振動が考えられたが、当時の「常識」では受け入れられなかった。カミオカンデの観測結果を否定する2つの観測結果がでた。

1991年、IMBの観測結果がカミオカンデの結果を支持する。

1994年、カミオカンデグループが、新たな大気ニュートリノの観測結果を発表。地球の反対側から飛来するニュートリノにだけ欠損があった。

1995年、ライネスがニュートリノの発見によりノーベル賞を受賞する。ニュートリノ発見から約40年。

1996年、スーパーカミオカンデ完成。

1998年、高山での『ニュートリノ国際会議』で、スーパーカミオカンデグループが「大気ニュートリノ振動」の発見を発表。

2002年、小柴とデイビスがノーベル物理学賞を受賞する。

ニュートリノ振動の確定

研究グループで行われていました。

この観測では、約六〇〇トンの塩素化合物

(C_2Cl_4) が用いられました。太陽から飛来する電子ニュートリノと塩素が反応し、その結果生成されるアルゴン原子の数を数えて、太陽ニュートリノの量を観測しようというものでした。^{*} その結果は、観測された太陽ニュートリノの量が、理論予想値の約三分の一程度である

という驚くべきものでした。

これが有名な「太陽ニュートリノの謎」と呼ばれた大問題です。

ただ、この実験は非常にむずかしいものです。六〇〇トンの塩素化合物中から検出されたアルゴン原子の数は、一日あたり平均で〇・五個とごくわずかです。このように、デイビスの実験というのは、技術的に非常にむずかしいため、その後二〇年近く、誰もその

結果が正しいのかどうか確かめることすらできませんでした。

なお付け加えますと、この実験は電子ニュートリノだけを測れる実験で、もし、太陽から電子ニュートリノ以外のニュートリノが飛来していても観測できません。

結局、「太陽ニュートリノの謎」は、二十一世紀になつて、ニュートリノに質

量があつて、ニュートリノ振動という現象が

の量が、理論予想値の約三分の一程度である

ウ) 粒子と呼ばれています。

同様にニュートリノにも3種類あり、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呼ばれています。クォークの仲間も、電荷がプラス3分の2のものとマイナス3分の1のものが、それぞれ3種類あります(パネル図B参照)。また、これらすべての粒子には反粒子と呼ばれる、反対電荷をもった粒子が存在します

素粒子間に働く力は、極端に弱い重力を除けば、「強い力」、「弱い力」、「電磁力」があります。これら、それ

それを記述する精密な理論も知られています。素粒子の「標準理論」と呼ばれています。この理論は非常に成功した理論で、本稿で述べられているニュートリノの質量を除けば、基本的にすべての素粒子実験の結果を説明することができます。

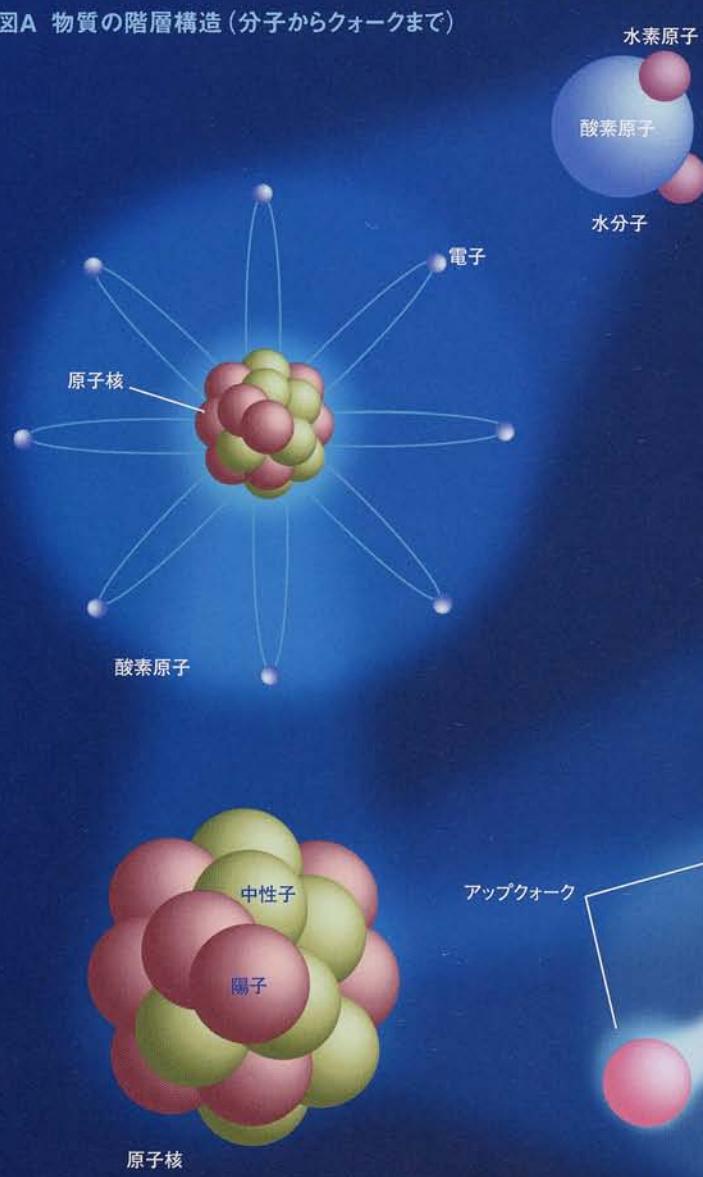
ただ、そうは言っても、この理論は不充分なもので、この宇宙の物理法則を支配する、もっと根本的な理論が存在し、それを知れば、より深く自然法則が理解できるものと考えられています。

たとえば、標準理論では、電磁力と弱い力は相互に関係があることがわか

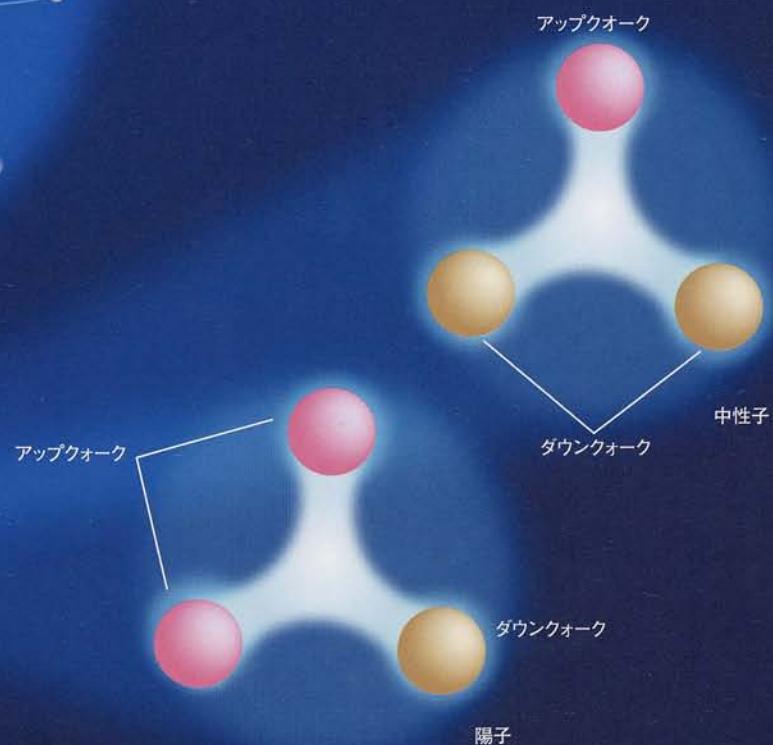
っていますが、強い力がなぜ他の力に比べて強いのか、などは説明が不可能です。これらの問題の一部を解決しようとする理論のひとつが素粒子の「大統一理論」と呼ばれるものです。

大統一理論は、現在の高エネルギー加速器で到達できるエネルギーの約10兆倍高いエネルギーでは上記の3種類の力が統一され、その強さが同じになることを予言しています。宇宙がビッグバンで始まった直後は、3種類の力が統一されていたと考えられています。

図A 物質の階層構造(分子からクォークまで)



図B 物質を構成する素粒子



19世紀に、すべての物質が100種類程度の元素からできていることが発見され、このことが物質の性質を理解するうえで重要であったことを思い出してください。その後20世紀になると、それぞれの元素（原子）は、中心に小さくて重い原子核があり、そのまわりを電子がかこんでいるのだということが発見されました。さらに原子核は、陽子と中性子が狭い空間に詰まって構成されていることがわかりました。

20世紀後半に素粒子物理学は飛躍的に発展しました。現在では、陽子や中性子はもはや基本的な粒子ではなく、内部に構造があって、「クォーク」と呼ばれる、より基本的な粒子3個から構成されていることがわかっています。また、よく知られている π （パイ）中間子という素粒子も内部構造があり、クォークと反クォーク（クォークの反粒子）それぞれ1個ずつから構成されています。

このクォークという粒子はおもしろい性質をもつ粒子で、たとえば、電荷は陽子の電荷に対して、プラス3分の2やマイナス3分の1をもち、また、クォークを単独で取り出すことはできません。このように、特別な性質をもっているので、世界中で大型の加速器を用いて、クォークについていろいろ調べられてきました。一例を挙げれば、高エネルギーに加速した電子を陽子に当てる実験で、陽子の内部に点状のものがあることがわかり、これがクォークだったのです。これは原子核を発見したラザフォードの実験の現代版といえます。

一方、電子やニュートリノには、現在でも内部に構造がある証拠は見つかっていません。つまり現在ではクォークや、電子、ニュートリノが物質を構成する、もっとも基本的な粒子であると考えられています。電子の仲間には、電子とほとんど性質が同じで、単に重さが重くなっただけのような粒子があと2種類存在し、軽いほうから μ （ミュー）粒子、 τ （タウ）粒子があります。

起こっているということで解決しました。このことについて述べる前に、ニュートリノ振動について説明しておきたいと思います。

量子の波の「うなり」現象 ニュートリノ振動は質量の存在を示す

もし、ニュートリノに質量があれば、ニュートリノ振動が起こることは予言されています。^{*4} どのような理由でニュートリノ振動が起こるのかをこれから説明しましょう。

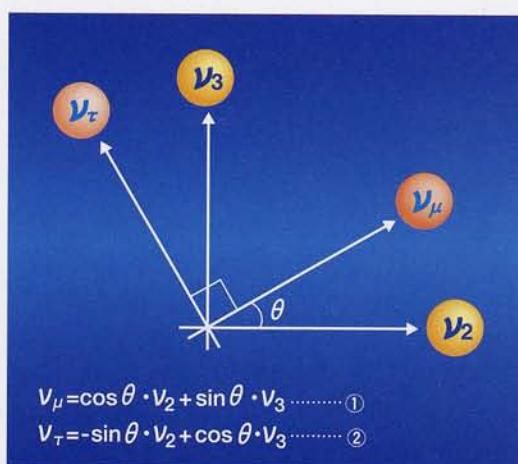
ニュートリノには電子ニュートリノ、ミュー^{*5}ニュートリノ、タウニュートリノの三種類あります（パネル参照）。ここでは説明を簡単にするために、二種類のニュートリノを考えます。たとえば、ミューニュートリノとタウニュートリノの場合を例にとりましょう。

くわしい説明は割愛しますが、ミクロの世界「量子力学」によると、これらミュー、タウニュートリノやタウニュートリノが一定の質量をもつて必然性はないのです。むしろ、「一

つの質量をもつた状態の重ね合わせ」となります。ここで、それぞれの質量をもつた状態を、 v_2 、 v_3 と書くと、ミューニュートリノ（ v_μ ）やタウニュートリノ（ v_τ ）は、図4のように表せます。図中で θ は混合角と呼びます。

いまミューニュートリノが真空中を飛び場合を考えましょう。この場合、ミューニュートリノが飛びとは、 v_2 と v_3 を重ね合わせたものが一緒に飛びということです。さて、よく知られているように、量子力学というミクロの世界を記述する理論では、素粒子は粒子であると同時に波でもあるのです。 v_2 、 v_3 それぞれが違った質量をもつてるので、 v_2 、 v_3 の波はわずかに違った周波数をもつ波となります。

われわれの身近でよく知られているように、わずかに周波数の違う音波を重ね合わせると、そこに「うなり」の現象が現れ、音が大きくなったり小さくなったりすることを周期的につくり返します。これと同様のことが、



●図4 固有の質量をもっていないニュートリノ

横軸を v_2 成分、縦軸を v_3 成分とし、2つの成分の重ね合わせで v_μ 、 v_τ を表します。混合角 θ の大きさに応じて成分の比率が変わります。

図の例では、混合角 θ が45°より小さいので、 v_μ には v_2 成分が v_3 成分より多く存在しています。

^{*3} 六〇〇トンの塩素化合物からアルゴン原子を取り出し、その数を数えることは、生成されたアルゴンが気体であり、また不安定な同位体であるため可能となった。まず、アルゴンを取り出すことは「バーリング」という技術で行われた。バーリングでは六〇〇トンのタンク中に超高純度のヘリウムガスの泡を入れる。すると、塩素化合物中のアルゴン原子がヘリウムの泡のほうに移動する。このヘリウムのガスの通る管を液体窒素に通すと、アルゴンが凍つて容器の表面につく。これをまんべんなく行うこと、六〇〇トンのタンクからアルゴン原子を全部回収できる。

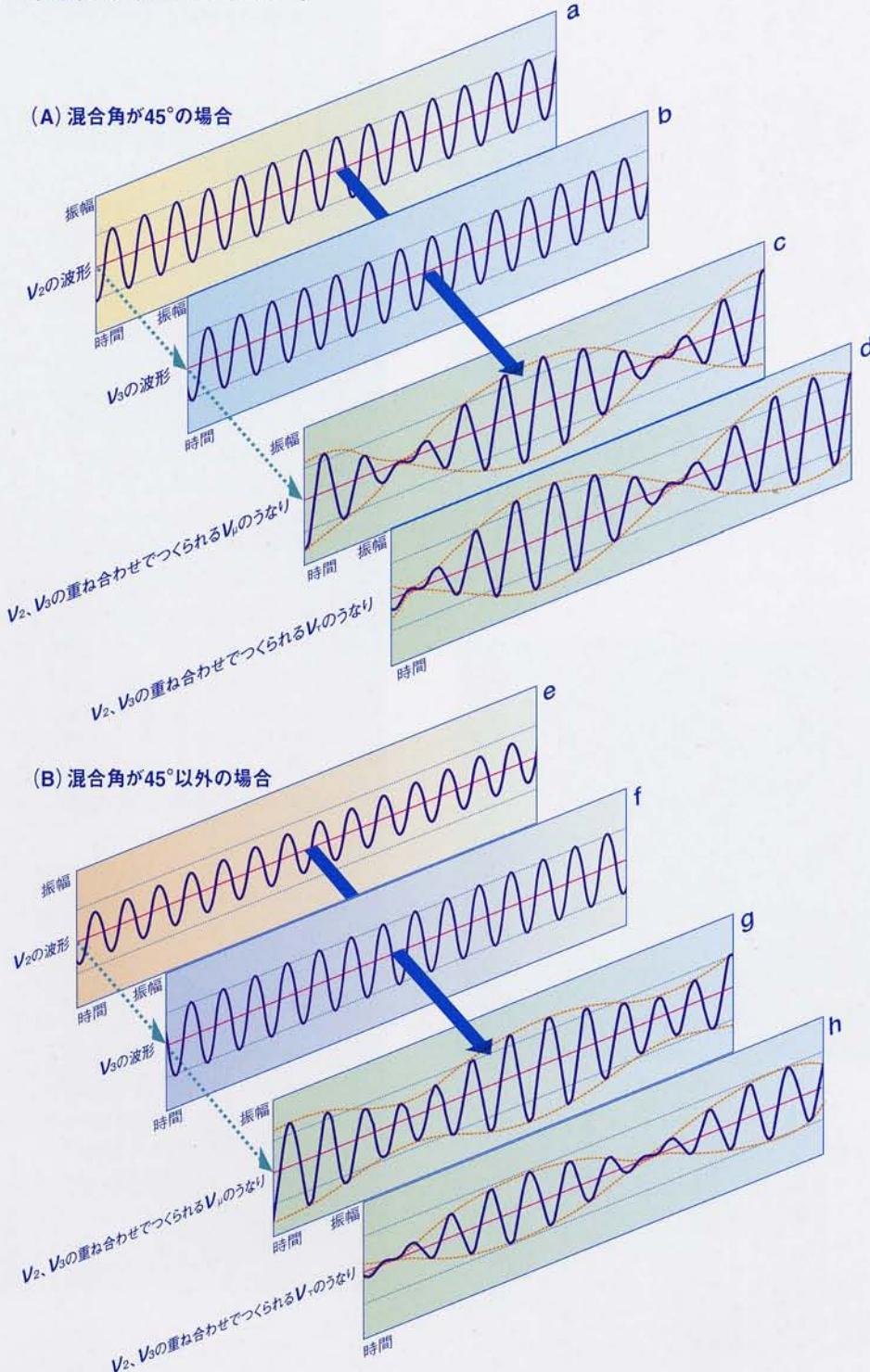
^{*4} ニュートリノ振動は牧一郎、川昌美、坂田昌一という三人の日本人によって一九六二年に予言された。ニュートリノ振動は本誌インタビュー参考とともに受賞した。

^{*5} ニュートリノ振動は牧一郎、川昌美、坂田昌一という三人の日本人によって一九六二年に予言された。ニュートリノ振動は本誌インタビュー参考とともに受賞した。

v_2 , v_3 の波の重ね合わせにも起こり「うなり」が生じて、その結果、ミューニュートリノ成分が減つたり増えたりをくり返す現象となるのです。そして、ミューニュートリノが減つたときには、タウニュートリノが生成されます。ある種類のニュートリノが「うなり」のように周期的に増えたり減つたりするので、「ニュートリノ振動」と呼ばれるのです(図5-A)。

●図5 波の重ね合わせで起こる「うなり」と「ニュートリノ振動」

ニュートリノ振動は波の重ね合わせで起こる「うなり」で表すことができます。ミューニュートリノは2つの質量の固有状態 ν_2 , ν_3 の重ね合わせです。 ν_2 , ν_3 それぞれが違った質量をもつとすると、 ν_2 , ν_3 の波の周波数にはわずかな違いがあるため、うなり現象が生じ、ミューニュートリノ成分が減つたり増えたりします。そして、ミューニュートリノ成分が減った分タウニュートリノ成分が現れています。とくに ν_2 , ν_3 が最初どれだけあったかによって、どれだけニュートリノ振動でタウニュートリノが生成されるかが決まります。見てわかるように図cでうなりの振幅が最小になったとき ν_μ 成分が最小になり、そのとき図dでの ν_τ のうなりの振幅が最大となります。図a, 図bは混合角が45°のときで、 ν_2 , ν_3 の振幅が同じになっています。45°以外のときには ν_2 , ν_3 の振幅が異なります(図e, 図f)。この場合、 ν_μ , ν_τ のうなりはそれぞれ図g, 図hと表すことができ、うなりの振幅が最小になったときでも ν_μ 成分が0にはなりませんが、 ν_τ 成分の振幅は小さくなります。



うなりの周波数でわかる質量
振幅でわかる混合角
「ニュートリノの混合角は小さいはず」と多くの研究者は考えた

音波のうなりの周波数は、重ね合わせる音波の周波数が近ければ近いほど小さくなりります。同様にニュートリノ振動でも、 ν_2 , ν_3 の質量の差が小さければ小さいほど、うなりの

周波数は小さくなります、つまり別のニュートリノに転移するまでに必要な距離は長くなります。逆に言えば、ニュートリノ振動によって別のニュートリノに転移するまでの距離を測れば、 ν_2 , ν_3 の質量の差が測ることになります。

いままで、わずかに違う周波数の音波を重ね合わせると、それぞれの音波の振幅の大きさ、つまり音の大きさについては何もふれ

*5 (10ページ)
量子力学は、分子、原子、素粒子など、微視的な領域を取り扱う理論体系。

ませんでした。たぶん、多くの方はそれぞれの音波が同じ大きさ（振幅）の音を想像されたかと思います。しかし、「うなり」の現象は、二つの周波数の音波の振幅が同じでなくとも起こります。この場合、「うなり」現象によって、音が大きくなったり小さくなったりするときの音の大きさの変化が小さくなり、音が一番小さくなつたときもまた音が消えることはありません（図5-B）。ニュートリノ振動でも、振動によつて周期的に完全に別のニュートリノに転移するのは特別な場合で、ふつうは、別のニュートリノに最大に転移しているときでも、最初のニュートリノの成分は残っています。図4中の混合角 θ がどれだけ別のニュートリノに転移するかを表します。もし、 θ が 0° なら、あるとき生成されたミュニニュートリノは永久にミュニニュートリノのままであります。一方、 θ が 45° なら、ミュニニュートリノがちょうどよい距離を飛んだときは、 -100° パーセント、タウニュートリノに転移します。

さて、この混合角というものは何をニュートリノに限られたものではなく、クオーレークもあります。^{*6} 実際、クオーレーク間の混合角は、長い間加速器を用いた実験で測定されてきました。そしてこれらの測定から、クオーレーク間の混合角は小さいことがわかつっていました。また、 10° のパネルの図Bを見ると、クオーレークとレブトンがなんとなく似たパターンで分類されていることがわかると思います。実際この類似性から「クオーレーク間の混合角が小さい」ということが、一歩進めて「二ユートリノ間の混合角も小さいはずだ」とい

う先入観になり、研究者の間に強く浸透してしまいました。

このため、太陽ニュートリノの欠損は、太陽中で生成された電子ニュートリノが、ニュートリノ振動により、別の種類のニュートリノに転移したと考えれば説明可能でしたが、そのためには大きい振動確率、つまり大きい混合角が必要となつてしましますので、あまり現実的とは考えられませんでした。後で説明ますが、この先入観は大きくまちがつていたことが現在では知られています。

「太陽中でのニュートリノ振動」の登場 これで太陽ニュートリノの謎は 解決できると考えられた

太陽ニュートリノの問題に転機が訪れたのは、一九八〇年代後半でした。理論的な発展と新たな実験によるものです。

一九八六年頃、^{*7} ミケーホフとスミルノフのふたりは「物質中のニュートリノ振動」を研究していました。その結果驚くことが判明しました。

電子ニュートリノと他の種類のニュートリノを考えた場合、混合角が小さいと真空中を飛行するニュートリノが別のニュートリノに転移する割合は小さいのですが、物質中では、条件がうまくそろうと、混合角が小さくても大きな割合で、別のニュートリノに転移することが理論上わかつたのです。ちょうどよい質量や混合角の場合には、太陽ニュートリノのほとんどがミュニニュートリノに変化するものでした（図6）。この装置では、水中の陽子が陽子崩壊して放出した光を他の現象

なお、この理論は、ニュートリノの質量の値や混合角について何か予言するものではありません。というのは、先入観で信じられていた小さな混合角でも、太陽ニュートリノは電子ニュートリノ以外の別のニュートリノに効率よく転移し、その結果、太陽ニュートリノ問題を自然に解決できると考えられたからです。

当時、この理論は、太陽ニュートリノ問題をニュートリノ振動で解決できる可能性を示しました。しかし、そもそもデイビスの観測実験が、正しいか否かがはつきりしないかぎり、決定的なことは何も言えません。

陽子崩壊を探るためにつくられた カミオカンデ 太陽ニュートリノのために大改造

この問題に実験的に取り組んだのが、一九八〇年代のカミオカンデです。カミオカンデは元々、大統一理論（パネル参照）で予言された陽子の崩壊を探すために、小柴昌俊東京大学教授（当時）の発案のもと、設計・建設された実験装置でした。

この装置は約三〇〇〇トンの純水を水槽に貯め、水中の陽子が崩壊したときに放出される陽電子やパイ中間子などの粒子が、水中を走るときに放出するチエレンコフ光を観測す

*6 キャビボ(Cabibbo, N.)・小林・益川の三人によってクオーレークの混合角が提唱された。

*7 ミケーホフ(Mikhnevich, S. D. 1940-)はロシアの実験物理学者。

*8 スミルノフ(Smirnov, A. Yu. 1951-)はロシアの理論物理学者。

*9 本誌25ページからインタビュー

とできるだけ明確に区別するために、巨大な光検出器（光電子増倍管）を開発して使用していました（図7）。

一九八三年夏、観測を始めてみると、目の陽子崩壊はその兆候がないのですが、開発された巨大な光電子増倍管の性能が非常によく、太陽ニュートリノも観測にかかりそうだということが、初期のデータから判明しました。そこで、小柴先生の発案で、カミオカンデを改造して太陽ニュートリノを観測しようとすることになりました。一九八三年の秋のことです。

先に述べました「物質中のニュートリノ振動の理論」が出る前でしたが、少なくとも太陽ニュートリノ問題という未解決の問題が存在して、この原因がデイベスの実験の誤りなのか否かは、別の実験で明らかにしなければいけません。このような理由から、太陽二ユートリノの観測に向けた測定器の大改造が始まりました。

ただし、実際にカミオカンデを改良して太陽ニュートリノの観測をする^{*10}のは、そ

う簡単なことではありませんでした。一九八四年から本格的に始まつた、太陽ニュートリノ観測に向けての装置の改良は、いろいろな努力の末、一九八七年一月に、やっと観測できるところまで進み、一九八九年には最初の結果がまとまりました。

観測された太陽ニュートリノの数は「太陽理論の予言値の半分程度」というものでした。つまり、カミオカンデの結果でも、太陽ニュートリノは理論どおりの数が観測されないというものでした。

この観測結果が出るまでは、太陽ニュートリノ問題は太陽の中で生成されるニュートリノの理論がまちがっているのか、デイベスの観測実験がまちがっているのか、それとも別の理由があるのかというように、いろいろな可能性がありました。しかし、少なくとも観測実験がまちがっていることはないであろうと結論されたのです。理論的発見、そしてカミオカンデの観測が重なり、この頃から、太陽ニュートリノ問題が、ニュートリノの振動と結びついているのではないかという予想が、真剣に議論されるようになつてきました。実際、太陽ニュートリノ問題はニュートリノ振動で決着したのですが、決着するには次世代の太陽ニュートリノ観測実験の精密データが必要でした。このことについては後（18ページ）で述べます。

宇宙線がつくる大気ニュートリノ あらゆる方向から飛来する 大気ニュートリノは 宇宙崩壊観測の障害だった

ここで、太陽ニュートリノとは別のニュートリノを観測して、ニュートリノ振動の発見にいたつた話について述べます。

宇宙のどこからか、地球上に飛来する宇宙線というものがあります。この主な成分は、高エネルギーの陽子や原子核です。これらの宇宙線が大気に入射すると、大気という標的と衝突してパイ中間子を生成し、それが崩壊してミュニニュートリノとミュー粒子を生成します。

●図6 水中で発生するチレンコフ光

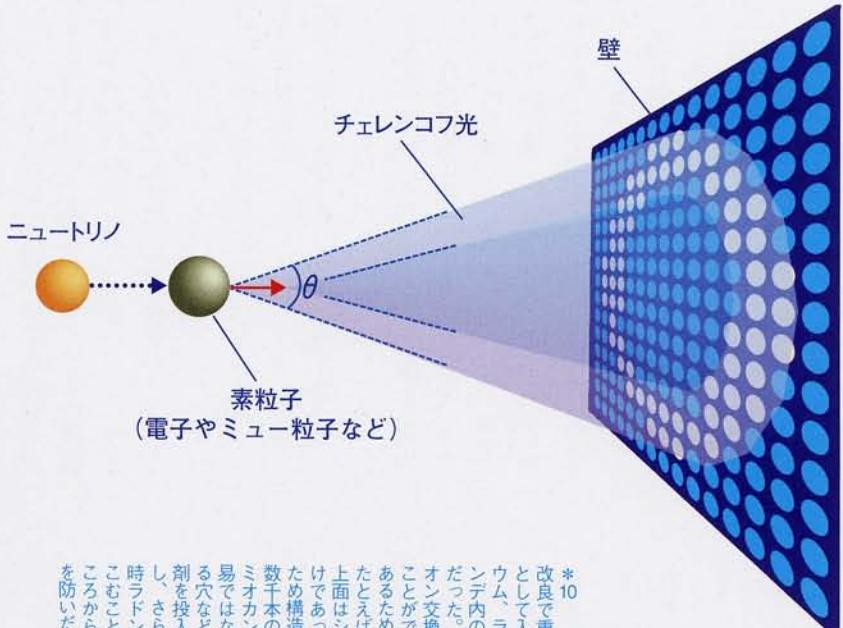
物質中では荷電粒子が移動するとき、その早さが物質中の光の速度より大きくなる場合もあります。そのときに光を出します（放射）。この現象で出る光をチレンコフ光と呼びます。

チレンコフ光は円錐形にひろがり、頂角 θ は粒子の速度と物質に依存しています。



カミオカンデのために開発された直径約50cmの光電子増倍管。このときまでは直径20cmが世界最大だった。

提供:浜松ホトニクス



*10 改良で重要なのは、不純物として入っているウランやカミオカンデ内の水の純度を高めることだつた。ウランやトリウムはイオン交換樹脂を用いて取り除くことができた。ラドンは気体であるため、とくに厄介であった。たとえば初期のカミオカンデの上面はシートがぶせめてあるだけであったが、ラドンを避けるため構造的に密封した。しかし、数千本のケーブルが出ているカミオカンデを密封することは容易ではなかった。ケーブルが通る穴など、すべての隙間に充填剤を投入してできるだけ気密にして、さらに上面の気密空間に常時ラドンを除去した空気を送りこむことで、気密が不完全なところからラドンが侵入することを防いた。

大気層は数十キロメートルと厚いので、パイン中間子が崩壊してできた比較的寿命の長い（一マイクロ秒）ミューゲー粒子も崩壊して、電子、ミューイユートリノと電子ニユートリノを生成します。このように、地球大気中で宇宙線と大気原子核の衝突によつて生成されたニュートリノを、大気ニユートリノと呼んでいます（図8・16ページ）。

これらの大気ニユートリノは、地球大気のあらゆるところで常に生成されています。また、大気ニユートリノのエネルギーは、太陽ニユートリノに比べれば一〇〇倍程度高く、太陽ニユートリノに比べれば観測は簡単です。

一九六〇年代半ばに、大気ニユートリノを検出する実験が、インドと南アフリカの鉱山の地下深くで行われました。実際、これらの実験で、大気ニユートリノの検出に成功しました。

このように、もう四〇年近く前に始まつた大気ニユートリノの研究ですが、多くの研究者の注目を集めることになつたのは一九八〇年代後半からです。

一九七〇年代に現れた素粒子の大統一理論（10ページパネル参照）は、陽子の崩壊を予言しました。とくに一九七〇年代の理論の予言では、陽子の寿命は非常に長いけれど、充分測定可能な寿命でした。そこで一九八〇年代初頭から世界各地で陽子崩壊を探す実験が開始されました。

これらの実験は、大量の物質を長時間観測し、あるとき、その中の陽子の一つが壊れて、別の粒子が飛び出てくるのを観測しようとい

うものでした。実験は、宇宙線の影響を避けるために、地下深くで行われました。

しかし、どんなに測定器を地下深く設置しても避けられないのが、大気ニユートリノ反応です。

ニユートリノは地球を通過して、そのうちのごく一部は測定器の内部で反応することがあります。この場合、ニユートリノ自体は見えないので、外から粒子（ニユートリノ）が入ってきたという証拠はありません。そのため、陽子崩壊かどうかを判断するために、ニユートリノ反応の詳細を調べることが必要となり、大気ニユートリノの性質についてくわしく調べることが必要となりました。

異常に少ないミューゲー粒子
ニユートリノ振動を観測しているのか？

大気ニユートリノ中のミューゲー粒子と電子ニユートリノの数の比は、簡単に精度よく理論計算できます。したがって、カミオカンデで観測されるミューゲー粒子と電子ニユートリノ事象の数の比も、おおよそ計算どおりになつてゐるはずです。

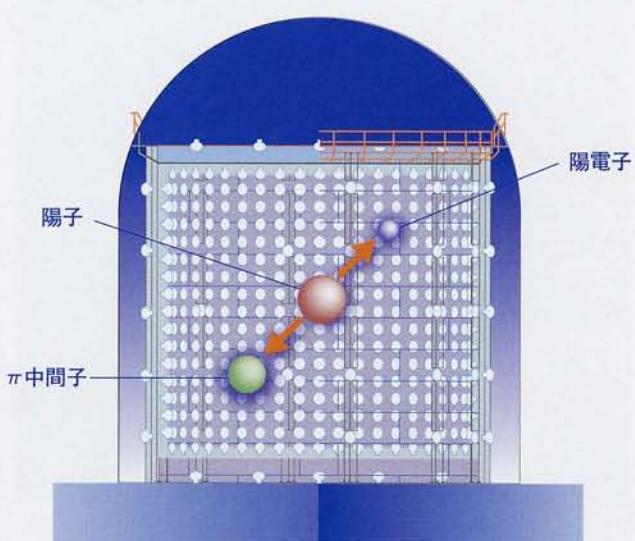
ところが詳細にデータを解析してみると、電子ニユートリノ反応で生成される電子は、おおよそ予想どおりの数が観測されていましたが、ミューゲー粒子反応で生成されるミューゲー粒子の数は、予想の六〇パーセント程度しか観測されていませんでした。

このデータは、もしミューゲー粒子とニユートリノ振動なしの理論計算と、まったく矛盾しないという実験結果を出しました。

そのため、いろいろな疑いが議論されました。最初にカミオカンデがこの観測結果を発表したのは一九八八年です。しかし、その後行われた他の観測実験では、カミオカンデの結果は確認されず、それどころかふたつの実験がカミオカンデの結果を否定するような、ニユートリノ振動なしの理論計算と、まつたやつと、カミオカンデと同様の結果が、別

*11 ディビスの実験では、観測値が理論値の約三分の一で、カミオカンデが約半分だったことを少しだけ説明する。ディビスの実験では、電子ニユートリノしか観測できない。したがって、三分の二のニユートリノは別の種類のニユートリノ（ミューゲー粒子）にニユートリノ振動してしまった。観測できない。ところが、カミオカンデの実験では、ミューゲー粒子（電子ニユートリノ）も電子ニユートリノに比べて約六分の一の確率で観測できる。つまり三分の二の六分の一で、太陽理論値の約一バーセントの信号がミューゲー粒子（電子ニユートリノ）から期待される。これに電子ニユートリノから期待される太陽理論値の三三・三バーセントとなつて、観測された値（理論値の約半分）と重複する。

●図7 陽子崩壊をとらえるためにつくられたカミオカンデ
カミオカンデは陽子崩壊によって生じるチレンコフ光をとらえるため、内面に約1000本の光検出器（光電子増倍管）を備えています。陽子崩壊では π （パイ）中間子と陽電子が放出されると考えられています。



の実験から得られたのは一九九一年でした。

これを報告したのはアメリカで行われていたIMBという実験でした。この実験装置は、カミオカンデと同様に水を用いた装置で、カ

ミオカンデより約三倍大きいのですが、光電子増倍管が小さくて性能が劣るものでした。

しかし、いずれにしても、合計四実験の結果は二対二に分かれていて、明確な結論は得られませんでした。

ところで、われわれのカミオカンデによる前述の発見は、カミオカンデという非常によい測定器があつたおかげですが、かなり偶然に近かつたことも書いておきたいと思います。そもそもは、陽子崩壊の検出感度をあげることをめざして、解析プログラムの改良をしていました。

具体的には、陽子崩壊やニュートリノ反応

で飛び出てきた粒子の種類が電子なのか、それともミュー粒子なのかを区別する解析プログラムです。完成したプログラムを、まず試

しに、すでにあるデータにかけてみました。すると結果は、予想と全然違っていました。

科学上の発見における偶然の要素がここにありました。もちろん、大気ニュートリノを用いたニュートリノ振動の研究は、カミオカンデを始める前から考えられていました。研究テーマのひとつですから、この偶然がなくても遅かれ早かれ発見されたと思いますが。

ひとつの実験方法が正しいことを示す別のテスト実験を行い、たしかに実験にまちがいがないことを示しました。それとともに、カミオカンデはもうひとつ、重要な結果を発表しました。

ニュートリノ振動を考えると、大気上空で生成され、上からカミオカンデに飛来するニュートリノは、地表までの飛行距離が短いので、まだニュートリノ振動をしていません。一方、地球の反対側の大気上空で生成され、地球をはるばる通過してきた大気ニュートリノには、ニュートリノ振動をして別のニュートリノを発見したライネスを中心としたグループにより行われた。インドの実験は、日本、インド、英國の共同研究で、中心人物は三宅二郎元東大宇宙線研究所所長。

実験結果を支持しませんでしたが、われわれはこの解析に自信があり、いずれこの結果が正しいと認められるときが来ると信じていました。

ただし、そのためには、ただ待つてみ上げていくことが必要と考えていました。

ひとつの実験方法が正しいことを示す別のテスト実験を行い、たしかに実験にまちがいがないことを示しました。それとともに、カミオカンデはもうひとつ、重要な結果を発表しました。

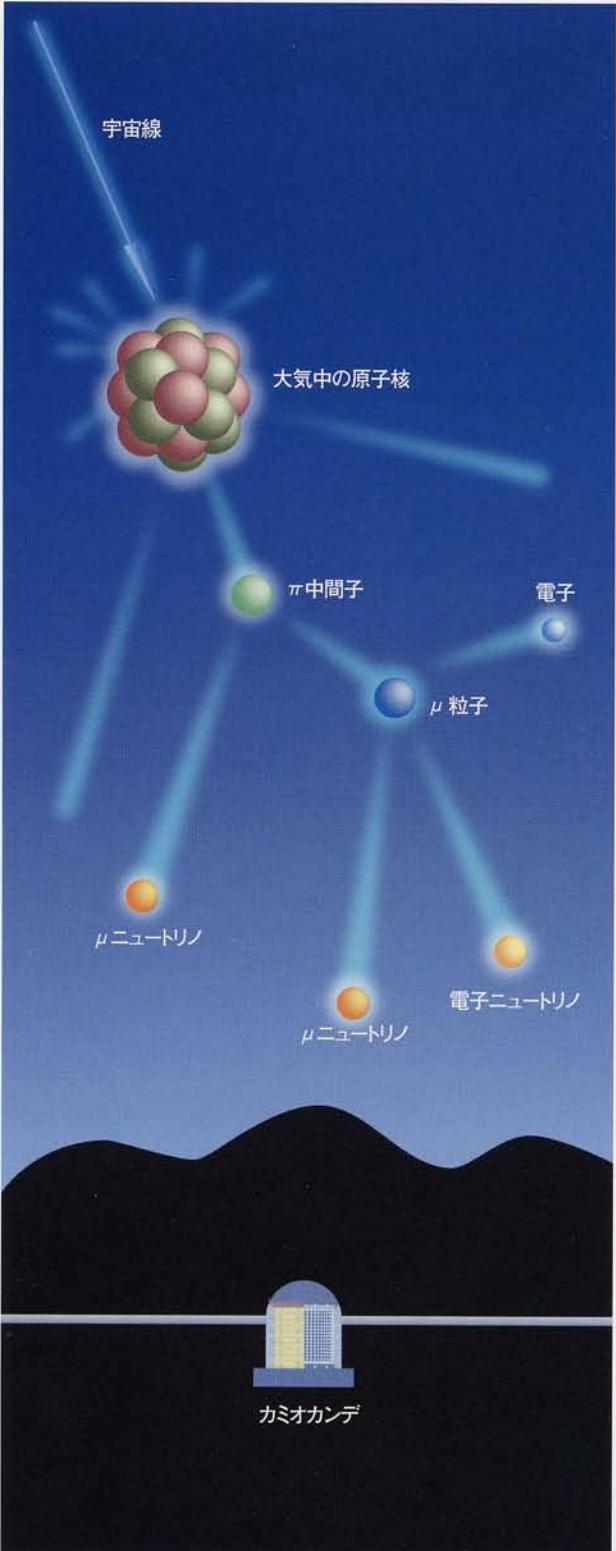
ニュートリノ振動を考えると、大気上空で生成され、上からカミオカンデに飛来するニュートリノは、地表までの飛行距離が短いので、まだニュートリノ振動をしていません。一方、地球の反対側の大気上空で生成され、地球をはるばる通過してきた大気ニュートリノには、ニュートリノ振動をして別のニュートリノを発見したライネスを中心としたグループにより行われた。インドの実験は、日本、印度、英國の共同研究で、中心人物は三宅二郎元東大宇宙線研究所所長。

(15ページ)

*13 IMBは、カリフォルニア大学アーバイン校(UC Irvine)、ミシガン大学(University of Michigan)、ブルックヘブン研究所(Brookhaven National Laboratory)の頭文字をとった、アメリカの陽子崩壊観測実験の研究グループ。一九八一年に実験が始まった。純水の漏洩を起こし、一九九一年に実験終了。

●図8 大気ニュートリノの発生

高エネルギーの宇宙線(陽子や原子核)が大気に入射すると、大気中の原子核と衝突を起こし、 π (パイ)中間子を発生します。 π 中間子は崩壊し μ (ミュー)粒子と μ ニュートリノを生成します。 μ 粒子はさらに崩壊して電子、電子ニュートリノ、 μ ニュートリノを発生します。



*13 IMBは、カリフォルニア大学アーバイン校(UC Irvine)、ミシガン大学(University of Michigan)、ブルックヘブン研究所(Brookhaven National Laboratory)の頭文字をとった、アメリカの陽子崩壊観測実験の研究グループ。一九八一年に実験が始まった。純水の漏洩を起こし、一九九一年に実験終了。

トリノに転移し、その分、元々のニュートリノが減ってしまうことが観測される可能性があります。

ところで、前述の論文中で使われたニュートリノ事象の平均エネルギーは、割合低いものでした。このため、ニュートリノが飛来する方向とミューゲー粒子の方向の角度相関はよくなく、ニュートリノが地球の反対側から上向きに飛んでも、ニュートリノ反応で生成されるミューゲー粒子の方向は下向きになつたりします。このため、もしニュートリノ振動によつて地球を通過してきたニュートリノだけが減つていたとしても、なかなかはつきりと観測しづらかったのです。

ニュートリノとミューゲー粒子との角度相関は、ニュートリノのエネルギーが高くなるとともによくなるので、下から来るニュートリノの数が減つていることは、もつと高エネルギーの大気ニュートリノ事象を解析すればよいはずです。

この考え方にもとづいて、高エネルギーニュートリノ事象の解析が行われました。その結果

飛来するニュートリノにだけ欠損が確認されたのです。

この頃から少しずつ、もしかしたらニュートリノ振動が観測されているのではないかという雰囲気が、世界の研究者間に出てきました。ただ、カミオカンデは測定器が充分な大きさではなかつたので、一〇年近く集めたデータを解析しても、充分な数のニュートリノ反応を観測できず、決定的とまではいたりませんでした。

スーパー・カミオカンデ ついにニュートリノ振動を証明

カミオカンデは、大気ニュートリノを調べてニュートリノ振動の兆候を観測しましたが、これらのニュートリノの観測頻度は何日かに一度という低いものでした。観測したニュートリノの数が少ないと、どうしても統計誤差が大きく決定的な結論が得られません。

限られた観測時間内で、より多くのニュートリノを観測するには、観測装置を大きくする以外に方法がありません。

このような理由で、カミオカンデよりはるかに大きいスーパー・カミオカンデが、強く望まれていました。カミオカンデで用いられた純水は三〇〇〇トンでしたが、スーパー・カミオカンデでは五万トン用いられています。この装置は一九九六年春に完成して以来、大量のニュートリノ観測データを提供しています。

スーパー・カミオカンデ（フロンティアレポート66ページ参照）は、大気ニュートリノ観測に対する有効体積でカミオカンデの約二〇倍大きいので、観測データの統計精度を上げるのは簡単です。むしろ、どれだけ信頼性のあるデータ解析ができるかが重要です。

データをとりはじめて約一年以上たつた

一九九七年夏頃から、少しずつ自信のあるデータが出せるようになりました。さあやがて、

ニュートリノ国際会議¹⁴⁾でのニュートリノ振動発見の発表となりました。

ニュートリノ振動が起こっていることをも

つとも明確に示すには、上から飛来するニュートリノと、下から（地球の裏側から）飛来するニュートリノの数を比べて、予想値どおりかどうか調べることです。もし、ミューゲー

トリノが振動してタウ・ニュートリノに変わるとすると、下から来るミューゲー・ニュートリノの数が減るはずです。したがつて、もし下から来るニュートリノの数が、上から来るものの数より少なければ、ニュートリノ振動の運動かぬ証拠となります。

このような考えに沿つて、ニュートリノ事象の天頂角分布が精密に調べられました。その結果を図9（18ページ）に示します。図9は、二〇〇一年までのスーパー・カミオカンデの観測データをまとめたものです。下からのミューゲー・ニュートリノ事象の数が、ほぼ半分になつていることが容易に確認できます。

下からのニュートリノのデータは、実験誤差では考えられない、大きい欠損を示しています。一九九八年のニュートリノのデータ量は図9の三分の一程度でしたが、図9のよう

な分布によつて、一九九八年六月にニュートリノ振動が受け入れられました。そしてこの観測から、一番重いニュートリノ（ v_3 ）の質量が求められました。

さて、この図で上向きミューゲー・ニュートリノ事象が、約半分にまで減つてているということに着目します。

先ほど、ニュートリノ振動によって別のニ

*15 ニュートリノ物理学・宇宙物理学国際会議は一九七二年に始まり、おおむね二年に一度開催されています。一九八八年に岐阜県高山で開催されたときには、海外から約二〇〇名を含め合計三百数十名が参加した。この会議での最大のトピックは、筆者がスーパー・カミオカンデ実験のデータをもとに報告した「ニュートリノ振動の発見」だった。

*16 スーパー・カミオカンデによる一九九八年の発見でニュートリノ振動の存在はまちがいないが二〇〇四年、さらにため押しが出された。それはスーパー・カミオカンデの大気ニュートリノの観測、引き続いて原子炉ニュートリノ振動実験のカムラン、それと長基線ニュートリノ振動実験¹⁷⁾である。これらの実験では、本文で説いてきたニュートリノの「うなり」を観測したのだ。すなわち、ニュートリノ振動により、最初存在していたミュー・ニュートリノ（カムランの場合には反電子ニュートリノ）が一度大きく減り、また距離とともに増えるこ

この場合、元々のニュートリノ（ミューニュートリノ）が別のニュートリノ（タウニュートリノ）に転移する確率が、飛行距離に応じて一〇〇パーセントになつたり、ゼロパーセントになつたりすることはすでに述べました。

もし、飛行距離が充分長くて、また、いろいろな飛行距離のニュートリノが飛んでくる場合を考えると、この場合は、平均してミュニートリノのままでいる確率は半分となり、半分のニュートリノはタウニュートリノになってしまいます。したがって、観測された下からのミュニニュートリノが予想の半分の数であつたということは、混合角が約45度であることを意味しています。これはクオーケン混合角とは違ひ非常に大きい値で、なぜこんなに違つのか、大きな謎として議論されています。

つぎつぎとつくられる新装置が
ニュートリノ振動を証明する
そして「常識」は変わった

現在までに、太陽ニュートリノの問題もニュートリノ振動であるということで解決しました。太陽中で生成された電子ニュートリノが、ミュニニュートリノに転移しているので

しかし、この問題の解決のためには三つの精密実験が必要でした。

ひとつはスーパーカミオカンデにおける太陽ニュートリノ観測でした。
もうひとつはカナダのSNOと呼ばれる実験でした。SNO実験は、水のかわりに重水を用いました。重水とは、水分子中にある水

素原子二個、酸素原子一個のうちの水素の原子核を、二個とも重水素原子核で置き換えた水です。重水を用いると、ふつうの水を使っている場合には観測できない反応が観測できます。とくに電子ニュートリノだけの数と、電子ニュートリノ、ミュニニュートリノ、タウニュートリノの合計数を、それぞれ求める

ことができるのです（図10）。もし電子ニュートリノがニュートリノ振動によって別のニュートリノに転移したとするとき、全ニュートリノ数は理論計算どおりだけれども、電子ニュートリノ数は計算より少ないという結果が得られるはずです。

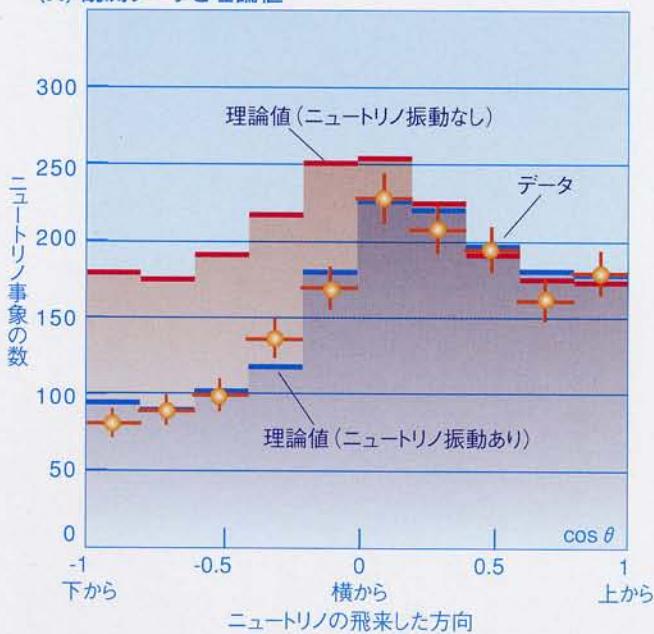
実際、観測はこの予想どおりとなりました。他の太陽ニュートリノの観測実験は、大雑把に言えば電子ニュートリノだけに感度がある実験だったので、太陽ニュートリノが減つて

*17 シーソー理論と呼ばれる小さいニュートリノの質量を説明する理説は、柳田勉（柳田勉）、ゲルマン（Gell-Mann, M.）、ラムンド（Lamond, R.）、スランスキ（Slansky, R.）によつて、一九七九年に発表された。

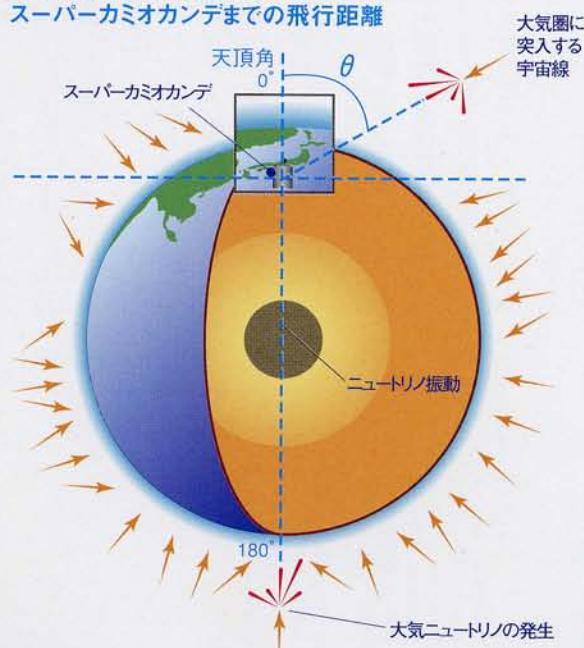
●図9 大気ニュートリノの天頂角による分布と飛行距離

(A) のグラフでは、下からのミュニニュートリノ事象の数がニュートリノ振動なしと仮定した理論値のほぼ半分になつてゐることが容易に確認できます。各データ点についている縦の棒が誤差棒と呼ばれるもので、実験データの数からくる誤差を示します。データの数が少ないと、この誤差棒が長くなつて誤差の大きいデータとなるわけです。グラフの横軸は、ニュートリノが飛来する方向を示します。ニュートリノは地球上の大気で生成されます。スーパーカミオカンデを中心としたとき天頂角 θ が変化するとニュートリノの飛行距離も変化します(B)。 θ が 0° のとき上空で生成されたニュートリノがスーパーカミオカンデに入り、 θ が 180° のとき地球の裏側で生成されたニュートリノがスーパーカミオカンデに入ります。

(A) 観測データと理論値



(B) 大気ニュートリノの発生と
スーパーカミオカンデまでの飛行距離



*18 クォーク間の混合角
ニュートリノの質量を説明するシーソー理論と呼ばれる小さいニュートリノの混合角 45° に対応するクォーク間の混合角は 24° である。

いるということはわかつても、その原因はつきとめられませんでした。重水は非常に高価な物質ですが、この実験はカナダ政府の全面的な支援を受け、カナダ政府から重水一〇〇〇トンを借りて行われています。

さらに、カミオカンデがその使命を終えたあと、その場所に新たに建設された実験装置カムランドが重要な役割を果たしています（フロンティアレポート70ページ参照）。

カムランドは太陽ニュートリノを観測しているのではなく、日本中の原子炉で核分裂エネルギーを用いた発電の際、自然に放出されている反電子ニュートリノを測定しています。

この装置は、一九五〇年代にニュートリノを発見した装置を巨大にしたような装置で、一〇〇〇トンの液体シンチレーターと呼ばれる発光物質を使っています。

地球と太陽間の距離に比べて、日本の原

子炉とカムランド間の距離は平均一八〇キロメートルと非常に短いため、このような実験で、太陽ニュートリノの観測に匹敵する研究ができるかと危惧される方もいるかと思いますが、実験をしてみると、ニュートリノ振動によって電子ニュートリノが減っていることが、見事に観測されました。

一九八六年頃に発表された「物質中でのニュートリノ振動の理論」では、混合角が小さくとも、太陽中で生成された電子ニュートリノが別のニュートリノに非常に高い確率で転移する場合があることが示され、これによつて太陽ニュートリノ問題をニュートリノ振動の可能性として、真剣に考えはじめるきっかけ

けとなりました。

この理論が示したニュートリノ振動の物質中でのふるまいは、いまでも正しく、実際このことを利用して、データの詳細な解析がなされています。ただ、太陽ニュートリノ実験やカムランド実験からわかつたことは、電子ニュートリノがかかるニュートリノ振動でも、混合角は大きいということでした。

太陽ニュートリノ問題をニュートリノ振動で説明しようとする試みは、混合角が小さいはずだという先入観と矛盾しない理論により、真剣に考えられはじめました。結局、太陽ニュートリノ問題はニュートリノ振動で解決しましたが、その結果は先入観どおりとうわけではありませんでした。

ニュートリノ観測で見える ビッグバン直後の世界

このようにニュートリノに質量があることがわかり、またデータの詳細な解析からニュートリノの質量の値もわかつてきました。ニュートリノの質量は、対応するクォークや荷電レプトンと比べると一〇桁以上小さいのです。

ところで、なぜニュートリノの質量の発見を重大であると思っているかといえば、ニュートリノの非常に小さい質量は、背後に非常に高エネルギーの世界の自然法則が隠されていると理論的に考えられているからです。^{*18} ニュートリノの質量とクオークの質量には

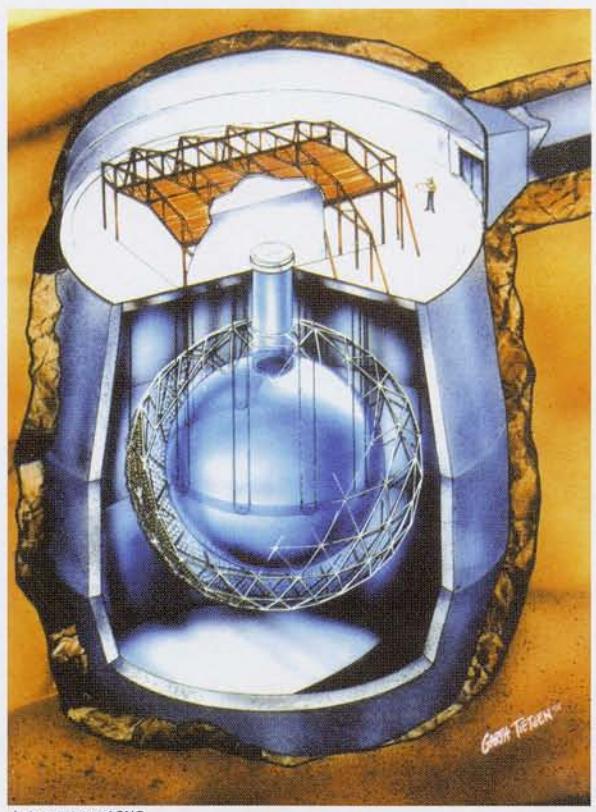


photo courtesy of SNO

●図 10 カナダの太陽ニュートリノ観測器 SNO

カナダのSNO 太陽ニュートリノ実験。中心部のフラスコのような容器の中に1000トンの重水が入っており、その内で太陽ニュートリノ反応が起こります。太陽ニュートリノ反応の結果出てきた電子などが放出するチerenコフ光を、まわりを取り囲む約1万本の光電子増倍管で観測します。

重水素原子核とは陽子1個と中性子1個が結合した原子核です。SNO 実験では重水素原子核とニュートリノの反応が2種類観測できます。ひとつは、電子ニュートリノが重水素原子核と反応して電子を放出し、重水素原子核は陽子2個になってばらばらになるものです。

もうひとつの反応は、ニュートリノが重水素原子核と反応して、重水素原子核が陽子と中性子にばらばらになる反応です。このときニュートリノはニュートリノのまま飛び去っていきます。最初の反応は電子ニュートリノだけしか起こらない反応ですが、この反応はすべてのニュートリノに共通に起ります。

という関係があると考えられています。ここで m_ν 、 m_q 、 m_N はそれぞれニュートリノの質量、クォークの質量、非常に重い未知の粒子の質量です。

^{*19} 相対性理論によれば、質量とエネルギーは等価です。つまり、この非常に重い粒子の質量と同程度のエネルギーのところに、まだわれわれがくわしく知らない、新しい物理の世界があると考えられます（図11）。

この考えに沿って、観測されたニュートリ

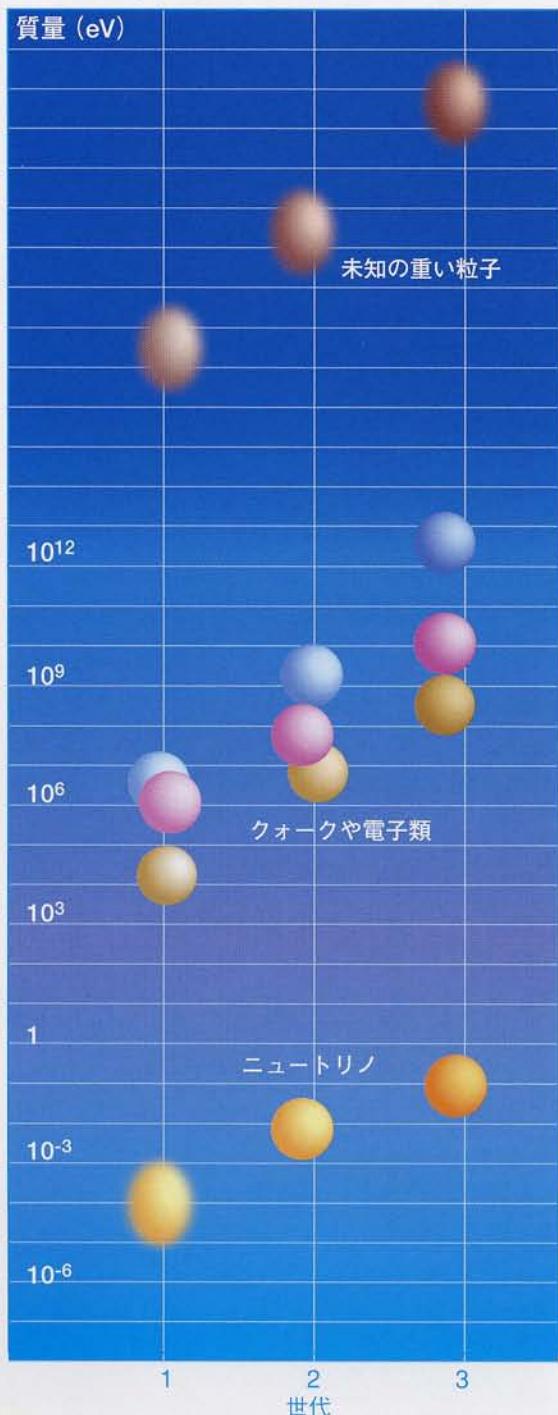
●図11 ニュートリノの小さい質量から見える重い未知の粒子

クォークの質量を支点として、重い未知の粒子の質量が重くなるほど、ニュートリノの質量は軽くなります。非常に重い未知の粒子と、ニュートリノ、クォークの質量との関係式は

$$m_\nu / m_q = m_q / m_N$$

となります。

この式によりニュートリノの質量 (m_ν) がクォークの質量 (m_q) に比べ小さければ小さいほど未知の粒子の質量 (m_N) が重くなることになります。



ギースケールに近いことがわかります。^{*20}

おそらくニュートリノ質量の物理は、大統一理論の情報をわれわれに与えてくれているのでしょう。このような背景があるた

め、ニュートリノの質量の発見は大きな興奮をもつて受けとめられたのです。ニュートリノの質量と、それに関連する物理量（たとえば混合角など）は、われわれに大統一理論の世界の情報を運んできているのかもしれません。

たとえば予想されていなかつたニュートリノ間の大きな混合角は、きっとより深く大統一理論の世界を理解するための、何かのヒントになつていています。そして最後に、われわれが大統一理論の世界の自然法則を知れば、それはビッグバンで宇宙が始まつた直後の世界を、よりくわしく知ることになるは

です。

ところで、宇宙はふつうの原子などではなく、その質量の大部 分を占めていることが知られています。これらは光では見えない物質なので、ダークマター（暗黒物質）と呼ばれています。この宇宙に存在するニュートリノの数は陽子や電子と比べるとかに多いので、もし、ニュートリノに小さい質量があれば、それはダークマターの候補となるのではないかと考えられていました。

しかし、観測されたニュートリノの質量は、ダークマターとして宇宙の見えない質量を説明するには小さすぎました。このほかにもいろいろな理由があり、現在では、ニュートリノとは違う未知の重い粒子がこの宇宙に漂つていて、それがダークマターとなつていると考えられています。この未知の粒子を探す試

*19 一九〇五年に、アインシュタインによって発表された理論。
*20 本誌オピオン47ページ図2参照。
*21 例として、ニュートリノが宇宙の見えない質量を説明できるほどの大きな質量をもつていたとすると、宇宙空間の銀河分布は現実に観測されているようにならないことなどがある。

*22 ビッグバン直後の超高温の宇宙では物質、反物質の区別なく、すべての粒子が同数存在したと考えられている。

みも、世界中でいろいろ進められています。

になっているはずです。

宇宙はなぜ物質でできていて

反物質はないのか？

宇宙の謎にニュートリノで挑む

い今まで、大気ニュートリノを使って調べられてきたミュニニュートリノのニュートリノ振動は、今後は加速器を用いた実験にだんだん取つて代わられるでしょう。この方法による世界初の実験が、いま、日本で行われています。また、つぎの実験がアメリカ、ヨーロッパ、日本で準備中です。これらの実験についてはフロンティアレポートを参照してください。

さらに、これらのニュートリノ振動実験のつぎの段階の実験をどうすべきかについて、いま、世界中で活発に議論されています。いまの議論の中心は、ニュートリノ振動を非常に精密に測定して、ニュートリノのニュートリノ振動と反ニュートリノのニュートリノ振動に、わずかな違いがあることを発見しようといふのです。この発見には、どのような実験をするのがもっとよいかを議論しているのです。

では、なぜこのような議論をしているのでしょうか？ 宇宙がビッグバンの超高温の状態で始まつたときは、物質も反物質も同数あつたはずです。その宇宙が冷えてきたときに、物質だけが残つて宇宙ができたのです。

ところが、自然法則が物質と反物質で完全に同じならば、この宇宙に現在物質だけが残る理由がないので、この宇宙は何もない宇宙

自然法則の現れ方に違があるはずです。実際、この違いはクォークと反クォークにあることが確認されているのですが、理論的な研究から、クォークと反クォークにおける違いだけでは、いまの宇宙の物質量を説明できないだろうと結論されています。するとどこかほかに、物質と反物質に対する自然法則の違いを探さねばなりません。

そして、いま有力と思われているのがニュートリノです。もしニュートリノのニュートリノ振動と、反ニュートリノのニュートリノ振動に違いがあれば、それは物質に対する自然法則と反物質に対する自然法則がわずかに違うことを意味します。

ただ、これを検証する実験は今までの実験より、さらに大規模なものになり、また世界的共同実験になるでしょう。この実験で使用されるニュートリノ測定器は、ハイパークミオカンデなどと呼ばれ、スーパーカミオカンデを小さいと感じるほどの巨大なものになります。

最後に、ニュートリノ振動が教えてくれる物理の大切さのため、世界中の研究者がこの問題に真剣に取り組んでいること、そしてこれららの研究の芽の多くが日本から出たことを理解していただければ幸いです。

また、われわれ日本の研究者は、今後もこの分野で世界の研究をリードしていくたいと考えています。

(かじた たかあき)

Detecting Neutrino Oscillation:

The Long Road to the Discovery of Neutrino Mass

by Takaaki KAJITA, Director, Research Center for Cosmic Neutrinos, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo

In 1998 Professor Kajita, a member of the group of scientists conducting the Super-Kamiokande Experiments and a long-time neutrino observer, reported to the world the discovery of neutrino oscillation in observations of atmospheric neutrinos. Neutrinos are particles postulated by Wolfgang Pauli in 1930 to explain the observation that energy conservation seems to be violated during nuclear beta decay. Neutrinos were found to actually exist when in the 1950s, Fred Reines and Clyde Cowan detected signals of particles that are produced by neutrino interactions. They used a nuclear power reactor as a strong neutrino source. More recently, scientists discovered that neutrinos have masses that are almost incomparably tiny compared with those of other elementary particles.

Neutrinos appear in one of three types—electron neutrinos, muon neutrinos, and tau neutrinos, and scientists predicted that if neutrinos did indeed have mass, neutrino oscillation would occur. According to quantum mechanics, none of these neutrino types has a fixed mass; rather, their masses tend to appear as a superposition of two or three different masses. The term *mixing angle* is used as the physical value for expressing this superposition of masses. A large mixing angle means a high probability that a given neutrino type will transform into a different neutrino type—i.e., that it will *oscillate*.

Raymond Davis Jr. and his collaborators started the first experiment to detect solar neutrinos in the late 1960s. This experiment discovered that the number of electron neutrinos actually detected was only about one-third of the theoretically predicted number based on the standard model of the Sun. This discrepancy, which caused major consternation at the time, became known as the “solar neutrino puzzle”

(also called the “solar neutrino problem”). In 1989, observations using the Kamiokande detector confirmed that the number of solar neutrinos reaching the Earth was indeed lower than that the theory had predicted.

Kamiokande also detected a deficiency in muon neutrinos created by cosmic ray interactions in the atmosphere, compared with predicted levels. Observations were continued using Super-Kamiokande, and it was shown that the number of muon neutrinos reaching the detector from the other side of the Earth is about half of that which theory predicted, proving that neutrinos oscillate and therefore have tiny masses.

Furthermore, observations carried out at Super-Kamiokande, SNO in Canada, and KamLAND in Japan (an observatory for detecting neutrinos generated in commercial nuclear power reactors) have yielded results that demonstrate that electron neutrinos change into other types of neutrinos on their way from the neutrino source to the detector, settling the long-standing solar neutrino problem.

Numerical values for neutrino masses have also been deduced from the observational data, and it has been shown that they are over ten orders of magnitude smaller than the masses of the corresponding quarks or charged leptons.

Theoretically, the extremely small masses of neutrinos could be regarded as a pointer to natural laws pertaining to the realm of extremely high energy, or equivalently of extremely small scale, and they may be providing us with clues to a grand unified theory(GUT) of the forces in nature. Consequently, the study of neutrinos should bring us closer to an understanding of the universe immediately after its birth with the Big Bang.