

基礎から学ぶ光物性

第4回 集光したとき光スポットはどこまで小さく絞れるか



東京農工大学特任教授
佐藤勝昭

第4回講義で学ぶこと

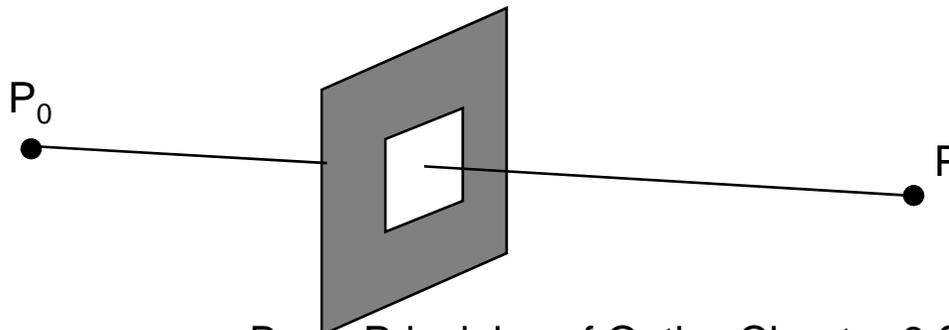
- この講義では、はじめに、方形および円形の開口による回折像についてのべ、その応用として結像系による集光の回折現象を論じ、分解能の式を導きます。
- これから、顕微鏡で液浸レンズを使うと分解能がなぜ上がるかについて述べます。
- また、ブルーレイディスクがDVDに比べ高密度に記録できる密度が高くなる訳を教えます。

矩形開口による フラウンホーファー回折

- 2辺の長さが2aおよび2bであるような長方形の開口を考えた場合の遠隔点Pにおける回折強度の式はフレネル・キルヒホッフの理論式を適用することにより

$$I(P) = \left(\frac{\sin kpa}{kpa} \right)^2 \left(\frac{\sin kpb}{kpb} \right)^2 I_0$$

で与えられます。ここに I_0 はパターンの中心位置での光強度です。関数 $y = (\sin x/x)^2$ は、右の図に示すようなフラウンホーファー型の回折パターンとなります。



Born: Principles of Optics Chapter 8, Section 8.5

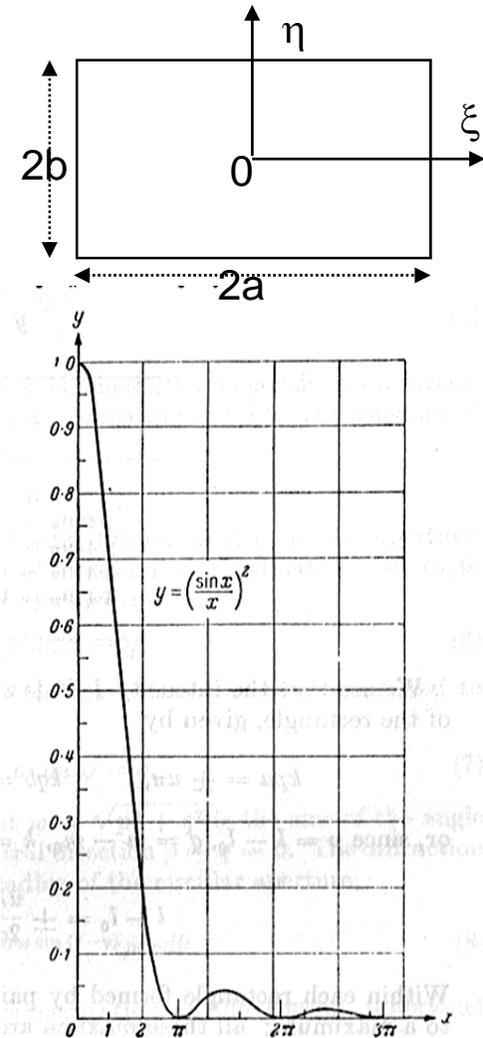


Fig. 8.9. FRAUNHOFER diffraction at a rectangular aperture. The function

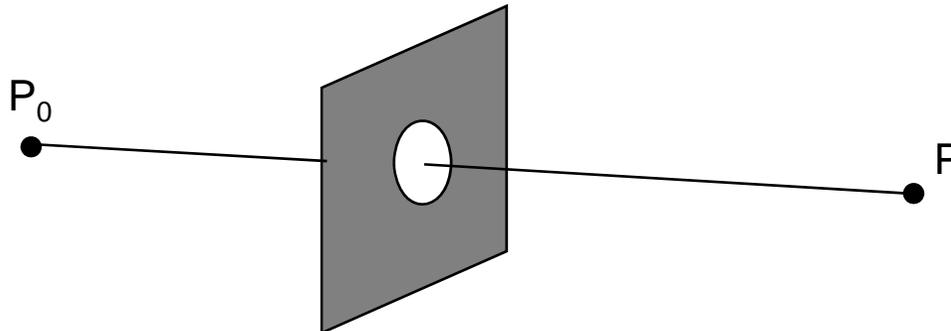
$$y = \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2.$$

円形開口による フラウンホーファー回折

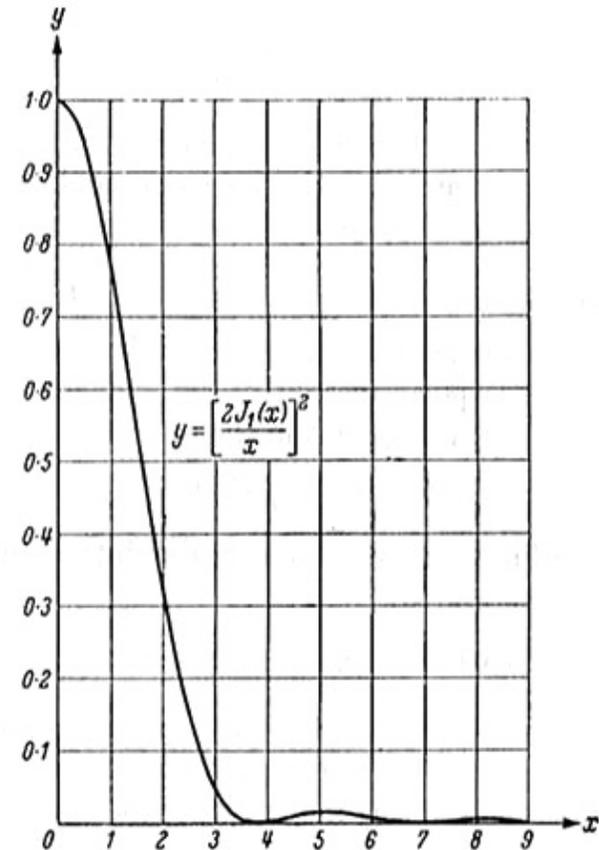
- 半径 a の円形の開口を考えた場合の遠隔点 P における回折強度の式は

$$I(P) = \left(\frac{2J_1(kaw)}{kaw} \right)^2 I_0$$

で与えられます。関数 $y=(2J_1(x)/x)^2$ は、右の図に示すような幅が矩形の場合よりすこし広がった回折パターンとなります。

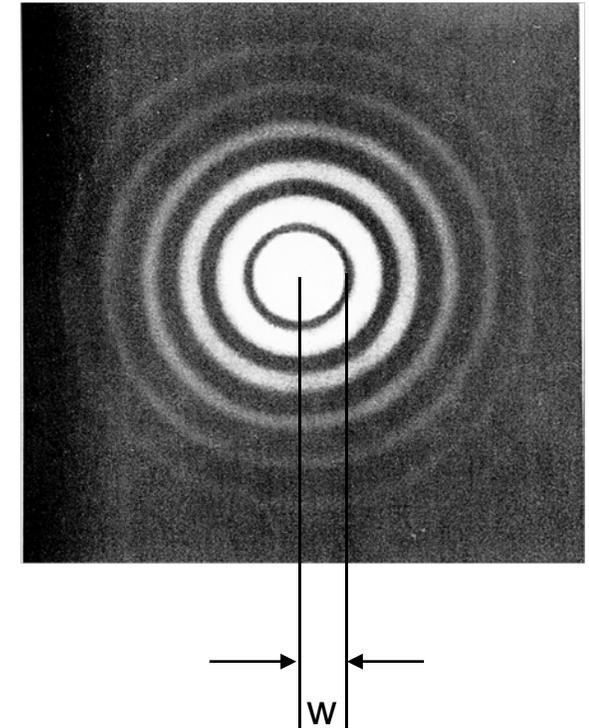


Born: Principles of Optics Chapter 8, Section 8.5



回折リング

- 回折像は、中心に明るい円盤があり、その周りを同心円状にいくつもの明るいリングと暗いリングが取り巻く構造になっています。
- 暗いリングの半径は、 $w=0.61\lambda/a, 1.116 \lambda/a, 1.619 \lambda/a \dots$ の位置に現れます。



結像系の分解能

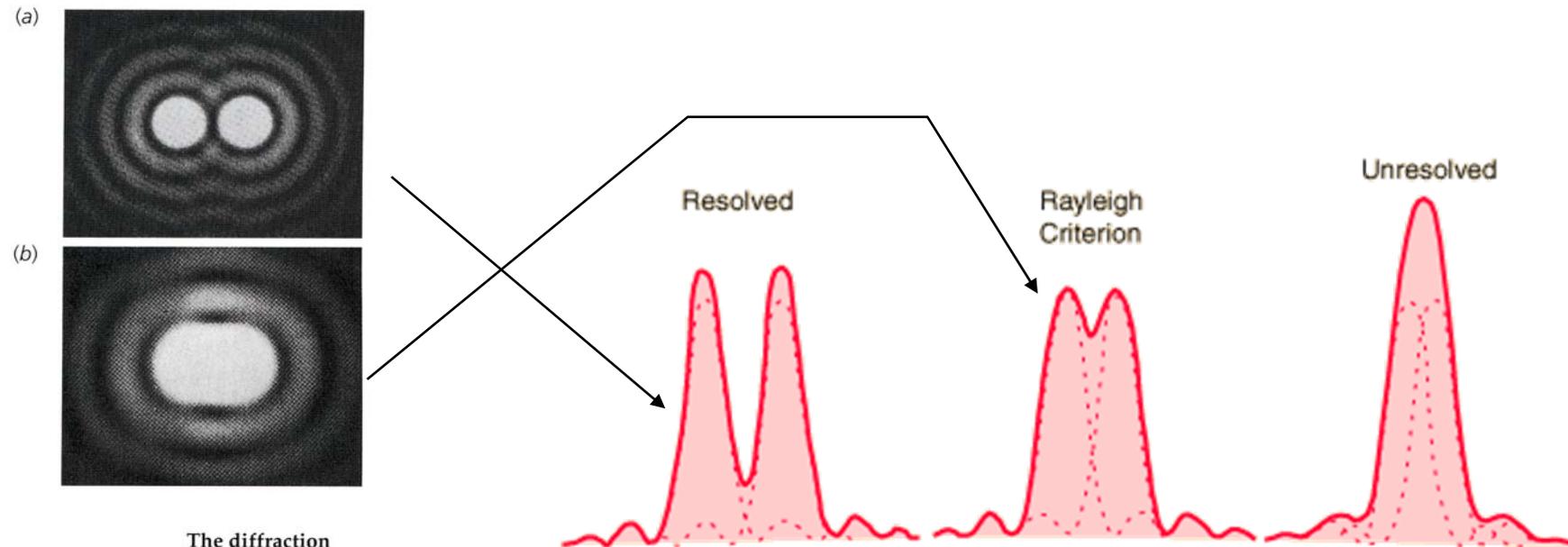
- フラウンホーファーの回折式は光学系の分解能に応用できます。結像系の分解能とは、2つの隣接する対象点の像を分離して観測できる能力を指します。
- 収差のない系であっても回折のため点はフラウンホーファーパターンで表されるような広がりを持ったものになるため、2点のパターンが重畳すると分離して見るのが困難になります。

望遠鏡の分解能:レイリーの判定条件

- 遠距離にある天体に対して、対物レンズの開口半径を a とすると、中心から最初の暗いリングの極小点までの距離は $w=0.61\lambda/a$ で与えられます。ここで w は天体を見込む角 ϕ の \sin で表されるので「2つの星を見分けることができる角度分解能は $0.61\lambda/a$ である」というレイリーの判定条件が得られます。

回折と分解能

- 1つのスポットの回折像の第2ピーク位置と隣のスポットのピーク位置が一致すれば完全に分解します。
- しかし、1つのスポットの回折像の第1極小の位置と隣のスポットのピーク位置が一致すれば一応分解しているとされます。これが**レーリーの判定基準**です。



The diffraction patterns for a circular aperture and two incoherent point sources when (a) α is much greater than $1.22\lambda/D$ and (b) when α is at the limit of resolution, $\alpha_c = 1.22\lambda/D$.

顕微鏡の分解能

- 点光源Pが軸上にあり、もう1つの点光源Qが物体面上PからY離れた位置にあるとします。これらの像をP',Q'とします。Pがレンズを見込む角を θ 、P'が見込む角を θ' とします。
- 後焦点面におけるP'に結像する光線の半径を a' とし焦点面と結像面の距離 D' とすると、 $\theta' = a'/D'$ で表されます。
- 一方、Q'とP'が分解できる角度をとすると $Y' = wD'$ と表されます。

ここで $w = 0.61\lambda'/a'$ を使うと

$$Y' = 0.61\lambda' D'/a' = 0.61\lambda'/\theta' \\ = 0.61 \lambda/n'\theta'$$

- $nY\sin\theta = -n'Y'\sin\theta'$ を考慮して

$$|Y| \sim 0.61\lambda/n\sin\theta = 0.61\lambda/NA$$

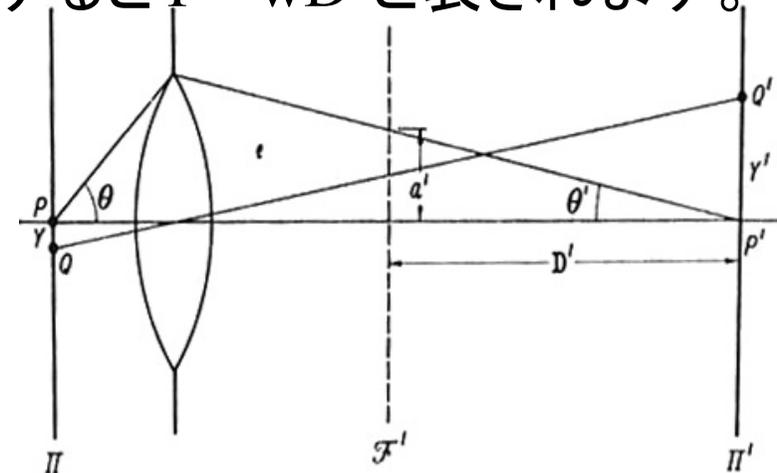


Fig. 8.31. Illustrating the theory of resolving power of the microscope.

レンズで絞れる最小スポットサイズは？

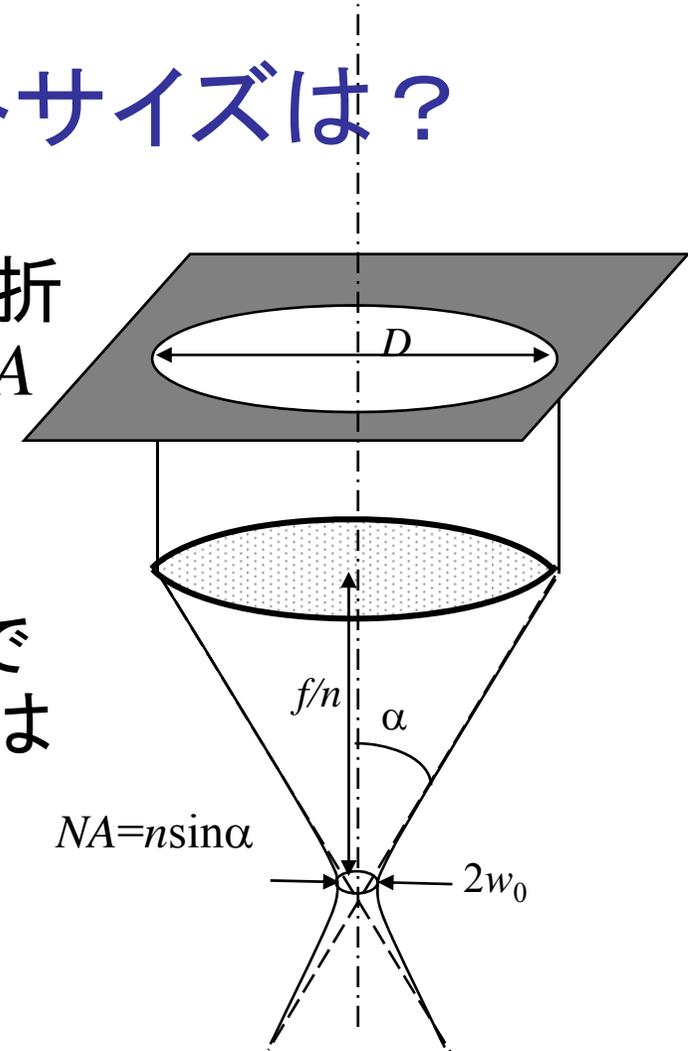
- レンズの絞り込み角 α 、媒質の屈折率を n とすると、レンズの開口数 NA は $NA=nsin\alpha$ で定義されます。

$$NA=nsin\alpha \sim nD/2f$$

- 波長 λ の光を開口数 NA のレンズで集光したときのスポットの半径 w_0 は

$$w_0 = \frac{1.22 f \lambda}{nD} \approx \frac{0.61 \lambda}{NA}$$

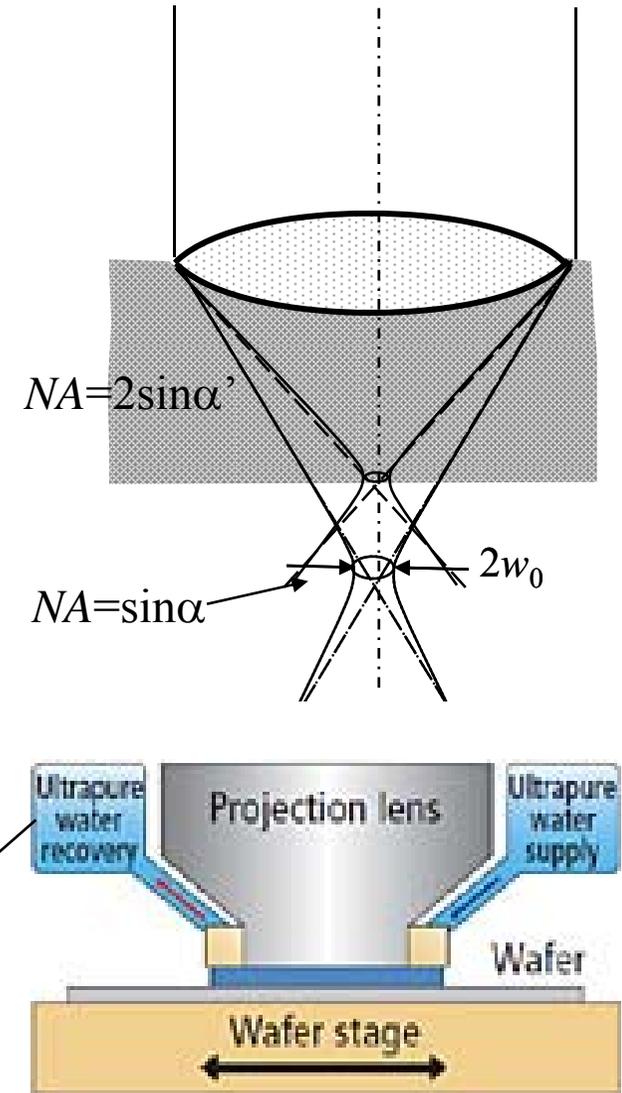
で表されます。



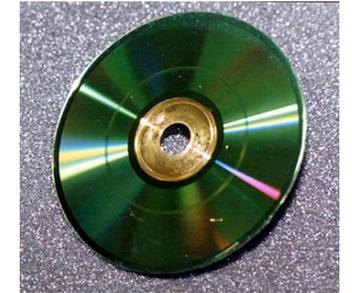
液浸レンズ

- $w_0 = 0.61\lambda/NA$ ですから、分解能を高めるには波長 λ を短くするか、NAを大きくすればよいのです。
- 顕微鏡の対物レンズを空气中で用いたときの $NA=0.6$ くらいですが、 $n=2$ の液体に浸して用いるとNAは1.2以上の値となり分解能が向上します。
- 半導体工業でもリソグラフィ用に用いられています。

リソグラフィでは純水を液体として用いる



光ディスクのレーザスポット

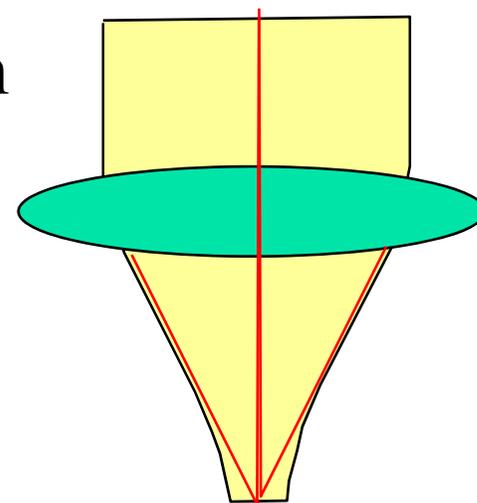


- 光ディスクでは、レーザを集光して小さなスポットにして、データの読み書きをしています。
- 従来のDVDでは、 $NA=0.65$ のレンズを用い、赤色の光(波長 650nm)を用いています。
- 最近のブルーレイディスクでは、 $NA=0.85$ のレンズを用い、青紫の光(波長 405nm)を用います。

記録密度を決めるのは光スポットサイズ

- 光ディスクの読み出しは、レーザー光を絞ったときに回折限界で決まるスポット半径 $w_0 = 0.6\lambda/NA$ で制限されます。
- 現行CD-ROM: $NA=0.65$
CD-ROM: $\lambda=780\text{nm} \rightarrow w_0=720\text{nm}$
DVD: $NA=0.65$
赤 $\lambda=650\text{nm} \rightarrow w_0=600\text{nm}$
BD: $NA=0.85$
青紫 $\lambda=405\text{nm} \rightarrow w_0=285\text{nm}$

BDのスポットの半径はDVDの約1/2,従って面積は約1/4なので記録密度は4倍になります。



スポット径 $2w_0$

演習

- 空気中で、 $NA=0.65$ のレンズを波長 $\lambda=650\text{nm}$ の光を使ったときに得られる分解能はいくらか
- 空気中で、 $NA=0.85$ のレンズで波長 $\lambda=500\text{nm}$ の光を使ったときに得られる分解能はいくらか
- $NA=0.85$ のレンズを $n=1.8$ の液体に浸漬したときに波長 $\lambda=500\text{nm}$ で得られる分解能はいくらか