



研究ノート

2枚の鏡の向こう側

山中 卓*

The other side of two mirrors

Key Word : CP violation, kaon, symmetry, decay

鏡をのぞき込むと、その向こう側には別の世界が広がっている。こちら側の世界と同じように、向こう側にもこちらをのぞき込んでいる人がいて、後ろに木があり、空が広がっている。しかし、よくよく見ると、字が反転している、人の心臓が右にある、左巻きのネジが圧倒的に多いなど、実はこちらとは違う世界であることに気づく。これは、字や人体やネジが左右対称では無いからである。しかし、2枚の鏡を並べると、鏡で2回反射した像はこちら側の世界と全く同じに見えるので、こちらの世界とは区別がつかない。

では、もっと基本的なもの、たとえば自然界を支配する4つの力を見てみよう。重力で引き合う二つの物、たとえばナシと地球を、鏡をとおしてみても、その間に働く力は二つの質量と、その間の距離に依るという法則はそのまま当てはまるので、何ら不思議には見えない。これは、重力という力が左右対称なためである。この事は、電磁気力や、陽子などを構成するクォークとクォークを結びつけている「強い力」にも当てはまる。

しかし、中性子が陽子と電子と反ニュートリノに壊れるときなどに働く、「弱い力」になると、事は一変する。このときに出てくる反ニュートリノのスピンは右巻き(粒子が回転しながら進む様子をイメージしてもらえればよい)である。しかし、図1に示すように、鏡をとおして同じ中性子が壊れる現象を

ながめると、右巻きのネジが左巻きのネジに見えるように、反ニュートリノが左巻きのスピンを持っているように見える。しかし、今までに左巻きの反ニュートリノは見つかっていない。だから(反)ニュートリノを見れば、それがこの世界なのか、鏡の向こう側の世界なのか、言い当てることができる。これは、「弱い力」が左右対称ではないからである。

さて、物質を構成する素粒子には、質量は同じだが、電荷などの性質が逆の反粒子というものがある。たとえば、電子に対しては、電荷が+の陽電子、陽子に対しては電荷が-の反陽子、クォークに対しては反クォーク、ニュートリノに対しては反ニュートリノ、といった具合である。

では、ここでちょっと不思議な鏡を考えてみよう。この鏡をとおして見ると、左右はそのままだが、粒子と反粒子がひっくり返って見える。たとえば、電

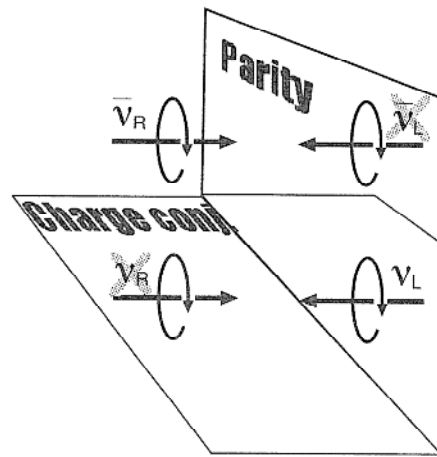


図1 右巻きの反ニュートリノ($\bar{\nu}_R$)は、ふつうの鏡に映すと、自然界に存在しない左巻きの反ニュートリノ($\bar{\nu}_L$)に見える。また、 $\bar{\nu}_R$ をCharge Conj.と書かれた、粒子と反粒子を入れ替える鏡に映すと、これもまた自然界に存在しない右巻きのニュートリノ(ν_R)に見える。しかし、両者の鏡をとおして見ると、左巻きのニュートリノ(ν_L)に見え、これは自然界に存在する。

*Taku YAMANAKA
 1957年4月7日生
 1985年東京大学大学院理学系研究科・博士課程物理卒業
 現在、大阪大学・大学院・理学研究科・物理学科・長島研究室、助教授、理学博士、高エネルギー物理学
 TEL 06-6850-5357
 FAX 06-6850-5532
 E-Mail taku@hep.sci.osaka-u.ac.jp



子と電子が負の電荷どうしで反発しあっている様子は、この鏡をとおすと陽電子と陽電子が正の電荷どうしで反発しているように見えるが、これはこの世の中でも起こることなので、何ら不思議に見えない。これは、電磁力が粒子・反粒子の入れ替えに対して対称なためであり、これは他の重力、強い力、にも当てはまる。

ところが、「弱い力」の場合には、これまたおかしな事になる。先ほどの中性子の壊れる反応を、粒子・反粒子をひっくり返す鏡に映して見ると(図1参照)、反中性子が反陽子と陽電子と右巻きのニュートリノに壊れるように見える。しかし、右巻きのニュートリノというのも今まで見つかっていないので、こちら側の世界ではないことがすぐわかる。つまり、「弱い力」は粒子・反粒子の入れ替えに対して対称ではない。

しかし、ふつうの鏡と、粒子・反粒子をひっくり返す鏡の二つをとおしてながめると、「弱い力」の働いている様子は、こちらの世界とほとんど変わらなく見える。ただし、この「ほとんど」というのがくせ者で、実はこの対称性も少し破れていることが1964年に中性のK中間子の崩壊で発見された。これは、C(粒子・反粒子を入れ替えるCharge conjugation)とP(左右を入れ替えるParity transformation)の二つの鏡を合わせても見える破れなので、CPの破れという。

CPの破れを起こすメカニズムとして、様々な理論が提唱されてきたが、現在まで生き残って来た主な理論は二つある。一つは超弱モデルと呼ばれる物で、これは中性のK中間子をその反粒子に変える非常に弱い5つ目の力がある、これがCPを破るいたずらをしているという理論である。もう一つは標準理論と呼ばれる物で、これは3世代あるクォークに弱い力が働いて別のクォークが変わるときに、CPを破るいたずらが起きるとい理論である。この後者のメカニズムは、日本の小林、益川が提唱した。

これらの二つの理論を検証するために、ヨーロッパのCERN研究所と、アメリカのFermilab研究所で実験が行われて来たが、CERNの実験とFermilabの実験はお互いに異なる結果を出していた。私はFermilabの実験に初めから参加していたが、1992年に大阪大学に移ったのに伴い、阪大のグループを作って、更に精度がよい新しいFermilabの実

験に参加して研究を進めて来た。

この実験の手法は、長い寿命を持つK中間子と、短い寿命を持つK中間子が、2個のパイ中間子、 $\pi^+ \pi^-$ もしくは $\pi^0 \pi^0$ に壊れる4つの分岐比の二重比を0.06%の精度で測ることにより、この二重比が1からずれているかどうか調べる。もし1からずれていれば、上で述べた超弱モデルを否定する事ができる。

まず、FermilabのTevatronという世界最高のエネルギーを持つ陽子加速器(直径2km)で800GeVまで陽子を加速し、この陽子を引き出して、標的に当てる。標的から出てくる様々な粒子のうち、荷電粒子は電磁石で曲げてしまい、中性粒子のビームを2本作る。標的から約120m下流では、ほとんど、長い寿命のK中間子のみが残っている。ここで2本のビームのうち片方のビームに物質を置いて強い相互作用を起こさせることによって、短い寿命のK中間子を作る。これによって、長い寿命のK中間子のビー

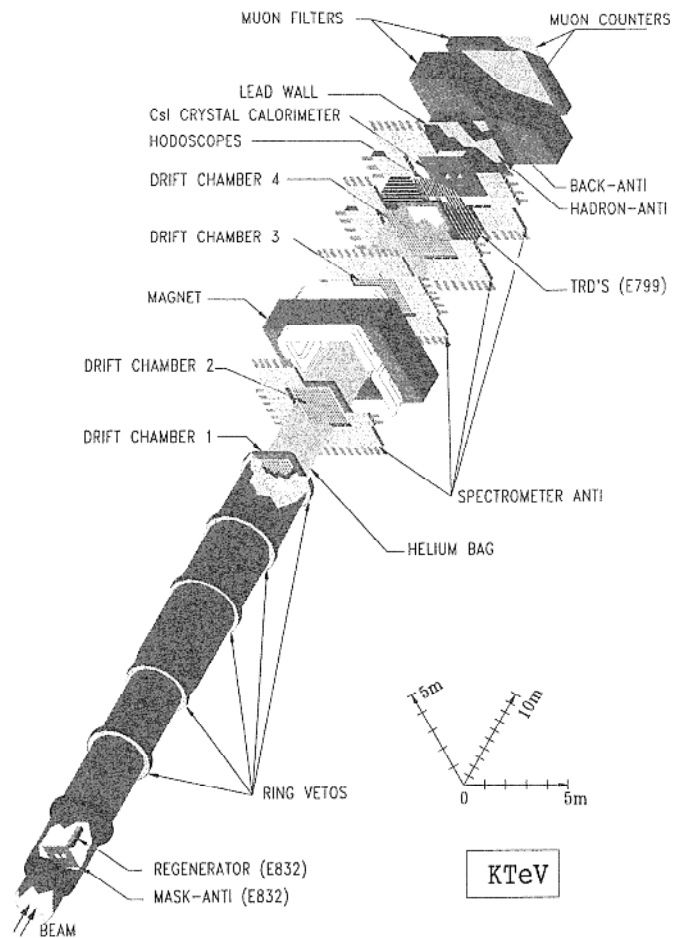


図2 Fermilabの実験装置

ムと、短い寿命のK中間子のビームができる。

これらのK中間子が崩壊してできた粒子を、図2に示す下流の測定器で観測する。まず、 π^+ などの荷電粒子は、ガスの中に高電圧をかけたワイヤーを張ったドリフトチェンバーを用いて、約100 μm の精度で粒子の通過位置を測定する。このチェンバーは4枚あり、2枚目と3枚目の間にギャップ2.4mの電磁石を置き、ここで軌道が曲げられる角度から荷電粒子の運動量を測る。また、上流の2枚のチェンバーでの2個の π 粒子の通過位置から、K中間子の壊れた場所を測定する。また、 π^0 粒子はその場で2個のガンマ線に壊れる。ガンマ線の位置とエネルギーは、4枚目のチェンバーの下流に置いた電磁カロリメータという測定器で測定する。これは、純粋なCsIの結晶を3100本積み重ねて1.9m四方の領域をカバーしている。ガンマ線が当たると、結晶の中で電磁シャワーを起こして結晶を光らせるので、その光量を各結晶につけた光電子増倍管で読み出す事によって、各結晶に落としたエネルギーを求める。エネルギー分解能は8GeV以上で1%以下であり、世界最高水準を誇る。この他にも、カロリメータに当たらなかったガンマ線を見つけるための測定器や、ミュー粒子を見つけるための測定器、などが全長合わせて70m程にわたって並べられている。ビームは1分間に20秒来るので、これらの測定器からデータ(8kbyte/事象)を1秒間に1万事象読み出し、約30秒間で全事象を解析して、必要なデータだけをテープに書き出す。我々大阪大学のグループは、この超高速データ収集システム、カロリメータ用の線形性の優れた光電子増倍管、小型のガンマ線検出器などを担当した。

実験は1996年から1997年にかけてデータを収集し、そのあと緻密な測定器の校正と解析を行ってきた。特に、分岐比の二重比を測る研究は、その精度のために、ありとあらゆる効果について徹底した検証と解析を行った。そして今年の2月、まず全体の5分の1のデータの解析をもとに、問題の二重比は1から約 7σ 離れているという結果を発表した。この新たな結果は超弱モデルを完全に否定し、標準理論をより強固なものとした。

この他にも、CPの破れが顕著に見えるとされる様々な稀な崩壊の探索を行い、これらの分岐比の上限値を1-2桁改善した。また、K中間子が $\pi^+\pi^-e^+e^-$ に壊れる崩壊において $\pi^+\pi^-$ のなす面と e^+e^- のなす面の間の角度に非対称性があるという新たなCPの破れの見え方も発見した。

今年はB中間子を用いてCPの破れの大きさを測る実験が日本とアメリカで始まる。また我々は、中性K中間子が π^0 とニュートリノと反ニュートリノに壊れる崩壊を見つけてその分岐比を正確に測ることにより、標準理論で説明するCPの破れのパラメータを測定しようという新たな実験も検討している。

CPの破れは、宇宙がビッグバンでできた後、どうして物質の方が反物質より圧倒的に多く残ったのかを説明するのに必要な要素である。しかし、現在、標準理論で説明しているCPの破れの大きさだけでは、今宇宙にある物質の量を説明しきれないとも言われており、実はまだどこかに、より大きなCPの破れが潜んでいそうである。

CとPという二つの鏡の向こうに広がる不思議な世界は、実はまだやっと、その端っこが見え始めたところである。

