

ニュートリノ振動の大角度混合がもたらした衝撃

1. 原子、電子、質量

日常的に私たちが接する物質は、すべて原子からできています。ひとくちに原子といっても、100種類ほどの性質の違った原子があって、その種類ごとに、水素、ヘリウム、炭素、酸素、鉄、銅、銀、金、セシウム、ウラン、などといった名前がつけられています。どの種類の原子も、図1のように、「陽子と中性子がギュッとかたまりあってできた原子核の周りを、電子が飛び回っている」、という姿をしています。炭素、水素、鉄、という各種の原子の性質の違いは、陽子の数の違いだけから来ていることが分かっています。そして、いろいろな物質の化学変化や、超伝導といった物質の性質は、これらの原子、原子核や電子の性質、とくに、陽子がプラスの電気を持ち、電子がマイナスの電気を持つ、という性質から出発して、理解することができます。

それでは、なぜ、陽子や中性子は小さくギュッと固まりあう一方で、電子はその周りを飛び回る、という振る舞いを示すのでしょうか？ 実際のところ、陽子や中性子が構成する原子核の半径は、電子の行動半径に比べて、5桁ほど小さいのです。原子核を1 cmの大きさに拡大すると、電子の行動範囲は1 kmになります。この大きな差はどこから来るのでしょうか？

1934年の湯川秀樹による中間子論は、数多くの陽

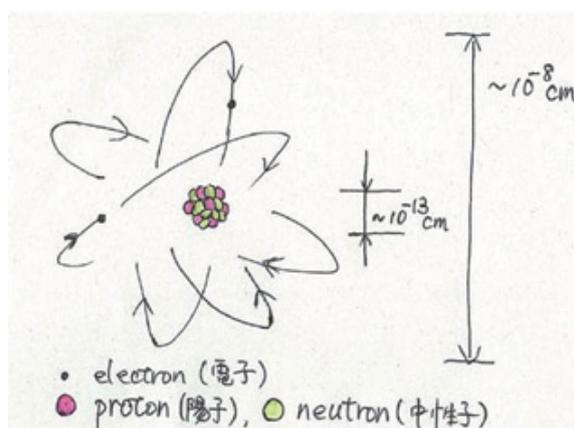
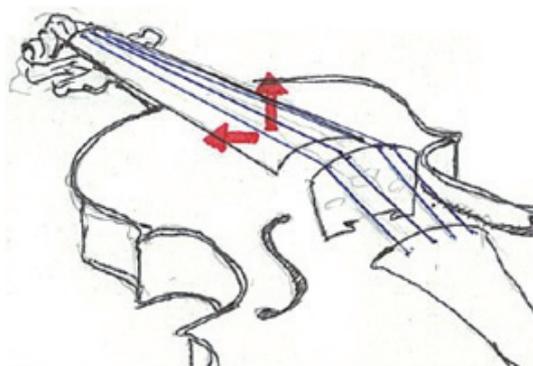


図1 「原子とそこにある原子核」のイメージ図。原子の全体の大きさに比べて、原子核の大きさを、この絵では10分の1くらいに描いてありますが、実際には10万分の1くらいの大きさです。

子や中性子からなる原子核がギュッと固まっていられる仕組みを、量子力学の枠内で見つけようとするものでした。「ギュッと固まっていられるためには、当時はまだ未発見の新粒子があればよい、そして、原子核の固まるサイズは、新粒子の質量によって決まる」、ということを中間子論は主張したのです。原子核の半径が電子の行動半径の5桁も小さくなるためには、新粒子の質量は電子の200倍ほどのはずだ、と予想されました。¹

¹なぜ中間子の質量は電子の質量の5桁上、ではなく2桁上、なのかというと、「電磁気力の強さ」の値も、原子核の半径と電子の行動半径の比率に関わっているからです。

図2 海面の波は、海面の各点での「波面の高さ」という1つの数値で表されますが、バイオリンの弦の動きは、弦の上の各点で、「図中の赤色矢印の2方向への位置（ずれ）」からなる、2つの数値で表されます。すなわち2自由度の波で表されます。



2. ミュー粒子の発見、「だれがこんなもの頼んだのだ!？」

中間子論の正しさを立証するには、そのような新しい粒子—中間子と呼ぶ—が存在することを実証するのが正攻法です。中間子を実験室で作り出すのは、当時の実験技術では困難だったのですが、大気の上から降ってくる高いエネルギーの粒子の中には、中間子が含まれているかも、という期待が持てました。そのため、大気中を降ってくる高速粒子の性質を観測する実験が1930年代後半に行われました。Anderson-Neddermeyer, Street-Stevenson、そして仁科芳雄らによる実験は、不思議なことに、中間子の予言された質量とほぼ同じくらいの質量の、しかし、中間子とは異なる性質を持った新しい粒子を発見してしまったのです。その後、中間子そのものも、観測実験の中でめでたく発見されるのですが、この予想外の新しい粒子には、とりあえずミュー粒子、と名前をつけてみたものの、当時の研究者はみな困惑させられました。ミュー粒子は、電気量などの性質が、電子と全く同じ。ただ、質量だけが電子と違う。なぜこんな粒子が存在しなければならないのか、何の「役に立つ」のか、全く分からない。ノーベル物理学賞を受賞した研究者、I. Rabi は、「Who ordered that?」という言葉を残しました。「誰

² 我々の自然界にこのミュー粒子が存在するという事実と、我々の宇宙には反物質がほとんど残っていないという事実の間には、実は、密接な関係がある可能性があります。ただ、それをもって Rabi の問いに対する答であると言うのが適切か否かは、議論の余地があります。

がこんなもの頼んだのだ??」といった感じでしょうか。

この単純過ぎるほどの問い、現代の素粒子物理学においても、答えがまったくわかっていないのです。²

3. 波の「高さ」とは何か?

「光=電磁波」のふるまいは、電場と磁場の波に対する方程式によって決まっていますが、電子、陽子、といった粒子のふるまいも、同様に、電子の波、陽子の波、といったものに対する方程式によって決まっています。その方程式を与えてくれるのが、量子力学です。

ミュー粒子という新たな粒子が「なぜ存在するのか」、という問いは当面脇においておくとしても、少なくとも、素粒子たちの振る舞いを記述するのに、「ミュー粒子の波」というものを新たに導入しなければならないことは確かです。これらの、「電磁場の波」、「電子の波」、「陽子の波」、「ミュー粒子の波」、..とはいったい何者なのでしょう?

「海の波」ならば、話は簡単です。海面の各点で、その時刻、海面の高さが平均海面から大きくずれているほど、海の波が高い/低い、ということにあたります。また、種類の違う波が複数ある状況も、さほど違和感はないでしょう。「バイオリンの弦の波」では、図2にあるように、弦の通常的位置から2方向へのずれを2種類の波の高さとして捉えることができます。バイ

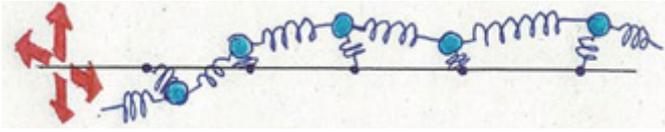


図3-1 バイオリンの弦の動きを再現する力学模型。錘(水色の玉)が赤色矢印の2方向に動けますが、各々の錘は、各自の通常安定位置にバネでつながっていて、かつ、隣接する錘の間もバネでつながっています。

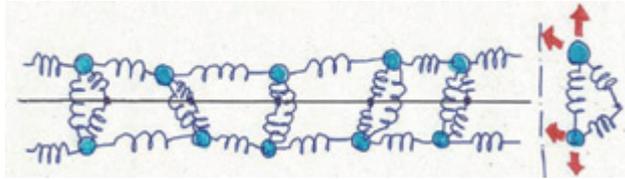


図3-2 もう少し複雑な力学模型。各点に載っている力学系が、錘2つとバネ3つからなるもの(図の右端)に置き換えられています。この各点の力学系の配位は「赤矢印で示した4つの動き(数値)」で表されるので、これを4自由度の力学系、と言います。力学模型全体のふるまいは、4種類の波を用いて記述されます。

オリンの弦がどちらの方向に揺れているかによって、いくらか音色(つまり種類)がちがう、のだそうです。

もう少し複雑な例を考えるための準備として、バイオリンの弦の振る舞いは、図3-1のような力学模型で再現することができる、ということをおさえておきましょう。錘の一つをつまんで「通常的位置」からずらして、手を離せば、ばねを通じて、錘の「2種類(2方向)の通常位置からのずれ」が、空間(横軸)方向に広がって伝わっていきます。では、次に、この模型をもう少し複雑にして、図3-2の模型を考えるとどうでしょう? 空間(横軸)の各点に、ある決まった力学系が載っていて、それが互いにつながっている、という仕組みになっています。その空間各点に載っている力学系について、「安定配位からのずれ=通常位置からのずれ」をあらわすには、複数の数値を用いねばなりません。図3-2の模型の場合、4つの数値が必要なので、この模型の振る舞いは、複数の波を用いて記述されます。このような模型の量子力学版を、場の量子論といいます。

現在のところ、場の量子論に、「空間の各点に載っている複雑な力学系」についていくつかの性質を仮定しさえすれば、電子や電磁場、ミュオンなどの素粒子の振る舞いについての既存の実験結果を非常によく説明する、ということが分かっています。標準模型、

と呼ばれる場の量子論の模型では、電子、ミュオン、といった粒子=波が45種類、電磁波とそれに似た性質をもつ波が12種類、そしてヒッグス場、と呼ばれる波が1種類、あわせて58種類の波を用います。ですから、乱暴に言ってしまうと、我々の宇宙では、「空間の各点に58の自由度がある力学系が載っていて、それが隣接各点の力学系とつながっている(図3のように)」というのが素粒子の世界の姿だということになります。

ですから、この場の量子論の言葉を用いれば、「なぜミュオンという粒子が我々の世界の記述に必要なのか」という問いは、「なぜ空間各点の上に載っている力学系はそんなに複雑(多自由度)なのか」という問いに置き換えられます。ただ、その難問に挑む前に、「我々の世界の記述を与えている、空間各点の力学系の正体は何者なのか」を問うのが正攻法でありましょう。確実なのは、図3-2の絵にあるような力学系よりは相当に複雑なことです。58も自由度があるのですから! そして、その問いに挑むには、「その力学系について、何を我々は自然(実験)から学べるのか」を整理するところから始める必要があります。力学系の「自由度の数」、だけではなく、より多くの情報を引き出したい。どのような実験から、何を学べるのでしょうか?

図4-1 中性子の崩壊。中性子はu型のクォーク1つとd型のクォーク2つが絡み合っている状態、と現在では理解されています。同様に、陽子は、u型のクォーク2つとd型のクォーク1つが絡み合った状態と理解されています。単独で存在する中性子は、陽子と電子とニュートリノの3つの粒子に自然に崩壊します。(图中、崩壊反応は図の左から右へと進みます。) その反応は、本質的には、クォークと電子、ニュートリノの間の相互作用です。

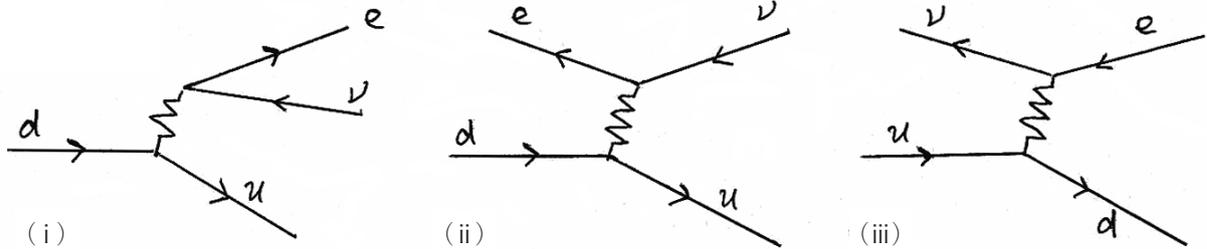
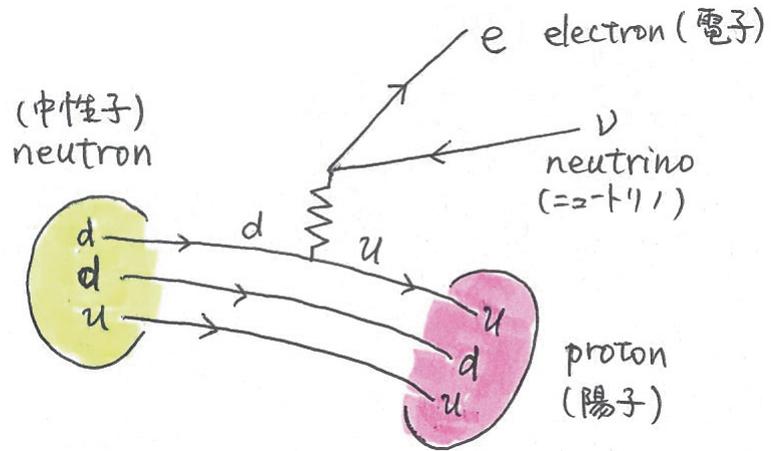


図4-2 (i) は、中性子の崩壊反応(図4-1)のうち、反応に直接関与しているクォークのみを取り出したものです。(ii)では、(i)の反応のように反応後に電子が出てくる代わりに、電子の反粒子が反応後になくなる反応を描いています。(iii)の反応は、(ii)の反応での時間の進み具合を逆向きにしたものです。いずれも、反応は図の左側から右側へと進みます。自然界では、(i)の反応だけでなく、(ii)や(iii)の反応も起きることが知られています。この弱い相互作用とは、(ii)、(iii)で分かるように、「パパ抜き」のようなもので、例えば(ii)の反応の場合、「パパ」を貰い受けると色が変わります(d型がu型に転換する)が、同時に、「パパ」を他の人に渡してホッとしている人もいます(電子の反粒子がニュートリノの反粒子に転換)。粒子間をつなぐギザギザは、パパの受け渡しを表します。

4. 弱い相互作用とニュートリノ

単独で存在する中性子は、放っておくと安定ではなく、数分くらいで、陽子と陽電子(電子の反粒子)とニュートリノという3つの粒子に崩壊することが知られています。さらに、中性子や陽子は、クォークと呼ばれる、より小さな粒子の結合状態であることも知られています。中性子の崩壊現象は、図4-1のような2種類のクォーク、電子、ニュートリノの間の相互作用に由来するもの、というのが、現在の素粒子物理での理解です。また、図4-1(あるいは図4-2(i))の相互作

用だけでなく、図4-2(ii)、(iii)などの相互作用も同時に存在することが分かっています。

ニュートリノという粒子は、電気量を持たず、この弱い相互作用のみを通じて他の粒子と力を及ぼしあいます。このことは、ニュートリノという粒子を検出するためには、弱い相互作用を用いなければならない、ということも意味します。実際、中性子の崩壊で出てきたニュートリノを初めて検出したのは、図4-3のように逆反応を利用した、1959年のReines-Cowanの実験でした。

さて、2節で、ミュー粒子という、電子と(質量は

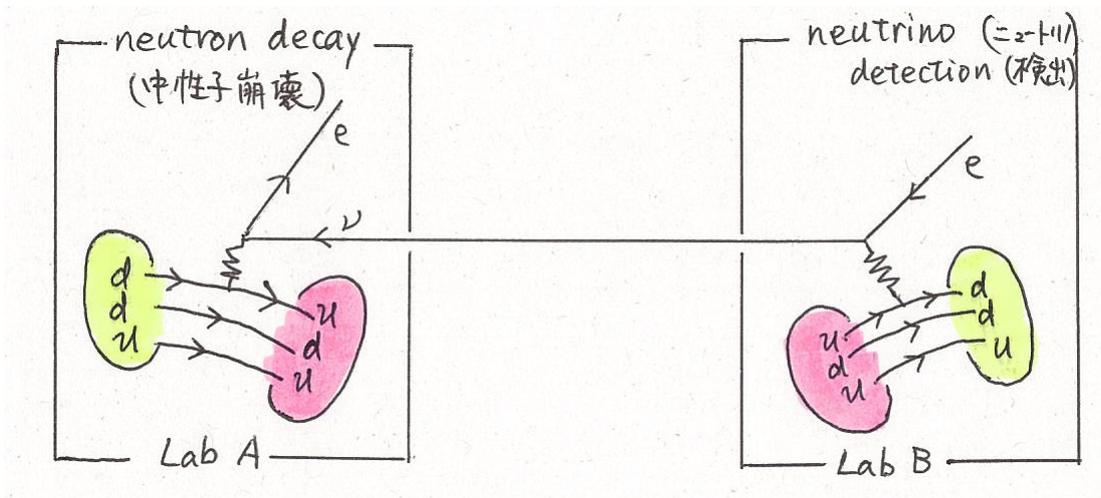


図4-3 中性子の崩壊で作られたニュートリノ（左側の実験室A）の存在を確かめるためには、もう一つの実験室（右側の実験室B）で逆反応を起こさせ、中性子（黄色）と電子の反粒子を検出します。ニュートリノの検出実験は、多くの場合にはこのような形をとっていて、弱い相互作用で転換された（ババをもらった）後の、電気をもった粒子を観測しています。

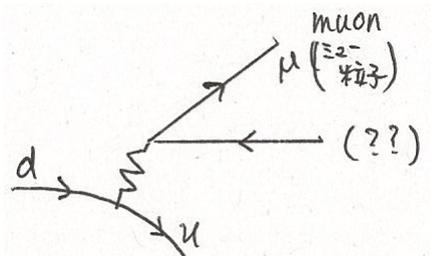


図4-4 図4-1と同様な反応で、電子のかわりにミュー粒子が出てくることも可能です。その際、図中、(??)で記したもう一つの粒子が反応後に出てきます。中性子の崩壊のときと同様、この(??)の粒子は、電気量を持っていません。

違うものの) 全く同じ力の及ぼし方、反応の仕方をする粒子が存在する、ということ述べました。力の及ぼし方が同じ、という点では、弱い相互作用も例外ではない、ということが現在は分かっています。すなわち、ミュー粒子が弱い相互作用をすれば、電子のときと同様、電気量を持たず、弱い相互作用のみをする粒子が出てくるのです(図4-4)。

ミュー粒子の弱い相互作用に伴って出てくる粒子と、電子の弱い相互作用で出てくる粒子（ニュートリノ）は、別の粒子である、ということが1962年の実験で示されました。ミュー粒子から出てくる粒子を図4-3のように原子核に当てても、電子が逆反応を通じ

て出てきたりは（必ずしも）しないことが分かったのです。この実験事実からすると、3節で述べた場の量子論の言葉では、空間各点の上に載っている力学系には、電子とミュー粒子に対応する自由度だけでなく、電気量を持たず弱い相互作用のみをする自由度もまた、2つ分ある、ということになります。現在では、これら両方の自由度をまとめて、ニュートリノと呼んでいます。

5. ニュートリノ振動と混合角

電子の弱い相互作用で出てきたニュートリノは、弱い相互作用で必ず電子に戻り、ミュー粒子の弱い相互作用で出てきたニュートリノは必ずミュー粒子に戻るか、といいますと、現実にはそうではありません。電子から出てきたニュートリノは、電子に戻ることもあ

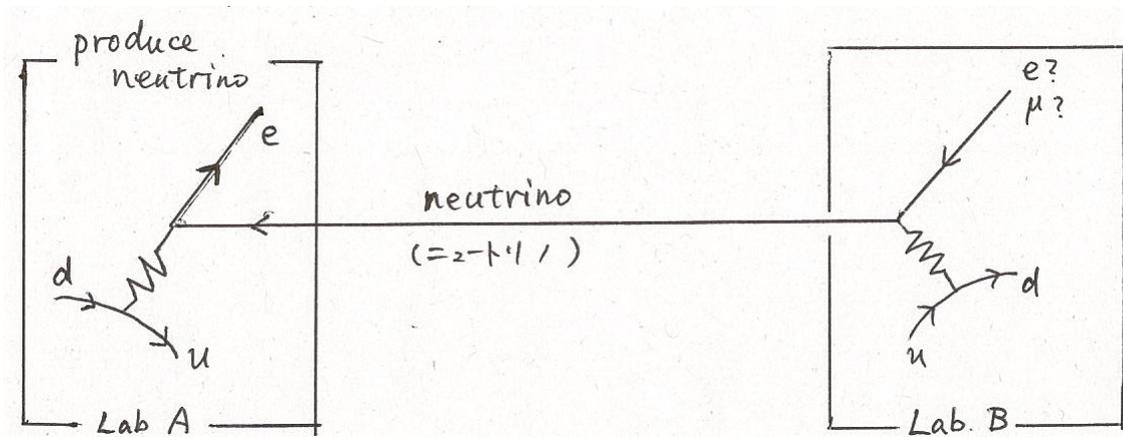


図5 ニュートリノ振動実験。実験室Aで、電子とともに作られたニュートリノの反粒子を、遠く離れた実験室Bで検出します。ニュートリノのもつエネルギーや、2つの実験室の間の距離によっては、実験室Bで弱い相互作用の反応によって出てくるのは電子の反粒子だったり、ミュー粒子の反粒子だったりします。この現象をニュートリノ振動と言います。

りますが、時にはミュー粒子になることもあります（十分にエネルギーが高ければ）。図5を参照して下さい。帽子にウサギを入れたら、鳩になって出てくることもある!! この現象を、学術的には、ニュートリノ振動と呼んでいます。（IPMU News No.15, 28-33ページ参照。）

（おそらくは）全ての手品に種や仕掛けがあるように、この現象も簡単に説明がつきます。図6-1の力学系を考えてみましょう。楕円形のお皿の上に、ビー玉を置いて、手を離す。ビー玉は図6-2のような軌跡を描くはずですが、時間が経つにつれ、ビー玉の振動方向が変わっていきます。この図6-2を回転させて、最初にビー玉が投入された方向を横軸に、その直交方向を縦軸にとって図示すると図6-3、このビー玉の横方向の位置、縦方向の位置の時間変化をグラフにすると図6-4になります。時間の経過とともに横方向の動きが減って、縦方向の動きが増えてきますね? このビー玉

の動きは、ニュートリノの2自由度分の波の時間変化を表し、そのうち、横方向への波の振幅が、弱い相互作用を通じて電子に戻る成分、縦方向への波の振幅が、ミュー粒子に転換する成分、となるのです。

この振動現象の本質は、「1. お皿が楕円形であること」、そして「2. ビー玉を投入した方向が、楕円の長軸方向でも短軸方向でもなく、斜めだったこと」の2点です。このうち1点目は、専門用語では、「ニュートリノには質量があり、かつ、その値が異なる」ことにあたります。そして、2点目を、「混合角がゼロではない」と表現します。混合角とは、図6-2と図6-3の間の回転角度のことです。

6. 大角度混合の衝撃、そして...

3節で述べたように、現在の素粒子物理の理解では、



図6-1 楕円形の皿の上でビー玉を転がす。

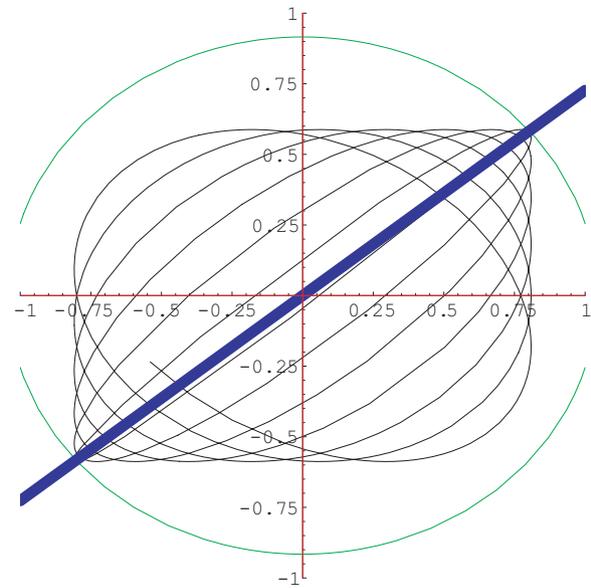


図6-2 楕円形の皿の上でのビー玉の動き。緑色の曲線が楕円形を表し、赤線が楕円の長軸、短軸にあたります。最初に青の線の上の右上の点から玉を放すと、黒の曲線の上を動きます。

少なくない数の粒子（自由度）を導入して、素粒子反応の記述をせざるを得ません。その粒子の数が、2、3個などではなく、50個を超えるのだとすれば、より微視的かつ基礎的（単純）な記述が存在するのではないか、と考えるのは自然なことでしょう。100種類を超える原子の存在が、「陽子、中性子、電子というたった3つの構成要素と量子力学という1つの理論」だけから導かれるように。

元素の周期律の発見を以って、量子力学の発見の前段階の分類学とするならば、たくさんある標準模型の素粒子にも、分類学を導入できないかと試みるのは自然な発想です。素粒子の質量の値を用いて、軽い素粒子、中くらいの重さの素粒子、重い素粒子、と3分類して、それぞれ、第1世代、第2世代、第3世代、という名前をつける。この「世代」による分類学が、何らかの意味をもっているだろう、と多くの研究者は考えていたのです。ただし、ニュートリノ振動現象が発見される前までは、もう少し詳しく説明すると、

ニュートリノ振動の発見以前には、図6-3の青線の軸（電子とミュオン粒子）に対して、赤線の2つの軸（ニュートリノの質量の軸）はほとんどずれていないだろう、と多くの研究者が想像していたのです。そして、その質量軸の方向が似ている粒子同士を集めて、ひとつの「世代」として分類していたのです。だから、弱い相互作用によってニュートリノが電子やミュオン粒子に転換したり、逆に電子やミュオン粒子がニュートリノに転換したりしても、同じ「世代=質量軸の方向」の中にとどまったまま、姿をかえていただけだろうと考えていたのです。それならば、分類学に意味があろうというものです。

しかし、ここ数十年の間に飛躍的進展を遂げたニュートリノ振動の実験は、図6-3にあるくらいに、赤線の軸と青線の軸がまったく違う方向にある、ということを示していました。すなわち、混合角は大きいのです。これは、「『世代』という概念の下での素粒子の分類学が、少なくともある程度は破綻している」、

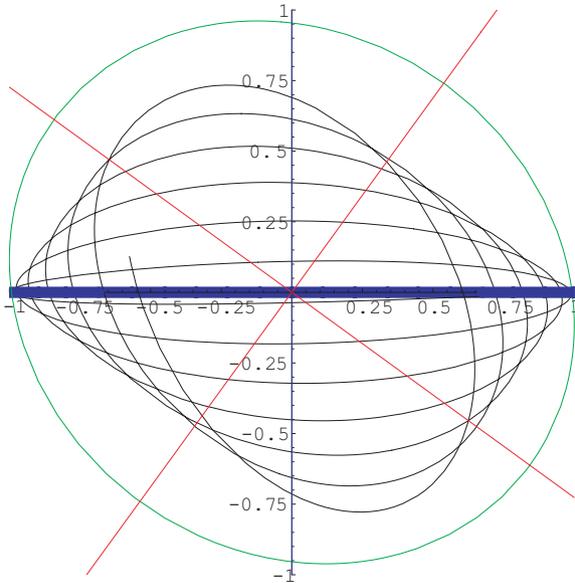


図6-3 図6-2を回転させて、青線を水平になるようにしたもの。当初は水平方向に黒の曲線が動くが、次第に縦方向の動きが出てきます。

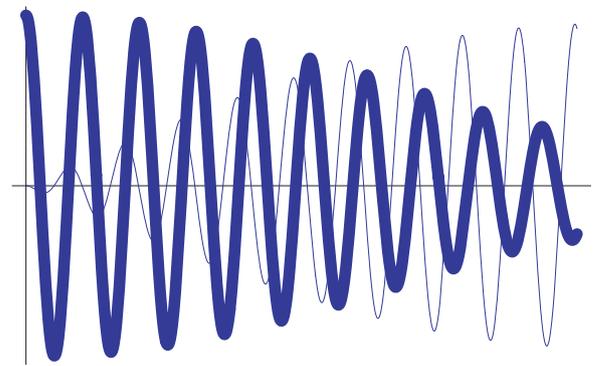


図6-4 横方向の動き(太線)と縦方向の動き(細線)に分解して、それらを時間の関数として図示したもの。

ということを意味しています。もしウサギが鳩に容易に化けられるなら、哺乳類と鳥類という分類学は無意味ですよ？一から考え直さざるを得ないのです！

素粒子の正体についてのより基礎的な理解を得るには、今後、どのように進めばよいのでしょうか？現代の素粒子物理の研究者は、この問題について模索を続けています。ここまでの数ページが過去数十年の素粒子物理の進展をカバーしているのですから、次の1ページを書くのにも10年かかると覚悟すべきなのでしょう。そうであっても、前向きに次の一步を模索するのが研究者というものです。

3節の終わりに、標準模型の記述では、空間各点の上に力学系が載っている、その「複雑な力学系の正体は何か？」という問いを設定しました。「我々とは何か？」という哲学的問いを突き詰めれば、ここにたどり着くのです。この問いに対して、超弦理論が示唆するのは、「空間各点に載っている複雑な力学系の正体は、既存の実験では見る事ができていないほどに小

さな6次元の空間である」、という考え方です。この超弦理論からの示唆を裏付けるような実験結果が現時点であるわけではありませんが、間違っていると暗示する結果があるわけでもありません。ならば、このような考え方を導入して、思考に枠をはめてみて、その中で知的冒険を試みる、というのは、理論研究の一形態として成立し得ます。

そこでは、空間の幾何に関する数学から、「実現可能な力学系」に対して制約が得られることを期待できます。素粒子物理が幾何学に出会うとき、場の量子論には内在していなかった何かを見つけることができなにか。それが「我々とは何か」という問いに答えることに役立たないか。そのようなことを、私自身はここ数年の研究の中で試みています。