

同步辐射核共振 Bragg 散射

赵越超

(中国科学院高能物理研究所同步辐射室,北京 100039)

本文简述核共振 Bragg 散射的原理以及同步辐射在这方面的实验技术和应用。

原子核具有能级结构(如图 1 所示)。能量等于 $E_j - E_i$ 的电磁辐射可以使原子核由 E_i 能级跃迁到 E_j 能级而产生共振效应。核共振现象可分为两类:一类是一个原子核单独地被辐射场激发产生能级跃迁,文献上将这类现象称为核荧光^[1];另一类是大量的原子核发生跃迁的集体效应,使出射的辐射液在空间产生消长现象,这类现象称为核共振 Bragg 散射(又称为核共振 Bragg 衍射)。人们熟知的 Mössbauer 效应,是无反冲的核共振吸收和发射现象^[2]。早在 50 年代末 60 年代初,即在 Mössbauer 发现了 Mössbauer 效应不久,就有人用核反应产生的 γ 射线、放射性同位素、电子回旋加速器发出的韧致辐射和常规 X 光管发出的 X 射线来研究核共振荧光和核共振 Bragg 散射。但是,实现这些实验是极端困难的,获得的信息很有限,故对核物理、固体物理等领域的吸引力不大。以

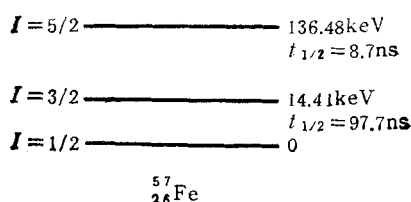


图 1 ^{57}Fe 的原子核能级示意图
(I 是核自旋量子数)

后基本上没有再进行类似的实验,仅在理论研究方面取得一些进展,直到同步辐射装置的建立并因其产生的具有优异性能的电磁辐射,才使人们注意核共振荧光和核共振 Bragg 散射的研究。

当电子(或其他荷电粒子)以接近光的速度

沿弯曲轨道运行时,会沿轨道的切线方向发出强烈的电磁辐射。由于这种辐射最早是于 1946 年在一个电子同步加速器中发现的,故称为同步辐射^[3]。现代的同步辐射装置能提供能量高达几十 keV 的高通量、高亮度、高偏振度和高分辨时间结构的电磁辐射。把同步辐射应用到核共振荧光和核共振 Bragg 散射的研究中,理论上和实验上都取得了可喜的成果。

一、基本原理

具有合适能量的电磁辐射作用在一个共振核上,能使这个核由基态跃迁到激发态,产生共振吸收,然后通过放出能量又退激回到基态。原子核有两种退激过程(如图 2 所示):一种是发

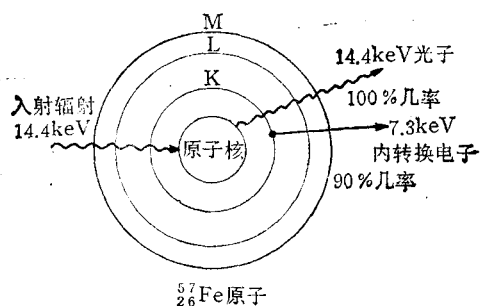


图 2 电磁辐射与 ^{57}Fe 作用的示意图

射一定能量的光子,称为共振发射;另一种是通过原子核的电磁场与原子内壳层电子作用而使其激发,这种过程称为内转换过程。核共振散射,就是核共振吸收电磁辐射后再共振发射一定能量的光子的过程。

在物质中传播的电磁波,还受到电子云的

弹性散射(称为瑞利散射)。其经典模型是这样的:电磁波使电子受激振荡成为带电振子,而带电振子会发生辐射(可参阅经典电动力学^[3]或X射线学^[4]这类教科书)。显然,为了揭示核共振散射,核共振散射截面(或散射几率)不应比电子云散射截面小很多。可以估算^[5],对于Fe样品,室温下,每个阵点有效的相干核共振散射截面为 $\sigma_c = 3F^2 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ (F 是样品中共振核⁵⁷Fe的分数),而每个Fe原子的电子云散射截面 $\sigma_e = 6 \times 10^{-21} \text{cm}^2$,且 σ_e 随出射波与入射波方向的夹角增加而显著减小。由此可见,若 F 足够大,核散射对辐射的贡献不比电子云散射的贡献小很多。另一方面,对单个共振核而言,共振散射截面一般要比共振吸收截面小几个数量级,因而通常晶体中的共振散射波衰减很快,只能在几个原子层尺度上传播。但如果入射波非常接近 Bragg 角时,则发生核共振 Bragg 散射。理论表明^[6],这时其他核对上游核所散射的波的核共振吸收及非弹性散射受到抑制,增加了 Bragg 散射几率,产生较大的反射波和透射波振幅,保证了核共振散射信号的实验测量。

基于上述的基本物理图象,核共振散射有其独特的物理现象,反映了一些有意义的物理内容。下面简单地介绍其中的一些物理现象。

1. 偏振混合 (polarization mixing)

核共振散射过程是多极辐射过程。习惯上记为 $E1, E2 \dots$, 分别相应于电偶极辐射、电四极辐射等;以及 $M1, M2 \dots$, 分别相应于磁偶

极辐射、磁四极辐射等。而电子云对辐射的散射则仅属于电偶极散射,即 $E1$ 辐射。因此,核共振散射可以改变入射波的偏振性,而电子散射则保持入射波的偏振性。总的散射效果是两者的混合。

2. 频率响应

Hannon 等人^[7]计算了掠入射的电磁波在含有共振核⁵⁷Fe的衬底与其上Te薄膜组成的反射镜的核共振 Bragg 反射。Te膜的厚度选取使其对应于⁵⁷Fe共振能量(14.4keV, 相当波长为0.086nm)为四分之一波片,这样可减小电磁波的电云散射而获得纯的核共振散射。因为对于电子云散射,由Te表面反射的波与Te/Fe界面反射的波二者发生相消干涉,而核共振反射波仅来自Te/Fe表面(因为Te是非核共振介质)。Hannon 等人采用的反射镜配置如图3所示。计算表明,核共振散射贡献的反射系数 $|R|_{res}^2 \approx 0.7$, 线宽为 $\Gamma_{eff} \approx 20\Gamma$ (Γ 是共振能量的自然宽度,对于⁵⁷Fe的14.4keV能级, $\Gamma = 4.67 \times 10^{-9} \text{eV}$),而在包含共振能量1keV的范围内(13.9—14.9keV),非核共振散射所贡献的反射率 $|R|_{non}^2 \leq 10^{-3}$ 。计算结果示于图4。利用核共振散射原理做成的反射镜,有可能得到非常尖锐的反射谱。与之比较,常用的X射线单色器,其出射的单色光的能量宽度最小也才可到 10^{-4}eV 的数量级。

3. 时间响应

根据量子力学的测不准原理,能级的自然宽度 Γ 和能级寿命 $t_{1/2}$ 符合关系式 $\Gamma \cdot t_{1/2} \geq \hbar$ 。

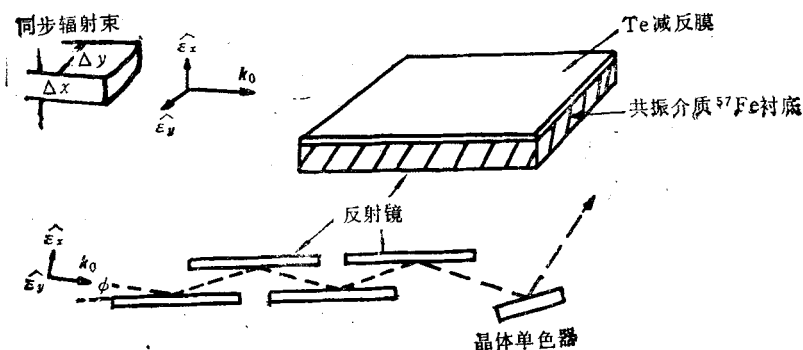


图3 核共振反射镜的几何设置

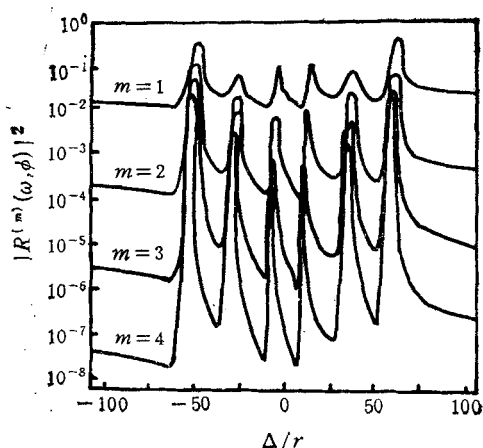


图4 核共振反射镜的反射强度的频谱

(横轴上的 Δ 是光子能量与核共振能级的能量的差值, r 是核共振能级的自然宽度;纵轴是反射率的平方, m 表示经过 m 次反射, ω 是光子能量;反射镜的几何设置示于图3, ϕ 为 4.4mrad ;内磁场 $B \perp K_0$,并且 B 躺在镜面上)

小于 100keV 的共振核激发态的寿命在 10^{-9} — 10^{-6}s 之间。而固体中电子受辐射激发由基态跃迁到激发态能带上,其能量范围较大,故激发态的寿命非常短,一般小于 10^{-14}s 。同步辐射具有时间结构。以北京正负电子对撞机(BEPC)的同步辐射装置为例,在贮存环单束团运行时,同步辐射为每隔 $8 \times 10^{-7}\text{s}$ 出现一个 $1.6 \times 10^{-10}\text{s}$ 宽的脉冲的电磁波。如果同步辐射脉冲照射到共振介质中,则电子散射、光电效应等与原子中电子壳层有关的过程将在 10^{-14}s 之内发生,而与核激发相关的过程将延迟 10^{-9} — 10^{-6}s 。因此使用时间分辨的探测技术,可以分辨核共振事例和非核共振事例。另一方面,同步辐射的脉冲特性使核共振 Bragg 散射出现随时间振荡的现象^[7]。

4. 量子拍

如果共振核某共振态的能级发生超精细分裂,会出现量子拍效应。这时,核共振 Bragg 散射信号的振幅作周期性变化。量子拍的基本特性是:尖锐的同步辐射脉冲瞬时地和相干地激发不同核激发态的亚能级,在随后的衰变中,出现不同的超精细跃迁辐射之间的干涉,由于这些辐射的频率相差微小,故出现“拍”现象。

二、实 验

实验上首先遇到的问题是怎样获得单纯的核共振 Bragg 散射信号。这是因为从样品出来的信号还包括电子云散射的贡献。原理上可以采用如下几种方法。

(1) 利用核共振事件时间滞后的特点,使用这样一个探测装置,它能在同步辐射脉冲照射到样品 10^{-7}s 后才启动,探测到的是纯粹的核共振信号。第一个同步辐射研究核共振的实验就用的这种方法^[8]。

(2) 利用某些晶体(如反铁磁性晶体)的“超点阵” Bragg 散射。这些晶体具有特殊的对称性,在某些取向上只对共振信号产生散射。

(3) 在共振晶体上制备一层非共振材料的减反膜(见图3),它削弱了整个样品对电子云散射的贡献,因而获得较纯的核共振 Bragg 散射信号。除了上述几种方法之外,还可以利用偏振性、电子散射的结构消光等方法来获取纯的核共振 Bragg 散射信号。

现简单介绍 Gerdau 等人所做的一个同步辐射核共振 Bragg 散射实验^[9,10]。实验装置如图5所示。从电子贮存环引出的多波长同步辐射(白光),经过一个 Ge(111)的双晶单色器,得到单色光(能量宽度 $\Delta E \approx 15\text{eV}$)。单色光的能量可以通过调节单色器相对光束的夹角来选择。这里选择的能量为 14.4keV 。单色光经过用作能量定标用的 Kr 气体盒(其 K 吸收边为 14.326keV),照射到由 ^{57}Fe 增丰的 YIG(钇铁石榴石)单晶薄膜与 GGG(钆镱石榴石)组成的核共振反射镜。YIG 的(002)面作为反射面,对电子散射是消光的。反射光穿过一个能沿水平方向移动的吸收体,进入探测装置。探测装置由探头和一套核物理常用的快—慢符合电子线路组成。电子线路由贮存环的束团发射器触发。他们用一个时间分辨率较高的塑料闪烁体探头,观察到样品的量子拍现象。他们的实验结果示于图6。结果表明,量子拍图谱给出了对单个铁原子核的超精细分裂和不同晶格位置

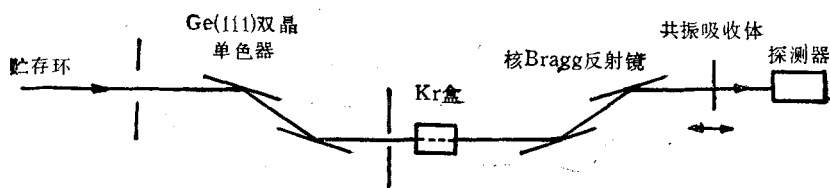


图5 Gerdau 等人的实验装置

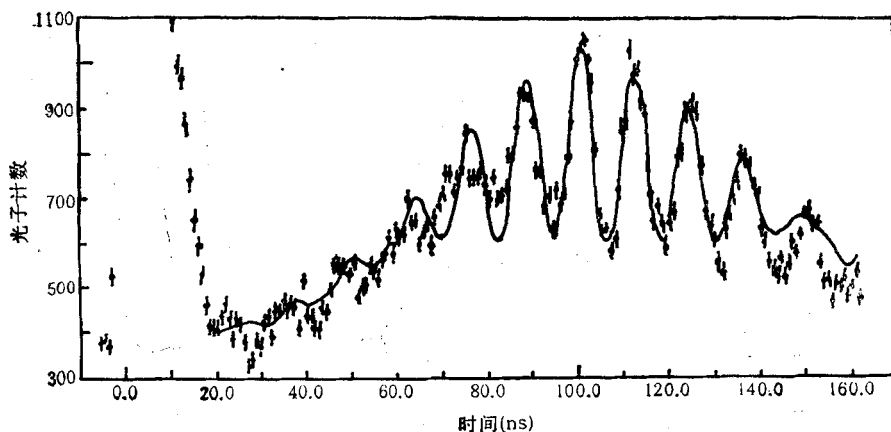


图6 核共振 Bragg 散射信号的时间谱
点是实验结果，线是理论计算结果

的核的能级移动的直接的、灵敏的测量。在测量超精细参数方面,可以达到常规的 Mössbauer 谱学难于达到的精度。

最后提一下同步辐射在 Mössbauer 谱学中的应用。应用 Mössbauer 效应作研究时,需要产生 γ 射线的放射源,自然希望同步辐射装置作为这个“放射源”。为了实现这一点,必须使同步辐射的单色化程度达 $\Delta E = 10^{-7} - 10^{-9}$ eV。常规的单色器是无法达到这一点的。一种可行的办法是采用核共振反射镜,其反射波的能量宽度非常小(参看图4),可作为 Mössbauer 谱学的“放射源”。同步辐射的良好偏振性、准直性和高时间分辨性对 Mössbauer 谱学非常有用,这是一般的放射源所不能比拟的。

目前同步辐射应用于核共振 Bragg 散射的实验还处于探索阶段。已报道的结果都是用弯曲磁铁引出的同步辐射光做实验所得的,计数率很低,只有 1Hz。采集一套完整的数据往往要花费几个小时乃至数天时间。但如果采用由适当的插入件引出的同步辐射,可使计数率提

高到 10^4 至 10^5 Hz。现在,世界上几个主要的同步辐射装置都在开展这方面的研究。例如正在兴建的欧洲同步辐射装置(ESRF),将核共振散射作为束线和实验站建设的研究项目^[1]。在日本正兴建的 SPring-8 同步辐射装置中也是这样。

在应用方面,核共振散射在表面核磁结构、薄膜磁性等方面有重要的应用价值。同时,基于核共振 Bragg 散射原理的 X 射线光学,由于信号的相干长度较长(0.3—30m),有希望在 X 射线干涉术方面开辟新的研究领域。

本文作者对冼鼎昌教授在科学上的启发和吴自勤教授的热情鼓励表示衷心的感谢。

- [1] H. Winick and S. Doniach, Synchrotron Radiation Research, Plenum Press, New York, (1980).
- [2] 夏元复、叶纯灏、张健编著,穆斯堡尔效应及其应用,原子能出版社,(1984).
- [3] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics (2nd Ed.), J. Wiley & Sons, Inc., (1975).

(下转第 732 页)