

慢正电子的应用

沈子威

陆祖荫

(清华大学生物科学和技术系) (中国科学院高能物理所)

一、表面分析

慢正电子近年来大量应用于表面分析, 尤其研究接近表面几十到几千埃层内结构状态。当慢正电子入射到金属, 受到声子和等离激元 (Plasmon) 散射很快损失能量, 其中一些慢正电子同金属晶体中的电子发生湮没, 大部分慢正电子扩散到表面不断热化, 接近表面遇到表面偶极层, 这偶极层可以给慢正电子一个负功函数 ϕ_+ 。当慢正电子离开表面时遇到一个有效位阱, 在阱边缘可以出现多次散射, 一部份 e^+ 形成电子偶素离开表面或以自由 e^+ 离开表面, 而其余慢正电子热化后产在表面势阱内, 一旦落入阱内就可同电子发生湮没, 产生2个 γ 光子, 如果自由电

子偶素由于热波动得到足够能量它还可以从表面逸出, 这些过程可用图1表示^[1]

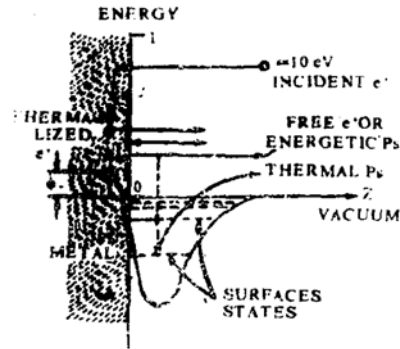


图1.慢正电子接近表面时出现几种过程的示意图。在表面处的 2γ 湮没及Bragg散射未表示图上。

为了有一个数量概念, 上述过程用数学表达式表示慢正电子中作为自由正电偶素的份额为

这个研究与开发的阶段大约需要100小时的束流 (包括调束时间), 之后, 就可以开始工业辐照阶段。

四、其他应用

在多种多样的工业应用中, GANIL实际作的是: 无反射玻璃, 晶体染色和其他由潜径迹派生出来的其他应用, 由于GANIL加速器在1988年底将关闭, 为了实现提高重离子能量的“O. A. E”计划 (Le Point Sur L'operation D'Augmentation D'Energie), 这个应用研究的计划直到1989年6月以后才能恢复。

参考文献

(1) B. E. FISCHER and R. SPOHR,

Rev. of Mod. Phys. 1983. 55-907

(2) FLEROV G. N, BARACHENKOV V. S. ouspeki, Phys. Naouk, 1974, V114 p.351

(3) D. BUSARDO, private communication

(4) C. BIETH, Etudes pour la réalisation industrielle de membranes microporeuses au GANIL, GANIL 85R/07/TP/01

(5) E. BALANZAT, Multitrous dans les membranes tamis, aspects visuels, CIRIL EB/SL-87/51

(6) P. BERGEZ, IRDI/DESICP(CEA), Caracterisation des membranes Biosystem International DP/SPCM/87/4178/PB/ml

(7) M. BERNARD, BSI-MODULETEC, Rapport d'Etude n°1 mai 1987

$$f_i = \frac{Zf_s}{r+Z} = \frac{Z_0 e^{-E_e/KT} f_s}{r+Z_0 e^{-E_e/KT}}$$

式中 f_s ——表面势阱捕集的份额,

r ——慢正电子表面态的湮没率,

$E_0 = E_b + \varphi_+ - \frac{1}{2}R_\infty$,

$\frac{1}{2}R_\infty = 6.8\text{eV}$, P_s 基态结合能

E_b ——在表面正电子结合能,

φ_+ ——负功函数 (同金属材料有关)。

Z_0 值是这样定的, 正电子的热速度 $v \approx 10^7\text{cm/s}$ 设表面位阱大小 $a \approx 10^8\text{cm}$, $Z_0 \approx v/a = 10^{15}/\text{sec}$ 实际上 Z_0 是同温度有关系的。

由入射的慢正电子形成的 P_s 的份额 $f = f_0 + f_i$ 。

式中 f_0 ——非热化慢正电子份额, 它直接形成正电子偶素。

在室温下 $f = 0.9$, 在高温下 $f = 0.5$ 。

Lynn 观察了 Al 单晶表面 5 埃厚的氧化层慢正电子是由 Cu(111)+S 正电子慢化器产生的^[2]。

Trifchäuser 和 Kögel 提出可以利用单能慢正电子测量了未损伤表面下几个埃深度剖面图^[3]。

慢正电子同电子有相同质量, 当从一个单晶表面散射时会显出同样的衍射, 这些衍射效应是一种非常好的表面分析手段。最近 D. R. Cook 就是利用这种方法研究 LiF(100) 表面的弹性和非弹性散射。整个实验装置见图 2^[4]。

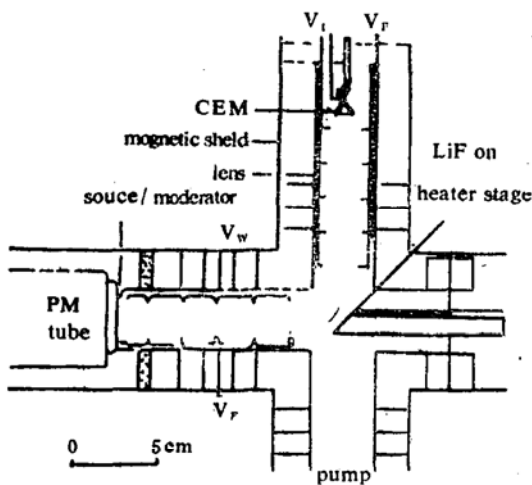


图2. 低能正电子衍射实验装置图

低能正电子衍射 (LEPD) 比低能电子衍射 (LEED) 的优点是正电子同固体作用以较简单的方式, 并且被离子核心排斥, 而且可以得到比 LEED 更有意思的信息^[4]。

正电子衍射图在 14.5eV, 23eV, 55eV 处有三个峰, 而电子衍射图只在 23eV 有一个峰。

目前正电子衍射方法问题是束流强度太弱, 通常 LEED 电子能量为 25eV, 束截面 $d \leq 1\text{mm}$, 散角 < 0.01 弧度。而按 Cu(111)+S 背散射变换器为例束截面大约 10mm, 固有能量 0.25eV, 散角 $\theta = 1$ 弧度。根据 Liouville 理论 θ 、 d 、 E 之间有近似关系式 $\theta \cdot d \sqrt{E} = \text{常数}$ 。如果要求正电子能量为 25eV, $\theta = 0.01$ 弧度, 则束截面至少 100mm, 如果满足 $d = 1\text{mm}$, 必须限束 1/100, 此时强度损失 10,000 倍。如开始正电子强度为 $10,000\text{e}^+/\text{秒}$, 到最后只有 $100\text{e}^+/\text{秒}$, 如果探测效率为 50% 则可探测到 $50\text{e}^+/\text{秒}$ 。实验得到的正电子衍射图是用较大的 θ 和 θ' 的正电子束流得到的衍射图。

二、电子偶素原子物理

电子偶素正式发现在 1951 年, Deutsch 在研究 e^+ 在稀有气体中湮没时, 测得到属于 O— P_s 湮没的长寿命成份并给出 $\tau_{PS} \sim 1.3 \times 10^{-7}$ 秒。

电子偶素 P_s 一般都是正电子热化后与电子结合形成的, 其结合能为 6.8eV, 所以慢正电子比较容易形成电子偶素。

电子偶素的是类氢原子, 由轻子组成的电磁作用束缚态, 它是一个最简单的束缚态, 是研究量子电动力学 (QED) 束缚态的最理想体系。从 P_s 的 $1^3 \rightarrow 2^3S$ 的能级跃迁可以求出精细结构常数 α 项。从 1934 年预言 P_s 存在到 1978 年之间进行了一系列的研究。1979 年以后由 A. P. Mills 得到慢正电子, 使电子偶素原子物理开辟了广阔的研究领域。正如图 3 所示, 使慢正电子形成电子偶素与激

光相干可得到电子偶素一些新的内容^[6]。

电子偶素还可以形成电子偶素负离子 ($e^+e^-e^-$)，类似于由质子束形成 H^- 离子一样。利用束箔技术一样可以得到 (e^+e^-)。用一束500eV正电子在真空中轰一块50埃厚的C箔，慢正电子同一或二个电子相结合，然后再加速到几个电子伏，探测到在慢离子飞行中由于湮没发生的多普勒频移的 γ 射线。电子偶素负离子的存在，理论上首先由Wheeler指出^[6]，最近计算表明电子偶素原子和一个自由电子的结合能是0.32667eV，用电子偶素负离子还有一些有兴趣的实验可做，包括光电离产生快电子偶素，并得到可调 γ 射线，作为一种精确的校准连续 γ 射线波长的标准。

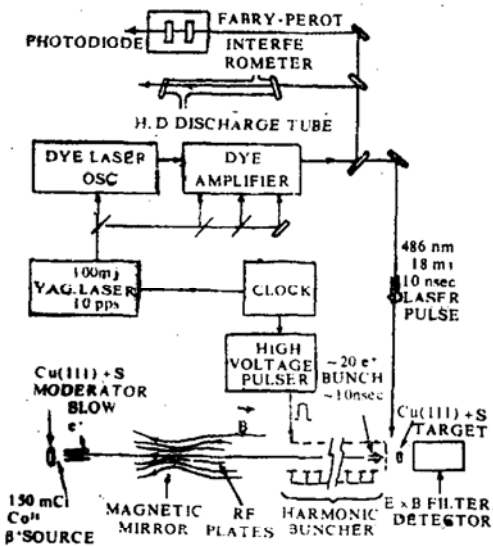


图3. 电子偶素与激光相干测定电子偶素 3S_1 — 2S_1 双光子动能实验装置图

慢正电子还可以同分子散射，进行分子激发态的研究。

三、生命科学——生物分子的手征性

生物大分子的旋光性首先是发现细菌的科学家巴士德发现的。奇怪的是在自然界中化学分子左旋和右旋二种异构体同时存在，而生物分子是单一旋光性。如蔗糖、葡萄糖

是右旋的，而果糖是左旋的，生物的氨基酸都是左旋的。二种不同旋光性的化学异构体如何在漫长的进化过程中变为单一旋光性的生物大分子，1957年Ulbrich指出了手征性来自宇称不守恒的假设^[7]。

为了证实这个假设，从1968年到1974年盖莱和庞纳分别用天然 β 源来照射一些外消旋的氨基酸，希望得到光学活性^[8,9]，但是由 β 粒子同底物作用产生大量次级电子因此很难分辨出与初级 β 粒子有关的效应。1973年盖莱用纵向极化慢正电子射入固体的氨基酸D、L异构体。观察到慢正电子与D、L异构体的电子形成O—Ps和P—Ps比例不同，正电子偶素(O—Ps)的慢正电子与电子的极化相平行，它衰变为三个 γ 光子，寿命为140毫微秒；而仲电子偶素(P—Ps)的正电子和电子的极化反平行，它衰变为二个 γ 光子，寿命为125微秒。实验结果如下：

表1 用 $^{90}Sr+^{90}Y$ 源辐照几种生物分子的正电子湮没时间谱的强度 I_2 (%)

	I_2	
苯氨基丙酸	11.0	13.4
酪氨酸	4.4	4.7
三羟苯氨基丙酸	1.6	2.2
色氨酸	12.0	18.0

表2 用极化低能正电子对左右旋的氨基酸的对称性

	左右对称性
胱氨酸、色氨酸	$<7 \times 10^{-4}$
酪氨酸	$-(31 \pm 7) \cdot 10^{-4}$

从表上看存在不对称效应，但是不十分明显，主要由于放射性辐射的正电子在与电子形成电子偶素之前因多次碰撞而造成的极化方向的变化，所以用慢正电子进行生物分子的手征性研究会得到较好的结果。1981年A. Rich等人用极化低能正电子对左旋和右旋氨基酸进行了试验，得到一些有希望的结果^[10,11]。

四、透射正电子显微镜 (Transmission positron microscope简称 TPM)

1988年6月首次由美国密歇根大学物理学家James Van Hous和Arthur Rich发明了这种显微镜^[12]。虽然,目前不论从分辨率还是放大倍数都不如透射电镜 (TEM), 以后会得到进一步改进, 更主要的是TPM比起TEM更容易“看到”由电子云围绕着的正电荷核的靶原子世界。另外, 辐射的正电子能量很低, 可以成像生物样品如RNA, 血红蛋白及其它分子和细菌。

参考文献

1. S. Chu et al., Phys. Rev. B23(1981) 2060
2. K. Lynn, Phys. Rev. Lett. 44 (1980)

3. W. Triftschäuser et al., Phys. Rev. Lett.48(1982)1741
4. D. R. Cook et al., Appl. Phys. A34 (1984)237
5. S. Chu et al., Phys. Rev. Lett. 48 (1982)1333
6. J. A. Wheeler et al., Sci.48(1945)219
7. F. Vester et al., Naturwissenschaften 46(1959)68
8. A. S. Garay, Nature(London)219(1968) 338
9. W. A. Bonner, J. Mol. Evol. 4(1974) 23
10. A. S. Garay et al., Chem. Phys. Lett. 23(1973)549
11. D. W. Gidley et al., Nature 297(1982) 639
12. J. V. Hous and A. Rich, To be published in Physical Review Letter 1988.