



北京大学物理学院 李健通

利用穆斯堡尔效应测定超精细结构

Bryan

北京大学物理学院 学号：1500066666 *

(日期：2019 年 6 月 7 日)

本实验以 Pd 衬底的 ^{57}Co 为放射源，获得了 $\alpha\text{-Fe}$ 与硝酸钠作为吸收体时的穆斯堡尔谱，由此验证了穆斯堡尔效应。

在此基础上，利用穆斯堡尔谱线的尖锐特性，通过对吸收谱的定量分析，测定了 ^{57}Fe 核能级的塞曼分裂、同质异能移位和电四极分裂等超精细结构；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 核能级 超精细结构

* masked_email_please_contact@github.com

I. 引言

γ 光子由于其能量较高，与自由原子核相互作用时导致原子核有显著的反冲；这使得 γ 射线能量相对于核能级差出现移动，从而难以实现共振吸收。

直到 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；此即穆斯堡尔效应。其工作 [1] 于 1958 年发表，这是最早观测到的 γ 射线共振散射现象；该发现于 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，著名的 Pound-Rebka 实验即在穆斯堡尔效应发现后的 1959 年实现，其利用安放在哈佛 Jefferson 实验室楼顶与地面之间的一对 γ 射线发射、吸收体精确地测得了光子的引力红移 [2]。与此类似，自然可由穆斯堡尔效应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入射的无反冲 γ 射线能量在小范围内变化，从而分辨并研究了几种典型的核能级超精细结构。

II. 理论

一般来说，共振吸收截面与谱线均为 Lorentz 线型，其自然线宽：

$$\Gamma \sim \frac{\hbar}{\tau} \quad (1)$$

其中 τ 为能级寿命。对 ^{57}Fe 的 $E_0 = 14.4 \text{ keV}$ 激发态而言， $\tau \sim 0.14 \text{ ps}$ ，导致 $\Gamma \approx 4.9 \times 10^{-9} \text{ eV}$ 的尖锐谱线。

而相应地， γ 光子造成的核反冲：

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

给出 $E_R \approx 2 \times 10^{-3} \text{ eV} \gg \Gamma$ ， $E_0 \pm E_R$ 谱线显著分离，难以实现共振吸收。

II. 理论

此外，虽说室温下的多普勒展宽 $D \sim 2 \times 10^{-2} \text{ eV} \gg \Gamma$ ，看似有助于共振吸收，但此时相对于原先仅有 $\sim \Gamma/D$ 比率的光子可被吸收，即有效吸收界面被 $\Gamma/D \sim 2.5 \times 10^{-7}$ 因子显著压低，实际无助于共振吸收。



不过，当原子嵌于晶格中时，其运动规律由固体整体波函数描述：

$$|\Psi\rangle = |\Psi_A\rangle \otimes |\Psi_B\rangle \otimes \cdots = |\Psi_A\rangle \otimes |\Psi_{\bar{A}}\rangle \quad (3)$$

这里 A, B, \dots 标记固体中的各原子，非 A 的原子一并标记为 \bar{A} 。

设 A 原子与高能 γ 光子作用，传递动量 p_0 ，则其波函数的变化规律与经典情形类似，可视为动量空间的平移：

$$\langle p | \Psi'_A \rangle = \langle p - p_0 | \Psi_A \rangle \quad (4)$$

由此得到整体波函数： $|\Psi'\rangle = |\Psi'_A\rangle \otimes |\Psi_B\rangle$ ，此时 $|\Psi'\rangle$ 不再是能量本征态，平均反冲能：

$$\langle \Psi' | \hat{H} - E_0 | \Psi' \rangle = E_R, \quad E_0 = \langle \Psi | \hat{H} | \Psi \rangle \quad (5)$$

然而，测定固体的吸收、发射谱，本质上正是对固体能量的观测；这一观测导致固体波函数坍缩至某一能量本征态，其中有一定概率回到初态，此即对应无反冲情形。无反冲分数可由终态与初态的交叠加以刻画： $f = |\langle \Psi | \Psi' \rangle|^2 = |\langle \Psi_A | \Psi'_A \rangle|^2$ 。这便是穆斯堡尔效应的基本图像。

核能级的超精细结构

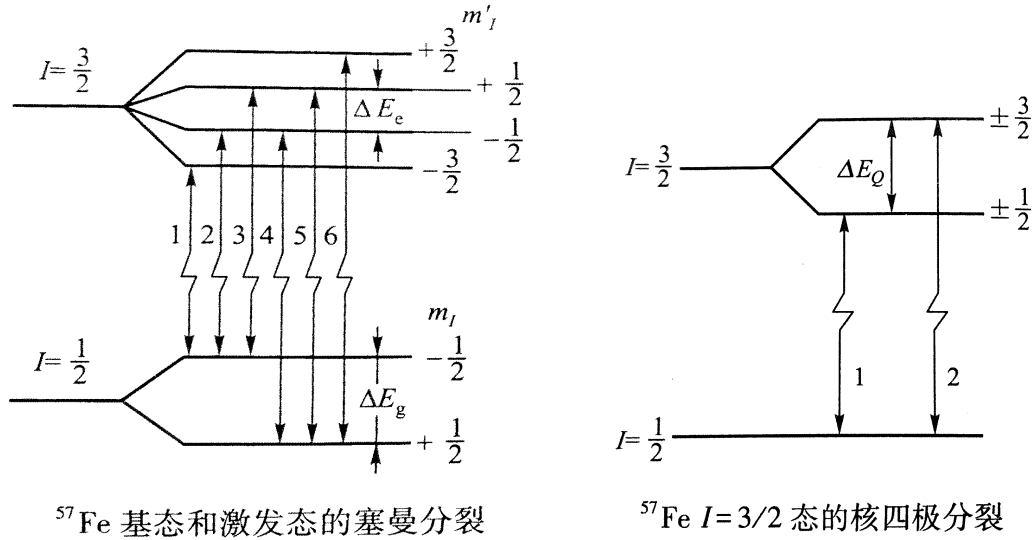


图 1: ^{57}Fe 能级分裂示意图, 摘自 [3].

图中已标明选择定则容许的 γ 跃迁。

如前所述, 利用穆斯堡尔效应, 可以精确地测定原子核超精细结构; 具体有:

a. **核塞曼分裂**: 固体内部磁场 B 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, 如图所示, 这将导致 6 条相近的谱线。

b. **电四极矩分裂**: 核电荷分布不均匀导致的能级劈裂:

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

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, 如图所示, 这将导致 2 条相近的谱线。

II. 理论

c. **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不同两者之相对值。

III. 实验装置

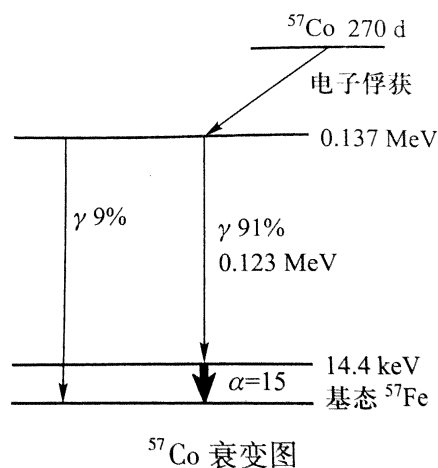


图 2：本实验利用 ^{57}Fe 退激发射的 14.4 keV γ 光子。选自 [3].

本实验采用 Pd 衬底的 ^{57}Co 为 γ 源，采用电磁驱动使穆斯堡尔源以 10 Hz 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 14.4 keV 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。具体实验装置示意如下。

III. 实验装置

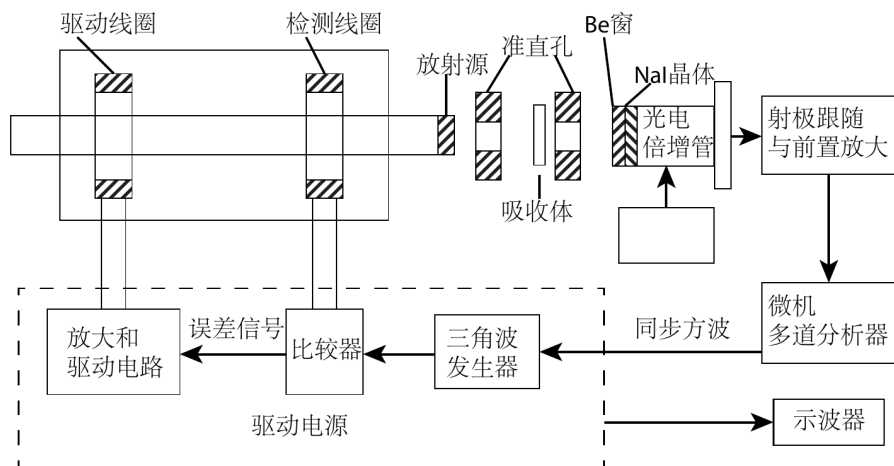


图 3: 穆斯堡尔效应实验装置示意图, 参见 [3].

IV. 结果与分析

首先采集 ^{57}Co 源能谱以选出所需的 14.4 keV 射线, 比较实验手册上 ^{57}Co 源的参考能谱, 可确定其中的较高峰值即对应 14.4 keV γ 射线。实验中估选其半高宽, 并在程序上设为上、下阈值。

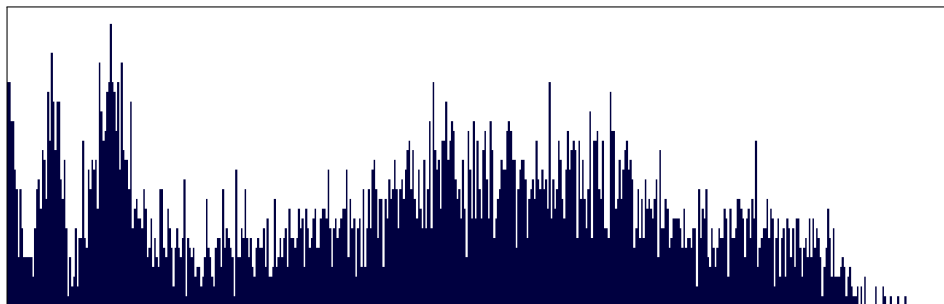
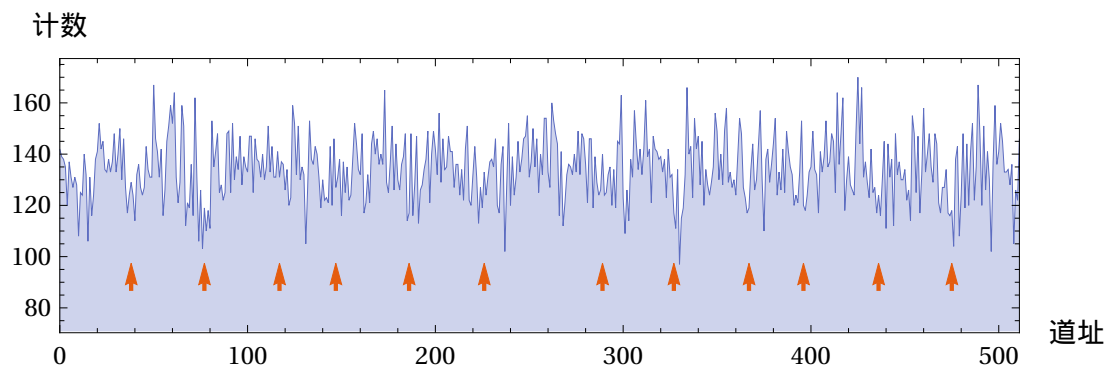


图 4: ^{57}Co 放射源能谱图, 于控制程序中截取得到。

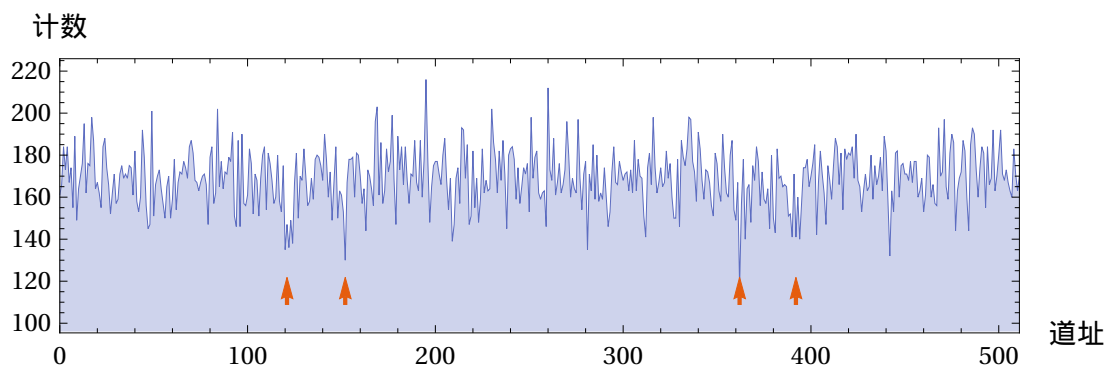
图中横轴为多道分析器的道址, 正比于射线能量, 共 512 道; 纵轴为计数, 表征相应能量处探测到的 γ 光子数目。能谱图上较低能量处有两处明显峰值, 其中最高者即对应 14.4 keV。

IV. 结果与分析

在此基础上，多道分析器切换至多度定标模式，采集 α -Fe 和硝普酸钠样品的穆斯堡尔谱（采谱时间各有 ≥ 2 h），结果如下：



(1) α -Fe



(2) 硝普酸钠

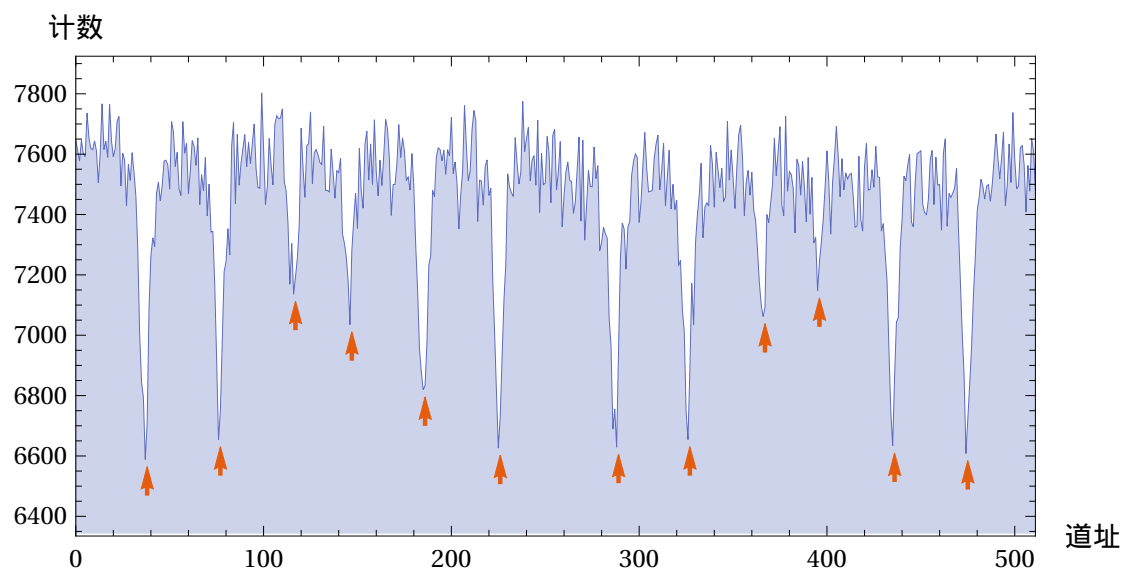
图 5: 所测两种样品的穆斯堡尔谱，箭头标志处为参考谱的吸收峰位置。

可见，虽经 ≥ 2 h 采谱，所得光子计数仍然很低，且难以识别出吸收峰；可见实验用信号源偏弱。事实上， ^{57}Co 半衰期 ~ 270 d，数年后其强度已经过低，难以得到足够强的谱线；故此后采用参考谱进行分析。

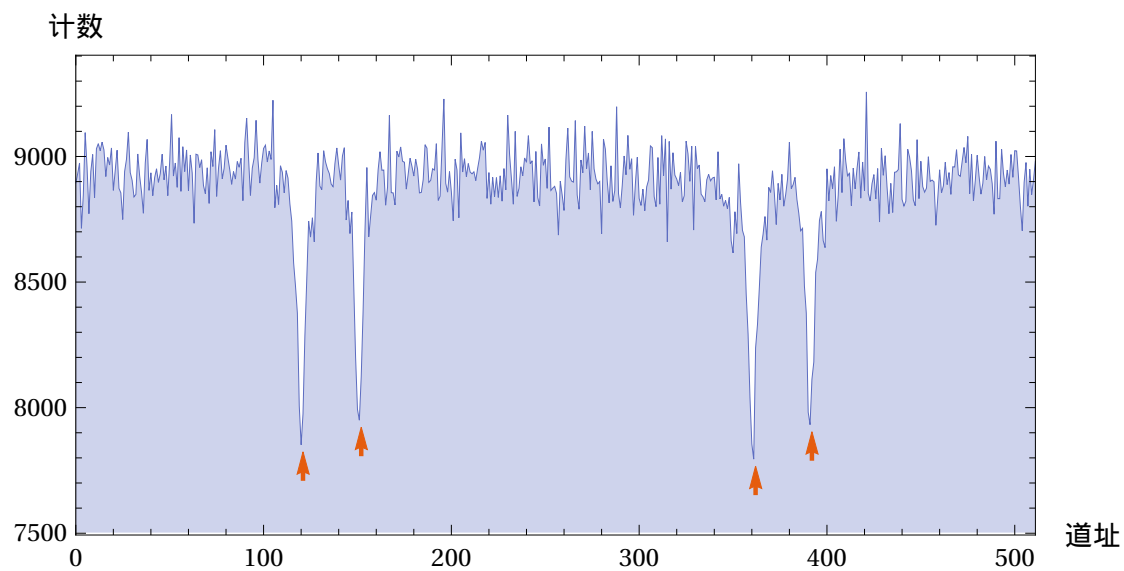
不过，若将参考谱吸收峰的位置标示于实验所得谱中，可见参考处附近确有吸收迹象，不过难以排除选择性确认偏差 (confirmation bias)，故此处不作为有效结果。

IV. 结果与分析

下面基于参考谱进行分析。参考谱如下：



(1) α -Fe



(2) 硝普酸钠

图 6: 所测两种样品的穆斯堡尔参考谱, 箭头标志处为吸收峰位置。

IV. 结果与分析

可见，参考谱计数比实验所得高过一个量级，相应地吸收峰明显，适合作为定量分析。首先，具体峰值位置由 Mathematica 的 FindPeaks 函数给出，有：

表 I: 参考穆斯堡尔谱的峰值道址

(1) α -Fe						
序号	1	2	3	4	5	6
右侧峰道址 v_R	289	327	367	396	436	475
左侧峰道址 v_L	226	186	147	117	77	38

(2) 硝普酸钠		
序号	1	2
右侧峰道址 v_R	362	392
左侧峰道址 v_L	152	121

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。

参见 [3], 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：

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

其中 $|v_6 - v_1|$ 由左右道址之结果平均给出，以下类似。

考虑 ^{57}Fe 的核塞曼分裂，可估测其发射 γ 射线的能量重心：

$$v_c \sim \frac{v_1 + v_2 + v_5 + v_6}{4} = \begin{cases} 381.75, & v \rightarrow v_R \\ 131.75, & v \rightarrow v_L \end{cases} \quad (9)$$

再利用 α -Fe 相对于源中 ^{57}Fe 核的同质异能移位值[3] $\mathcal{V}' = -0.185 \text{ mm/s}$, 可得该谱仪的零速度道址为：

$$v_0 = v_c \pm \frac{\mathcal{V}'}{K} = \begin{cases} 385, & v \rightarrow v_R \\ 128.5, & v \rightarrow v_L \end{cases} \quad (10)$$

IV. 结果与分析

零速度道址间隔 $385 - 128.5 = 256.5 \approx 256 = 512/2$, 表明放射源速度周期与 512 道基本匹配; 反之, 在确定速度变化与道址匹配的前提下, 这一结果实质上验证了同质异能移位的存在性, 并检验了 \mathcal{V}' 值的可靠性。

进一步, 具体计算超精细结构:

a. **核塞曼分裂**: 比较前述能级图与能谱图, 由 [3] $\frac{E_0}{c} = 4.807\,66 \times 10^{-8} \frac{\text{eV}}{\text{mm/s}}$, 可得塞曼分裂裂距:

$$\Delta E_g = \frac{|v_4 - v_2| + |v_5 - v_3|}{2} \cdot \frac{K}{c} E_0 \simeq 1.897 \times 10^{-7} \text{ eV}, \quad (11)$$

$$\Delta E_e = \frac{|v_3 - v_2| + |v_5 - v_4|}{2} \cdot \frac{K}{c} E_0 \simeq 1.089 \times 10^{-7} \text{ eV}, \quad (12)$$

上述结果均已对 v_L, v_R 平均。考虑到 ^{57}Fe 内磁场 [3] $B \simeq 33 \text{ T}$, 由 $\Delta E = g\mu_N B$, 以及 $\mu_N \simeq 3.152\,451 \times 10^{-8} \text{ eV/T}$, 可得:

$$g_g \simeq 0.182, \quad g_e \simeq 0.105, \quad (13)$$

$$\mu_g \simeq 5.75 \times 10^{-9} \text{ eV/T}, \quad \mu_e \simeq 3.30 \times 10^{-9} \text{ eV/T} \quad (14)$$

b. **同质异能移位**: 硝普酸钠相对 $\alpha\text{-Fe}$ 的重心偏移为:

$$\Delta v = \left| \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right)_{\text{硝普酸钠}} - (v_c)_{\alpha\text{-Fe}} \right| = 4.75 \quad (15)$$

结合道增益 K 及零速度道址, 可得相对移位 0.271 mm/s , 对应 $\Delta E = +1.30 \times 10^{-8} \text{ eV}$.

c. **电四极分裂**: 同样, 对硝普酸钠样品, 比较能级图, 可得:

$$\Delta E = |v_1 - v_2| \cdot \frac{K}{c} E_0 \simeq 8.36 \times 10^{-8} \text{ eV}, \quad (16)$$

此即 ^{57}Fe 第一激发态的电四极分裂裂距。

IV. 结果与分析

.....

此外，注意到吸收峰半高宽 $\simeq 5\sim 6$ 道，对应：

$$2\Gamma \gtrsim 5 \times \frac{K}{c} E_0 \simeq 1.37 \times 10^{-8} \text{ eV} \quad (17)$$

比激发态寿命对应的半高宽 $\sim 0.98 \times 10^{-8} \text{ eV}$ 来得宽，相应地，对应寿命 $\tau = \hbar/\Gamma \simeq 0.096 \mu\text{s}$ 比 $0.14 \mu\text{s}$ 来得稍短。由于源和吸收体均存在一定厚度，估计上述展宽主要源于自吸收的影响。

V. 结论

本实验以 ^{57}Co 作为 γ 源，利用多普勒效应微调制光子能量，获得了 $\alpha\text{-Fe}$ 和硝酸钠样品的穆斯堡尔吸收谱。在此基础上，结合已知参量校准了谱仪，进而研究了 ^{57}Fe 核能级的超精细结构，确定了 $\alpha\text{-Fe}$ 中 ^{57}Fe 的塞曼裂距、核磁矩及朗德 g 因子，测定了硝酸钠中 ^{57}Fe 相对于 $\alpha\text{-Fe}$ 的同质异能移位及其电四极裂距。

实验表明，将穆斯堡尔效应用于高分辨能级探测是十分强大的，尤其便于探测原子核的精超细结构。

VI. 致谢

感谢张双全老师的细致指导和耐心帮助；感谢 T_EX - L^AT_EX Stack Exchange¹，助我解决了众多排版问题。

¹ <https://tex.stackexchange.com/>

VI. 致谢

.....

- [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.