

穆斯堡尔效应测定超精细结构

隋源*

北京大学物理学院 学号: 2000011379

本实验以 Pd 衬底的 ^{57}Co 为放射源, 获得了 $\alpha\text{-Fe}$ 与硝酸钠作吸收体的穆斯堡尔谱, 验证了穆斯堡尔效应, 并利用谱线的尖锐特性对吸收谱进行定量分析, 测定了 ^{57}Fe 的超精细相互作用 (同质异能移位、电四极分裂和核塞曼分裂), 初步了解了穆斯堡尔效应在高分辨探测中的应用。

关键词: 穆斯堡尔效应, 超精细相互作用

I 引言

光子由于能量较高, 与自由原子核相互作用时导致原子核有显著的反冲, 导致 γ 射线能量相对于核能级差出现偏移, 难以实现共振吸收。

但在 1957 年, 德国物理学家穆斯堡尔 (R. L. Mössbauer) 在博士研究期间发现, 固体中的 ^{191}Ir 核在 γ 射线散射过程中有一定概率不发生反冲, 从而出现共振吸收, 是最早观测到的 γ 射线共振散射现象, 即穆斯堡尔效应。该发现 [1] 于 1958 年发表, 并于 1961 年获诺贝尔物理学奖。

穆斯堡尔谱线非常窄, 可用于测量十分微小的能量差。例如 1959 年的 Pound-Rebka 实验就利用穆斯堡尔效应的原理精确测得了光子的引力红移 [2]; 类似地, 穆斯堡尔效应也可用于测定吸收体原子的超精细结构。本实验即利用多普勒效应控制无反冲 γ 射线能量在小范围内变化, 分辨并研究了几种典型的核能级超精细结构。

II 理论

(一) γ 射线的共振吸收

核的反冲能

$$E_R = \frac{p^2}{2m_N} \approx \frac{E_0^2}{2m_N c^2} \quad (1)$$

*suiyuan@stu.pku.edu.cn

其中 p 为光子动量, m_N 为核质量, E_0 为核能级差。对洛伦兹线型, 谱线的自然线宽为

$$\Gamma \approx \hbar/\tau \quad (2)$$

其中 τ 为能级寿命。对 ^{57}Fe 的 14.4keV 激发态, $\tau \approx 0.14\mu\text{s}$, $\Gamma \approx 5 \times 10^{-9}\text{eV}$, 而 $E_R \approx 2 \times 10^{-3}\text{eV} \gg \Gamma$, 难以实现共振吸收。考虑多普勒效应, 尽管能均分定理估计的室温展宽 $D_T \approx 2 \times 10^{-2}\text{eV} \gg E_R$, 但有效散射截面也要减小 $\Gamma/D_T \approx 3 \times 10^{-7}$, 因而要观察到共振吸收依然十分困难。

(二) 无反冲分数

根据量子力学的讨论, 发射一个光子对整个固体的影响仅限于发射的原子核 A 得到一个反冲动量, 即

$$\langle p | \psi_A \rangle = \langle p - p_0 | \psi_{A'} \rangle \quad (3)$$

其中 $|\psi_A\rangle$ 和 $|\psi_{A'}\rangle$ 分别为发射前后的 A 原子波函数。则发射前后的固体系统波函数为

$$|\Psi\rangle = |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle \otimes \dots, \quad |\Psi'\rangle = |\psi_{A'}\rangle \otimes |\psi_B\rangle \otimes \dots \quad (4)$$

由于 $|\Psi'\rangle$ 不再是本征态, 从观测角度上说系统有一定概率回到初态 $|\Psi\rangle$, 对应无反冲情形, 于是无反冲分数由二者的交叠积分给出

$$f = |\langle \Psi | \Psi' \rangle|^2 = |\langle \psi_A | \psi_{A'} \rangle|^2 \quad (5)$$

此即穆斯堡尔效应的基本图像。由固体物理的讨论, 光子能量较低, 晶格德拜温度较高, 温度较低时无反冲分数较大。对室温 ^{57}Fe 的 14.4keV 激发态, 德拜温度 $\theta_D \approx 420\text{K}$, 无反冲分数 $f \approx 0.71$, 用来观察穆斯堡尔效应很合适。

(三) 超精细相互作用

1. 同质异能移位: 核外 s 电子因隧穿效应致其在核内有一定概率分布, 又核激发时半径有一定变化, 导致能量变化, 此即同质异能移位。放射源和吸收体通常有大小不同的同质异能移位, 故实际讨论和测量的同质异能移位为相对值。

2. 核塞曼分裂: 固体内部磁场与原子核磁矩相互作用导致的塞曼分裂

$$\Delta E = g\mu_N B \quad (6)$$

其中 $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$ ，对 ^{57}Fe 而言，这将导致 6 条相近的谱线。

电四极矩分裂: 核电荷分布不均匀导致的能级劈裂

$$\Delta E_Q = \frac{1}{2}eq \cdot eQ \quad (7)$$

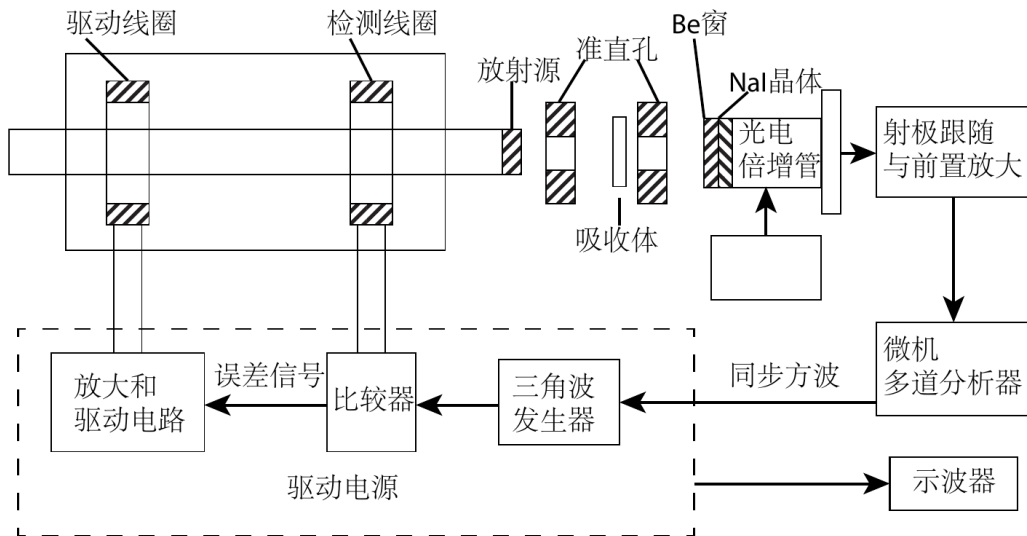
其中 eq 对应电场梯度主分量， eQ 对应电四极矩主分量。对 ^{57}Fe 而言，这将导致 2 条相近的谱线。

III 实验

本实验采用 Pd 衬底的 ^{57}Co 为放射源，采用电磁驱动使穆斯堡尔源以 10Hz 频率水平往返匀加速运动，利用多普勒效应周期性地、线性地调制 γ 射线能量。

采集信号的多道分析器具有脉冲幅度分析 (PHA) 和多度定标 (MCS) 两种功能，PHA 用以选取实验所需 14.4keV 射线，MCS 用以探测穆斯堡尔谱。多度定标模式将不同时刻的脉冲送入不同道址，由于放射源的速度与扫描周期同步变化，故不同道址实际对应于放射源的不同速度。

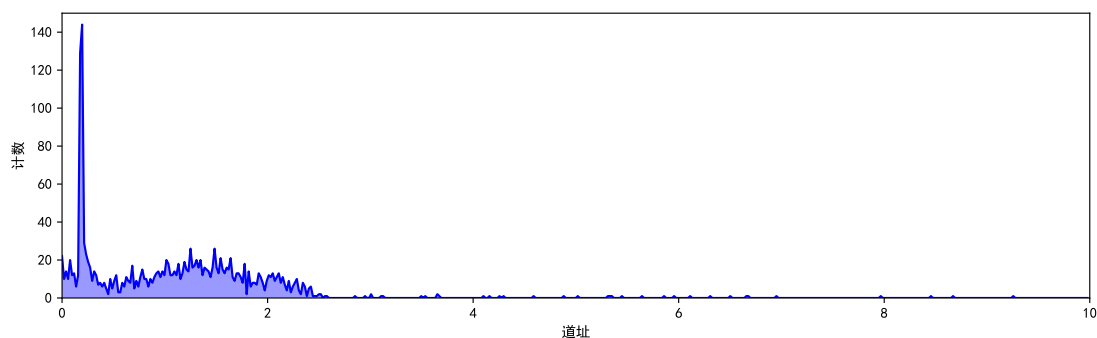
程序上，通过比较多道分析器信号，反馈调节驱动线圈以保证驱动与输入信号严格同步，从而与多道分析器接收端的扫描同步。 γ 射线的探测采用 NaI(Tl) 闪烁体探测器，保护窗为 Be 窗，NaI 晶体厚度约为 1mm。具体实验装置示意图如下。



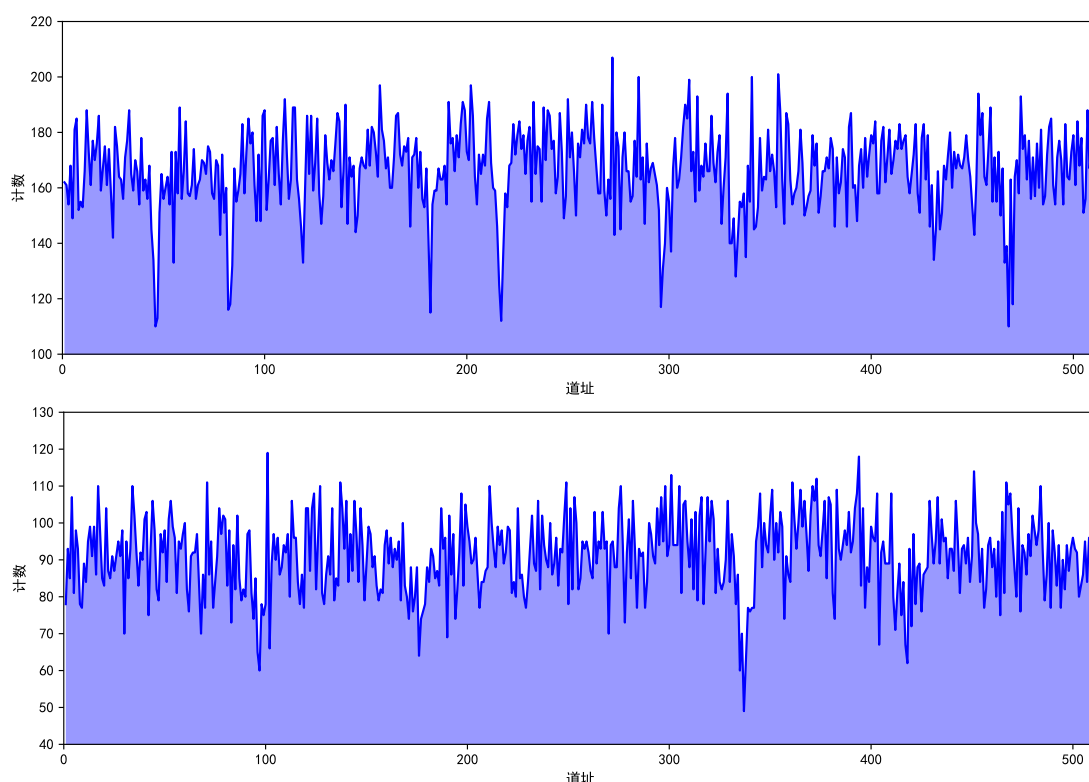
图一：穆斯堡尔效应实验装置图 [3]。包括 X 光荧光分析探头、微机多道分析器、高压电源、电磁驱动器及电源、通用示波器、 ^{57}Co 放射源、准直孔、 $\alpha - \text{Fe}$ 和硝酸钠薄膜样品。

IV 结果与讨论

首先采集 ^{57}Co 源能谱以选出所需的 14.4keV 射线。然而，对放射源进行采谱约 4h 发现，放射源较弱以至于不能确定 14.4keV 位置。接下来通过实验室模拟程序来研究穆斯堡尔效应的吸收谱。



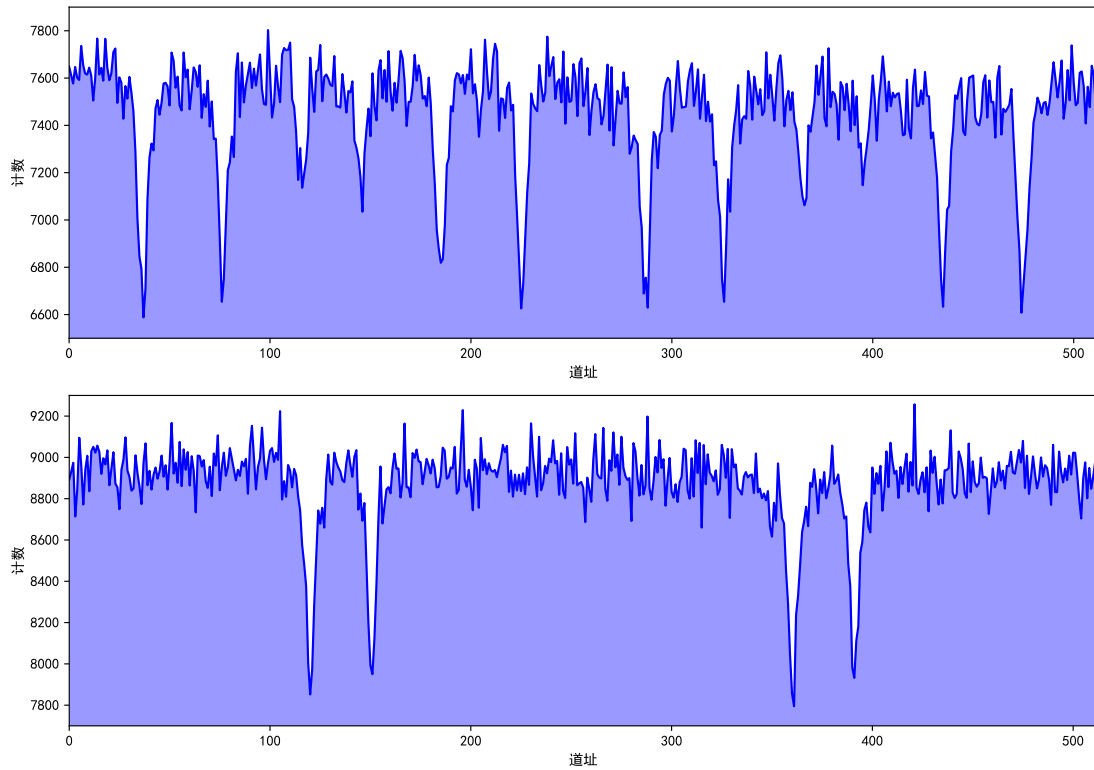
图二： ^{57}Co 放射源能谱图。横轴为多道分析器的道址，正比于射线能量；纵轴为计数，表征相应能量处探测到的 γ 光子数目，可以看出因放射源较弱无法确定 14.4keV 位置。



图三： $\alpha\text{-Fe}$ 和硝普酸钠做吸收体时穆斯堡尔谱的模拟结果，其中 $\alpha\text{-Fe}$ 结果在上，硝普酸钠结果在下。由基于 Linux 系统编写的模拟测量程序给出，模拟时长约为 30 分钟。模拟结果在拟合之前可以基本分辨大部分吸收峰。

模拟程序在 Linux 平台上运行，每个吸收谱进行了约 30 分钟的模拟。可以看出，在对实验数据进行恰当拟合之前可以基本分辨大部分吸收峰，但由于模拟时间较短，吸收

谱的计数仍较低，部分吸收峰不够明显，无法直接辨认。为了完整讨论物理现象，之后采用标准谱进行分析。



图四： α -Fe 和硝普酸钠做吸收体时穆斯堡尔谱的参考谱，其中 α -Fe 结果在上，硝普酸钠结果在下。可以看到上方计数图中有明显的 12 道吸收峰，左右各自对应常温下 α -Fe 吸收体的 6 道峰，2 倍的峰数对应于驱动器周期和道址探测周期的倍数关系，下方的 4 道峰同理（对应硝普酸钠作吸收体的 2 道峰）

可见，参考谱计数比模拟结果高过一个量级，相应地吸收峰明显，适合作为定量分析。具体峰值位置依据图像和原始数据给出。（注意右侧峰道址随序号递增，而左侧峰递减，原因在于它们分别对应一个速度周期中的上升、下降区间。）

表一：参考穆斯堡尔谱的峰值道址

α -Fe							硝普酸钠		
序号	1	2	3	4	5	6	序号	1	2
右侧道址	289	327	367	396	436	475	右侧道址	362	392
左侧道址	226	186	147	117	77	38	左侧道址	152	121

已知 α -Fe 第 1 和第 6 谱线间距 $\mathcal{V} = 10.656 \text{ mm/s}$ ，可得道增益（由左右道址之结果平均给出）

$$K = \frac{\mathcal{V}}{|v_6 - v_1|} = 5.70 \times 10^{-2} \text{ mm/s} \quad (8)$$

由谱线的能量重心 $v_c = (v_1 + v_2 + v_5 + v_6)/4$, 可得左右谱线的重心道址

$$v_{Rc} = 381.8, \quad v_{Lc} = 131.8 \quad (9)$$

由 α -Fe 相对于源中 ^{57}Fe 核的同质异能移位值 $\mathcal{V}' = -0.185\text{mm/s}$, 可得该谱仪的零速度道址

$$v_{R0} = v_{Rc} - \frac{\mathcal{V}'}{K} = 385, \quad v_{L0} = v_{Lc} + \frac{\mathcal{V}'}{K} = 129 \quad (10)$$

左右零速度道址间隔约 256, 表明放射源速度周期与 512 道基本匹配, 这实质上与同质异能移位的现象自洽。

为计算基态和激发态的朗德 g 因子和核磁矩大小, 需要计算核塞曼分裂能极差。由 14.4keV 时 $1\text{mm/s} = 4.808 \times 10^{-8}\text{eV}$ 的换算关系, 左右平均后得到

$$\Delta E_g = 1.897 \times 10^{-7}\text{eV}, \quad \Delta E_e = 1.089 \times 10^{-7}\text{eV} \quad (11)$$

其中 ΔE_g 是基态裂矩, ΔE_e 是激发态裂矩。具体计算方式参考能级图 [3]。考虑到内磁场 $B = 33\text{T}$, 由式 (6) 以及 $\mu_N = 3.152 \times 10^{-8}\text{eV}$ 可得

$$g_g = 0.182, \quad \mu_g = 5.75 \times 10^{-9}\text{eV/T} \quad (12)$$

$$g_e = 0.105, \quad \mu_e = 3.30 \times 10^{-9}\text{eV/T} \quad (13)$$

硝普酸钠相对 α -Fe 的重心偏移为 (考虑左右平均结果)

$$\Delta v = |(v_1 + v_2)/2 - v_c| = 4.8 \quad (14)$$

结合道增益 K 可得相对移位约为 0.27mm/s 。同样, 对硝普酸钠样品, 比较能级图 [3] 可计算四级裂矩

$$\Delta E = 8.36 \times 10^{-8}\text{eV} \quad (15)$$

此即第一激发态的电四极分裂裂距。

实验谱中的吸收峰半高宽约为 5-6 道, 对应

$$2\Gamma \approx 1.37 \times 10^{-8}\text{eV} \quad (16)$$

比激发态寿命对应的半高宽更宽。分析认为可能是由于发射源和吸收体均存在一定厚度，而上述展宽可能主要源于自吸收的影响。

V 结论

本实验以 ^{57}Co 作为 γ 源，利用多普勒效应调制光子能量，获得了 $\alpha\text{-Fe}$ 和硝普酸钠样品的穆斯堡尔吸收谱，并研究了 ^{57}Fe 核能级的超精细结构，确定了 $\alpha\text{-Fe}$ 的核磁矩及朗德 g 因子，测定了硝普酸钠的相对同质异能移位及电四极裂距。本实验验证了穆斯堡尔效应在高分辨能级探测方面的能力。

VI 致谢

感谢王思广老师对实验原理的耐心介绍和对模拟程序原理的细致讲解。

-
- [1] MÖSSBAUER R L. Kernresonanzfluoreszenz von gammastrahlung in ir 191[J]. Zeitschrift für Physik, 1958, 151(2): 124–143.
- [2] POUND R V, REBKA JR G A. Gravitational red-shift in nuclear resonance[J]. Physical Review Letters, 1959, 3(9): 439.
- [3] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.