

演習 1：反粒子を捕まえて遊ぼう ～最軽量原子ポジトロニウムを作ろう～

反粒子とは、ちょっと SF じみた響きがありますが、素粒子物理の世界では日常的に使用されています。この演習では、反粒子を捕えて身近に体感してもらうのを目的とします。

我々が今回作るポジトロニウム(Ps)は、電子とその反粒子である陽電子が電磁相互作用で束縛された水素原子に似た準安定状態です。重さは電子 2 個分、水素原子の 1/1000 です。反粒子である陽電子は電子とは電荷の符号が異なるほかは全く同じ性質を持つ粒子で、この演習では、放射性同位元素の β^+ 崩壊（陽子→中性子+陽電子+ニュートリノ）で放出された陽電子を利用します。陽電子を物質に照射すると、物質中の電子と束縛し合い Ps を形成します。粒子・反粒子からなる原子なので、周りに物質がなくても、ある確率で対消滅し、複数の γ 線に崩壊します。つまり、粒子と反粒子が消滅し、その質量がエネルギーに変換されます。

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、C 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、p-Ps は偶数本(主に 2 本)の γ 線に崩壊します。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。

今回の演習では、写真の装置を使用します。中心部に陽電子を放出する放射線源と Ps を生成させるシリカエアロゲルを置き、その周りを 60 度おきに 6 本の γ 線検出器が囲っています。p-Ps は 125 ピコ秒という短寿命で崩壊するため、陽電子と電子が Ps を形成せずに直接消滅した事象と区別するのが困難ですが、o-Ps は 142 ナノ秒と比較的長い寿命を持ち、特徴的な 3 γ 崩壊をするため、識別することができます。

実験装置で、 γ 線への崩壊時間と 3 本の γ 線 1 本 1 本のエネルギーを測定し、Ps が実際に生成されていることを確認しましょう。

