

物質と反物質の非対称性¹

谷村 省吾

大阪市立大学工学研究科機械物理系専攻応用数学分野 助教授

略歴と専門分野：名古屋大学工学部応用物理学科卒業。学部では主に固体物理、金属電子論を学ぶ。名古屋大学理学研究科物理学専攻修了（理学博士）。大学院では素粒子論を専攻。ゲージ理論、量子論とトポロジー、高次元時空における対称性の破れなどを研究し、最近は量子コンピュータの研究に力を傾けている。東京大学（学振研究員）、京都大学を経て、平成15年より現職。研究テーマはあれこれと変遷しているが、じつはテーマ間のつながりは保っているつもりである。書類に専門を書くときは「数理論理」としている。あれもこれもと手を出しているうちに、自分は「何々分野の人」というラベルのつけにくい人になってしまったが、何ごとにも好奇心旺盛であり続けたいと思っている。

1 まえおき

場違いかもしれないと恐れながら、反粒子についての研究の歴史と最近の発展について簡単なお話させていただきます。この分野に関して私自身のオリジナルの寄与はわずかですので、先駆者たちや現在ご活躍の方たちの仕事を紹介する形でこの小論を書きます。ここで話しますが、ひょっとして何年か後に誰かが反粒子の研究でノーベル賞をもらうことになったときに、反粒子って何だということを皆さんに思い出してもらうために役に立つかもしれません。この小論は2004年10月に大阪市立大学で行われた国際シンポジウム「材料と文明」での講演で私がお話しきれずに残した話題の一つでもあります。

2 物質の成り立ちを問う

世界中に存在する物質は何からできているのか？多種多様な物質に共通な根源物質があるのだろうか？あるとしたらそれはどんなものだろうか？という問いは、世界に関する人類の基本的な問いの一つであろう。この問いに正確な、いわゆる科学的な、答えが返せるようになったのは、今から百年ほど前、20世紀の初頭であると言ってよいと思う。つまり、物質は原子からできているという説が確立したのである [1]。原子論は、唯一の決定的証拠によって確立したというよりは、多くの間接的証拠の積み重ねによってだんだん疑いようがなくなっていく、と表現した方がよいだろう。証拠としては例えば、アインシュタインによるブラウン運動の分子運動論的説明、ペランによるアボガドロ数の測定実験、ラウエによる結晶の X 線回折の発見などを挙げてよいだろう。さらに、原子は原子核と電子から成るということも確証され、原子内の電子の運動を説明するために、紆余曲折を経て量子力学が建設された。ハイゼンベルクの行列力学とシュレーディンガーの波動力学がディラックによって非可換力学としてまとめられ、量子力学がいちおうの完成を見たのが1926年としてよいだろう。実験とその理論的解釈・混乱・飛躍とが交錯しながら、原

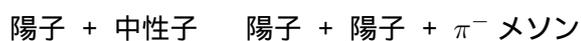
¹大阪市立大学工作技術センターレポート「ファブリカ」No. 16, pp. 9-15 (2004) に掲載。

子の構造と力学が少しずつ解明されていったのが、この頃の物理学の発展史であった。

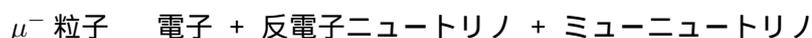
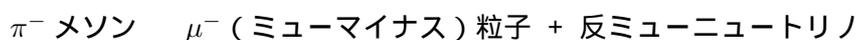
ところが、それに関する実験的証拠がまったくなかったときに、純粋に理論的な考察だけからこの世界にまだ発見されていない物質（粒子と呼んだ方がいいかもしれない）の存在を予言した人がいた。それがポール・ディラックという人であり、1931年に彼が予言したものは反物質（反粒子）であった。と言っても、ディラック自身初めから反粒子の存在を自信を持って予言したわけではなかった。自分が書き下した方程式の妥当な解釈を考え、迷ったあげく、反粒子の存在を考えざるを得ないという結論に達したのであった。そしてその年のうちにアンダーソンが偶然に（つまり意図的に陽電子を探そうとしていたのではなかったが）宇宙線の中に陽電子を発見した [2]。これが人類に最初に認知された反粒子であった。その後、1955年には意図的にデザインされた加速器実験によって反陽子が作られた。

3 素粒子の性質

物質は原子から成り、原子は原子核と電子から成り、原子核は陽子と中性子から成る。陽子や中性子に似た粒子として Λ (ラムダ) 粒子や Σ (シグマ) 粒子、 Δ (デルタ) 粒子などと呼ばれる粒子があり、陽子と中性子の間には π (パイ) メソンや K メソンといった粒子が飛び交っていることがわかっている。こういった奇妙な粒子の名前を覚えていただく必要はない。これらの粒子は、粒子と粒子が衝突したときに粒子が別の粒子に変わる（化ける）という過程によって生まれる。そして、一瞬の後に他の粒子に崩壊してしまう。例えば π メソンは、



という過程で生まれ、



という過程を経て壊れていく。それぞれの粒子の崩壊は確率的な現象であり、個々の粒子がいつ崩壊するかということはわからない。しかし、崩壊する「確率」を測定したり計算したりすることは可能であり、粒子の種類ごとに「平均寿命」を考えることには意味がある。これは、これらの粒子が量子力学的存在であり、確率的に生まれ、確率的に死んでいく存在だということの顕れである。例えば、 π^- メソンの平均寿命は 2.6×10^{-8} s、 μ^- 粒子の平均寿命は 2.2×10^{-6} s といった具合である。中には、寿命が無限、つまり単独に置いておく限り壊れない（壊れるところを実験的に観測されたことがない）粒子もある。陽子や電子やニュートリノが平均寿命無限大の粒子だと考えられている。

粒子の種類ごとに固有の性質として、質量・平均寿命・スピン・電荷・磁気モーメントなどがある [4]。また、粒子の壊れ方のパターンは、一般には一通りではなく、例えば π メソンは、先に挙げた崩壊の仕方の他に、稀に



という壊れ方をすることもある。崩壊様式ごとにそれぞれ確率が決まっており、例えば

$$(\pi^- \quad \mu^- + \text{反ミューニュートリノ}) \text{の確率} = (99.98770 \pm 0.00004)\%$$

$$(\pi^- \quad \text{電子} + \text{反電子ニュートリノ}) \text{の確率} = (1.230 \pm 0.004) \times 10^{-4}$$

といった値も π メソンに固有の性質である。こういう確率は実験的に測られる量であるが、現在

までに物理学者たちは、こういう確率を計算し予測する理論（ゲージ場の量子論、あるいは標準理論と呼ばれる）を手にしており、実験との比較テストに成功している。こういう「成功談」はすでに「教科書的な事実」になっており、私自身は先駆者たちの功績にただ感心するのみである。

4 反粒子とは？

ここまでの記述ですでに「反・・・」という粒子が現れてしまったが、いちおうここで反粒子のおおざっぱな定義を与えよう。反粒子とは、ある粒子と等しい質量・平均寿命・スピンを持つが、電荷の符号が逆の粒子である。例えば、陽子はプラスの電荷を持つが、陽子と等しい質量を持ち、絶対量は等しいがマイナスの電荷を持つ反陽子がある。電子はマイナスの電荷を持つが、反電子（陽電子という呼び方が定着している）は電子と同じ質量を持ちながら、プラスの電荷を持つ。粒子に対して反粒子は、ある種の「鏡写し」の存在であり、「反粒子の反粒子」は元の粒子ということになる。反粒子の存在によって、我々の世界はある意味で倍増したのである。

ただし、上の定義では、電荷ゼロの粒子に対する反粒子の定義が曖昧である。理論的に厳密な定義を与えることもできるのだが、また、そういう話しをしようと当初は目論んでいたのだが、それをやり出すと小論の規模を超えてしまうので、申し訳ないが省略させていただく。実際には、中性子は電荷ゼロであるが、反中性子という反粒子がある。 Λ 粒子も電荷ゼロであるが、反 Λ 粒子という反粒子がある。光子も電荷ゼロであるが、反光子は光子自身と一致してしまっている。電氣的に中性な粒子に対しては、反粒子が粒子と別物として存在することもあるし、反粒子が元の粒子そのものだったりすることがあるのだ。これも粒子の種類に応じて固有のことである。とくに、電氣的に中性でありながら反粒子が粒子とは別物として存在するとき、いろいろと不思議なことが起こる。

一般に、粒子と反粒子が衝突すると、共に消えて、光子になったり、他の粒子・反粒子の対に変わったりする。エネルギー保存則や、種々の保存則で許される限り、いろいろな変換の可能性がある。実際、高エネルギーの粒子の反応によって大量の粒子・反粒子の対を生成する実験は、いまでは当たり前のことになっている。そして粒子と反粒子の性質は非常に精密に調べられている。例えば、電子と陽電子の質量の差は、実験的に

$$\frac{|(\text{電子の質量}) - (\text{陽電子の質量})|}{\{(\text{電子の質量}) + (\text{陽電子の質量})\}/2} < 8 \times 10^{-9}$$

程度に抑えられている。電子と陽電子の電荷の差は

$$\frac{|(\text{電子の電荷}) + (\text{陽電子の電荷})|}{\{ |(\text{電子の電荷})| + |(\text{陽電子の電荷})| \}/2} < 4 \times 10^{-8}$$

以下である。ミュー粒子 μ^- と反ミュー粒子 μ^+ の平均寿命の比は

$$\frac{(\text{反ミュー粒子の平均寿命})}{(\text{ミュー粒子の平均寿命})} = 1.00002 \pm 0.00008$$

と測定されている。つまり、粒子と反粒子の違いはほとんどない、ということが 10 万分の 1 から 1 億分の 1 の精度で実験的に確認されている²。

²ここに挙げたのは CPT 対称性のテストである。

5 物質と反物質の対称性

粒子が集まって物質を作るように、反粒子も集まって物質を構成し得る。反陽子と反中性子が集まってマイナスの電荷を持った反原子核を構成し、その周りをプラスの電荷を持った陽電子が回って、反原子を構成する。反原子が寄り集まって反物質ができる。例えば、反水素原子と反酸素原子が結合して反水分子ができるし、反ナトリウムと反塩素が結合して反塩化ナトリウムができる。こうしてできた反水は、水と同じ物理・化学的性質を持つだろう。水と同じように反水も1気圧100℃で沸騰するし、0℃で凍るだろう。水に塩が溶けるのと同じ溶解度で、反水に反塩が溶けるだろう。つまり、物質を反物質と総入れ替えしても、我々の世界はまったく変わりがないだろうと考えられる。こういう不変性のことを、粒子と反粒子の対称性、あるいはC変換 (charge conjugation) 対称性という。ディラックによる反粒子の存在予言は、物質とそっくり入れ換え可能な反物質の存在可能性を意味し、宇宙はそういう二重の可能性を持っているということの意味しているのである。

ただし、二つの重要なことを断っておかなければならない。一つは、現実の宇宙は物質側にひどく偏っているということである。反粒子をかき集めて、いま言ったような反水や反塩のような「バルクの」反物質を作った人はいない。また、バルクの反物質が宇宙のどこかで見つかったこともない。反陽子は宇宙のどこかからときどき地球に降り注いでくることはあるが、反ヘリウム原子核や反炭素原子核が飛んで来たことはない。もしこのような反原子核が飛んで来たら、それは宇宙のどこかに反陽子でできた星があって、それが核融合反応を起こしているということの証拠になるのだが、そういう発見はまだない。反原子について言えば、ようやく1995年になってCERNのエレルトラによって反水素原子が実験室で作られたところである。最近では2002年に東大の早野らのグループが反水素原子を大量に作る実験に成功している。それにしても、物質と反物質は原理的にはほぼ対称であり、どちらかが優勢でなければならないという理由はないにも関わらず、実際の宇宙には反物質はほとんど見当たらない。これは宇宙にまつわる大きな謎の一つである。

もう一つ注意しておかなければならないことは、粒子と反粒子は完全には対称ではなく、じつは粒子と反粒子の振る舞いが微妙にずれている現象があるということである [3]。そのような現象がつい最近日本とアメリカの別々の実験グループによって非常に明確な形で発見されたので、そのことを紹介しよう³。

6 Bメソンで見つかった粒子・反粒子の非対称性

Bメソンは電氣的に中性でありながら、反Bメソンと区別がつく粒子である。Bメソンの質量は5279 MeVである(陽子の質量は938 MeV)。日本のつくばにはKEKBと呼ばれる特別の加速器とBelle(ベル)と呼ばれる測定器が稼動している。KEKBは電子と陽電子をほぼ光速で衝突させる加速器であり、Bメソンと反Bメソンの対を1日100万個発生させることができる。なぜそんなにたくさんの粒子・反粒子の対が必要かという、粒子と反粒子の差異は、非常に生起確率の低い、稀な現象を通してでしか見られないからである。しかし、その差が見つかるときは歴然

³以下に述べるのはCP対称性のテストである。CPT対称性はすべての実験で成り立っているが、CP対称性からのずれを示す実験結果があるということである。

とした差となって現れるのである。そのような B メソンの特徴を理論的に予測したのは名古屋大学の三田 [6] である。

Belle は、電子・陽電子の衝突点から飛び出した B メソンや反 B メソンが、どこでどんな粒子に崩壊するか捉える測定器である。 B メソンは衝突点で生まれて飛び出して壊れるまで、わずか数十～百マイクロメートルしか走らない。崩壊のパターンも非常に多様である。

2004 年 1 月に Belle グループが発表したところによると [7]、累積 1 億 5200 万個の B ・反 B メソン対のうち、 B メソンが二つの π メソンに崩壊するケースが 264 個、反 B メソンが同様の崩壊をするケースが 219 個あった。もし、粒子と反粒子が完全に同等なものであれば、これらは同数でなければならない。対称性の破れの大きさは

$$\frac{(B \rightarrow \pi^+, \pi^-) \text{ の確率} - (\text{反 } B \rightarrow \pi^+, \pi^-) \text{ の確率}}{(B \rightarrow \pi^+, \pi^-) \text{ の確率} + (\text{反 } B \rightarrow \pi^+, \pi^-) \text{ の確率}} = \frac{264 - 219}{264 + 219} = \frac{45}{483} = 0.093$$

の程度であり、粒子と反粒子の振る舞いには 9% の違いがある⁴。つまり 1 億 5200 万分の 264 ないし 1 億 5200 万分の 219 という非常に頻度の低い現象であるが、相対的には 10 分の 1 のオーダーのずれが観測されたのである。これが、「粒子・反粒子の差異は、稀な現象を通してしか見られないが、その差が見つかる時は歴然とした差となって現れる」と言ったことの意味なのである。

さらに 2004 年 8 月に北京で開かれた国際会議で Belle グループは次のような発表をした [8]。累積データ 2 億 7400 万個の B ・反 B メソン対のうち、1166 個の B メソンが K^+ メソンと π^- メソンに崩壊していたのに対し、 K^- メソンと π^+ メソンに崩壊する反 B メソンは 974 個しかないことを観測した。つまり、この場合は

$$\frac{(B \rightarrow K^+, \pi^-) \text{ の確率} - (\text{反 } B \rightarrow K^-, \pi^+) \text{ の確率}}{(B \rightarrow K^+, \pi^-) \text{ の確率} + (\text{反 } B \rightarrow K^-, \pi^+) \text{ の確率}} = \frac{1166 - 974}{1166 + 974} = \frac{192}{2140} = 0.090$$

という粒子・反粒子の非対称性がある。

一方でアメリカのスタンフォード加速器センターにおける BaBar (ババー) と呼ばれる実験グループも同様の測定を行って 2 億 2700 万個の B ・反 B メソン対についてデータを蓄積したところ、910 個の B メソンが K^+ メソンと π^- メソンに崩壊していたのに対し、 K^- メソンと π^+ メソンに崩壊した反 B メソンは 696 個しかなかった [10]。つまり、

$$\frac{(B \rightarrow K^+, \pi^-) \text{ の確率} - (\text{反 } B \rightarrow K^-, \pi^+) \text{ の確率}}{(B \rightarrow K^+, \pi^-) \text{ の確率} + (\text{反 } B \rightarrow K^-, \pi^+) \text{ の確率}} = \frac{910 - 696}{910 + 696} = \frac{214}{1606} = 0.13$$

という大きさの粒子・反粒子の非対称性を発見した。

ここまでの結果は、じつはある程度予想どおりの結果である。1973 年に唱えられた小林・益川理論 [5] を組み込んだ標準理論と呼ばれる理論があって、粒子と反粒子は異なった振る舞いをするところがある、ということを説明する枠組みは出来上がっているのである。そしてここまでの実験結果は標準理論の予測と矛盾しないものであった。Belle と BaBar の測定結果は多少ずれてはいるが、これはまだ実験データが少ないせいだろう。

ところが 2004 年 8 月に Belle が報告したもう一つの結果 [9] は、波乱を含むものであった。その実験は、 B メソンが ϕ メソンと K^0 メソンに崩壊する様子を時間分解して観測する、つまり B メ

⁴差を問題にするなら差と平均値の比で 18% と言った方がいいかもしれないが、差と和の比で非対称性を表現するのが通例である。

ソンが生まれてから何秒後 (10^{-12} 秒のオーダー) に崩壊するか測定する、という非常に難しい実験である (実際には、時間ではなく、飛んで行く粒子が崩壊する位置を数マイクロメートルの精度で測定する)。その測定結果が、 B メソンと反 B メソンとで異なっている、という点まではいいのだが、小林・益川理論の予測とも異なっていたのである。 B メソンが f_0 メソンと K メソンに崩壊する場合の測定も行われたが、理論値からのずれはもっとひどいように見える。さて、これをどう説明するか? BaBar も同様の測定を行っているが [11, 12]、こちらでは理論値からのひどいずれはないようにも見える。しかしデータはまだ少なく、はっきりしたことは言えないようである。

7 あとがき

反粒子や反物質は、そのネーミングとその存在のエキゾチックさゆえに、SF のネタにされる (スタートレックの宇宙船「エンタープライズ号」の動力源は「物質・反物質反応炉」ということになっている。また、アイザック・アシモフは未来のコンピュータは「陽電子コンピュータ」であると想像した) こともあって、それなりにポピュラーであると思われるが、他の解説ではあまり触れられていない素粒子物理の一側面について注意を喚起してこの小論を閉じたい。

量子論の予測の多くは本質的に確率的なものであるため⁵、素粒子物理は 1 回の実験で 1 個の新粒子を発見して万歳という決着のつき方をするものではない、ということをご理解いただきたい。個々の粒子の寿命はまちまちであり、何個もの粒子の崩壊の様子を測定して、同種の粒子の「平均」寿命がようやく定義されるのである。また、粒子の崩壊の時間「分布」や崩壊「確率」が意味のある統計量となる。粒子と反粒子が異なった振る舞いをするというときも、粒子と反粒子を多数用意して、それらの統計的な違いを予測したり測定したりしなくてはならない。また、 10^{-22} s 以下の極端に寿命の短い粒子もあるが、そのような粒子は統計的な方法によってしか定義されない。そう言えば最近巷を賑わせている (私も研究している) 量子コンピュータなるものは、なかなか魅惑的なネーミングではあるが、あれも統計的な計算しかしない計算機なのである。例え話したが、「15 は 90 パーセントの確率で 3 かける 5 に等しい」とか、量子コンピュータは意外と頼りない予測をする計算機であり、何回か計算を繰り返してやらないと確かな答えを出せないのである。

巨大加速器という派手な外見やコストが目につきやすく、ときとして世間様から批判の声にさらされることもあるようだが、素粒子実験は地道で息の長い努力の積み重ねによって成り立っている科学なのである。よりよい統計を上げるためには、実験精度の向上と長時間の安定運転とが必須になってくるのである。また、その努力の過程でハイテクの発展を促しているのである。そのへんのところをどうかご理解いただいて、粒子・反粒子の物理の研究も長い目で見守っていただきたいのである。私自身は実験家ではないが、そう思う。こういうお話しをして工作技術センターに関わる皆さんにも、いっちょう手を貸してやるうか、という気になっていただければ幸いです。

⁵量子論の予測のすべてが確率的であるわけではない。確率的ではなく一つの値を予測できることもある。例えば素粒子の質量やスピンについては確定値を予測し得る。しかしそれらについても多数のデータの統計を通してのみ実験と比較し得る。

参考文献

- [1] 原子の発見の歴史について書かれた面白い本として、江沢洋「だれが原子をみたか」岩波書店 (1976).
- [2] 反物質の発見の物語として、G. フレーザー「反物質 消えた反世界はいまどこに? 究極の鏡の謎にせまる」(訳: 澤田哲生、監訳: 佐藤勝彦) シュプリンガー・フェアラーク東京 (2002).
- [3] CP 対称性の破れのやさしい解説として、谷村省吾、三田一郎「宇宙の起源を探る CP の破れ」パリティ(丸善) 9月, 10-23 (1994).
- [4] 素粒子の種類・性質についての最新の実験データはインターネット上に公開されている。Particle Data Group, Phys. Lett. B **592**, 1 (2004); <http://ccwww.kek.jp/pdg/>
- [5] M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973).
- [6] A. B. Carter and A. I. Sanda, Phys. Rev. D **23**, 1567 (1981); I. I. Bigi and A. I. Sanda, Nucl. Phys. B **193**, 85 (1981).
- [7] The Belle Collaboration, Phys. Rev. Lett. **93**, 021601 (2004); <http://jp.arxiv.org/abs/hep-ex/0401029>.
- [8] The Belle Collaboration, <http://jp.arxiv.org/abs/hep-ex/0408100>.
- [9] The Belle Collaboration, <http://jp.arxiv.org/abs/hep-ex/0409049>.
- [10] The BaBar Collaboration, Phys. Rev. Lett. **93**, 131801 (2004); <http://jp.arxiv.org/abs/hep-ex/0407057>.
- [11] The BaBar Collaboration, <http://jp.arxiv.org/abs/hep-ex/0408072>.
- [12] The BaBar Collaboration, <http://jp.arxiv.org/abs/hep-ex/0408095>.