

# 反物質

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 教授 早野 龍五

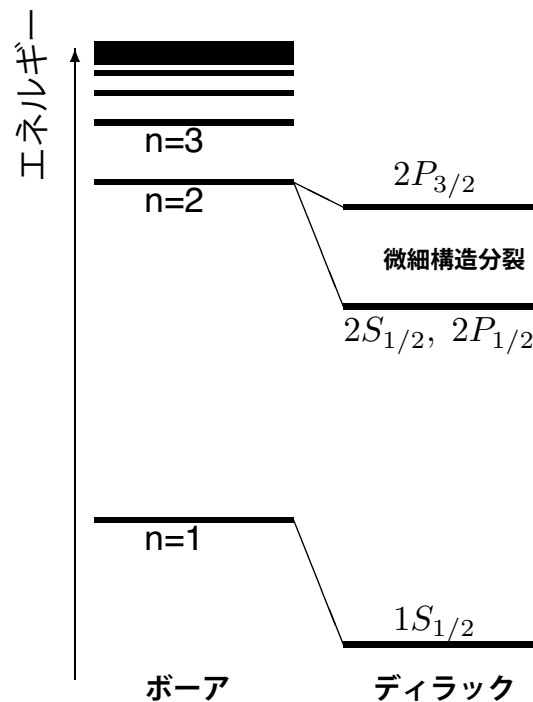


図 1：水素原子のエネルギー準位。ボーア模型（左）では水素原子の細かい構造（微細構造分裂）が説明できないが、ディラック理論（右）では説明できる。

## 少年時代の夢

私は、SF テレビシリーズの「スタートレック」で反物質に憧れた世代です。宇宙船エンタープライズ号は、反物質を燃料とするワープエンジンによって光速を超える航行が可能という設定でした。

最近では、スイスに実在する CERN（欧州原子核研究機構）から反物質が盗まれ、バチカンに爆弾として仕掛けられる、という小説「天使と悪魔」も話題になりました。

その CERN で、私は 15 年ほど前から、反物質の研究を行っています。私たちの研究は宇宙航行を目指したものではありませんが、少年

時代の夢に近い研究を出来るようになったことは、とても嬉しいことです。

## 反物質の「いろは」

最初に反物質の「いろは」を述べておきましょう。

- (い) 電子と質量が同じで電荷がプラスの粒子（陽電子）が存在する。陽子と質量が同じで電荷がマイナスの粒子（反陽子）も存在する。中性子は電荷を持たないが、反中性子が存在する。
- (ろ) 電子と陽電子が出会うと「対消滅」する。陽子と反陽子、中性子と反中性子も対消滅する。

(は) 反物質は陽電子・反陽子・反中性子などから構成されるが、現在人工的に作ることが出来るのは、反水素原子のみである。

### それは水素原子を知ることから始まった

高校の物理で、水素原子のボーア模型を学びます。しかし、水素原子のスペクトルを詳しく調べると、図1に示すようにボーアの公式と完全には一致しません。この違いを説明できる理論を確立したのが、ディラックです。

彼は、量子力学と相対性理論の統一をめざしました。すなわち相対性理論のエネルギー  $E$  と運動量  $p$  の関係、 $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$  を満たす電子の波動方程式（ディラック方程式）を見つけたのです。彼はこれを用いて水素原子のエネルギー準位を説明し、成功をおさめました。

ところがディラック方程式を解くと「負エネルギー解」という余計なものが出てきます<sup>1</sup>。「負エネルギー解」は正電荷を持つ粒子として振舞うことに気付いたディラックは、当初「負エネルギー解 = 陽子」に違いないと考えました。しかし、ディラック理論では電子と陽子の質量は等しくなければならないのに、現実の陽子は電子の2000倍近く重い。悩んだ末に彼は、電荷がプラスで質量が電子と等しい未知の粒子の存在を予言しました。

### 陽電子、反陽子、反水素原子の発見

ディラックの予言直後にアンダーソンが霧箱で宇宙線を観測し、電荷が正で質量が電子と等しい「陽電子」を見つけました。

反陽子の発見にはその後約四半世紀を要しました。反陽子は地上に降り注ぐ宇宙線には全く含まれておらず、大型加速器による実験が必要

<sup>1</sup>  $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$  の両辺の平方根を取ったとき、±の符号が出ることに関係しています。

だったためです。

陽電子と反陽子があるなら、反水素原子を作るのは容易か、というと決してそうではありません。反水素原子の生成に成功したのは、ごく最近のことです。CERNには、反陽子を生成・捕獲・減速する専用の装置「反陽子減速器」があり、我々はこれを利用して、反陽子と陽電子を混ぜ、反水素原子の生成に成功しました。

### ディラックの慧眼と宇宙の謎

ディラックは1933年のノーベル物理学賞受賞講演で次のように述べています。

「粒子と反粒子には対称性がある。だから、太陽系が電子と陽子で出来ているのは偶然で、宇宙のどこかには陽電子と反陽子で出来た星があるかもしれない…」

現在では、ビッグバンの直後に物質が反物質よりも少しだけ余計にあって対消滅を免れ、それが星や私たちを作ったと考えられています（宇宙のどこかに反物質星がある可能性は極めて低い）。小林・益川両先生がノーベル賞を受賞された「CP非保存」は「宇宙の消えた反物質の謎」にも関係しますが、小林・益川理論だけでは物質と反物質の非対称を十分に説明できないことも知られており、現在の重要な研究のテーマの一つとなっています。



### 参考文献

1. 「消えた反物質」小林誠（著）、ブルーバックス 講談社
2. 「宇宙は何でできているのか」村山 斉（著）、幻冬舎新書
3. 「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」G. フレーザー（著）、澤田 哲生（著）、佐藤勝彦（著）、シュプリンガー・フェアラーク東京
4. 「量子の海、ディラックの深淵——天才物理学者の華々しき業績と寡黙なる生涯」グレアム・ファームロ（著）、吉田 三知世（翻訳）、早川書房