

演習課題 11：反粒子を捕まえよう

～最軽量原子ポジトロニウムの崩壊観測実験～

担当教員：東京都立大学・大学院理学研究科、汲田 哲郎

ある素粒子と質量やスピンの等しく、電荷の正負が逆転した粒子を反粒子と呼びます。粒子と反粒子が出会うと消滅し、質量がエネルギーに変換され、通常は光子が放出されます（対消滅）。SF ではおなじみの話ですが、高エネルギー物理学では、日常的に反粒子を使った実験を行っています。

反粒子は、巨大な加速器を使わなくても発生させることができます。通常の β 崩壊（中性子 \rightarrow 陽子+電子+反ニュートリノ）の逆で、 β^+ 崩壊として知られる、陽子 \rightarrow 中性子+陽電子+ニュートリノ のような崩壊をする放射性元素を使えば、簡単に陽電子（電子の反粒子）を得ることができます。

陽電子を通常物質に入射するとどうなるでしょうか？電子と対消滅を起こして、 γ 線を生成しますが、中には電子と束縛し、準安定状態を作るものもあります。ちょうど水素原子の陽子を陽電子で置き換えた、この「原子」は、ポジトロニウム (Ps) と呼ばれます。Ps は、質量が電子の2倍、水素原子の約1/1000で、半径が水素原子の2倍の最軽量原子です。

Ps はスピン1/2を持つ電子と陽電子の束縛系なので、スピン合成則によりスピン並行 ($S=1$)で3重項のオルソポジトロニウム (o-Ps) と反平行 ($S=0$)で1重項のパラポジトロニウム (p-Ps) に分類することができます (図参照)。電磁相互作用では、荷電共役変換 (粒子-反粒子変換) に対する対称性が存在することから、o-Ps は奇数本 (主に3本) の γ 線に寿命142ナノ秒で崩壊、p-Ps は偶数本 (主に2本) の γ 線に寿命125ピコ秒で崩壊します。崩壊前の静止しているPs と崩壊後の γ 線の間で、エネルギーと運動量が保存するため、1本の γ 線への崩壊は禁止され、p-Ps の2 γ 崩壊では、電子の質量エネルギー (511keV) を持った γ 線2本が正反対の方向に放出されます。o-Ps の3 γ 崩壊では、同一平面上に3本の γ 線が放出され、エネルギーの総和は電子と陽電子の質量エネルギーを合計した1022keVとなります。

o-Ps の寿命142ナノ秒は、十分長い時間なので、実験的に測定することができます。この演習では、陽電子を放出する β^+ 放射核とPsを生成しやすいシリカエアロジェルトターゲットの周りに γ 線検出器を配置し、3本の γ 線のエネルギーと飛来時刻を測定し、オルソポジトロニウムが生成して、その寿命程度の時間で崩壊したことを確認します。

演習を通じて、高エネルギー物理学で標準的に使用される、 γ 線測定器、データ収集電子回路、コンピューターを使用したデータ解析技法について学習します。

