



上海科技大学
ShanghaiTech University

扫描电子显微成像原理

Principles of Scanning Electron Microscope Imaging

马延航

物质学院8-414

mayh2@shanghaitech.edu.cn



立志成才 报国裕民

➤ Introduction



物质学院电镜中心 Centre for High-resolution Electron Microscopy

TEM:

稳定运行中的电镜:



JEM ARM- 300F
(GRAND-ARM)



JEM-2100PLUS



JEM-1400PLUS

SEM:



JSM-7800F



JSM-6010Plus/LA



Phenom ProX

2019年增加的电镜:



JEM ARM-
300F (in-situ)



JIB-4700F



JAMP-9510F



IT500-HR



JEM-F200

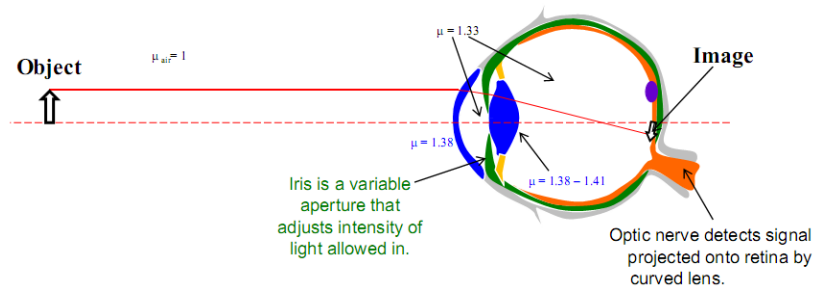
➤ Introduction

显微镜 Microscope

- 显微镜：将微小物体放大成为人肉眼所能看到的仪器。

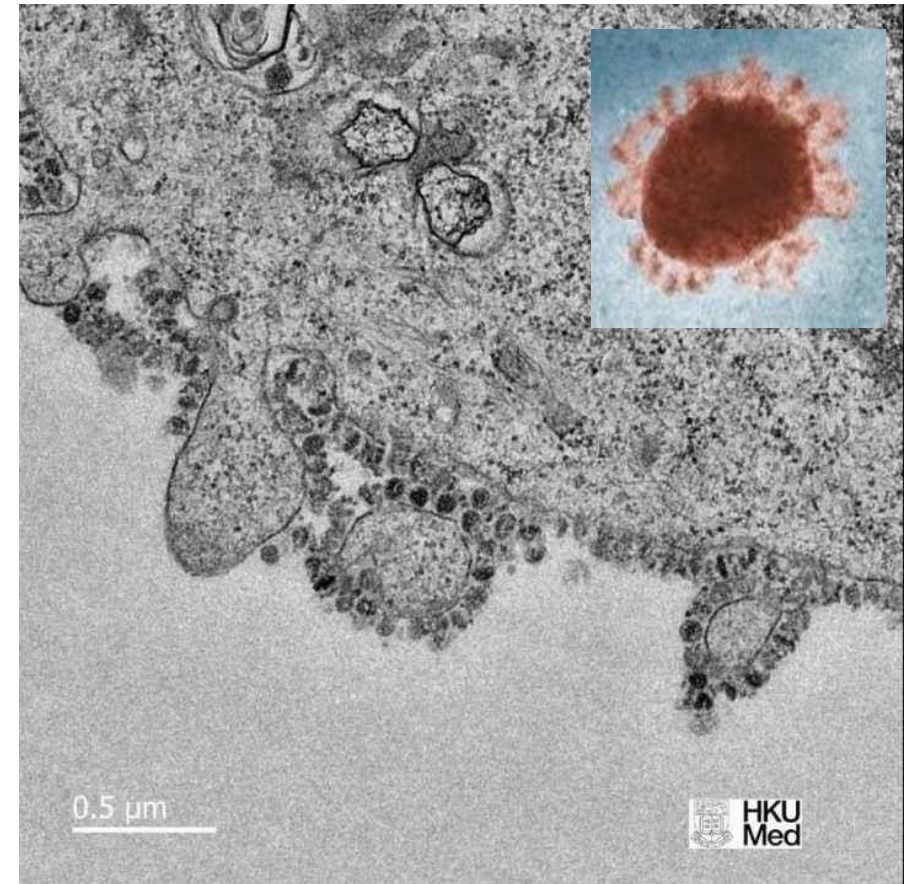


- 分辨率：分辨率是指两个物体刚好能分辨开的距离。



~0.1 mm @ 25 cm 距离

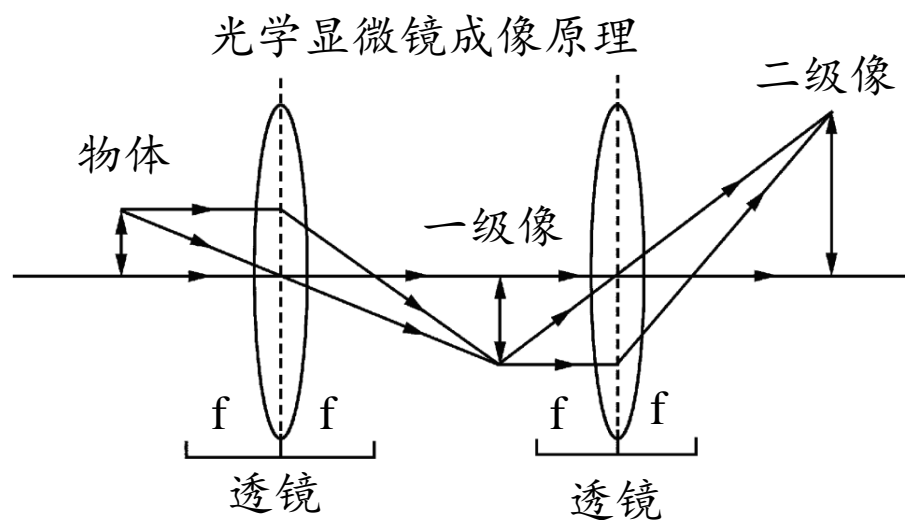
COVID-2019



From HKU MED

➤ Introduction

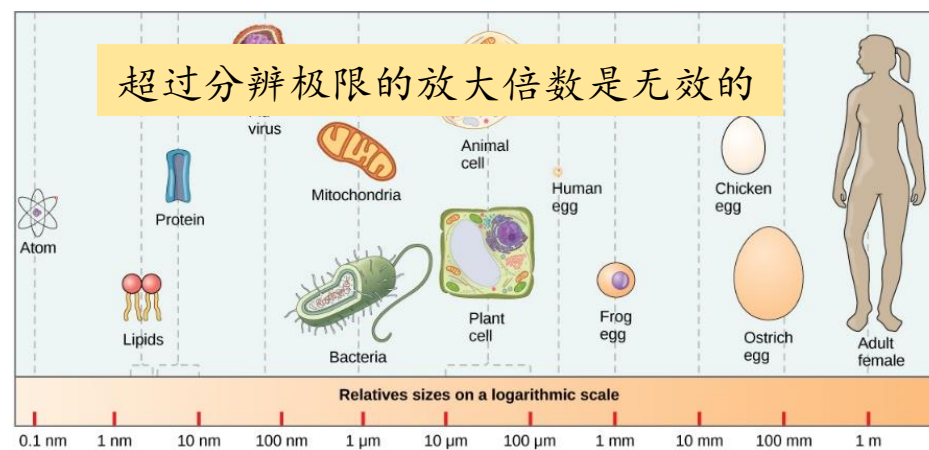
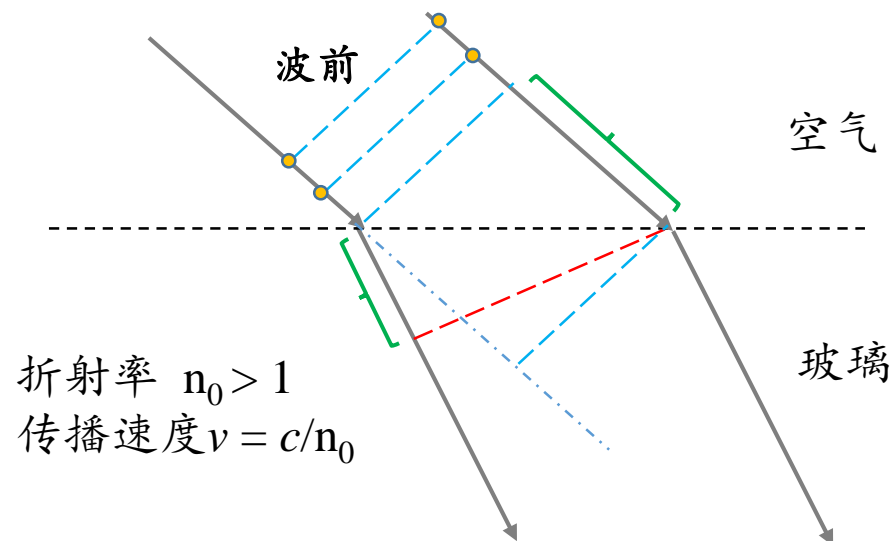
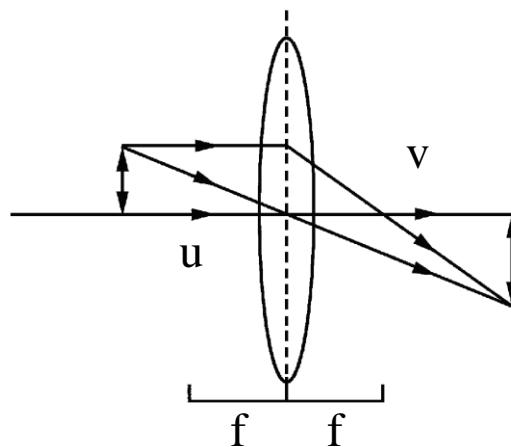
显微镜 Microscope



Magnification
放大倍数

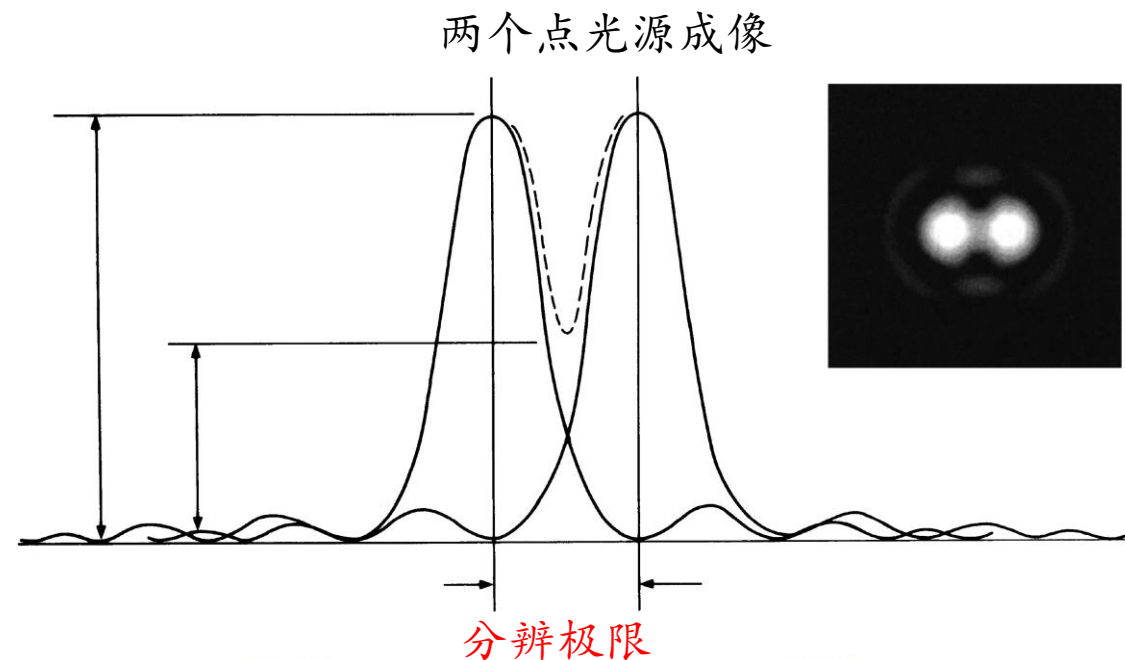
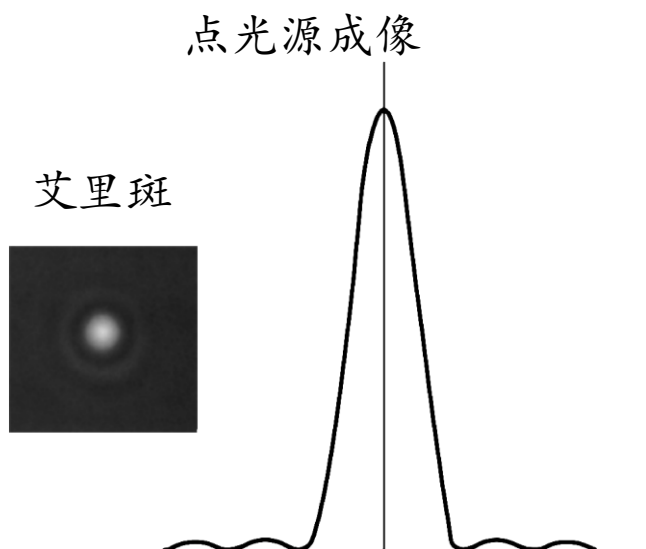
$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad M = \frac{v - f}{f}$$

放大的目的是让人看到微小的物体



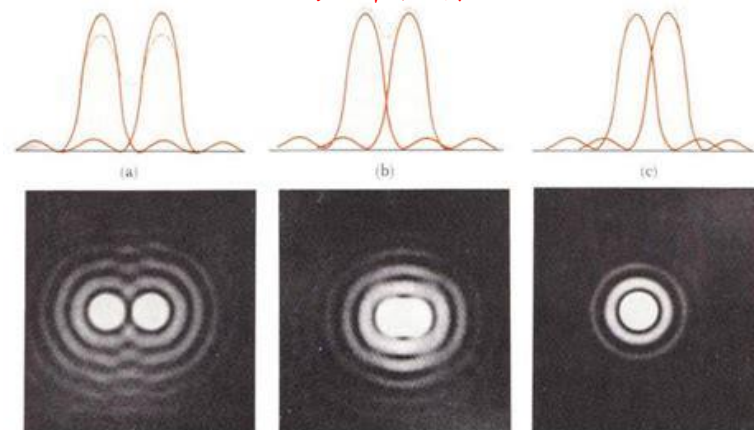
➤ Introduction

显微镜 Microscope



$$\text{分辨率 } R = d/2 = \frac{0.61\lambda}{n\sin\alpha} = \frac{0.61\lambda}{NA}$$

λ : 光波波长; n : 折射率; α : 孔径半角;
NA: 透镜数值孔径。



➤ Introduction

2014 年的诺贝尔化学奖颁发给了“超分辨荧光显微技术”。



Photo: A.
Mahmoud

Eric Betzig



Photo: A.
Mahmoud

Stefan W. Hell

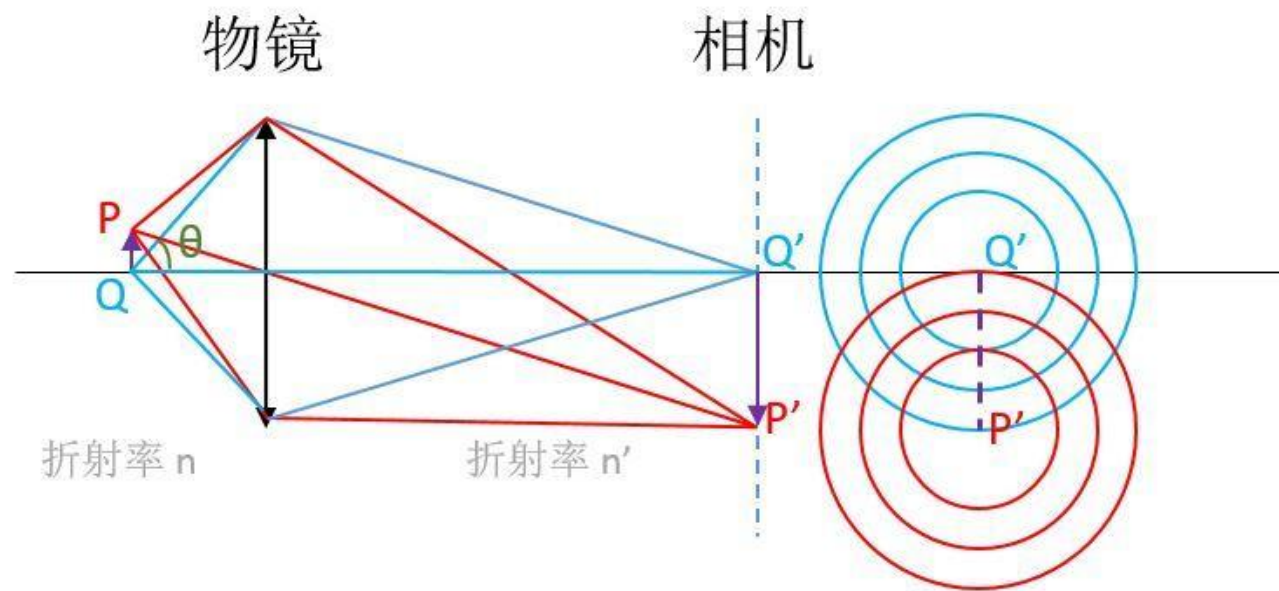


Photo: A.
Mahmoud

**William E.
Moerner**

“真正”突破衍射极限!

➤ Introduction



Superresolution Imaging of Microtubules with STORM

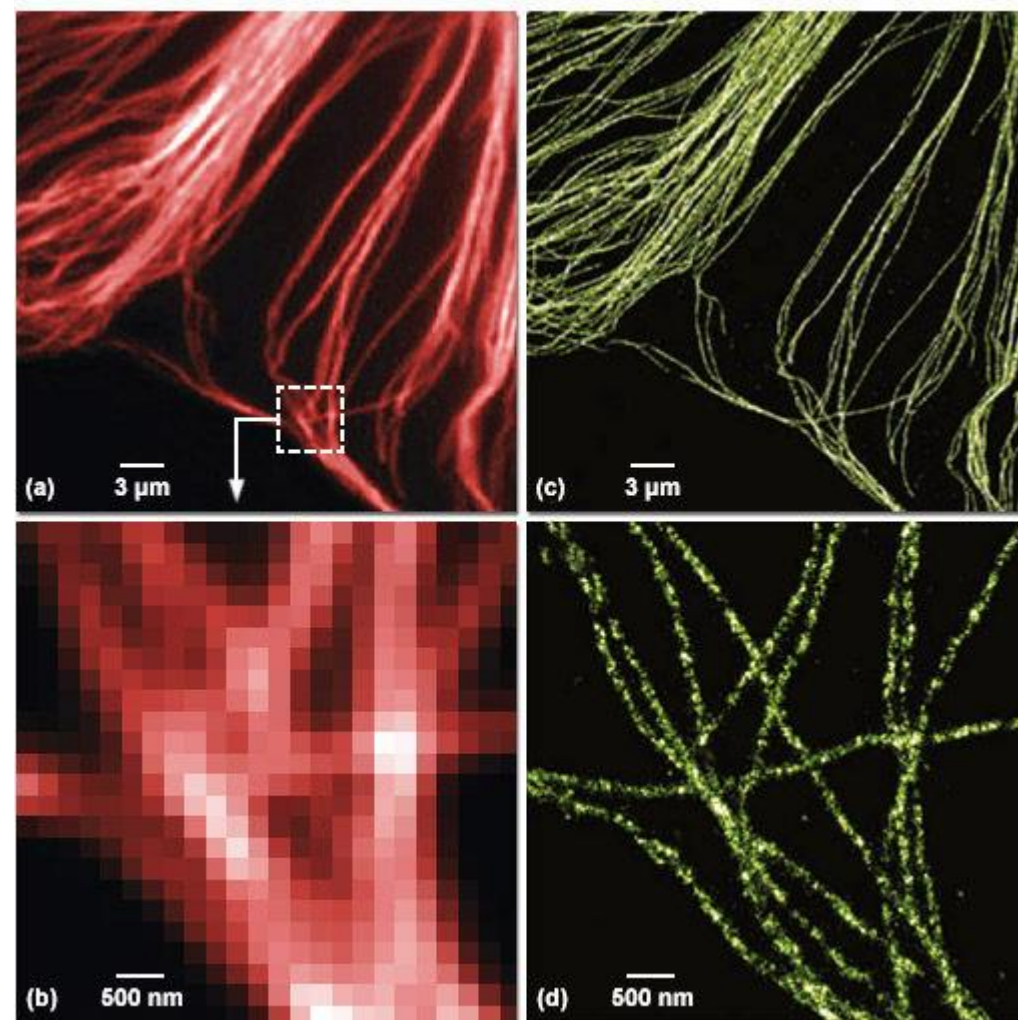
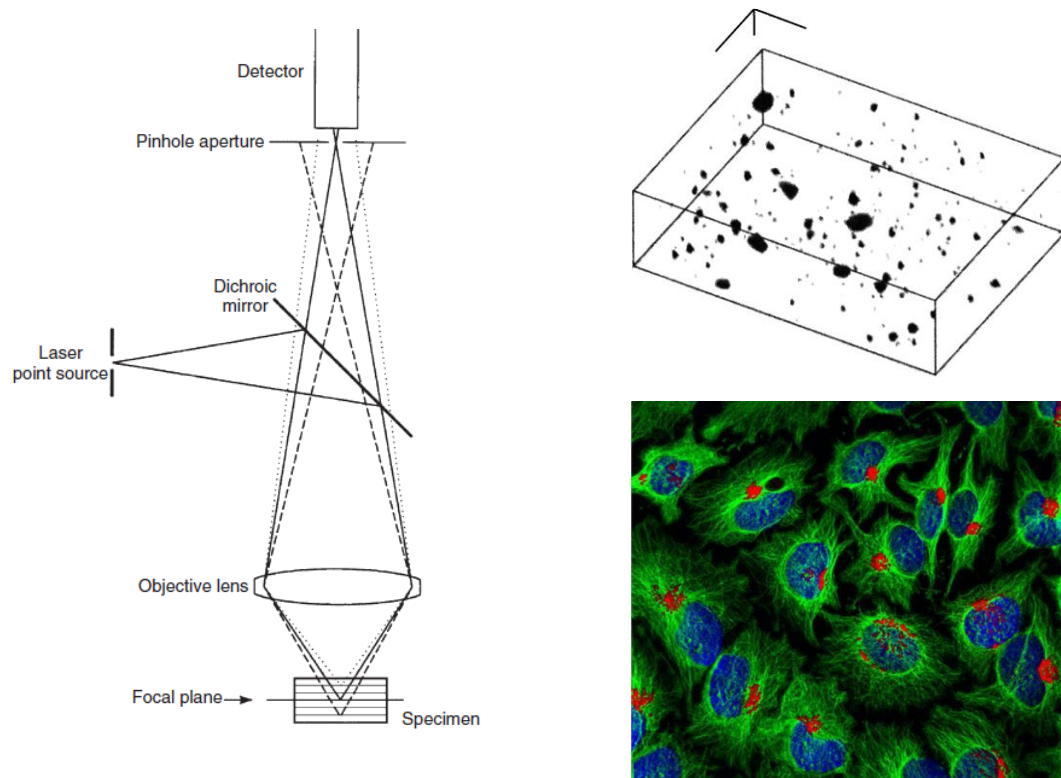


Figure 4

➤ Introduction

Confocal Microscopy 共聚焦显微镜



Fluorescence Microscopy 荧光显微镜



➤ 第一章：电子光学基础

- I put this out as a challenge: Is there no way to make the electron microscope more powerful?

--Richard Feynman, 1959



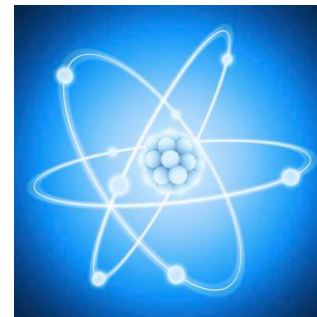
理查德·菲利普斯·费曼
美国理论物理学家，量子电动力学创始人之一，纳米技术之父。

➤ 第一章：电子光学基础

1.1 电子 Electron

- 带负电的粒子；
- 质量： 9.1×10^{-31} kg, 电量： 1.6×10^{-19} C.
- 运动的电子具有波粒二象性，

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



h : 6.626×10^{-34} J.s; m : 运动电子的质量; v : 电子速度。

当电子运动速度接近光速时，需要考虑相对论修正，

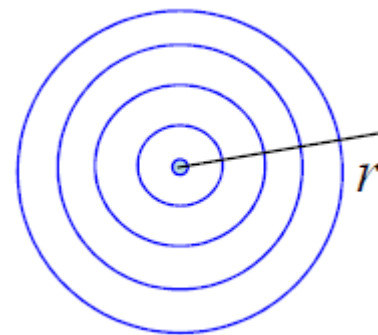
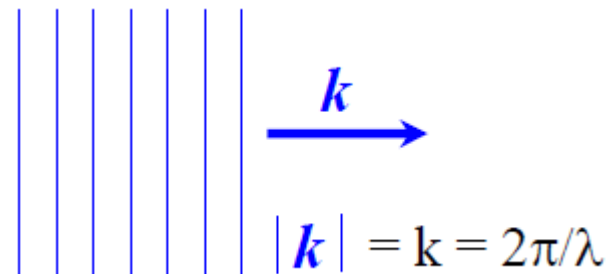
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV(1 + \frac{eV}{2m_0 c^2})}} = \frac{12.25}{\sqrt{V(1 + 10^{-6}V)}}$$

电压/kV	100	200	300	1000
波长/Å	0.0370	0.0251	0.0197	0.0087

➤ 第一章：电子光学基础

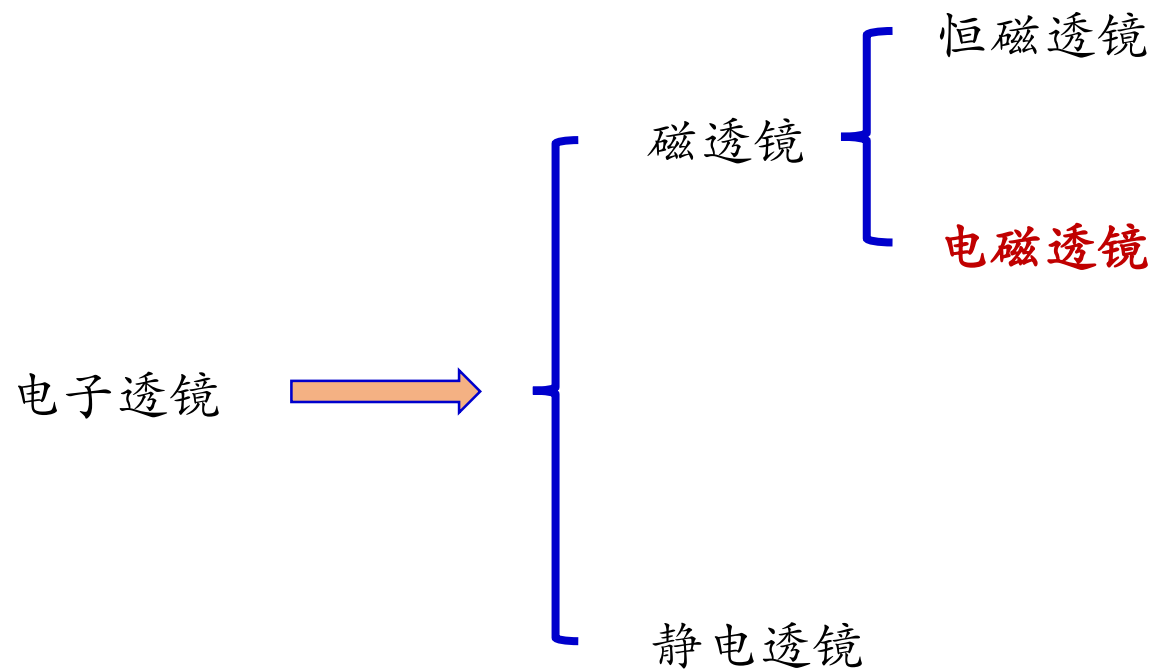
1.1 电子波

- 波：在介质中周期性波动；
- In physics, a wave is a disturbance that transfers energy through matter or space.
 - 时间：行波和驻波
 - 方向：横波和纵波。
- 平面波 Plane wave: $Ae^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$
- 球面波 Spherical wave: $\frac{Ae^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}}{|\mathbf{r}|}$



➤ 第一章：电子光学基础

电子透镜：能使电子束聚焦的装置

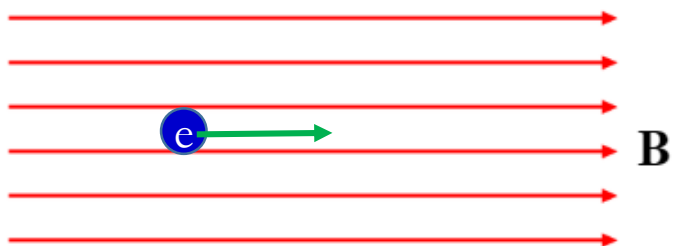


电子束经过轴对称的非均匀磁场、电场，会产生会聚或发散，从而达到成像目的

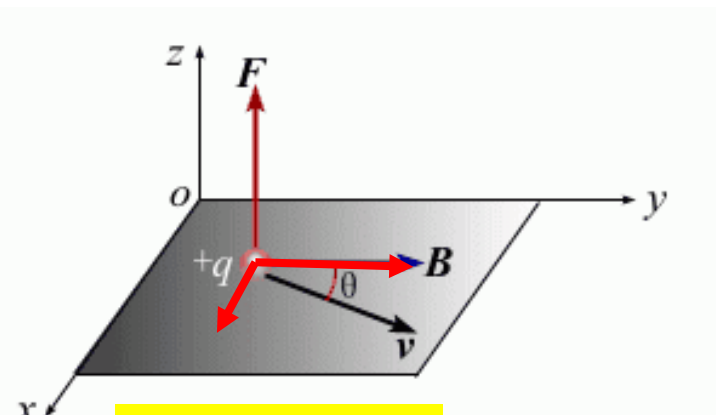
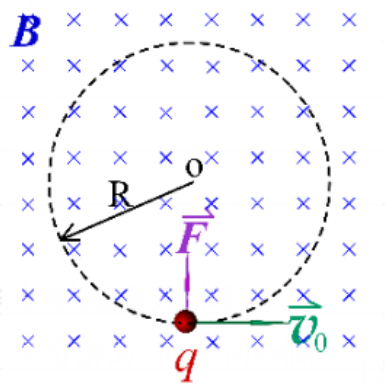
➤ 第一章：电子光学基础

1.2 电磁透镜

运动方向平行磁场



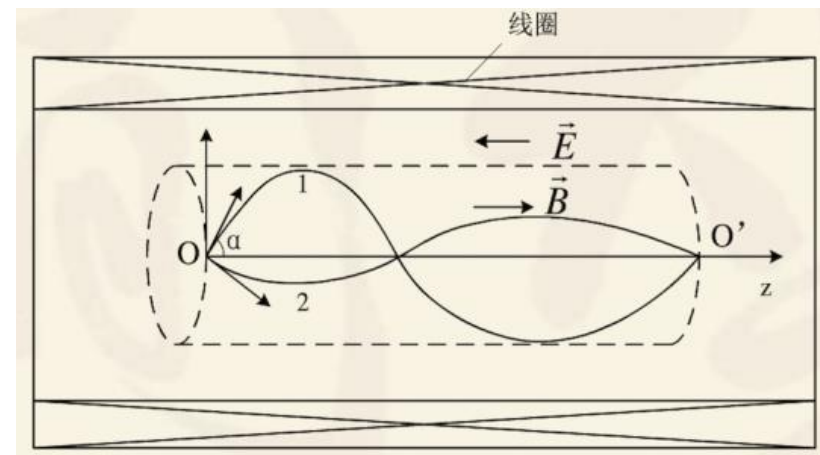
运动方向垂直磁场



$$F = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



均匀磁场——长磁透镜



$$F = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B});$$

$$\text{电子圆周运动半径: } r = \frac{mv}{eB} = \frac{mv}{eB} \sin \alpha$$

$$\text{电子旋转一周所需时间: } \tau = \frac{2\pi r}{v_r} = \frac{2\pi m}{eB}$$

$$\text{在}\tau\text{时间内前进距离: } v_z \cdot \tau = \frac{2\pi m}{eB} v \cos \alpha$$

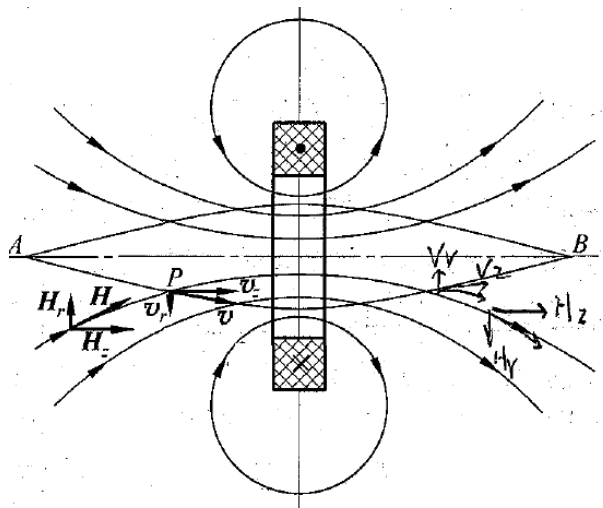
➤ 第一章：电子光学基础

1.2 电磁透镜

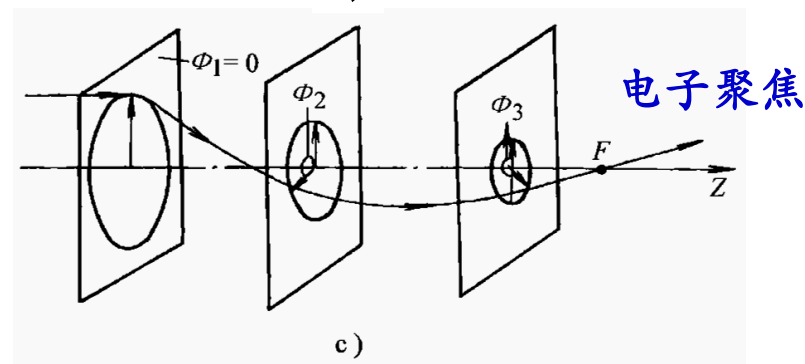
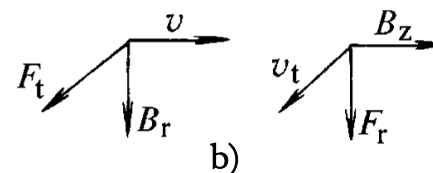
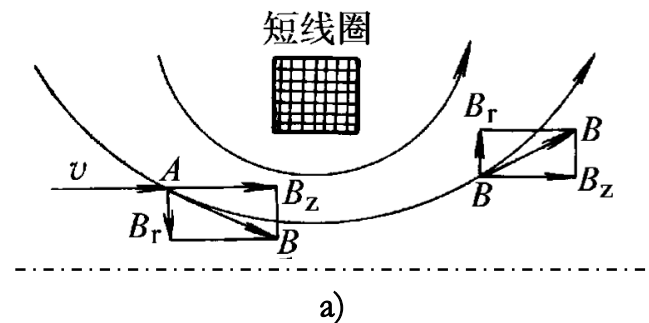
短磁透镜

磁场分量

$$B_z(r, z) = B(z)$$
$$B_r(r, z) = -\frac{r}{2} B'(z)$$



- 1) 电子绕轴旋转
- 2) 电子折向轴聚焦

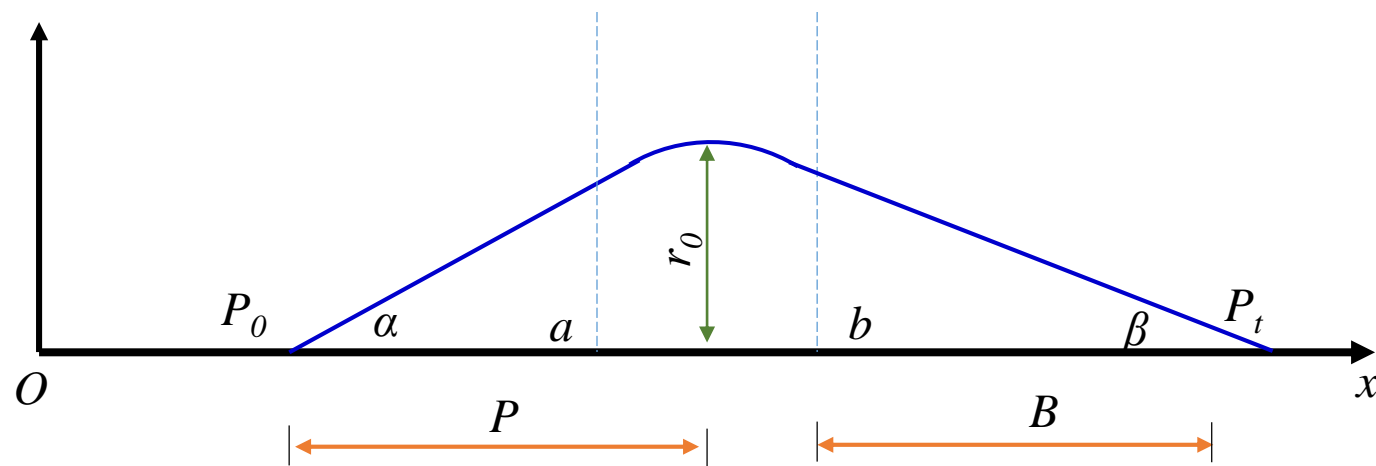


电子聚焦

电子显微镜中利用磁场使电子波聚焦成像的装置称电磁透镜

➤ 第一章：电子光学基础

1.2 电磁透镜



圆周运动；
切向前行；
向轴靠近。

$$\frac{1}{P} + \frac{1}{B} = \frac{1}{f} \quad \text{Magnification: } M = \frac{B}{P} = \frac{B}{f} - 1$$

$$\frac{1}{f} = \frac{3\pi^2}{16} \frac{e}{mVR} I^2$$

I: 电流; V: 加速电压; R: 线圈半径

1. Convex lens;
2. Focus is proportion to current;
3. Focus is related to the electron energy.

➤ 第一章：电子光学基础

1.2 电磁透镜

轴对称静磁场是电子光学中应用最广泛的场，绝大多数电子成象透镜都是使用轴对称静磁场，如电子显微镜中的成像透镜。如图所示，线包通以恒稳电流 I 后，就会在线包内部空间，形成相对于 z 轴具有旋转对称性的轴对称静磁场（线包的轴线通过 z 轴）。

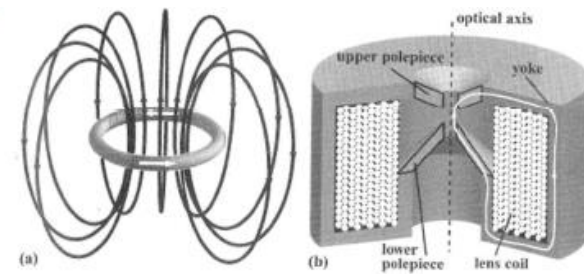
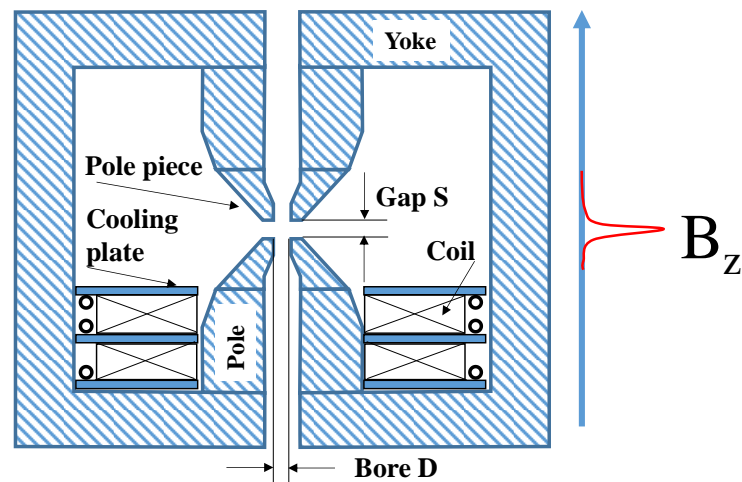
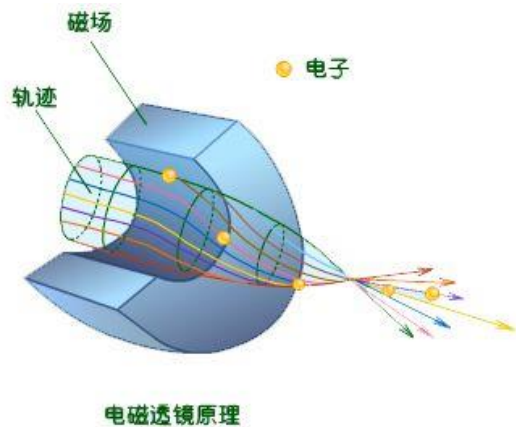
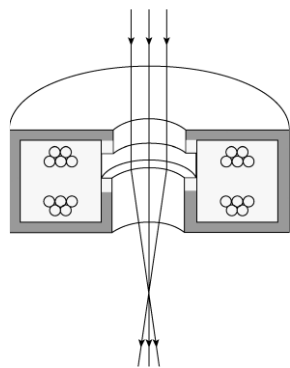


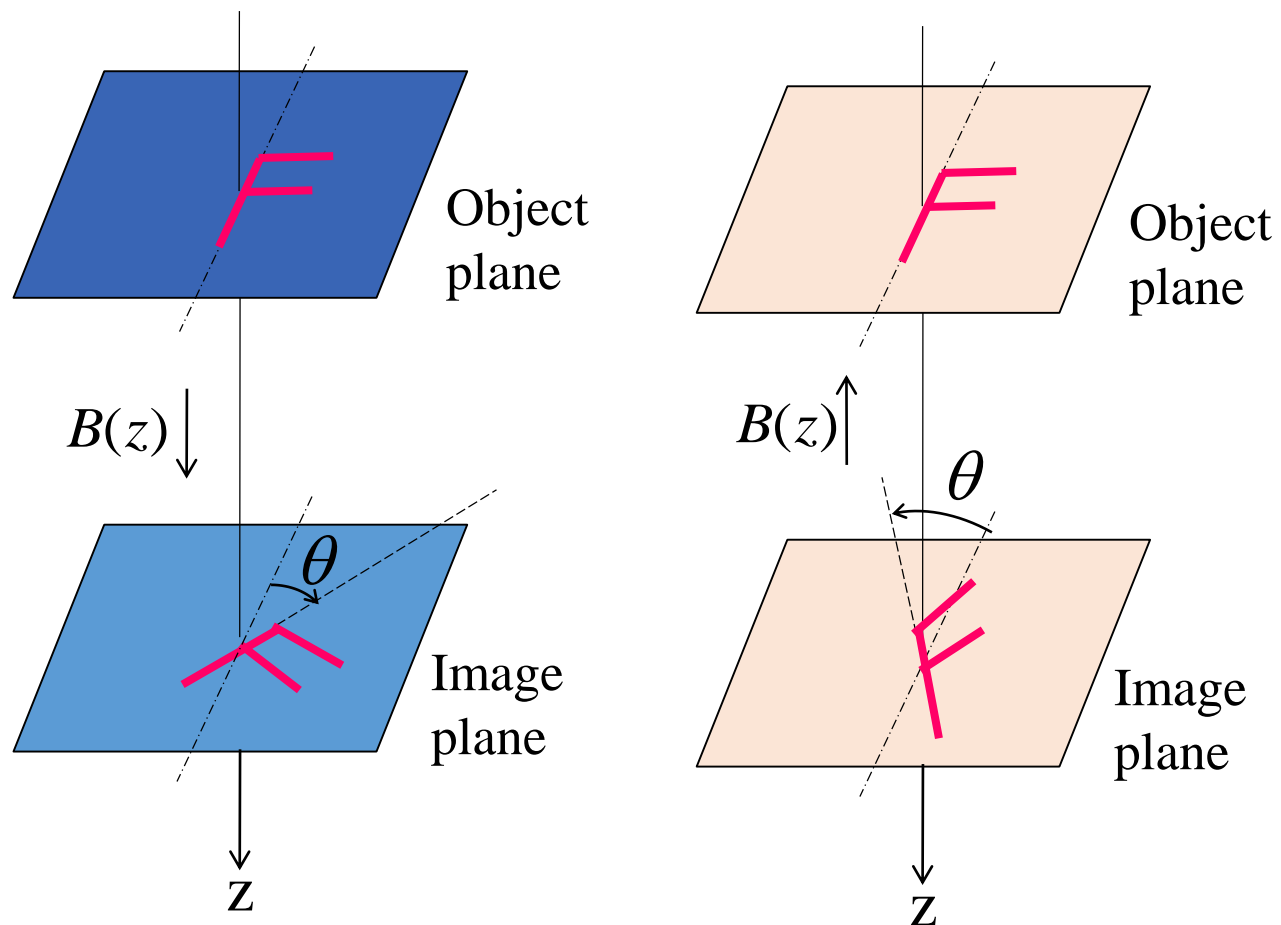
Fig. 3.3. (a) Schematic representation of the magnetic field lines around a circular current-carrying coil; (b) a magnetic yoke concentrates the field lines near the center of the coil and provides a particular geometry to the field.



Polepiece: 2-10 mm

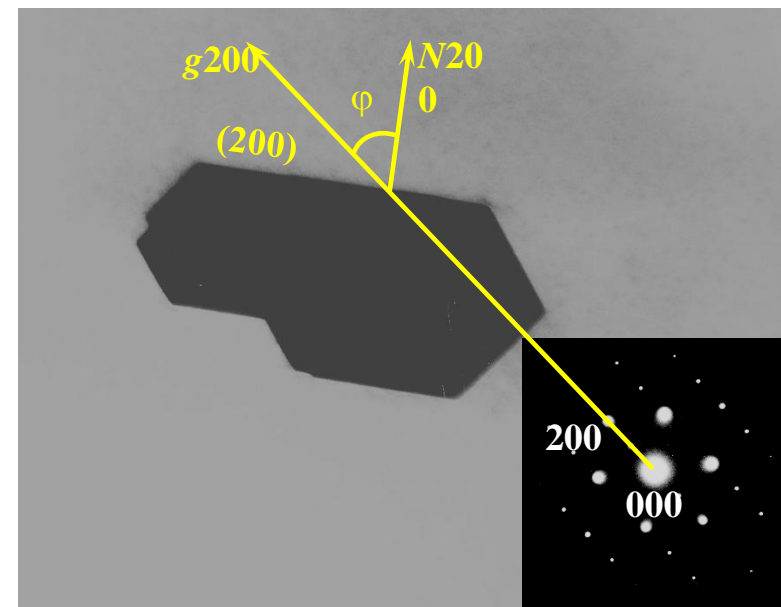
➤ 第一章：电子光学基础

1.2 电磁透镜



Rotation of images formed by electron microscopes

电子通过电磁透镜时，在磁场作用下作螺旋近轴运动，到达荧光屏时电子将转过一定角度成像操作时，若图像相对于样品的磁转角为 φ_i ，而衍射操作时，衍射花样相对于样品的磁转角为 φ_d ，则衍射花样相对于图像的磁转角为 φ ， $\varphi = \varphi_i - \varphi_d$ 标定磁转角的方法是利用已知的面状结构特征，如 TiB 晶体柱面，标定方法见图



➤ 第一章：电子光学基础

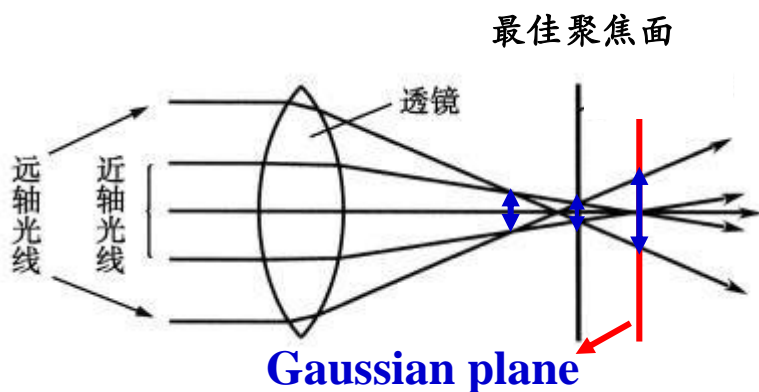
1.3 电磁透镜的像差Aberrations

- 理想情况下，在旁轴条件（靠近轴）下，物平面上的点都被单值的、无形变的成像在像平面上（无像差）。实际上电子显微镜成像都会受透镜的像差影响，其分辨率也受限于此。
- 像差分为两类：
 - 几何像差：球差Spherical aberration、像散Astigmatism和畸变Distortion。
 - 色差Chromatic aberration：电子速度（能量）不同。

➤ 第一章：电子光学基础

1.3 电磁透镜的像差Aberrations:球差 spherical aberration

球差是由于透镜中心区域和边缘区域对电子的折射能力不同而形成的，用 Δr_s 表示球差的大小。

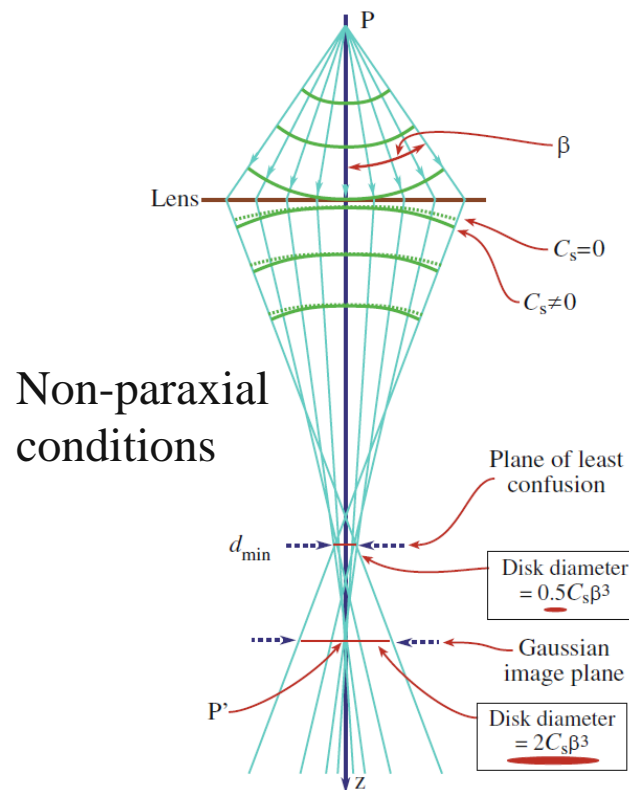


$$r_s = 0.5 C_s \alpha^3$$

式中， C_s 为球差系数； α 是孔径半角。

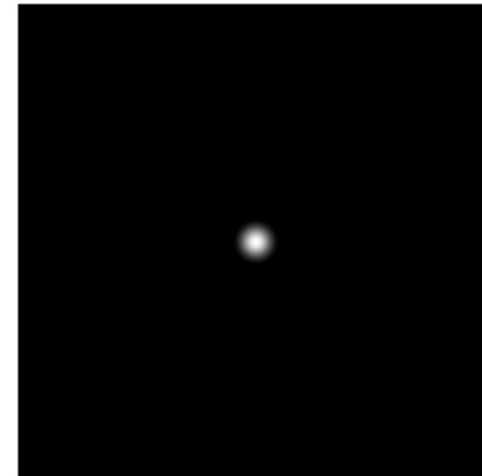
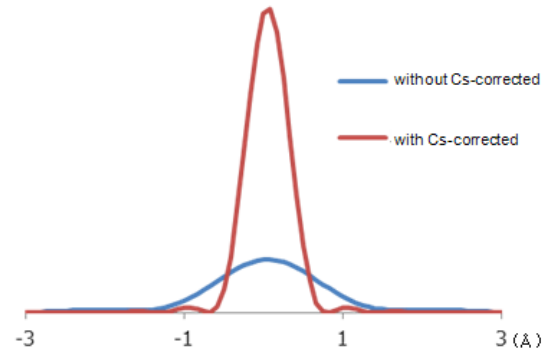
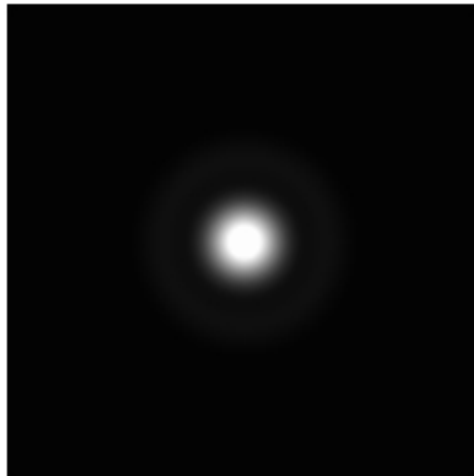
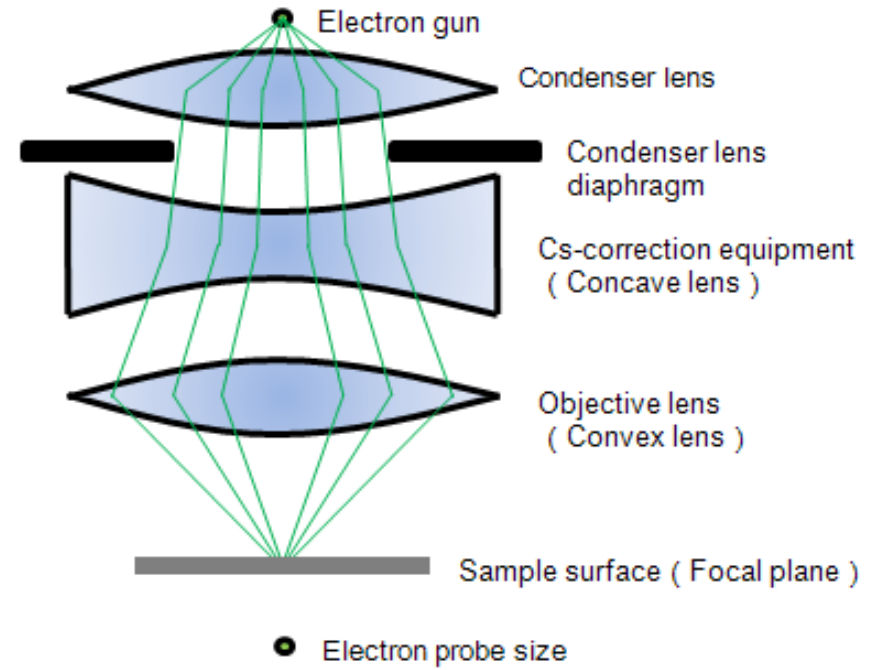
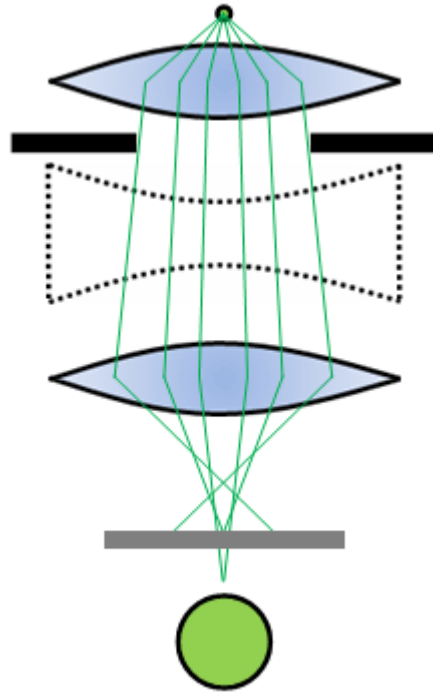
减小 C_s 和 β 可以减弱球差影响，也可以引入球差矫正器。

球差的矫正



D. B. Williams, C. B. Carter. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*, Springer, 2009.

1.3 球差矫正效果

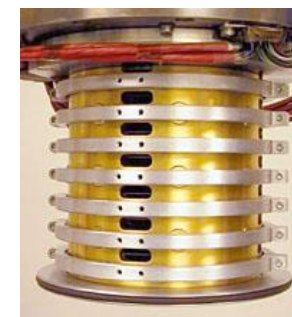
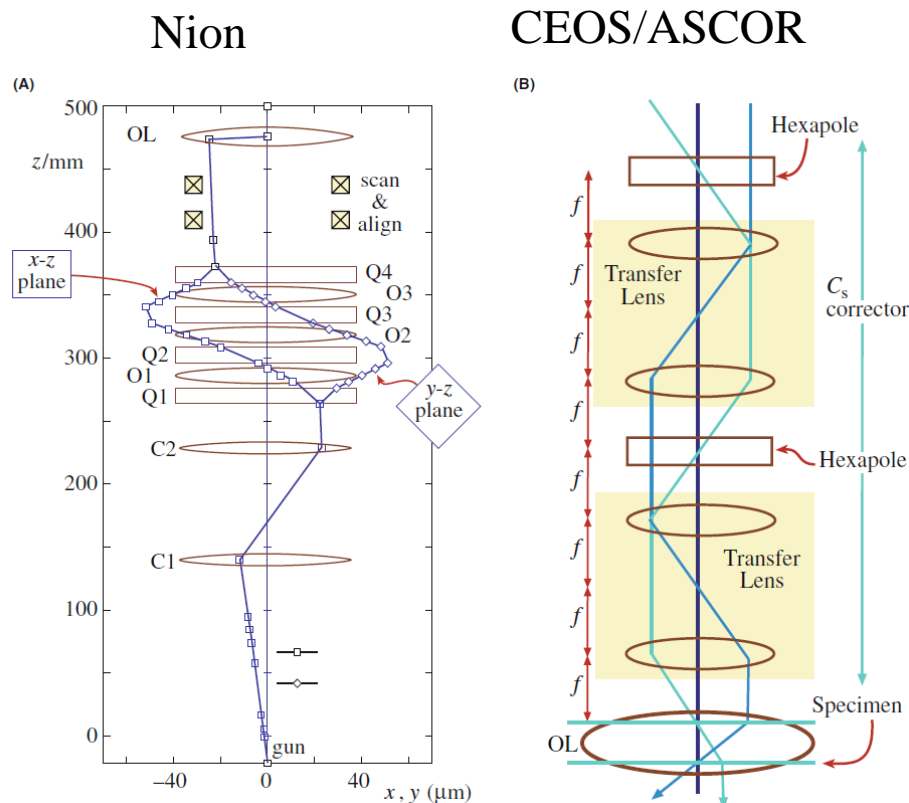
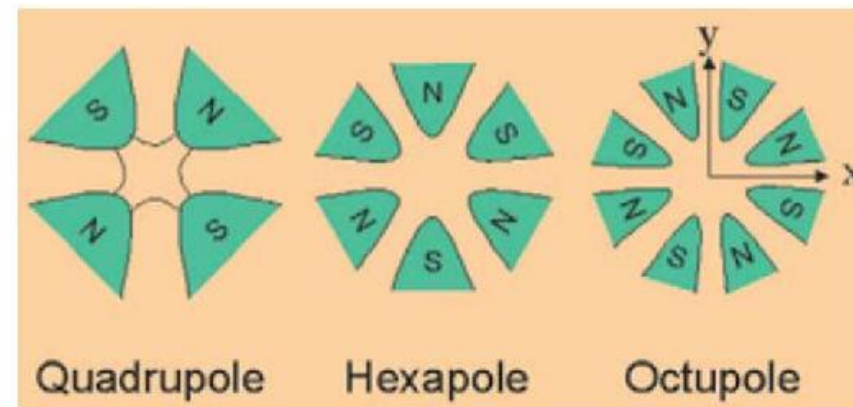


➤ 第一章：电子光学基础

1.3 电磁透镜的像差Aberrations：球差

The "Cs corrector" produces a negative spherical aberration coefficient (C_s) to cancel positive C_s of the objective and condenser lenses, which are axially-symmetric magnetic field lenses.

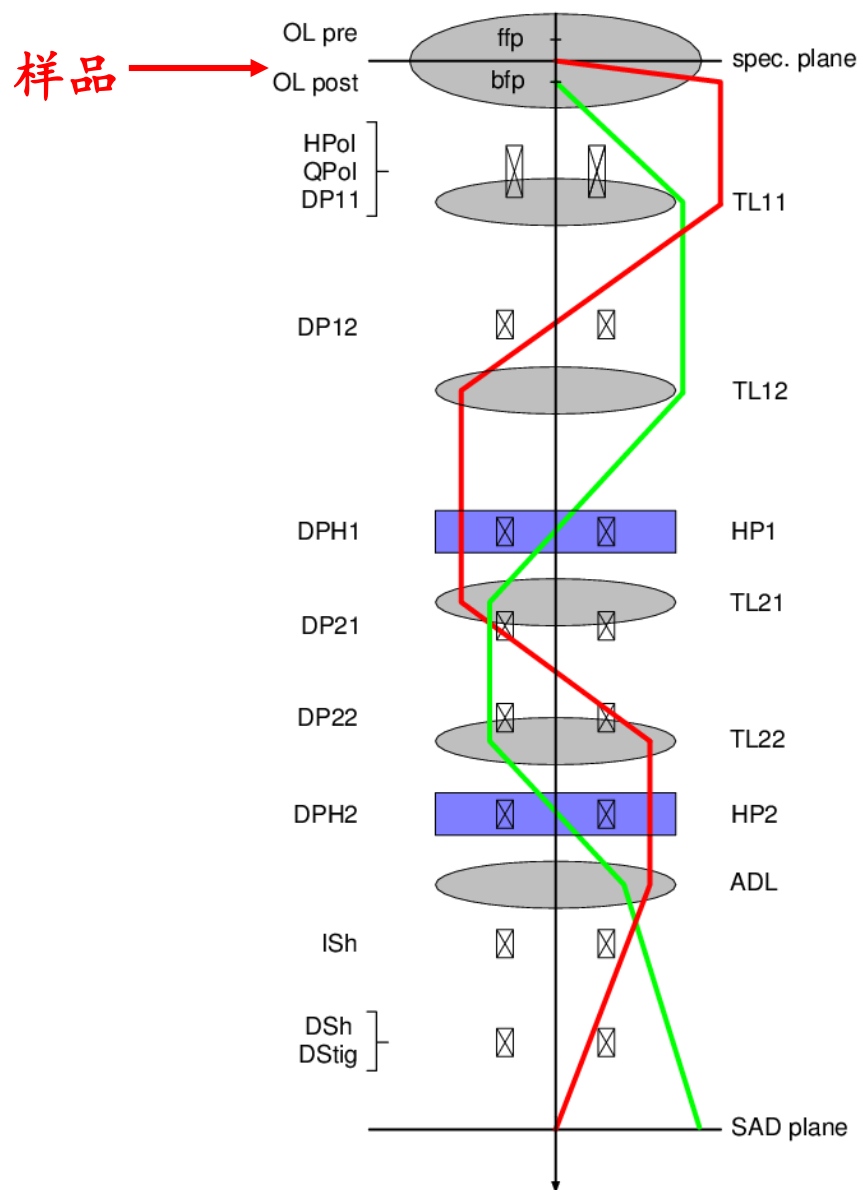
多极子校正装置的示意图和球差校正光路示意图



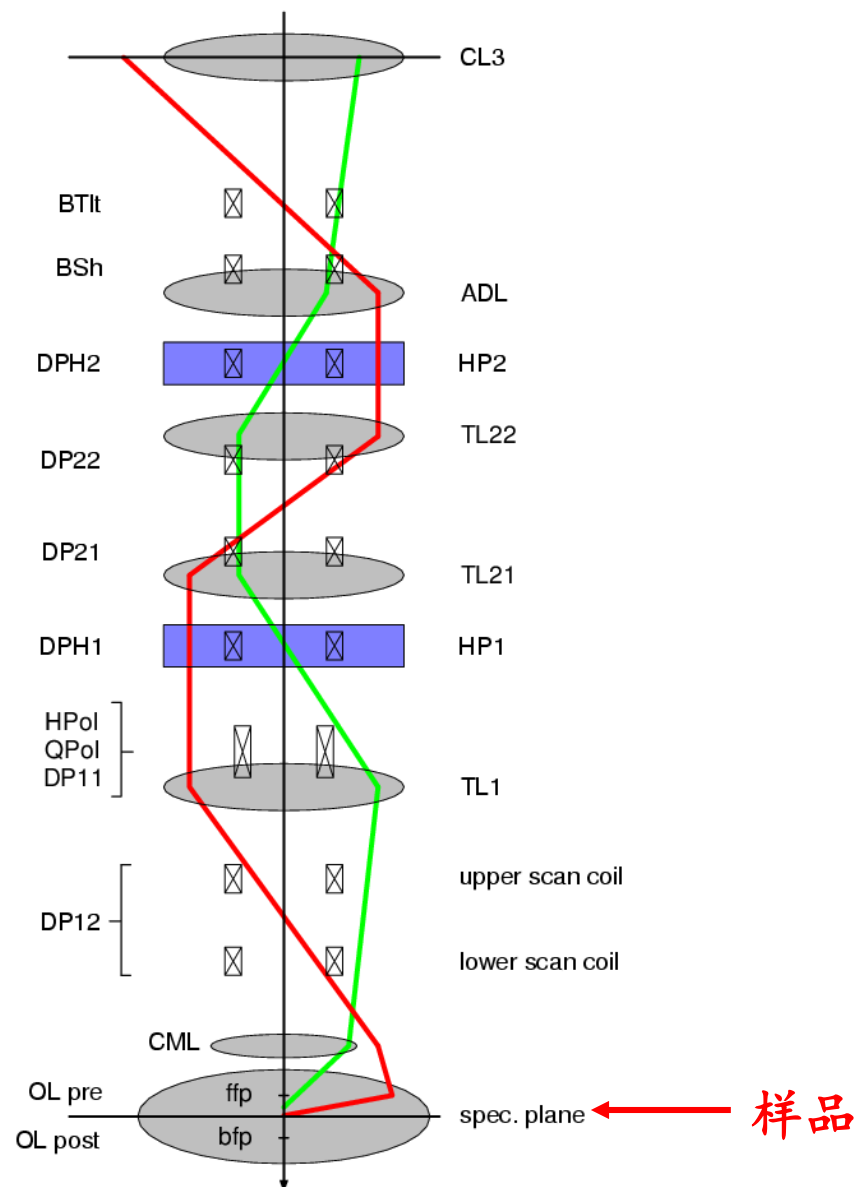
1. Rose, H H (2008). "Optics of high-performance electron Microscopes";
2. Haider, M. et al. (1998) "Towards 0.1 nm resolution with the first spherically corrected transmission electron microscope"

1.3 两种矫正器

TEM Cs-corrector



STEM Cs-corrector

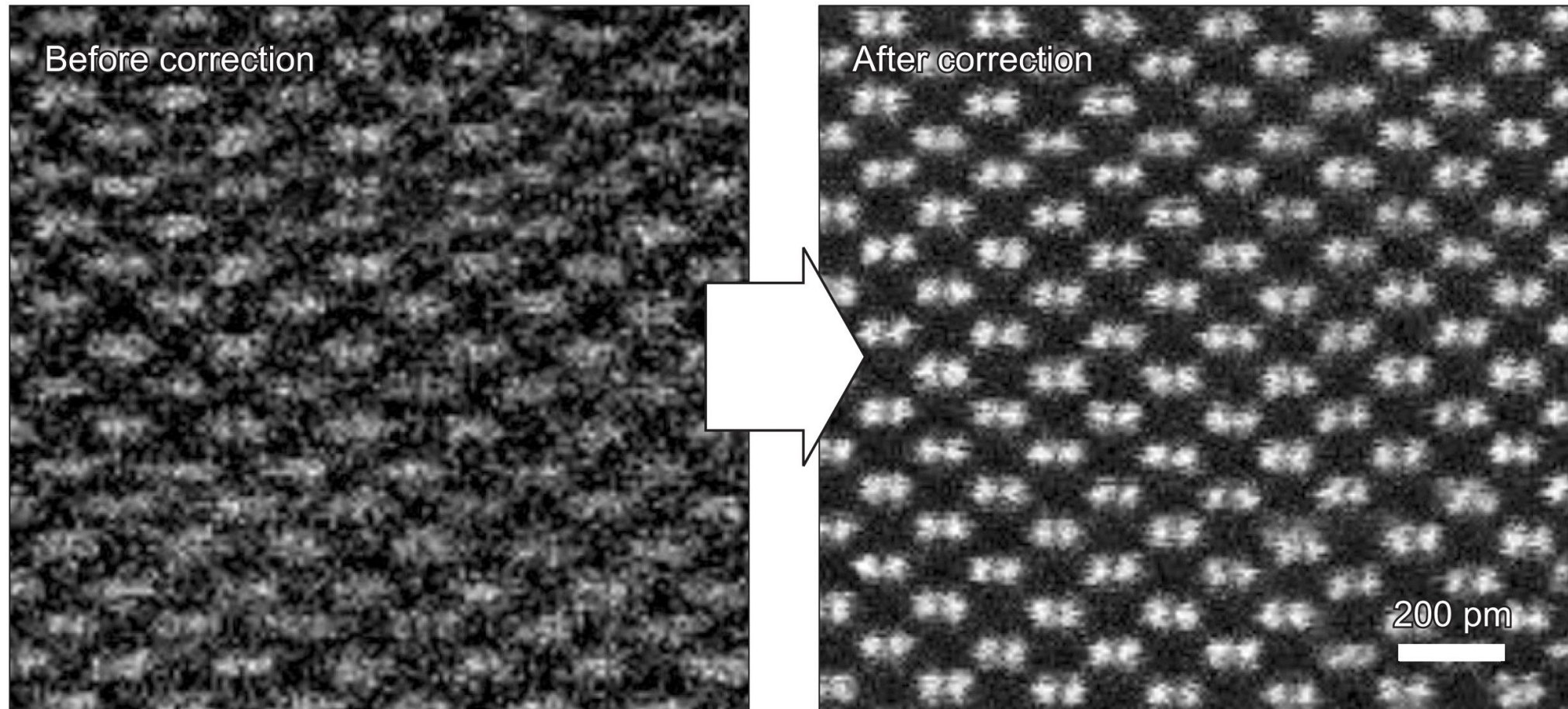


1.3 电磁透镜的像差Aberrations: 球差

2020年科维理纳米科学奖



Maximilian Haider, Knut Urban, Harald Rose, Ondrej Krivanek



<https://www.e-sciencecentral.org/articles/SC000011190>

➤ 第一章：电子光学基础

1.3 电磁透镜的像差Aberrations：畸变 Distortion

- 畸变是由球差引起的，透镜对边缘区域的聚焦能力比中心部分大。
- 像的放大倍数将随离轴径向距离的加大而增加或减小，这时，图像虽然是清晰的，但是由于离轴径向尺寸的不同，图像产生不同程度的位移。
- 两个投影镜，畸变相反，即可相互抵消。

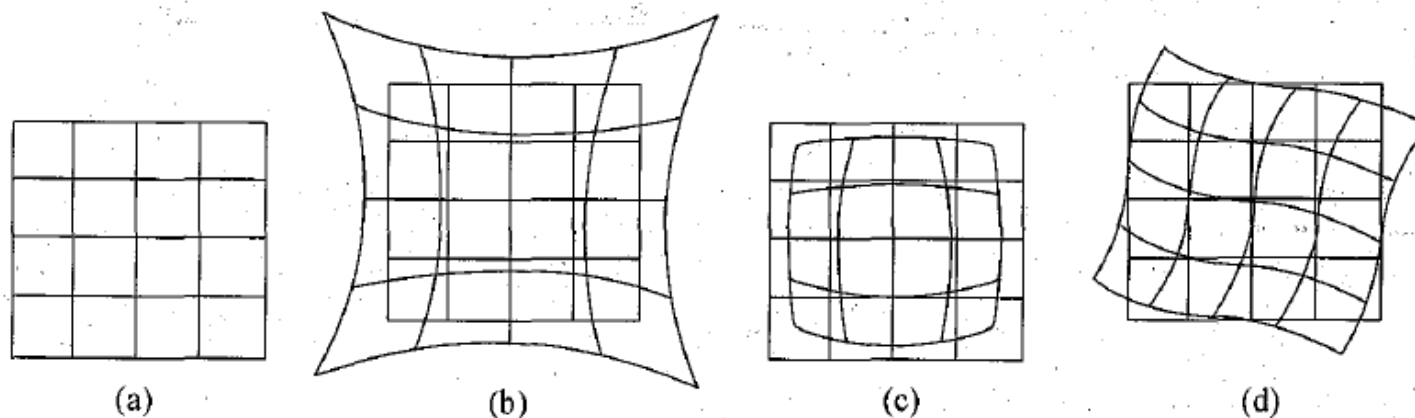


图 1-10 磁透镜产生的畸变

(a) 无畸变；(b) 枕形畸变；(c) 桶形畸变；(d) 旋转畸变

➤ 第一章：电子光学基础

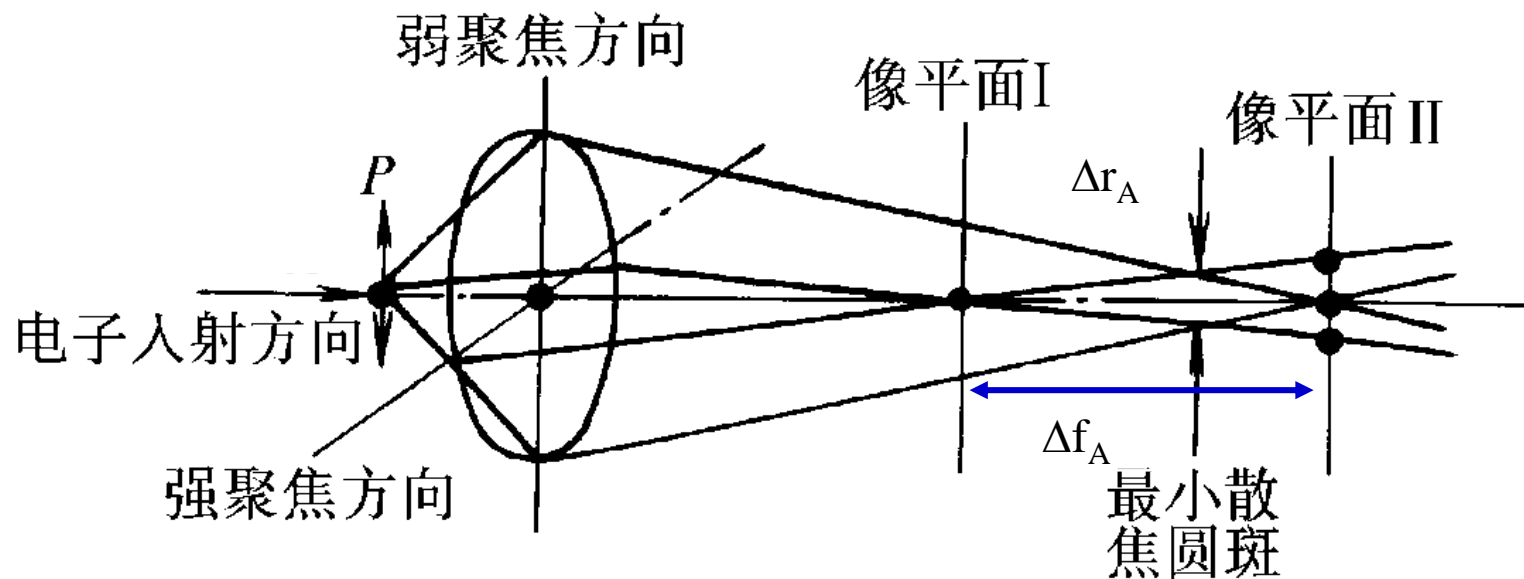
1.3 电磁透镜的像差Aberrations：像散 Astigmatism

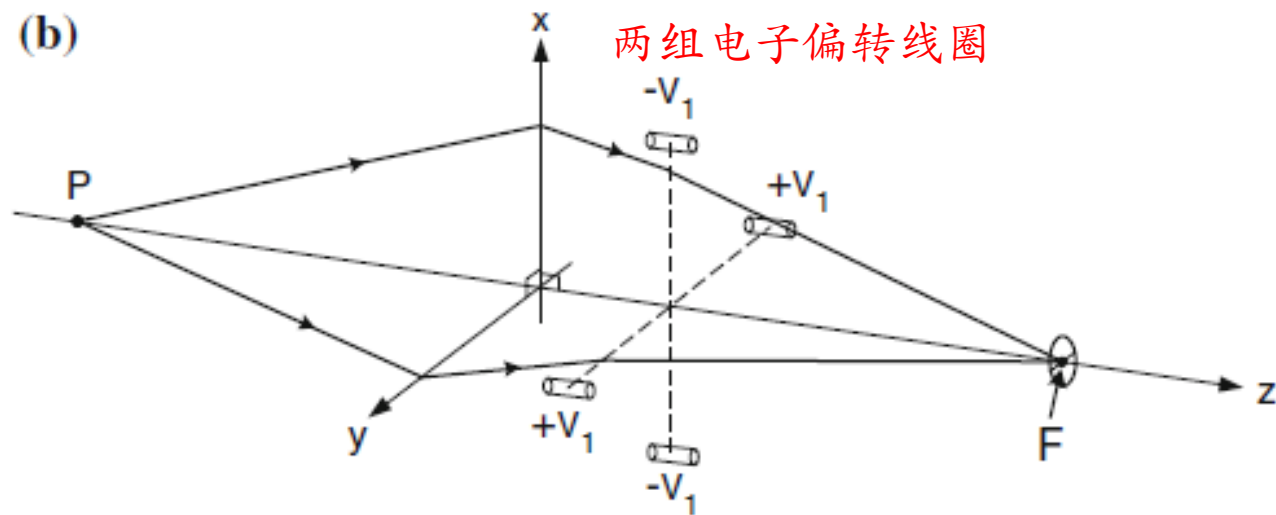
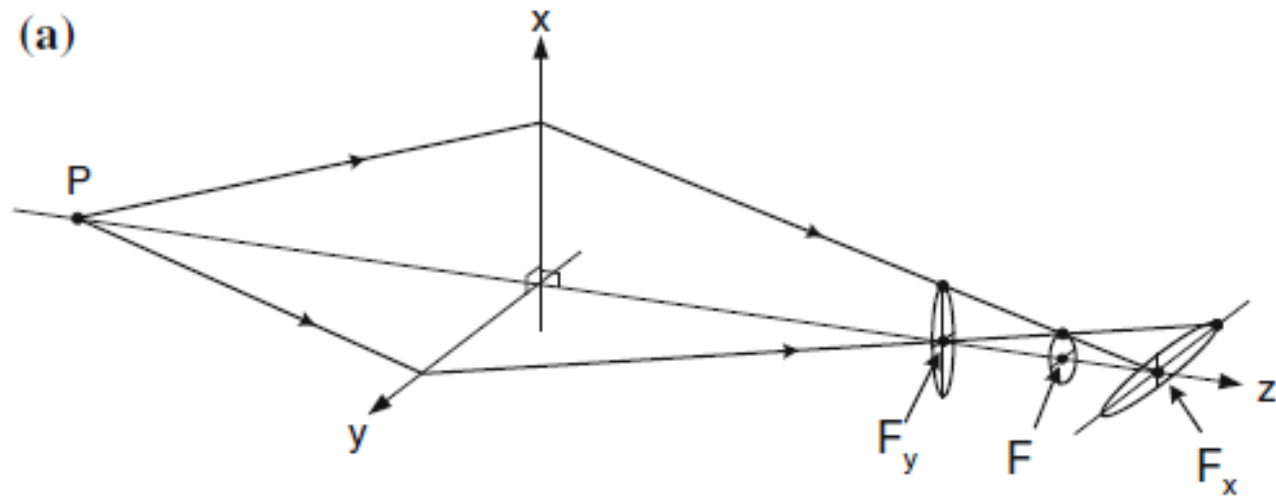
像散是由于透镜磁的非旋转对称导致不同方向聚焦能力出现差别而引起的，用 Δr_A 表示像散的大小

$$\Delta r_A = \Delta f_A \alpha$$

Δf_A 为磁场出现非旋转对称时的焦距差； α 是孔径半角。

通过引入强度和方位均可调节的矫正磁场消除像散。





➤ 第一章：电子光学基础

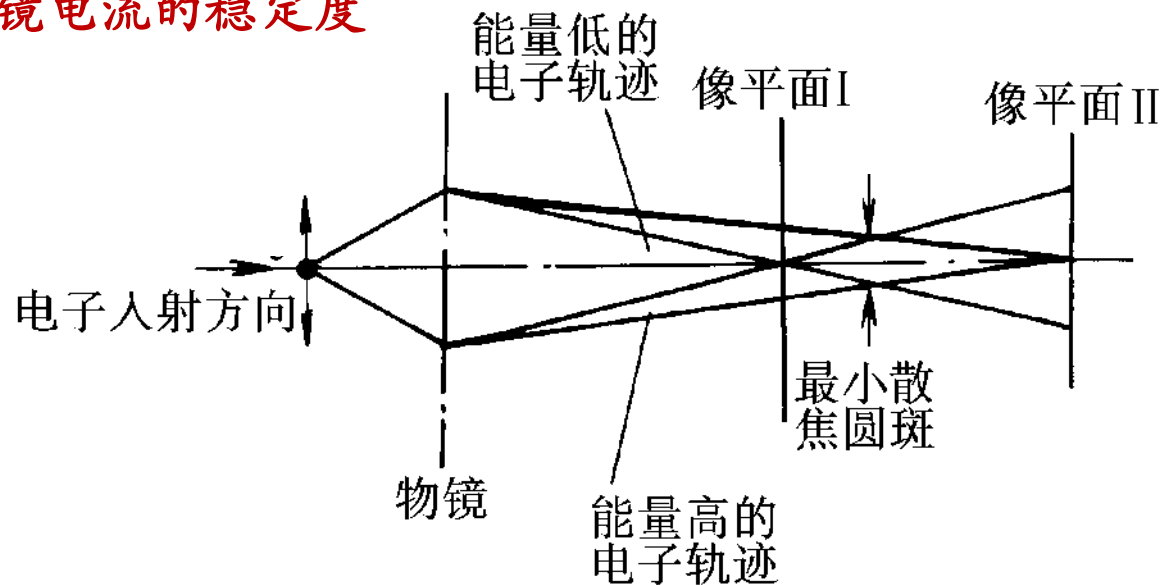
1.3 电磁透镜的像差Aberrations: 色差 Chromatic aberration

色差是由于入射电子波长(或能量)的非单一性或透镜磁场不稳定导致聚焦能力的差别所造成的，用 Δr_c 表示色差的大小

$$\Delta r_c = C_f \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta I}{I}\right)^2}$$

C_f 是色差系数（有时用 C_c ）； $\Delta V/V$ 和 $\Delta I/I$ 为电压和电流的变化率。

提高加速电压和透镜电流的稳定度



➤ 第一章：电子光学基础

1.3 磁透镜的理论分辨率

- 在磁透镜中，减小孔径可以减小像差，提高分辨率。对于磁透镜，折射率 ~ 1 ， 2α 为 $3-5^\circ$ (α 是孔径半角)。
- 对电镜影响最大的是衍射效应和球差。

$$\text{衍射: } r_{th} = 0.61 \frac{\lambda}{\alpha} \quad \text{球差: } r_s = 0.5 C_s \alpha^3$$

$$\text{色差 } \Delta r_c = C_c \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta I}{I}\right)^2}$$

$$r = \sqrt{r_{th}^2 + r_s^2 + r_c^2} = \sqrt{\left(0.61 \frac{\lambda}{\alpha}\right)^2 + (0.5 C_s \alpha^3)^2 + C_c^2 \alpha^2 \left[\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta I}{I}\right)^2\right]}$$

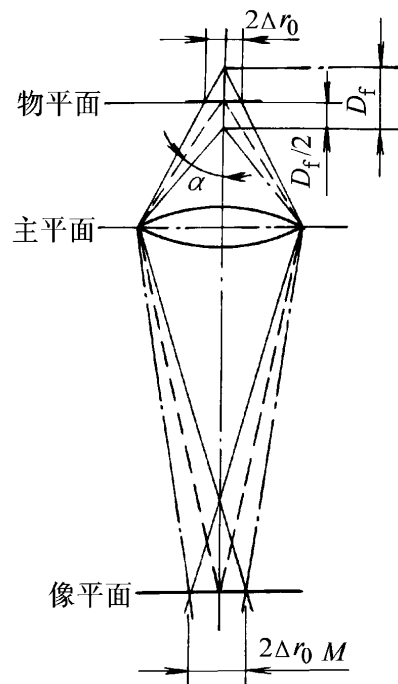
对于高分辨电镜， $C_s < 1 \text{ mm}$ ，分辨率约为 $1.4-1.9 \text{ \AA}$

➤ 第一章：电子光学基础

1.4 景深和焦深 Depth of Field and Depth of Focus

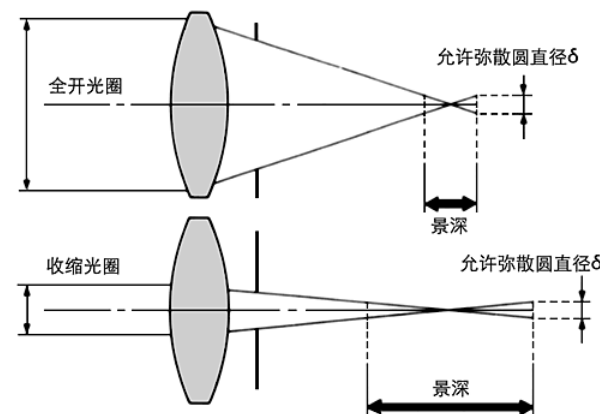
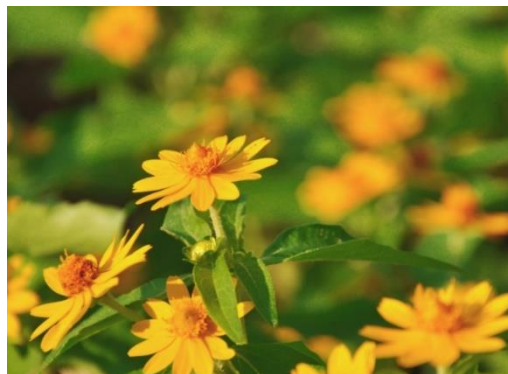
景深：能够取得清晰图像的成像所测定的被摄物体前后距离范围。

Depth of Field is the tolerance of distance between object and lens where the object appear acceptably sharp in an image.



$$D_f = \frac{2\Delta r_0}{\tan \alpha} \approx \frac{2\Delta r_0}{\alpha}$$

若 $\Delta r_0 = 1 \text{ nm}$, $\alpha = 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ rad}$,
则 $D_f = 200 \sim 2000 \text{ nm}$



Aperture = f/1.4. DOF=0.8 cm

Aperture = f/4.0. DOF=2.2 cm

Aperture = f/22. DOF=12.4 cm

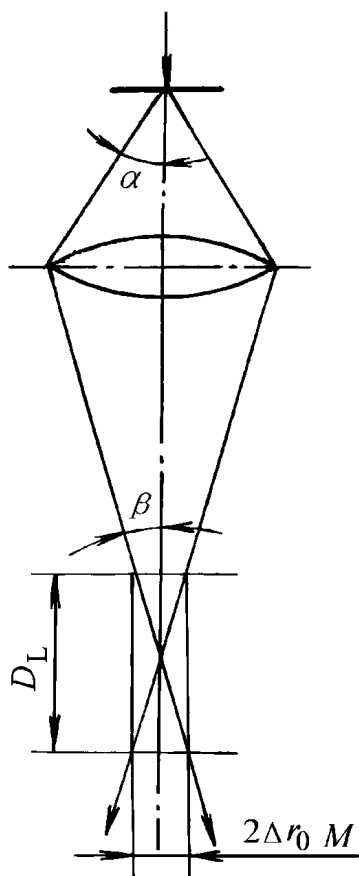
Depth of field for different values of aperture using 50 mm objective lens and full-frame DSLR camera. Focus point is on the first blocks column.^[9]

➤ 第一章：电子光学基础

1.4 景深和焦深 Depth of Field and Depth of Focus

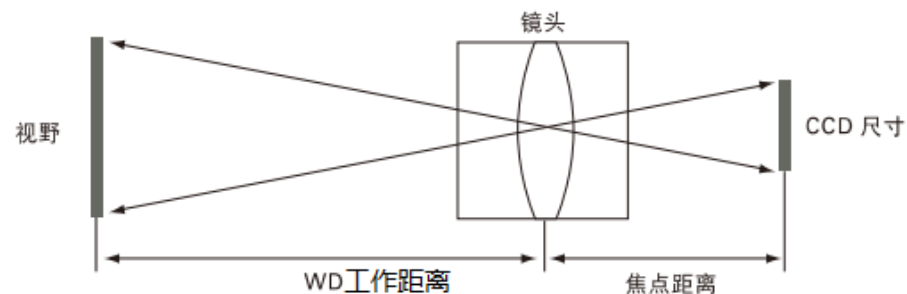
焦深：保持影像较为清晰的前提下，焦点（焦平面）沿镜头光轴所允许移动的距离

The **Depth of Focus** is the tolerance of placement of the image plane.



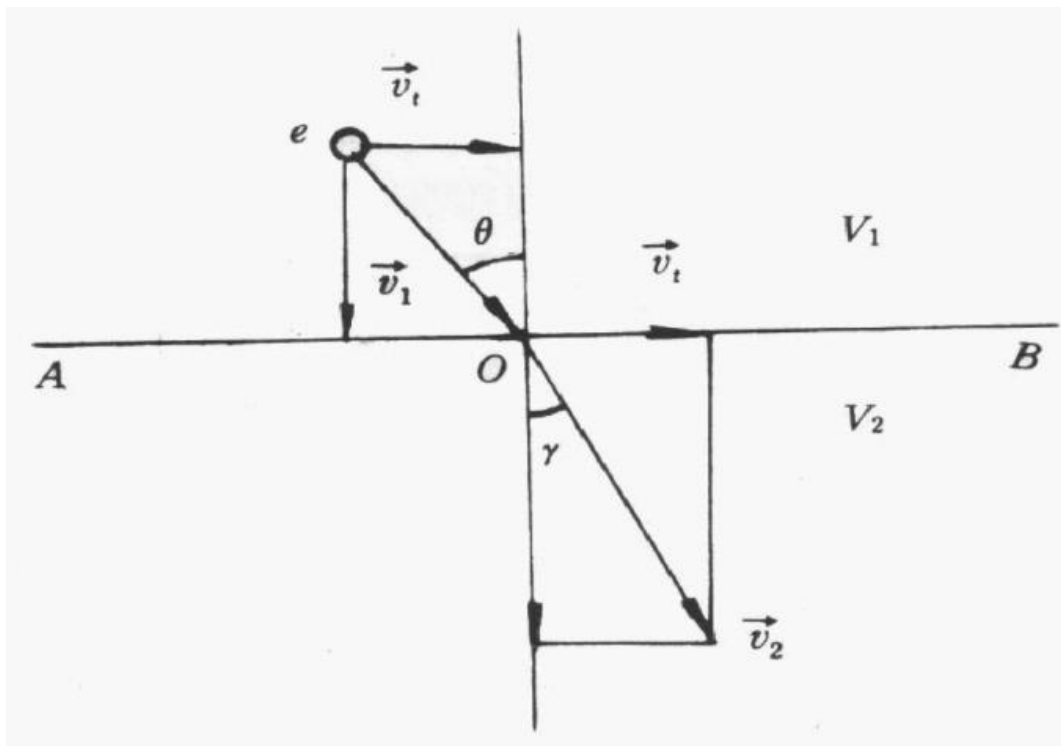
$$D_L = \frac{2\Delta r_0 M}{\tan \beta} \approx \frac{2\Delta r_0}{\alpha} M^2$$

若 $\Delta r_0 = 1\text{nm}$, $\alpha = 10^{-2}\text{rad}$,
 $M = 200\text{倍}$, 则 $D_L = 8\text{mm}$



➤ 第一章：电子光学基础

1.5 静电透镜 Electric lens



电子束在电位分界面（等位面）的“折射”

电子在静电场中运动方式与光的折射现象十分相似，并且当电子从低电位进入高电位区时，折射角趋近法线，反之电子的轨迹远离法线。

当电子速度不为零、运动方向与电场力方向不一致时，电场力不仅改变电子运动的能量，也会改变其运动方向。

$$v_1 \sin \theta = v_2 \sin \gamma \quad \text{或} \quad \frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2eV_1}{m}} \quad v_2 = \sqrt{\frac{2eV_2}{m}}$$

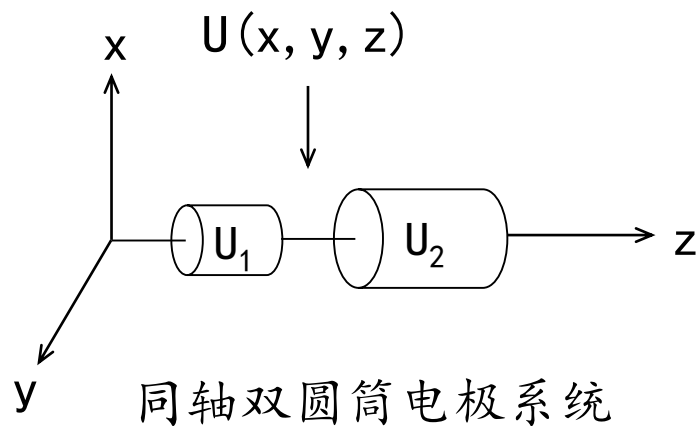
$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

➤ 第一章：电子光学基础

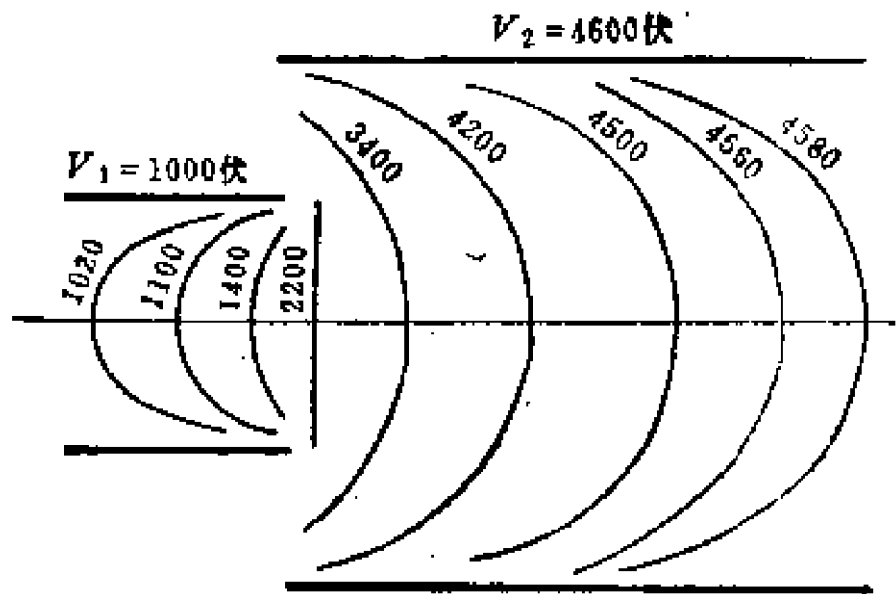
1.5 静电透镜 Electric lens

关于坐标轴 z 具有对称形状的电极系统，所形成的场具有轴对称性。

例如，图示同轴双圆筒电极，对于 z 轴具有对称形状，在两个圆筒上分别加上电位 U_1 与 U_2 组成一电子光学系统，该系统所形成的场是轴对称场



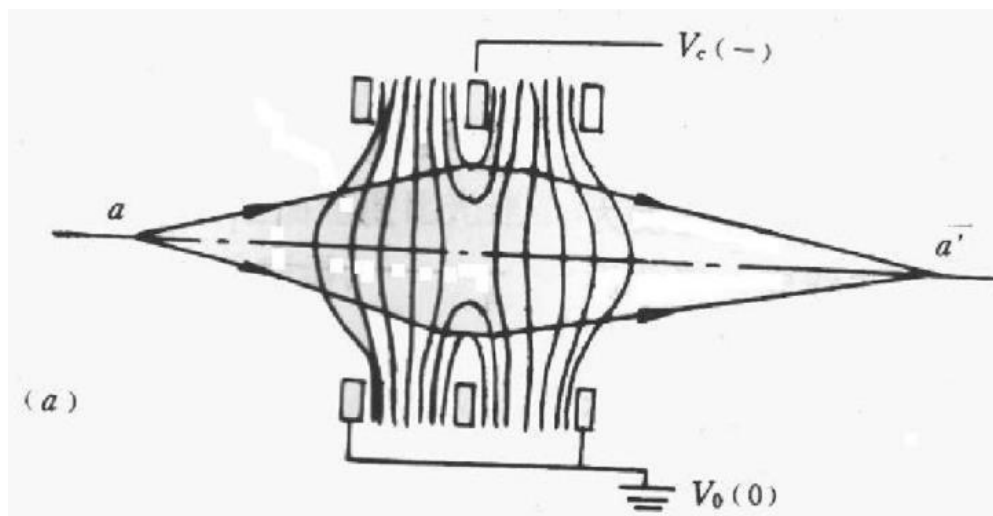
轴对称静电场



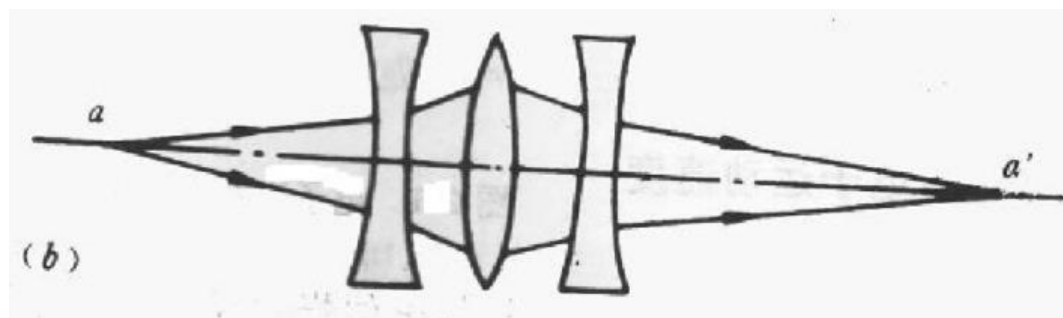
➤ 第一章：电子光学基础

1.5 静电透镜 Electric lens

与玻璃的凸透镜可以使光线聚焦成像类似，一定形状的等电位曲面簇，也可以使电子束聚焦成像。产生这种旋转对称等电位曲面簇的电极装置即为静电透镜。有二极式和三级式。



三极式静电透镜的等电位面 (a) 和电子轨迹 (b) 示意图



相当于光学的玻璃透镜

➤ 第一章：电子光学基础

1.5 静电透镜 Electric lens

电子光学中著名的谢乐（Scherzer）公式

$$U(r, z) = U(z) - \frac{1}{2^2} U''(z) r^2 + \frac{1}{2^4 \times (1 \times 2)^2} U^{(4)}(z) r^4 + \dots$$
$$= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{2^{2n} (n!)^2} U^{(2n)}(z) r^{2n}$$

谢乐（Scherzer）公式是电子光学的基本公式。表明旋转对称静电场空间内只要知道轴上电位 $U(z)$ 分布，就可以完全而又唯一地确定整个场空间的电位分布。这样，求解旋转对称场的场分布问题，就转成求轴上电位分布

磁透镜与静电透镜的比较

- 磁透镜和静电透镜都可以用作会聚透镜，但现代的透射/扫描电镜除电子光源处外都用磁透镜作为会聚镜，主要因为：
 - 1. 磁透镜的焦距可以做的很短，获得高的放大倍数和较小的球差；
 - 2. 静电透镜要求高的电压，使仪器绝缘问题难以解决。

小结

1. 放大倍数及衍射极限；
2. 电子的波长；
3. 电磁透镜的性质、像差；
4. 景深和焦深的概念及影响因素；
5. 静电透镜。