

# 一种理想的穆斯堡尔源——同步辐射光

李 士

从电动力学理论中可知：一个作加速运动的带电粒子会以电磁波的形式辐射能量。同样一个电子在同步加速器和电子储存环中作圆周运动时，由于受到向心加速度的作用也会辐射能量。当带电粒子的速度接近光速时，即  $v/c \cong 1$ ，电磁辐射将集中在轨道的切线方向，其辐射形状呈光锥形，由于电子在轨道上连续运动，因此辐射呈扁平扇形发出。这种辐射就是同步辐射。同步辐射具有许多特点，如波长范围宽、高辐射强度和准直性、完全的偏振性、时间脉冲结构好、高稳定性、光源尺寸和光非常洁净等优点，因此它在固体物理、材料科学、地质矿物学、化学、生物医学和技术科学等方面得到广泛的应用。可以说在研究物质微观结构的基础科学和应用科学各个领域中都几乎都有它的用武之地。

随着穆斯堡尔谱学应用的迅速发展，利用穆斯堡尔同位素制备的穆斯堡尔放射源其强度不能满足科学技术发展的需要，而同步辐射的强度比一般光源大，极化度高，而且时间脉冲结构好，有可能成为一种理想的穆斯堡尔源。由于同步辐射光源的出现，提供了许多新的实验的可能性。表 1 列出了有可能用于同步辐射穆斯堡尔实验的某些核素及其跃迁特性。

同步辐射光用于穆斯堡尔实验目前尚处于探索阶段，这是因为有许多技术问题尚需解决，它的困难是

表 1 有可能用于同步辐射穆斯堡尔实验的某些核跃迁<sup>[1]</sup>

同位素	跃迁能 (keV)	半衰期 (ps)	共振截面 ( $10^{-20}\text{cm}^2$ )	自然丰度 (%)
<sup>19</sup> F	110	600	20.0	100
<sup>57</sup> Fe	14.4	97800	256.0	2.2
<sup>83</sup> Kr	9.4	$0.14 \times 10^6$	107.0	11.6
<sup>157</sup> Gd	64	$0.46 \times 10^6$	23.0	15.7
<sup>159</sup> Tb	58	105	10.5	100
<sup>165</sup> Ho	95	22	8.3	100
<sup>181</sup> Ta	6.2	$6.8 \times 10^6$	167.0	100
<sup>181</sup> Ta	136	40	6.0	100
<sup>187</sup> Re	134	10	5.4	63
<sup>201</sup> Hg	32.2	200	0.95	13

穆斯堡尔谱线的线宽为  $4.67 \times 10^{-9}\text{eV}$ ，即共振吸收的能量范围约为  $10^{-9}\text{eV}$ ，而同步辐射光的强度虽然很高（约为  $10^{14}$  光子/秒），通过过滤器（单色器）后光的强度约为  $10^{10}$  光子/秒，其能量范围远远大于穆斯堡尔效应共振吸收能量范围，而且这些对共振吸收不灵敏的无用光子，还会产生较强的与共振吸收不易区分的电子散射本底，这是至今同步辐射光还未能成为穆斯堡尔源的主要原因之一。

如果能够设计出一种比较合适的过滤器，则经过过滤的同步辐射光可以作为理想的穆斯堡尔源，即能

保持同步辐射光的强度几乎不减少,又能使通过过滤器后同步辐射的辐射频段宽度仅为穆斯堡尔谱线自然线宽的几倍,同时在这个有用的辐射频段之外,其辐射强度大大降低,在这种情况下,经过过滤的同步辐射光可以作为理想的穆斯堡尔源而用于穆斯堡尔实验. Trammell 等人研究了这种方法,并对各种不同过滤器方案的效率进行了计算. 目前这方面的工作尚在探索阶段. 最简单的过滤器是利用共振散射和非共振布喇格散射在反射性质上的不同,因为非共振散射是瞬时的,而共振散射有一个接近于同质异能态寿命的延迟时间,我们可以利用同步辐射光的时间脉冲结构好的特性来区分这两种散射,从而减小本底的影响. 对于很薄的薄膜来说,共振散射反射率与非共振散射反射率之比等于其散射振幅平方之比. 我们可以选取对共振散射来说具有适当厚度的薄膜,使两者反射率具有同一量级,对非共振布喇格散射来说这样的厚度还是相当薄的. 例如,对于  $^{57}\text{Fe}$  核  $14.4\text{keV}$  的  $\gamma$  射线的共振散射振幅约相当于 440 个电子(强度估算),而朝前电子散射振幅则为 26 个电子,在  $90^\circ$  散射角上只有 7.6 个电子. 对于铁的  $[332]$  晶面的布喇格散射角趋近  $90^\circ$ . 计算表明  $M = 10^3$  原子层厚度的铁薄膜,经三次反射后(三个单色器串联使用)可达到过滤作用.

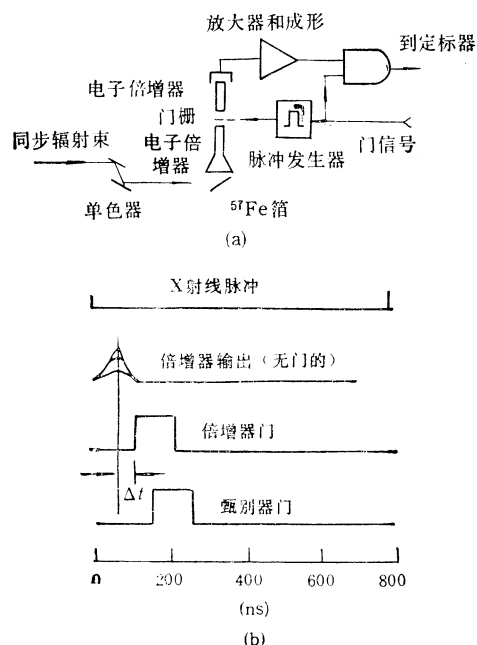


图 1 (a) 使用在斯坦福同步加速器上的门转换电子探测器简图. (b) 定时示意图.

时间过滤也是一种过滤方案. 同步辐射由于其脉冲非常短  $\tau \approx 2 \times 10^{-10}$  秒,脉冲间隔  $\Delta \approx 10^{-6}$  秒. 非

共振的电子过程(如散射,光子和俄歇电子等)一般是在脉冲过程中瞬时发生的,而核共振过程产生的平均时间延迟为  $\Gamma^{-1}$ . 对于大多数穆斯堡尔共振  $\tau < \Gamma^{-1} < \Delta$ , 如果时控探测器在初始脉冲后的  $\Gamma^{-1}$  时间内能恢复正常工作,则核共振就能予以测定,而且在时间上又能将非共振过程区分开来.

另外利用薄膜过滤器或厚过滤器也是一种过滤方案. 薄膜过滤器是在薄晶体上用外延沉积  $^{57}\text{Fe}$  和  $^{56}\text{Fe}$  的交替层作为超点阵布喇格反射过滤器. 薄膜过滤器可以给出很窄的洛伦兹型的穆斯堡尔谱线,即给出约为自然线宽的宽度,使用厚过滤器也具有较大的优越性. 其布喇格反射率比起前者高好多倍(对  $^{57}\text{Fe}$  来说,  $[332]$  晶面反射率为 0.87),当然此时穆斯堡尔谱线会加宽(对  $^{57}\text{Fe}$  来说  $\sim 50\Gamma$ ),不过反射强度也会大大增加.

1978 年 Cohen 等人以同步辐射激发  $^{57}\text{Fe}$  的  $14.4\text{keV}$ ,  $100\text{ns}$  的激发态得到了初步结果. 其实验装置和定时示意图如图 1 所示. 在他们的实验中,作者研制了门转换电子探测器来探测由同步辐射激发的  $^{57}\text{Fe}$  核  $14.4\text{keV}$  产生的转换电子. 这个实验装置已使用在斯坦福的同步加速上 (SSRL), 图 2 为实验得到的共振曲线.

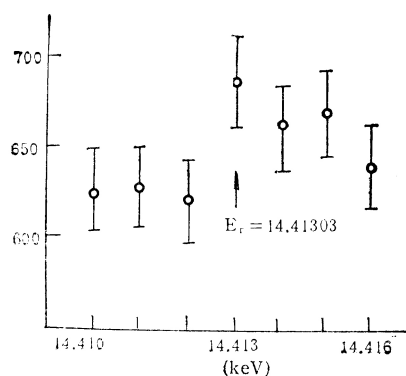


图 2 在核激发能范围内的共振曲线

到目前为止已有许多利用同步辐射光作为穆斯堡尔谱学实验的方案. 如果从同步辐射中能得到和穆斯堡尔谱线线宽相接近的、足够强的、极化的和准直性好的辐射光源,则可以用同步辐射作为穆斯堡尔源,并可以开展一些新的实验,如极化的辐射源可以用来研究磁的精细结构,良好的准直性可作原子核的布喇格衍射实验及红移效应实验等. 目前各国科学工作者正在设法提高同步辐射强度,改进单色器性能,可以预见在一个不太长的时间内,人们一定会得到同步辐射穆斯堡尔源.