

正电子湮没技术

王少阶

近年来,在化学,固体物理等学科中经常利用正电子在介质中可直接与电子发生湮没,或与电子形成电子-正电子束缚态(叫做氦子素)而后湮没的特性.由此而发展起来的正电子湮没方法已成为研究物质微观结构和化学环境的一门新型核技术.下面就其基本原理、实验方法等作一简要介绍.

一、基本原理

1. 正电子及其自由湮没

1930年狄拉克首先预言了正电子的存在.1932年安德逊在宇宙线实验中找到了正电子存在的证据.这是物理学上杰出的预言之一.按照狄拉克理论,自由运动电子所满足的方程的能量本征值为:

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

式中 m_0 是电子的静止质量, p 是它的动量, c 为光速.

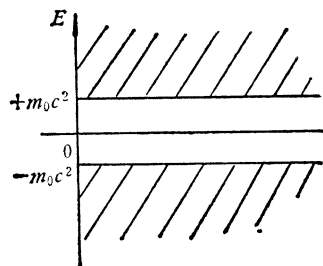
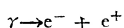


图 1

由于动量的大小可取任何值,故上式所表示的能谱可用图1表示.即 E 可从 $-\infty$ 变化到 $-m_0c^2$, 和从 m_0c^2 变化

到 $+\infty$, 中间有一段从 $-m_0c^2$ 到 $+m_0c^2$ 的“禁区”.正能量对应于自由运动的电子,那么负能量意味着什么呢?狄拉克假设:所有负能级平时都为电子所占据,因而根据泡利原理,不能再容纳电子了.如果有足够大的能量把一个电子从负能级激发到正能级,则在原来被占满的负能级中就出现一个“空穴”.这个“空穴”从实验观察者看来就是电子的反粒子,叫做正电子.它的质量与电子相同,所带的电荷与电子电荷大小相等,符号相反.在宇宙线和许多放射性核的衰变产物中都能找到正电子.能量大于图1“禁区”宽度(即 1.022MeV)的 γ 光子与核的电场相互作用时,会发生下述过程:



(走过原子核旁)

其多余能量变为 e^+ 和 e^- 的动能.

高速正电子进入物质后,因与原子或分子碰撞而很快地被慢化.慢化后的正电子可与物质中的负电子直接发生湮没,此即自由湮没.(慢化过程中也能发生湮没,但几率很小.如能量为 1MeV 的飞行中的正电子仅有百分之几发生湮没.)湮没的结果是将它们的能量全部转化为电磁辐射.湮没辐射有单 γ 、双 γ 和 3γ 三种情况.当正电子与原子内壳层(常为 K 壳层)电子相互作用时,发生单 γ 辐射,当与原子的外层电子或自由电子相湮没时,发生双 γ 或 3γ 辐射,这取决于电子和正电子自旋的相对取向.当自旋反平行时,为双 γ 辐射;当自旋平行时,为 3γ 辐射.双 γ 湮没的几率比其它两种情形大得多.

在双 γ 湮没时,正电子通常是慢化到其动能为与物质温度相应的热能(即 $3/2KT$, 约 0.025eV)时才与一个能量为几个电子伏的电子相湮没,由能量守恒定律可得,两个 γ 光子的总能量为:

$$E_\gamma = 2m_0c^2 + E_+ + E_- \approx 2m_0c^2 = 1.022\text{MeV}$$

式中 E_+ 和 E_- 是正电子和负电子的动能,显然它们与 $2m_0c^2$ 相比时可以略去.又由动量守恒知,两个 γ 光子以几近相反的方向辐射,动量大小几乎相等,因此每个 γ 光子的能量为 m_0c^2 , 即 511KeV .

由类似的分析可知, 3γ 湮没时发射的三个 γ 光子能量之和也为 1.022MeV .为满足动量守恒条件,它们必须在同一平面内辐射,但不得在同一半平面内,湮

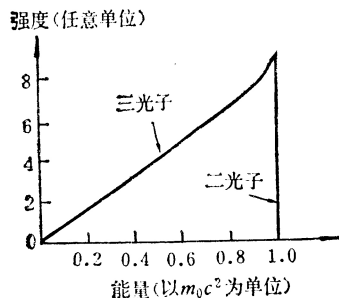


图 2

没后的光子的能量按其相对方向进行分配,可连续地在 $0-m_0c^2$ 之间取值.图2示出了双 γ 和 3γ 湮没的湮没光子能谱.

显然,正

电子的自由湮

没几率与介质中的电子密度有关.介质中电子密度越低,其湮没几率也越低,寿命就越长.实验结果表明,在固体中正电子自由湮没的寿命约为 $1-5 \times 10^{-10}$ 秒.

2. 氦子素

在一些自由电子密度较低的材料中(如气体、液体和各类有机分子固体中),正电子可与一个电子结合形成电子-正电子束缚态,称为氦子素 (Positronium).它是一种结构类似于氢原子的中性体系.根据与氢原子相同的理论,并考虑到这里的折合质量是 $m_0/2$,我们可得到氦子素的能级公式为:

$$E_n = -m_0c^4 / (4n^2\hbar^2)$$

式中 e 为电子电荷, n 为主量子数, $\hbar = h/2\pi$, 而 h 是普朗克常数.由上式可知,它的能级为氢原子的一

半,电离能为 -6.8eV ,玻尔半径为 1.06 埃等等。

氚素素的基态按正电子与电子的相对自旋取向分为单态或三重态,它们都经历自湮没而衰变。无外场时,单态氚素素以辐射两光子形式衰变,寿命为 1.25×10^{-10} 秒。三重态氚素素以辐射三光子形式衰变,寿命为 1.4×10^{-7} 秒。

由上述分析可知,正电子湮没既可发生于自由态,又可发生于束缚态(氚素素),所以实验中得到的湮没特征谱是一混合谱,需要仔细分析以得出所需的结论。

二、实验方法

为研究正电子和氚素素在各种物质中的湮没特性,常常要测量湮没所产生的光子的能谱、正电子的寿命谱、角关联谱以及两光子和三光子的符合计数等。为此还必须正确选择和制备正电子源和样品,并对实验

数据进行快速处理和分析。以下仅对最常用的测寿命和角关联的技术作一说明。

1. 源和样品:

实验中使用得最广泛的正电子源是 Na^{22} 。其半衰期为 2.6 年,衰变方式如图3所示。由图可见, Na^{22} 通过发射正电子或电子俘获衰变到 Ne^{22} 第一激发态(能量为 1.28MeV)。该激发态跃迁到基态时发射能量为 1.28MeV 的 γ 射线,激发态寿命 $\sim 10^{-12}$ 秒。由此可见:使用 Na^{22} 源有下述优点: i) 寿命长,在实验进行期间可认为源强不变; ii) 实验上可认为能量为 1.28MeV 的 γ 射线与正电子同时发射,这在测量寿命谱时极为重要; iii) 能量为 1.28MeV 的 γ 射线在能量上易与湮没后产生的光子(能量为 511KeV)相区别。

所研究的样品应极其纯净,即使极少量的杂质也会使结果有很大的变化。特别要除去氧及各种顺磁类物质。样品还应有足够的厚度,使其能吸收从源所发出的全部正电子。当源为 Na^{22} 时对固体和液体样品,厚度为 200 毫克/ cm^2 就已足够了。

2. 寿命技术

正电子的寿命与湮没特性有关,其范围是 10^{-7} — 10^{-10} 秒。这样短的寿命可用时间谱技术来测量。如前所述,把 Na^{22} 衰变中几乎与正电子同时产生的 1.28MeV γ 射线作为正电子产生的信号,而正电子的湮没则为其辐射的能量为 511KeV 的 γ 射线所标记。测量这两个事件之间的时间间隔,即得正电子寿命。

实验中使用了时间幅度转换技术,将能量为 1.28MeV 的 γ 射线产生的脉冲作为“起始”信号送入时间幅度转换器中,而当 511KeV 的 γ 射线产生的“终止”脉

冲到达时,时间幅度转换器就输出一个高度与“起始”和“终止”脉冲之间的时间间隔成正比的脉冲。将这些脉冲按高度存储于多道脉冲分析器中,脉冲愈高,道数愈多,因此道数就量度了起止时间,即正电子的寿命。

典型的寿命谱仪如图4所示。放射源和样品置于

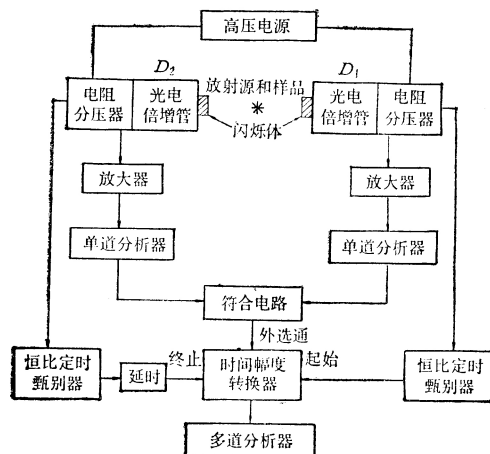


图4 寿命谱仪

塑料闪烁体探测器 D_1 、 D_2 中间。时间幅度转换器的输出脉冲就是能量经过选择,而幅度代表相应时间差的脉冲。将它们送入多道分析器进行分类和记录,就得到我们的样品中的正电子寿命谱。

图5为典型的二组分寿命谱。它包括短寿命成分 τ_1 ,其相对强度为 I_1 ,这个成分与正电子的自由湮没及

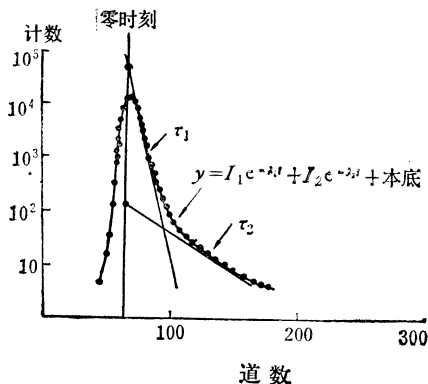


图5 寿命谱

单态氚素素衰变有关, τ_2 是长寿命成分,其相对强度为 I_2 。在寿命谱曲线上, t 时刻每道的计数率 Y 与 I_1 、 τ_1 、 I_2 、 τ_2 有如下关系:

$$Y = I_1 e^{-\lambda_1 t} + I_2 e^{-\lambda_2 t}$$

式中 λ_1 和 λ_2 分别为 τ_1 和 τ_2 的倒数。正电子在复杂的材料中湮没,其寿命谱往往包含三个以上的寿命成分。

3. 角关联技术

正电子-电子的双 γ 湮没特性与介质中电子动量

的分布密切相关。如果正电子-电子对湮没前的动量为零,那末湮没后发射的两 γ 光子间的夹角精确地是 180° 。但实际上,湮没前介质中的电子有一定的动量,故两 γ 之间的夹角与 180° 稍有偏离,可写为 $180^\circ \pm \theta$,这里 θ 是毫弧度数量级。通过测量这一角分布(即角关联谱)就可得到介质内电子动量分布的信息。由于介质结构的变化会引起电子动量分布的变化,故角关联技术可用来研究物质的微观结构。

典型的角关联谱仪如图6所示。这是一种带准直器的 2γ 符合系统。两台单道 γ 谱仪均调定为接收511 KeV的 γ 射线,它们都接到符合单元和定标器。两个探测器中 D_1 固定, D_2 能与 D_1 和样品联线的垂直方向上移动一个小角度。定标器所给出的符合计数与探测器 D_2 移动角度间的关系即我们所关心的角关联谱。

通常的角关联实验中,两个铅准直器的切口均为长狭缝,且两条狭缝彼此平行,其几何安排参见图6。

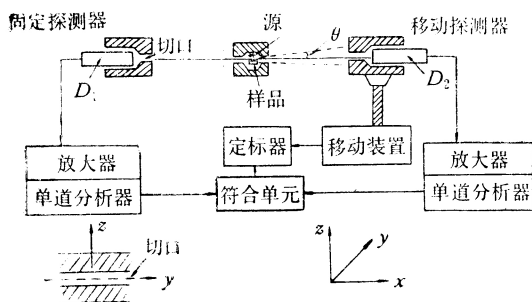


图6 角关联谱仪

图面在 $X-Z$ 平面内,切口方向为 Y 轴方向, D_2 在 Z 方向移动。若电子动量为 $p_\perp$,移动角为 θ ,则可得到下述关系:

$$\sin \theta = p_\perp / m_0 c,$$

这里认为湮没光子动量近似地为 $m_0 c$ 。由于 θ 很小 $\sin \theta \approx \theta$,所以: $\theta \approx p_\perp / m_0 c$ 。

典型的角关联谱示于图7。抛物形实线是费密电子的角分布(例如,正电子在碱金属中的湮没就是这种情形)。图中给出 $\theta_{\max} = 4$ 毫弧度。故由 $\theta = p_\perp / m_0 c$ 可算出相应的费密能为:

$$E = \frac{p_{\perp \max}^2}{2m_0} = \frac{\theta_{\max}^2 \cdot (m_0 c^2)}{2m_0} = 4.08 \text{ eV}$$

图中长点划线表示的钟形分布是正电子与高能电子(如原子内壳层电子或晶格周期性势场所束缚的电子)相湮没时所产生的,这对铜、银及许多离子晶体都能观察到这种谱。图中的窄峰表示慢化到能量为热能时的正电子所形成的单态氦子素湮没所产生的角分布。可见,角关联曲线中若小角度成分丰富,则表示有氦子素形成。

此外,还可将角关联谱仪与寿命谱仪组合起来进行多参数测量,以便在更短时间内得到更全面、更准确

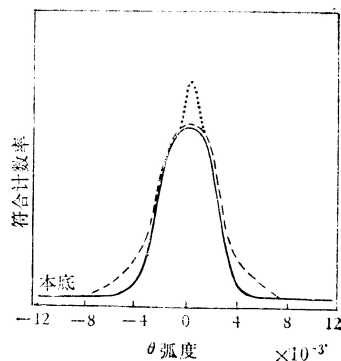


图7 典型的角分布曲线

——费米电子 ——高动量分量单态正子素
的资料,也有为专门目的而设计的实验装置,这里就不一一赘述了。

三、应用举例

在不同的化学环境和物质结构中,正电子和氦子素有不同的湮没特性。因此,正电子湮没方法在化学、生物学和固体物理中的应用是广泛的,下面仅择要介绍之。如前所述,介质的电子密度直接影响湮没谱,所以温度变化、辐射损伤、相变、晶格的有序-无序转变等都使相应的正电子湮没谱发生显著的变化。图8示出了萘中的正电子寿命谱的长寿命分量 τ_2 与温度的关系。曲线的突变点为 81°C ,这正是材料由固态到液态的相变点。

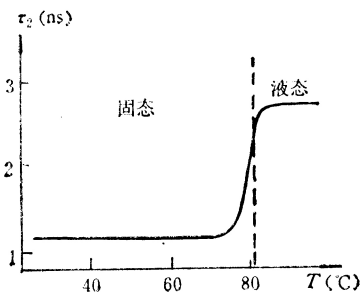


图8 萘中正电子衰变特性与温度的关系

子动量的分布和费密面的形状。此外,还可用来研究晶体的缺陷,尤其是对空位型缺陷有特殊的敏感性。还可研究铁磁金属的磁性及金属的表面特性等等,为此还发展了一些专门的实验技术和相应的理论模型。

应当指出,正电子湮没方法还处于发展阶段,尚待人们进一步地研究和探索。近年来国际上对它的研究相当活跃(见“高能物理”1979年第4期),并且日趋深入,可以预期,正电子湮没方法必将成为进行边缘学科研究的有力工具之一。