

正电子湮没寿命谱的测量

实验目的

了解正电子寿命测量的基本原理，初步掌握正电子寿命测量方法。

实验原理

1. 正电子在物质中的湮没寿命

正电子与电子相遇时发生“湮没”，它们的总能量以电磁辐射能的形式发射出来。放射源发射的正电子，通常具有几百 KeV 的动能，进入物质后，与物质的分子原子相碰撞，很快损失它的动能，在极短时间内（ $\sim 10\text{ps}$ ）与物质达到热平衡，然后继续在物质中运动，直到与负电子发生湮没。正电子从产生到湮没的时间间隔，称为正电子在物质中的湮没寿命。

在金属中，正电子与负电子直接湮没，湮没过程的绝大多数是发射两个能量相等，方向相反的 γ 光子。正电子的平均寿命在 100ps — 500ps 之间。在凝聚态物质中，正电子除了与电子湮没外，还能与电子湮没外，还能与电子形成类似氢原子结构的正电子素，其中，单态的正电子素本征寿命为 142ps 。总之，正电子在物质中的寿命同物质的结构和电子密度有关，其寿命谱往往有几种不同成份的寿命混合而成。

2. 测量正电子寿命的实验原理

用 ^{22}Na 发生 β^+ 衰变时发出正电子 e^+ ， ^{22}Na 跃迁到 ^{22}Ne 的激发态，此激发态的激发能为 1.274MeV ，寿命约为 3×10^{-12} 秒量级。激发态通过发射 1.28MeV γ 光子退激到 ^{22}Ne 的基态。在时间谱仪的分辨时间为 10^{-10} 秒量级的情况下，可以认为上述核跃迁过程中发射 e^+ 和 γ 是同时进行的。在测量正电子寿命时， 1.28MeV γ 光子可作为 e^+ 产生的时标信号。 e^+ 湮没放出的 γ 光子，可作为正电子湮没的时标信号。测量这两个时标信号之间的时间差，就得到了正电子寿命。

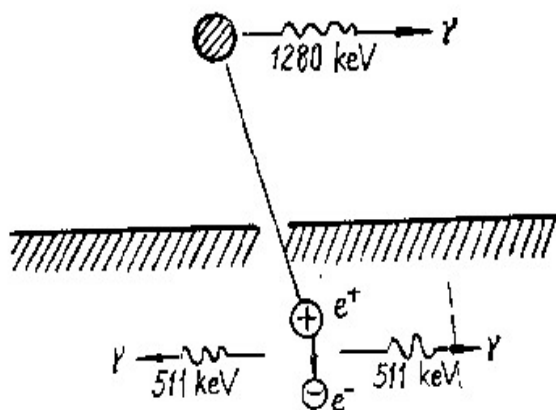


图 1 ^{22}Na 正电子源发射正电子湮没过程示意图

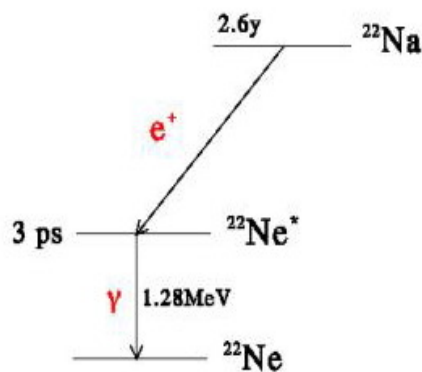


图 2 ^{22}Na 衰变纲图

实验内容

1. 用延迟箱和多道分析器对谱仪进行时间刻度。
2. 测量正电子在样品中的寿命谱。用斜率法及寿命谱解谱程序求出不同成分的寿命，并比较结果。

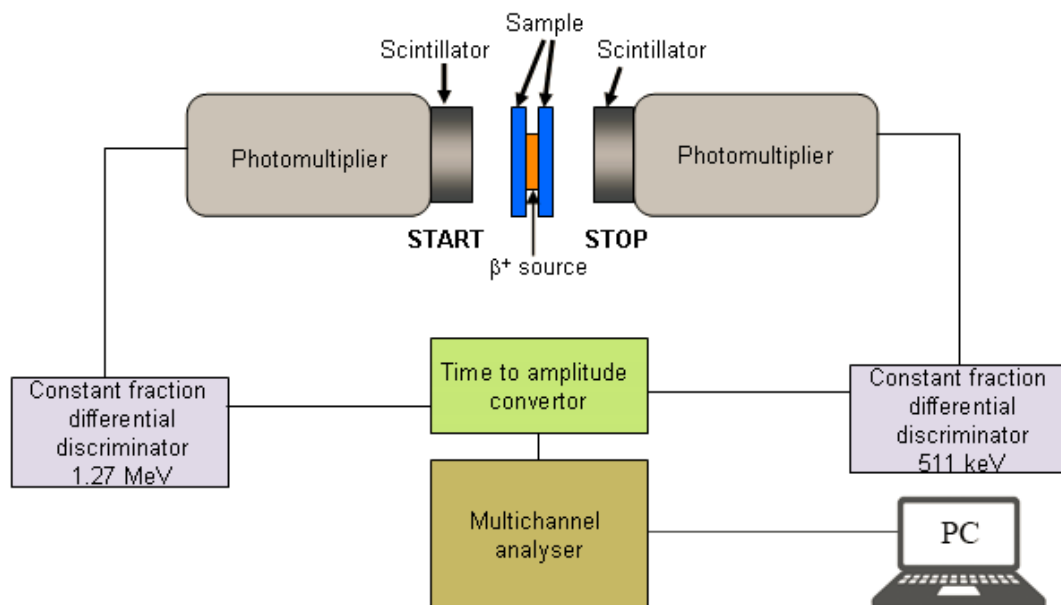


图 3 正电子湮没寿命谱仪示意框图

实验仪器

测量正电子寿命谱的线路如图 3 所示。所需仪器如下：

NIM 机箱：	ORTEC 4001A
光电倍增管：	Hamamatsu H3378-51
闪烁晶体：	EJ-232
恒比定时甄别器：	ORTEC 583B
延迟箱：	ORTEC DB463
高压电源：	东文高压电源
时间幅度转换器：	ORTEC 567
多道分析器：	ORTEC 928
PC 机：	

实验步骤

1. 对谱仪进行时间刻度
在正电子湮没谱仪的能窗参数已经调好的情况下，将夹着 ^{22}Na 放射源的两个样品放在两个 γ 探测器的中间位置，调节延迟箱上的延迟时间，分别测量在不同延时条件下瞬时符合谱的峰位中心道址，以实现时间谱仪的时间刻度。
2. 测量正电子在单晶硅等样品中的寿命谱。
在已选定的工作条件下，测量样品的正电子湮没寿命谱。为满足统计精度要求，每个测量谱的总计数在 2×10^6 个以上。

实验数据处理

在正电子技术应用中，通常测量的正电子寿命谱是含有几个指数成分的复合谱，如图所示，其中的每一组分是与一种湮没机制相对应的。在凝聚态物理中，这些不同的湮没机制包括：正电子与电子的自由态湮没，单态正电子素的湮没，

三态正电子素的自由湮没，三态正电子素的淬灭湮没等。

多指数成份的寿命谱一般可用下式表示：

$$Y(t) = \sum_{j=1} N_{0j} e^{-\lambda_j t}, j=1,2,3,\dots$$

式中， j 为组分数， $Y(t)$ 是对应时间 t 的道计数，时间 t 的零点在 ^{60}Co 瞬时符合谱的中心道处， λ_j 为第 j 组成份的衰变常数， N_{0j} 为第 j 组成份在 $t=0$ 道的计数。如果所测寿命谱的道计数为 $y(t)$ ，原则上可用最小二乘法将 $y(t)$ 与 $Y(t)$ 进行拟合，求得各组分的 N_{0j} 和 λ_j 。但这样工作量较大，必须在计算机上拟合。对于像图 4 所示的含三种成份的复合谱。如果不用计算机，可按以下步骤进行“手工”分解。

1. 将各道的计数减去平均本底后，在半对数坐标纸上画出复合寿命谱：

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)。$$

2. 先确定慢组分 $y_3(t)$ ，因为 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ ，当 t 足够大时，第一组分和第二组分对复合谱的贡献可以忽略不计， $Y(t) \approx y_3(t)$ 。在图 5 中，取 t 足够大后的若干点，这些点基本分布在一条直线附近。将这些点与直线 $\ln y_3(t) = \ln N_{03} - \lambda_3 t$ 进行拟合，可得 N_{03} 和 λ_3 ，即得 $y_3(t) = N_{03} \exp(-\lambda_3 t)$ 。

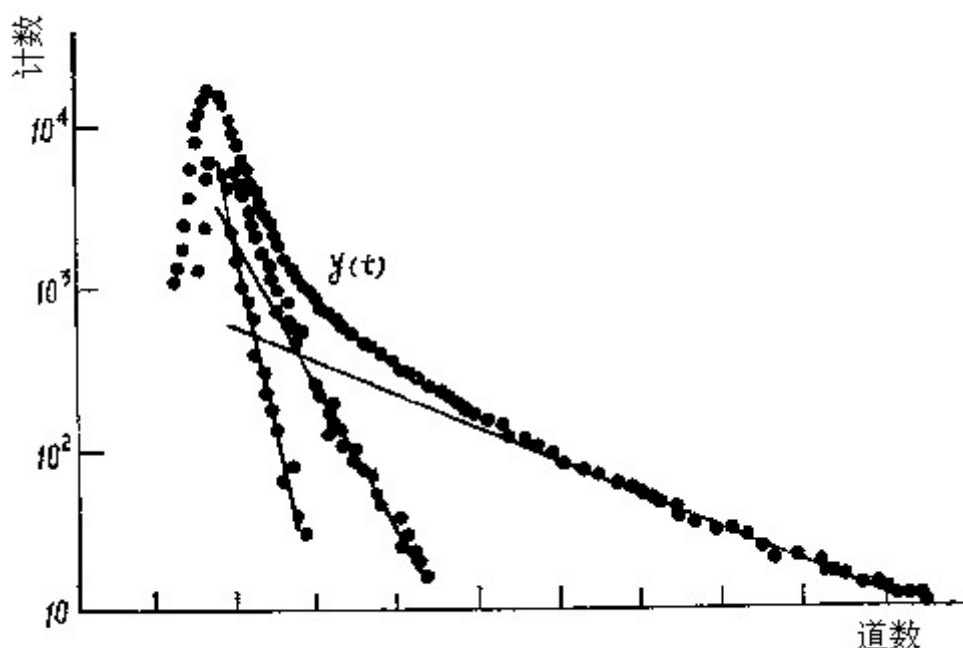


图4 多指数复合谱

3. 第二步确定 $y_2(t)$ ，从总谱 $y(t)$ 中减去 $y_3(t)$ ，即得 $y_1(t) + y_2(t)$ 。在 $y_1(t) + y_2(t)$ 的后半部分取若干点，与 $y_2(t) = N_{02} \exp(-\lambda_2 t)$ 拟合，可求出 N_{02} 和 λ_2 。
4. 按确定 $y_2(t)$ 类似的方法，进而确定 N_{01} 和 λ_1 。
5. 可按式求第 j 组成份的相对强度：

$$A_j = N_{0j} \int_0^{\infty} e^{-\lambda_j t} dt / A_T$$

其中， A_T 为时间谱（扣除本底后）的各计数之和。实际计算时，式中的积分应换成求和。

6. 用计算机拟合程序拟合寿命谱，并与上面得到的结果相比较。

思考题

1. 寿命谱仪中的延迟箱的作用是什么？
2. 如果时间谱仪的瞬时符合谱的 FWHM 很小，即瞬时符合谱接近一条直线，试分析该谱仪测量的正电子寿命谱形状如何。实际上时间谱仪的瞬时符合谱总有一定宽度，它对正电子寿命谱有何影响？
3. 如何通过实验来确定影响寿命谱仪时间分辨率的因素，主要因素有哪些？

参考资料

许咨宗. 核与粒子物理导论. 中国科学技术大学出版社, 2009。

郁伟中. 正电子物理及其应用. 科学出版社, 2003。

王少阶等. 应用正电子谱学. 湖北科学技术出版社, 2008。