# 高分辨率 X 射线显微成像及其进展\*

陈 洁 柳龙华 刘 刚 田扬超 $^{*}$ 

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘 要 介绍了高分辨率 X 射线显微成像产生背景和发展过程,着重分析了基于光学元件波带片的放大成像的基本原理,并简述了高分辨率三维成像的有关理论。同时给出国内外高分辨率 X 射线显微成像研究的最新进展,展望 了高分辨率 X 射线显微成像的应用前景。

关键词 X射线显微成像 高分辨率 波带片

## High resolution X-ray microscopy and its new developments

CHEN Jie LIU Long-Hua LIU Gang TIAN Yang-Chao<sup>†</sup>

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

AbstractThe background and principle of zone plate based high resolution X-ray microscopy is reviewed , aswell as X-ray 3D imaging. The latest developments and future prospects in this field are also discussed.KeywordsX-ray microscopy , high resolution , zone plate

## 1 引言

1665 年,英国人 Robert Hook 设计和制造了一 台光学显微镜,并第一次观察到细胞这一生物单元, 从此显微镜登上了研究物质细微结构的历史舞台。 显微镜是人类认识微观世界的重要桥梁,随着科学 技术的突飞猛进,人们发明了各种显微镜。常规的 光学显微镜受波长的限制(400—700 nm),分辨率 很难突破 200 nm 的衍射极限。电子的德布罗意波 波长由加速电压决定,可远小于1 nm。近代高分辨 率透射电镜的点分辨率达 0.3 nm,线分辨率为 0.144 nm。但电子显微镜需要高真空环境,对生物 样品的观测还需要一系列诸如切片、脱水等处理,这 无疑破坏了样品的内部结构信息。而且电子在样品 中的平均自由程很短,所以电子显微镜与近年来发 展的力场显微镜和近场光学显微镜一样,虽然分辨 率很高,但只适用于研究样品的表面结构。

1895 年,德国科学家伦琴在试验阴极射线管时 发现了 X 射线,从此吸引了很多人开始研究 X 射线 成像。X 射线波长短、穿透深度大,不仅具有对厚样 品进行无损纳米分辨成像的潜力,而且成像机制多 样(如吸收、荧光、化学态、自旋、相位等),衬度来源 丰富,同时曝光时间短,效率非常高,因而可观察分 析多种微观物理、化学变化和微纳米结构,在生物医 学、材料科学和工业上有着广泛的应用。多年来,人 们已经发展了多种 X 射线成像技术。例如,X 射线 接触式成像技术、X 射线扫描成像技术、X 射线光栅 成像技术、X 射线类同轴成像技术(X 射线全息 术),X 射线衍射增强技术、X 射线干涉法成像技术 和 X 射线 CT 技术等<sup>[1-8]</sup>。然而这些成像技术的空 间分辨率很低,一般取决于探测器或记录介质的分 辨率,只达到微米或亚微米量级。

空间分辨率是确定图像清晰度的最重要指标。 自发现 X 射线 100 多年来,提高 X 射线显微镜的分 辨率一直是 X 射线显微学研究者追求的一个重要 目标。但是由于缺乏性能优良的 X 射线光源和高 分辨率成像光学元件,X 射线高分辨率成像的潜力

† 通讯联系人. Email : ychtian@ ustc. edu. cn

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10675113)资助项目

<sup>2006 - 12 - 04</sup> 收到初稿 2007 - 05 - 09 收到修改稿

长期得不到发挥。一方面,X射线的衍射效率比较 低 亮度较低的 X 射线管不足以产生足够强的携带 高分辨信息的大角衍射信号 ;另一方面 缺乏适当的 光学元件,不能够在实验上实现精确的 X 射线聚 焦。近20年来随着高亮度的同步辐射光源、自由 电子激光、等离子体 X 射线源的发展,加上纳米加 工技术的飞速进步 ;人们能够制作出高效率、高分辨 率的物镜波带片;再加上高速度、高灵敏的 X 射线 探测器的研制成功 高分辨率的 X 射线显微成像技 术又重新活跃起来。目前,基于波带片的高分辨率 X 射线显微术以其独特的魅力吸引了世界各国众多 研究者的关注,它能提供其他无损检测方法所不能 提供的样品内部结构的细节信息。世界上许多同步 辐射装置上都建造了高分辨率 X 射线成像装 置<sup>[9-12]</sup>,主要用于细胞分子生物学和材料科学方面 的研究。

下面我们对基于波带片的高分辨率 X 射线显 微术的原理、高分辨率的三维成像原理以及它们在 各学科领域应用等方面进行详细论述。

## 2 基于波带片的高分辨率 X 射线显 微成像

人类对微观世界的认识很大程度上取决于显微 术的发展。人眼能达到的分辨率约为0.2 mm,而普 通的光学显微镜则是利用聚焦透镜放大成像,使人 们观察到更细微的世界。众所周知,X 射线聚焦是 一个令人头痛的问题,这是由于在 X 射线聚焦是 一个令人头痛的问题,这是由于在 X 射线聚焦是 为新材料的折射率都近似等于1。因此,常规的折 射光学元件都无法使用。近年来波带片应用于 X 射线聚焦得到了快速普及,同时也正逐步作为物镜 用于高分辨放大成像。

目前 ,X 射线成像采用的波带片是菲涅耳波带 片(Fresnel zone plates ,FZPs  $\int^{13}$ ]。波带片实质上就 是一圆形的衍射光栅 ,它是由线密度径向增加的明 暗相间的同心圆环带组成的。根据菲涅耳圆孔衍射 理论 ,如果按公式  $r_n = \sqrt{nf\lambda}$ 把圆孔连续分割成一个 个半波带 ,把奇数或偶数个半波带遮住 ,就构成一个 菲涅耳波带片(图1)。

波带片在环带足够多(*n*≥100)时,具有与薄透 镜一样的成像功能:

 $1/f = 1/L_1 + 1/L_2 M = L_2/L_1$ , (1) 式中  $L_1$  为物距(样品到波带片的距离) $L_2$  为像距



图 1 菲涅耳波带片(r<sub>1</sub>为第一环带半径,r<sub>n</sub>为第 n环带半径, Δr 为最外环宽度 λ 为入射光波长,f 为波带片焦距,D 为波带 片直径)

(波带片到成像平面的距离)ƒ为波带片焦距 M 为 放大倍率。

透镜空间分辨率的一种度量就是两个彼此不相 干的点源能够被分辨的最小间距。它依赖于透镜的 点扩展函数(point spread function),即一个远处点源 在像平面上的强度分布。对于理想透镜,包括波带 片,点扩展函数都是艾里图案。图 2 是波带片分辨 两个衍射点光斑的截面示意图 L 为两点间的距离,  $r_{null}$ 为系统的分辨率(文中用  $\Delta$  表示)。当  $L > r_{null}$ 时,系统能分辨出两个点,否则,不能分辨出两个点。 其横向分辨率  $\Delta$  既依赖于波长又依赖于透镜的数 值孔径(瑞利判据)<sup>141</sup>:

$$\Delta = k_1 \lambda / N A_{\rm MZP} , \qquad (2)$$

式中  $NA_{MZP}$ 为波带片的数值孔径  $k_1$  为由光源相干性决定的常量 即值为 0.3—0.61 。对于成像波带 片  $NA_{MZP} = \lambda/2\Delta^{f^{151}}$  ( $\Delta r$  为最外环宽度),而一般  $k_1$ 取值为 0.61。将这些代入(2)式 则可得到:

$$\Delta = 1.22\Delta r . \tag{3}$$

可见 基于波带片的 X 射线成像系统的空间分 辨率 Δ 取决于物镜波带片的最外环宽度 Δr。因此, 要实现纳米级的空间分辨率,波带片的最外环宽度 也应为几十纳米,但是制作这种波带片的最外环宽度 很大。近年来,在提高纳米加工技术的研究过程中, 人们发展了多种制作波带片的理论方法和新型技术 手段(电子束光刻技术、高分辨率光刻胶合成技术 和 Overlay 纳米加工技术等 )<sup>16-181</sup>,同时设计了多 种不同功能的波带片(位相波带片、消色差波带片 和多层次高效率波带片等 )<sup>19-211</sup>。这些都使得制 造高衍射效率、高分辨率的波带片成为可能 极大地 推动了高分辨率 X 射线显微术的发展。目前,在硬



图 2 两个衍射光斑能够被恰好分辨开的距离(图中(b)所示 即为瑞利判据)



图 3 ALS 同步辐射光源的软 X 射线透射式显微镜 XM-1

X 射线波段,美国 Xradia 公司已经制作出最外环宽 度为 30 nm 的波带片<sup>[22]</sup>,日本 Spring-8 光源上实现 了 30 nm 空间分辨率的 X 射线成像<sup>[23]</sup>。在软 X 射 线波段,美国的劳伦斯伯克利国家实验室的 Advanced Light Source (简称 ALS )同步辐射光源已经 实现了 15 nm 空间分辨率的 X 射线成像<sup>[18]</sup>。

图 3 为 ALS 同步辐射光源的软 X 射线透射式 显微镜<sup>[18]</sup>。图中聚焦波带片用于 X 射线聚焦和色 散。微波带片(也称为物镜波带片)用作 X 射线显 微镜的物镜进行放大成像。其中微波带片的参数 为 最外环宽度  $\Delta r = 15 \text{ nm}$ ,环带数 n = 100,直径为 30  $\mu$ m。由于使用的光源部分相干,所以(2)式中  $k_1$ 取 0.4,则空间分辨率  $\Delta = 0.8\Delta r$ 。因此,最外环宽 度  $\Delta r = 15 \text{ nm}$ 时,其空间分辨率可优于 15 nm。此 前,ALS 同步辐射光源已经制作了一个最外环宽度 为 25 nm 的物镜波带片,取得了 20 nm 空间分辨 率<sup>[24]</sup>。

图 4 为使用最外环宽度分别为 25 nm 和 15 nm 的两个物镜波带片,分别对具有19.5 nm 和15.1 nm 半周期的 Cr/Si 多层喷镀金属膜的横断面进行 成像。图 4(a) 图和图 4(c) 是用最外环宽度为 25 nm 的波带片分别得到的两个样品的 X 射线成像, 图 4( a)中的条纹和间隔显示了好的调制度( 约为 20%)但是图4(c)的调制度为零根本看不清楚, 说明利用最外环为 25nm 的波带片不能够分辨半周 期为 15.1 nm 的多层膜。对于具有 19.5 nm 半周期 的多层膜,与图4(a)图相比,用最外环宽度为15 nm的波带片得到的图 4(b)图噪声更低,图像更加 清晰。对于具有15.1 nm 半周期的多层膜,与图4 (c)图相比,利用最外环宽度为15 nm的波带片得 到的图 4(d)图 却显示极为优秀的调制度。这些都 验证了 X 射线成像系统的空间分辨率与波带片最 外环宽度的关系。

### 3 高分辨率的 X 射线三维显微成像

X 射线显微术一直是医学诊断和研究物质内部 结构的重要手段。但是,X 射线成像装置是将三维 的样品显示在二维的记录介质或探测器上,物质内 部深度方向上的信息重叠在一起,引起混淆。为了 克服这一缺点,所谓的计算机辅助断层成像技术 (computerized tomography,简称 CT)发展了起来。 1917 年奥地利数学家 Radon 最先提出 CT 的思想, 其后又经过 Bracewell,Olendorf,Cormack 等人近一 个世纪的发展,CT 技术无论在原理上还是算法上, 都已经成熟,并且广泛应用到不同的领域<sup>[25]</sup>。

CT 技术的基本思想如下<sup>[26-29]</sup>:如图 5 所示,首 先将 X 射线光照射在样品上,我们取得一组数据, 然后转动样品台一个小角度  $\Delta \theta$  取得新入射角的另 一组数据。如此重复,直至旋转  $N_{\theta}$ 次( $N_{\theta} \times \Delta \theta$  = 180°) 取得  $N_{\theta}$ 组数据为止,我们称每一组数据为一 组"投影数据"。通过处理这些投影数据得到样品 三维信息的过程,我们则称为"反投影"。"反投影" 重构图像的思想为:断层平面中某一点的密度值可



图 4 (a)用最外环宽度为 25 nm 的波带片对具有 19.5 nm 半周期的样品的成像 (b)用最外环宽度为 15 nm 的波带片 对具有 19.5 nm 半周期的样品的成像 (c)用最外环宽度为 25 nm 的波带片对具有 15.1 nm 半周期的样品的成像 (d) 用最外环宽度为 15 nm 的波带片对具有 15.1 nm 半周期的样品的成像。其中(a)和(c)在波长为 2.07 nm(光子能量为 600 eV)的情况下获得 (b)和(d)在波长为 1.52 nm(光子能量为 815 eV)的情况下获得



图 5 CT 技术的示意图。(a)CT 装置的简单示意图 (b)样品 的某一断层的投影示意图 *A*(r φ)为该断层在 *XOY* 平面内以极 坐标表示的二维分布

看作这一平面内所有经过该点射线的投影之和( 或 平均值 )。就是说 反投影是一个将投影数据" 均匀 回抹"的过程 ,在不同的投影线交点处 ,像素值由各 个投影数据叠加得到。反投影得到的是某一个断层 截面 ,最后通过软件将不同的断层截面组合得到样 品的三维视图。图 6 很直观地反映了" 反投影"的 过程。样品为两个相隔的圆柱 利用反投影法 ,展示



图 6 反投影重构样品截面的过程的示意图

了分别由 2 *4* 8,16 个投影数据叠加而产生的断层 截面。由此可见,采集数据密度越大,即 N<sub>0</sub> 越大,得 到的断层图像越清晰。

图 5( b )是样品的某一断层的投影示意图,设A ( $r \phi$ )为该断层在 XOY 平面内以极坐标表示的二 维分布,一束平行的射线沿投影方向 I 上穿过物体, 在与 I 垂直的方向上( $\theta$ 角的方向)记录一维投影数 据  $P(x)_{\theta}$ :

$$P(x)_{\theta} = \left[A(r,\phi)\delta[s - r\cos(\theta - \phi)]ds\right] (4)$$

它表示沿着直线  $s = r \cos(\theta - \phi)$ 的线积分,即投影。 用  $f(r, \phi)$ 表示反投影后得到的断层数据。根据反 投影的叠加思想,反投影的表示如下:

$$f(r \phi) = \frac{1}{N_{\theta}} \sum_{i=1}^{N_{\theta}} P_{\theta i} [r \cos(\phi - \theta_i)]$$
$$= \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{N_{\theta}} P_{\theta i} [r \cos(\phi - \theta_i)] \Delta \theta_i , \quad (5)$$

· 591 ·



图 7 (a)老鼠的乳腺上皮细胞的 X 射线显微成像(蓝色的为标记了的微管网络 橙色的为核仁)(b)人类乳腺上皮肿瘤细胞的核子(蓝色为标记了的细胞核膜上的细孔体系)(c)人类乳腺上皮肿瘤细胞的核子(蓝色为标记了的 RNA)



图 8 发酵的酵母细胞不但是基因、分子和生物化学分析的模型系统,而且还是蛋白新陈代谢研究的重要对象。酵母细胞 直径 5 µm,显微 CT 空间分辨率为 60 nm。(a)细胞壁半透明的三维显示 (b)细胞壁透明的三维显示 (c)断层厚度为 0.5 µm 的断层像

式中  $P_{\theta}$ [ rcos(  $\phi - \theta_i$  )]是经过点(  $r \phi$  )的第  $i \uparrow h$ 影值。由( 5 )式过渡到更一般的连续情况下的反投 影表达式为

$$f(r \phi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} P_{\theta} [r \cos(\phi - \theta)] d\theta. \quad (6)$$

三维图像重建的算法还有很多:傅里叶变换重 建、滤波反投影重建、卷积法重建以及代数重建等算 法。虽然反投影重建算法是原理最简单、直观的一 种 却是理解其他重建算法的基础。把高分辨率的 X 射线成像技术与 CT 技术结合起来,即添加相应 的旋转样品台和三维重构图像处理的软件,我们就 可以得到高分辨率的物质内部三维分布<sup>[30,31]</sup>。

#### 4 高分辨率 X 射线成像技术的应用

人们想探究物质超微观世界的强烈愿望使得高 分辨率 X 射线成像技术成为当今世界的主要研究 工具之一。将它与其他相关技术结合,可使其大放 异彩。 近年来,生物样品制备技术、低温成像技术以及 其他定影技术的迅猛发展,降低了 X 射线对辐射敏 感的样品(特别是生物样品)的损伤<sup>[32]</sup>,使得高分辨 率 X 射线成像技术成为研究细胞生物学的又一有 力手段。同步辐射高分辨 X 射线成像技术在生物 医学方面也取得了一些令人振奋的结果,美国的 ALS 同步辐射装置利用常规吸收衬度与免疫金标记 法结合,获得标记的蛋白质或生物大分子体系在整 个细胞的空间分布图(见图 7 )<sup>[33]</sup>。

美国的 ALS 同步辐射装置利用高分辨 X 射线 成像技术研究酵母细胞的三维成像,其分辨率达到 了 60 nm,可以清楚地观察到细胞核、细胞质、类脂 滴、甚至液泡(见图 8)。此三维图像是通过一系列 细胞断层的图片(见图 9)重构得到的<sup>[34,35]</sup>。

在化学元素的吸收边,光子有足够的能量使特 定轨道的一个电子跃迁并被吸收。因此,通过调节 X射线的能量,使其高于或低于某一特定的吸收边, 则特定的化学元素对图像的贡献将增加或减少。台 湾的国家同步辐射研究中心则利用这一特性,研究



图 9 发酵的酵母细胞不同的断层图片



图 10 (a)钨插拴阵列的三维视图,右边分别为两个生成锁眼的插拴(b)集成电路中的钨插拴分布图,红色区域的插拴为图 (c)中分析的插拴(c)插拴的侧面三维示意图(d)插拴中锁眼 尺寸的测量

了因生成锁眼(keyhole)而导致集成电路失效的机 制(图10)<sup>36</sup>]。实验样品是集成电路中的微钨插拴 阵列,他们把X射线的波长调到0.118 nm(能量为 10.5keV),略高于钨的吸收边。实验得到了生成锁 眼的插拴的三维图像,分辨率达到60 nm<sup>[36]</sup>。

#### 5 结论与展望

目前,X 射线显微成像的空间分辨率主要受限 于波带片的最外环宽度和厚度,三维成像也受限于 景深和有限的旋转角度。尽管如此,由于相应的光 学和纳米制造技术也更加成熟,同时基础设计的不 断改进和实用化,高效率的自动显微镜将保证高分 辨率 X 射线显微术在材料、环境和生物科学中有着 光明的应用前景<sup>[37]</sup>。当前,细胞显微是研究细胞及 其内部各组成部分的结构、行为和功能的最重要的 方法之一。近年来很多技术的出现,如4D技术、量 子点技术和荧光能量共振技术等<sup>[38-41]</sup>,使人们可以 原位、实时、动态地从细胞或亚细胞层次研究细胞内 生物大分子间的相互作用,相互作用点的定位,信号 转导通路,以及大分子在细胞内及细胞表面的分布、 迁移。从事高分辨率 X 射线成像的研究者则是希 望把这些技术结合起来,发展一种独特的方法来研 究美妙的细胞分子世界。

#### 参考文献

- [1]马礼敦 杨福家.同步辐射应用概论.上海:复旦大学出版 社 2000.512[MaLD, Yang FJ. Introduction to Synchrotron Radiation Applications. Shanghai: Fudan University Press, 2000.512(in Chinese)]
- $\left[ \begin{array}{c} 2 \end{array} \right]$  Majima T. Trends in Analytical Chemistry , 2004 , 23 : 520
- [ 3 ] Burge R E , Yuan X C , Knauer J N et al. Ultramicroscopy , 1997 , 69 :259
- [ 4 ] Pfeiffer F , Wei T T , Bunk O et al. Nature Physics ,2006 ,10 : 1038
- [5] Wilkin S W, Gureyev T E, Gao D et al. Nature, 1996, 384: 335
- [6] Chapman D , Thomlinson W , Johnston R E et al. Phys. Med. Biol. , 1997 , 42 : 2015
- [7] Bonse U, Hart M. Appl. Phys. lett., 1965, 6:155
- [ 8 ] Zhu P P et al. Appl. Phys. Lett. 2005 87 264101
- [9] Meyer-IIse W, Warwick T, Attwood D. X-ray Microscopy. In : AIP Proceedings of the Sixth International Conference. Berkeley CA 1999. 743
- [10] Chao W L , Anderson E H , Denbeaux G et al. Proceedings of SPIE , 2000 , 4146 :171
- [11] Awaji M, Suzuki Y, Takeuchi A et al. Nucl. Instrum. Meth. A ,2001 ,467—468 :845
- [12] 柳龙华,刘刚陈洁等.中国科学技术大学学报 2007 37: 93 [LiuLH, LiuG, ChenJet al. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37:93 (in Chinese)]
- [ 13 ] Yun W B , Chrzas J , Viccaro P J. SPIE , 1990 , 1345 :146
- [14] Born M Wolf E. Principles of Optics. New York Cambridge University Press, 1999
- [15] Yun W B , Howells M R. J. Opt. Soc. Am. A , 1987 , 4 34
- [16] Anderson E H et al. J. Vac. Sci. Technol. B , 2000 , 18 2970
- [17] Schneider G, Schliebe T, Aschoff H. J. Vac. Sci. Technol. B, 1995, 13 2809
- [ 18 ] Chao W L ,Harteneck B D ,Liddle J A et al. Nature ,2005 , 435 1210
- [19] Kaulich B. SPIE , 1998 , 3449 :108
- [20] Wang Y X , Yun W B , Jacobsen C. Nature , 2003 , 424 :50
- [21] Fabrizio E D et al. Nature , 1999 , 401 : 895
- [22] http://www.xradia.com

#### X射线探测、成像及应用专题

- [23] Aoki S , Kagoshima Y , Suzuki Y. X-ray Microscopy. In IPAP Proc. 8th Int. Conf. Tokyo , 2006
- [24] Chao W et al. J. Vac. Sci. Technol. B , 2003 , 21 3108
- [25] Kalender W A. Phys. Med. Biol 2006 51 29
- [26] 庄天戈. CT 原理与算法. 上海:上海交通大学出版社, 1992. 154 [ Zhuang T G. CT Principle and Algorithm. Shanghai Shanghai Jiao Tong University Press, 1992. 154 ( in Chinese )]
- [27] Bonse U ,Busch F. Prog. Biophys. Molec. Biol. ,1996 65 :133
- [28] Eberhardt C N , Clarke A R. J. Microscopy 2002 206 41
- [29] Midgley P A ,Weyland M. Ultramicroscopy 2003 96 413
- [ 30 ] Weib D et al. Ultramicroscopy 2000 84 :185
- [31] Scheneider G et al. Surf. Rev. Lett. 2002 9 :177

- [ 32 ] Jacobsen C. Trends in Cell Biology ,1999 9 44
- [ 33 ] Meyer Ilse W , Hamamoto D , Nair A et al. J. Microscopy , 2001 201 395
- [34] Larabell C A ,Le Gros M A. Mol. Biol. Cell. 2004 ,15 957
- [ 35 ] Le Gros M A ,McDermott G ,Larabell C A. Curr. Opin. Struct. Biol 2001 ,15 593
- [ 36 ] Yin G C et al. Appl. Phys. Lett. 2006 88 241115
- [ 37 ] Attwood D. Nature 2006 442 642
- [38] Bement W M et al. Differentiation 2003 71 518
- [ 39 ] Pellegrino T et al. Differentiation 2003 71 542
- [40] Chen Y et al. Differentiation 2003 71 528
- [41] Elangovan M et al. J. Microscopy 2002 205 3

物理新闻和动态。

## 关于爱因斯坦" 定域实在论 "的新实验

爱因斯坦坚信一个真实世界的存在:对于一个系统的测量结果,应由系统本身的物理性质决定,物性先于测量并且独立于测量(即所谓'实在论",realism)。爱因斯坦同时认为,测量结果不会受到远距离事件的即时影响(即所谓'定域性",locality,或者说,任何影响的传递都不可能超光速)。为了论证'定域 – 实在"论,爱因斯坦与 Podolsky 和 Rosen 于 1935 年联名发表 了一篇文章,提出了两粒子纠缠问题——EPR 纠缠态。

1964 年 John Bell 在研究了 EPR 纠缠态之后,对" 定域 – 实在 "论所预言的关联(例如,组成一对纠缠光子的甲和乙分开 后的线偏振),确定了一个"极限",并以"不等式"表示。随后,关于 Bell 理论的实验以极高的显著性证明 纠缠光子对的行 为服从量子力学的预言,而与从"定域 – 实在 "论导出的 Bell"不等式"相悖。仿佛甲光子知道自己应该拗着乙光子行事.你的 线偏振"垂直",我就"水平",你"水平",我就"垂直"。

现在的问题是,定域或实在,究竟是哪一方面出了错?抑或两者都出了错?最近,奥地利维也纳大学的 Groeblacher 等沿 着理论家 Leggett A J 的新思路,设计并完成了关于纠缠光子对的全新测量。该实验把原先对线偏振的测量改换成了对椭圆 偏振的测量,实验难度增大,但更适于研究上述问题。实验结果明显违背 Leggett 的以"实在论"为前提的广义不等式,即无论 是"定域 – 实在"理论的预言,还是这次"非定域 – 实在"理论的预言,均与观察到的量子关联不符,从而对"实在论"提出了质 疑。然而,有专家认为 Groeblacher 等的实验只是证明"实在论"与某些非定域模型不匹配,不能就此认定问题出在"实在论" 上。总之,新实验必将促进我们更深入地探讨量子奥秘。

(戴闻 编译自 Nature, 2007 446 866 871)

### 单层锰原子的手征磁有序

-只光滑的铁环放在镜子前,它的像与铁环本身完全一样,不可区分。然而,将我们的右手放在镜子前,镜中的像将不同,它像是我们的左手。自然界中有许多现象涉及"前进"与"旋转"方向二者的关系,他们被称为是"手性的",或"手征"。在讨论电磁感应时,我们区分"右手定则"和'左手定则";在沃森和克里克的 DNA 双螺旋结构示意图(1953 年 4 月 25 日发表)中,两股并行盘绕的螺旋链被分别标记了"上行箭头"和'下行箭头";在吴健雄验证"杨 – 李理论"的实验中,发现 f<sup>0</sup> Co 在 β 衰变过程中并不是朝着<sup>60</sup> Co 自旋极化的正反两个方向对称地发射电子,而是仅仅朝自旋极化的反方向发射。在稀土金属 Dy 的低温反铁磁态,原子磁矩躺在六方晶格的基平面内,磁矩取向不共线,而是每上一个原子层绕 c 轴转一个角度,从而形成 所谓'螺旋(helical)反铁磁"。

最近,来自德国汉堡大学的 Bode 等利用自旋极化扫描隧道显微镜,观察了淀积于钨衬底上单层锰原子的磁有序。他们 发现,与大块锰金属中共线反铁磁有序不同,单层锰原子的磁矩表现出不同程度的倾斜,以至于形成周期 12nm 的螺旋结 构:毗邻自旋的取向逐步变化,遵循摆线(或称旋轮线)行为。他们运用 Dzyaloshinskii – Moriya 相互作用(在缺乏反演对称的 晶体中,若'自旋 – 轨道"耦合足够强,此作用将诱发长周期无公度螺旋磁有序),定量解释了上述手征磁有序。同行专家高 度评价这项工作在自旋电子学领域的应用前景:当自旋极化电流流过上述纳米尺度的手征磁体时,将对后者的磁结构施加 一个转矩;接下来,将可能操控磁化强度的分布,发展超高密度磁记录介质、磁化开关和磁性马达。

( 戴闻 编译自 Nature 2007 447:157,190 )