

微桔型电子能谱仪

袁 观 俊

(中国科学院原子能研究所)

内转换是原子核电磁跃迁的形式之一。用电子能谱仪(即 β 谱仪)对内转换电子进行测量是一种常用的原子核物理实验手段。由于近十多年来原子核科学和技术的发展,电子能谱仪的发展也很迅速。半导体探测器和它的结合更提高了它的性能和扩大了它的应用范围。更有意义的是,目前已开始利用电子能谱仪在加速器的束流上进行在束核物理实验。

1972年, J. Van Klinken 等人^[1]首先研究了微桔型(Mini-Orange)内转换电子能谱仪。他们采用高磁性能的永磁材料研制出体积小、结构简单、易于操作和价格低廉的电子能谱仪及其装置系统,它在原子核物理学研究和应用方面很有前途。

一、原理、结构及特性参数

1. 基本原理和结构

微桔谱仪的主体结构以及不同形状的磁铁的组合方式如图1所示。谱仪的主体是利用永磁材料制成的,按设计要求,将这些楔形或片状的永久磁铁放射式地排列在一个锥体的周围。这个锥体一般称为中心吸收体。为了有效地消除中子和 γ 射线等对探测器的影响,中心吸收体是由密度较高的或很少产生中子俘获辐射的几种材料组合而成,象铅、金、铋等。在磁铁的两边分别是源S(或靶T)和探测器D。由于在磁铁的空隙间形成近似的环状磁场,所以当源S射出的电子到达空隙时,受磁场的作用而被偏转,最后聚焦到探测器上。这类似于一个光学透镜系统, f 称为物距, g 称为象距。显然,正电子所受作用力与负电子所受作用力方向相

反,将被过滤掉。

磁铁的形状和片数是可以调整的,一般在3—12片之间变动。磁铁所占的空间(φ)与空隙所占的空间(Φ)之比称为阻塞因子 b ,设计时通常使 $b = \varphi/\Phi \leq 0.25$ 。图1中的 f 和 g 值也可调,在大多数实验中, f 值接近 g 值。若 f 值和 g 值同时或分别加大,则透射率(T)曲线幅度值降低,且变窄, T 曲线的峰值位置向电子的高能端推移。F是障板,通常选用铜、锡等材料,主要用来吸收散射的电子,特别是低能 δ 射线,它主要来自靶。例如入射 α 粒子,打在靶上产生 δ 射线的截面比复合截面大 10^6 量级左右,其能量 $E_\delta = 4Mm(M+m)^{-2}E_\alpha \cos^2\theta$, M 和 m 分别是 α 粒子和电子质量, E_α 为 α 粒子能量, θ 是入射 α 粒子同出射 δ 射线的夹角。如 $\theta \leq \pi/2$, $E_\alpha = 100 \text{ MeV}$,则 $E_\delta = 55 \text{ keV}$ 。如这种低能电子打在探测器上,可破坏探测器的

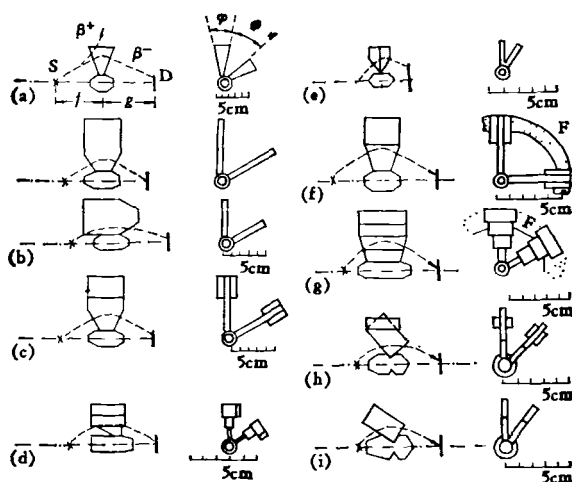


图1 微桔型电子谱仪的原理及不同形状磁铁的组合结构
(a) koerzit 材料; (b), (c) BaO·6Fe₂O₃ 材料;
(d)—(i) SmCo₅ 材料

表1 微单桔型电子谱仪特性参数

磁		铁		可移动半导体探测器 Si(Li)			
材 料	形状, 片数	b	f, g	直 径	厚 度	能量分辨(FWHN)	时间分辨(ns)
AlNiCo BaO · 6Fe ₂ O ₃ SmCo ₅ 等	楔形、扇形复合 磁铁在 3—12 片 之间调整	≤0.25	分别在 1--7 cm 之间变动	4—30mm	2--3.5mm	2—3keV(对 1MeV 左右的电子能量)	~8

正常工作。

谱仪对电子能量的分辨主要决定于半导体探测器 D 的优劣。按照需要, 我们可以设计成单桔型电子谱仪 (c), 电子- γ 符合谱仪 (c γ), 电子-电子符合谱仪 (ee) 和电子-电子- γ 符合谱仪 (ee γ)。表 1 列出了微型单桔谱仪的主要特性参数。

2. 磁铁设计

通常采用的磁性材料是 koerzit, AlNiCo, BaO · 6Fe₂O₃ 和 SmCo₅ 等。前两种性能较差, 后两种较好。BaO · 6Fe₂O₃ 的矫顽力 $H_c \geq 3\text{kOe}$, 最大磁能积 $(B \cdot H)_{\max} \geq 3.5\text{kGOe}$, 其价格低廉, 易于加工成不同形状, 对测量能量 $E_e < 100\text{keV}$ 的电子有利。SmCo₅ 合金的 $H_c \geq 8\text{keV}$, $(B \cdot H)_{\max} \geq 16\text{MGoe}$, 虽然价格较贵, 加工困难, 但磁性能好, 现在使用最多。

设计磁铁时, 主要考虑如何得到较高的透射率。环形场的磁感应可以由下式

$$\left. \begin{aligned} \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} &= 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

来描述, H 和 B 分别为磁场强度和磁感应强度。设 L_g 和 L_m 分别是磁空隙和磁铁上的磁路参数, H_g, H_m 和 B_g, B_m 分别为磁场强度和磁感应强度, 按磁路公式有

$$\begin{aligned} B_g = B_m = \mu_0 H_g &= -\mu_0 \frac{L_m H_m}{L_g} \\ &= \frac{L_m M}{L_g + L_m}, \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式中的 M 是磁化强度, μ_0 是磁导率。由上式可知, 对简单的平面磁铁, 当 L_g 相对于 L_m 增加时, B_g 减少。所以, 为获得均匀磁场, 采用楔形磁铁是比较合适的。对一点成象的谱仪系统, 当 $f = g$ 时, 磁铁的边界容易确定^[2]。无论是

恒定场(磁感应强度沿径向变化近似等于常数)还是对称场(磁感应强度沿径向变化近似为 $1/r$), 磁铁的边界面都接近三角形。至于磁铁间隙的每一点的磁感应强度 B , 可以由方程 $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}$ 和 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 求得。然而实际的磁感应强度不严格均匀, 所以实际测量值与理论值有差别。这是由磁性材料不均匀和几何控制不严格引起的。因而在整个磁铁的设计中, 通常先作大致估算, 然后再用霍耳探针 (Hall probe) 进行测量校正, 作适当调整。

3. 透射率 T

透射率 T 是评价微桔谱仪的主要参数, 它与磁场强度、几何特性以及被测电子能量有关。 T 定义为: 从放射源发出的单能电子中, 在进入谱仪后, 被探测器所记录下来的一部分所占的百分比, 即

$$T = N_M(E_e) / N_0(E_e), \quad (3)$$

其中 E_e 是电子的动能, $N_M(E_e)$ 是有微桔谱仪时的计数率, $N_0(E_e)$ 是 4π 立体角内总的计数率。由于部分电子在探测器表面的反散射, 测得的计数率 $I_M(E_e)$ 小于 $N_M(E_e)$, 因此必须对 $N_M(E_e)$ 进行修正。

$$N_M(E_e) = I_M(1 - K), \quad (4)$$

式中 K 是电子在探测器表面的反散射因子。于是 T 可写成

$$T = A(\cos\theta_a - \cos\theta_b)(1 - b)(1 - K), \quad (5)$$

式中的 $(1 - b)$ 是阻塞因子的修正, A 是相对归一化常数。当 $E_e > 200\text{keV}$ 时, K 值的经验公式为

$$\begin{aligned} K &= 0.483 \times 10^{-3} \varphi + 0.22 \\ &(0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ), \end{aligned} \quad (6)$$

式中 φ 为电子在半导体探测器表面的人射角。例如 $b \leq 0.25$, $K \leq 0.3$, θ_a 和 θ_b 分别为 10° 和

表 2 不同透射率曲线所对应的几何参数

磁铁类型和片数	6A	9A	4B	6B	4, 6, 8C
间隙磁场强度	2.8—3.0kG	~4.5 kG		1.4 kG	
$f(\text{mm})$	10—40	20	14	11—50	15
$g(\text{mm})$	25	25—50	25	25	15

55°, 估算 T 值可达 10%。W. Neumann 等人^[3]提出了一种数字计算 T 值方法。然而, 计算出的理论值与实验值总是有差异。原因是存在径向和轴向场分量, 不能得到理想的聚焦场。因此, 电子在磁场中运动轨迹不是在一个理想平面上。图 2 的 T 值曲线是利用圆饼状 SmCo_5 磁铁测得的结果。不同透射率曲线所对应的几何参数如表 2 所示。

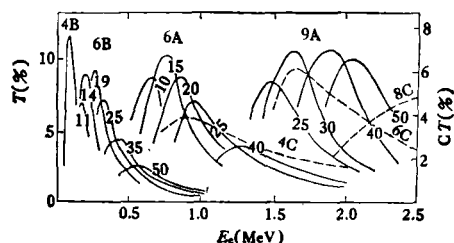


图 2 不同几何参数所对应的 T 值曲线

从图 2 可以看出, 在低能端, 我们用 B 类磁铁可以获得很窄的 T 值曲线, 这就大大提高了测量低能电子谱的效应本底比。对 C 类磁铁, 又能获取较宽的 T 值曲线, 便于高能电子的测量。总之, 我们可以设计多组磁铁, 按实验要求进行组装, 从而得到理想的 T 值曲线。

二、主要应用

微桔型电子能谱仪比较突出的优点是: (1) 采用高性能永久磁铁, 体积小(约 10 cm 直径的球体), 进行各种实验测量时便于安排和调整; (2) 免除了传统 β 谱仪线圈设计及其供电稳流和冷却系统带来的麻烦; (3) 使用半导体探测器, 可作全能谱分析, 能谱分辨好, 并大大节省了时间; (4) 由于磁铁片数、形状和其它几何参数可调整, 便于选择被测量的电子能量的上下限, 因此它可以作为单窗探测器; (5) 本底相对较小, 用微桔谱仪测量能改善效应本底比因子

约 2×10^2 量级; (6) 透射率高, 可达 10%。上述原因, 给它的应用带来了广阔的前景。

1. 离束测量(衰变原子核能谱学的研究)

如果我们能测量同一跃迁的内转换电子强度和 γ 射线强度, 则可计算内转换系数 α , 也可以测定 K/L 比等, 进而获得跃迁角动量和宇称的信息, 完成衰变纲图。其次它适用于弱跃迁和弱活性短寿命同位素的测量, 能测定像 $E0$ 和 $E4$ 之类的弱跃迁多极性^[4]。在文献[2]中给出了源强仅有 14nCi 的 ^{84}Rb 电子谱的测量结果。还有, 由于发射内转换电子要克服轨道电子的结合能, 而内层轨道电子结合能的数值随原子序数 Z 值的增加而增加。所以, 根据内转换电子和 γ 射线的能谱, 我们可以确定 Z 值。

2. 在束 γ 谱学的研究

这是低能核物理研究中较活跃的领域之一。借助于 γ 谱仪和电子谱仪等的在束工作, 不仅对核反应机制, 象融合反应和复合核衰变理论作出了有力的验证, 而且把核结构的高自旋态、回弯现象等研究工作推进了一大步。微桔电子能谱仪是否可用于物质材料分析研究, 这是值得探讨的一个问题。

当然, 它也存在某些不足之处, 机械加工要求精细, $\text{Si}(\text{Li})$ 探测器要求保存在低温真空状态中, 才能有好的分辨能力和延长使用寿命等。因此需要继续研究改进, 如用室温保存的高阻硅探测器逐渐代替 $\text{Si}(\text{Li})$ 探测器。

参 考 文 献

- [1] J. Van Klinken and K. Wisshak, *Nucl. Instrum. Methods*, **98**(1972), 1.
- [2] J. Van Klinken and S. J. Feenstra, *Nucl. Instrum. Methods*, **130**(1975), 427.
- [3] W. Neumann et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **164**(1979), 539.
- [4] A. Hanser et al., *Phys. Rev. C*, **12**(1975), 338.