

正电子湮没技术(PAT)是一项较新的核技术。它是利用正电子与物质的相互作用来获得凝聚态物质的微观结构、电子动量分布及缺陷状态等信息的实验技术。

正电子是电子的反粒子,这种粒子首先是狄拉克在1930年建立相对论量子力学时预言其存在的。两年以后安德逊(Anderson)在宇宙射线中发现了它。它是人们发现的第一种反粒子。正电子与电子一样,同属于轻子。正电子和电子作为基本粒子的属性列于表1。从表中可以看出正电子与电子具有相同的静止质量和自旋,所带的电荷和电子的电量相等,不过是正的,因而也具有正的磁矩。

但是,正电子和电子之间也有重要的区别。电子是一种较容易发现的基本粒子,一切原子的外壳层都是由电子构成,而正电子则比较罕见,它们只在与宇宙线有关的现象中及不稳定同位素的 β^+ 衰变时出现。

当物质与反物质相互作用时,质量转化为能量的过程称为湮没。在我们这个物质世界里,正电子不可能长时间稳定地存在。它遇到电子时就会湮没,正电子和电子转变为 γ 光子。正电子主要以两种形式发生湮没。第一种形式是自由湮没,第二种形式是束缚态湮没。自由的正电子与电子湮没,称为自由湮没。目前正电子湮没技术作为一种实际的测试方法主要是自由湮没。根据自由湮没时发射的光子数目不同分为三种情况:即单光子、双光子和三光子湮没,不发射光子或发射更多光子的情况极为罕见。

实验中用的正电子都来自放射性同位素的正电子衰变。在一般实验中使用最多的正电子源是 ^{22}Na ,它有着较长的半衰期和高的衰变效

率。并且在 β^+ 衰变过程中,在放出正电子的几乎同时还放出一个能量为1.28MeV的 γ 光子,这个光子可以作为正电子诞生的标记。作为商品供应的 ^{22}Na 正电子源是 $^{22}\text{NaCl}$ 水溶液。通常人们是把这种 $^{22}\text{NaCl}$ 水溶液滴在抗蚀的材料如镍箔、塑料或云母片上,然后将 $^{22}\text{NaCl}$ 水溶液蒸发掉,在上面再盖上一片同样的箔,这样就制成了我们在实验中使用的正电子源。当大量正电子射到样品中去,与样品中的电子湮没时,发射出 γ 射线,用 γ 射线探测器探测这些射线,就可以获知样品材料内部有关电子结构、电子密度等方面的信息。

刘东红
刘裕勤

正电子湮没技术

表1 正电子与电子的基本属性

粒子类型	物理量	单位	静止质量/kg	自旋 h	电荷 e	磁矩 μ_B
	正电子			9.11×10^{-31}	1/2	+1
电子			9.11×10^{-31}	1/2	-1	-1

250ps(皮秒,即 10^{-12} 秒)之间,在离子化合物或其他非金属化合物中则可到1ns(纳秒, 10^{-9} 秒),材料中有空位缺陷时,缺陷中的电子密度

较小,因而正电子进入缺陷后会有较长的寿命.这样,正电子寿命的测量就能提供有关物质相结构(用来研究各种结构相变、液晶相变乃至生物膜相变等)以及晶体中缺陷的大小和种类的信息.这对了解材料的宏观性质都是很重要的.

假设正电子-电子湮没对的总动量很小,可以近似地看做零,因为湮没过程遵守一般的守恒定律.湮没前后的总能量守恒,总动量守恒,湮没的两个粒子的静止质量为 $2m_0$,湮没后产生的两个 γ 光子的能量,根据爱因斯坦质能关系式

$$E^2 = m_0^2 c^4,$$

可以计算出一个 γ 光子的能量为 $E_0 = 511 \text{ keV}$.因为我们假定湮没前电子对的总动量为零,根据动量守恒,湮没后两个 γ 光子必然沿 180° 的相反方向射出.如图 1 所示.

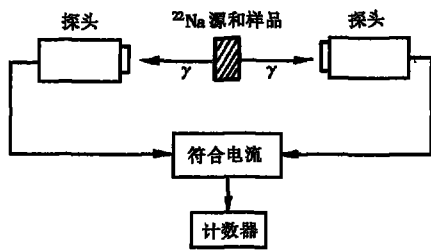


图1 记录正电子湮没事件数的实验简图

在滴上 $^{22}\text{NaCl}$ 溶液的样品的两侧相对着放置两个 γ 射线探测器,它们接收的信号送入一个符合电路,该符合电路只有当两端同时有脉冲输入时,才能输出一个脉冲,这一脉冲送入计数器就是一次正电子湮没的计数.为了测出正电子寿命,实验装置中还要加进探测 ^{22}Na 发射 1.28MeV 的 γ 光子的部件.这样就能测出正电子从发射到湮没所存在的时间,也就是测出了正电子的寿命.

如果正电子-电子对的初始动量不为零,在金属中,因为电子有几个到十几个电子伏特的能量,在质心坐标系中,光子的能量精确地为 $m_0 c^2 = 511\text{keV}$,两个光子沿相反方向射出,而在实验室坐标系中,由于电子对具有动量 \vec{p} ,因而两个 γ 光子的方向就要偏离共直线,如图 2 所

示.由于多普勒效应,能量也要与 511keV 发生偏移,根据动量和能量守恒定律,可以得到偏角 θ 和多普勒能移 ΔE

$$\theta = \frac{p_T}{m_0 c}, \quad \Delta E = \frac{1}{2} C p_L$$

式中 p_T ——电子对动量的纵向分量, p_L ——电子对动量的横向分量.

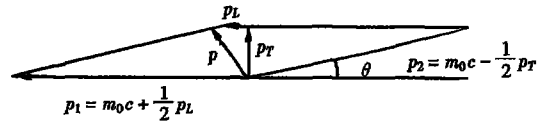


图2 双光子湮没过程动量守恒矢量图

由以上两式可以看出 θ 和 ΔE 的大小代表着电子对在湮没前动量的大小,而电子对的动量主要由湮没电子的动量来决定.因此,实验上测量 θ 和 ΔE 就可以反应出物质中电子动量的信息.这就是角关联和多普勒展宽方法所依据的原理.通过角关联测量可以获得固体中电子的动量和能量的信息.这对研究金属中电子的能级及固体能带结构都是很重要的,这种信息也用来研究材料的缺陷.

正电子湮没技术 (PAT) 应用范围极其广泛,几乎包括一切形态的凝聚态物质都可以用此技术来研究.研究涉及到固体物理、原子物理、材料物理、表面物理、化学、医学等领域.金属与合金是 PAT 研究的传统阵地,但现在在非金属、半导体、离子晶体、有机晶体、陶瓷等方面的应用也有了长足发展.

