

特集／〈反粒子〉

反粒子とそれが生み出した世界

現代物理の扉を開く

川 村 嘉 春

物理学とは「物(もの)」の「理(ことわり)」を探究する学問である。ここで、「物」とは実体・対象(本特集では素粒子、特に反粒子)のことで、「理」とは原理や法則のことである。

「物」と「理」は関連し合っていて、様々な探究方法が存在する。主なものを列挙する。

- (1) 実験や理論を通じて「物」の性質を追究することにより、「理」を発見する。
- (2) 「理」に基づいて推論し、未知の「物」や「理」を予見し、実験・観測で検証する。
- (3) 異なる理論体系の結合により、未知の「物」と「理」を見出し、実験・観測で検証する。

「物」と「理」の探究は次のような思想に基づいてなされる場合が多い。

- (a) 「物」や「理」はより統一的に理解される。
 - (b) 「物」や「理」はより基本的なものに換わる。
 - (c) 「物」と「理」は表裏一体で必然性を有する。
- (b) は還元主義または要素還元型アプローチで、「物」に関してはより基本的な構成要素に基づいてモデルを構築すること、「理」に関してはより基本的な原理を採用して理論を再構成することである。

上記の項目に照らし合わせると、今回のテーマである反粒子に関する物理は(3)と(c)の典型例に当たる。

探究方法に関しては、「特殊相対性理論」と「量子力学」という異なる理論体系の結びつきにより生み出された、ディラック方程式を基礎方程式とする「相対論的量子力学」とよばれる理論がある。

この理論の「物」は(生みの親である)量子力学と同様に「電子」(広い意味では質量を持つスピン1/2の粒子)であるが、実はこれだけにとどまらなかった。ディラック方程式の申し子として「スピノル」とよばれる幾何学的な量が発見され、スピノルが記述する実体として「スピン」および「反粒子」の存在が明らかになった。実際、「反粒子」という未知の「物」とそれにまつわる「理」として「空孔理論」や「荷電共役(およびCPT対称性)」が見出され、実験・観測で確認された。

ここで、「スピン」とは粒子に固有の角運動量で、その値は換算プランク定数 $\hbar = 1.05457168 \times 10^{-34}$ J·s を単位として整数値あるいは半奇数値を取る。スピンにまつわる「理」として、「パウリの排他律」や「スピンと統計の関係」がある。

また、「反粒子」とは粒子と同一の質量を持ち、電荷は反対符号を持つ粒子のことである。例えば、電子の反粒子は「陽電子」とよばれ、その質量は電子と同じで $m_e = 9.1093826 \times 10^{-31}$ kg で、電荷は $e = 1.60217653 \times 10^{-19}$ C である。

思想に関しては、ディラック方程式の「物」は4成分の波動関数で正エネルギーを有する2つの状態と負エネルギーを有する2つの状態から成り、それぞれ2つのスピン状態($\hbar/2$ と $-\hbar/2$)を有する電子と陽電子に相当する。負エネルギー状態を陽電子と関連づける際に、「空孔理論」、「荷電共役」、「パウリの排他律」という「理」およびこれを昇華・兼備した「場の量子論」が一役買う。