

用 CO₂ 激光的大角散射能测得离子温度,而实验并不困难. 对于低密度,高温度的等离子体,应用 CO₂ 单模激光进行外差探测,在原则上和模拟实验上是可行的. 如要用于大型实验装置,还需解决一些技术困难. 而更有效的是应用远红外激光的汤姆逊散射,目前国外大力开展这方面的研究工作. 激光器和远红外探测器的灵敏度已基本满足了散射实验的要求. 虽然还没有应用于象托卡马克这样的装置,但可以期望,在一两年内会得到远红外激光的汤姆逊散射的实验结果.

参 考 文 献

[1] D. E. Evans, *Reports on Progress in Physics*, **32** Part 1(1969), 207.
 [2] 村岡克紀、野島邦夫、俊藤誠一, 核融合研究, **37** (1977), 487.
 [3] W. A. Peebles and M. J. Herbst, *IEEE Trans.*, **PS-6**(1978), 564
 [4] A. Gondhalekar and E. Holzhauser, *Phys. Letters*, **51A**(1975), 178.

[5] D. R. Baker, N. R. Heeekenberg and J. Meyer, *Phys. Letters*, **51A**(1975), 185
 [6] D. R. Baker, *IEEE Trans.*, **PS-5**(1977), 27.
 [7] A. Gondhaleker et al., *IEEE J.*, **QE-11**(1975), 103.
 [8] A. Gondhaleker and F. Keilmann, *Opt. Commun.*, **14**(1975), 263
 [9] F. R. Arams et al., *IEEE J.* **QE-3**(1967), 484.
 [10] D. L. Jassby, D. R. Cohn, B. Lax and W. Halverson, *Nucl. Fusion*, **14**(1974), 745.
 [11] B. Lax and D. R. Cohn, *IEEE Trans.*, **MTT-22** (1974), 1049.
 [12] H. C. Praddande and P. Woskoboinikow, NASA-CR-2974 (1978).
 [13] D. E. Evans, L. E. Sharp, W. A. Peebles and G. Taylor, *IEEE J.*, **QE-13**(1977), 54.
 [14] P. W. Smith, *Proc. IEEE*, **60**(1972), 422.
 [15] P. Woskoboinikow et al., *J. Appl. Phys.*, **50**(1979), 1125.
 [16] Reference Data for Radio Engineers, Howard W. Sams and Co., Inc., Indianapolis, Fifth Ed. (1972).
 [17] H. R. Fettermann et al., *IEEE Trans.*, **MTT-22** (1974), 1013.
 [18] R. A. Murphy et al., *IEEE Trans.*, **MTT-25** (1977), 494.

正 电 子 湮 灭

周宗源 伍必和

(南京大学物理系)

正电子是电子的反粒子. 自从 Dirac 1930 年从相对论的观点预言正电子存在后^[1], 1932年 Anderson 就在宇宙线的云雾室照片中发现了静止质量为 m_0 , 电荷为 $+e$ 的粒子,证实了正电子的存在. 正电子的发现不仅对原子核物理、基本粒子物理等基础理论研究方面作出了重大的贡献,而且为固体物理、医学、化学等各方面的应用开拓了广阔的前景,形成了富有生命力的边缘学科.

1942年 R. Beringer 和 C. G. Montgomery 将正电子湮灭的 γ - γ 角关联技术首先应用于 Cu 和 Pb^[2]. 然而正电子湮灭实验盛行还是在第二次世界大战之后,特别是在最近十年. 正电子寿命的测定比角关联实验约迟十年. 1952年 S. DeBenedetti 和 H. Riching 首次应用正电子寿命测量技术于固体物理研究^[3,4], 测定了各种物质中的正电子寿命. 由于正电子湮灭有一系列的特性,使它在介质中电子状态的研究、晶格缺陷的研究等领域成为非常有用的手段. 1965年在 Detroit 召开了首届正电子湮灭国际会议. 以后 1969

年在 Saclay、71年在 Kingston、76年在 Denmark、79年在东京召开二~五届正电子湮灭的国际学术会议^[5-8],提出了许多报告. 近年来,随着核物理探测技术、毫微秒技术的飞速发展, Ge (Li) 谱仪、多道分析器和电子计算机的在线应用^[9],使正电子湮灭技术有了很大的提高,应用范围也日益广泛. 本文试从正电子湮灭的特性、实验技术及其应用作一介绍,以期对这一领域有一个总的了解.

一、正电子湮灭的特性

1. 湮灭的过程

根据 Dirac 的理论,满足 Dirac 方程的电子的能量可以有正值或负值. 在正常情况下,所有负能级都被占据,不能再容纳电子. 所观察到的电子代表超过负能级的电子数目. 当正能态的负电子填充负能态的空穴时,即电子从正能级向负能级跃迁时,而负能级又全被占满,此时多余的能量就全部转变为 γ 辐射释放

出来, 这就是实验上所观察到的正、负电子的湮灭现象。电子偶湮灭时产生的 γ 射线能量为

$$E_\gamma = 2m_0c^2 + E_+ + E_- \quad (1)$$

这里 $E_+ + m_0c^2$ 和 $E_- + m_0c^2$ 各为正、负电子的总能量, m_0 为 e^- 和 e^+ 的静止质量。

由于动量守恒的关系, 如果没有足够强的外界力场可以吸收动量, 电子偶湮灭后是不可能只产生一个光子的。除非在与原子最内壳层电子发生湮灭时, K 层电子或原子核吸收了反冲动量, 会发生单 γ 辐射外, 通常都放射出两个光子。由于受到电子偶波函数对称性质的限制, 即当 e^+ 和 e^- 自旋平行时, 也可能产生发射三个光子的湮灭。这三种过程的费曼图如图 1 所示。它们之间的截面比为

$$\frac{\sigma(3)}{\sigma(2)} \approx \alpha = \frac{1}{137}, \quad \frac{\sigma(1)}{\sigma(2)} \approx \alpha^4.$$

因此, 湮灭辐射主要表现为双 γ 辐射。

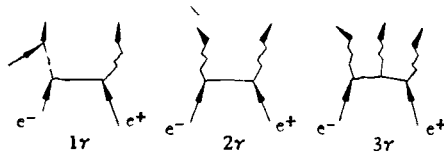


图 1 正电子湮灭的费曼图

2. 双光子湮灭

双光子湮灭辐射是当正、负电子自旋反平行时产生的。在电子偶的质心系统中, 两个光子的能量相等, 方向相反的射出。在一般情形中, 电子偶在湮灭前的瞬间的速度非常小, 它们的质心系统接近于实验室坐标系统, 每个光子的能量差不多就是 m_0c^2 (即 511 keV)。

(1) 湮灭几率和正电子寿命

Dirac 1930 年给出一个总能量为 γm_0c^2 和动量为 $\beta \gamma m_0c$ 的正电子和物质中静止的负电子湮灭时, 其几率可以用负电子的有效截面 σ 来表示:

$$\sigma_{\text{湮灭}} = \frac{\pi r_0^2}{\gamma + 1} \left[\frac{\gamma^2 + 4\gamma + 1}{\gamma - 1} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \frac{\gamma + 3}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \right], \quad (2)$$

其中 $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $\beta = v/c$, $r_0 = \frac{e^2}{m_0c^2}$ 。在计算(2)式时曾假定粒子是完全自由的, 甚至电子间的库仑引力也略去了。公式中的 r_0 为电子的经典半径。当电子偶的相对速度 v 不大时, (2)式可简化为

$$\sigma_{\text{湮灭}} \approx \pi r_0^2 c/v. \quad (3)$$

那么在每 cm^3 有 n_e 个电子的物质中, 湮灭几率为

$$R = \sigma_{\text{湮灭}} \cdot n_e v \approx \pi r_0^2 c n_e = 4.52 \times 10^9 \rho Z / A \text{sec}^{-1}, \quad (4)$$

其中 ρ , Z , A 分别表示物质的密度、原子序数和原子量。由(4)式可见, 湮灭几率与正电子的速度无关, 并且与电子密度成简单的线性关系。因此, 速度不大的正电子在介质中的平均寿命则为

$$\tau = \frac{1}{R} \approx \frac{1}{\pi r_0^2 c n_e}. \quad (5)$$

从(5)式可见, 正电子在介质中湮灭速率依赖于电子的密度, 介质中 n_e 越低, τ 越长; n_e 越高, 则 τ 越短。正电子寿命依赖于 n_e 的这一特性使它在研究材料内部状态上有很大的价值, 如温度、晶化度的变化以及辐射损伤引起的材料结构的变化和相变等都引起正电子寿命的明显变化, 因此可以通过正电子寿命的测量来研究这些结构的变化。

(2) 湮灭 γ 角关联和多普勒效应

电子偶湮灭特性还和介质中电子动量分布有关。从(1)式可见, 当 $E_+ = E_- = 0$ 时, $E_\gamma = 2m_0c^2$, 即每个 γ 射线的能量为 511 keV, 并且两个 γ 射线沿精确的 180° 方向发射。但是由于湮灭的 e^+ , e^- 不是完全静止的, 介质中的电子动量有一定的分布, 它们的质心相对于实验室坐标还有一个在 γ 射线发射方向上的大约等于 $6 \times 10^{-3} m_0c$ 的平均动量, 这就引起了谱线的多普勒加宽。同时, 湮灭电子偶的动量也使得发射出的两个 γ 光子的方向并不互成 180° 而是有一个小角度的偏离, 从而构成一定的角分布。通过湮灭辐射角分布和多普勒加宽谱的测量就可以反映出介质有关电子动量分布的信息。

3. 正子素 (positronium)

正子素是正、负电子结合成的一个呈电中性的系统, 类似于质子和电子结合成氢原子, 以前曾称它为氢原子, 记符号为 Ps , 其折合质量为 $\mu = \frac{1}{2} m_0$, 玻尔半径比氢原子大一倍, $a_{\text{Ps}} = \frac{\hbar^2}{\mu e^2} = 2 a_{\text{H}} = 1.05 \text{ \AA}$, 电离电位为 $I_{\text{Ps}} = \frac{1}{2} I_{\text{H}} = 6.8 \text{ eV}$, 基态波函数为 $\psi_{00} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \left(\frac{1}{2a_{\text{H}}} \right)^{3/2} 2e^{-r/2a_{\text{H}}}$ 。根据 e^+ 和 e^- 的自旋取向不同, Ps 分为 1S_0 和 3S_1 两种状态, 前者 e^+ 和 e^- 自旋反平行, 记符号为 P-Ps ; 后者 e^+ 和 e^- 自旋平行, 记符号为 O-Ps 。 P-Ps 的寿命短, 约 $1.25 \times 10^{-10} \text{ sec}$, 放出双 γ 光子; O-Ps 在与周围介质没有相互作用时则以比较长的寿命约 140 ns 放出三个 γ 光子而湮灭。对某物质中正电子的长短两种寿命的观测就可以成为判别正子素存在与否的关键。当 O-Ps 存在于介质中, O-Ps 内的 e^+ 同外部介质的 e^- 进行双光子湮灭, 这时正电子的寿命就比 140 ns 短, 在多数场合下, 观测到 (0.5—几十个) ns 的范围, 这种湮灭称之为拾取湮

灭 (Pick off), 图 2 形象地说明了这一过程。由于电子和分子中的自旋相反的电子的交换, 使 3S_1 态转变成 1S_0 态, 正电子湮灭加快, 因此正电子的寿命取决于正子素的状态和它与周围介质的相互作用, 这就为正子素化学研究提供了其它技术所不能获得的信息。

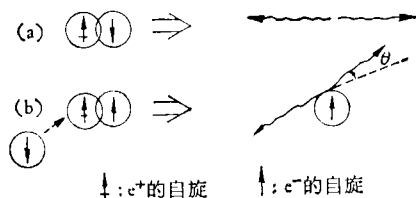


图 2 P-Ps 的自由湮灭 (a) 和 O-Ps 的拾取湮灭 (b)

二、实验技术

1. 正电子源

进行正电子湮灭实验, 首先需要正电子源, 通常是利用 β^+ 衰变的放射性同位素来获得正电子常用的 β^+

衰变正电子源如表 1 所列。其中 ^{22}Na 半衰期长、 β^+ 衰变的比例大, 因此是作 e^+ 湮灭寿命实验最好的源。但是由于它通常要用回旋加速器的质子长时期照射 ^{23}Mg 来产生, 因此, 价格昂贵, 想要获得 0.1 Ci 的 ^{22}Na 源也是比较困难的。虽然也可以通过快堆内作为冷却剂的 ^{23}Na ($n, 2n$) ^{22}Na 反应来获得, 但由于不能经济的加以分离, 因此实用价值不大。而 ^{64}Cu 虽然半衰期短, 但制造简单便宜。1 g ^{63}Cu 放在热中子通量为 8×10^{13} 中子/sec \cdot cm 2 的反应堆上照射 20 分钟, 就能得到 1 Ci 的 ^{64}Cu 源^[10]。特别是在研究 Cu 和 Cu 基合金的费密面时, 将 Cu 合金放在高通量反应堆中照射, 使之在晶体内部产生 ^{64}Cu 强正电子源, 防止了 e^+ 的损耗, 相应提高了源强减少了统计误差, 从而获得高的分辨率^[11]。 ^{58}Co 可以在反应堆内由快中子照射而产生, 故使用也很广泛。 ^{90}Nb 常用于研究强磁性金属的费密面。在有医用回旋加速器的地方常常利用来生产半衰期短的 ^{11}C 和 ^{13}N 等简单方便的 e^+ 源。在有电子直线加速器的地方, 常常用 (γ, n) 反应来生产各种缺中子的 β^+ 衰变放射源^[12]。

表 1 正电子源的特性

e^+ 源	半衰期	β^+ 衰变比例%	e^+ 能量 MeV	产生反应
^{22}Na	2.60 年	90.55	0.545	^{23}Mg (p, d); ^{27}Al ($^3\text{He}, 2\alpha$); ^{23}Na ($n, 2n$); ^{23}Na (d, t); ^{20}Ne (α, d); ^{24}Mg (d, α); ^{23}Mg (p, α); ^{26}Mg ($p, \alpha n$)
^{58}Co	17.54 小时	79	1.513	^{58}Ni (p, α); ^{56}Fe ($p, 2n$); ^{54}Fe (p, γ)
^{57}Ni	36.0 小时	41	0.848	^{56}Fe ($^3\text{He}, 2n$); ^{58}Ni (p, d)
^{58}Co	71.3 天	15.5	0.473	^{58}Ni (n, p); ^{55}Mn (α, n); ^{58}Fe (p, n)
^{64}Cu	12.71 小时	19.3	0.6553	^{63}Cu (n, γ); ^{65}Cu ($n, 2n$); ^{64}Zn (n, p)
^{90}Nb	14.59 小时	54	1.50	^{90}Zr (p, n); ^{90}Zr ($d, 2n$)
^{11}C	20.39 分	99.8	0.96	^{11}B (p, n); ^{10}B (d, n); ^{10}B (p, γ); ^{14}N (p, α)
^{13}N	9.961 分	100	1.199	^{10}B (α, n); ^{10}B ($^6\text{Li}, t$); ^{12}C (d, n); ^{13}C (p, n); ^{12}C (p, γ)

利用电子直线加速器的 γ 辐射在介质中引起的电子偶效应, 通过电场和磁场系统引出 e^+ 束, 以此作为强正电子源的尝试由于以下原因而使实际应用起来很困难。(1) 在费用相同时, 产额少。(2) 加速器束流稳定度的影响, 使 e^+ 源的稳定性能差。(3) 本底 γ 射线增加, 使偶然符合及假符合计数增加^[13]。

为了获得廉价的强正电子源, 使用高通量反应堆是最为有效的。在表 2 中可见, (3), (7) 两种情况在介质中湮灭的正电子数最多, 利用率最高。前者是内藏源情形, 后者是在高通量堆的情形。由此可见, 在高通量反应堆附近进行正电子湮灭实验, 在某种意义上同进行中子散射实验一样是个非常有效的方法。

2. 正电子寿命谱的测量

正电子寿命谱仪装置方框图如图 3 所示。一般使用 10 μCi ^{22}Na 作 e^+ 源, 其衰变纲图见图 4。 ^{22}Na 进行 β^+ 衰变后变成 $^{22}\text{Ne}^*$, 而 $^{22}\text{Ne}^*$ 在 3×10^{-11} sec 的间隔内放出 1.28 MeV 的 γ 射线而降到基态。因此可以近似认为放射 e^+ 的时刻即是放射 1.28 MeV 光子的时刻, 因而可将探测到 1.28 MeV γ 射线的时刻作为 e^+ 产生的起始信号。 e^+ 进入介质后, 通过与电子、离子的非弹性散射, 很快被慢化而成为与分子热运动相平衡的热正电子, 然后以 $\sim kT$ 的动量在介质中运动, 直到与一个离核相当远的电子湮灭为止, 湮灭时产

表 2 各种情况下的正电子源的比较^[13]

		作者或实验条件	e ⁺ 源的放置	e ⁺ 源的种类	源强	最初24小时内从e ⁺ 源内所放出的e ⁺ 数N ₀	e ⁺ 在试料内湮灭的比例μ	最初24小时内试料中湮灭的e ⁺ 数N = μN ₀	用(3)中N作为归一化标准归一比
六七年 前代表例	外	(1) Gustafson et al. (1963)	试料外	²² Na	10 mCi	3 × 10 ¹³	~ 1/5	6 × 10 ¹²	~ 1/25
	国	(2) Williams et al. (1966)	试料外	⁶⁰ Co	125 mCi	6 × 10 ¹³	~ 1/5	1.2 × 10 ¹³	~ 1/13
	日本	(3) 藤原, 末岡, (1965, 1966)	内藏	⁶⁴ Cu	1 Ci	3 × 10 ¹⁴	~ 1/2	1.5 × 10 ¹⁴	1
日本六七年后的各种可能情况		(4) 原研 2# 堆照射 20 分钟, 在东京实验(通量 8 × 10 ¹³ 中子/s·cm ²)	试料外	⁶⁴ Cu	200 mCi*	6 × 10 ¹⁴	~ 1/15 [†]	4 × 10 ¹⁴	~ 1/38
		(5) 原研 2# 堆照射 3 小时在堆附近实验	试料外	⁶⁴ Cu	2.4 Ci*	8 × 10 ¹⁴	~ 1/15 [†]	5 × 10 ¹³	~ 1/3
		(6) 原研材料试验堆, 照射 3 小时在堆旁实验(Φ 1.5 × 10 ¹⁴ 中子/sec·cm ²)	试料外	⁶⁴ Cu	4.7 Ci*	1.5 × 10 ¹⁵	~ 1/15 [†]	1 × 10 ¹⁴	~ 2/3
		(7) 在假定的 1 × 10 ¹⁵ 中子/sec·cm ² 高通量堆中照射 3 小时, 堆旁实验	试料外	⁶⁴ Cu	30 Ci*	1 × 10 ¹⁶	~ 1/15 [†]	7 × 10 ¹⁴	~ 5
		(8) 在用回旋加速器大量生产 ²² Na 成为可能时	试料外	²² Na	100 mCi	3 × 10 ¹⁴	~ 1/5	6 × 10 ¹³	~ 2/5

* 根据所照射 Cu 片大小为 2 cm² × 0.1 mm (0.27 g) 来计算。
 † 若用磁场聚焦, 可达 1/10。

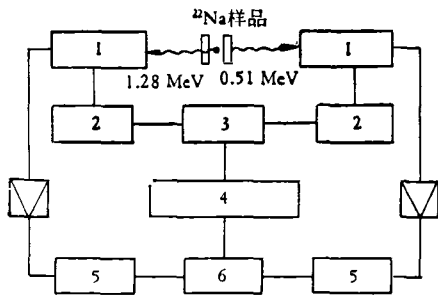


图 3 正电子寿命谱仪方框图

1 为闪烁探测器; 2 为鉴别器; 3 为时幅变换器;
 4 为多道振幅分析器; 5 为单道分析器; 6 为符合电路

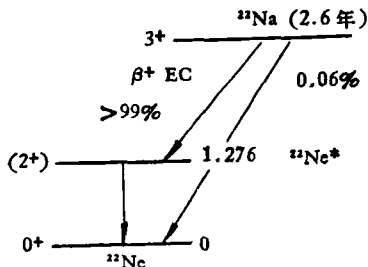


图 4 ²²Na 衰变纲图

生 511 keV 的 γ 射线, 以此作为终止信号。从 e⁺ 产

生到湮灭之间的时间间隔, 即为正电子的寿命。由于正电子在金属中的寿命约为 0.2 ns 左右, 因此影响实验测量结果的重要因素是 γ 探头及谱仪线路的快时间响应, 即系统的时间分辨率。使用 XP-2040 可满足要求。时幅变换器将同一个正电子的 1.28 MeV 和 0.511 MeV γ 射线之间的时间间隔转换成一定幅度的脉冲, 再送到多道脉冲分析器进行分类和记录, 所测得的脉冲幅度谱即为介质中的 e⁺ 寿命谱。图 5 是在三种不同介质中所测得的 e⁺ 寿命谱的实例。

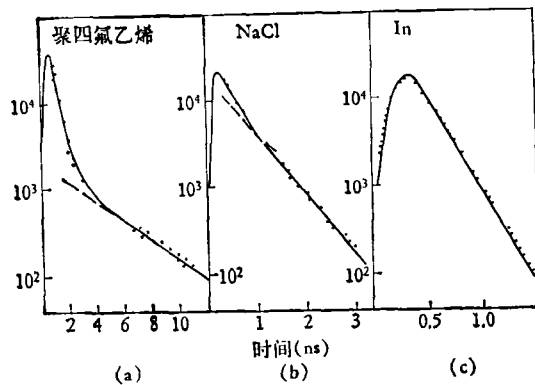
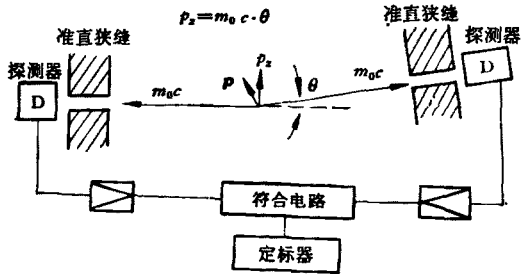


图 5 典型的 e⁺ 寿命谱

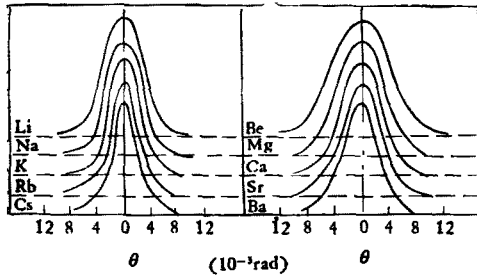
(a) 分子材料; (b) 离子晶体; (c) 金属

3. 湮灭 γ - γ 角关联

γ - γ 角关联在核谱学中已是很成熟的重要研究手段之一,图6(a)给出了一个湮灭 γ - γ 角关联装置的示意图。放射源放在靠近样品的地方,为了减少损失可加一磁场使 e^+ 聚焦在样品上。以样品为轴心,两侧各放一个由 NaI (TI) 晶体、56 AVP 光电倍增管组成的 γ 闪烁探测器,探测由样品放出的电子偶湮灭 γ 射线。一方固定,另一方可绕轴心作小角度旋转。为了提高角度分辨率一方面在 γ 探头前放置 1 mm 宽的 Pb 准直狭缝,另一方面转动平台在 $(0\sim 20)\times 10^{-3}\text{rad}$ 内必须精确到能分辨出 $0.5\times 10^{-3}\text{rad}$ 的刻度。由于这样几何学上的限制,以致必须使用强源,两侧的 γ 探头输出的信号经前放、主放、甄别而输入符合电路,由定标器记录符合计数率。由此测得湮灭 γ 射线的符合计数率随角度的变化,即角关联曲线。



(a)



(b)

图6 双光子湮灭 γ - γ 角关联装置示意图 (a) 和实例 (b)

在 e^+ , e^- 电子对湮灭时,满足动量守恒、能量守恒定律,由此可以推得

$$p_x = m_0 c \theta, \quad (6)$$

$$E_\gamma = m_0 c^2 + \frac{c}{2} p_x, \quad (7)$$

m_0 是电子静止质量, c 光速, $m_0 c$ 为湮灭光子的动量, p_x 为正负电子湮灭前的总动量 P 在 x 轴上的分量。 p_x 为 P 在 x 轴上的投影,即在 γ 发射方向上的动量分量。(7)式的后面部分 $\frac{c}{2} p_x$ 就是多普勒效应

所引起的围绕着 $m_0 c^2$ (511keV) 谱线有一个多普勒加宽。图6(b)是角关联曲线的实例。根据(6)式可求得与 e^+ 相湮灭的金属晶体中的电子的动量分布,从而推断其费密面。1967年末岡修首次采用样品旋转法,即把两个 γ 探测器固定放置在 180° 的方向上而旋转样品晶体,测定符合计数率随介质晶体方位的变化,由此直接得出介质费密面的形状。图7给出了用样品旋转法测得的 Cu 的费密面曲线^[10,13]。这种方法已成为研究费密面的很有用的方法。精确的测量可以达到 $\sim 0.1\times 10^{-3}\text{rad}$ 的角分辨率。

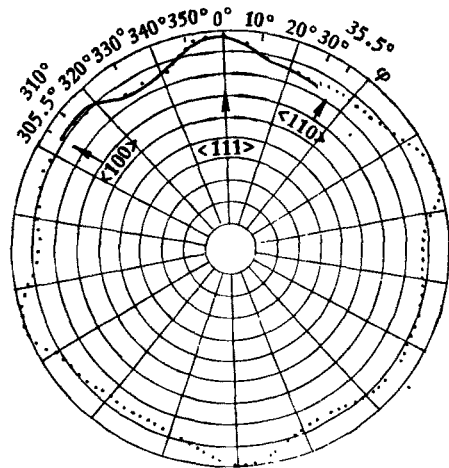


图7 用样品旋转法测得的 Cu 的费密面的断面

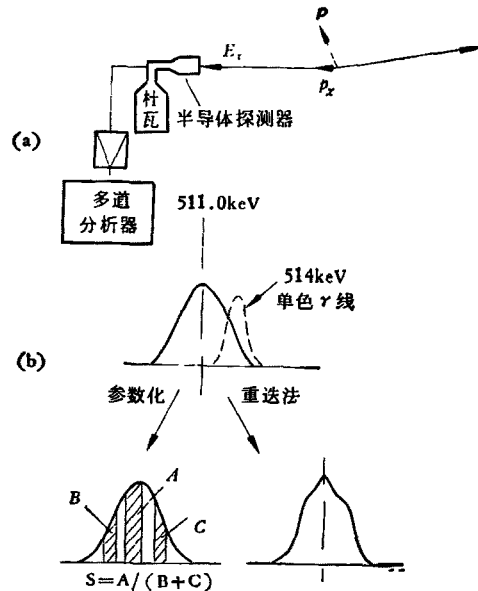


图8 湮灭 γ 射线的多普勒效应谱仪示意图

(a) 和谱的处理方法 (b)

注:图8(b)中的参数化应为参数法。

4. 多普勒加宽谱的测量

用 Ge(Li) 谱仪或高纯 Ge 谱仪作为测定多普勒加宽谱的常规装置, 是目前研究金属缺陷的主要工具^[14]。谱仪装置如图 8(a)所示。谱仪系统对 500keV 的 γ 射线的能量分辨率为 1.0~1.3keV (半宽度)。图 8(b) 表示了介质中湮灭谱线多普勒加宽谱的数据处理方法, 重叠法和参数法。重叠法是用 ^{89}Sr 的 514keV 单能 γ 射线, ^{181}Hf 的 482keV 单能 γ 线, ^{106}Rn 的 511.9 keV γ 线对单能 511 keV γ 线作出响应函数, 然后用计算机解出湮灭 γ 的固有多普勒展宽谱^[9]。文献 [9] 介绍了重叠法在计算机上用于多普勒加宽谱获得部分成功的例子。参数法是用参数来表示多普勒加宽的程度, 如 S 参数表示湮灭峰的窄化度。

根据多普勒展宽的程度, 由(7)式可知能够得到电子动量分布的信息, 但其动量分辨率比角关联方法要差数倍^[10]。而且在技术上的要求也比较高, 因此在学习上不如角关联广泛, 但随着 Ge(Li)、高纯 Ge 谱仪和计算机的普遍使用以及数据处理的自动化必将促使其更广泛的应用。由于它收集数据快, 不要求强源, 特别是在高温、高压以及研究退火和反应动力学方面更是不可缺少有效方法。

三、应用

1. 在固体物理研究中的应用

(1) 金属费密面的研究

作为费密面研究的手段, 初期的所有方法根据它们的原理都被局限在极低温和高纯材料的条件下进行, 而对于 e^+ 湮灭来说, 上述局限全然没有, 因此成为金属费密面研究的常规手段。特别是对单晶样品和 Cu 合金尤为有效。在文献 [13] 中报道了各种单晶的测试结果: Cu, Al, Cd, Bi, Zn, Be, Li, Ho, Y, Si, Ge。根据角关联曲线决定费密面形状的典型图如图 9 所示。由图可见 Cu 的费密面在 $\langle 111 \rangle$ 方向有 8 个缩颈, 它们一直伸展到 (111) 边界, 湮灭曲线与缩颈边界的这种对应性显示了这一方法能使我们研究费密面的形貌细节, 给我们提供至今用其他方法不能得到的信息。

(2) 晶格缺陷的研究

各种缺陷的存在直接影响着金属和合金的电子结构。含有缺陷的金属其内部势场分布的不规则性必将导致 e^+ 在靠近带正电荷的缺陷处逗留几率减少而在靠近带负电荷的缺陷处逗留几率增加, 因此通过 e^+ 与晶格缺陷的相互作用就可以研究电子动力学性质的不规则性, 这对晶格缺陷的产生、浓度及其结构等的研

究无疑是提供了宝贵的信息。通过 e^+ 寿命的测量, 多普勒加宽谱 S 参数的测定以及湮灭 γ 角关联 0° 方向符合计数率的测定可以很灵敏地确定缺陷的捕获速率和缺陷浓度的信息。

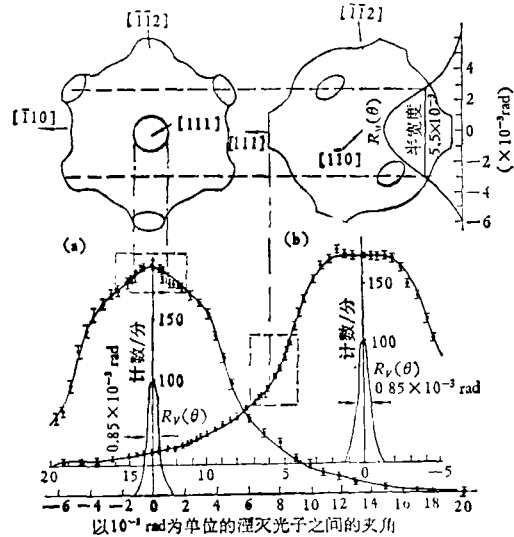


图 9 Cu 单晶二个取向上的角关联曲线和费密面形状的对对应关系

(3) 辐照损伤的研究

金属受到带电粒子或中子的照射, 晶格会受到损伤, 特别是在核反应堆里, 核燃料包壳元件受到大剂量快中子照射而产生空洞, 当空洞生长速率达到一定程度时, 包壳元件就会破裂而造成严重的污染事故。因此包壳元件材料的研究是个极为重要的课题。目前世界各国投入相当的力量从事这方面的研究。正是正电子湮灭技术对空洞探测的灵敏性, 使它成为研究金属辐照损伤的极为有力的工具。图 10 表明了金属中 e^+ 湮灭对缺陷的灵敏程度。从 (a) 可知, 当温度升高时, 缺陷生长, e^+ 寿命变长; 从 (b) 可知角关联曲线由于中子辐射后空位的存在, 使曲线变窄。

(4) 其它

除上所述, e^+ 湮灭技术还可以应用在相变研究, 合金中有序-无序转变的研究, 铁磁金属和合金的磁性研究方面, 为这些研究提供了良好的手段。

2. 在医学上的应用——正电子照相

根据上述 e^+ 湮灭的特性可知, 当 $E_+ = E_- = 0$ 时, 由(1)式得 $E_\gamma = 2m_0c^2$, 湮灭沿互成 180° 方向发射能量各为 511 keV 的两支 γ 射线。如图 11 所示, 在被测器管两侧放上两个 γ 探测器, 进行符合测量, 以此决定 β^+ 衰变核的位置和浓度的分布。在这基础上

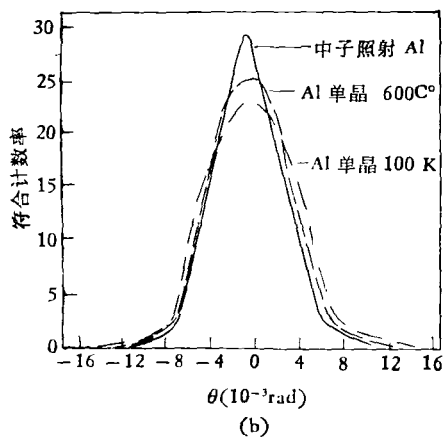
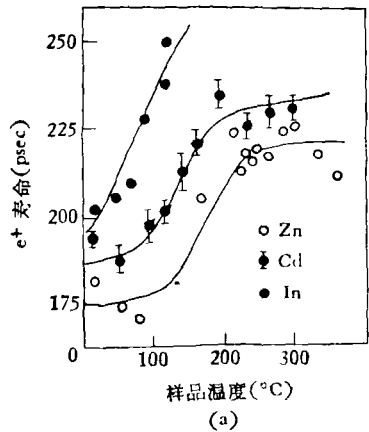


图10 金属中正电子湮灭的缺陷效应
(a) 温度升高, 缺陷增多, 寿命变长;
(b) 角关联曲线由于缺陷存在而变窄

建立起来的诊断医学称之为正电子照相。为使诊断时间大大缩短, 有必要使用二维位置灵敏探测器, 对此目前正在研究之中^[12]。

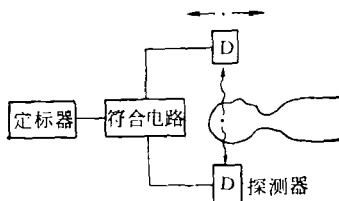


图11 正电子照相示意图

3. 正电子湮灭技术在化学上的应用

在气体、液体、分子性结晶的无机物和各类有机分子固体中, 由于它们的自由电子密度比较低, 因此正电子就有可能被束缚于某一特定的电子而形成中性的正子素, 而在金属中则一般不形成正子素。关于正子素的形成有两种模型: ORe 和 Spur 模型。详细地研究形成 Ps 的反应 $e^+ + M \rightarrow Ps + M^+$ 不仅对正子素化学本身, 而且加深对放射化学、物理化学的基础过程的理解, 也是有重要意义的。通过对在不同条件下 Ps 寿命的测定就可以给出 Ps 的状态及其与周围介质相互作用的大量信息。

随着 e^+ 湮灭技术向各领域的渗透, 反过来促使原子核物理学的飞速发展。例如, 在湮灭角关联的测定中要求有二维位置灵敏探测器; 在 e^+ 寿命测定中要求时间分辨率提高到 $\sim 0.1\text{ns}$; 在多普勒加宽谱测量中要求能量分辨率提高到 $\sim 0.2\text{keV}$ 。这都给核物理技术提出了新的研究课题, 这些核技术的进一步提高, 无疑将给正电子湮灭技术的推广、发展开辟更为广阔的前景。

参 考 文 献

- [1] P. A. M. Dirac, Proc Cambridge Phil. Soc., **26** (1930), 361.
- [2] R. Beringer and C. G. Montgomery, *Phys. Rev.*, **61**(1940), 222.
- [3] S. DeBenedetti and H. Riching, *Phys. Rev.*, **85** (1952), 377.
- [4] R. E. Bell and R. L. Graham, *Phys. Rev.*, **90** (1953), 644.
- [5] Positron Annihilation, ed. A. T. Stewart and L. O. Roelling, (Academic Press, N. Y. 1967)
- [6] Conference Europeenne sur la physique du positon et positonium a basse energie, Saclay, (1969).
- [7] International conference on positron annihilation Kingston, Canada, (1971).
- [8] Proc. 4th Intern. conf. on Positron Annihilation, Helsingor, Denmark, (August, 1976).
- [9] 岡田、伊藤、田畑, *Radioisotopes*, **26**(1977), 139.
- [10] 堂山昌男, *応用物理*, **41**(1972), 684.
- [11] J. J. Burton and G. Jura, *Phys. Rev.*, **171**(1968), 699.
- [12] 田畑、伊藤, *原子力工業*, **24-9**(1978)43.
- [13] 藤原邦男、末岡 修, *日本物理学会志*, **22**(1967)541.
- [14] T. E. Jackmam, P. C. Lichtenberger, and C. W. Schulte, *Appl. Phys.*, **5-259**(1974).