

穆斯堡尔效应

郑裕芳

穆斯堡尔效应是一种原子核无反冲的 γ 射线共振吸收或共振散射现象，是德国物理学家穆斯堡尔在 1957 年—1958 年观察 ^{109}Ir (铱-191) 的 γ 射线共振吸收时发现的。为此而荣获 1961 年诺贝尔物理学奖。他在演讲会上预言：“物理学这一个年轻分支，尚处于萌芽时期，不仅在扩展已有知识的谱学应用方面，而且在对未知现象和效应的了解方面，都将还会大有发展。”的确如此，现在，穆斯堡尔谱学已广泛应用于核物理、固体物理、表面科学、化学、生物学、地质学、考古学等领域。在研究物质微观结构的自然科学各领域几乎都有其踪迹，而且还能直接应用于工业和技术。

什么是共振吸收现象和无反冲共振？

共振在自然界中是十分普遍的，如力学中两个相同单摆的共振；声学中两个特征频率相同的音叉的共振。在光学中，如： NaCl 在酒精灯上燃烧发出黄光，即发出 Na-D 线，当光线通过一个装有钠蒸汽的透明容器时，部分 Na-D 线被钠蒸气吸收，在 Na-D 线处发现明显的吸收峰，这就是光学中的共振吸收。

反冲现象在我们日常生活中经常碰到的，在平静的湖面上有二只小船，当一个人从船甲跳到船乙的时候，船甲就会由于反冲而向后运动，而船乙则会得到能量向前运动。如果船冻结在冰中，人从甲船跳到乙船，甲船不会向后运动，这就是无反冲。

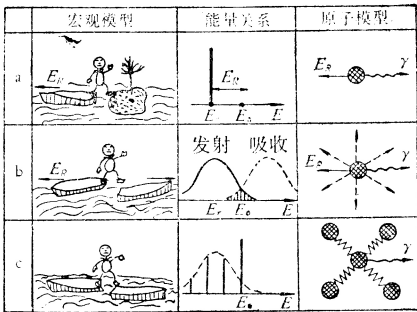


图 1 穆斯堡尔谱学有关的模型及其能量关系

若用船代表静止的原子核，当它发射出一个 γ 光子时，核本身也会受到反冲。同样，静止的吸收核也会得到能量。发射的 γ 射线能量与吸收的 γ 射线能量可以相差 $2E_R$ ， E_R 是原子核吸收 γ 光子而得到的能量。

在物理学中，不可确定性可以精确地用海森堡测不准原理的形式来表示： $(\Delta E)(\Delta t) \geq \hbar$ 。对原子核跃迁 $\Delta E = \frac{\hbar}{\tau} = \Gamma_H$ 。其中 τ 为激发态的平均寿命，

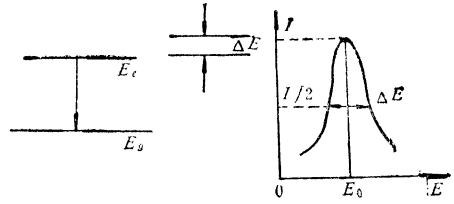


图 2

ΔE 或 Γ_H 称为谱线的自然线宽，它定义为谱线的半高度处的全宽度。如图 2 所示，由于谱线不论是吸收或发射总有一定的宽度，要实现共振吸收，必须要使吸收峰和发射峰有重叠的部分，在重叠部分才能产生共振吸收，对可见光 E 较小， E_R 也很小，且发射峰和吸收峰都比较宽，两峰重叠部分很大，故比较容易实现共振吸收，上面谈到的钠光的共振吸收就是如此。

对原子核 γ 射线发射，自然线宽很窄，例如，铁-57 (^{57}Fe) $E_0 = 14.4 \text{ keV}$ ， $E_R = 1.95 \times 10^{-3} \text{ eV}$ ， $\Gamma_H = 4.67 \times 10^{-9} \text{ eV}$ 。即核发射 14.4 keV 的 γ 射线时的反冲能量要比发射或吸收谱线的半宽度大几十万倍。因此，发射与吸收谱线一般情况不存在重叠部分，因而不会产生共振吸收现象。穆斯堡尔将发射核和吸收核嵌入固体的晶格中，使它们牢固地受到晶格的束缚，好比船在冻结的湖里，原子核发射 γ 射线和吸收 γ 射线时，再也不能自由反冲，这样大大减少了反冲能量 E_R ，从而有效地观测到无反冲的 γ 射线的共振吸收。

当一个以速度 v 运动的物体发射一个频率为 ω_0 的波时，静止的观测者观测到的波频率为 ω ，二者的

关系为 $\omega = \omega_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$ 这个现象称为多普勒效应。

当取一级近似时 $\omega = \omega_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right)$ ，相应的能量变为 $E = E_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right)$ ，所以多普勒效应所产生的附加能量为 $E_D = E_0 \frac{v}{c}$ 。

当放射源以速度 v 运动时，放射源发射的 γ 射线能量应加上多普勒效应能量 E_D 。所以这时发射的

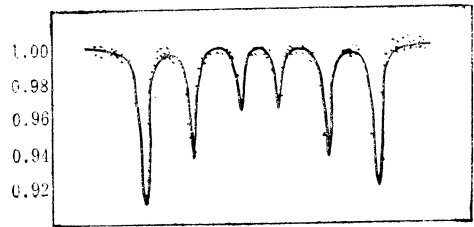


图 3 室温时 $\alpha\text{-Fe}$ 的透射穆斯堡尔谱

γ 射线能量为 $E_\gamma = E_0 - E_R + E_D$.

故可利用多普勒能量调制 E_γ 的大小.

穆斯堡尔谱呈明显的洛仑兹线型, 谱线中每个峰可以用一洛仑兹函数来描写:

$$y(X, A, \Gamma, Z) = \frac{A}{1 + \left(\frac{X - Z}{\Gamma/2}\right)^2}$$

其中 A 为峰的振幅, Γ 为峰的半高宽度, Z 为峰的位置, X 是自变量即道址. 谱线中若有 N 个峰, 则整个谱线是它们叠加而成的, 如图 3 所示.

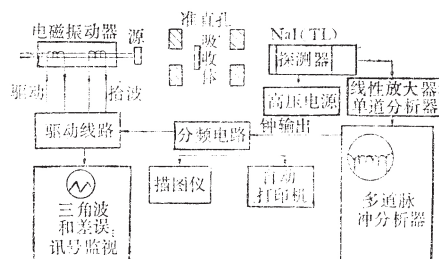


图 4 穆斯堡尔谱仪原理方框图

穆斯堡尔核共振现象对 γ 射线能量的依赖关系极为灵敏. 共振线非常窄, 它对核具有选择性, 这样可以通过探测 γ 射线能量极为微小的变化获得有关穆斯堡尔核附近的物理和化学环境的微观参数, 如电子结构、磁结构、阵点对称性等微观结构, 甚至对穆斯堡尔核邻近 $10-15 \text{ \AA}$ 的范围内的影响都可以觉察出来. 能量在 $10^{-12}-10^{-6} \text{ eV}$ 的变化都可以用此方法测量出来, 还能以较直接的方式分辨超精细相互作用.

庞德 (R. V. Pound) 和里布卡 (G. A. Rebka) 利用穆斯堡尔效应成功地验证了相对论预言的重力场谱线红移理论. 而海 (H. J. Hay) 等则验证了相对论预言的横向多普勒效应. 穆斯堡尔谱仪的原理方框图如图 4 所示.

当前穆斯堡尔谱仪向微处理机化、数据块积累化、高速化及提高精度和可靠性方面发展.

目前在各学科中观测到穆斯堡尔效应的元素有 40 多种, 同位素 80 多个, γ 跃迁 100 个左右. 其中最重要的是 ^{57}Fe 的 14.4 keV 和 ^{119}Sn 的 23.8 keV 能级的穆斯堡尔效应. 有关 ^{57}Fe 应用研究的文章在 1974 年法国 Bendor 国际穆斯堡尔谱学会议时占 76%, 在 1979 年南斯拉夫 Portoroz 国际会议时占 81%.

当然穆斯堡尔效应的应用也有其局限性, 它只能研究穆斯堡尔核, 很多轻元素还没有发现穆斯堡尔效应. 除 ^{57}Fe 、 ^{119}Sn 、 ^{151}Sm 、 ^{83}Kr 等少数穆斯堡尔同位素外, 一般元素还必须在低温下见到明显的穆斯堡尔效应. 目前研究得较多的还限于固体和少数调粘或冷冻液体. 对一般液体或气体还未观察到穆斯堡尔效应.

在我国, 目前已装备穆斯堡尔谱仪约 40 台, 有几十个单位正在开展这项研究, 并已取得不少研究成果.