

慢正电子束技术在基础理论研究中的应用

林大航 饶建锡

正电子湮没技术已广泛地用来研究凝聚态物质的内部微观结构及表面性质。在基础理论研究方面,人们早已利用正电子和电子形成束缚态、正电子与其它粒子的散射等方法来研究物质间的相互作用。近年来,由于在获得慢正电子束的方法上取得重要进展,在基础理论研究方面,已利用慢正电子束做了大量的工作,得到了一些新的结果。首先,用慢正电子束作了大量正电子与各种气体分子的碰撞实验,并把它与电子和气体分子碰撞实验加以比较;同时把实验值与理论值加以对照,这对量子力学的势散射理论是一个直接的检验。慢正电子束是产生正电子素(positronium 是正电子与电子的亚稳束缚态)的有效手段,正电子素的实验可以用来检验量子电动力学的理论。最近,利用慢正电子束技术,已经在实验上观察到正电子素负离子的形成,测量了它的衰变宽度。此外,还可以利用慢正电子束作正电子极化实验,以及固体物理及表面物理的一些研究。

一、慢正电子束的产生

从 β^+ 放射源辐射出来的正电子的动能的典型值是几百 keV,这种快正电子的能量有一很宽的连续分布,不能任意调节以达到各种实验的要求。人们早就期望能量为 eV 量级的单能正电子的产生,但早期的努力失败了。1958年, W. Cherry 发现^[1,2],当正电子源辐射出来的快正电子入射到 Cr 靶时,从 Cr 表面会有能量为 1 eV 左右的慢正电子发射出来。这是因为当快正电子在真空中打在适当的固体表面上时,有一部分正电子在固体中减速慢化后重新从表面发射出来。重新发射出来的正电子能量在 0—3 eV,经适当的加速和聚焦即成为单能的慢正电

子束。但早期的慢正电子产生的效率很低,平均每 10^7 个人射快正电子只能产生一个慢正电子。这样少的慢正电子还不能达到实验的要求。以后的发展就向两个方向进行,一是提高入射正电子的流强,二是提高快正电子—慢正电子的转换效率。提高转换效率的关键是选择和制备慢化效率高的快-慢正电子转换器。好的转换器应该是密度高,扩散长度大和对正电子有负的亲和性。经过十年多的努力,直到 1971 年,第一个足以用来作实验的慢正电子束才由 D. G. Costello 等人得到。他们利用 55 MeV 的直线加速器产生出来的快正电子,打在薄的镀金云母箔上,用它作快-慢正电子转换器,可使转换效率大大提高。1972 年, K. F. Canter 等人用有 MgO 涂层的金箔做成“威尼斯百叶窗”作为转换器,用 ^{60}Co 作正电子辐射源,可以使转换效率超过 3×10^{-3} ,慢正电子的能量宽度 $\Delta E \approx 2\text{eV}$ 。以后,人们的研究兴趣主要集中在提高转换效率和降低 ΔE 方面。1980 年, S. Pendyala 和 J. W. McGowan 用碳化金(carbonized gold)作转换器,可使转换效率达到 10^{-4} , $\Delta E < 0.2\text{eV}$ 。到目前为止,一个产生慢正电子的最有效的方法是由 A. P. Mills, Jr. 在 1979 年提出的。他用一个经过仔细退火的铜单晶作为转换器,放在真空度为 10^{-10} Torr 的装置中,可以使转换效率达到 6×10^{-3} ,能量接近热能。这是目前所达到的最高效率。

现在,在许多能获得慢正电子束的实验室里,慢正电子束通量均可达到 10^4 — 10^6 e^+/s 。用几居里的强 β^+ 放射源甚至可达到 10^6 — 10^7 e^+/s 的慢正电子束。慢正电子的能量分布宽度可达到 0.2—0.5 eV。可以把这样的慢正电子加速到所需要的能量去进行各种实验。

二、正电子散射实验

虽然, 1932 年 C. D. Anderson 就在宇宙线中找到了正电子, 但由于一直难以获得足够强的能量确定的正电子束, 无法进行 e^+ 和原子的散射实验。有了能量可以控制的低能正电子束后, 在 1972 年出现了关于直接测量 e^+ -原子散射总截面的首次报道。近十年来, 人们对 e^+ 和惰性气体以及其它气体的散射截面进行了反复的实验测量和理论计算, 得到了很多十分有趣的结果。

正电子-原子散射实验的意义在于, 它反映了反物质-物质间的相互作用, 并且帮助我们更好地理解原子、分子对电子的散射。在许多科技领域中, 这是一个十分重要的课题。

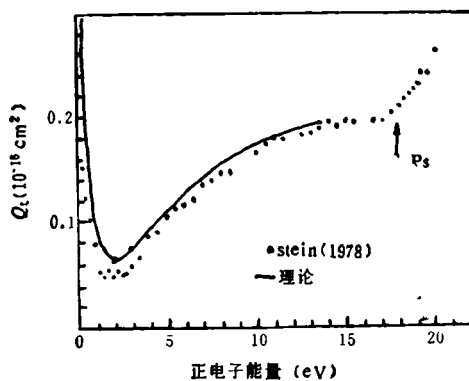


图 1

在过去的十年中, 对 e^+ 和惰性气体散射总截面的测量做了大量的工作, 这些实验结果的总趋势是互相吻合的, 几乎所有各小组的实验点都落在一条窄的曲线带之中。我们以 T. S. Stein 组 1978 年的实验结果^[3] 为例来说明散射截面的一些特点。图 1 画出了低能情况下 e^+ -He 散射总截面 Q_t 的测量结果, 同时也画出了 D. M. Schrader 1979 年理论计算的曲线。从图中可以看出, 一个令人瞩目的特征是在 2eV 附近出现了 Q_t 的最小值。这个现象叫 Ramsauer-Townsend 效应。它最初是由 C. Ramsauer 等人测量 e^- -Ar, Kr, Xe 散射总截面时观察到

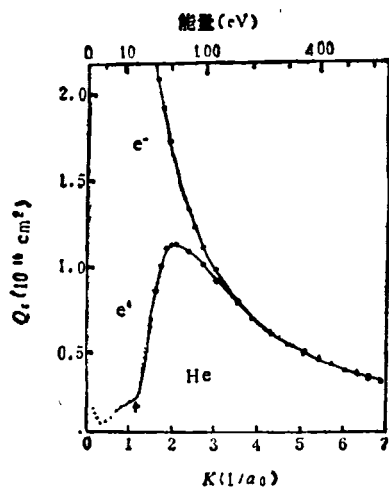
的。Ramsauer-Townsend 效应的原因是入射粒子与气体靶原子间纯吸引作用的量子力学效应, 在正电子散射实验中观察到的这一现象是对量子力学势散射理论的有力支持。

最近, W. E. Kauppila 等人对能量从 0—800 eV 范围的 e^+ 和 e^- -惰性气体的总截面作了比较。 e^+ 散射的明显差别是在低能端的 Ramsauer 效应不同, 正电子只在比较轻的惰性气体 (如 He, Ne) 中出现 Q_t 最小值, 而电子则只在较重的惰性气体 (Ar, Kr, Xe) 中出现。在图 2 中画出了 e^+ -He, e^+ -Ne 的 Q_t 曲线。从图 2 可以看出, 对 He 在低能时 e^+ 截面大约比 e^- 截面小两个量级。这是因为在 e^- 情况下, 静电相互作用和极化相互作用都是吸引的, 它们互相加强。而在 e^+ 情况下, 它们互相抵消。与低能时相差很大的散射截面形成鲜明对照的是, 在 200 eV 以上 e^+ 和 e^- 的截面基本相等 (最多相差 2%), 这是在实验误差范围内的。但是理论计算的结果与这有所不同。D. P. Dewangan 和 H. R. J. Walters 用扭曲波的二级玻恩近似方法计算了 e^+ 和 e^- 与 He 的散射截面, 它们的结果是直到 2000eV 时两者才重合。在 200eV 时, 对电子的扭曲波的计算结果比正电子的相应值高 21%。理论上如何解释这一差异仍是一个有待解决的问题。底特律小组对 Ne, Ar, Kr 和 Xe 所作的 e^+ 散射截面的测量在所研究的高能区并没有发现截面曲线的重合。

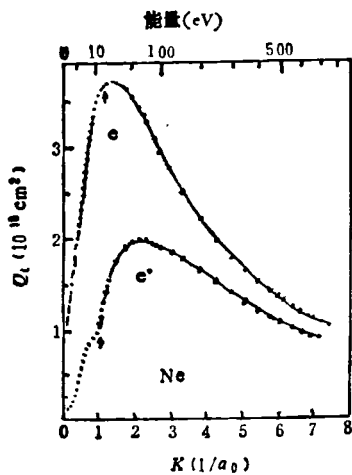
除了惰性气体外, 人们还对 e^+ 和 H_2 , N_2 及 CO_2 气体散射截面作了反复测量, 也作了一些较好的理论计算。在 e^+ - H_2 的实验结果中, 能量在 200 eV 以上时也发现了总截面曲线的重合。

P. G. Coleman 和 J. D. McNutt 最近报道了用 2—9eV 的正电子对 Ar 散射的角度从 20° 到 60° 的微分截面进行首次测量的结果。这个结果与 Schrader 及 R. P. McEachram 等人 1979 年计算的微分截面基本一致。Coleman 等人还用同样的装置和同样的方法测量了 e^- -Ar 的微分散射截面。

在 e^+ 的总散射截面中扣除弹性散射截面



(a)



(b)

图 2

就可以得到非弹性散射截面。在正电子素(Ps)形成阈(图1)以下,总散射截面就是弹性散射截面。如果从Ps形成阈开始把弹性散射截面光滑外推,就可以估计出非弹性散射截面的大小。非弹性散射主要是Ps形成、激发与电离。

对Ps的形成截面,除了可从总截面实验中得到外,1980年M. Charlton等人首次在He, Ar, H₂和CH₄中对正正电子素(O-Ps)的形成截面的能量关系作了直接测量。他们用慢正电子束通过气体散射室,并对O-Ps的三γ衰变进行了三重符合计数。在这个问题上,用各种方法计算得到的理论值也是互相不一致的,它们与实验值之间也有很大差别。

1981年,Coleman组测量了He, Ne, Ar的激发加电离截面。对He和Ar,如果把Charlton等人的 Q_{O-Ps} 结果及上述激发加电离截面都加到由外推法得到的弹性散射截面曲线上,就会发现它比总散射截面曲线低很多。这表明还有大部分的非弹性散射截面没有测量到。有人预言,在 e^+-He , e^+-H_2 系统中可能存在其它的共振态。但到目前为止,还没有任何实验观察到 e^+ 散射的这些共振。

三、正电子素实验

传统的正电子素产生技术是利用正电子通过气体或粉末时形成的,这种方法产生的正电子素数量很少。有了慢正电子束技术以后,很快就发展了一种产生Ps的新技术——Ps在真空中的产生技术。这种技术综合了慢正电子束技术和超真空技术。高真空装置中产生的低能慢正电子束射到Au, Ti, Cu等材料的表面时,有80%以上的人射正电子可以形成Ps。这些Ps马上脱离靶表面而进入周围的真空区。这种在真空中形成Ps的方法无疑是对传统方法的很大改进。

真空Ps形成技术的第一个成果就是Ps第一径向激发态的测量。因为Ps中只有 $1/10^4$ 的态处于 $n=2$ 的激发态,一般实验很难发现。1975年Canter, Mills和S. Berko^[1]首次观察到正电子素喇曼- α 辐射,继而测量了 $n=2$ 的Ps态的精细结构。1976年,D. W. Gidley等人用Ps真空形成技术直接测量了O-Ps真空衰变率。这些高精度的测量大大鼓舞了理论物理学家,他们对正电子素的理论重新计算,从而检验量子电动力学的理论到底准确到什么程度。例如,Gidley等人测得 $\Gamma_{3\gamma}(1^3S_1, \text{exp})=7.09(2)\times 10^6\text{s}^{-1}$ 。这比原先计算的理论值 $7.242\times 10^6\text{s}^{-1}$ 低好多。于是人们又回过头来检查理论计算的正确性,结果发现辐射修正项中有一项符号错误。重新计算以后,1979年W. E. Caswell和G. P. Lepage才给出与实验一致的理论值 $\Gamma_{3\gamma}(1^3S_1, \text{th})=7.03858(18)\times 10^6\text{s}^{-1}\pm 0.00038\times$

10^6s^{-1} . 1978年, Gidley等改进实验方法后又重新测得 $\Gamma_{3\gamma}(1^3\text{S}_1, \text{exp}) = 7.050(13) \times 10^6\text{s}^{-1}$.

四、正电子素负离子的发现

正电子素负离子 (Ps^-) 是 $e^-e^+e^-$ 的三体亚稳束缚态. 还在实验上发现正电子素以前, 就有人从理论上预言了它的存在. 1946年, J. A. Wheeler 首先从理论上论证了 Ps^- 的稳定性, 并计算了它的结合能. 到目前为止, 关于 Ps^- 基态能量的最准确的计算也许是 1964年 A. A. Frost 等人的结果. 其计算结果是 $E_{\text{Ps}^-} = -7.129\text{eV}$, 即结合能 $E_{\text{Ps}^-} - E_{\text{Ps}} = 0.327\text{eV}$. 1968年, G. Ferrante 计算出, Ps^- 的 2γ 湮没率是 $\Gamma = (0.502\text{ns})^{-1}$.

多年来, 许多实验物理学家一直试图寻找 Ps^- . 有了能量可调的慢正电子束技术后, 1981年贝尔实验室的 Mills 找到了一种产生 Ps^- 的实验方法^[4]. 在高真空条件下, 用单晶铜产生的慢正电子束入射薄碳靶, 调节入射正电子能量, 使一部分正电子可完全通过碳膜. 这些正电子从碳膜一出射, 就有一些正电子与两个电子结合形成 Ps^- . 再用一反向加速电压将产生的 Ps^- 加速, 利用 Ps^- 的 2γ 湮没的多普勒能移, 测出其荷质比 $M/Q = 3.011(14) m_e/c$. 这正好证明了产生 2γ 辐射的粒子就是 Ps^- (其 $M/Q = 3m_e/c$).

继实验上发现 Ps^- 后, Mills 进行了一系列有意义的测量. 1983年, Mills 测得 Ps^- 的 2γ 湮没率^[5] $\Gamma = 2.09(9)\text{ns}^{-1}$, 这比早期计算的值大, 但与最近 Y. K. Ho 的计算值相近.

最近, 我们用三参数的变分法并考虑 Ps^- 系统的到 v^2/c^2 阶的相对论修正后, 计算了 Ps^-

的基态能级. 得到的结果是 $E_{\text{Ps}^-} = -7.0134\text{eV}$, 并期望能同最近可能得到的实验值相比较.

Ps^- 是一个新的纯轻子系统, 对它的一系列基本性质的研究将会进一步促进量子电动力学的发展.

五、低能极化正电子实验

1979年, P. W. Zitzewitz 等人发现, 从镀 MgO 的金箔中发射出来的慢正电子是极化的, 其极化度是 $P = 0.22 \pm 0.02$. 大家知道, 低能电子衍射是测量晶体结构的有效方法, 现在可用极化正电子来代替电子作衍射实验, 这就丰富了可测量的内容. 一些初步的实验表明, 从极化低能正电子衍射中可以得到更多的晶体表面参数. 由于用了正电子, 可以消除交换力的影响, 再同电子衍射的结果比较, 就可以检验交换力的性质. 这对磁性物质的研究是极为可贵的.

用极化正电子可以研究分子的活性, 特别是生物分子的光学活性.

此外, 随着极化度及极化度测量精度的提高, 将会给人们提供一些信息去分析慢正电子发射及极化本身的机制.

参 考 文 献

- [1] S. Berko and H. N. Pendleton, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **30**(1980), 543.
- [2] A. Rich, *Rev. Mod. Phys.*, **53** (1981), 127.
- [3] T. S. Stein and W. E. Kauppila, *Positron Annihilation*, eds. by P. G. Coleman, S. C. Sharma, L. M. Diana, North-Holland Publishing Company, (1982), 49.
- [4] A. P. Mills, Jr., *Phys. Rev. Lett.*, **46**(1981), 717.
- [5] A. P. Mills, Jr., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 671.