

## 六、其 它

此外, X射线貌相术还可以用来观测晶体中杂质的偏析和沉淀,以及表面损伤的程度。将受过损伤的表面层逐层剥蚀,再用双晶衍射仪测量表面反射的摆动曲线的半高宽度 $\beta$ ,直到 $\beta$ 不再减小时为止,可以求出损伤层的厚度。某些应变场很小的点阵微缺陷可以通过铜或锂原子缀饰后,在貌相图中显示。磁性材料(如铁和铁-硅合金等)晶体的磁畴壁以及铁电材料(如钛酸钡等)晶体的铁电畴壁也可以利用X射线貌相方法显示。由于电、磁致伸缩效应,在畴壁

面缺陷处产生微应变区,因而在貌相图中产生相应的衬度效应,并有一定的消象规律。

### 参 考 文 献

- [1] 许顺生,物理,8-4(1979),306.
- [2] E. M. Juleff. *International J. Electronics*. 19 (1965), 153.
- [3] P. Wang, *Solid State Tech.*, 12(1969), 25.
- [4] A. E. Jenkinson, A. R. Lang. *Direct Observation of Imperfections in Crystals*, Interscience Publishers, 1962, p. 471.
- [5] 杨传铮、姜小龙、许顺生,物理学报,29-3(1980),341.
- [6] J. Chikawa, Y. Asaeda, I. Fujimoto, *J. Appl. Phys.*, 41(1970), 1922.
- [7] M. Renninger, *J. Appl. Cryst.*, 9(1976), 178.
- [8] J. Kies, R. Köhler, W. Möhling, *Phys. stat. sol. (a)*, 37(1976) K113.

## 热 中 子 散 射 及 其 应 用

杨继廉 叶春堂 牛世文

(中国科学院原子能研究所)

本文介绍热中子散射的一般原理及其在物理等科学研究中的应用,对于近年来出现的新技术与新方法也作了简要叙述。

### 一、引 言

随着原子核反应堆的建立而发展起来的热中子散射研究工作,从1945年到现在已有三十多年的历史。三十多年来,实验技术的发展,特别是高通量反应堆、电子直线加速器和电子计算机的建立与发展,大大推动了热中子散射的研究与应用,使它成为研究物质结构的重要工具,它与X射线、电子衍射以及各种能谱技术相结合,使结构研究得到更好的结果。

中子是组成原子核的基本粒子之一。中子的宏观电荷为零,它穿透物质的本领很强,可用于研究物质内部的特性,特别适合于凝聚态物质结构的研究。而热中子还有其他一些重要性质。

热中子的波长为 $10^{-7}$ — $10^{-8}$ 厘米,和大多数晶体的晶格距离有相同的量级,因此热中子受到晶体散射时,散射波将出现干涉效应,这就是中子衍射现象。中子衍射和X射线衍射一样,可用于结构分析,但它又不同于X射线衍射,差别的本质在于:中子是和原子核相互作用,而X射线主要是和核外电子相互作用。这样,在结构分析中,中子不仅能测定轻元素在晶格中的位置,而且能分辨X射线难于分辨的近邻元素的差别。热中子的能量在 $10^{-3}$ — $10^{-2}$ 电子伏特范围,与声子能量相近,可用于声子特性的研究。此外,中子还具有磁矩(1.91核磁子),磁性物质对热中子的散射,除了核散射外,还会产生磁散射。可用磁散射研究磁性物质的磁结构。

热中子散射分为弹性散射和非弹性散射。关于中子非弹性散射过去已有专文介绍<sup>[1]</sup>,因此,本文将着重介绍中子衍射,同时也将对近来发展很快的中子小角度散射技术作一些叙述。

## 二、热中子散射原理<sup>[2]</sup>概述

### 1. 热中子衍射

我们知道中子与X光一样具有波动性和粒子性,它们与物质之间的相互作用有相似之处.当一束X光通过结晶物质时,就会产生衍射.同样,当热中子通过结晶物质时,也产生类似的衍射现象.当满足布喇格(Bragg)条件 $2d \sin \theta = n\lambda$ 时,则产生干涉极大,式中的 $d$ 是晶面间距, $\theta$ 为散射角, $\lambda$ 为中子的波长, $n$ 为反射波长的级次.衍射峰的强度正比于结构因子 $F$ 的平方,即

$$I_{hkl}(\text{核}) \propto F_{hkl}^2(\text{核}), \quad (1)$$

$$F = \sum_j b_j \exp[2\pi i(hX_j + kY_j + lZ_j)], \quad (2)$$

其中 $b_j$ 是晶体中第 $j$ 个原子的相干散射振幅,这个值是由实验决定的,大多数元素的相干散射振幅已经测定了; $hkl$ 是反射面的指数; $X_j, Y_j, Z_j$ 是第 $j$ 个原子在晶胞中的坐标参量.

由于中子具有磁矩,当中子通过磁性晶体时,会产生磁的中子衍射.对于非极化中子而言,磁衍射强度正比于磁的结构因子的平方及磁矩相对于散射面的取向,即

$$I \propto q^2 F_{\text{磁}}^2, \quad (3)$$

$$q^2 = \sin^2 \alpha, \quad (4)$$

其中 $\alpha$ 是磁矩方向与反射面法线之间的夹角,见图1.式(3)中的磁结构因子公式表示如下:

$$F_{\text{磁}} = \sum_j \mathbf{p}_j \exp[2\pi i(hX_j + kY_j + lZ_j)], \quad (5)$$

式中 $\mathbf{p}_j$ 为第 $j$ 个原子的磁散射振幅,用矢量来表示,就是说它不仅与磁矩的大小有关,而且与磁矩的方向有关.

用中子衍射测量磁性晶体时,中子衍射强度是核衍射强度与磁衍射强度之和,即

$$I_{hkl} = I_{hkl}(\text{核}) + I_{hkl}(\text{磁}). \quad (6)$$

以上所述是传统的粉末衍射结构分析法.这个方法要求各个峰能分开,然而,实际上只有高对称的晶体可得到分解的衍射峰,所以,过去只能用此法决定具有十个可变参数的简单结构问题.为了解决叠加的衍射峰不可分解的问题,

Rietveld<sup>[4]</sup>提出了衍射峰的轮廓分析(profile)的新方法,他首先假定每一个衍射峰的强度分布服从高斯函数,据此就可以写出衍射峰的强度分布为

$$I_i = \epsilon j_k^2 L_k \frac{2\sqrt{\ln 2}}{H_k \sqrt{\pi}} \exp\{-4 \ln 2 [(2\theta_i - 2\theta_k)/H_k]^2\}, \quad (7)$$

式中 $\epsilon$ 为计数管步进宽度; $S_k^2 = F_k^2 + J_k^2$ 是核散射和磁散射对衍射峰的贡献的总和; $j_k$ 是反射面的重复因子; $L_k$ 是洛伦兹因子; $2\theta_k$ 是第 $k$ 个衍射峰的准确位置; $2\theta_i$ 是偏离 $2\theta_k$ 的角度; $H_k$ 是衍射峰的半宽度.

这个高斯分布的假定与实际情况符合得较好.如果某一散射角有几个峰重叠,只要把各个衍射峰按高斯分布加起来即可.在这个方法中,无需求出每一个峰的积分强度,只要按一定的间距把衍射峰的角度分布一点一点地测出来,再用数学方法把相应的各点的强度计算出来,并用最小二乘法决定结构.

如果用单晶体进行中子衍射测量,则衍射强度写为

$$I_{hkl} \propto F_{hkl}^2 / \sin 2\theta. \quad (8)$$

在测量强度后,采用傅里叶综合法把欲求的原子坐标参数定出来.大致步骤是,先把强度还原为结构振幅 $|F_{hkl}|$ ,再乘上位相,然后用傅里叶变换计算投影图或截面图,一般用下式去计算:

$$\rho(XYZ) = \frac{1}{V} \sum_h \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_l |F_{hkl}| e^{i\alpha_{hkl}} \cdot e^{i2\pi(hX+kY+lZ)}, \quad (9)$$

其中 $\alpha_{hkl}$ 为相位角.由投影图或截面图得到各原子位置参数后,再用最小二乘法求得精确的位置参数.

### 2. 中子小角度散射<sup>[5]</sup>

中子小角度散射原理与X射线小角度散射原理相似.当一束波长为 $\lambda$ 的中子穿过由许多颗粒组成的物质(这些颗粒间的距离相当远)时,我们考虑一个颗粒中各个原子对中子波的散射,当散射方向与入射的方向一致时,各个原

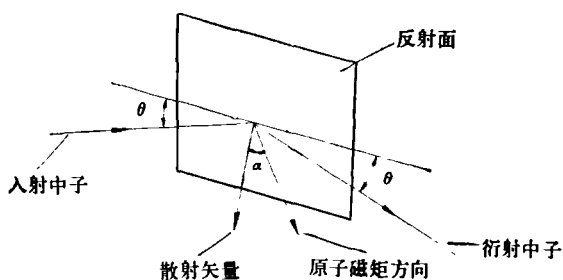


图1 原子磁矩与散射矢量的夹角  $\alpha$  示意图<sup>[3]</sup>

子散射的中子波是同位相的，散射波的振幅是相加的，散射强度有最大值；随着散射角的增加，各个原子的散射波间的位相差也相应增大，散射波间的相干性减弱，因而散射强度相应降低；当  $2\theta = \frac{\lambda}{D}$  时，位相在  $0$  与  $\pi$  之间的散射波

的数目和位相在  $\pi$  与  $2\pi$  之间的散射波的数目相等，这时合成的散射波振幅为零。散射强度亦为零。可见只要找到散射强度为零的角度  $2\theta$ ，即可得到表示颗粒大小的值  $D$ 。由于  $D$  比波长  $\lambda$  大几十倍以上，所以  $2\theta$  值一般很小，约在几分到两度的范围内。如果样品中有圆球形颗粒，圆球的大小又完全相等，这时中子散射强度为

$$I(\theta) = KM \left( \sum_{i=1}^N b_i \right)^2 \exp \left[ -\frac{4\pi^2}{3\lambda^2} \bar{R}^2(\theta)^2 \right], \quad (10)$$

式中  $K$  为仪器参数； $M$  为样品中的颗粒的数目；每个颗粒由  $N$  个原子组成； $b_i$  为颗粒中第  $i$  个原子的核散射振幅； $\bar{R}$  为颗粒的迴转半径； $\theta$  为散射角； $\lambda$  为中子波长。

### 三、中子散射的基本实验装置简介

要进行中子散射研究，首先要有中子源，其通量至少在  $10^{12}$  中子/厘米<sup>2</sup>·秒以上。此外还要有各种散射装置：二轴中子衍射仪、三轴中子谱仪、四圆衍射仪、飞行时间中子谱仪、小角度散射装置等。

(1) 一般的二轴中子衍射仪的构造如图2所示。主要由准直器、单色器、测角仪、探测器、记录系统、控制系统及防护体等构成。为了研

究各种条件下的结构效应，还可在二轴谱仪上附加电磁铁、高低温装置及高压装置等。

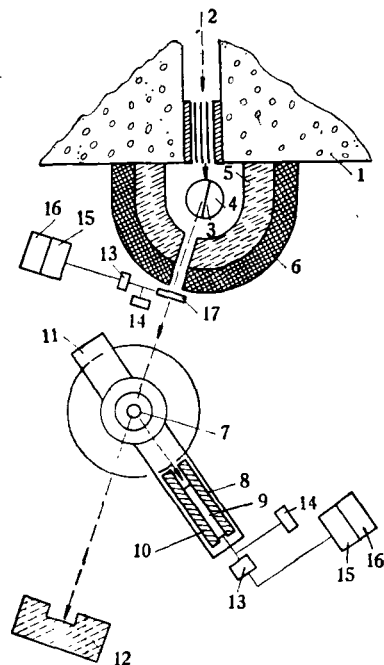


图2 中子衍射仪的构造示意图<sup>[6]</sup>

1. 反应堆防护； 2. 第一准直器； 3. NaCl 单晶体；
4. 晶体台； 5. 含硼石蜡防护； 6. 铅砖； 7. 样品及样品台；
8. 第三准直器； 9. BF<sub>3</sub> 计数管；
10. 计数管防护； 11. 反承重； 12. 捕捉器； 13. 阴极跟随器；
14. 高压； 15. 放大器； 16. 定标器；
17. 监视器

三轴谱仪是在二轴谱仪上加一个分析器。用三轴谱仪可以测量色散曲线，也可用来测量含H较多的晶体结构。

四圆中子衍射仪实际上是二轴衍射仪加一个二圆测角仪和转角的控制系统。利用四圆衍射仪可以测量单晶体中任何一个反射面，这样就大大地丰富了单晶衍射的数据。可用它来研究比较复杂的晶体结构。

(2) 飞行时间中子谱仪是用飞行时间方法进行中子散射实验，它除了脉冲中子源外，还装有准直器、散射室、探测器、多道时间分析器等部分（见图3）。利用飞行时间中子谱仪可以测量多晶样品的晶格振动能谱、声子态密度等；也可用来研究晶体结构及磁结构，对研究结构的瞬时变化特别有利。

(3) 中子小角度散射装置一般由波长大于

4 埃的中子源, 100 米左右的中子导管, 机械选择器, 二维的位置灵敏探测器、记录系统及控制系统等组成。装置示意图见图 4。

关于其他类型的仪器, 不一一在此介绍了。

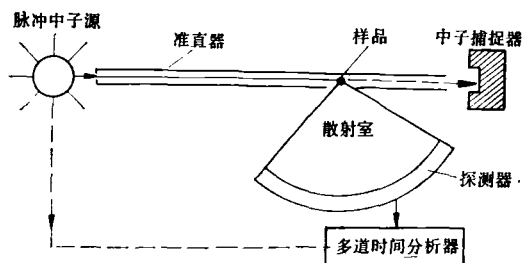


图 3 飞行时间中子谱仪示意图<sup>[7]</sup>

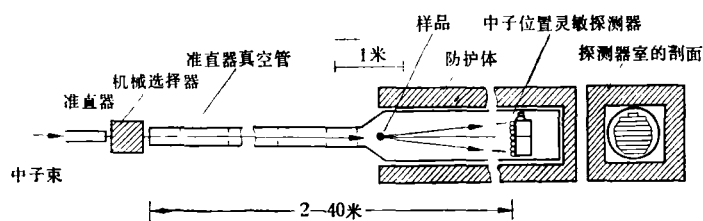


图 4 中子小角度散射装置示意图<sup>[4]</sup>

#### 四、中子衍射在结构研究中的应用

##### 1. 用中子衍射法测定晶体结构

用中子衍射测量晶体结构, 很多工作都是测定轻元素如 H, Li, O 等在晶格中的位置。早期是用多晶样品进行中子衍射的, 分析方法是尝试法, 例如对 NaH 的结构分析, 就是根据粉末衍射图确定为 NaCl 型结构的。此外, 还对 TiH 这一类型氢化物及 W-C 类型的化合物的结构也用中子衍射进行了研究。Hewat<sup>[9]</sup> 曾用衍射峰的轮廓分析法研究 KNbO<sub>3</sub> 的相变, 在转变温度 435℃ 以上, KNbO<sub>3</sub> 是钙钛矿型结构, 晶胞常数是 4 埃, 各原子的位置是: K: 000; Nb:  $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ ; O:  $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ ,  $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ ,  $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ 。相变后空间群从 P<sub>m3m</sub> 变为 P<sub>4mm</sub>。在变为正交结构时, 各原子在 Z 向的位移是: K: 0.018 ± 0.006 埃; Nb: 0; O<sub>I</sub>: 0.044 ± 0.001 埃, O<sub>II</sub> = O<sub>III</sub>: 0.040 ± 0.001 埃, 这个结果与单晶分析的结果一致。据统计, 曾用这个方法成功地研究过 150 个结构。

物理

单晶体的中子衍射结构分析, 现在大多数是在四圆衍射仪上收集数据, 用傅里叶综合法求得各个原子的位置。例如, 为了解决核磁共振等方法测定 FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 中 H 原子位置的不一致, 用中子衍射测量了 FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 的结构<sup>[10]</sup>。数据收集是用四圆衍射仪, 用 θ-2θ 步进扫描方式进行测量, 收集了 1776 个衍射峰数据, 用差值傅里叶综合法得到各原子的位置参数示于表 1。

这些直接测定的 H 原子位置, 给核磁共振法对 H 位置的猜测以明确的回答, 从而解决了由猜测所引起的各种矛盾。

近几年来, 用中子衍射对许多生物分子的结构进行了分析。工作是从测定简单的氨基酸小分子 (如乙氨酸) 开始的, 逐渐到较复杂的生物分子结构如肌红蛋白等的结构研究。

利用中子衍射法测量 3d 过渡族合金中的有序与无序的问题也是一个有效的方法。而 X 射线是无能为力的。对于中子衍射, 由于这些元素的相干散射振幅相差较大 (见表 2), 因而能测定他们在晶格中的位置。曾用中子衍射研究过 Fe-Co, Fe-Cr 等合金的有序度。还用中子衍射对稀土-钴合金中的有序度进行了研究, 例如, Th(Co<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)<sub>5</sub> 的中子衍射研究<sup>[11]</sup>, 得到的结论是 Fe 优先占据 3g 位置。我们最近对 Y[Co<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>]<sub>5</sub> 及 Ce[Co<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>]<sub>5</sub> 进行了中子衍射测量, 得到的结论是 Cu 优先占据 2c 位置。

中子衍射对结构相变的研究也进行了一些工作, 如 CD<sub>4</sub>, NaSH 等相变的研究。1973 年日本科学家曾用飞行时间中子衍射法研究了 NaNO<sub>2</sub> 单晶体在外电场作用下的结构相变<sup>[12]</sup>。作者根据中子衍射强度对时间的依赖关系导出 NO<sub>2</sub> 绕 [001] 轴旋转的结论, 从而否定了红外测量所推断的 NO<sub>2</sub> 绕 [100] 旋转的说法。

此外, 还可用中子衍射对金属、合金中的择优取向及晶体的形貌进行研究。

##### 2. 用中子衍射研究磁性物质

用非极化的中子对各种磁性物质进行研

表 1

	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
Fe	0.00000	0.00000	0.00000	H <sub>12</sub>	0.37822(44)	-0.2163(47)	0.00566(30)
Cl	0.30923(5)	0.25828(4)	0.07702(4)	Fe	0.0000	0.5000	0.0000
O <sub>1</sub>	0.00228(11)	-0.00077(8)	0.24967(6)	O <sub>2</sub>	0.2782(11)	0.7051(9)	0.0707(8)
O <sub>2</sub>	0.27206(11)	-0.20276(11)	0.06720(8)	H <sub>11</sub>	-0.1055(35)	-0.0783(28)	0.1563(25)
H <sub>11</sub>	0.10463(38)	0.07174(29)	0.34121(23)	H <sub>12</sub>	0.1016(31)	0.0716(24)	0.2096(21)
H <sub>12</sub>	-0.10024(39)	-0.07330(30)	0.29065(24)	H <sub>21</sub>	0.3749(44)	-0.2802(28)	0.1859(31)
H <sub>11</sub>	0.37849(46)	-0.21398(47)	0.18200(31)	H <sub>22</sub>	0.3704(51)	-0.2851(32)	0.0023(36)

究,早期是研究反铁磁体,如 MnO, α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等在室温及 80K 时的磁结构. 随后对亚铁磁结构进行了许多测量,例如对尖晶石型铁氧体及石榴石型铁氧体磁结构的测定. 对尖晶石型铁氧体进行的中子衍射,证实了奈耳(Néel)提出的亚铁磁结构模型,即八个 A 位的磁矩反平行于十六个 B 位的磁矩,这样可计算得 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的分子磁矩为 4μ<sub>B</sub>,而观测值为 4.2 μ<sub>B</sub>,可见理论与实验符合得较好. 对石榴石型铁氧体的中子衍射也证明了奈耳的假设. 五十年代末, Yoshimori 在解释 MnO<sub>2</sub> 的中子衍射结果时,发现了螺旋的磁结构<sup>[13]</sup>,随后,在稀土金属及合金中发现了各种螺旋结构. 螺旋结构有以下几种(见图 5): 原螺旋、圆锥螺旋、圆摆线螺旋、纵向正弦波、横向正弦波、圆锥螺旋、圆摆线螺旋、纵向正弦波、横

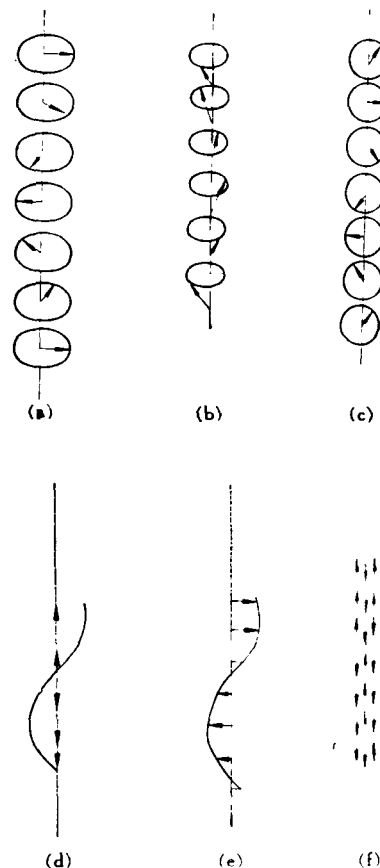


图 5 各种螺旋结构示意图<sup>[14]</sup>  
 (a) 原螺旋; (b) 圆锥螺旋; (c) 圆摆线螺旋;  
 (d) 纵向正弦波; (e) 横向正弦波; (f) 反相畴

上面各式中的  $\Theta$ ,  $\Phi$  分别为散射矢量与螺旋轴形成的极角和方位角;  $\beta$  为磁矩方向与 Z 轴所成的角度.

判断螺旋结构是否存在,就看是否出现伴线,伴线出现的角位置与磁矩之间的旋转角度有关,如果旋转角为  $\phi$ ,相邻的磁性原子距离为  $\frac{c}{2}$ ,螺旋轴为 C 轴,则

表 2 几种元素的相干散射振幅的值

元素	$b(10^{-12}$ 厘米)	元素	$b(10^{-12}$ 厘米)	元素	$b(10^{-12}$ 厘米)
Cr	0.352	Fe	0.95	Ni	1.03
Mn	-0.39	Co	0.25	Cu	0.76

向正弦波及反相畴等. 对不同的螺旋结构所引起的中子衍射效应进行了理论分析,得到衍射强度的公式为

$$I_{\text{磁}} \propto q^2 F_{\text{磁}}^2 \quad (11)$$

式(13)与式(3)形式相同,但式(13)中的  $q^2$  对于不同的螺旋结构有不同的值:

- (1) 原螺旋:  $(1 + \cos^2\Theta)$ ;
- (2) 圆锥螺旋:  $\sin^2\beta(1 + \cos^2\Theta)$ ;
- (3) 圆摆线螺旋:  $(1 + \sin^2\Theta \cdot \cos^2\Phi)$ ;
- (4) 纵向正弦波:  $\sin^2\Theta$ ;
- (5) 横向正弦波:  $(1 - \sin^2\Theta \cdot \cos^2\Phi)$ .

$$\phi = 2\pi\Delta l \cdot \frac{1}{2} = \pi\Delta l, \quad (12)$$

中子衍射对  $\text{MnAu}_2$  的研究表明,  $\text{MnAu}_2$  是原螺旋结构, 螺旋轴为  $[001]$ ,  $\phi = 51^\circ$ , 相应的

$$\Delta l = \frac{2}{7},$$

故在  $(002)$  附近出现  $(0 \ 0 \ \frac{12}{7})$  及  $(0 \ 0 \ \frac{16}{7})$  两个伴随的磁衍射峰。

利用中子衍射还可以测定各个晶格位置上的原子磁矩值, 如  $\text{Fe}_4\text{N}$ ,  $\text{Mn}_4\text{N}$  的中子衍射研究, 把在不同位置上的 Fe 的磁矩值测了出来。  $\text{Fe}_1(000)$  的磁矩值为  $2.98 \mu_B$ ;  $\text{Fe}_{II}$  (在面心位置) 的磁矩值为  $2.01 \mu_B$ ; 而在  $\text{Mn}_4\text{N}$  中,  $\text{Mn}(000)$  的磁矩值为  $3.5 \mu_B$ ; Mn (在面心位置) 的磁矩值为  $0.8 \mu_B$ 。  $\text{Fe}_3\text{Al}$  等材料的不同晶位上的磁矩值也用中子衍射进行了研究。

此外, 可用极化中子测定磁电子在晶格中的分布, 研究磁畴结构和研究非晶态材料的磁结构等等。

### 3. 中子小角度散射的应用<sup>[5]</sup>

由于可从反应堆中得到 10 埃以上的中子及中子具有磁矩等特点, 使中子小角散射比 X 射线优越, 所以近十年来发展很快, 已成为研究固体的重要手段。

用中子小角度散射研究材料中的沉淀、缺陷、位错特别有效。如 Al-Zn 合金中的沉淀物, 用中子小角度散射作了测定, 沉淀物仅占 3%, 大部分是有序结构。  $\text{Al}_{0.93}\text{Mg}_{0.07}$  中不存在 G-P 区。而  $\text{Al}_{0.885}\text{Mg}_{0.115}$  中, G-P 区的大小与时效的时间有关, 在室温时效一年的合金, G-P 区的平均半径为 70 埃。

用中子小角度散射研究材料中的缺陷。例如用快中子辐照过的 Cu 单晶 (中子能量大于 0.1 兆电子伏, 累积通量为  $4 \times 10^{19}$  中子/厘米<sup>2</sup>), 曾进行中子小角度散射实验, 得到缺陷大小为 280 埃, 这个结果与电子显微镜研究及 X 射线的数据符合得很好。

用中子小角度散射研究位错, 例如对多晶的 Cu 与 Ni 中的位错的研究, 发现位错密度

正比于外加的压力而反比于晶粒的大小。另外, 用小角散射研究材料的疲劳也有重大的应用价值。

对磁性物质中的磁性不均匀性曾进行过研究<sup>[5]</sup>。由 TiCoNiAl 合金材料的小角散射, 观察到方形的沉淀。在  $\text{Cu}_{1-x}\text{Co}_x$  的单晶体中的研究表明, 铁磁沉淀区的大小为 100 埃到 1000 埃之间, 并且肯定了磁性是由形状各向异性而不是磁晶各向异性贡献的。

最早用中子小角度散射证明第二类超导体 Nb 中存在磁通线晶格的是 Cribier 等人。由中子小角度散射可以得到: (1) 微观磁场的分布, 由此可得微观的磁通密度及磁通晶格参数; (2) 磁通晶格的对称性及磁通晶体的嵌镶分布。由 Nb 的中子小角度散射得到: 磁通线中心的最大磁场为  $2540 \pm 90$  高斯; 最小磁场是  $160 \pm 20$  高斯; 最近的磁通线间的距离为 1940 埃; 磁通线晶格是六角对称的; 磁通晶体的嵌镶角小于  $1.2'$ 。其他的工作请参阅[15]。

用中子小角度散射还可以研究聚合物在空间的构型及生物大分子的形状。

综上所述, 可见热中子散射应用的范围是很广泛的, 从物理、化学、高分子到生命科学; 从基础理论、应用研究到材料工艺, 热中子散射都有重要作用。我们应当尽快地把这方面的工作搞上去。

### 参 考 文 献

- [1] 杨楨, 物理, 4-2(1975), 96.
- [2] 星莖禎男, 中性子回折, 共立出版株式会社(1976), 183.
- [3] G. E. Bacon, Neutron Diffraction. Second Edition Oxford at the Clarendon Press (1962), p. 161.
- [4] H. M. Rietveld. *J. Appl. Cryst.*, 2-1(1969), 65.
- [5] W. Schmatz et al., *J. Appl. Cryst.*, 7-2(1974), 96.
- [6] 安万寿等, 物理学报, 17-5(1961), 222.
- [7] B. Buras, New methods and techniques in neutron diffraction—Proceeding of the neutron diffraction Conference-Petten, 1975, p. 311.
- [8] J. Schelten, *Kerntechnik*, 14-2(1972), 86.
- [9] A. W. Hewat, *J. Phys. C. Solid State Phys.*, 6-16(1973), 2559.
- [10] Jacques J. Verbist et al., *J. Chem. Phys.*, 56-7 (1972), 3257.

[11] J. Laforest et al., *I. E. E. E. Trans. Mag.*, 9 (1973), 217.  
 [12] N. Niimura et al., *J. Phys. Soc. Japan*, 35-2 (1973), 628.  
 [13] A. Yoshimori, *J. Phys. Soc. Japan*, 14-6(1959),

807.  
 [14] 星笠禎男等, 日本物理学会誌, 18-3(1963), 122.  
 [15] S. K. Burke et al., *J. Appl. Cryst.*, 11-5(1978), 644—657.

## 中 子 电 偶 极 矩

刘 圣 康    林 进 福

(南 京 大 学)

中子是一种基本粒子。从1932年发现中子以来,对中子的基本性质已进行了大量的研究。近来,由于高通量反应堆及其他强中子源的出现,冷中子技术的发展,使得对中子基本性质的研究进一步深入。例如,超冷中子贮存技术的成功,为实验测量中子电偶极矩提供了特别有利的条件。

从1956年李政道和杨振宁发现在弱相互作用下宇称不守恒以后,朗道等人又提出了宇称( $P$ )、电荷( $C$ )的联合守恒定理(即 $CP$ 守恒),从而保证了宇称、电荷和时间( $T$ )的联合守恒( $CPT$ 守恒)。可是1964年克利斯坦森等所作的精密实验表明:当寿命约为 $10^{-8}$ sec的中性 $K_L^0$ 介子衰变成为两个 $\pi$ 介子时,

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$$

发现 $CP$ 不守恒现象。到目前为止,还在 $K_L^0$ 的另外两个衰变过程中

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu$$

发现 $CP$ 不守恒现象(式中 $e^+$ ,  $e^-$ 为正、负电子,  $\nu$ 为中微子,  $\bar{\nu}$ 为反中微子)。

虽然曾在一系列其他过程中寻找 $CP$ 不守恒现象,但在目前实验所能达到的精度范围内,还没有发现其他 $CP$ 不守恒的例子。

根据 $CPT$ 定理,如果 $CP$ 不守恒, $T$ 必然不守恒。如果能够利用中子实验来检验 $T$ 是不守恒的,那是很有意义的。

如果中子有电偶极矩,那么电偶极矩 $\mathbf{d}$ 和中子自旋 $\mathbf{s}$ 的方向是相同的,并且有正比关系<sup>[1]</sup>:

$$\mathbf{d} = \alpha \mathbf{s}, \quad (1)$$

式中 $\alpha$ 为常数。如果中子处在静电场 $\mathbf{E}$ 中,那么中子电偶极矩 $\mathbf{d}$ 与电场 $\mathbf{E}$ 的相互作用能为

$$\mathbf{d} \cdot \mathbf{E} = \alpha \mathbf{s} \cdot \mathbf{E}. \quad (2)$$

在时间反演变换下,

$$T\mathbf{d} = \mathbf{d},$$

$$T\mathbf{E} = \mathbf{E},$$

$$T\mathbf{s} = -\mathbf{s},$$

所以

$$T\mathbf{d} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{d} \cdot \mathbf{E},$$

$$T\mathbf{s} \cdot \mathbf{E} = -\mathbf{s} \cdot \mathbf{E}.$$

因此,在时间反演变换下,要使(2)式成立,除非 $\alpha = 0$ 。也就是说,如果 $T$ 守恒,必须是 $\mathbf{d} = 0$ 。如果 $\mathbf{d} \neq 0$ ,则证明 $T$ 是不守恒的。所以,通过实验测量中子电偶极矩值可以检验时间反演守恒定理是否破坏。

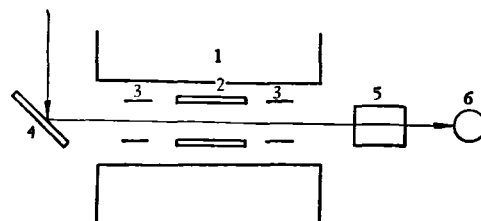


图1 测量中子电偶极矩的实验装置示意图

1——建立恒定磁场 $H$ 的磁铁; 2——建立静电场 $E$ 的电极; 3——建立高频 $\nu_1$ 磁场的高频线圈; 4——镜面极化镜; 5——分析器; 6——中子探测器