

演習課題 P01：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普段からよく使っています。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てきた、水素原子に似た準安定状態の原子です。重さは電子2個分、水素原子の約1/1000です。反粒子である陽電子は1928年、P.M.ディラックによって予言され、1932年にC.アンダーソンが宇宙線の中に発見しました。陽電子は電子と電荷の符号が異なる他は全く同じ性質をもつ粒子で、この演習では放射性同位元素の β^+ 崩壊（陽子 \rightarrow 中性子+陽電子+ニュートリノ）で放出されたものを利用します。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。これはまさにアインシュタインの有名な公式 $E=MC^2$ の通り、物質が消滅してその質量がエネルギーに変換されているのです。

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平行($S=1$)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は奇数本の γ 線に、p-Psは偶数本の 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)をもった γ 線2本が正反対の方向に放出されます。一方、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の合計1022keVとなります。

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を生成させるシリコンのパウダーを置き、その周りを60度おきに6本の γ 線検出器が並んでいます。p-Psは125ピコ秒の短寿命で崩壊してしまうのに対し、o-Psは142ナノ秒と比較的長い寿命をもち、さらに特徴的な3 γ 崩壊をするので、識別することができます。演習課題では検出器の組み立てから始まります。それぞれの検出器に入った γ 線のエネルギーと時間を測定し、Psが実際に生成されていることを確認します。

果たして、Ps生成の直接証拠である3 γ 事象を見事捕えることができるでしょうか？

