

# X 射线成像的一些基本知识

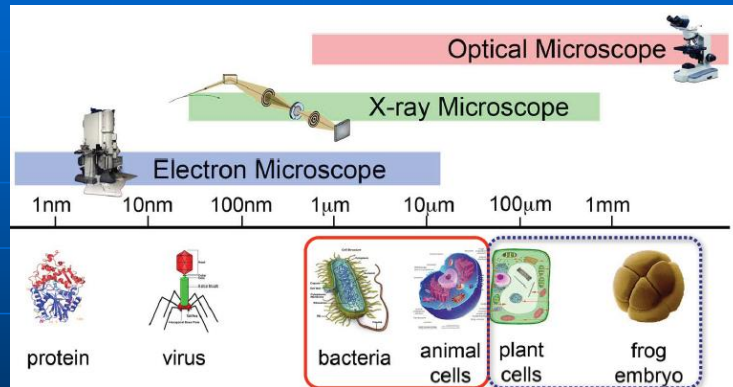
朱佩平

2013年11月21日

## 成像的目的和意义

- 眼睛是人类感知世界最重要的器官，眼睛本身是一台发展完美的成像光学仪器。
- 人类研制的各种成像光学仪器，如望远镜、显微镜、照相机、雷达、医院里检查人体的X光透视设备、安检入口的危险物品检测设备等等，都是人类眼睛的延伸，是人类遥望星空，观察微观世界，留下美好回忆，保证身体健康、建设安全生活环境不可或缺的工具。
- 科学发展无止境，成像研究也不会结束，需要不断研究成像的原理，需要研制出功能更强大的工具。

# 成像所涉及的领域



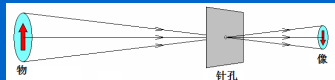
- 从声波、电磁波到电子波，波长从小于纳米到大于毫米，虽然本讲座主要讲同步辐射X射线成像，但是其中的一些原理和研究方法具有相当的普遍性。

# 成像的目的

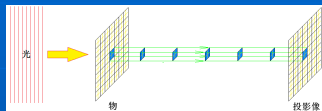
- 尽可能逼真地获取物体图像；
- 二维成像就是从—个方向看物体，在数学上就是把物体描述为二维坐标函数；
- 三维成像就是从多个方向看物体，在数学上就是把多个不同方向的二维函数变成三维坐标函数，这个数学过程叫重建；
- 观察物体内部任意剖面图像，又称为断层成像，在数学上就是让三维函数中的一维坐标成为常数。

# 描述成像的参数

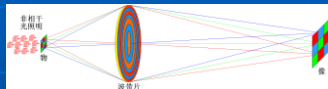
- **分辨率**：能分辨单位长度上的线对数；
- **分辨力**：能分辨最小间距。
- **衬度**：信号和背景的差别，有差别才能形成图像。衬度定义：
$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$
- **衬度种类**：吸收衬度，相位衬度，荧光衬度等。



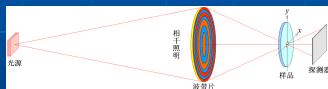
针孔成像



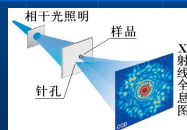
投影成像



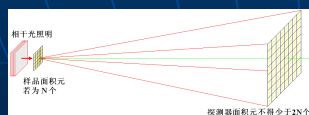
透镜(波带片)成像



微探针扫描成像



全息成像  
(干涉成像)

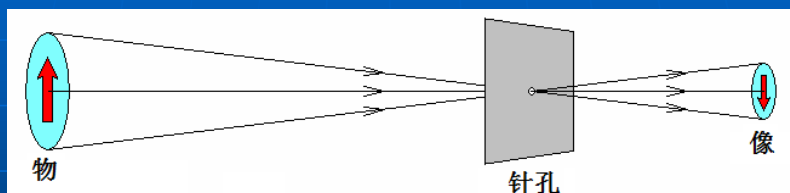


相干衍射成像  
(自干涉成像)

多种X射线成像列举

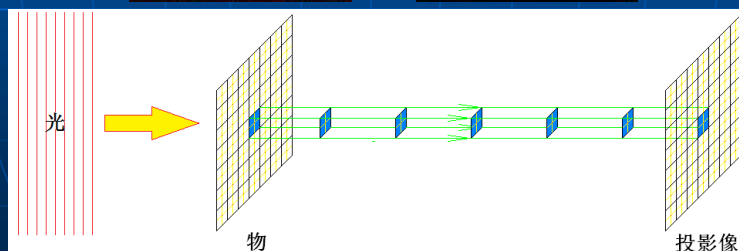
## 针孔成像

- 2300年前，战国时代，墨子提出针孔成像原理。针孔成像是分析其它成像的基础。



- 墨子的时代，中国是先进国家，近一二百年，中国落后了，本讲座介绍的成像方法，基本上是外国人发明的。
- 近几十年，中国发展突飞猛进，在成像科学上也是如此，本讲座会介绍一些中国人的贡献。

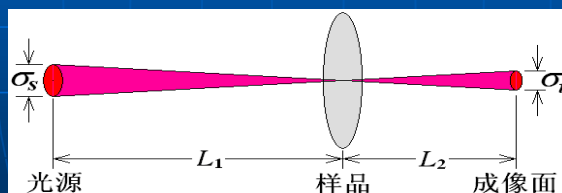
## X射线投影成像





## 根据粒子性建立投影成像模型

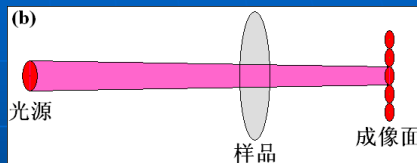
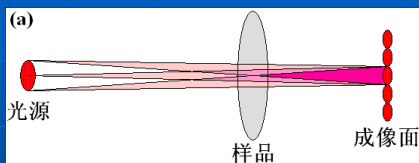
- X射线光源都有一定直径，是多个点光源的集合，光源中任意一点的发光都是独立的。同理，样品是多个物点的集合。
- 在X射线投影成像中，既存在多个点光源照射一个物点的过程，又有一个点光源照射多个物点的过程。
- 先研究整个光源照射一个物点的过程：



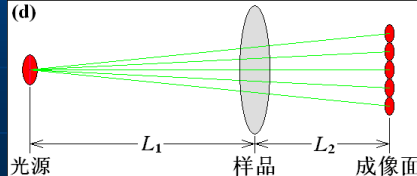
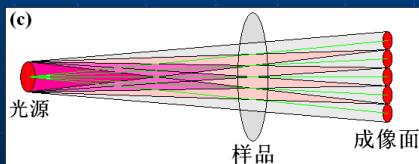
- 一个物点被扩散为一个光斑，称为点扩散斑，光斑直径与光源直径成正比。由此可知，投影成像不可能分辨比点扩散斑更小的间隔。（针孔成像原理）

## 根据粒子性建立投影成像模型

- 再研究整个光源照射一个点扩散斑的过程，可以看到，从光源到点扩散斑，形成一条输送光子的管道。

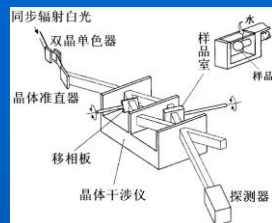
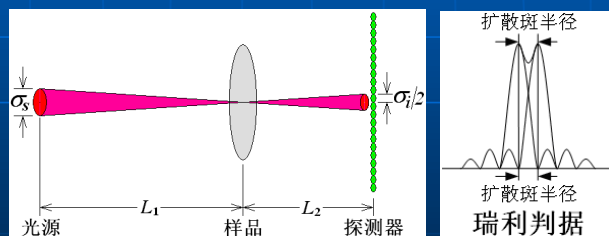


- 如果以点扩散斑为分辨单元，对成像面进行分割，则存在多条输送光的管道。若将从光源到物点扩散斑的管道抽象成一根光线，则可建立投影成像的模型。



## 如何选择探测器的像素大小？

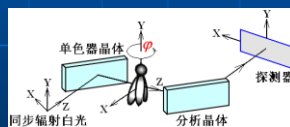
- 类似于瑞利建立分辨率判据的思路，以物点扩散斑半径作为分辨率的极限，并认为探测器的像素直径等于物点扩散斑半径是最佳选择。



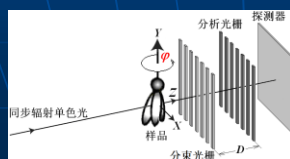
干涉成像，利用参考光和物投影光之间的干涉进行成像  
1971年



同轴相位传播成像  
19--年



衍射增强成像  
1997年

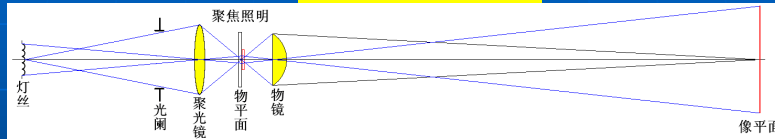


光栅剪切成像  
2003年

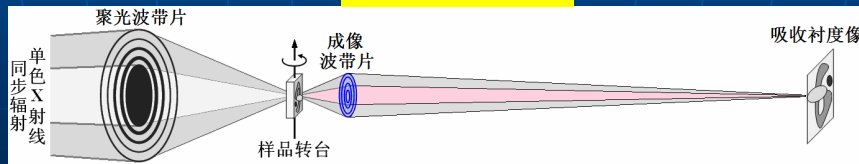
与相位有关的投影成像

# 透镜成像

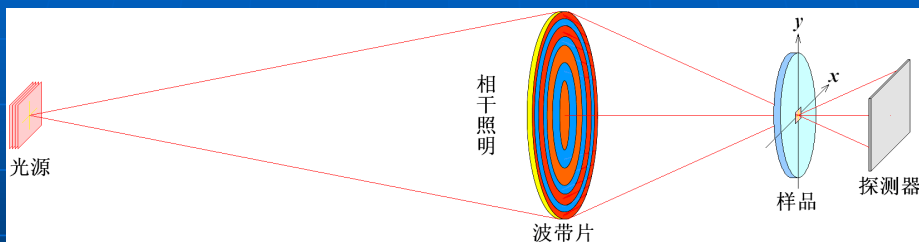
## 可见光显微镜



## X射线显微镜

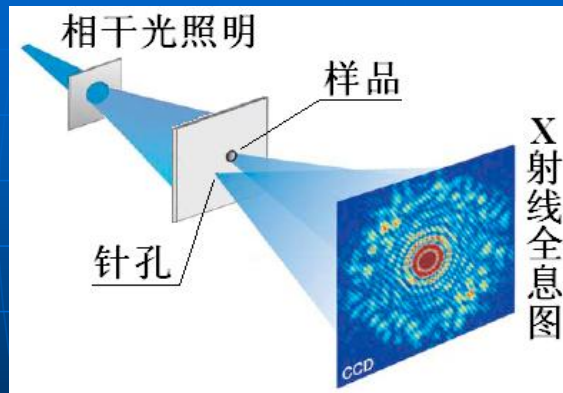


# X射线探针扫描成像



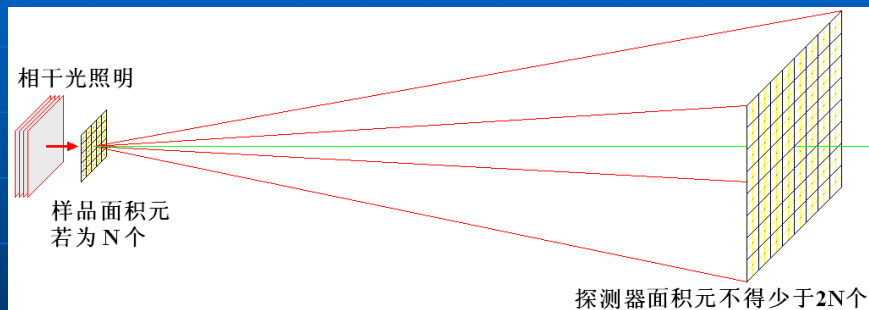
- 利用X射线透镜聚焦形成微小探针，扫描样品，获取样品的影像。

## X射线全息成像



- 利用参考光和物衍射光之间的干涉拍摄X射线全息图。

## 相干衍射成像



- 物的衍射图就是物衍射光的自干涉图，根据物衍射图可以重建样品内部的微观结构。

## 成像中的几个概念

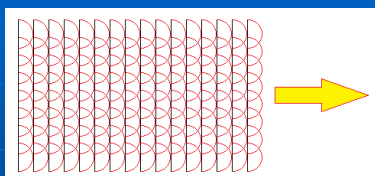
- 并行成像：X射线投影成像、X射线透镜成像和相干X射线无透镜成像为并行成像，各个像素同时成像；
- 串行成像：X射线探针扫描成像为串行成像，各个像素按顺序成像；
- 直接成像：X射线投影成像和X射线透镜成像为直接成像，又称一步成像；
- 间接成像：X射线全息成像和相干衍射成像为间接成像，又称二步成像。

## 光传播的物理性质

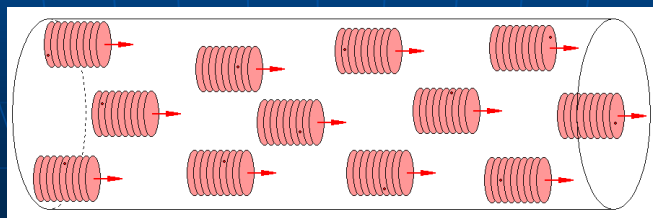
学习成像原理需要搞清楚光的物理性质

## 光有两面性：周期性和非周期性

- 就像小孩向水中扔一块石子，激发一串波。



- 一般而言，一串波太弱不足以构成光，光是多串波构成的，就像很多小孩随意向水中扔石子。

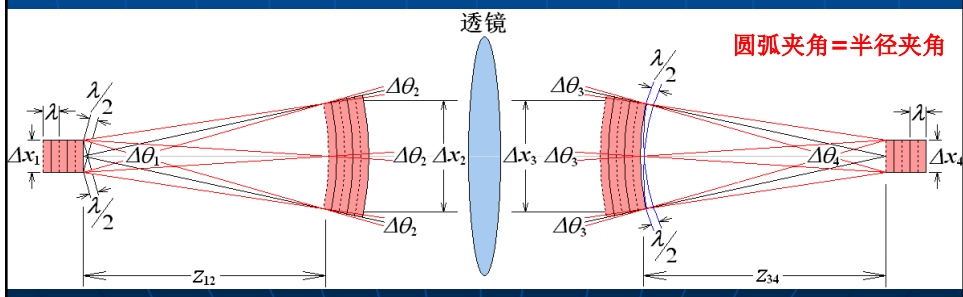


## 光的发生—光子或者波包

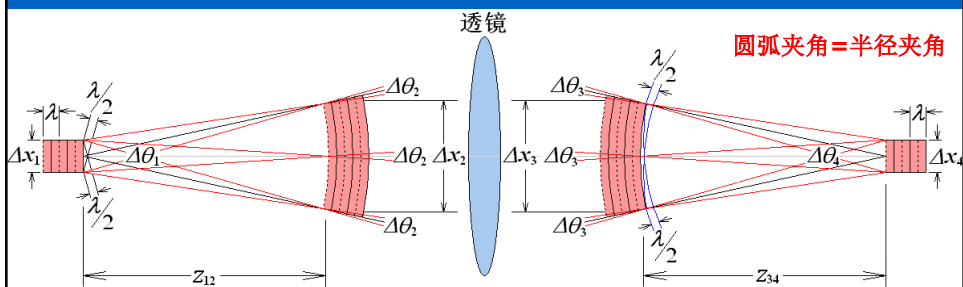
- 电子在加速或减速时，辐射出一份份的能量，称为光子，又称为波包。之所以称为光子，是因为这每一份能量在探测器上的显示为一个亮点；之所以称为波包，是因为这每一份能量都具有波的性质，可以发生干涉和衍射。
- 每个波包都有周期性的波阵面结构，波包内部各点具有固定的相位关系；而波包之间没有相位关系。因此，干涉只发生在波包内部，波包之间不会发生干涉。
- 一般而言，光束是由众多前仆后继的波包构成。波包的大与小、多与少，可以有成千上万个组合，造成千变万化的结果，因而形成光束相干性的复杂性。

# 光子和波包之间的关系

- 干涉是两波相遇，两波之间相位相同和相反产生的效应；
- 光子流向波包自干涉加强的方向，波包自干涉振幅为零的地方是光子的禁区；
- 波包自干涉开辟光子流域。



## 波面宽度和光子流向的关系



$$\frac{\lambda/2}{\Delta x_1} = \frac{\Delta \theta_1}{2} \Rightarrow \Delta x_1 \Delta \theta_1 = \lambda$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta x_2 = z_{12} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 = \frac{\Delta x_1}{z_{12}} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta x_2 \Delta \theta_2 = \Delta x_1 \Delta \theta_1$$

$$\frac{\lambda/2}{\Delta x_3/2} = \Delta \theta_3 \Rightarrow \Delta x_3 \Delta \theta_3 = \lambda$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta x_3 = z_{34} \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_3 = \frac{\Delta x_4}{z_{34}} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta x_3 \Delta \theta_3 = \Delta x_4 \Delta \theta_4$$

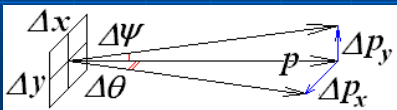
$$\Delta x \cdot \Delta \theta = \lambda$$



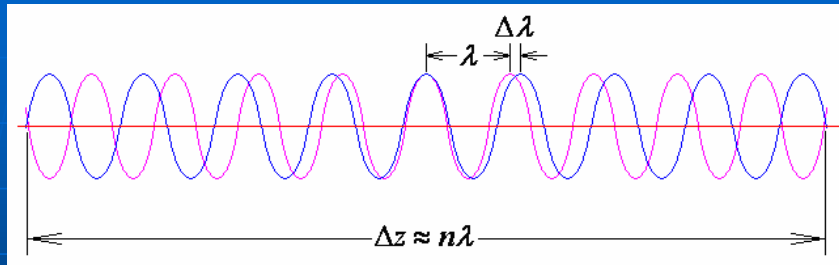
## 光的波粒二象性

- 光到底是波还是粒子？
- 根据光子流密度等于光波振幅平方，正确的答案是：光既是波，又是粒子。
- 在表面上看来，光波和光子是矛盾的，可是它们之间却存在着不可分割、相互依存的关系。一方面，无论何时何地，使用探测器去探测光，它总是以光子的形式出现；另一方面，光的行为规范却是由光波决定的。当没有相互作用时，光子可能出现在有光波的任何地方，可是当光和物质发生相互作用时，就会有反射波和衍射波，光子一定在光波干涉或衍射加强的地方出现的可能性大，而在光波干涉或衍射减弱的地方出现的可能性小，特别是光子绝对不会出现在干涉或衍射振幅为零的地方。因此，只须把光强看作光子出现的可能性，光的波粒二象性之间就会协调一致。

根据波面宽度和光子流向关系式和德布罗意假设，可以得到垂直光束的不确定关系

$$\Delta x \cdot \Delta \theta = \lambda \quad \rightarrow \quad \Delta x \cdot \frac{\Delta p_x}{p} = \lambda \quad \rightarrow \quad \Delta x \cdot \Delta p_x = p \lambda$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$
$$\Delta x \cdot \Delta p_x = h$$

## 波包长度和带宽的关系



$$\Delta z = n\lambda = (n-1)(\lambda + \Delta\lambda) \Rightarrow \Delta z = \frac{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

$$\Delta z \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \lambda$$

- $\Delta z$ 为波包长度， $\Delta\lambda$ 为波包的波长不确定，又称带宽， $\lambda$ 为中心波长。

根据波包长度和带宽的关系式和德布罗意假设，可以得到平行于光束的不确定关系

$$\Delta z \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \lambda \quad \Rightarrow \quad p\lambda = h \Rightarrow \frac{\Delta p_z}{p} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta z \cdot \frac{\Delta p_z}{p} = \lambda$$

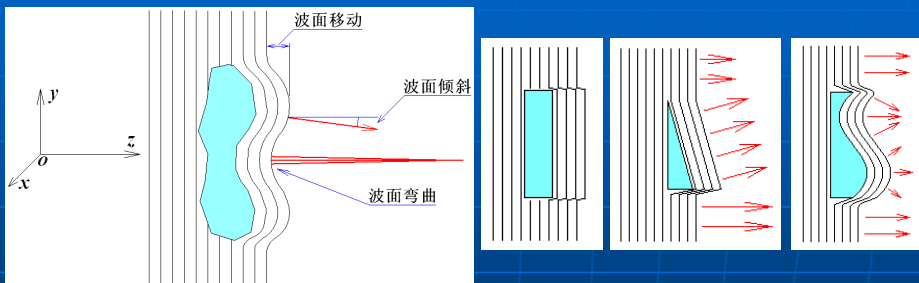
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z = h$$

# 光的相位

- 相位就是人们常说的步调。在前进的队伍中，步调相差半步或半步奇数倍的两个人，手臂的摆动是相反的，称为相位相反；步调相差一步或一步整数倍的两个人，手臂的摆动是一致的，称为相位相同。为了能用数学来描述运动的周期性，人们把它和旋转箭头（就像人们用钟表记录日月的周而复始）的周期性联系起来，用箭头旋转一圈，即  $2\pi$  相位，表示一步、一个波长或者其它具有周期性的量。相位相差或奇数倍，称为相位相反，相位相差  $2\pi$  或  $2\pi$  整数倍，称为相位相同。
- 两束相干光（同一个波包分为两部分，形成两束相干光）相遇，在相遇的地点，若两束光相位相同，则会互相加强，合振幅是两束光振幅之和，产生亮纹；若两束光相位相反，则会互相抵消，合振幅是两束光振幅之差，产生暗纹。由此可以体会到，当两束光相干时，光子流向相位一致的地方，相位衬度成像就是利用相位调控光子流向的特点，对样品进行成像的。

## 三种相位信号的分类



- （1）波面移动产生相位移信号；
- （2）波面倾斜（相位一阶导数）产生折射角信号；
- （3）波面弯曲（相位二阶导数）产生聚焦和发散。

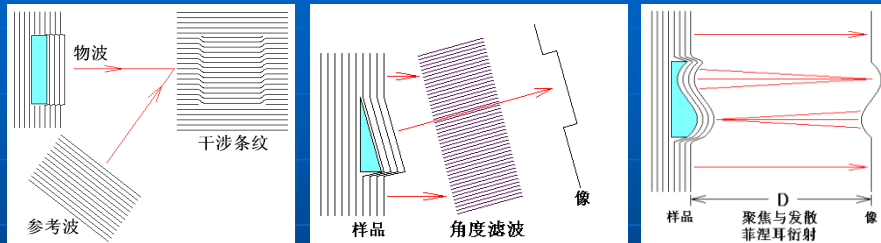
## 相位信号分类

- 当平面光波经过样品时，可能引起波阵面发生三种变化，产生三种相位信号：
- （1）样品中像加速器或减速器，引起光波阵面出现超前或落后，产生相位差信号；
- （2）样品像棱镜，引起光波阵面倾斜，导致光的折射，其折射角与相位一阶导数成正比；
- （3）样品像透镜，引起光波阵面弯曲，导致光强的聚焦或者发散，可以用相位二阶导数描述波阵面的弯曲程度。

## 相位探测原理

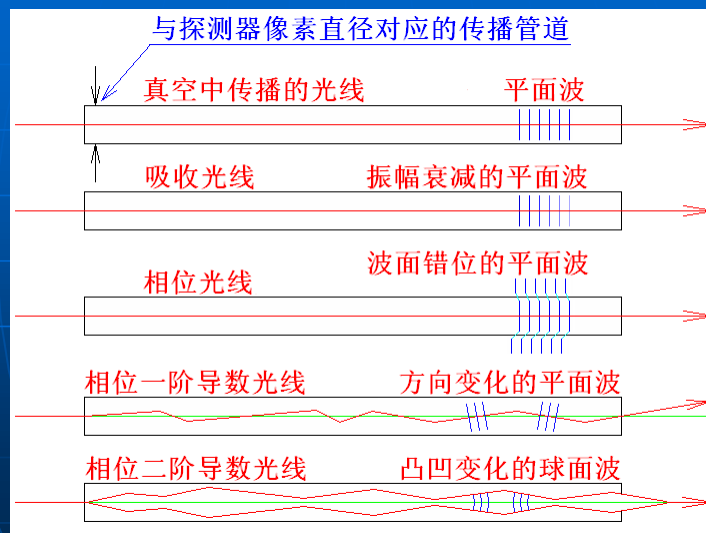
- 虽然相位本身是看不见的，但是它可以通过调控光强来表明它的存在。相位探测的基本原理是，通过探测相位引起的光强变化来探测样品的。

## 三种相位探测方法



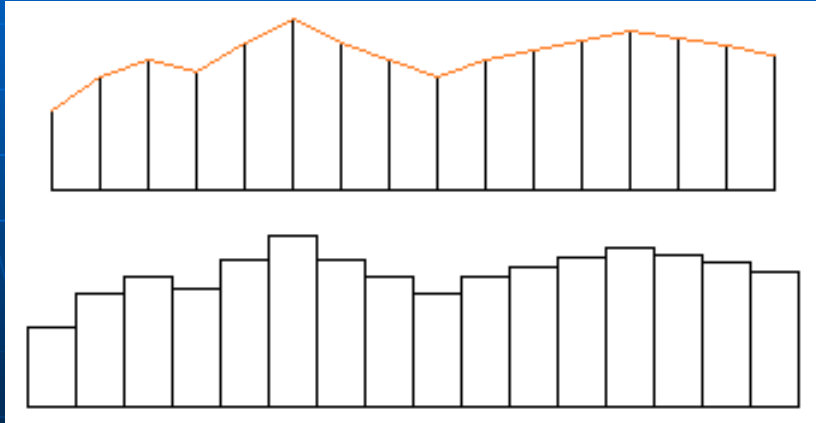
- 根据相位信号的特点，发展了三种探测相位信号的方法，
- （1）利用干涉条纹探测相移；
- （2）利用角分辨元件探测折射角获得相位一阶导数；
- （3）利用不同距离探测光强，获得相位二阶导数。

## 光线直线传播的五种可能性



## 相位和相位导数之间的关系

- 探测器各像素的相位和相位导数之间的关系

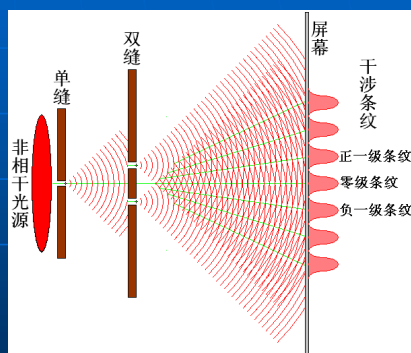


## 相干性的研究内容

- 一般光源发出的光束，都是多个波包构成的，干涉条纹是波包自干涉形成的，不同波包的干涉条纹之间的错位，会使干涉条纹消失的无影无踪。
- 相干性是研究如何产生干涉条纹的学问，研究光束宽度和光子流向必须满足什么关系，才能产生干涉条纹，研究光程差必须满足什么关系，才能产生干涉条纹。
- **空间相干性**：研究光束宽度和光子流向之间的关系
- **时间相干性**：研究光程差和干涉条纹清晰度的关系
- **研究方法**：双孔干涉

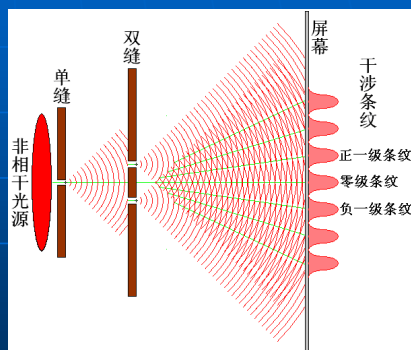
## 研究相干性的装置

- 来自两个灯泡的两束光，不会产生干涉条纹；
- 一个灯泡照射下的双缝，不会产生干涉条纹；
- 1801年英国医生托马斯·杨先用单孔从灯泡光中滤出相干光，然后用双孔获得干涉条纹。



## 需要研究的问题

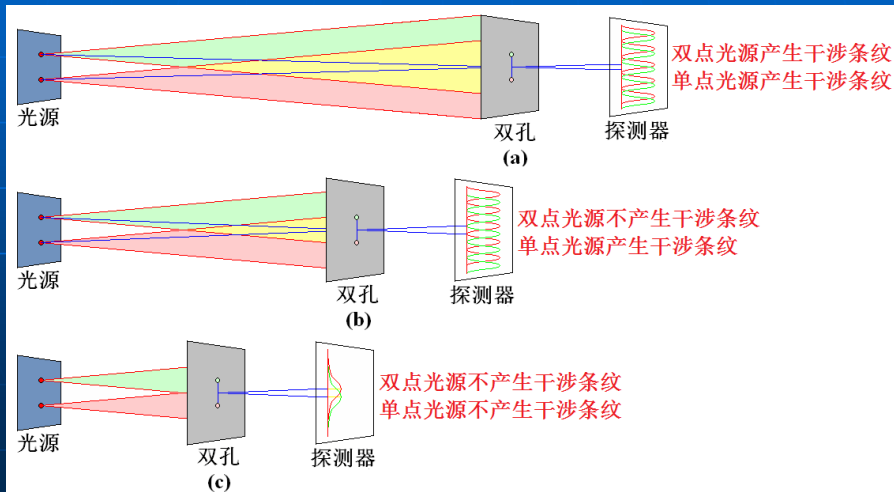
- (1) 干涉条纹为什么随着单缝增宽或者距离变近而模糊？
- (2) 干涉条纹为什么中间清楚，两边模糊？
- 第一个问题引入空间相干性；
- 第二个问题引入时间相干性。





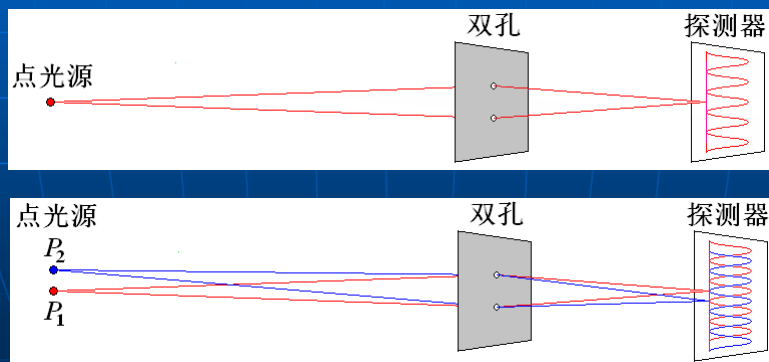
## 双孔干涉的三种现象

- 在光源上过滤出两点光源，考察双孔干涉，发现三种现象：

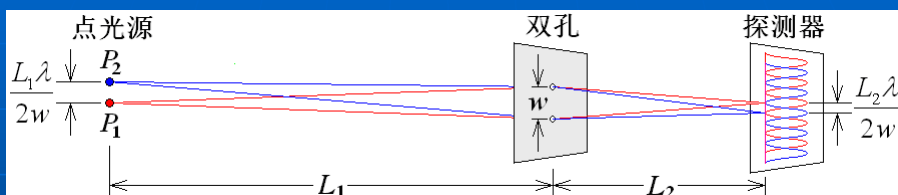


## 双孔干涉的细致研究

- 一点光源（单色）肯定会产生干涉条纹；
- 两点光源呢？可能产生，也可能不产生。

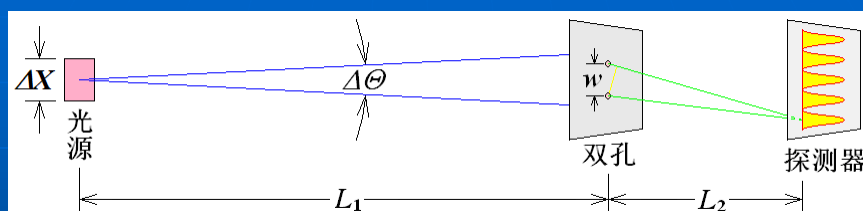


## 双点光源产生双孔干涉的条件



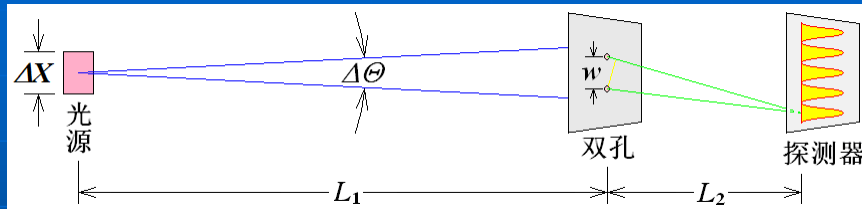
- 双孔干涉条纹周期为  $\frac{L_2\lambda}{w}$  当  $P_2$  点光源移动  $\frac{L_1\lambda}{2w}$  ,  $P_2$  的亮纹与  $P_1$  的暗纹重合, 干涉条纹消失。
- 考察双点光源间距  $\Delta X < \frac{L_1\lambda}{2w}$  和双孔张角  $\Delta\Theta < \frac{w}{L_1}$  之间的关系, 当  $\Delta X \cdot \Delta\Theta < \frac{\lambda}{2}$  有干涉条纹, 当  $\Delta X \cdot \Delta\Theta = \frac{\lambda}{2}$  干涉条纹消失。

## 扩展光源产生双孔干涉条纹研究



- 扩展光源中, 既有满足条件  $\Delta X \cdot \Delta\Theta < \frac{\lambda}{2}$  的两点, 也有满足  $\Delta X \cdot \Delta\Theta = \frac{\lambda}{2}$  条件的两点, 还有满足  $\Delta X \cdot \Delta\Theta > \frac{\lambda}{2}$  条件的亮点。
- 细致分析后, 只有当  $\Delta X \cdot \Delta\Theta < \lambda$  , 才能存在未抵消的光源点 来产生干涉条纹, 当  $\Delta X \cdot \Delta\Theta = \lambda$  全部点互相抵消, 干涉条纹消失。

## 空间相干条件



$$\begin{cases} \Delta X \cdot \Delta \Theta < \lambda \\ \Delta X \cdot \Delta \Theta = \lambda \end{cases}$$



$$\Delta X \cdot \Delta \Theta \leq \lambda$$

- $w = L_1 \Delta \Theta$  称为空间相干长度；
- 请思考空间相干长度和波包宽度的关系；
- 请思考两个关系式之间的区别

$$\Delta x \cdot \Delta \theta = \lambda$$

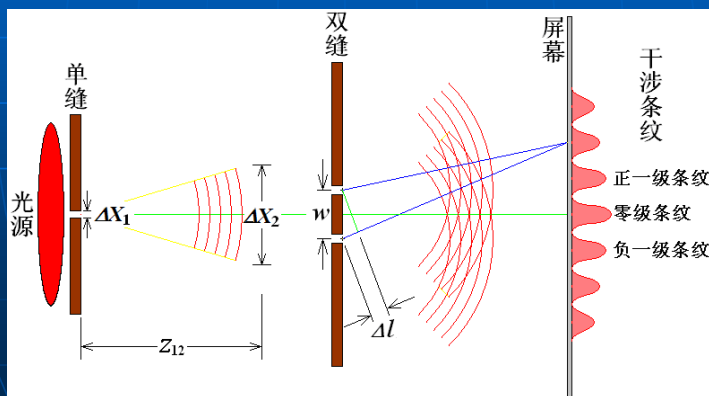
$$\Delta X \cdot \Delta \Theta = \lambda$$

## 空间相干光和非相干光

- 对于双孔干涉而言，满足空间相干条件的光束，称为空间相干光，不满足空间相干条件的光束，称为空间非相干光。
- 非相干光不是没有相干过程发生，而是各种相干效应互相干扰，其结果看起来好像没有相干性。
- 下列三种措施，可使从双孔发出的光从不相干变为相干：
  - （1）双孔远离光源，
  - （2）缩小光源直径，
  - （3）缩小双孔之间距离。

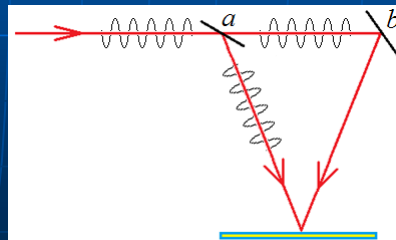
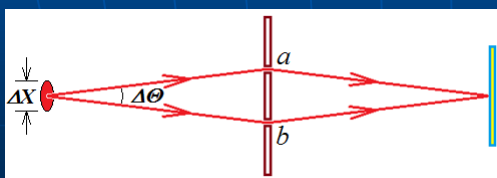
## 干涉条纹的可见度 是两种相干性共同作用的结果

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



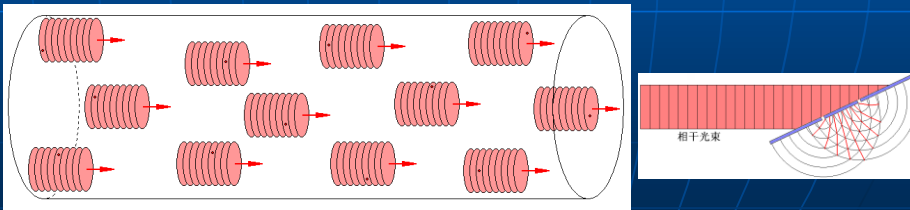
## 如何研究 纯空间相干性和纯时间相干性

- 垂直于光束传播方向的两点的相干性称为空间相干性，也称为横向相干性；
- 平行于光束传播方向的两点的相干性称为时间相干性，也称为纵向相干性。



# 干涉条纹是许多波包的累积效应

- 一个波包不足以产生可观察的干涉条纹，
- 干涉条纹是许多波包前赴后继的累积效应。



## 光传播性质的小结

- (1) 单个波包形状变化规律，三个不确定关系：

$$\Delta x \cdot \Delta \theta = \lambda, \quad \Delta y \cdot \Delta \psi = \lambda, \quad \Delta z \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \lambda$$

- (2) 垂直于光束的两点的相干性，空间相干条件：

$$\Delta X \cdot \Delta \Theta \leq \lambda$$

- (3) 平行于光束的两点的相干性，时间相干条件：

$$\Delta L \leq L_c = \lambda^2 / \Delta \lambda$$

- (4) 两相干光相遇，振幅相加；两非相干光相遇，光强相加。

# X射线纳米CT成像原理 以及 在生命和材料科学中的应用

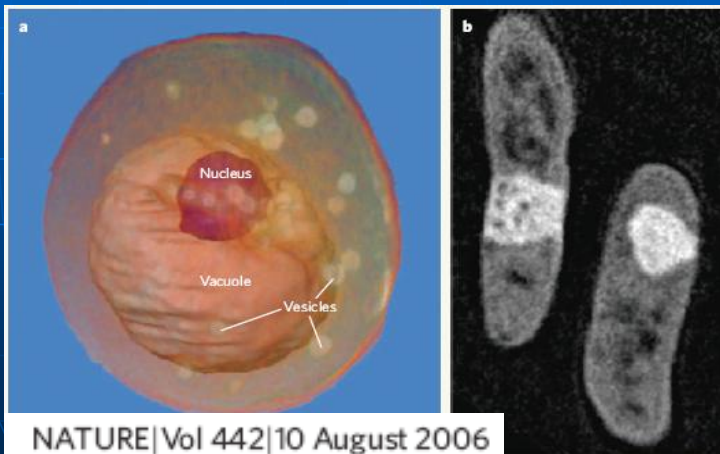
朱佩平

2013-11-21

## Nanotomography comes of age

David Attwood

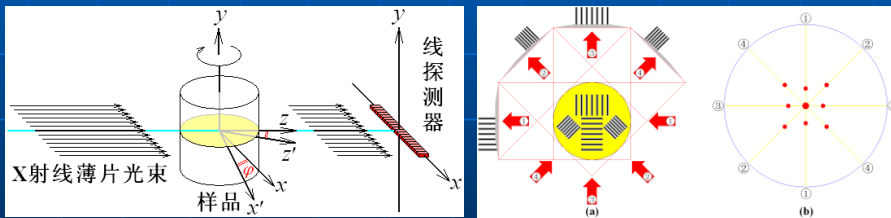
The use of X-rays to construct three-dimensional tomographic images is well established in medicine. The same principle is being extended to the nanoscale, bringing us startlingly accurate pictures of tiny objects.



NATURE|Vol 442|10 August 2006

## X射线CT的原理

- X射线CT已经广泛应用于医学、工业、安检，其基本原理是利用投影的傅立叶变换，求得待测样品断层的傅立叶变换，并重建断层的空间结构。



- 傅立叶中心切片定理：投影的傅立叶变换是二维傅立叶频谱在垂直投影方向的一个切片。

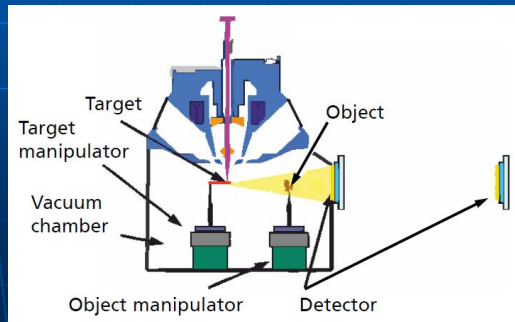
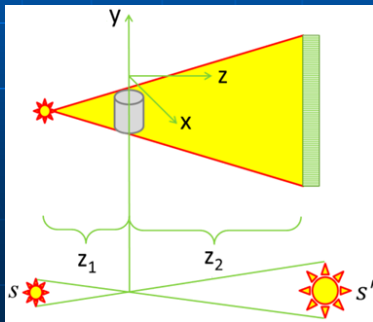
## 实现X射线纳米CT的两种方法

- 投影放大成像方法
- 透镜放大成像方法



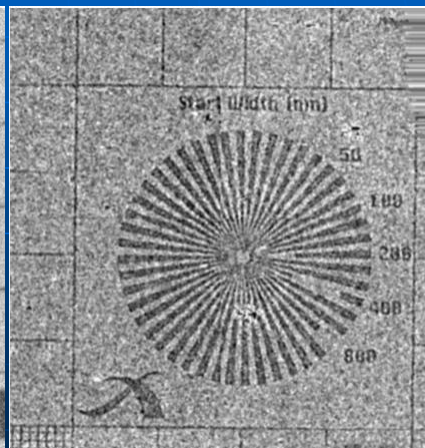
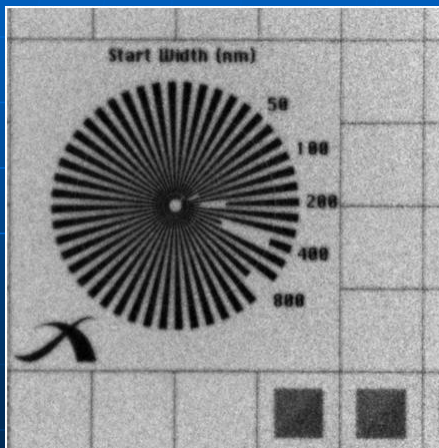
# 投影放大成像实现纳米CT

- 投影放大成像： $Z_1$ 越小， $Z_2$ 越大，放大倍数越大；
- 针孔成像： $Z_1$ 越小， $Z_2$ 越大，分辨率越低；光源S越小， $S'$ 越小，分辨率越高；光源S越小，光通量越小。
- 选用直径约为70纳米的光源。



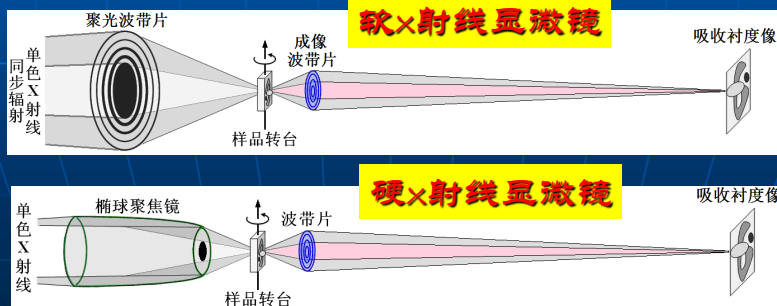
## 投影放大成像分辨率达到80纳米

- 左图是用Xradia的X射线显微镜5分钟曝光拍摄的图像；右图是投影放大成像2分钟拍摄的图像。



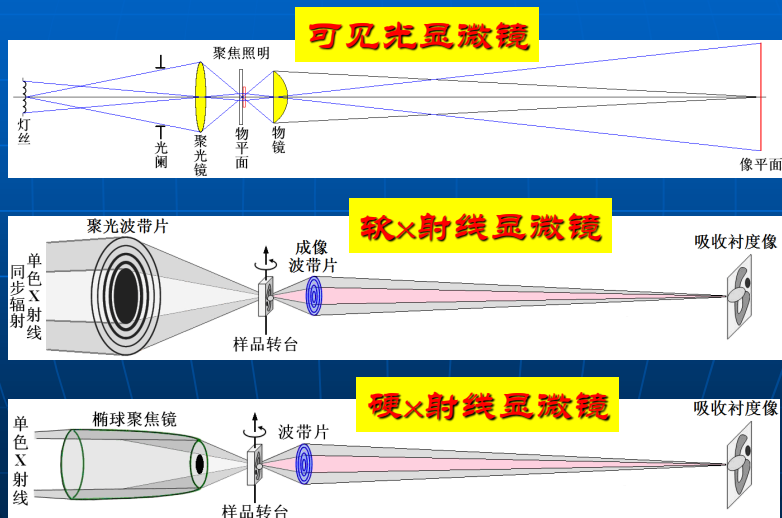
# 透镜放大成像实现X射线纳米CT

- 已经实现的X射线纳米CT是X射线显微镜和传统CT的结合。
- 基本原理之一：利用X射线透镜将纳米尺寸结构信息放大到微米尺寸，然后用微米尺寸像素的探测器采集投影数据。



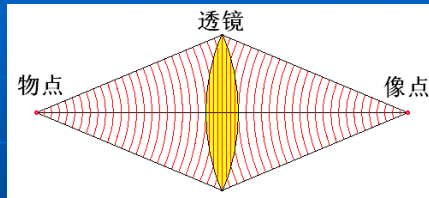
## X射线显微镜的原理

- X射线显微镜是光学显微镜在X射线波段的推广。

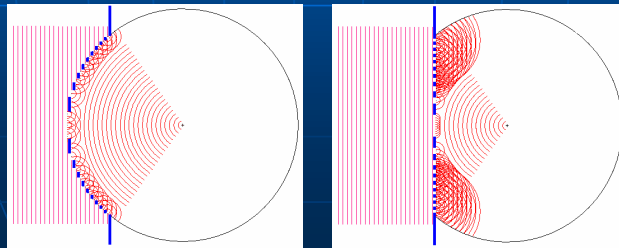


## X射线透镜—波带片

- 玻璃透镜将一个凸球面波变换为一个凹球面波。



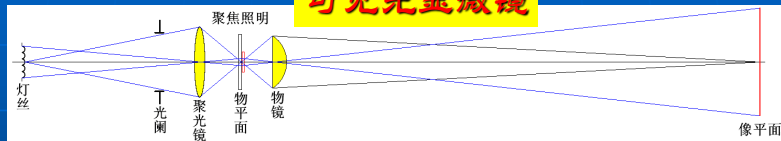
- 波带片将一个凸球面波变换为一个凹球面波。



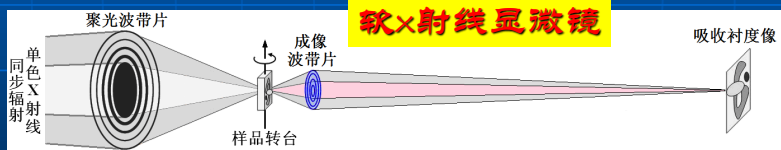
## 纳米CT获得放大投影的条件

- 样品厚度小于透镜焦深

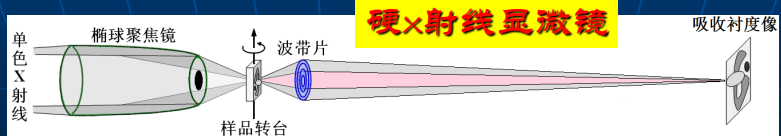
### 可见光显微镜



### 软X射线显微镜



### 硬X射线显微镜

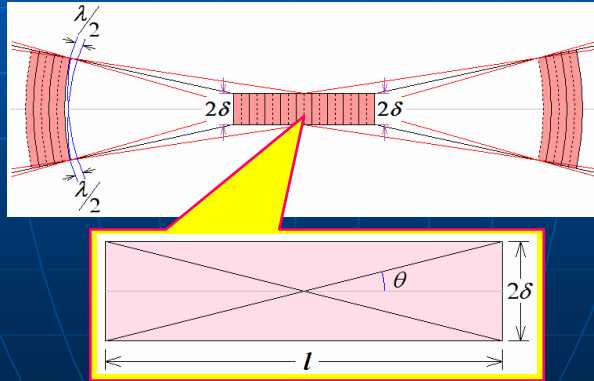


## 透镜焦深产生原理

- 焦点是等光程点，而焦点周围半波光程差决定焦深半径 $\delta$ （爱里斑半径）和焦深长度 $l$ ：

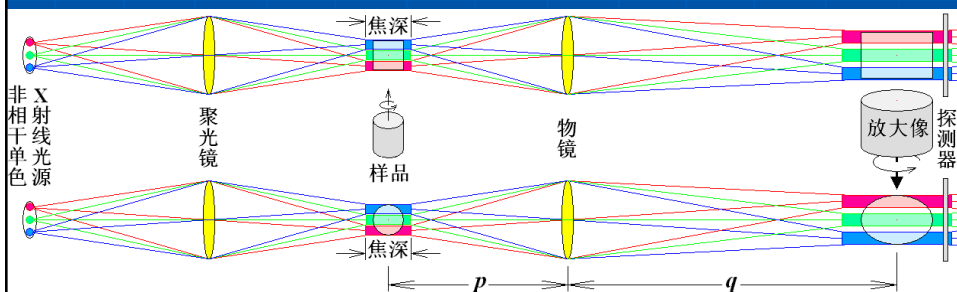
$$\text{爱里斑半径: } \delta = \frac{0.61\lambda}{\theta}$$

$$\text{焦深长度: } l = \frac{2\delta}{\tan \theta} \approx \frac{2\delta}{\sin \theta} \approx \frac{2\delta}{\theta} = \frac{2\delta}{0.61\lambda/\delta} = 3.28 \frac{\delta^2}{\lambda}$$



## 纳米CT获取放大投影的原理

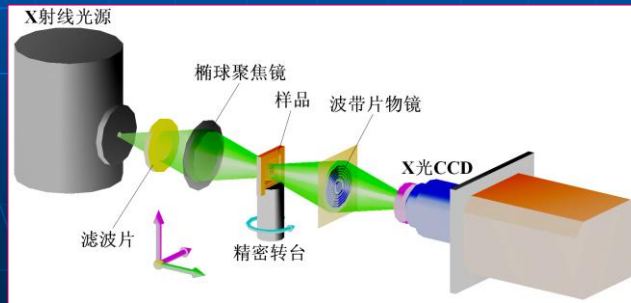
- 多个球面波在焦深处，形成多条焦深平行细光束；
- 当样品直径小于物面焦深，就可以在像面焦深获得样品放大投影像；
- 用CCD记录含有纳米尺寸信息的放大投影像。



- 物镜把物面焦深放大、搬运到像面。

## X射线纳米CT成像过程

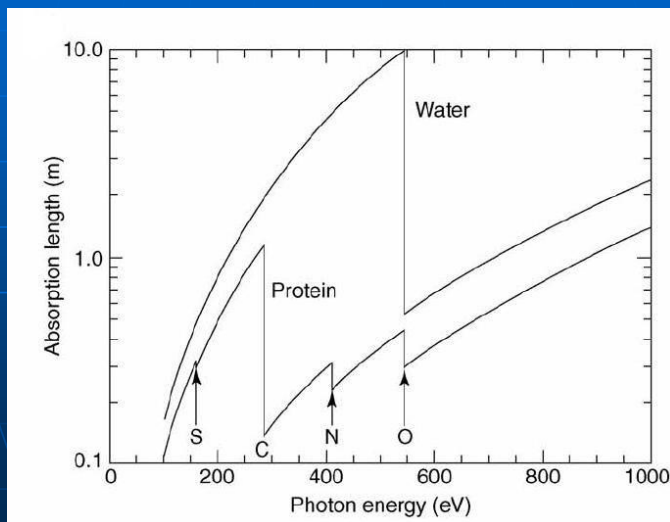
- 利用椭球镜会聚X射线光源发出的X光束，形成空心光锥照射在样品上；
- 波带片将样品放大成像在 X射线CCD上，把纳米尺寸的信息放大为微米尺寸，CCD可以记录放大的样品像；
- 纳米精密转台逐步旋转，CCD逐幅采集放大像，就可进行几十纳米分辨的CT成像。



## “水窗”软X射线纳米CT

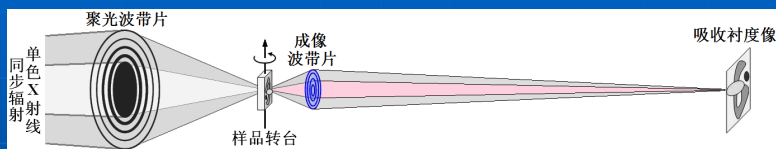
## “水窗”软X射线的性质

- 含义是“水窗”软X射线在水中传播是透明的。

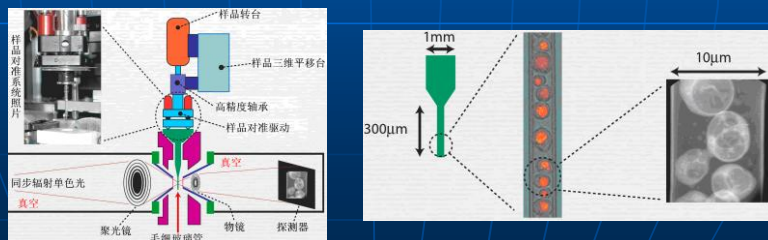


## “水窗”软X射线纳米CT装置

- “水窗”软X射线显微镜光路图



- “水窗”软X射线纳米CT装置结构图



## “水窗”软X射线显微镜成像原理

- 研究水中样品，如水中细胞等；
- 物面上样品的复振幅

$$\mathcal{A}_o(x_o, y_o) = A_o \exp \left[ -\frac{M(x_o, y_o)}{2} + i\Phi(x_o, y_o) \right]$$

- 经过波带片成像，在像面获得样品像的复振幅

$$\mathcal{A}_i(x_i, y_i) = A_i \exp \left[ -\frac{M(x_i, y_i)}{2} + i\Phi(x_i, y_i) \right]$$

- 物面上水的复振幅

$$\mathcal{A}_w(x_w, y_w) = A_o \exp \left[ -\frac{M(x_w, y_w)}{2} + i\Phi(x_w, y_w) \right]$$

- 经过波带片成像，在像面获得水像对应的复振幅

$$\mathcal{A}_w(x_w, y_w) = A_i \exp \left[ -\frac{M(x_w, y_w)}{2} + i\Phi(x_w, y_w) \right]$$

## “水窗”软X射线显微镜成像原理

- 像面样品像的光强为

$$\begin{aligned} I_i(x_i, y_i) &= \mathcal{A}_i(x_i, y_i) \mathcal{A}_i^*(x_i, y_i) \\ &= A_i \exp \left[ -\frac{M(x_i, y_i)}{2} + i\Phi(x_i, y_i) \right] A_i^* \exp \left[ -\frac{M(x_i, y_i)}{2} - i\Phi(x_i, y_i) \right] \\ &= |A_i|^2 \exp[-M(x_i, y_i)] \approx |A_i|^2 [1 - M(x_i, y_i)] \end{aligned}$$

- 像面水像的光强为

$$\begin{aligned} I_w(x_w, y_w) &= \mathcal{A}_w(x_w, y_w) \mathcal{A}_w^*(x_w, y_w) \\ &= A_i \exp \left( -\frac{M_{\text{水}}}{2} + i\Phi_{\text{水}} \right) A_i^* \exp \left( -\frac{M_{\text{水}}}{2} - i\Phi_{\text{水}} \right) \\ &= |A_i|^2 \exp(-M_{\text{水}}) \approx |A_i|^2 (1 - M_{\text{水}}) \end{aligned}$$



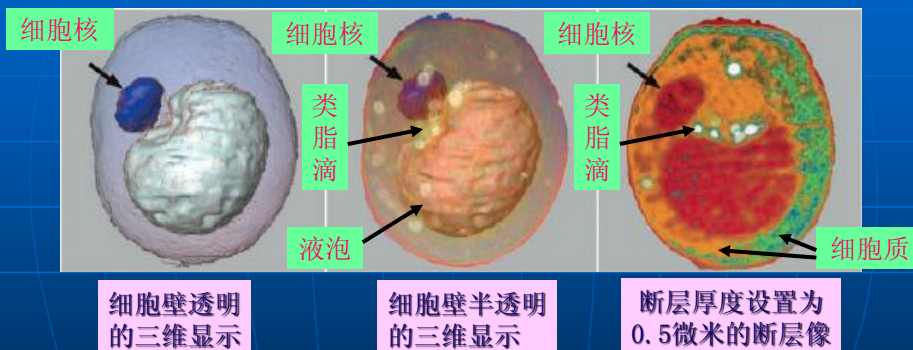
# “水窗”软X射线显微镜成像原理

- 水中样品的吸收衬度

$$C_{\text{吸收}} = \frac{|A_i|^2 (1 - M_{\text{水}}) - |A_i|^2 [1 - M(x_i, y_i)]}{|A_i|^2 (1 - M_{\text{水}}) + |A_i|^2 [1 - M(x_i, y_i)]} \approx \frac{M(x_i, y_i) - M_{\text{水}}}{2}$$

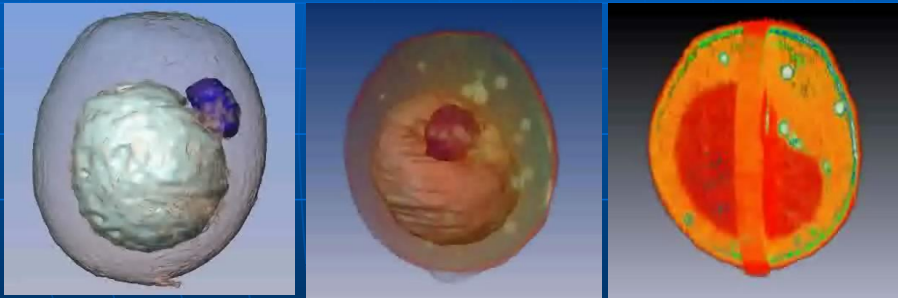
- 蛋白质的吸收比水高一个数量级，“水窗”软X射线显微镜成为对含水细胞成像的最佳工具。

## 2006年美国ALS光源“水窗”软X射线纳米CT酵母细胞三维成像结果

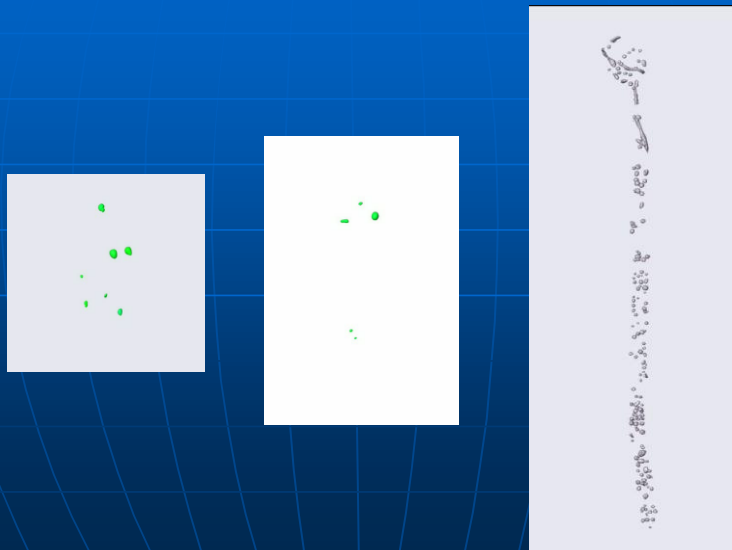


- 酵母细胞直径 5 微米，CT空间分辨率为60纳米。
- 发酵的酵母细胞不但是基因、分子和生物化学分析有价值的模型系统，而且还是蛋白新陈代谢研究的重要对象。

**2006年美国ALS光源“水窗”软X射线  
纳米CT酵母细胞三维成像结果**



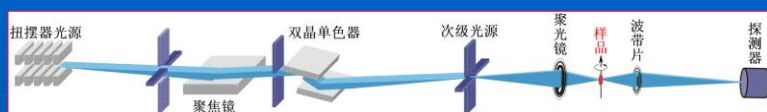
**2010年美国ALS光源“水窗”软X射线  
纳米CT白色念珠菌细胞三维成像结果**



# 硬X射线纳米CT

## 中国现有三台同步辐射纳米CT

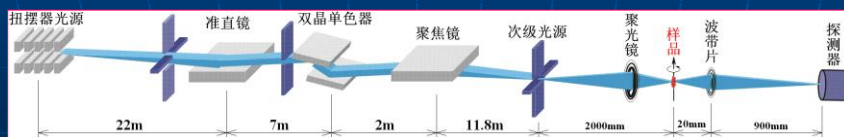
- 台湾、合肥和北京先后建成了同步辐射纳米分辨CT



台湾新竹第三代同步辐射装置纳米分辨CT



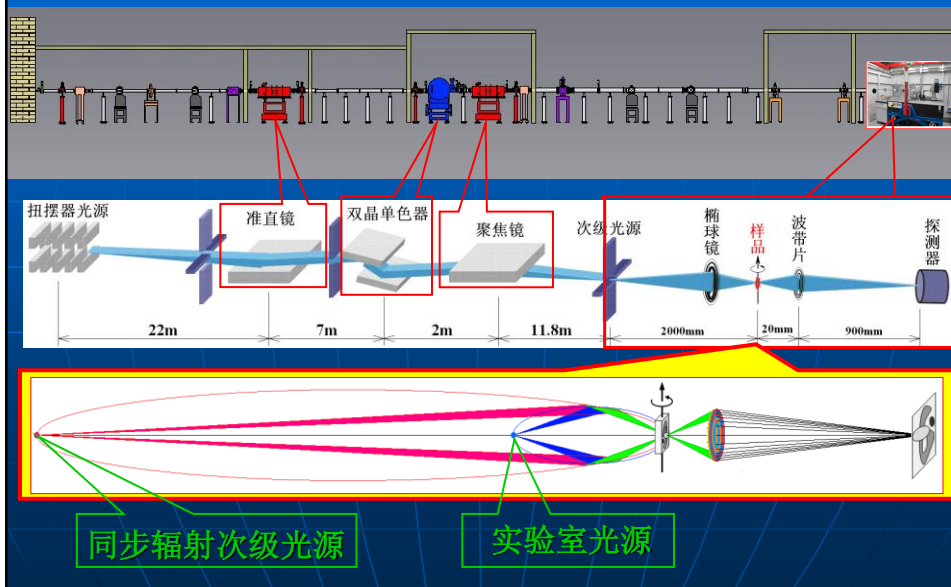
合肥第二代同步辐射装置纳米分辨CT



北京第一代同步辐射装置纳米分辨CT

# 北京同步辐射纳米成像光束线站

## (1) 纳米成像光束线和实验站



## (2) 双平晶单色器

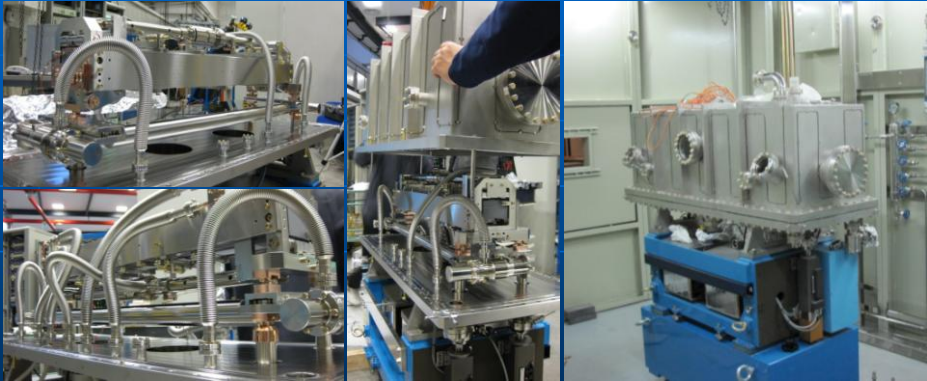


## 习近平视察纳米成像光束线





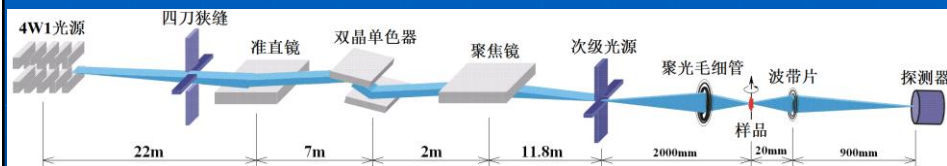
### (3) 准直镜和聚焦镜



### (4) 纳米CT设备

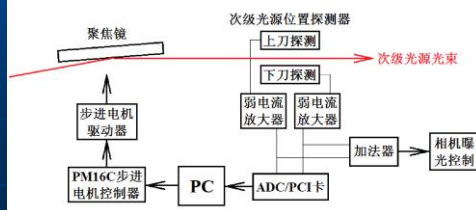
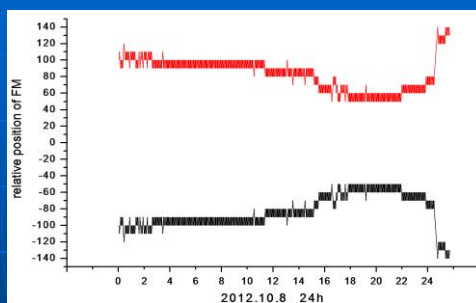


## (5) 调试纳米成像光束线的关键

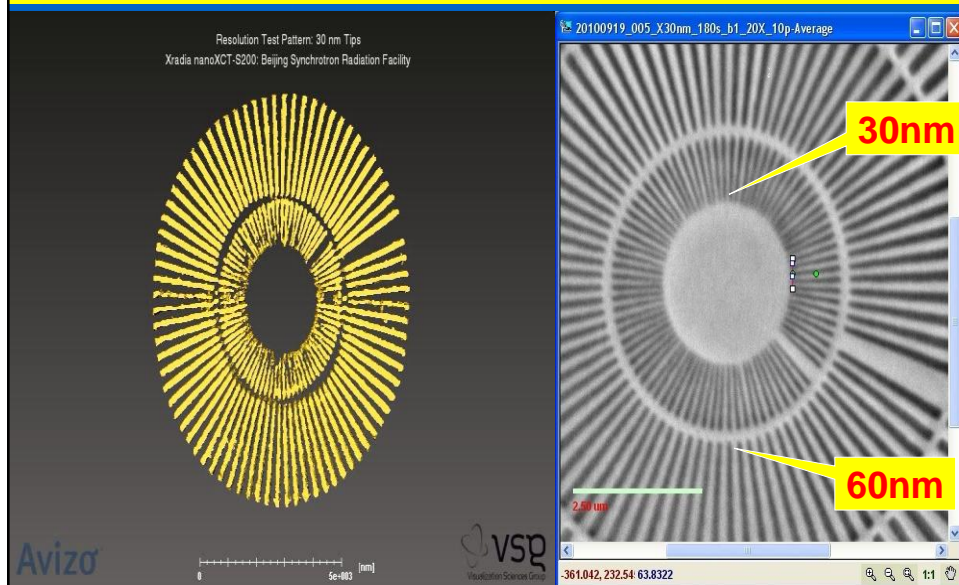


- 关键在于精密调整准直镜、双晶单色器和聚焦镜在垂直方向的相对位置，确保准直镜和聚焦镜在垂直方向保证波带片获得最大数值孔径，达到30纳米分辨的要求。

## (6) 光束位置校正系统



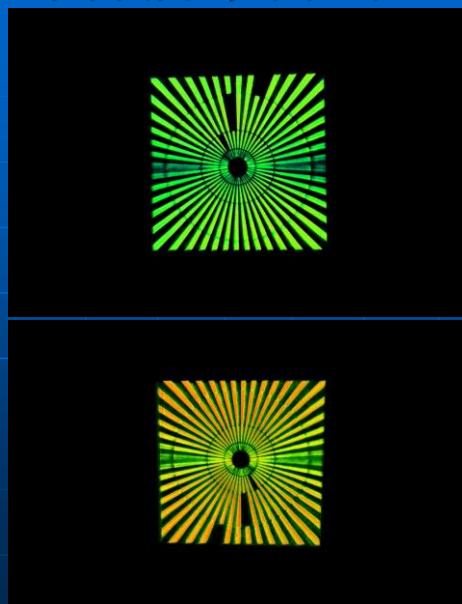
北京同步辐射纳米成像分辨率优于30nm，达到国际领先水平，开创了第一代同步辐射装置实现纳米成像的先例



## 实验室光源三维分辨率测试

钼靶光源5.4keV  
50纳米分辨率板

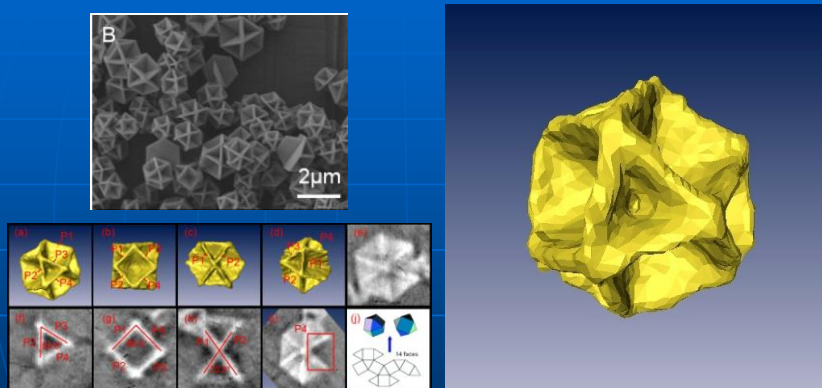
铜靶光源8keV  
50纳米分辨率板





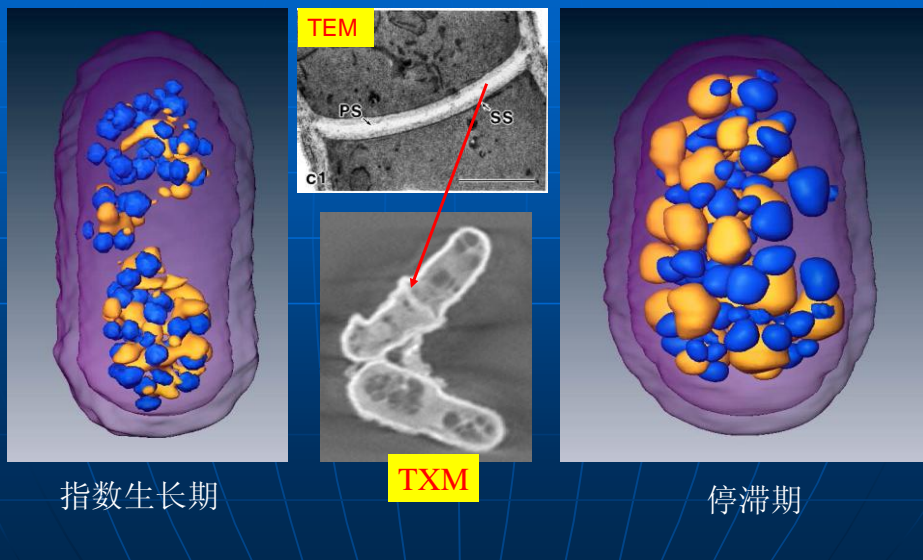
# 纳米成像应用成果

## (1) 合肥同步辐射纳米CT研究成果



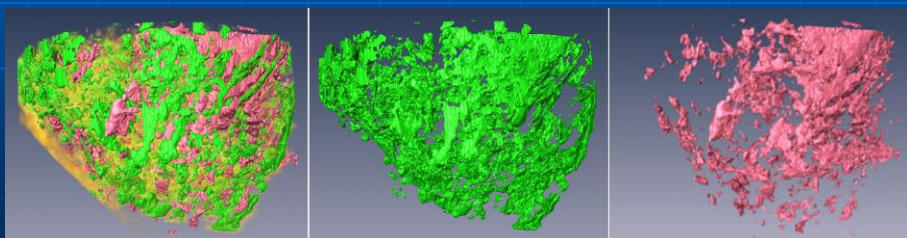
- 硫化铜 ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) 十四面晶体三维成像，被Nature China作为来自中国大陆的研究亮点工作予以报道。
- APL, 92, 233104 (2008) .

## (2) 酵母细胞生长过程内部形貌变化研究



## (3) 纳米成像在环境科学中的应用

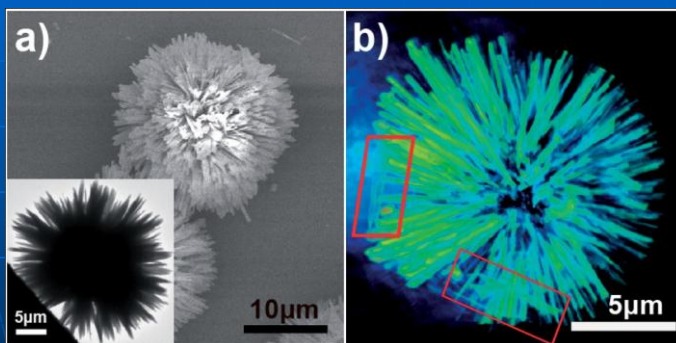
- 土壤中的碳是大气中的两倍。中国科学院大学崔骁勇课题组与本课题组合作，利用纳米CT获得了土壤微团聚体不同成分的三维结构分布。微团聚体外围是大空隙，微团聚体内部存在小空隙，部分矿质颗粒通过有机质粘合在一起，有机碳非均匀地包裹在矿质颗粒团聚体里。



左为土壤三维结构，中为有机质三维结构，右为矿物质三维结构

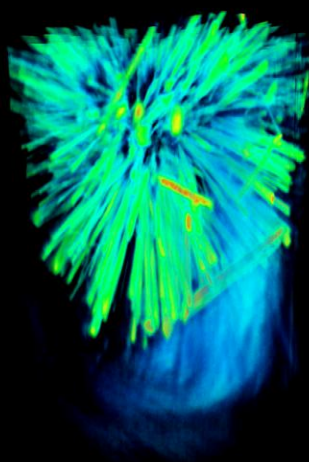
## (4) 纳米成像在催化剂领域的应用

- 中科院化学所宋卫国课题组与本课题合作，研究硅酸锌纳米棒自组装催化剂颗粒的三维结构



纳米成像可以看到纳米棒的自组装行为及内部结构，其中纳米棒的无序结构是电镜看不到的。

Qu et al., J. Mater. Chem., 2012, 22, 3562–356 IF: 5.968

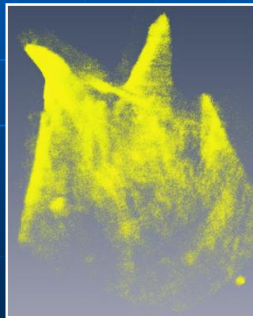


硅  
酸  
锌  
催  
化  
剂  
三  
维  
成  
像

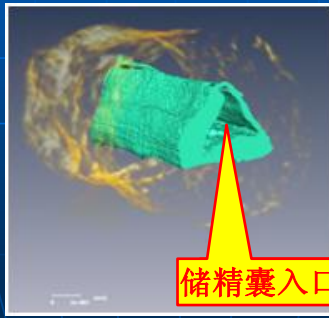
## (5) 纳米成像在昆虫进化研究的应用

- 中科院动物所周红章课题组与本课题组合作，对前角隐翅虫整个交配过程进行了观察，研究了精子传递过程。观察到了雌虫和雄虫交配后，在储精囊管中存在的大量的精子，为形成完整和系统的前角隐翅虫交配进化理论奠定了基础。

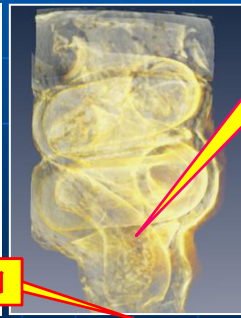
Zhang et al., Chinese Physics B. accepted. IF: 1.376



雄虫鞭毛顶端三维结构



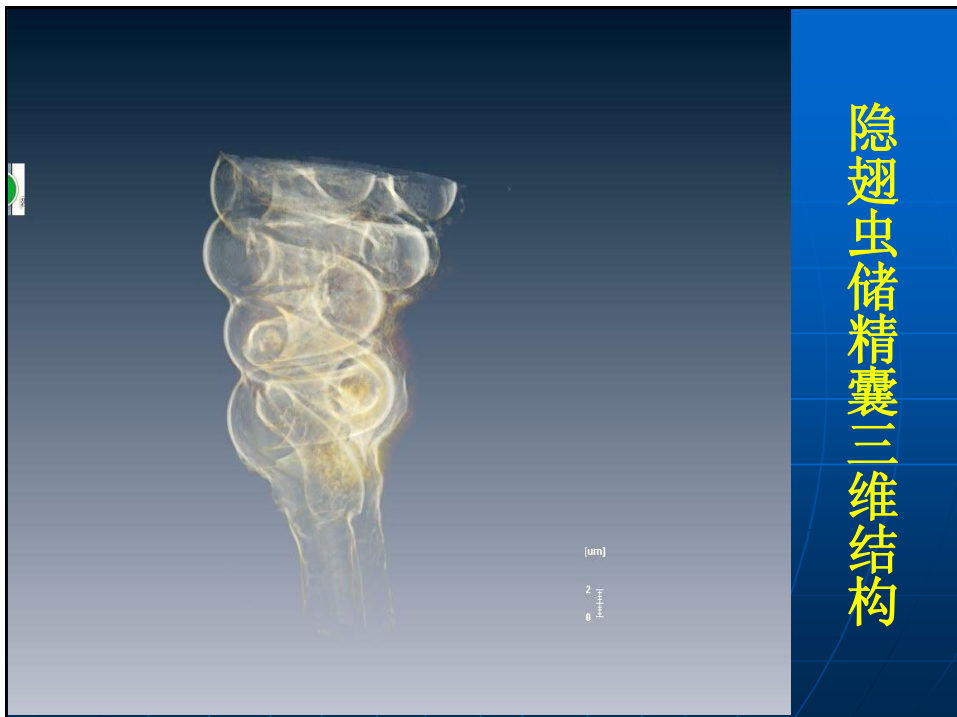
雌虫储精囊管三维结构



雌虫储精囊三维结构

储精囊

储精囊入口

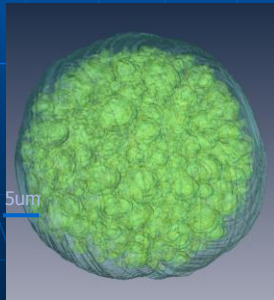


隐翅虫储精囊三维结构

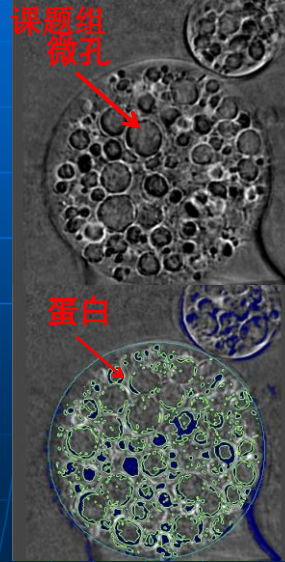
## (6) 纳米成像在生物医学中的应用

高分子材料PLGA微球(聚乳酸-羟基乙酸共聚物)  
三维重建

- 微球内部含孔隙，并附着有牛血清蛋白，纳米CT可准确探明蛋白在微球内部的分布及体积比等，阐明微球携带蛋白的能力。经计算此样品内蛋白含量为20.79%。

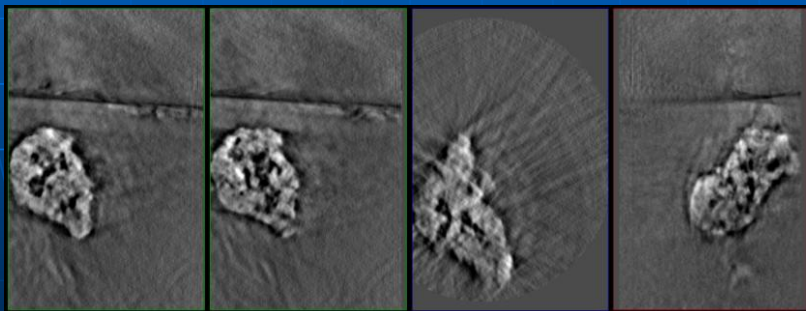


中山大学药学院，张永明  
课题组



## (7) 纳米成像在宇宙学中的应用研究

- 意大利INFN Augusto Marcelli 课题组与本课题合作，试图确定星际尘埃内部的结构和成分，搞清楚星际尘埃的来源和分布。

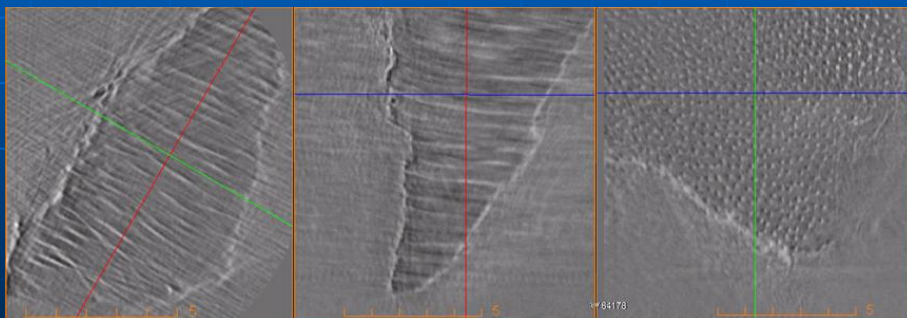


一、二图为X-Z断层像，三图为X-Y断层像，四图为Y-Z断层像



## (8) 纳米成像在仿生学中的应用

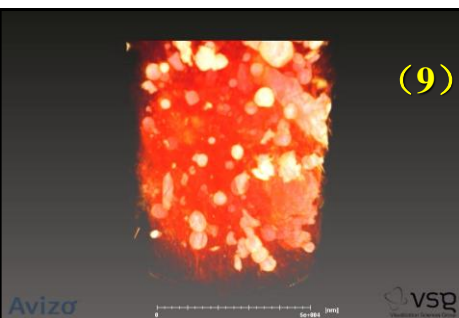
- 北京航空航天大学江雷课题组和本课题合作，研究龙虾壳结构。曾有理论模型指出，龙虾壳逐层旋转的致密层状结构可能是虾壳的高强度的原因，纳米三维成像为这个理论模型提供了证据。



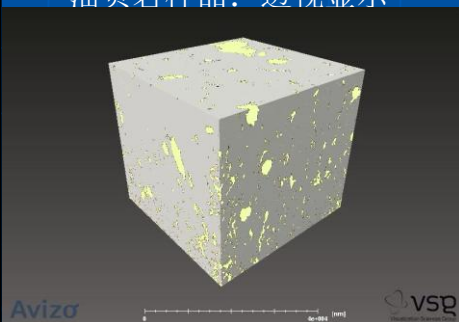
左为X-Z断层结构，中为X-Y断层结构，右为Y-Z断层结构

## (9) 纳米成像在能源科学的应用

- 油页岩是未来的替代能源之一。
- 本课题组对美国的油页岩样品进行了纳米分辨三维成像。
- 油、气页岩中储油、储气孔结构在微米和纳米量级，纳米三维成像可以估算出储油、储气孔体积在油页岩中的比例，清楚显示出孔的形状。这对评估油、气储量，提高开采效率，具有重要意义。



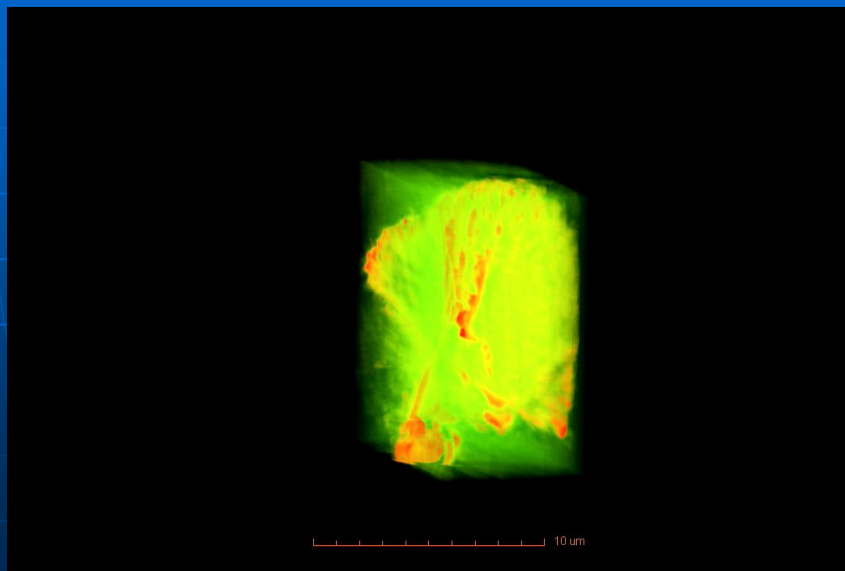
油页岩样品：透视显示



油页岩样品：成分分

| 成分    | 体积 (nm <sup>3</sup> ) | 体积比例   |
|-------|-----------------------|--------|
| 储油孔   | 1.58E+12              | 3.20%  |
| 页岩    | 4.32E+13              | 87.68% |
| 矿物质颗粒 | 4.49E+12              | 9.12%  |

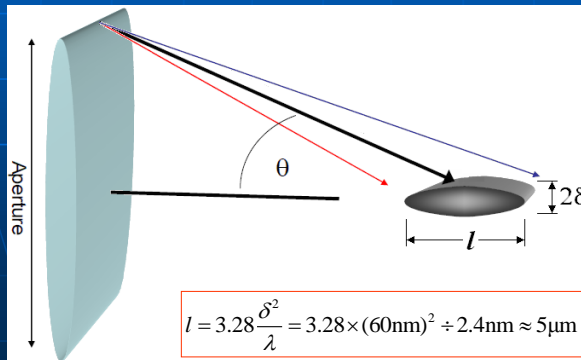
(10) 本课题组对物理所的磷酸铁锂电池电极样品进行了  
纳米分辨三维成像。



**X射线纳米CT面临的问题**

## “水窗”软 X 射线显微镜

- 优势：“水窗”软 X 射线的吸收衬度高；
- 不足：“水窗”软 X 射线的波长长，焦深短，利用焦深对直径 5 微米以上的细胞进行三维成像时，出现困难，而哺乳动物的细胞，直径一般在 10 微米左右。



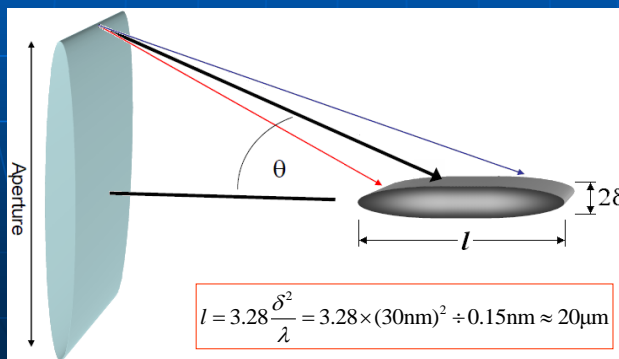
$$\delta \cdot \theta = 0.61\lambda$$

$$\frac{2\delta}{l} = \tan \theta \approx \theta$$

$$l = 3.28 \frac{\delta^2}{\lambda}$$

## 硬 X 射线显微镜

- 优势：硬 X 射线波长是“水窗”软 X 射线波长的十分之一到二十分之一，可以获得更大的焦深，具有对更大细胞进行分辨率更高的三维成像潜力。
- 不足：硬 X 射线泽尼克相位衬度定量化问题没有解决。



$$\delta \cdot \theta = 0.61\lambda$$

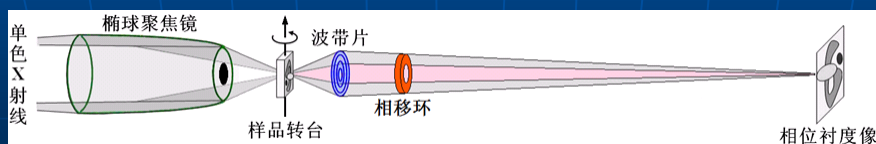
$$\frac{2\delta}{l} = \tan \theta \approx \theta$$

$$l = 3.28 \frac{\delta^2}{\lambda}$$



## 泽尼克相位衬度定量化的问题

- （一）对于吸收和相位共存的样品，获得的图像是吸收衬度和相位衬度共同作用的结果，如何分离吸收贡献和和相位贡献？
- （二）对于大样品，如何解决相位周期性带来的两个相位对应一个衬度的问题？

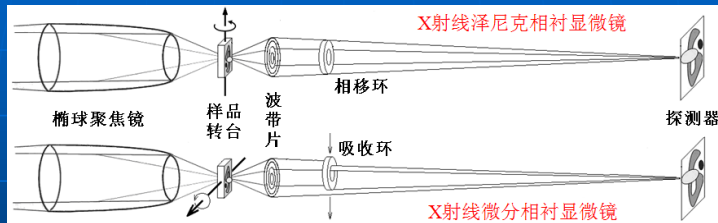


## 两个值得关注的研究方向

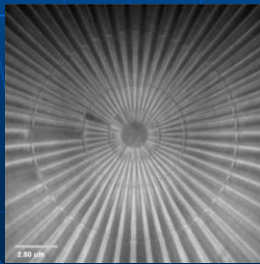
- 方向一：合肥光源正在开辟中能 X 射线纳米CT研究方向，试图同时实现大焦深和高衬度；
- 方向二：在硬 X 射线显微镜中引入微分相位衬度成像机制，解决相位衬度定量化和相位周期性问题。

# X射线微分相衬显微镜

- 北京同步辐射装置最近在相位衬度成像定量化研究中取得进展；



吸收像



折射像



请各位专家批评指正