

# 中子导管

何敏

(中国科学院原子能研究所)

中子导管是七十年代在反应堆上开始用来传送中子的一种新型装置。它可以从反应堆的麦克斯韦谱中引出较长波长的中子,同时切断短波长的中子、避开快中子和 $\gamma$ 射线的影响,起到降低本底的作用。这对于要了解生物大分子、聚合物长链的结构而计数率不高的中子小角散射工作是非常有利的。而且由于导管能够长距离、几乎没有损失地传送中子,因此对提高反应堆的利用率及反应堆周围的物理工作和设备的布局也都起了非常重要的作用。目前,为了利用反应堆中波长大于 $1\text{\AA}$ 的中子,很多国家的反应堆上都安装了中子导管。这样,就使得许多实验室在没有提高反应堆运行功率的情况下,其研究成果不论在质或量的方面都有了相当大的提高。

## 一、中子导管的工作原理

中子导管是利用中子几何光学的性质(折射和反射)来实现对中子的传导的。波长为 $\lambda$ 的慢中子在物质中的折射指数 $n$ 可用下式表示:

$$n = 1 - \lambda^2 \frac{N a_{\text{coh}}}{2\pi}, \quad (1)$$

其中 $N$ 为折射介质的原子密度, $a_{\text{coh}}$ 为这种物质的相干散射振幅,其值通常为正值,因此 $n$ 小于1。对于常用的波长( $\lambda = 1-10\text{\AA}$ ), $n$ 非常接近于1( $1-n \sim 10^{-3} \sim 10^{-6}$ 的量级)。由光学知识可得到

$$n = \cos \gamma_c \quad (2)$$

可见,当 $\gamma \leq \gamma_c$ 时, $R = 1$ ,也就是说出现全反射, $\gamma_c$ 就称为全反射的临界角。由于 $\gamma_c$ 很

小,(2)式可以写成

$$n = 1 - \frac{\gamma_c^2}{2}. \quad (3)$$

比较(1)式和(3)式可以得到

$$\gamma_c = \lambda \sqrt{\frac{N a_{\text{coh}}}{\pi}}. \quad (4)$$

定义

$$\alpha = \sqrt{\frac{N a_{\text{coh}}}{\pi}}, \quad (5)$$

则

$$\gamma_c = \alpha \lambda. \quad (6)$$

可见 $\alpha$ 只与物质的性质有关,不同的物质具有不同的 $\alpha$ 值,它是物质的反射特征系数。如镍的 $\alpha = 5.96'/\text{\AA}$ ,玻璃的 $\alpha$ 为 $3.78'/\text{\AA}$ 。由(6)式可见, $\alpha$ 越大,物质的临界角 $\gamma_c$ 也越大。

中子导管就是利用上述全反射的原理来传送中子的。中子导管的内壁是用全反射临界角大的材料制成反射元件后拼接而成。大多数反射元件是在玻璃片或玻璃管内壁上薄薄地镀上一层镍制成的。玻璃的表面非常平坦,因此它能给出非常好的全反射( $R \approx 1$ );而镀镍后,既保持了玻璃最有利的性质,又能利用镍具有较大的临界角的特点。将制得的反射元件按要求仔细地连结成具有一定长度和一定曲率半径的中子导管。一般来说,导管内都要抽真空,以减少中子强度在行程上的损失。

由于全反射过程中,中子强度几乎无损失,因此利用镜面连续地对中子进行全反射,就可以达到远距离无损失地传送中子的目的。这种传送中子的办法首先是在西德慕尼黑的反应堆上实现的。

## 二、中子导管的结构

### 1. 直导管

最简单的一种中子导管是直导管，它的优点是可以向远离反应堆的地方进行长距离、几乎没有损失地传送中子，这就降低了来自堆芯的快中子和 $\gamma$ 本底，从而提高了信号本底比。此外，将一段直导管安装在弯曲导管的末端，还能使导管出口处中子强度的空间分布变得均匀些。

直导管传送的中子强度与导管接受中子的立体角和中子进入导管后被导管壁反射的次数有关。进入直导管的中子，在整个行程中始终具有相同的立体角： $\Omega = 4\gamma_c^2$ ，可见传送的中子强度是与入射中子的临界角成正比。

导管的截面一般做成矩形的空腔。设某导管长 $L$ ，其截面为 $a \times b$ 的空腔。当中子以临界角 $\gamma_c$ 射入导管后，其平均反射次数 $\bar{m}$ 可用下式确定：

$$\bar{m} = \frac{L}{2} \gamma_c \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right). \quad (7)$$

对于 $L\gamma_c < \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$ 的短波中子来说，导管相当于一个狭缝准直器。对于波长较长的中子，当不考虑有效反射率引起的损失时，传递的中子强度正比于 $\gamma_c$ 。由于反射面不可能绝对平坦，这就使得反射率 $R$ 实际上不可能等于1，损失总是存在的。假设有效反射率为 $R$ ，经 $\bar{m}$ 次反射后，反射强度的损失为

$$P = 1 - R^{\bar{m}}. \quad (8)$$

设有一支截面为 $2 \times 5\text{cm}$ 、长为 $10\text{m}$ 的镍导管，当 $R = 0.98$ 时，对 $4\text{\AA}$ 的中子能传送95%，而对波长为 $16\text{\AA}$ 的中子，由于反射次数 $\bar{m}$ 增加了，所以仅能传送82%。当 $R = 0.96$ 时，对上述两种波长的中子的传送率分别为90%和67%。这说明传送的中子波长越长，要求镜面的反射率越高。

### 2. 弯曲导管

利用直导管可以使中子谱仪远离反应堆的

堆芯。此时来自堆芯的本底噪音（快中子和 $\gamma$ 辐射）的衰减仍然是距离的函数，而所传送的中子强度却几乎无损失，从而提高了信噪比，但直导管本身并不起滤波器的作用。为了增加对中子的滤波效果，只将波长大于某一定值的中子传送到远离反应堆的样品上，这时就必须使用弯曲导管了。

弯曲导管所传送的中子强度除与 $\gamma_c$ 有关外，还与该导管的特征角 $\gamma^*$ 有关，其传输率是依赖于 $\gamma_c/\gamma^*$ 的。

弯曲导管一般根据需要可以在设计中选定一个与某一特定的热中子或冷中子的波长相对应的特征角 $\gamma^*$ 、曲率半径 $\rho$ 和直视长度 $L_1$ 。此特定的波长称为该弯曲导管的特征波长，用 $\lambda^*$ 表示。当波长远小于特征波长的快中子和 $\gamma$ 射线入射到导管壁上时，将穿透导管壁或经导管壁散射后被导管周围的屏蔽体吸收。这样导管传送的中子束流就只是由波长大于一定值的中子组成，从而起到了中子滤波的作用。具体讨论如下。

弯曲导管可用曲率半径 $\rho$ 和直视长度 $L_1$ 来表征。 $a$ 为导管截面的宽度。由图1可知，

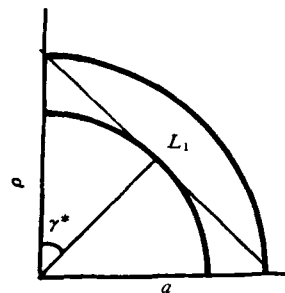


图1 弯曲导管的几何关系示意图

$$L_1 = \sqrt{8a\rho}. \quad (9)$$

导管的特征角 $\gamma^*$ 可以定义为

$$\gamma^* = \sqrt{\frac{2a}{\rho}}, \quad (10)$$

可得到

$$L_1 = 2\rho\gamma^*. \quad (11)$$

对应于 $\gamma_c = \gamma^*$ 的中子的波长叫做导管的“特征波长”。弯曲导管传送中子的方式有两种：

(1) 对于  $\lambda < \lambda^*$  的中子, 其临界角  $r_c$  必然小于中子导管特征角  $r^*$  (因为  $r_c \propto \lambda$ ), 即  $r_c/r^* < 1$ , 这种波长的中子只经受弯曲导管中凹面的反射, 这种反射可形象地称为“花环反射”。在“花环反射”中, 中子束的照射面积很小, 集中在弯曲导管的凹面附近 (见图 2)。在

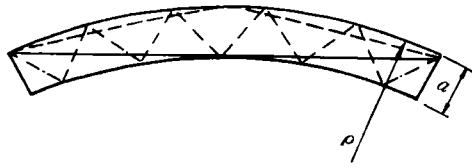


图 2 中子导管内不同类型的反射  
 -----花环反射,  $r_c/r^* \leq 1$ ; ————花环反射,  $r_c/r^* = 1$ ;  
 - · - · - 锯齿反射,  $r_c/r^* > 1$

这种传送过程中, 在  $L_1$  的直视长度内, 管壁对中子的反射次数为

$$m_{\text{花环}} = \frac{1}{\sqrt{k^2 + \frac{x}{a}}}, \quad (12)$$

式中  $k = r/r^*$ ,  $r$  为中子对管壁的人射角,  $x$  为中子在导管入口处位置的横坐标。当波长减小时, 反射次数则随之增加, 从而使传送的强度  $R^m$  和中子的照射面积都减小。当入射中子的波长继续减小至  $\lambda \ll \lambda^*$  时, 照射面积趋于零, 此时即便入射角  $r = r_c$ , 但中子由于其穿透镍层的深度为  $\infty$  而穿出镍层。可见对于波长极短的中子, 当导管的长度  $L > L_1$  时, 这些中子入射到管壁上会穿透导管壁然后被周围的屏蔽体吸收而不致被传送至导管末端, 从而除去

了入射束中原有的快中子和热上中子的成分, 起到了滤波的作用, 从而提高了实验中的信噪比, 使得谱仪能在更有利的本底条件下工作。Ageron 计算了快中子和热上中子随导管增加而衰减的关系。表 1 列出了 Ageron 用两个截面为  $3 \times 20\text{cm}$  的弯曲导管测量的当  $L > L_1$  时的结果<sup>[4]</sup>, 为便于比较, 在表 1 的下栏给出了水平孔道出口处和 30m 长直导管末端的快中子通量。由表 1 可见弯曲导管确实对清除快中子、 $\gamma$  射线和热上中子是很有利的。L 越长该作用越显著, 但 L 太长时, 由于反射次数增加, 会降低传送的中子强度。由表 1 可见, 当 L 从  $1.1L_1$  增至  $1.5L_1$  时, 滤波效率增加不大, 只有当  $L > 2L_1$  后, 该效率才有明显的提高。将传送率和滤波作用综合考虑的结果认为,  $L = 1.2L_1$  时, 在大多数情况下, 即具有足够弱的本底又能得到良好的传导强度。

(2)  $\lambda > \lambda^*$  的中子可以有两种传送方式。当  $r_c/r^* > 1$  且入射角  $r < r^*$  时, 仍为“花环传送”。而当  $r_c > r > r^*$  时, 可通过导管的两个内壁(凹面和凸面)交替地对中子全反射来达到传送中子的目的。这种传送方式称为“锯齿反射”传送 (见图 2)。

$\lambda = \lambda^*$  的入射中子在导管中反射的次数最少。此后随波长  $\lambda$  增加, 反射次数也增加。“锯齿反射”的反射次数可由下式决定:

$$m_{\text{锯齿}} = \frac{2}{\sqrt{k^2 + \frac{x}{a}} - \sqrt{k^2 + \frac{x}{a} - 1}}, \quad (13)$$

表 1

		$\lambda^* = 2 \text{ \AA}, L_1 = 70\text{m}$		$\lambda^* = 4 \text{ \AA}, L_1 = 35\text{m}$	
		快中子 ( $\text{n/cm}^2\text{s}$ )	热上中子 ( $\text{n/cm}^2\text{s}$ )	快中子 ( $\text{n/cm}^2\text{s}$ )	热上中子 ( $\text{n/cm}^2\text{s}$ )
源 通 量		$4 \times 10^{11}$	$1.5 \times 10^{12}$	$2 \times 10^{10}$	$5 \times 10^{10}$
导 管 出 口 处	$1.1L_1$	2.6	10	2	5
	$1.5L_1$	0.17	0.65	0.14	0.35
	$2.1L_1$	$10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-4}$
30m 长直导管出口		$2 \times 10^6$			
水平孔道出口		$10^8$			

式中  $k$  与  $x$  的物理意义与前述相同。可见当  $L > L_1$  时, 经导管传送出来的是至少经历了一次全反射的中子。

当入射中子的波长  $\lambda \gg \lambda^*$  时, 弯曲导管对这些中子的传送作用类似于直导管。此时由于  $r_c$  很大, 这种波长的中子的入射角一般都小于  $r_c$ , 因此入射的中子全部被传送, 传送的强度仅与反射次数  $m$  有关, 正比于  $R^m$ 。

这种弯曲导管的缺点是, 在导管出口处中子强度的空间分布是不均匀的。这个缺点可以通过在弯曲导管之后再接一段直导管或使用双向弯曲导管的方法而得到克服。

所谓双向弯曲导管, 是一种 S 形的弯曲导管。这种导管的第一部分一般做成  $1.5 L_1$  长, 第二部分的弯曲方向与第一部分相反, 长  $L_1$ 。这种双向弯曲导管不仅能使出口处中子强度的空间分布均匀, 而且可以完全切除短波中子, 从而起到消除级次的作用。

### 三、本底及屏蔽

入射到导管壁上的快中子、热中子以及未被反射的热中子对外界相当于一个很强的辐射源。因此需要对导管进行屏蔽, 至少要将长度为  $L_1$  的这一段导管用屏蔽体包起来, 超出  $L_1$  长度以外区域的本底基本上是由未被导管反射的热中子被导管壁俘获时引起的。因此, 这段区域的本底是均匀的。用含硼玻璃来制作这段导管, 可明显地降低这段区域的本底。萨克莱的导管末端使用了硼玻璃, 使  $\gamma$  辐射大约降低了两个数量级。实验室的中子本底也有所减少。

### 四、影响中子导管传送系数的因素

#### 1. 中子穿透镜面的厚度

在实际情况下, 大多数组成导管的反射元件都是由在玻璃上薄薄地镀上一层镍做成的。当中子以小于临界角的角度入射到镍层上时, 就会产生全反射, 而使这些中子几乎全部返回

导管中。当镀层过薄时, 入射束就会穿透镀层而使中子强度受到损失。为了确定镀层所必须的厚度, 就需要了解中子穿透镜面的深度。

中子波在介质中的强度是随进入介质的深度而按指数规律衰减的。当强度降为入射强度的  $1/e$  时, 穿透深度  $d_e$  可由下式确定:

$$d_e = \frac{\lambda}{2\pi(\sin^2 r_c - \sin^2 r)^{1/2}} \quad (14)$$

可见当  $r \rightarrow r_c$  时, 入射束的穿透深度为无穷大。实验表明, 当镀层的厚度为  $1000 \text{ \AA}$  时, 即使  $r/r_c$  增大到大约 0.98, 入射束的强度也只损失大约 1—2%, 也就是说几乎没损失。实验还表明, 当镍层的厚度由  $1000 \text{ \AA}$  增加到  $2700 \text{ \AA}$  时, 经多次反射后, 导管的传送系数不变<sup>[1]</sup>。这说明镀层厚度为  $1000 \text{ \AA}$  时, 是能满足要求的。

#### 2. 镜面缺陷对反射率的影响

实际应用中, 镜面不会是绝对理想的平面, 总是存在一些缺陷, 使得全反射不完善, 从而影响镜面的反射率。这种影响使得即使入射角  $r \leq r_c$  时, 反射率  $R$  仍然小于 1。镜面缺陷对反射率的影响很难定量地估计, 这方面也还没有理论进行透彻的分析。

对反射率有影响的缺陷, 按其大小可分为表面微观缺陷和宏观缺陷两类。反射镜表面的微观缺陷对反射率的影响是和缺陷的大小  $\delta$  与波长之比成正比的。一般定义  $\delta/2\pi\lambda \leq 1$  的缺陷为微观缺陷。实验观察到液体的表面从微观上看仍是很平坦的, 其反射率  $R \approx 1$ 。玻璃也是这样, 从这个意义上看, 玻璃类似于液体。

宏观缺陷包括镜面的粗糙、起伏、镜面间的排列、片间缝隙和角定位的不完善, 以及用直管形元件组成多边形的导管取代圆弧形的弯曲导管时引起的多边形近似。反射强度对这样一些宏观几何缺陷特别敏感。在这几种宏观缺陷中, 后四种的影响只有在将元件装配起来后才会显现出来。所以在单个导管元件上测量的结果总是比以整体导管的传送系数为基础计算出来的结果要好。导管的安装和调节对传送中子的强度影响很大, 因此要求安装调节的精度很高。特征波长越短的中子导管对玻璃的等级及

安装的技术条件的要求越高,因此制造上更困难。而对于特征波长较长的中子导管,在制造上相对就容易些,并且可用圆弧形的弯曲玻璃元件,从而减少了传送强度的损失。

## 五、现有导管的几个实例

### 1. 萨克莱的中子导管

萨克莱的第一支导管是用平板元件组装成的。反射元件是一些厚 20mm、长 340mm 的镀膜玻璃片。这些玻璃片预先经过光学抛光,使表面的不平度为 10s/m,平均粗糙度低于  $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ ,用蒸发的方法在玻璃片上镀一层 0.15  $\mu\text{m}$  厚的纯度为 99.99% 的镍,这样就制成了反射元件。将这些反射元件极仔细地用胶粘成截面为  $20 \times 50 \text{mm}^2$  的密封的平行管道,然后将一段段的管道连成一个曲率半径  $\rho = 835 \text{m}$ 、特征角  $\gamma^* = 6.92 \times 10^{-3} \text{rad}$ 、 $\lambda^* = 4 \text{\AA}$  的弯曲中子管道,两端用厚度为 0.2mm 的铝箔或 60  $\mu\text{m}$  厚的铝箔制成窗口。管道内部要能保持  $5 \times 10^{-2} \text{Torr}$  的真空。该导管全长 30m ( $L_1 = 11.6 \text{m}$ )。前面 17m 长的部分贯穿整个反应堆大厅。这部分的生物屏蔽是用一个截面为  $2 \times 2 \text{m}^2$  的轻水池来保证。后一部分长 13m,在反应堆大厅外面,不需另加屏蔽。

当反应堆的运行功率为 14MW 时,整个 30 m 长的导管能传送 75% 的中子。由这个导管所得到的结果,可以认为能代表最接近理想导管所得的结果。该导管对中子的传送系数是随波长的不同而不同的。由图 3 可见,波长在 5—16  $\text{\AA}$  之间,传送中子的强度损失正比于波长,有效反射率  $R = 98\%$ ,而对于 2—5  $\text{\AA}$  之

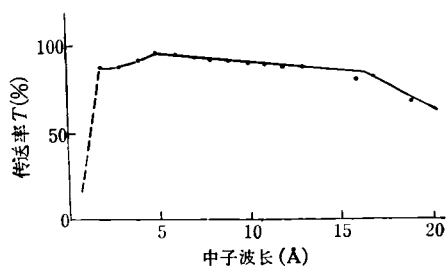


图 3 直视长度  $L_1$  上的中子传送率

间的中子,反射率为 93%。反射率下降的原因至今尚不清楚。对于  $\lambda > 16 \text{\AA}$  的中子,反射率下降得更快,其原因也有待进一步研究。

目前萨克莱已将这支导管的曲率半径增加一倍,使  $\lambda^* = 2.83 \text{\AA}$ ,导管出口处的总通量也增加了一倍 ( $4.3 \times 10^7 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ )。在导管的末端还使用了硼玻璃的管壁,使得导管附近的  $\gamma$  辐射由原来的 200mrem/h 降为 2mrem/h。同时在此孔道上又增加了一支  $\lambda^* = 2 \text{\AA}$  的导管。两导管之间的夹角为  $2^\circ$ 。后增加的这支导管,是用硼玻璃制成的,并在 29m 长的弯曲导管之后加了一支 10 m 长的直导管,从而使得出口处 1—3  $\text{\AA}$  波长的中子强度的空间分部稍微均匀些。

### 2. 慕尼黑的中子导管

利用中子全反射的特征制成中子导管并用来进行长距离传送中子的办法首先是在慕尼黑实现的。

慕尼黑的中子导管与真空室是分开制造的。组成导管的元件长 1m,将其固定在一定的位置上,用精密仪器校正片间距离,使其连成中子导管。导管本身并不是密封的,而是将导管装入一个钢制的密闭真空室内,室外有螺丝与内部的反射元件相连。通过调节这些螺丝可改变内部反射元件的位置。

慕尼黑用这种方法在一个水平孔道上建造了截面为  $2.5 \times 2.5 \text{cm}^2$ ,  $\lambda^*$  分别为 3.8  $\text{\AA}$ , 6  $\text{\AA}$  和 35  $\text{\AA}$  的三支导管。所用的玻璃是从工业生产的玻璃板样品中仔细挑选出来的,未经光学抛光。因此不平度可能大于  $10^{-4} \text{rad}$ 。实验证明,用这种方法建造的中子导管已取得了良好的结果。

### 3. Grenoble 高通量堆上的中子导管

在 Grenoble 高通量反应堆的一个水平孔道内安装了十根中子导管。其中五支正对一个冷源,导管在距冷源 2m 处开始向远处引导中子;另外五支是热中子导管,其起点离孔道底部的基点约 5m。这些导管的截面都是  $3 \times 20 \text{cm}$  的矩形空腔。反射元件是用在光学抛光的玻璃片上镀膜的方法制成的。其中三支冷中子导管和所有的热中子导管的长度均为直视长度的

1.2 倍,另外两支冷中子导管的长度为其直视长度的两倍。在这些导管上,每隔 10—15m 的地方都有束流引出口可供安排实验。这些导管彼此靠得很近,相互间的夹角为  $2^\circ$ 。十支导管都包裹在一个大水池中,水池末端距反应堆水平孔道出口处的距离大于 6m。其中有八支导管伸到反应堆大厅以外,反应堆大厅的墙壁对大厅外部的实验也起了屏蔽作用,使这些实验免受反应堆次级辐射的影响。

## 六、中子导管的应用效果和前景

采用中子导管后,可以在一个水平孔道上安装多种实验装置,从而提高了反应堆水平孔道的利用率。由于中子导管末端的本底很低,谱仪本身的屏蔽可以大大地精减,从而使得实验设备更为简单。因此,单从经济角度着眼,安装这项设施也是值得的,因为安装在水平孔道附近的谱仪,在其屏蔽上所耗资的资金往往要占全部投资的 1/2 左右。从物理学的观点来看,使用中子导管有利于应用占地面积大的飞行时间技术,而不致于因为需要考虑中子强度的损失而受牵制;由于使用中子导管后能极大地降低本底从而提高了信噪比,可以作很多测量时间长、计数率低或要求分辨率较高的工作如小角散射、非弹性散射和背散射等。从目前科学技术发展的水平看,要制造中子导管并不困难,对工业部门的要求也不高,因此目前国际上对于使用波长大于  $1\text{\AA}$  中子的工作,有不少都安装上了中子导管。中子导管还可以用来产生极化中子。不过从工程角度来看极化导管在

制造上要困难一些<sup>[7]</sup>,但却值得我们注意。

就导管本身而言,目前也还有许多工作要做。例如,需要研究各反射面状态之间的关系,需要从理论和实验两方面来研究导管的反射率等。

值得注意的是,由于中子导管传输的主要为长波 ( $\lambda \geq 2\text{\AA}$ ) 的中子,因而在导管入口处加装“冷中子源”(实质上多数为一个装有液氢的容器),使中子在进入导管之前在冷源中进一步“冷却”,以增加其中低能量即长波中子的成分,对增大导管内的中子通量是有效的,能使 5—20 $\text{\AA}$  范围内的中子通量增加大约 5—20 倍。

本文在写作过程中得到杨楨同志很大帮助,谨在此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] B. Jacrot, Utilization of Neutron Guide Tubes for Neutron Inelastic Scattering, Instrumentation for Neutron Inelastic Scattering Research (Proceedings of a Panel Held in Vienna, 1—5 December 1969), IAEA, Vienna, (1970), 225.
- [2] B. Farnoux, B. Hennion, J. Fagot, Description et Caractéristiques Neutroniques du Tube Conducteur de Neutrons Instable près du Réacteur EL3, Neutron Inelastic Scattering (Proc. Symp: Copenhagen, 1968), 2 IAEA, Vienna, (1968), 353.
- [3] D. J. 休斯著,洪永炎译,中子光学,上海科学技术出版社, (1963).
- [4] D. Bally et al., *Rev. Scient. Instrum.*, 33(1962), 916.
- [5] H. R. Child, A New Small-Angle Neutron Scattering (SANS) Instrument at ORNL Using a Position-Sensitive Area Detector, Oak Tennessee 37830.
- [6] A. P. Bulkin et al., *Nucl. Instr. Methods*, 178 (1980), 105—108.

## 1985 年第 5 期《物理》内容预告

深切悼念伟大的物理学家狄喇克(汪世清);用布里渊散射研究晶体相变(顾本源);光电子衍射(黄筠等);激光化学概述(徐积仁); $\mu$ 原子和 $\mu$ 子催化的核聚变反应(千文甲);硅片制备中的损伤问题(陈志恭);低

温技术在医学上的应用(于鲲);测量金属玻璃饱和磁致伸缩常数的张力磁化法(陈笃行);微桔型电子能谱仪(袁观俊);锁相放大器在介电测量中的应用(赵世富);一种用于物理研究的样品控温装置(曹必松等);极化测量在固体离子学中的应用(薛荣坚);新型倍频晶体 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 的光谱测定(黄德如等);集成电路中的物理问题讲座第二讲:硅中的扩散(吴自勤);光学信息处理讲座第十二讲:相干光学反馈技术(张以谟等)。