

演習課題 P01 : 反粒子を捕まえよう ～最軽量原子ポジトロニウムの観測～

担当教員：東京工業大学理学院物理学系、陣内修
協力大学：首都大学東京

「反粒子」とは、少し SF じみた響きがありますが、素粒子物理の世界では日常よく使う単語です。この演習では、反粒子を捕えてその存在を実感してもらうことが狙いです。

この演習で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できた、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。陽電子は電荷の符号が異なる他は電子と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→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。この準原子は、周りに物質がなくても対消滅し、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) に分類ができます (図参照)。電磁相互作用では、荷電共役変換に対する対称性が存在することから o-Ps は主に 3 本の γ 線に、p-Ps は主に 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、運動量の保存則のため γ 線 1 本への崩壊は起きません。p-Ps 崩壊では、電子の質量エネルギー (511keV) をもった γ 線 2 本が反対方向に放出されます。一方、o-Ps 崩壊では、同一平面上に 3 本の γ 線が放出され、 γ 線エネルギーの総和は 1022 keV となります。

演習では写真の装置を使用します。中心部に陽電子源と Ps を生成させる二酸化珪素の粉を置き、その周りに 6 本の γ 線検出器を並べています。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。演習では検出器の組み立てから始めます。Ps 崩壊からの γ 線のエネルギーと時間を測り、その情報を元に Ps が実際に生成されたことを確認していきます。

Ps 生成の直接証拠とは何か？ どうすれば Ps が本当にできたことを示すことができるのか？ その答えは本演習で自らの目で確かめて下さい。

