オルソポジトロニウム3γ 崩壊の寿命測定

物質科学専攻 素粒子基礎物理学研究室 044110 有田義宣
指導教員 高嶋隆一

§1. 緒言

素粒子のひとつである陽電子 (positron) が Dirac の 1928 年の有名な仮説によって知られるようになり, それが実際に 1932 年に発見[1] されると, 陽電子と陽子のその性質の対応から陽電子-電子の水素原子に似た束縛状態が類推された.[2] この"原子"ポジトロニウム (以下 Ps) は二つの状態を持ち, そのひとつであるオルソポジトロニウム (ortho-Ps) の崩壊率 (寿命$^{-1}$) は量子電磁力学からおよそ 7.04[$usec^{-1}$] と予言されている. その値について, 現在では約 200ppm の精度で理論値と一致した測定結果[3] が出ている.

ortho-Ps の寿命測定にはプラスチックシンチレータが陽電子の検出器として使用されているが[4] , 今回はそのプラスチックシンチレータの厚さと陽電子通過率を独自の方法で見積もり, その結果を踏まえて ortho-Ps の寿命測定を行う.

§2. 方法

陽電子のシンチレータ通過率を求めるシミュレーションと, 寿命測定の方法について紹介する.

2.1. シミュレーション

本実験で使用する ^{22}Na から放出される陽電子について, シンチレータをどのくらいの確率で通過しうるのかをシミュレーションで計算した. このために, 粒子と物質の相互作用を正確に計算する GEANT4 というシミュレータを組み込んだプログラムを作成した. また,^{22}Na から放出される陽電子は,0.545[MeV] を最大値とするβ 線スペクトルと呼ばれる確立分布に従う運動エネルギーをもってシンチレータに入射する. したがって, シミュレーションではまず GEANT4 でエネルギーに対する陽電子の物質通過率を求め, 規格化したβ 線スペクトルによって重み付けをすることで陽電子のシンチレータ通過率を求めた.

2.2. 寿命測定実験

ortho-Ps の寿命は,ortho-Ps 生成からの時間と崩壊数の関係から求めることができる. 不安定粒子が崩壊する場合, その崩壊率 dN/dt は不安定粒子の個数 N に比例するので,τ を寿命とすると,

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{\tau} . N \qquad (1)$$

ここから, 時間を t として方程式を解くと

$$N(t) = N_0 exp(-\frac{t}{\tau}) \qquad (2)$$

が得られる. したがって,ortho-Ps の時間-崩壊数の関係を測定で知ることができれば, この関係式にフィットすることでその寿命 τ を求めることができる. 実際にはログスケールでフィッティングし, その傾きの逆数を求める.

ortho-Ps の生成はプラスチックシンチレータを陽電子が通過したときと考え, そこから ortho-Ps が崩壊時に放出するγ 線を検出するまでの時間を ortho-Ps の崩壊時間とする. その時間測定を行うために, 今回は NIM・CAMAC 規格の TDC というモジュールを用いて ortho-Ps 生成から 3γ 崩壊までの時間を測り, その崩壊時間を持ったイベントを数えることで, 目的の時間-崩壊数の関係を得た. また, 計測と同時にγ 線のエネルギーを得ることで,ortho-Ps のγ 線をある程度特定することができる.

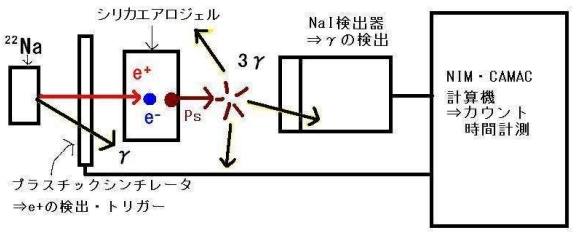

Fig. 1: 実験セットアップ略図

以上の情報を得るために, 実験セットアップおよびプラスチックシンチレータなどの装置, プログラム, 回路を作成し, 装置 (特に PHADC と TDC) のキャリブレーションを行った. セットアップの略図は図 1 である. エアロジェルは空孔率がほとんど 100%の多孔性ガラスの一種だが, 陽電子を減速させるための減速剤の役割と陽電子が電子を捕まえるための触媒として設置している.

§3. 結果

シミュレーションの結果と, 寿命測定の結果を以下に示す.

3.1. シミュレーション

0.2[mm] のプラスチックシンチレータに ^{22}Na 線源から放出される陽電子を仮定して通過率を求め, 図 2 のような結果を得られた.

[1] C.D.Anderson はこの発見でノーベル賞を受けた.
[2] Mohorovičić,1934.
[3] ミシガン大,2003.
[4] 本実験でのトリガーの役割を果す.

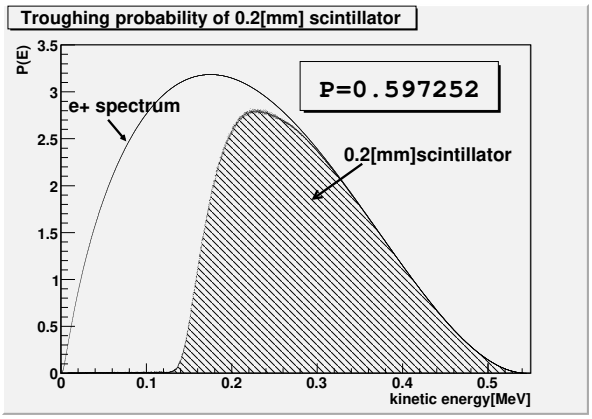

Fig. 2: 陽電子通過率 (厚さ 0.2[mm] のシンチレータ)

図の外側の線はβ 線スペクトルで放出される規格化された陽電子のエネルギースペクトルを表し, 内側の斜線部のスペクトルがエネルギーに対するシンチレータ通過率である. (図は 0.2[mm] のプラスチックシンチレータの陽電子通過率) このシミュレーションの誤差は, 最大で+0.05%までである.

また, シンチレータの厚さと通過率の関係は図 3 のようになる.

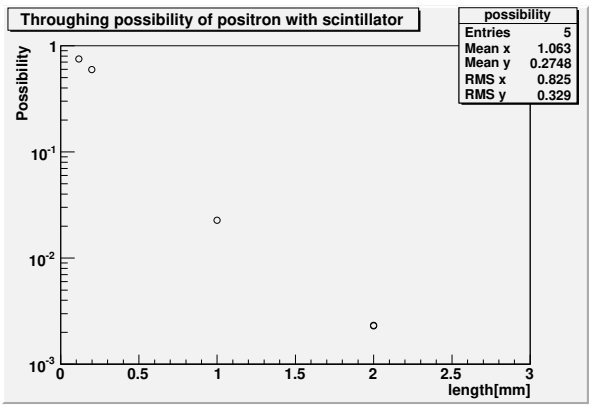

Fig. 3: シンチレータの厚さと陽電子通過率の関係

3.2. 寿命測定実験

寿命を求めるために, エネルギー分布と時間の計数をとった. 検出したひとつのγ 線ごとにエネルギーと時間が得られるので, 電子-陽電子の対消滅のエネルギーであり,para-Ps のエネルギーである 511[keV] 付近と,^{22}Na が放出するγ 線の作りうるコンプトンエッジ 170[keV],213[keV] 付近を除く意図で,275 ~ 425[keV] のイベントを切り出した. それが図 4 である.

時間のプロットをログスケールで直線フィッティングすると崩壊率[5] が得られ, この逆数をとることで, ortho-Ps の寿命

$$\tau = 113.56 \pm 32.34[nsec]$$

を得た.

[5]図 4 の傾き (slope)$[nsec^{-1}]$.

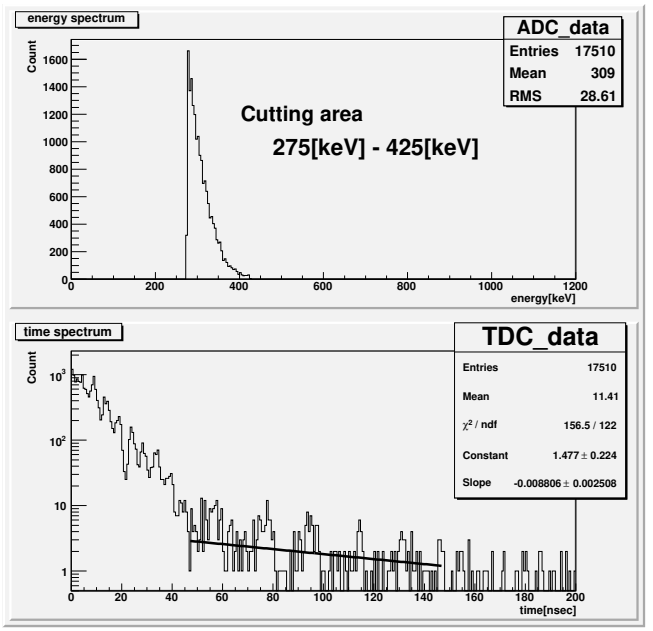

Fig. 4: エネルギーカットと TDC 時間プロット

§4. 寿命測定についての考察

今回とったデータは 67,886 イベントである. 時間プロットの 0[nsec] 付近にピークがあるが, これは 511[keV] 領域をカットすることで大幅に数を減らしたので, 寿命 125[psec] の para-Ps であると考えられる.

また,0 ~ 40[nsec] の範囲に丘があるが, かなり高低差のある部分もみられるため, 崩壊によるγ 以外のなんらかの外部に原因をもつ寄与が, ここで現れているのではないかと推論することができる.

また, フィットした部分もイベント数が非常に少ないため, もっとイベント数をためる必要がある.

§5. まとめ・課題

シミュレーションによって, シンチレータと陽子通過率の関係を見積もることができた.

また, 今回実験で得られた ortho-Ps の寿命は次のように求められた.

$$\tau = 113.56 \pm 32.34[nsec]$$

今後の主な課題 (展望) は以下の通りである.

1. イベント数の増加.
2. 機械的な雑音の除去 (プリアンプ, プラスチックシンチレータの計数率の増加, 遮光, 熱雑音等).
3. ディスクリミネータに関する, フォトチューブから得られる波形の大きさと信号の立ち上がりの時間差の補正.
4. 真空 (pick-off の除去) と物質量 (熱化問題) の外挿.
5. 3 体崩壊のシミュレーションによる,3 γ のエネルギー範囲の見積もり.