

演習 01 : 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：首都大学東京・大学院理学研究科、汲田 哲郎

東京工業大学理学院物理学系、陣内 修

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?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の生成を確認します。

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。

