

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：東京科学大学理学院物理学系 陣内 修，
東京都立大学大学院理学研究科 汲田哲郎

「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「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（原子核中の陽子→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) に分類できます（図参照）。電磁相互作用では、荷電共役変換の対称性から 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。 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。

o -Ps は 142 ナノ秒と比較的長い寿命をもち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^+ 放射線源とシリカ素材の Ps 生成部を実験装置の中央に置き、 γ 線検出器で γ 線のエネルギーと到来方向・時間を測定して o -Ps の生成を確認します。

演習では検出器の設置から始め、データ収集電子回路の組み上げ、PC を使ったデータ収集、そしてデータ解析技法について学びます。

反粒子捕獲の直接証拠とは何か？ どうすれば Ps が実際にできたことを示すことができるのか？ その答えは本演習の中で自らの目で確かめて下さい。

