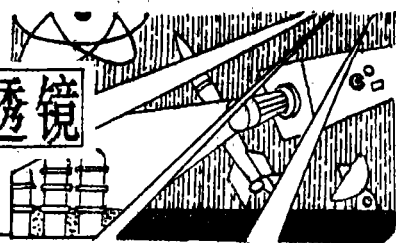


# X 光学的重要突破——谈 X 光透镜

· 颜一鸣



自从 1895 年德国科学家伦琴发现 X 射线,迄今已近百年。在此期间,人们不仅认识到 X 射线是短波长 ( $10^{-2} \sim 10^4 \text{ \AA}$ ) 的电磁波,它是怎样产生的,而且深入研究了它和物质的各种相互作用。在 X 射线物理发展的同时, X 射线得到了广泛的应用。我们无需查阅那些浩如烟海的文献库,就能说出 X 射线的若干应用: X 光诊断、X 光治疗、X 光分析、X 光探伤……。

本世纪 70 年代以前, X 光设备有一个明显的弱点,就是 X 光束无法调控,我们不能改变 X 光束的传播方向,不能会聚 X 光,也得不到平行的 X 光束。由于没有 X 光透镜,也就不能象在红外光和可见光波段那样,设计和制造 X 光望远镜、X 光显微镜等等复杂的光学仪器和光学系统。因此, X 光的应用受到很大限制。

近二十几年以来, X 光学得到了迅速的复苏和发展,制造出了多种 X 光仪器设备,如旋转二次曲面掠射镜,多层膜 X 射线反射镜, X 光波带片、衍射光栅等衍射器件和干涉器件。利用这些 X 光学器件,在微观的物质结构分析领域和天文学观测方面取得了惊人的成就。但 X 光望远镜等所用的掠射镜只利用了一到两次

散射, X 光收集角非常小,功率密度很低;衍射器件和干涉器件的光谱选择性很强,无法调节宽波段的 X 光束。此外,所有上述器件都只能在软 X 光波段使用,硬 X 射线束的调控手段还未能解决。

80 年代末,苏联库马霍夫提出了一种新的利用多次反射的 X 光聚束方法。利用这种原理制作的 X 光器件称为 X 光聚束器(又常称为 X 光透镜,尽管它只是用来聚束而未用于成象)。它可以在大角度范围内对宽波段的 X 光聚束。

一种应用多次反射聚束的方法是空心 X 光导管聚束。X 光导管内壁产生多次全反射,从而由光导管的一端传播到另一端并随导管的弯曲而改变传播方向。这样,导管的弯角可以大大超过全反射的临界角  $\theta_{cr}$ 。例如设  $\theta_{cr}$  为  $1.00^\circ$ , 如果 X 光在导管

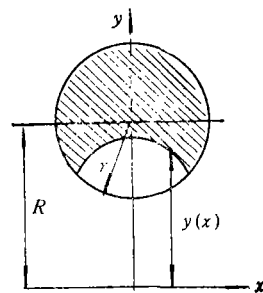


图 1 弯曲导管在  $\gamma < 1$  时捕获 X 光的截面

往和地球实验室的测量结果不同。

早期的观测工作多数是根据实验室已知的分子频率设计谱线接收机,来找寻理想中的天文分子。现代望远镜还常用宽频带的谱线接收机在各个频率同时进行搜索。在巡天普查中,发现了不少实验室数据中不存在的“U 谱线”(未证认谱线)。这常常预示着发现了一种地球上不能稳定存在的“奇异分子”。不过这种谱线很难证认它的归属。为了证认 U 谱线需要多种学科的密切合作。

U-89 谱线的证认可作为这种合作的典型例子。1970 年后,在许多分子源中观测到两条频率约为 90 京赫兹的地球上从未见过的强谱线。当时只好仿照 hydrogen (氢)暂取名为 X-ogen, 和 Y-ogen。从这些分子云的化学元素丰度、云中已发现的分子品种以及可能的气相化学反应等天体化学诸因素及微波波谱学转动谱线频率的一般规律来考虑,人们有理由猜测频率为 89.2 京赫兹的一条 U 谱线可能来自地球环境中不能稳定存在的  $\text{HCO}^+$  (甲酰离子)。根据量子化学理论使用超级计算机算出的频率值支持这种猜测。

后来又在这些源中找到同位素分子  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  ( $^{13}\text{C}$  没有核磁矩而  $^{12}\text{C}$  有核磁矩,它们的谱线超精细结构不同),更有把握认为 X-ogen 就是  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ 。不过,决定性的裁决最终要靠在实验室直接测定  $\text{HCO}^+$  频率。70 年代分子天体物理学的进展推动了微波波谱学家测量不稳定分子的兴趣,导致一种新的波谱技术——反应式分子微波谱仪——的出现。它能即时测定通过化学反应产生出来的不稳定分子的微波谱线。1975 年终于在实验室中测到了  $\text{H}^{12}\text{CO}^+$  和  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  的 89.2 京赫兹谱线。彻底完成了证认工作。后来 Y-ogen 也被证实为  $\text{HNC}$ 。

目前国际上天文观测,天体物理、化学理论分析,实验室波谱学测定和量子化学计算之间的合作已经成为常规。天文台、大学、实验室等各机构为找寻和证认各种未知的分子谱线发挥各自的作用。

尽管如此,由于复杂分子越来越多,它们的谱线十分稠密,证认的不确定性随之增加,所以目前还是有几百条 U 谱线没有找到归属。这是摆在量子化学和微波波谱学面前的一项艰难的课题。 (待续)

中以 $1.00^\circ$ 角掠射并反射15次,则由导管出射的X光的方向和入射X光方向的差角 $\varphi$ 可以达 $30^\circ$ 。成千上万根这样的X光导管组成的系统可以在 $\pm 30^\circ$ 范围内收集X光,并将X光束变为会聚束或准平行束。由于多次反射过程中各导管内的传播模式非常多,从聚束器中出射的X光已不是相干光。这种X透镜有相当广泛的实际应用。它可以改变出射X光束的方向,并将X光束会聚到很小的面积上,从而集中X光束的功率。

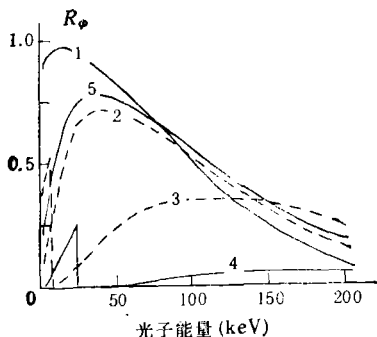


图2 X光导弯角为 $\varphi = 0.25\text{rad}$ 时X光的衰减系数,光导管材料为1.Be, 2.Al, 3.Cu, 4.Ag, 5.C-52号玻璃

实验表明,空心玻璃毛细管可用作X光导管。它的内壁应做成对所传输的X光吸收很小而且很光滑,不致产生X光的漫射。显然,X射线在光导管内壁上的掠射角应小于导管材料表面的全反射角 $\theta_{cr}$ ,光导管对入射X光的捕集效率可用 $\gamma = R\theta_{cr}^2/4r$ 来表示,其中 $r$ 为X光导管的内半径, $R$ 为X光导管弯曲的曲率半径。从几何条件的分析不难得出结论:只有当 $\gamma > 1$ 时,沿光导管轴,即垂直于光导管截面入射的X光才能全部为光导管捕获;如果 $\gamma < 1$ ,则在光导管的截面上有一部分X光的掠射角将大于 $\theta_{cr}$ ,从而在第一次反射时就会损失掉,如图1所表明的那样。入射截面的这种捕集特性会在传播过程中保持下来。

因为X光全反射临界角和X光子的能量成反比: $\theta_{cr} \sim 1/E_x$ 。当玻璃材料对1keV光子的全反射临界角 $\theta_{cr}$ 为 $1.8^\circ$ 时,对20keV的光子的全反射临界角仅为 $5.7'$ 。我们知道 $\gamma$ 正比于 $\theta_{cr}^2$ ,对于同样曲率的X光弯导管, $E_x = 1\text{keV}$ 时的光导管的内径为 $0.4\text{mm}$ ,则当 $E_x = 20\text{keV}$ 时,管子的内径必须小到 $1\mu\text{m}$ 。可见,对于高能X射线,X光导管的制作必须采用专门的工艺。

在设计X光透镜时,外层X光导管要作大角度弯曲,X光要进行多次反射。在这种情况下计算X光导管的传输效率,不仅要考虑几何效率,还要考虑多次反射时X光的吸收。总的转角为 $\phi$ 时,X光传输的衰减系数 $R_\phi$ 可表示为

$$R_\phi \approx \exp(-\beta\alpha^{-3/2}\phi)$$

其中 $\alpha$ 和 $\beta$ 是玻璃折射系数的实数部份和虚数部份

$$n = 1 - \frac{\alpha}{2} + i\frac{\beta}{2}$$

而  $\alpha = 4\pi\omega_p^2/E_x^2$ ,  $E_x$ 为光子能量

$$\beta = \lambda\mu_i \quad \mu_i = \mu_r \cdot \rho \text{ 为物质的线性}$$

吸收系数

对于 $E_x > 1\text{keV}$ 的光子, $\alpha$ 和 $\beta \ll 1$ , $R_\phi$ 可视为表征弯曲 $\phi$ 度的光导管传输X光的能力的特征物理量。

对于一定规格的透镜有一定的通频带。光子能量的增加导致 $\gamma < 1$ ,光子的捕集效率随能量增加而减小,大量光子被散射出导管。光子能量太低时,吸收会增加,X光束的强度也会降低。图2给出了 $\phi = 0.25\text{rad}$ 时,不同材料的X光导管的 $R_\phi$ 随光子能量的变化(计算结果)。由图可以看出,即便对于较硬的X射线,转角 $\phi = 0.25\text{rad} = 14.3^\circ$ 时,射线束强度的损失还可以容忍。由此证明了生产X光透镜的实际可行性。

北京师范大学低能核物理研究所成功地试制了两台X光透镜(见封三)。其中,会聚透镜有对称的输入输出,X光的收集角为 $13^\circ$ 。透镜由1953根X光导管组成,长44cm,有效照野为入射端截面的61%。从透镜出口端算起,焦距为5cm,它由透镜光导管终端直线路段的倾角决定。透镜最外层曲率半径最小值为1.5m。此透镜会聚的X光能量最佳值在2—2.5keV处。随着能量增加 $\gamma$ 将变得 $< 1$ ,几何捕集效率小于100%。但因外层光导管数目很多,这一部分光导管对会聚束斑功率密度的贡献还是很大的。平行束透镜是将发散X光束转化为平行光束。此类透镜适用于亚微米X射线光刻或X射线天文观测(平行X光束发射自远方天体)。对透镜后输出的平行束X光拍摄的照片见封三,其中a、b、c拍摄的位置在距透镜出口端1mm,88mm和338mm处。由图可见,自出口端发射的准平行X光束随着距离的增加逐渐形成均匀的X光照野。图中X光的不均匀,部分是由于X光源不均匀,部分来自透镜加工工艺不完善,但主要是因为使用的X光波段在14keV处,不符合设计要求。

这种新的X光聚束法是X光科技领域的一个重要突破。它给出了对宽频带连续谱X光束进行调控的可能性。它的一个最重要的特点就是可以大幅度地提高X光束的功率密度。设X源的功率为 $J$ ,透镜系统收集X光的效率为 $\eta$ ,焦斑的面积为 $S$ ,则会聚后的X光束功率密度为 $W = \eta J/S$ 。设焦斑至X光源的距离为 $L$ ,则无透镜时焦斑处的功率密度为 $W' = J/4\pi L^2$ 。功率密度放大倍数为 $K = W/W' = 4\pi\eta L^2/S$ 。对于给定波段的X光, $\eta$ 值大约在 $10^{-2}$ — $25 \cdot 10^{-2}$ 之间, $S$ 大约为 $10^{-2}$ — $10^{-6}\text{cm}^2$ 。设 $L \approx 50$ — $100\text{cm}$ ,则功率密度放大倍数 $K \approx 3 \cdot 10^4$ — $3 \cdot 10^{10}$ ,这是很可观的数字。

X光管光源的X光发射功率为 $J = KZIV^2$ 。系数 $K \approx 10^{-9}$ (伏 $^{-1}$ ), $Z$ 为阳极物质的原子序数, $I$ 为X光管电流(安), $V$ 为X光管电压(伏),大功率X光管的功

率达(10—100)千瓦,旋转阳极X光管的X光发射功率在数十瓦到数百瓦之间。设  $J = 100W$ ,  $S = 10^{-4}cm^2$ ,  $\eta = 5 \cdot 10^{-2}$ , 则会聚透镜给出的X光功率密度为

$$W = 5 \times 10^4 W/cm^2$$

目前存在的最强的辐射是同步回旋加速器贮存环给出的同步辐射。其功率密度为(1—10) $W/cm^2$ 。可见,普通X光管如加透镜能给出比同步辐射高得多的功率密度。当代的强X光源,如等离子体放电X光源,激光加热等离子体光源,沟道辐射X光源,甚至同步辐射源发射的X光都可以用X光透镜作进一步会聚,从而得到空前高的X光功率密度,这对今后的X光学和X光产业的发展有着不可估量的意义。

如前所述,X光透镜可以给出高功率密度的会聚或平行X光束,聚束X光子的能量可以从300eV到(200—300)keV,还存在着1MeV  $\gamma$ 光子聚束的诱人前景。

强X光平行束和会聚束在物理、化学、生物、材料科学和地球科学诸领域有着广泛的应用。它可以用于射线物质相互作用的研究,并能给出比原有测量精度高得多的基础数据。这既是X光学研究的基础课题,也是聚变物理,天体物理等不可或缺的基础数据来源。在凝聚态物理领域,强X光束可用于截面形貌术,广延吸收边精细结构(EXAFS)研究等等。强X射线衍射给化学分析带来新的机会。利用小角衍射可研究物质的表面状态,研究非晶态材料,还可以研究超高压下的物质特性。用细X光束研究微晶体时可以避免高压梯度对物质特性的影响。脉冲强X光束可用于研究化学反应动力学过程。强X光束也是生物学、生物物理、生物化学研究的新手段,这方面的例子也是很多的。

利用强X光源可以进行各种开发应用研究。如进行X光衍射分析,X射线荧光分析时,在X光源一侧用半透镜代替梭罗光阑可以较大幅度地提高X光流强;在探测器一端加上半透镜,可以起到定向探测器的作用,即只有沿X导管轴向入射的X光子方能打到探测器上。这样的分析装置可以成量级地提高信号本底比,大大提高分析的灵敏度和测量速度,从而使物质结构和元素成份分析迈上新的台阶。直径小于100 $\mu m$ 的细X光束可以用于微晶照象,细光束进行矿样的微区分析,这对地球物理勘探和地质研究非常重要。

强X光学设备在医学领域将有广泛的应用。X光透镜可以产生大面积的平行X光照野。强X光光子前面加上半透镜,使之只接受人体透射的平行X光将消除有限X光源大小引起的半影模糊,特别可贵的是它可以成量级的减少人体散射的本底,从而大大提高X光片的清晰度。这在用于工业探伤时也是很重要的。

用X光束治疗,没有放射性同位素的污染问题,也不需要准直装置,而且可以有很高的剂量密度,便于在中小城市推广应用。

X射线天文学是天文学的重要分支。X光半透镜可用于制造大面积X光天文望远镜。已经商定于1993年将一台用X光导管组成的天文望远镜发射到外层空间去,望远镜直径1m,它的收集光强将大大超过以往任何一台X光天文望远镜,而且角分辨率也非常好。它将会带来大量激动人心的新发现。

软X射线半透镜和强X光源的组合可以用作微电子学工业的亚微米X射线光刻机的光源。多数专家认为,制造新一代线宽0.5 $\mu m$ 以下的亚微米器件的最有前景的手段是X射线光刻。迄今为止,发达国家都把希望寄托在同步辐射光刻上,他们已经花费了上亿美元,也取得了相当的进展。但是平行束软X光源与同步辐射源相比有一系列优越性。首先它的造价比同步辐射源低得多,即使专用的紧密结构同步辐射加速器造价也要数百万美元,软X平行束光源至少要便宜1—2个数量级。其次,同步辐射源需要昂贵的基建费用,一个国家中有有限的几台,而这种软X平行束光源安装简单,可以安放在任意普通中小城市,建在微电子学工厂中,从而避免工厂和加速器在不同城市时产生的运输,以及片子清洁,保养等问题。第三,这种软X光源运行稳定可靠,维修简单,不象同步辐射源那样难侍候,要水平较高的专门的运行维修班子。这种源还有一个很大的优点,就是能够给出4—6英寸直径的均匀软X光束,可以进行一次接近式光刻,而同步辐射光束斑为细条形的,必须进行分步式光刻,装置更为复杂,而且曝光时间要更长。由此可以确认,这种新型的软X射线平行束源将是最有前景的亚微米级光刻源。此外,新光刻源的电光转换效率要比同步辐射源高好几个量级。

纵观近些年X光学取得的重大进展和突破,可以说,我们正站在新的起跑线上。现代科学技术和尖端工业为X光学产业的更新换代提供了现实的基础。另一方面,基础研究和一些边缘学科,交叉学科的发展以及应用技术的开发对X光学又不断提出新的课题。可以预料,最近的将来定是X光学蓬勃发展,不断取得新成就的时代。

## · 专家评审 ·

### 谈《现代物理知识》特点

科普作家 卞德培

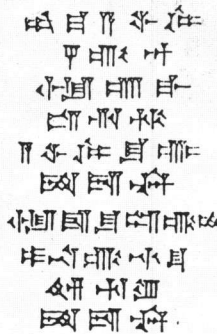
杂志难办,高层次的知识性杂志尤其难办。《现代物理知识》既反映国内外现代物理学领域的最新进展,开阔视野,又为从事物理工作的同志提供大量新颖知识,有所启迪,特色鲜明,乃所以受到从广大物理学爱好者及专家的普遍欢迎,并非偶然。在同类杂志中,本刊质量和受推戴的程度均属一流,特予推荐。

# 不同形式的信息载体

(详见本期冯端一文)



(g) 艾契尔 的画



(c) 亚述的楔形文字

வாசிக் துவருகையில், விவொரு வாக்கியத்தையும் அந்நூதிய படத்தோடு சிபாபிட்டுப் பாய்க்குந் தே-  
 ாறும் அர்த்தமாகிக்கொண்டு வரும. மனப்பாடம் பண்ணி க்கொள்ள வேண்டிய அம்சங்கள் மிகக் குறைவு. ஆகையினால் அர்த்தத்துக்கு இணங்க வாக்கிய அமைப்பின் வேறுபாடுகளைக் கண்டறி-  
 ந்து கொள்வதற்கு வசதிகள் உண்டு. இம்முறை அநுகரித்து ஆங்கிலம் கற்றுக்கொள்வது சம்ப-  
 மில்லாததுமன்றிவினாயிடும் சம்பந்தப்பட்டது.

(b) 泰米尔文



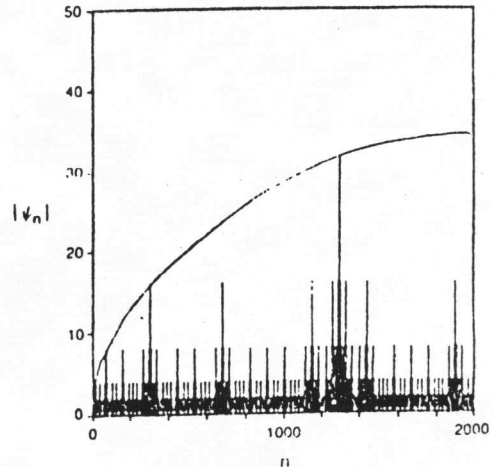
(e) 一段巴哈的乐谱



(a) 复活节岛上发现的铭文

$$\left. \begin{aligned} \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \xi(x)}{dx^2} + (V_s - E_s) \xi(x) &= 0, \\ \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \eta(y)}{dy^2} + (V_v - E_v) \eta(y) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

(f) 两维的薛定谔方程组



(d) 准周期结构的波函数

# X 光透镜

(详见本期颜一鸣文)

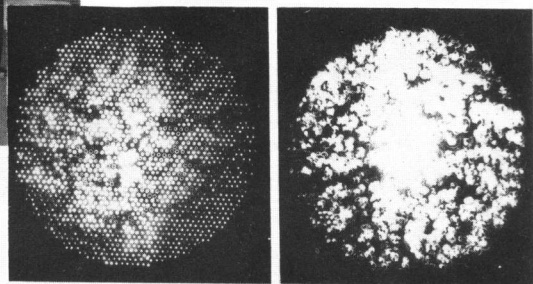
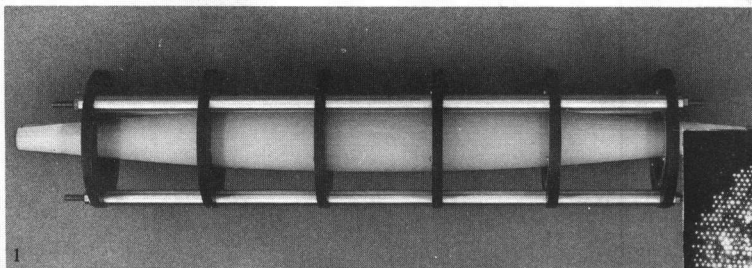


图1 图2：会聚透镜与平行束透镜

图3 图4 图5：X 光束空间分布

