

眼睛的光學

朱士維

台大物理系

4-1 眼睛各部分的光學特性

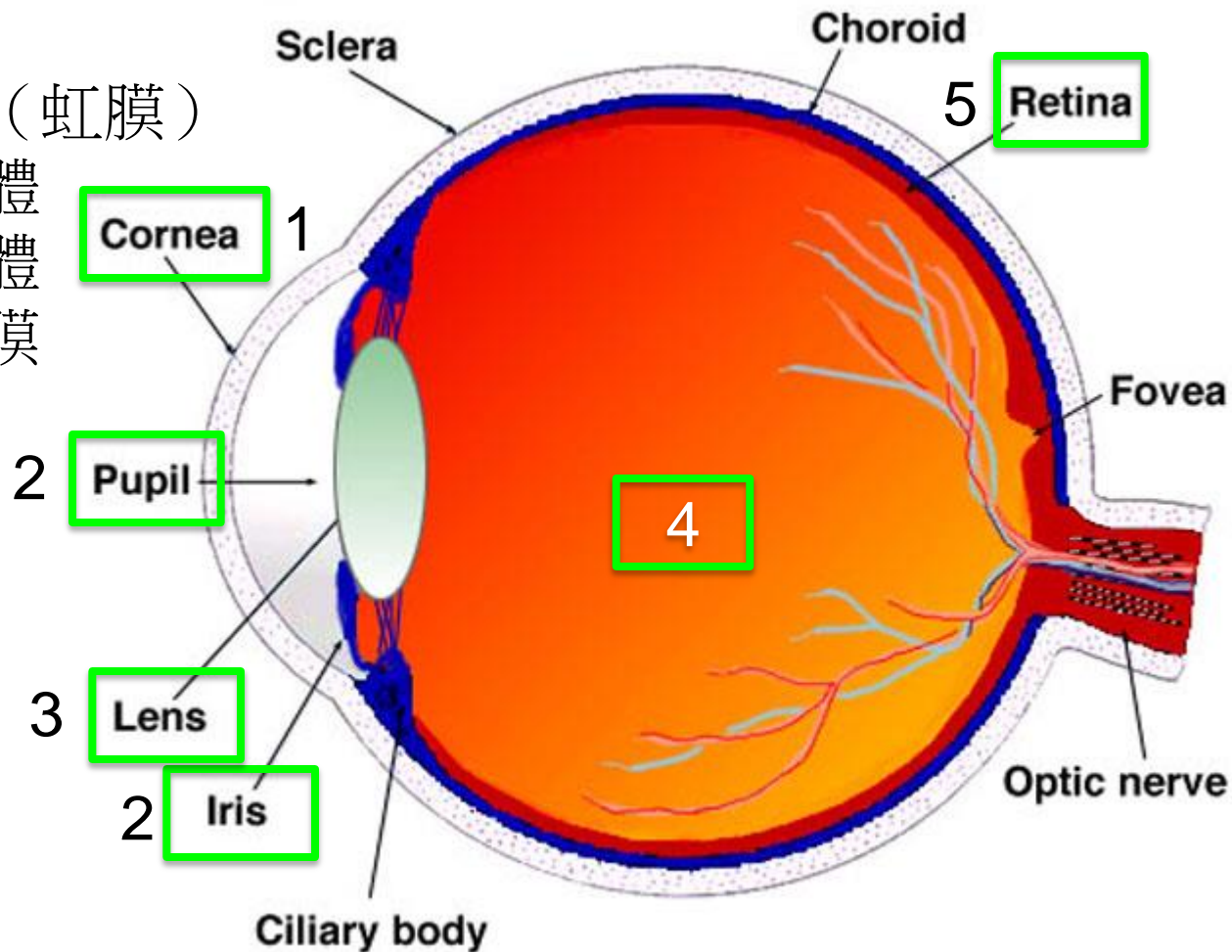
人眼

- 眼睛的構造
 - 各部分的光學特性
 1. 角膜
 2. 瞳孔（虹膜）
 3. 水晶體
 4. 玻璃體
 5. 視網膜
- 成像品質分析
 - 失焦
 - 繞射
 - 像差
 - 散射

眼睛的解剖學構造

入射光從外部到視網膜，會遇到

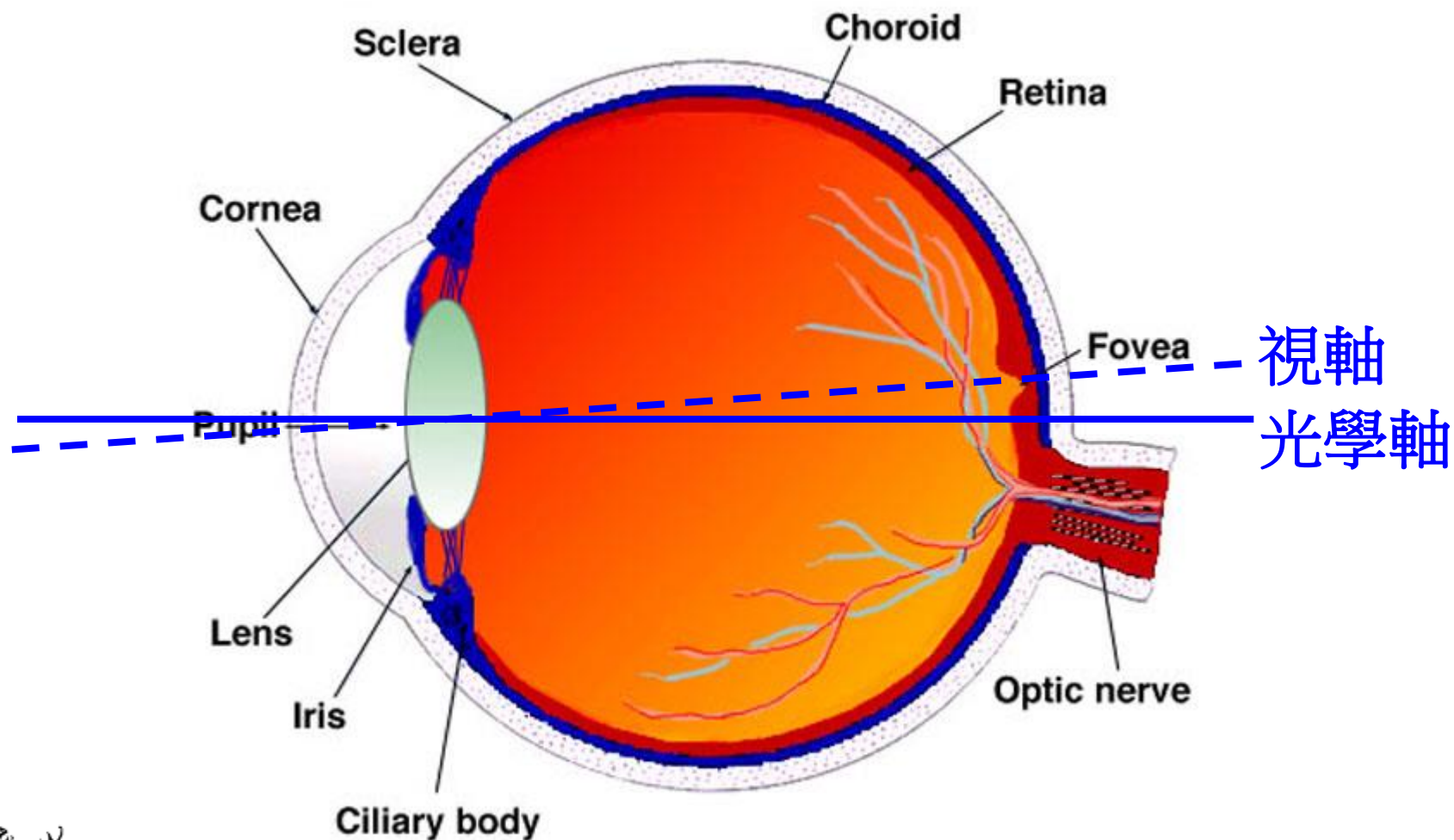
1. 角膜
2. 瞳孔（虹膜）
3. 水晶體
4. 玻璃體
5. 視網膜



眼睛的解剖學構造

光學軸：光學元件的對稱軸

視軸：視覺最靈敏的軸

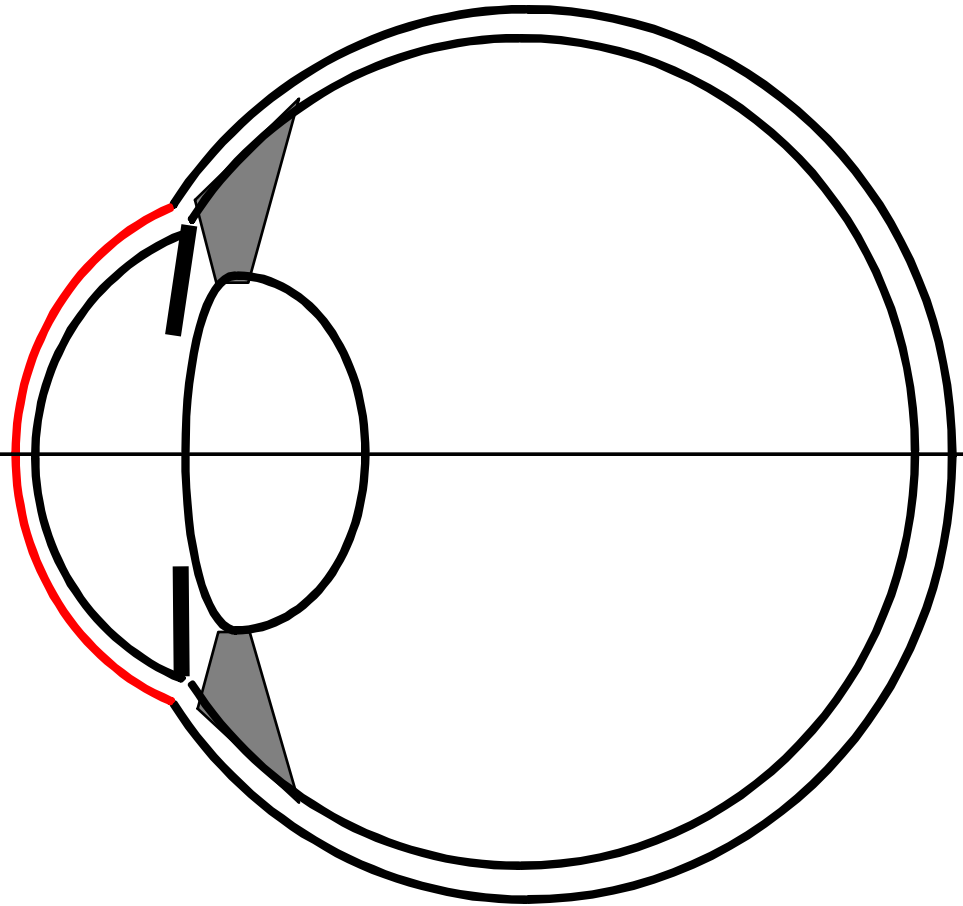


先讓我們猜一猜

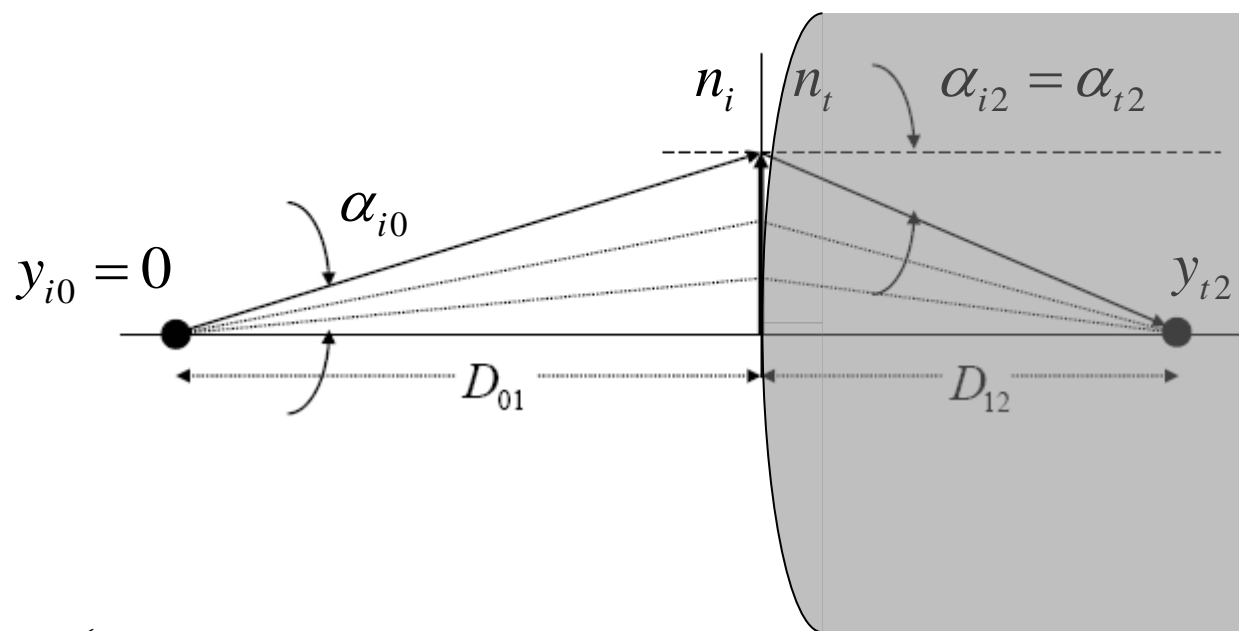
- 請問下面哪一個眼睛的部分對眼睛的屈光能力貢獻最大？
 1. 眼角膜 (cornea)
 2. 虹膜 (iris)
 3. 水晶體 (lens)
 4. 玻璃體 (vitreous body)
 5. 視網膜 (retina)

人眼的光學結構1 – 角膜

- 眼睛最外層的透明部分
 - 與空氣直接接觸
 - 空氣折射率為1，角膜折射率為1.376
 - 角膜的外表面曲率半徑為 7.7 mm。
 - 請問此外表的屈光力為？



回顧上一講：球面折射成像



成像的意義：所有由 y_{i0} 發出來的光線不論角度為何，都能會聚在 y_{t2} 形成聚焦點。

$$\Rightarrow \frac{\partial y_{t2}}{\partial \alpha_{i0}} = 0$$

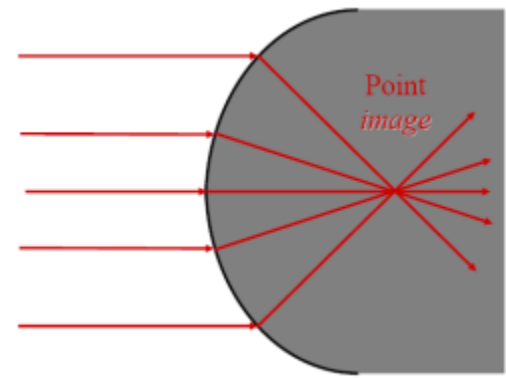
$$\left(y_{t2} = [\dots] y_{i0} + \left[D_{01} + \frac{n_i}{n_t} D_{12} + \frac{(n_i - n_t) D_{01} D_{12}}{n_t R} \right] \alpha_{i0} \right)$$

屈光力 P

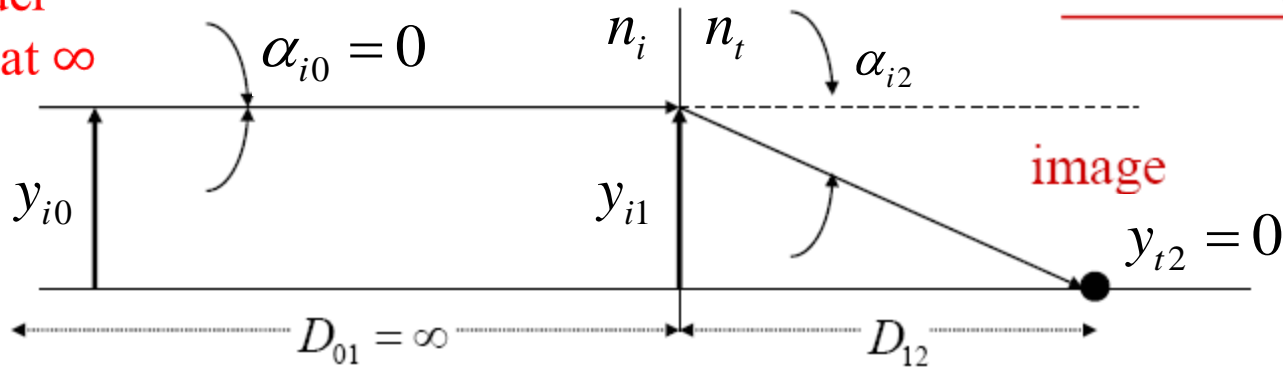
$$\Rightarrow \frac{n_t}{D_{12}} + \frac{n_i}{D_{01}} = \frac{n_t - n_i}{R}$$

像距 物距 球面曲率半徑

平行光通過球面聚焦



Consider
object at ∞



$$\frac{n_t}{D_{12}} = \frac{n_t - n_i}{R} \Rightarrow D_{12} = \frac{n_t R}{n_t - n_i} \equiv f \text{ 球面的等效焦距}$$

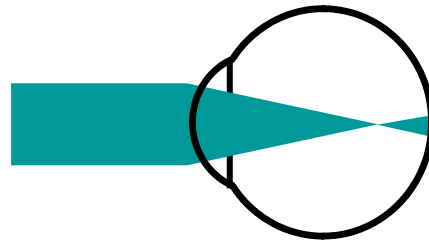
$$\text{屈光力 } P = \frac{1}{\text{focal length in air}} = \frac{\text{refractive index}}{\text{focal length}} = \frac{n_t}{f} = \frac{n_t - n_i}{R}$$

[單位: 屈光度
diopter D, $1D = 1 \text{ m}^{-1}$]

Diopter (屈光度) vs. 近視度數

- 近視度數/100 = 屈光度
- 近視100度意即需要一個焦距1 m的凹透鏡來校正

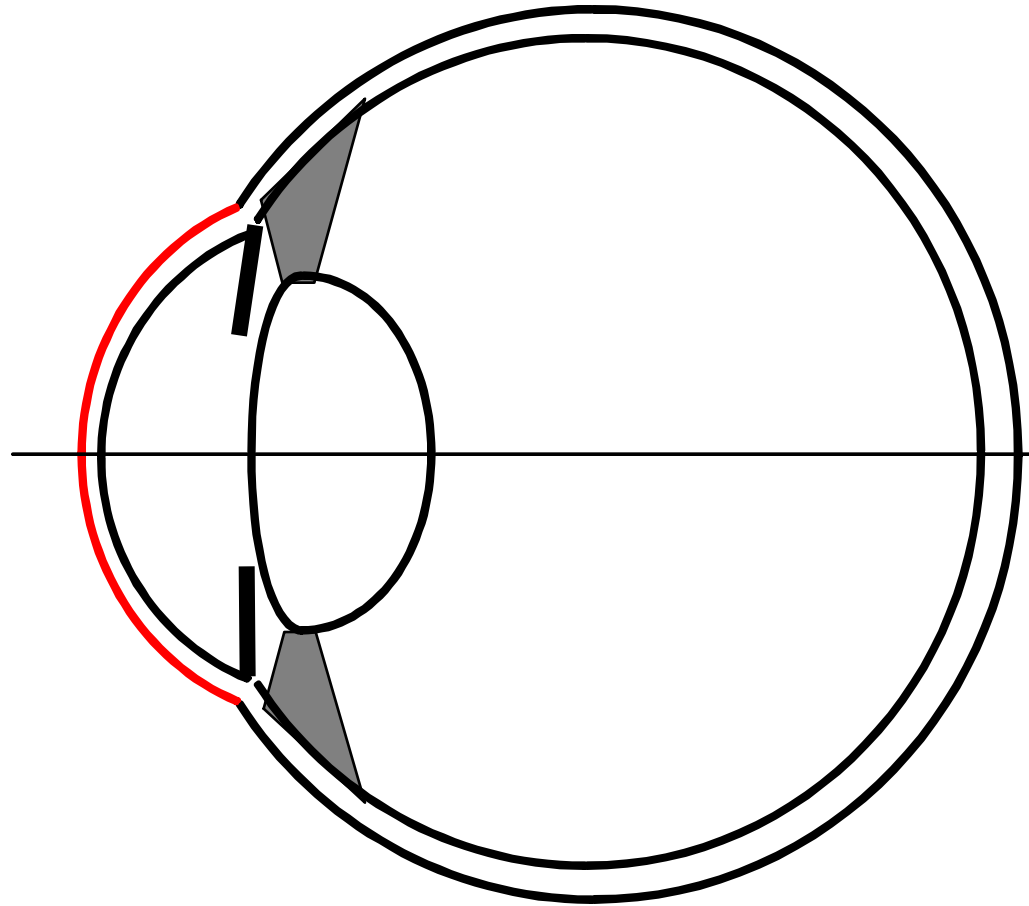
成像面在視
網膜前方
(近視)



人眼的光學結構1 – 角膜

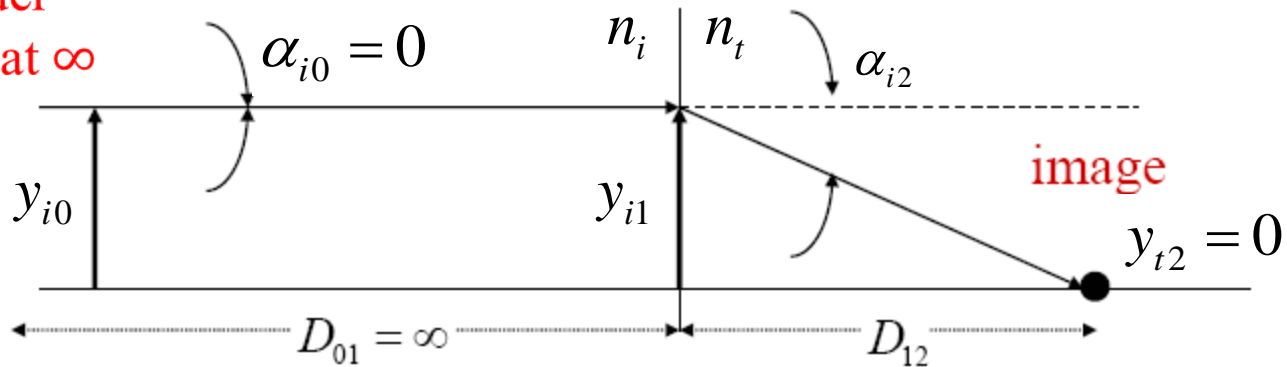
- 角膜的外表面
 - 空氣折射率為1，角膜折射率約為1.376
 - 曲率半徑為 7.7 mm。
 - 此表面的屈光力為

$$\begin{aligned} P &= \frac{n_t - n_i}{R} \\ &= \frac{1.376 - 1}{.0077} \\ &= +48.83 \text{ D} \end{aligned}$$



- 由平行光通過球面聚焦的方程式

Consider
object at ∞



$$\frac{n_t}{D_{12}} = \frac{n_t - n_i}{R} \Rightarrow D_{12} = \frac{n_t R}{n_t - n_i} \equiv f \quad \text{球面的等效焦距}$$

 ~ 50 D

$$f \gg \frac{1.33}{50} \text{ m} \gg 26 \text{ mm}$$

差不多就是眼睛的直徑了

➔ 角膜在眼睛中貢獻最多屈光能力

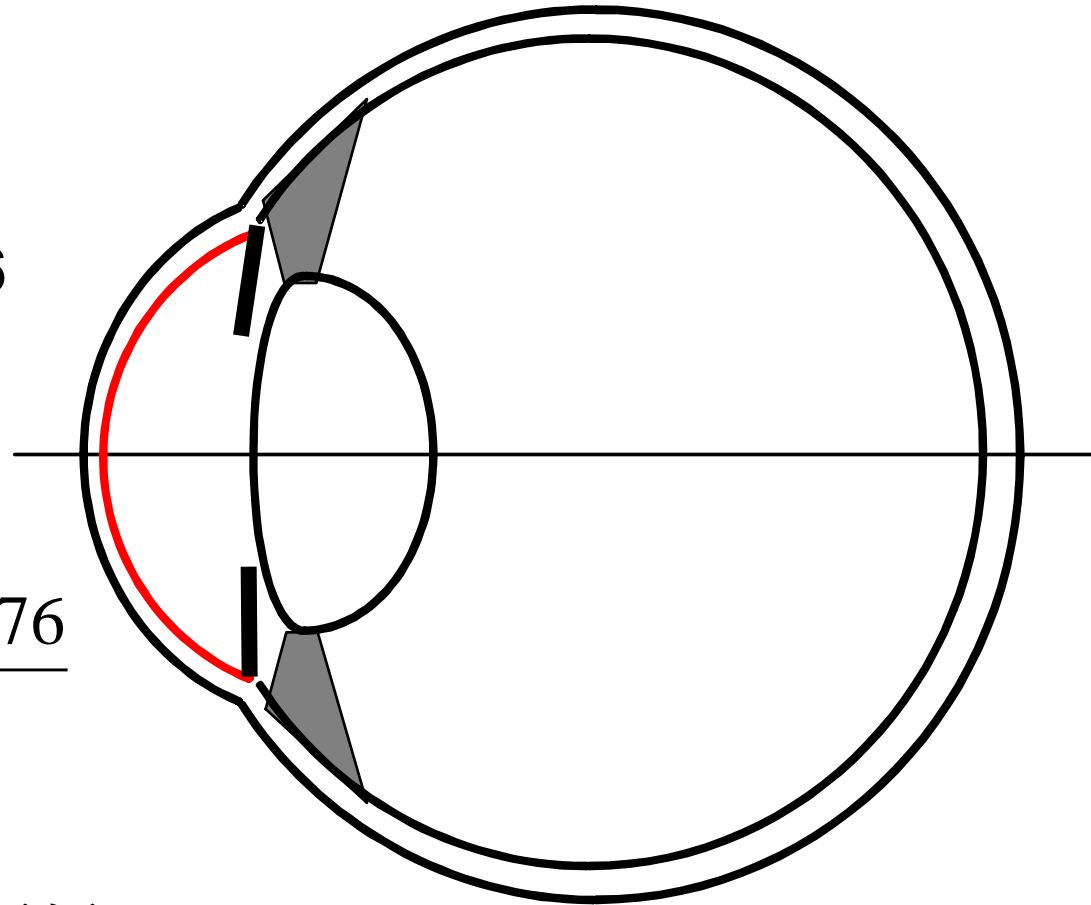
人眼的光學結構1 – 角膜

- 角膜的內表面

- 角膜折射率約 1.376
- 玻璃體折射率約 1.336
- 曲率半徑約 6.8 mm

→ 屈光力:
$$P = \frac{n_t - n_i}{R}$$
$$= \frac{1.336 - 1.376}{.0068}$$
$$= -5.88 \text{ D}$$

因為從高折射率進入低折射率，所以屈光力是負的

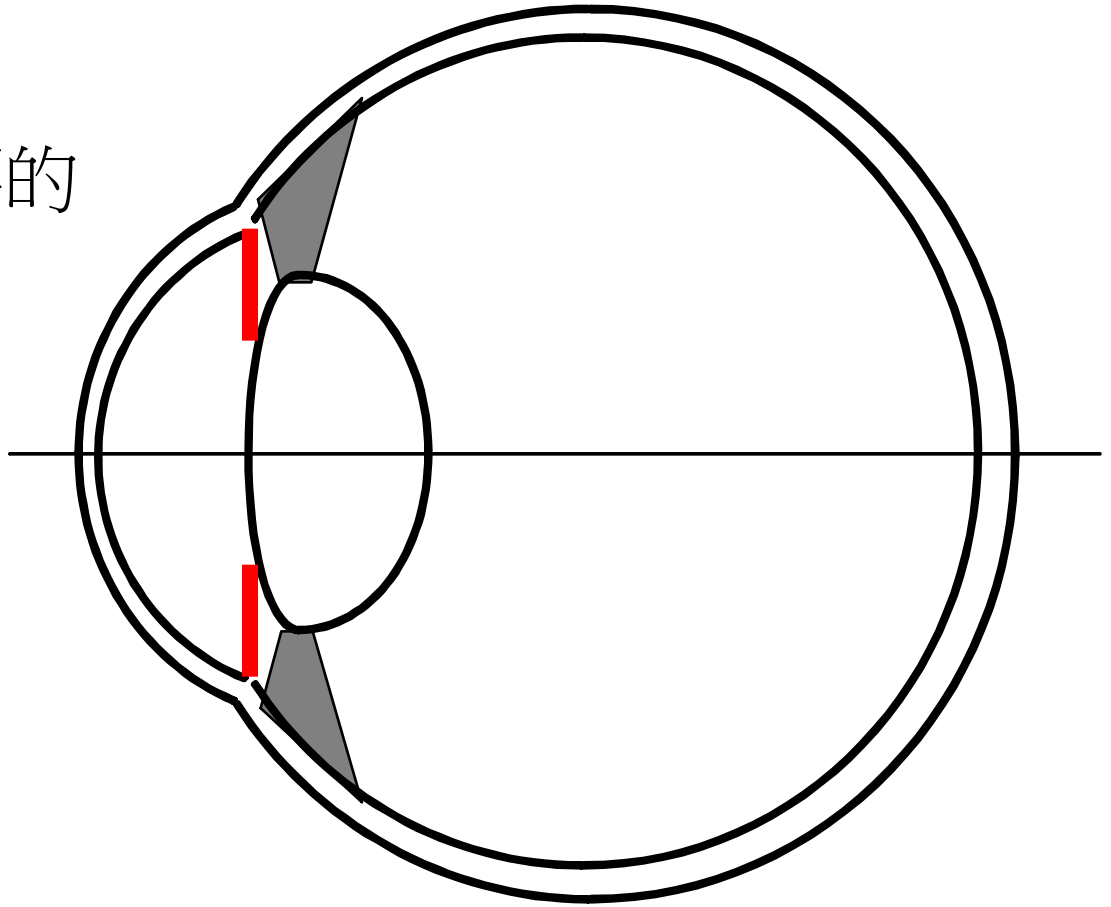


角膜的總屈光力約為 +43 D

人眼的光學結構2 – 瞳孔

先猜猜看瞳孔最主要的功能是？

1. 控制進光量
2. 控制影像品質
3. 改變焦距
4. 造成繞射
5. 其他



自己動手看一看

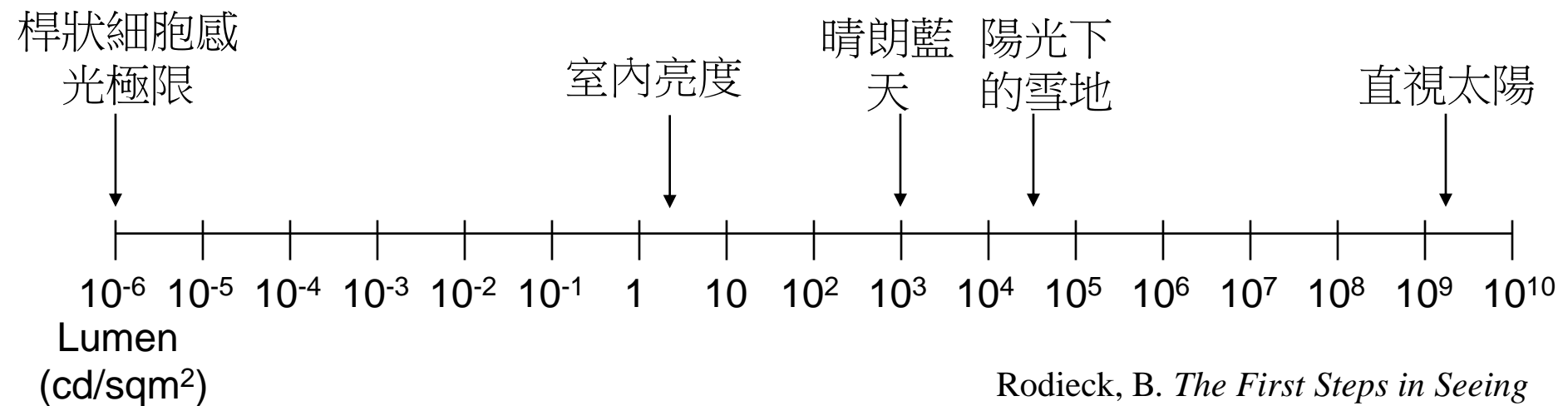
- 找一個表面光滑的湯匙，凹面向下蓋在自己的眼睛上
- 你看到什麼？



wikipedia

環境光亮度範圍 vs. 瞳孔大小

眼睛可看見的光亮度差異非常大，可達 10^{15} ！



- 我們為何可以看到明亮差異度這麼大的環境？
 - 瞳孔雖然可以調整光入射眼睛的量，但是瞳孔大小最多只能由1 mm 變成 8 mm，因此只能調整約兩個數量級
 - 實際上要靠不同的感光細胞來調節

自己在家做實驗

- 那麼，瞳孔到底扮演什麼角色呢？
- 讓我們用這個簡單的實驗來觀察
 - 先找一張白紙，在上面畫一個約五公分見方的十字
 - 將這個十字往眼睛不斷靠近，直到無法對焦，影像變模糊（約**4 – 5**公分，眼鏡不需取下）
 - 此時微微眯眼，請問有哪一條線看起來變清楚？
 - 如果把頭向右轉九十度，哪一條線變清楚？

4-2 瞳孔的作用

4-2

- 瞳孔的作用
 - 光量
 - 景深
 - 視野範圍

生活中的觀察

- 當你看東西不清楚時，直覺的反應是...
- 你有沒有聽過有人說他們平常不需要眼鏡，只有晚上會看比較不清楚？

自己在家做實驗

- 那麼，瞳孔到底扮演什麼角色呢？
- 讓我們用這個簡單的實驗來觀察
 - 先找一張白紙，在上面畫一個約五公分見方的十字
 - 將這個十字往眼睛不斷靠近，直到無法對焦，影像變模糊（約**4 – 5**公分，眼鏡不需取下）
 - 此時微微眯眼，請問有哪一條線看起來變清楚？
 - 如果把頭向右轉九十度，哪一條線變清楚？

實驗結論

- 透過剛剛這個實驗，請問若我們要看得比較清晰，入射眼睛的孔洞直徑（由瞳孔或眼瞼控制）應該要
 1. 盡量大
 2. 盡量小
 3. 大或小都沒有影響

光學入射孔徑大小決定景深

- 就像相機的光圈

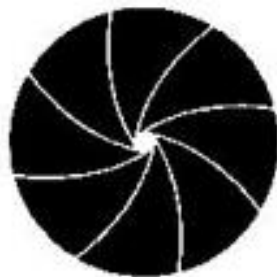
- 光圈大，只有成像面影像清楚。不在成像面的背景就會模糊 – 景深小



f/5.6



- 光圈小，不論是否在成像面，都可以看見 → 景深大



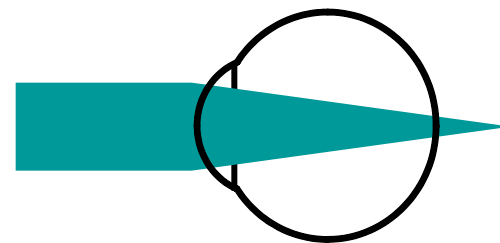
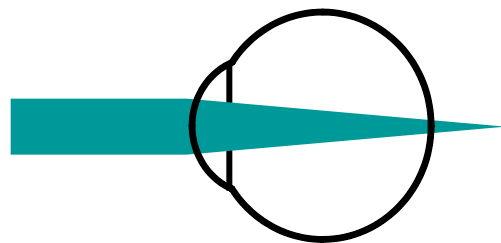
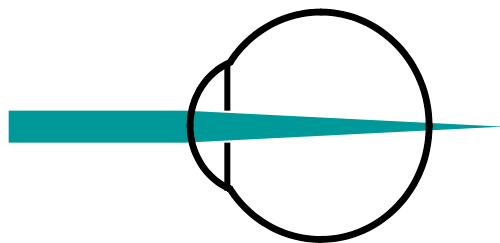
f/32



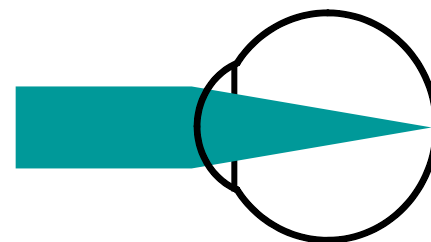
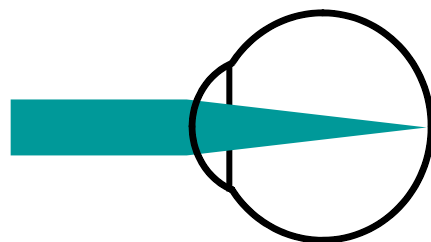
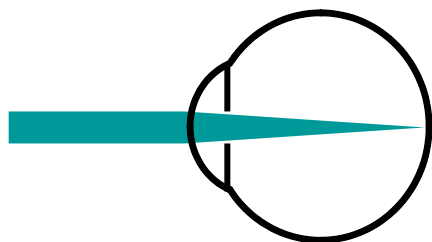
- 景深：可同時清晰成像的物體距離

瞳孔大小和景深的關係

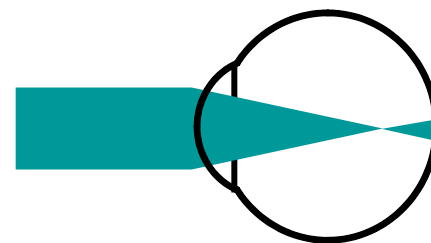
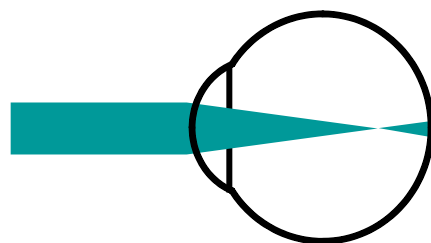
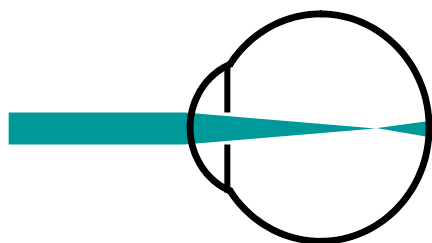
成像面在視
網膜後方
(遠視)



成像面在視
網膜上
In focus



成像面在視
網膜前方
(近視)



瞳孔 2 mm

瞳孔 4 mm

瞳孔 6 mm

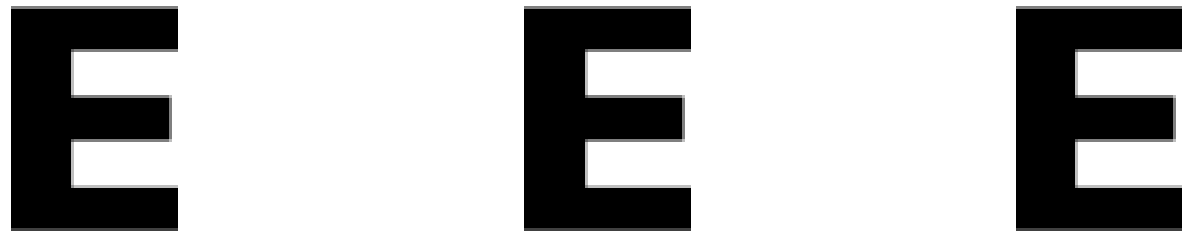
瞳孔大小和景深的關係

成像面在視
網膜後方
(遠視)



視網膜不在成像面上時，瞳孔越小，成像越清楚

成像面在視
網膜上
In focus



視網膜在完美對焦的成像面，瞳孔影響不大

成像面在視
網膜前方
(近視)

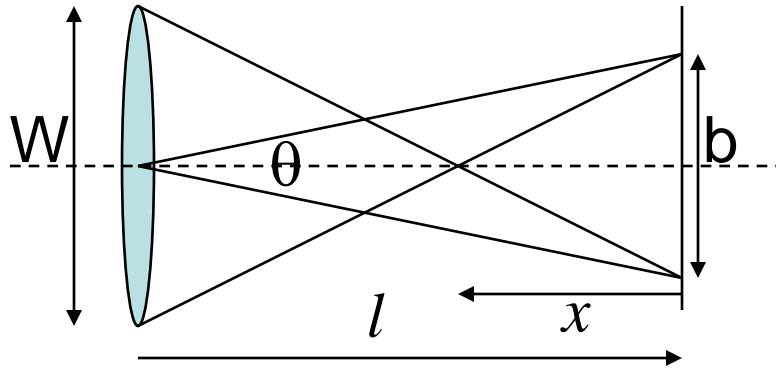


瞳孔 2 mm

瞳孔 4 mm

瞳孔 6 mm

幾何光學計算成像到底多模糊



W : 瞳孔大小

θ : 視角

l : 等效薄透鏡到視網膜距離

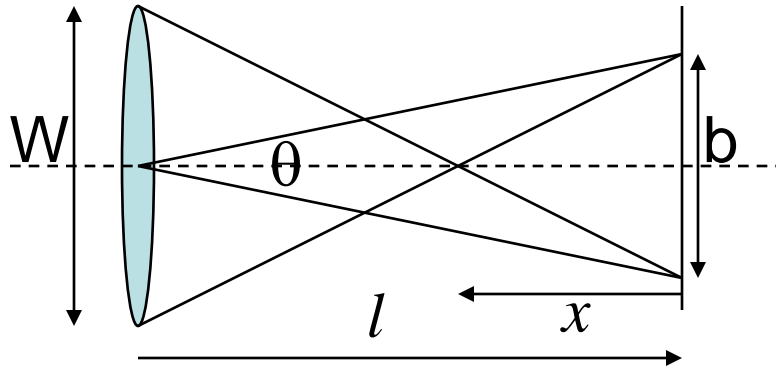
x : 理想成像面到視網膜距離

b : 視網膜上成像大小

- 模糊就是問視角變多大
 - 考慮一個遠方的點光源（例如星光）
 - 若視網膜就在理想成像面 ($x = 0$)，視角 $\theta \rightarrow 0$
 - 若視網膜不在理想成像面，由上圖可知

$$\frac{W}{l-x} = \frac{b}{x} \approx \frac{l\theta}{x}$$

幾何光學計算成像到底多模糊



W : 瞳孔大小

θ : 視角

l : 等效薄透鏡到視網膜距離

x : 理想成像面到視網膜距離

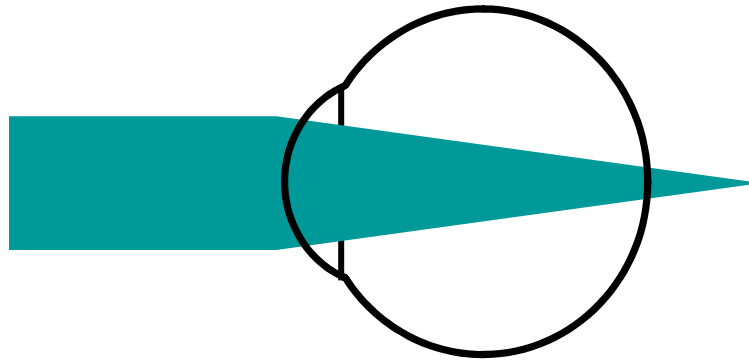
b : 視網膜上成像大小

— 若視網膜不在理想成像面

$$\theta = \frac{Wx}{l^2 - lx} = W \left(\frac{x - l + l}{l(l - x)} \right) = W \left(\frac{l}{l(l - x)} - \frac{l - x}{l(l - x)} \right)$$
$$= W \left(\frac{1}{l - x} - \frac{1}{l} \right) = WD$$

失焦係數 D (單位為 diopters)

瞳孔大小與成像模糊的定量關係

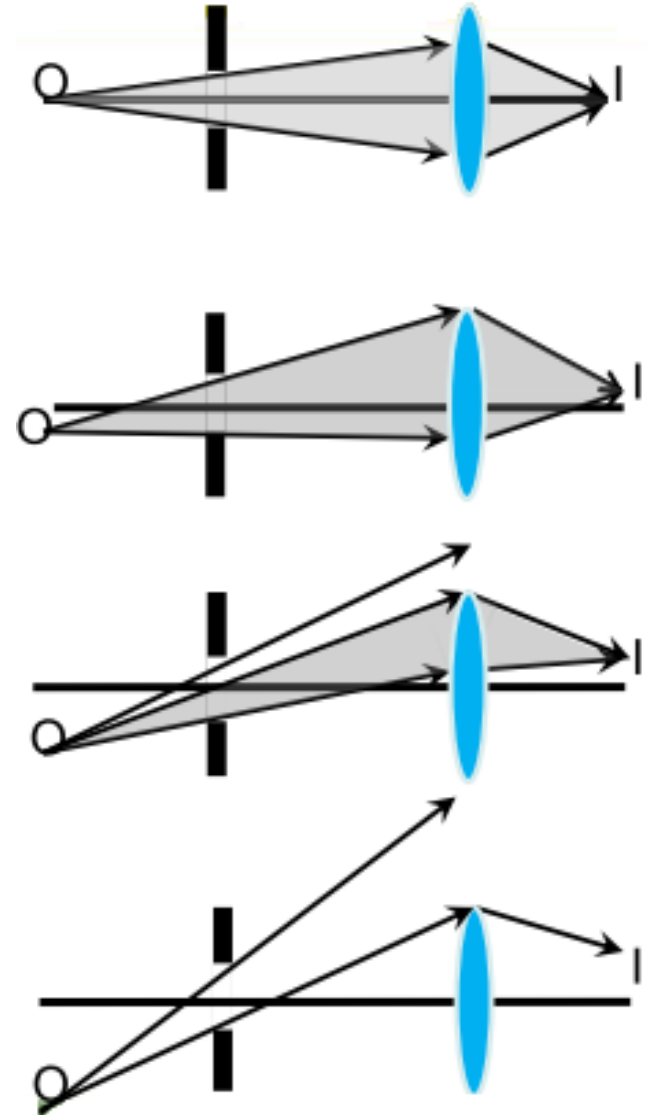


模糊程度 (視角大小[mrad])
= 瞳孔直徑 W [mm] x 失焦係數 D [diopter]

- 1 diopter失焦，瞳孔為 8 mm 時，點光源的模糊程度為 8 mrad ~ 0.5 degrees
 - 遠方的星光看來會和月亮一樣大！

孔徑欄 (aperture stop)

- 控制入射光直徑的孔洞
 - 可影響進光量
 - 影響景深
 - 影響視野範圍 (field of view)
 - 漸暈 (vignet)



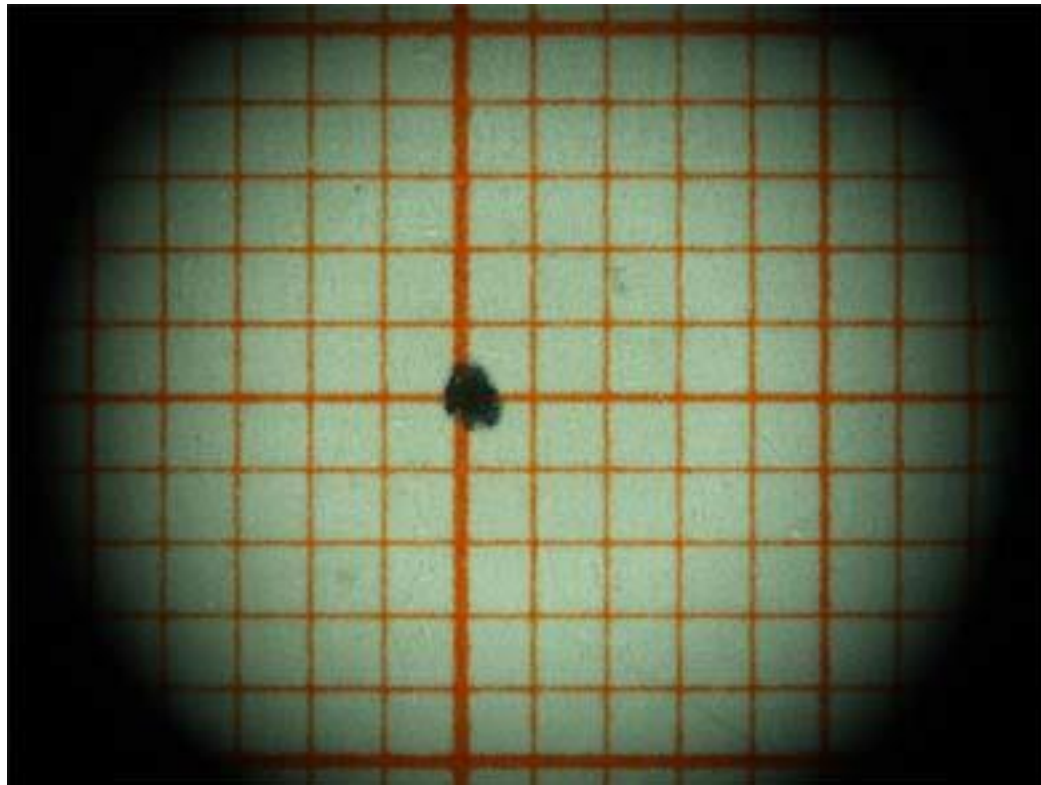
視野範圍與漸暈

- 影像外圍進光量減少 → 漸暈



視野範圍與漸暈

- 孔徑不夠大或位置不好的話，視野範圍受限
- 漸暈也可以同時觀察到



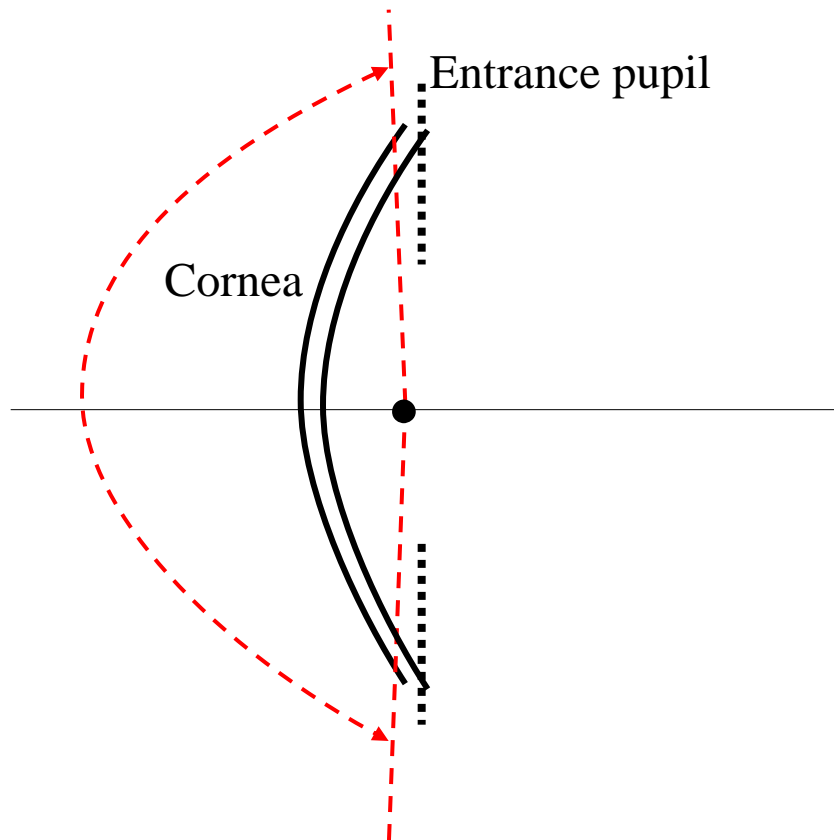
From: eigenes Bild

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Randabschattung_Mikroskop_Kamera_6.JPG

瞳孔是一個位置非常好的孔徑欄

使眼睛的視野最大化

非常寬的
視野範圍



視野範圍：由入射
孔徑的中心連結到
成像孔徑(視網膜)
邊緣的角度

隨堂測驗

- 請問下面哪一個眼睛的部分對眼睛的屈光能力貢獻最大？
 1. 眼角膜 (cornea)
 2. 虹膜 (iris)
 3. 水晶體 (lens)
 4. 玻璃體 (vitreous body)
 5. 視網膜 (retina)

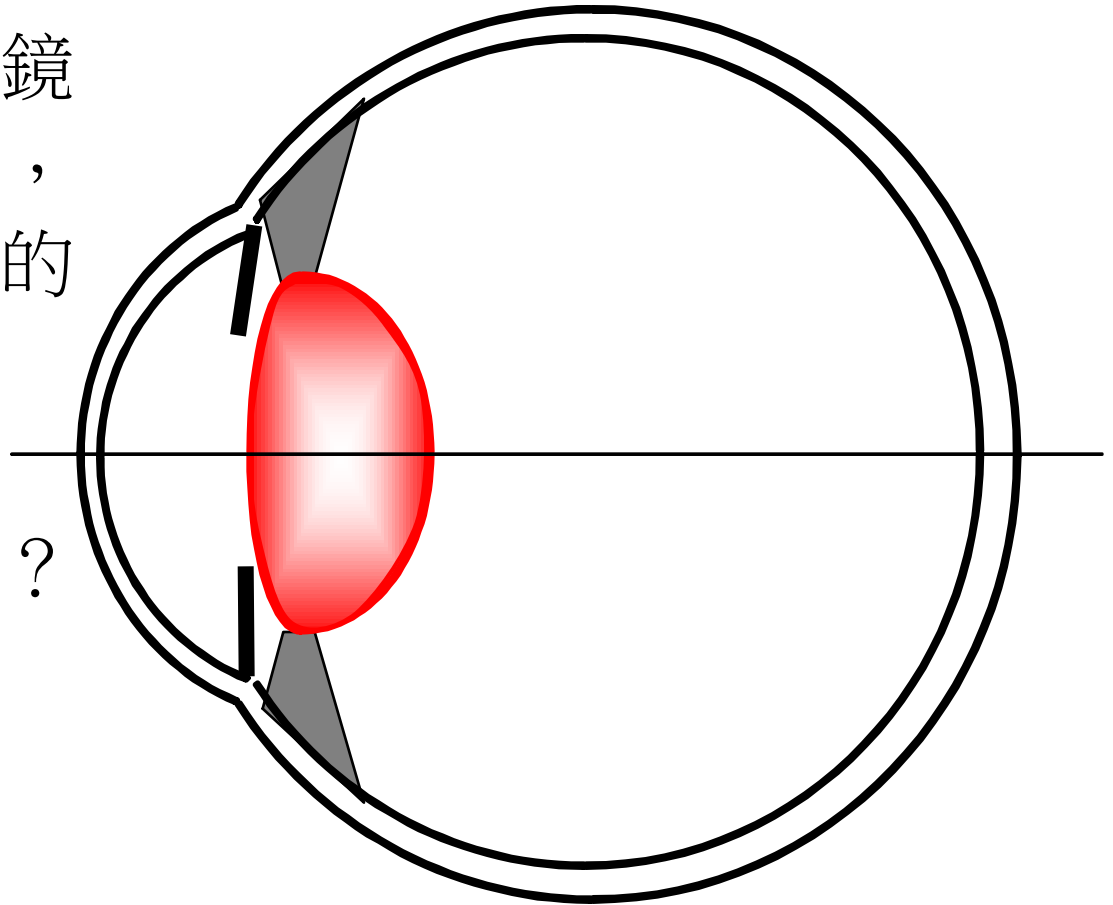
4-3 水晶體與玻璃體

4-3

- 水晶體
 - 屈光力
 - 調適作用
- 玻璃體
 - 穿透光譜

人眼的光學結構3 – 水晶體

- 基本上就是一顆透鏡
- 由於透鏡浸在水中，
因此表面折射造成的
屈光很小
- 要如何增加屈光力？

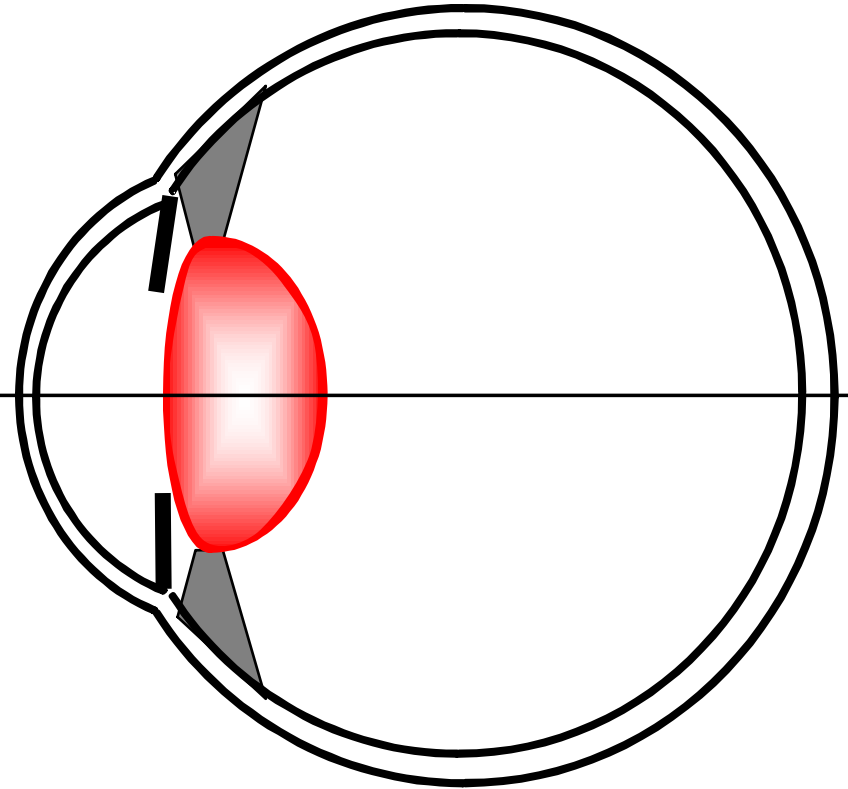


示範實驗

- 把（塑膠）凸透鏡浸在水中與油中，會使屈光能力大幅降低
 - － 甚至可使此透鏡由聚焦變成發散

人眼的光學結構3 – 水晶體

- 具有折射率漸層
 - 表面 $n = 1.385$
 - 上下兩端 $n = 1.375$
 - 中心 $n \sim 1.41$
- 主要是靠折射率漸層來造成屈光效應
- 還記得2-2講中提到的梯度透鏡嗎
- 若是一個均勻透鏡，其材料的折射率要比漸層的最大折射率還大才能得到一樣的屈光度
- 透鏡的屈光度為 20 - 30 D

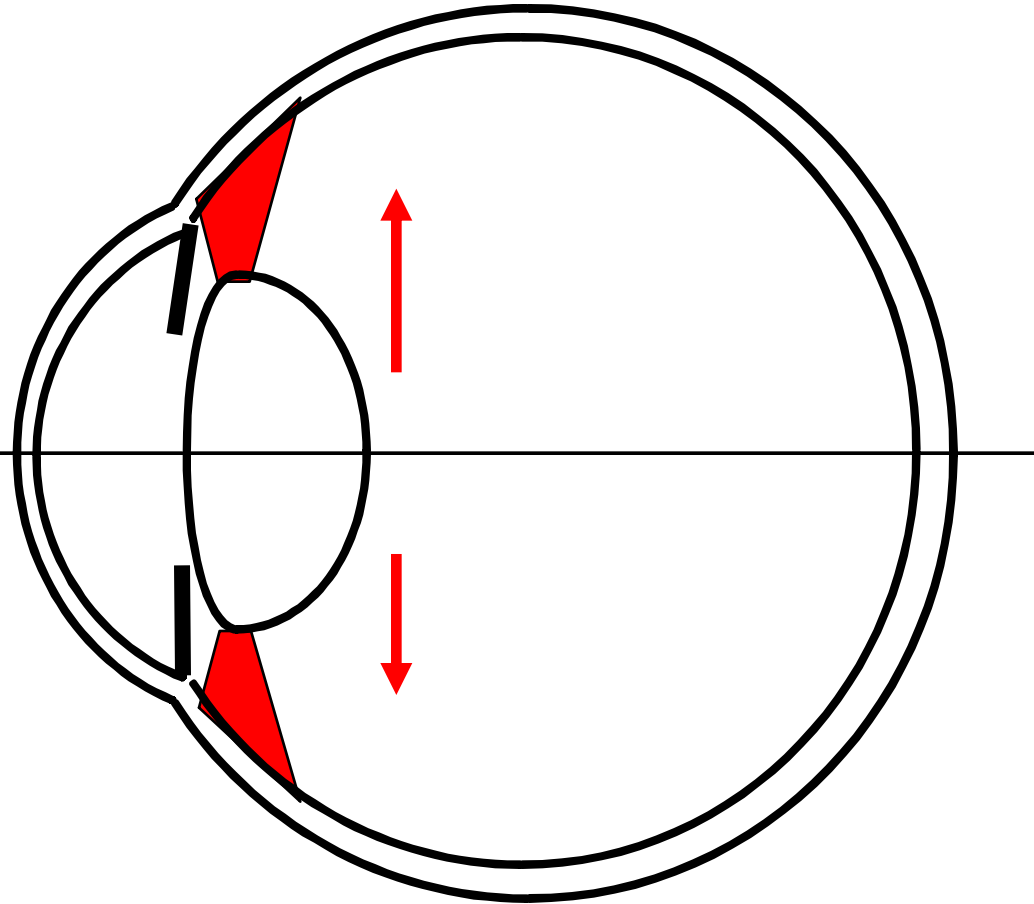


常識測驗

- 當我們看哪裡的時候，眼睛會呈現所謂的「放鬆」狀態？
 1. 近處的物體
 2. 遠處的物體
 3. 電腦螢幕
 4. 夢中情人

人眼的光學結構3 – 水晶體與睫狀體

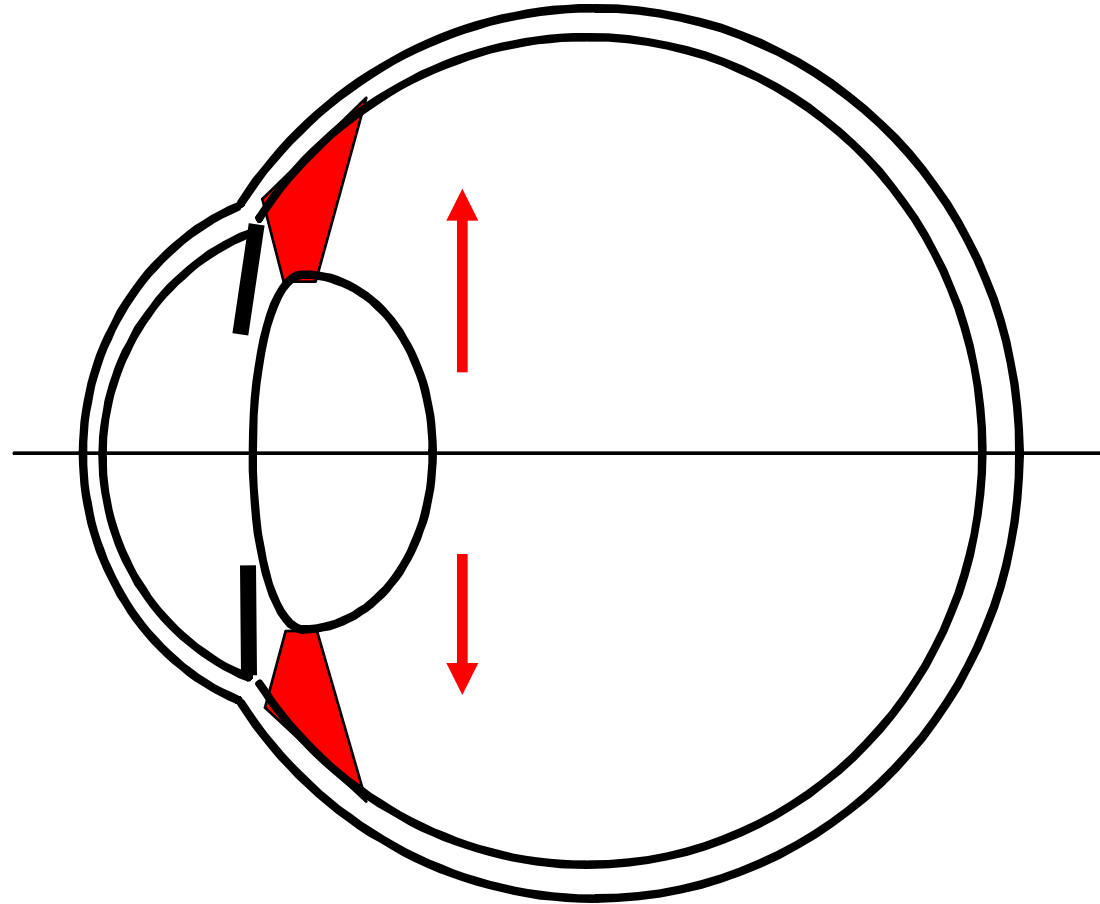
- 調適作用
(accommodation)
 - 透過睫狀肌ciliary muscle 與懸纖維zonule fiber 的交互作用調整水晶體屈光度



人眼的光學結構3 – 水晶體與睫狀體

• 放鬆的眼睛

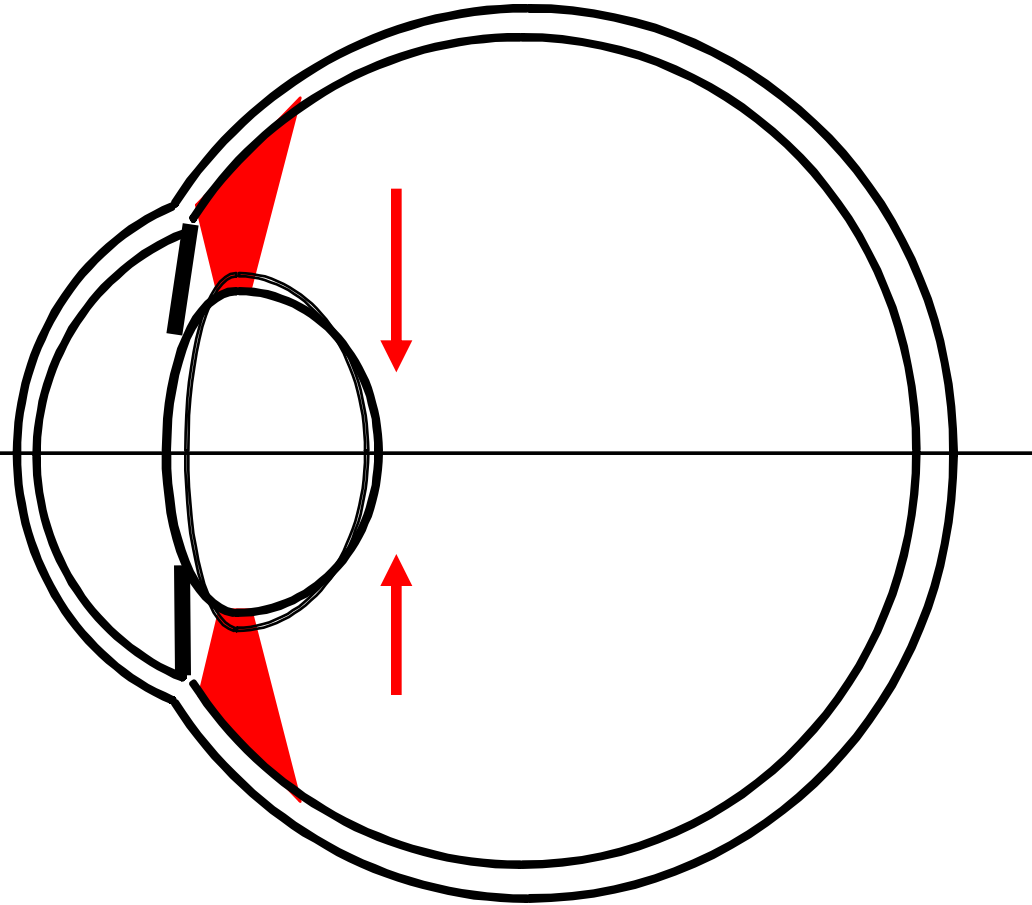
- 指的是睫狀肌放鬆
- 但此時懸纖維 **zonule fiber** 收緊
- 水晶體變平，屈光力較低，約 **21D**
- 適合看遠方物體



人眼的光學結構3 – 水晶體與睫狀體

• 調適的眼睛

- 睫狀肌收緊
- 懸纖維放鬆
- 水晶體曲率增加，屈光力較高，約 32D
- 適合看近處物體

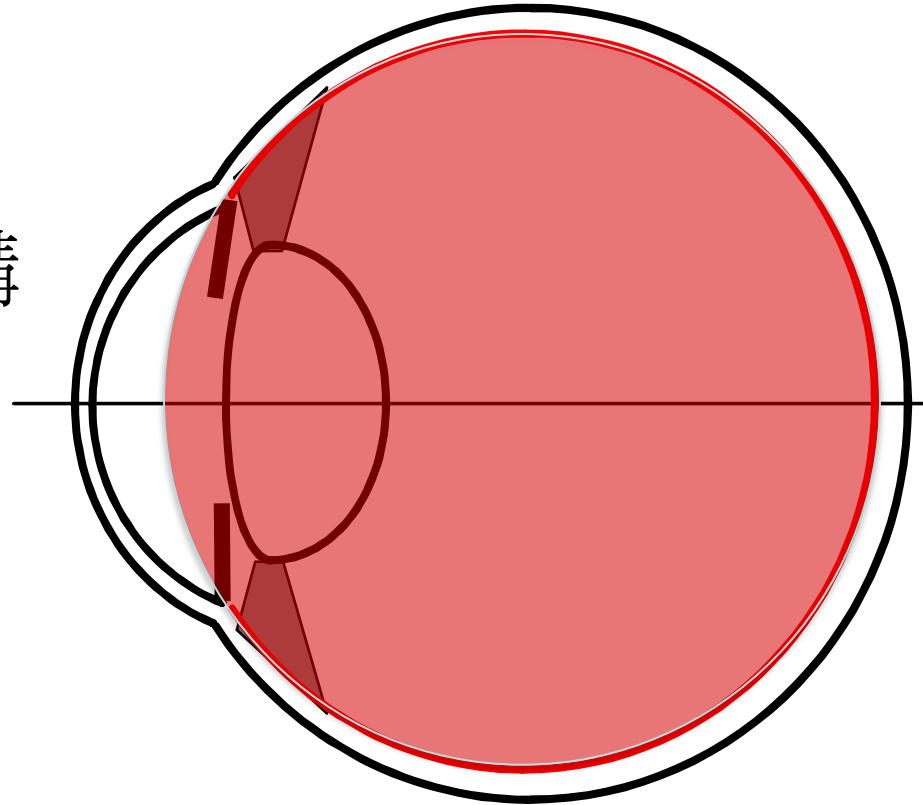


近點 (Near point)

- 能看清物體的最小距離
 - 用一把尺量一下自己的近點距離眼睛多遠？
 - 這個距離通常會隨年齡而上昇
 - 10 歲 → 7 cm
 - 40 歲 → 22 cm
 - 60 歲 → 100 cm (老花)
 - 猜猜看老花的成因是眼睛的哪一部份老化？

人眼的光學結構4 – 玻璃體

- 99%由水組成
- 提供眼壓，支撐結構



玻璃體的穿透光譜

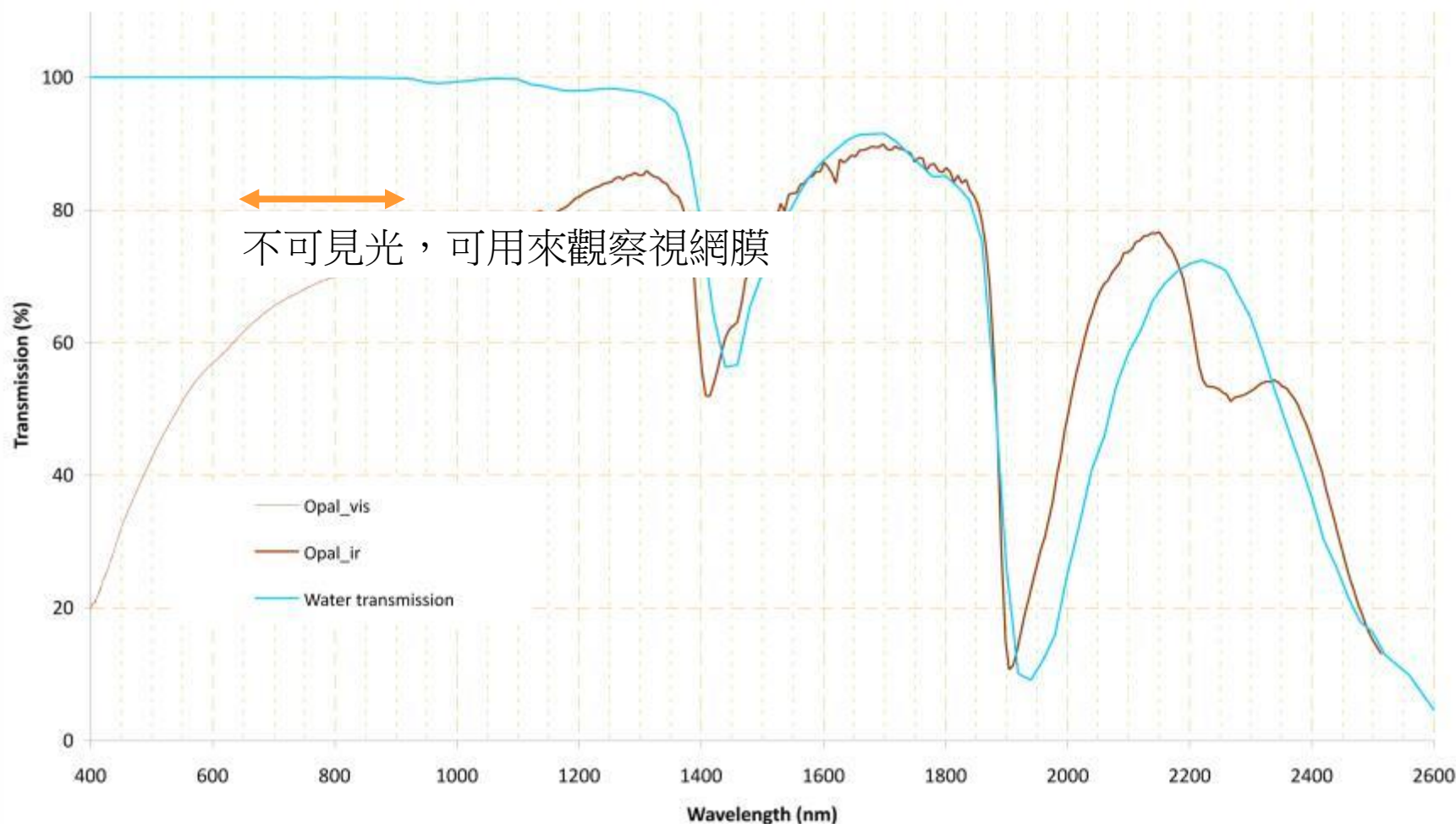
- 因為版權問題，不能將玻璃體的穿透光譜放上來給同學看，因此我們放了水的穿透光譜做為替代。

有關玻璃體的穿透光譜，同學可以到以下網址觀看！

<http://www.iovs.org/content/1/6/776>

水的穿透光譜

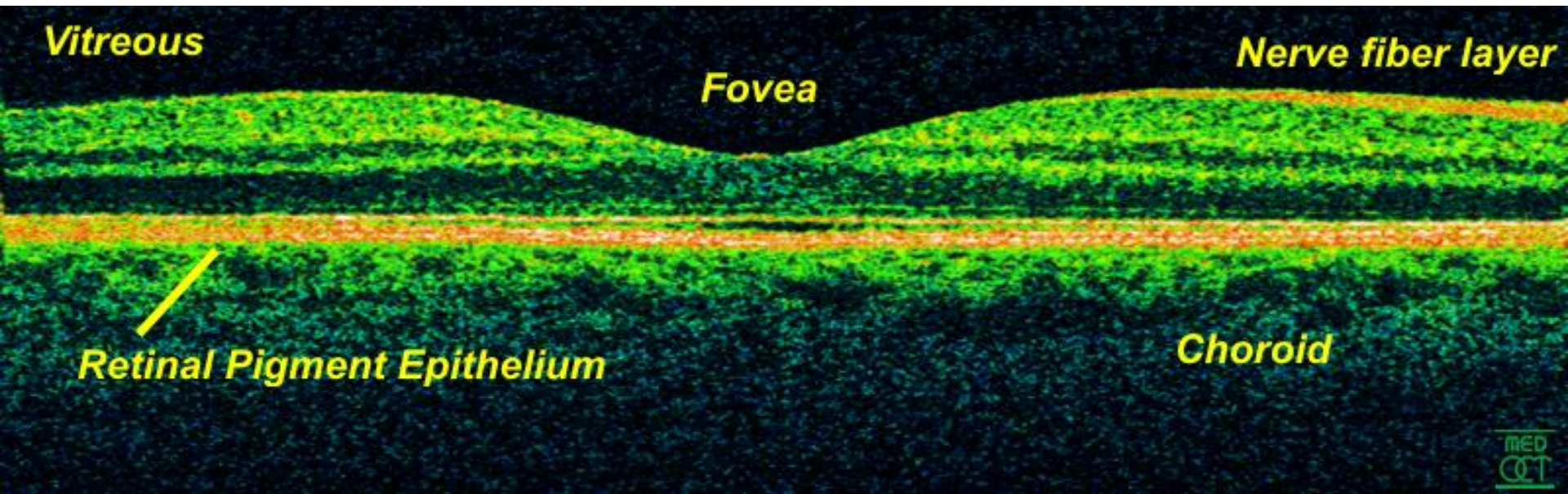
Opal (1.4mm thick), visible-infrared transmission; RAEF, 31 August 2011
Liquid water comparison (200 μ m)



不可見光，可用來觀察視網膜

視網膜成像

- 光學同調斷層影像
 - 用800 nm的雷射光非侵入式觀察
 - 下一講介紹



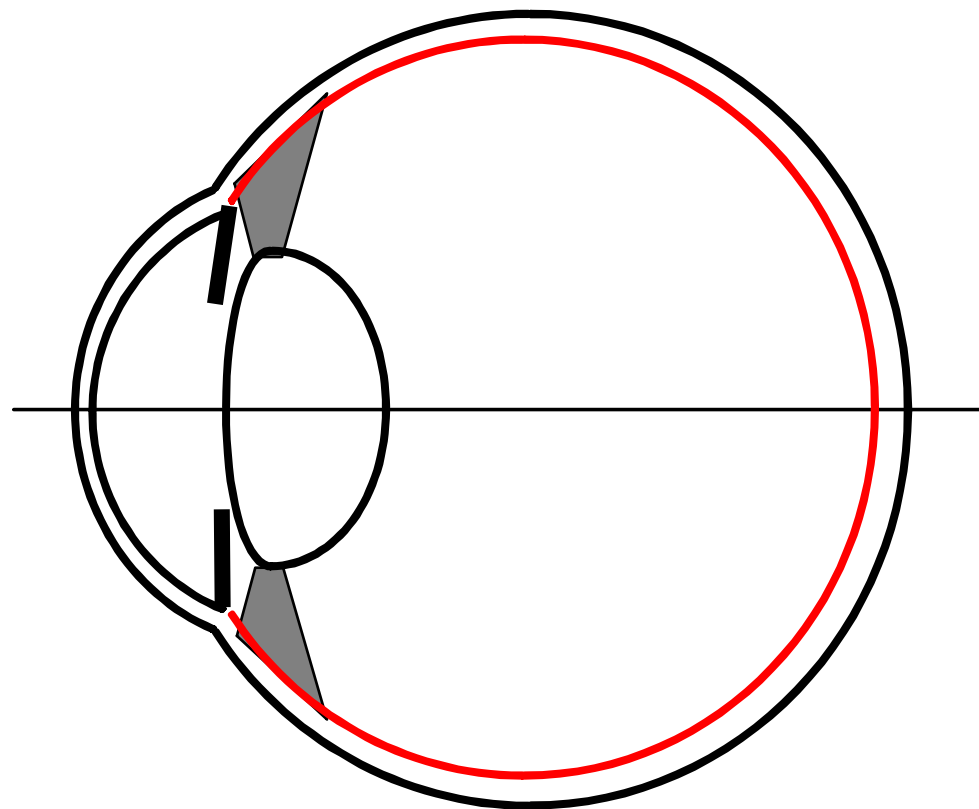
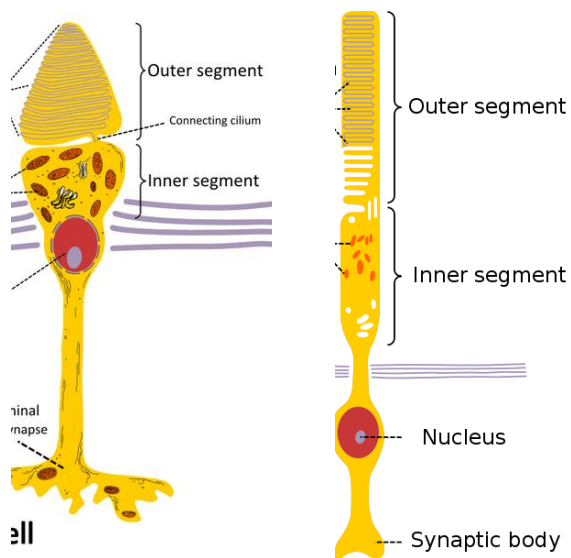
隨堂測驗

- 請問當我們看遠方的時候，下列何者正確？
 1. 睫狀肌放鬆，懸纖維拉緊，水晶體變胖
 2. 睫狀肌拉緊，懸纖維放鬆，水晶體變胖
 3. 睫狀肌放鬆，懸纖維拉緊，水晶體變瘦
 4. 睫狀肌拉緊，懸纖維放鬆，水晶體變瘦

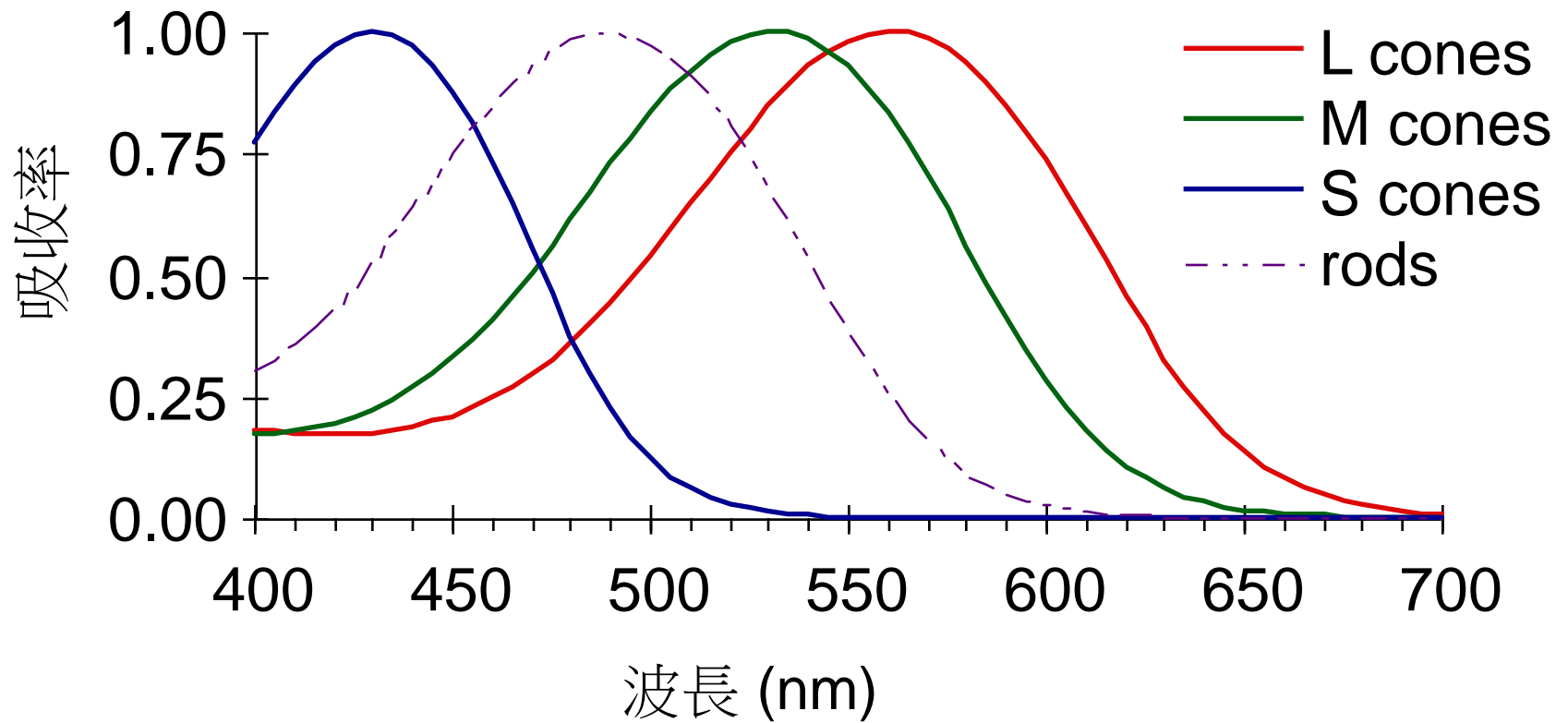
4-4 視網膜

人眼的光學結構5 – 視網膜

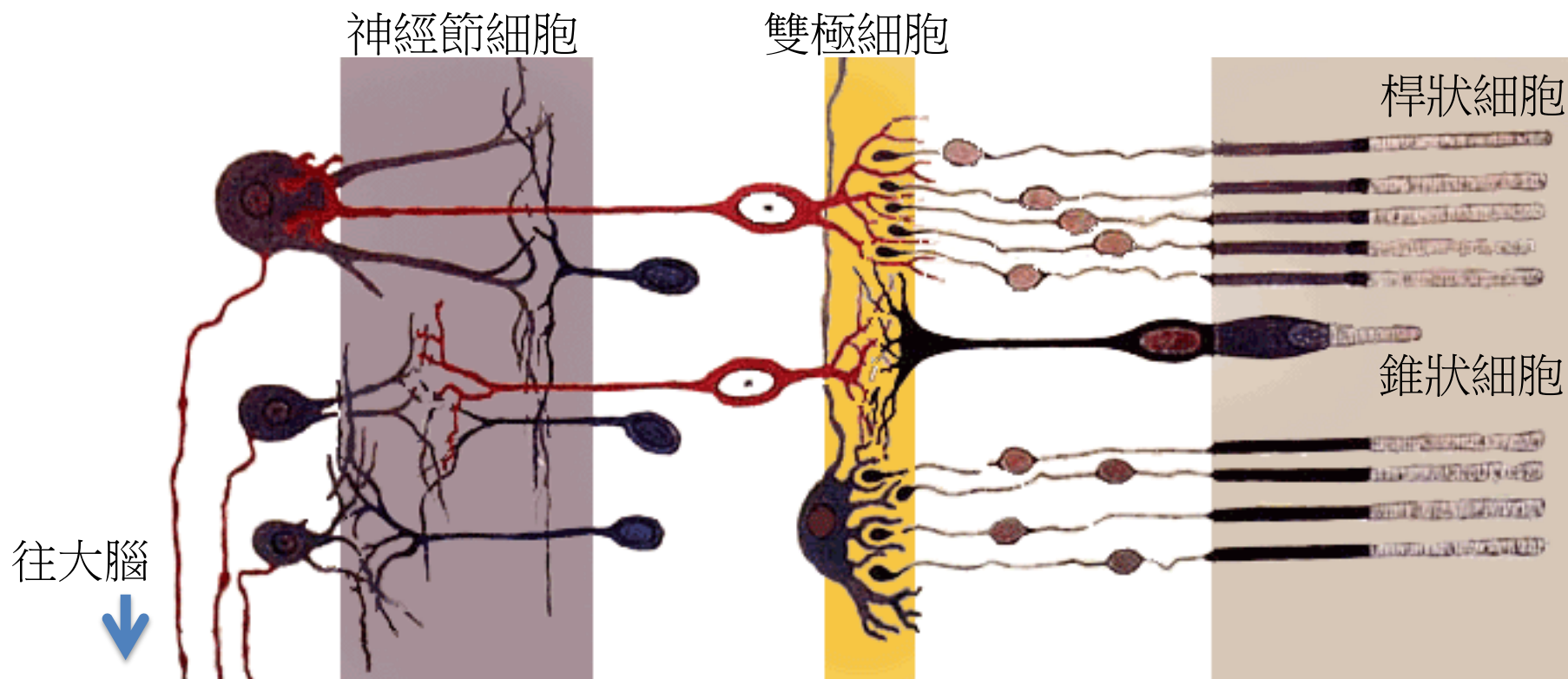
- 由非常多的錐狀細胞和桿狀細胞組成
- 接收影像光線產生電訊號送到大腦成像



感光細胞的吸收光譜



視網膜的分層結構



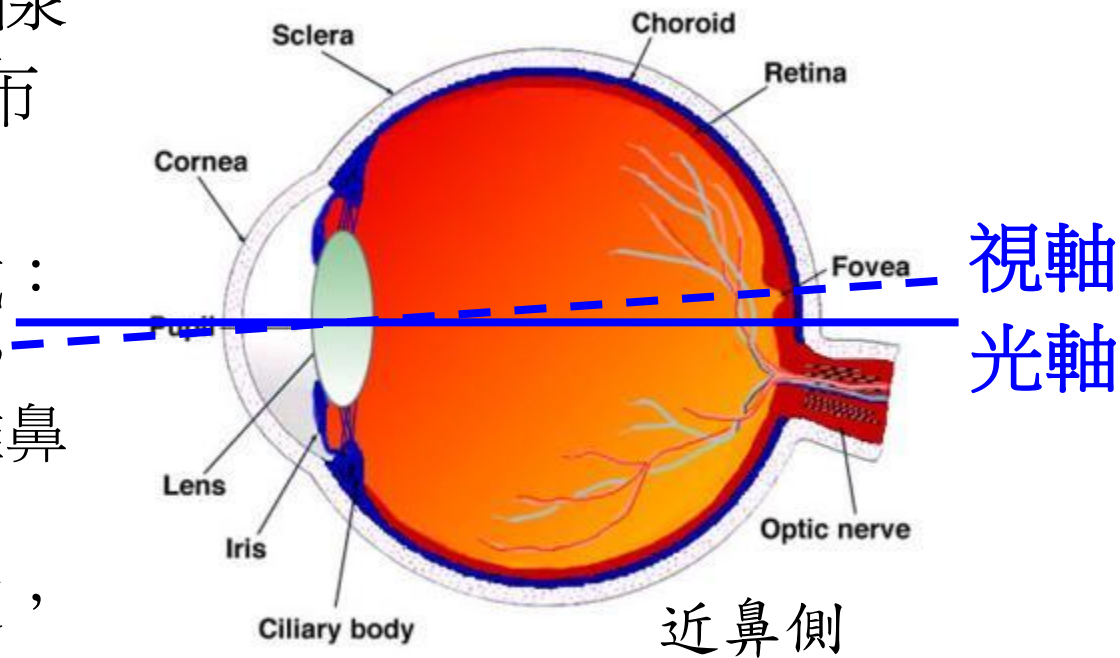
- 光由左方入射
- 感光細胞藏在一堆神經細胞後面

人眼的光學結構5 – 視網膜

- 雖然作用相當於相機的底片或CCD，但是有兩個地方不一樣

1. 感光元件的分布不均勻

- 密度最高的區域：中心窩 (fovea)，約在光學軸遠離鼻側五度處
- 此處視覺最清楚，稱為視軸

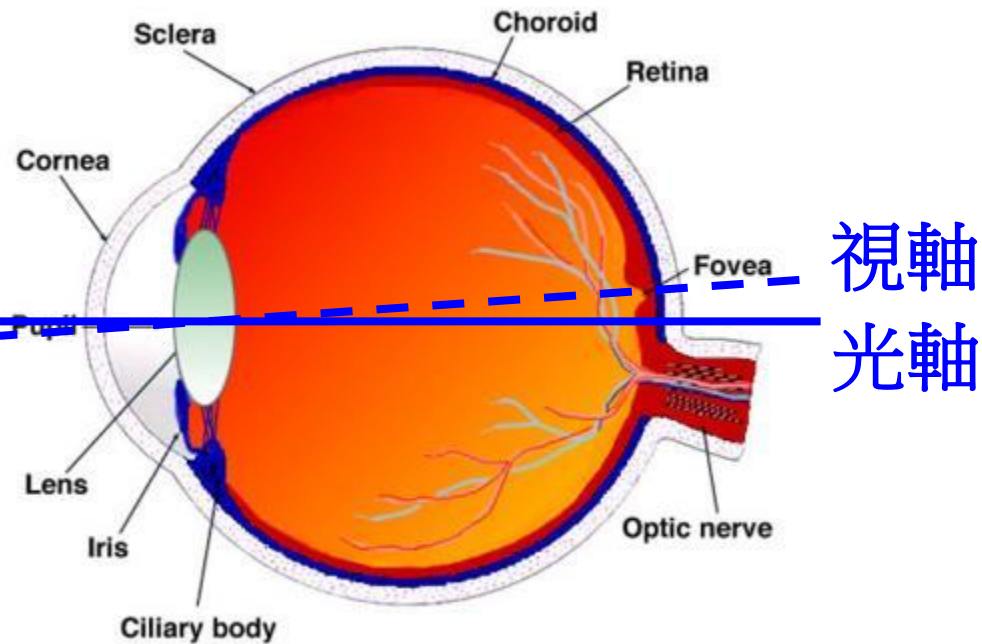


人眼的光學結構5 – 視網膜

- 雖然作用相當於相機的底片或CCD，但是有兩個地方不一樣

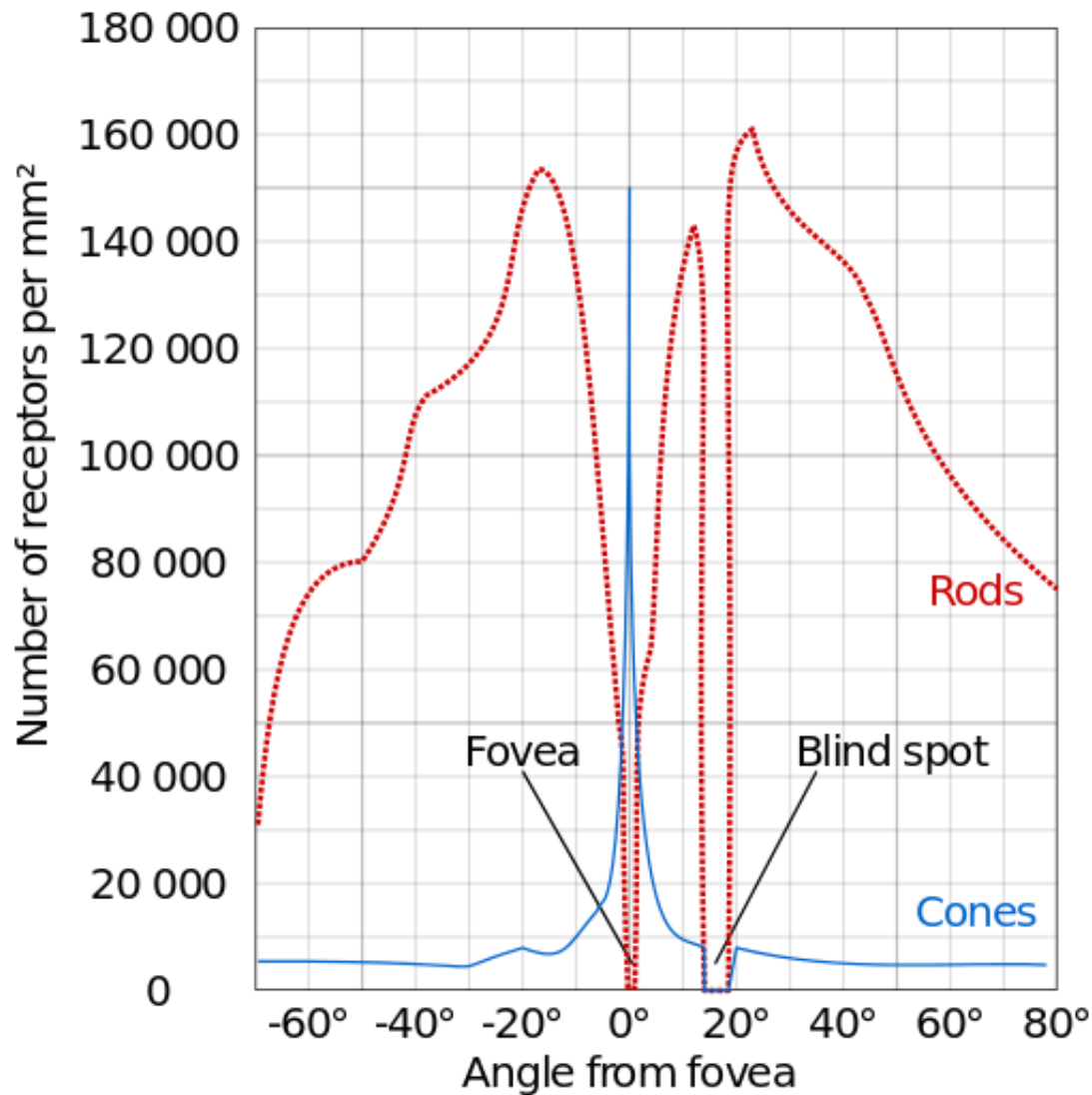
2. 有一區完全看不到東西：

- 盲點 (optic disc) :
約在光學軸靠近鼻側十度處
- 往大腦的視神經集結處
- 和中心窩差距視角十五度



視軸
光軸

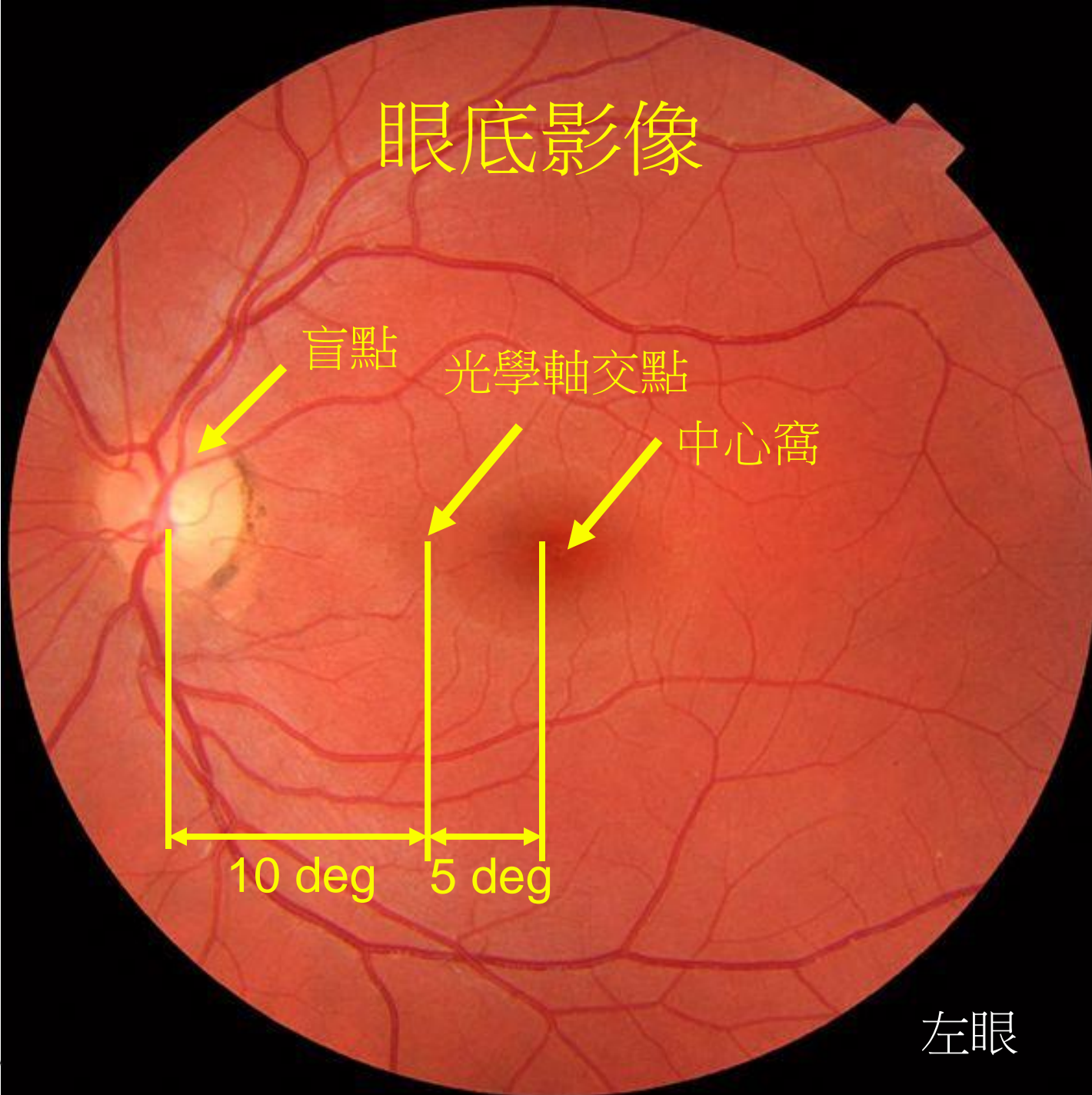
感光細胞的空間分布



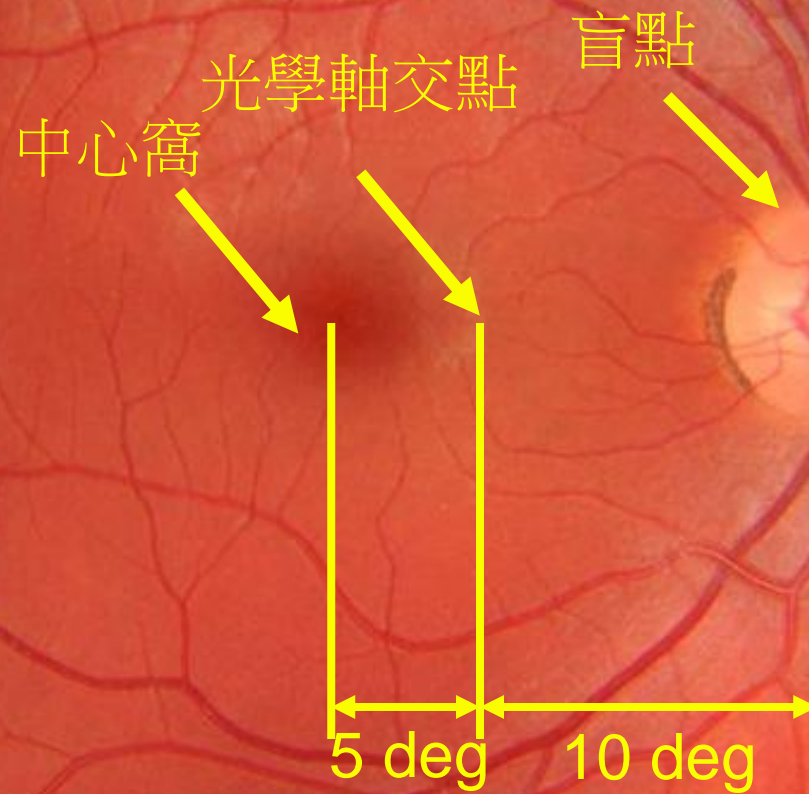
From: Cmglee

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_photoreceptor_distribution.svg

眼底影像



眼底影像



右眼

找出自己的盲點！

- 閉上左眼，讓右眼和電腦的距離大約是紅線的三到四倍長。依字母序用右眼輪流專心看，在哪一個字母的時候，會看不到旁邊的大黑點？

a	b	c	d	e	f	g	h
i	j	k	l	m	n	o	p
q	r	s	t	u	v	w	x



閉右眼睜左眼



a	b	c	d	e	f	g	h
i	j	k	l	m	n	o	p
q	r	s	t	u	v	w	x

視網膜的結構

- 脊椎動物的眼睛結構都是大同小異
 - 視網膜上感光細胞在最後面，而不是在前面。
 - 這就像是在相機的底片上加一片霧面玻璃，應該不是一個好的光學設計
 - 頭足類動物的視網膜感光細胞就在神經細胞前面，所以不會有盲點
 - 可能的原因：
 1. 讓視網膜獲得比較好的血流供應
 2. 對小動物來說，可以節省空間

1. <http://www.photobiology.info/Rozanowska.html>
2. Kröger RH, Biehlmaier O, “Space-saving advantage of an inverted retina”. *Vision Res.* **49**, 2318–21 (2009)

4-5 眼睛的簡化光學模型,視角, 大腦對視覺成像的影響

眼睛的簡化光學模型

- 將眼睛簡化成兩個球體的結合，屈光力集中在角膜
- 球面成像方程式 $\frac{n_t}{D_{12}} + \frac{n_i}{D_{01}} = \frac{n_t - n_i}{R}$
- 設計要使得平行光入射可以聚焦在視網膜上

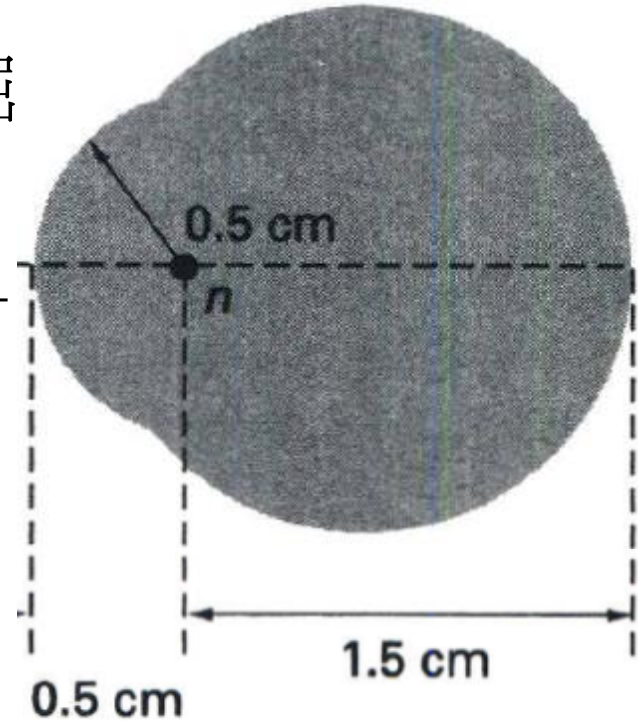
D_{01} = 無限大 (平行光入射)

$R = 0.5 \text{ cm}$ (角膜球面曲率半徑)

$n_i = 1$ (空氣)

$n_t = 1.33$ (水)

→ $D_{12} = 20 \text{ mm}$

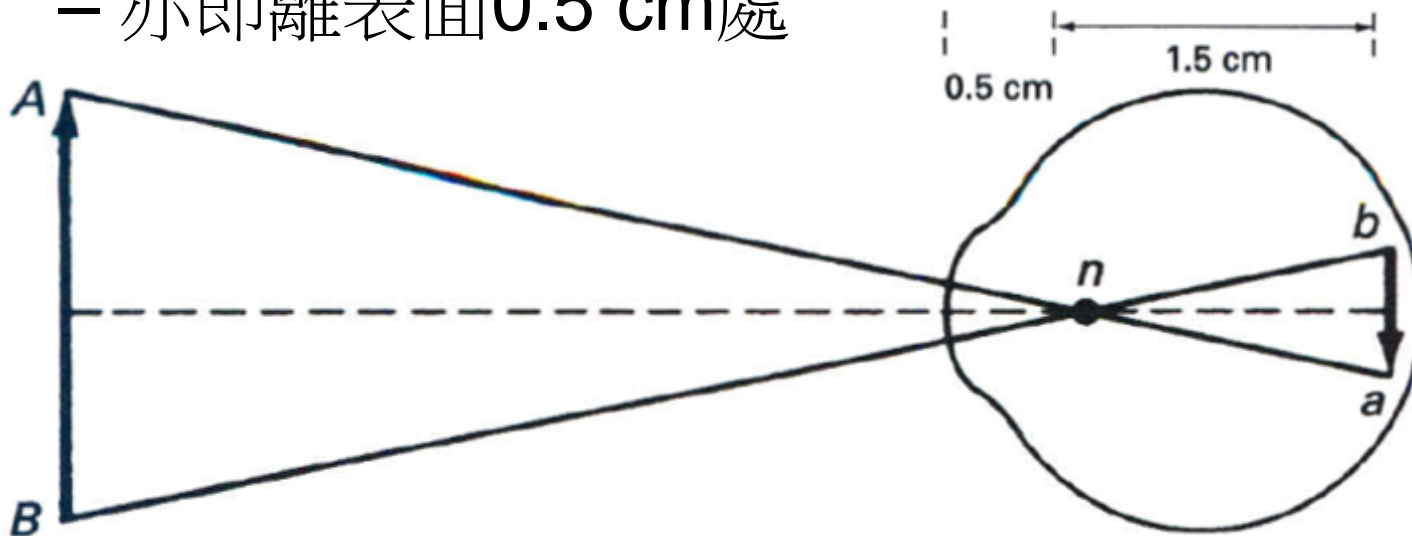


眼睛的簡化光學模型

- 此簡化模型的屈光度為 $\frac{n_t - n_i}{R} = \frac{1.33 - 1}{0.005} = 66D$
- 和角膜與水晶體的屈光度總和相當

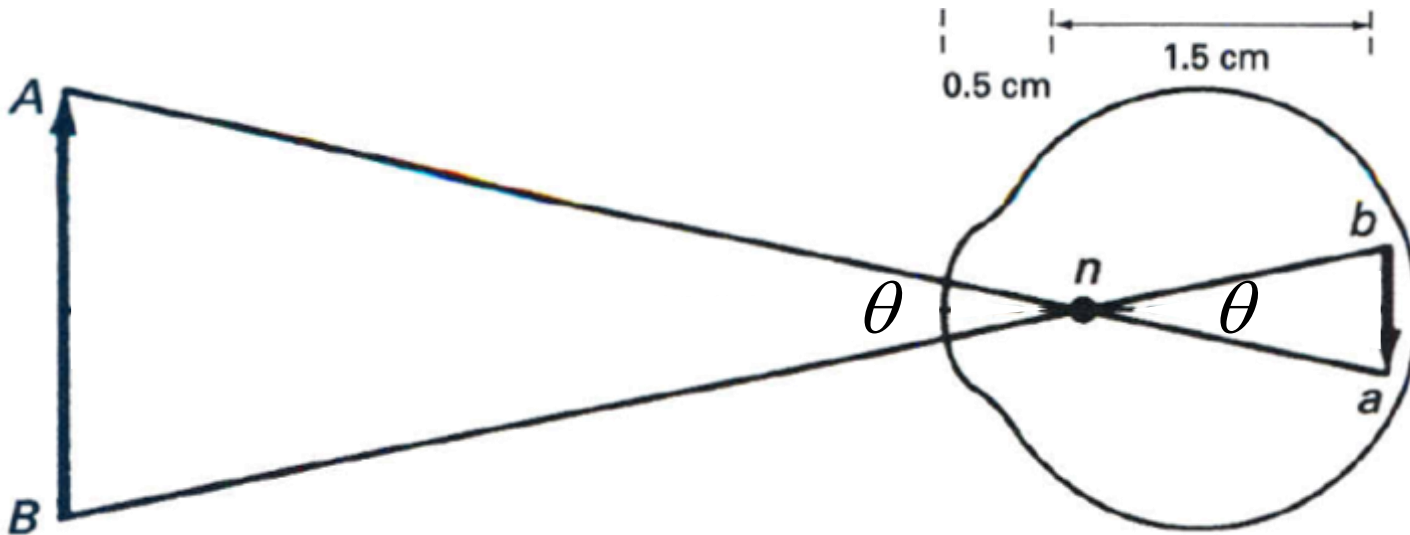
簡化眼睛模型的節點

- 節點：入射角 = 出射角
 - 相當於角膜折射球面的球心
 - 亦即離表面0.5 cm處



視角以及影像尺寸

- 若在視網膜上成像大小為 1 mm $\Rightarrow \tan \theta \approx \frac{1}{15}$
- 相當於視角 $\theta = 1/15 = 0.067 \text{ rad} = 3.8^\circ$
- 1° 視角，相當於視網膜上的像為 $263 \text{ } \mu\text{m}$



角度的單位

- 通常用弧度radian
 - 1 弧度 = 57.29 度
 - 你/妳知道為什麼弧度是很好用的角度單位嗎？
 - 長度 \times 弧度 = 弧長
 - 在角度很小時，可以用弧分或是弧秒
 - 1 度 = 60 弧分 = 3600 弧秒
 - 1 弧分相當於視網膜上 $\sim 4.8 \mu\text{m}$

視角解析度

- 在中心窩的位置，錐狀細胞的直徑約為 $2.5 \mu\text{m}$
- 視角解析度為何？

$$\theta \approx \frac{2.5 \mu\text{m}}{15 \text{mm}} = 1.67 \times 10^{-4} \text{rad} = 0.01 \text{deg} = 0.6 \text{min}$$

眼睛中真正的節點

- 有兩個，前節點在水晶體中，後節點在水晶體後。
 - 入射往前節點的光線張角與由後節點出射的張角相同
 - 後節點距離視網膜約**16.5**毫米

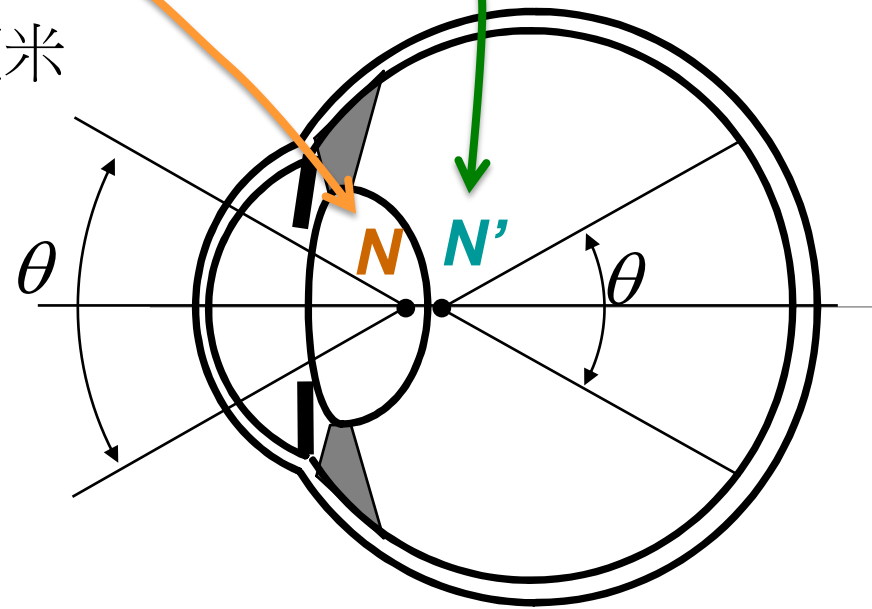
若在視網膜上成像大小為 1 mm...

$$\tan \theta \approx \frac{1}{16.5}$$

$$\text{visual angle } \theta = 3.47^\circ$$

$$1^\circ = 288 \mu\text{m}$$

簡化的眼睛模型已經非常接近



隨堂測驗

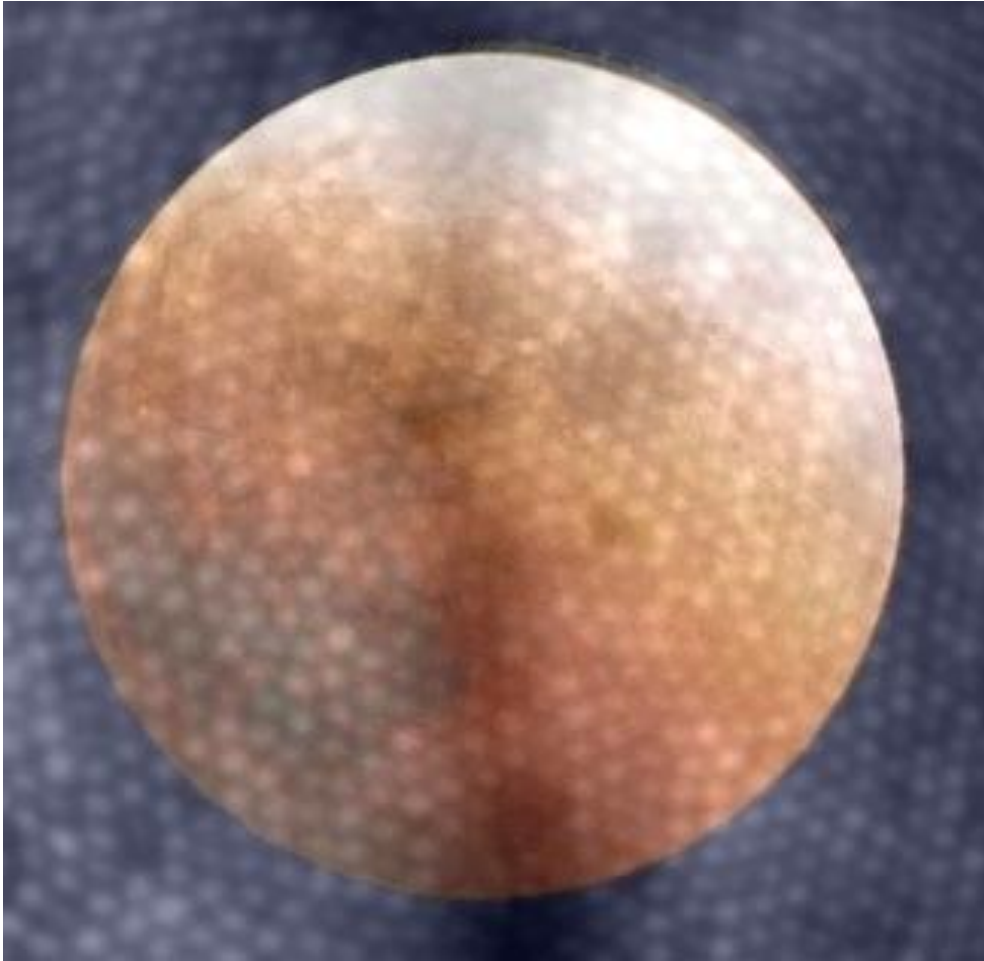
- 請問眼睛的簡化模型，其焦距為
 1. 1 mm
 2. 5 mm
 3. 10 mm
 4. 20 mm
 5. 30 mm

人眼的視角

- 食指律
 - 手臂伸直並伸出食指，食指寬度大約就是1度視角
 - 月亮和太陽的視角大約0.5度
 - 用自己的食指測試看看，剛升上來的月亮和天空正中央的月亮，哪一個大？



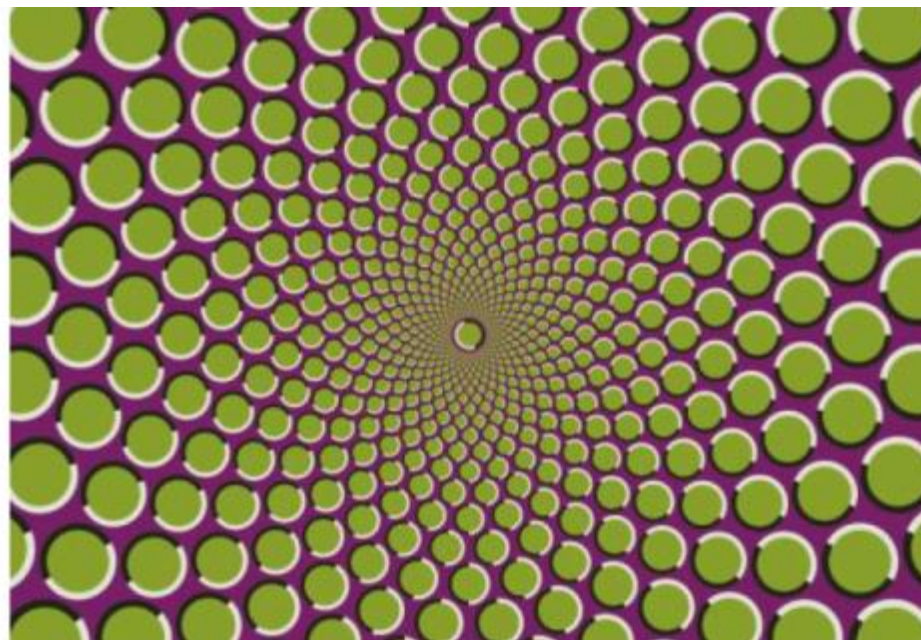
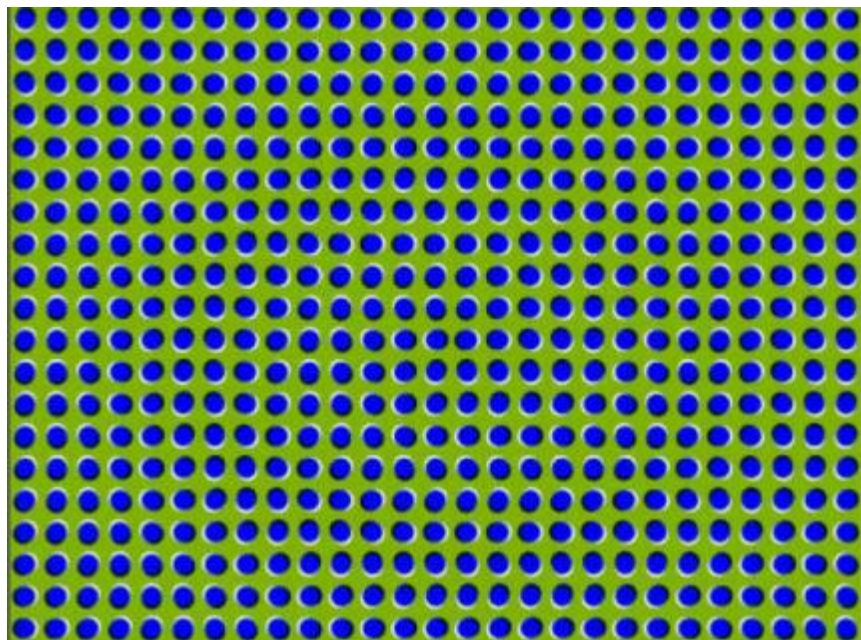
月亮在視網膜上的影像 (離中心窩一度)



- 視角為**0.5度**的月亮在視網膜上直徑大約**144 微米**
- 離中心窩一度之處，錐狀細胞的直徑約為 **5 微米**
- 月亮直徑相當於**29**個錐狀細胞
- 意即月光在直徑上激發了**29**個錐狀細胞，整個月亮約激發了**650**個錐狀細胞。

視覺的錯覺 (Optical illusions)

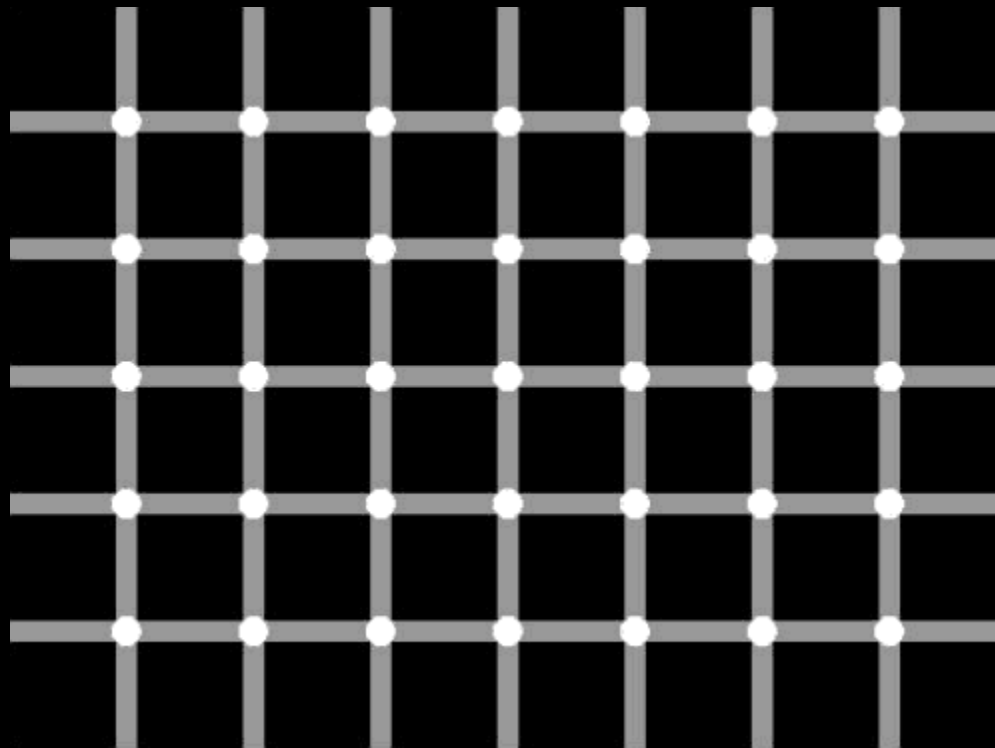
- 我們的視覺並不只是由眼睛的光學系統所決定
- 大腦如何處理才是最後的關鍵



這些圖有在動嗎？

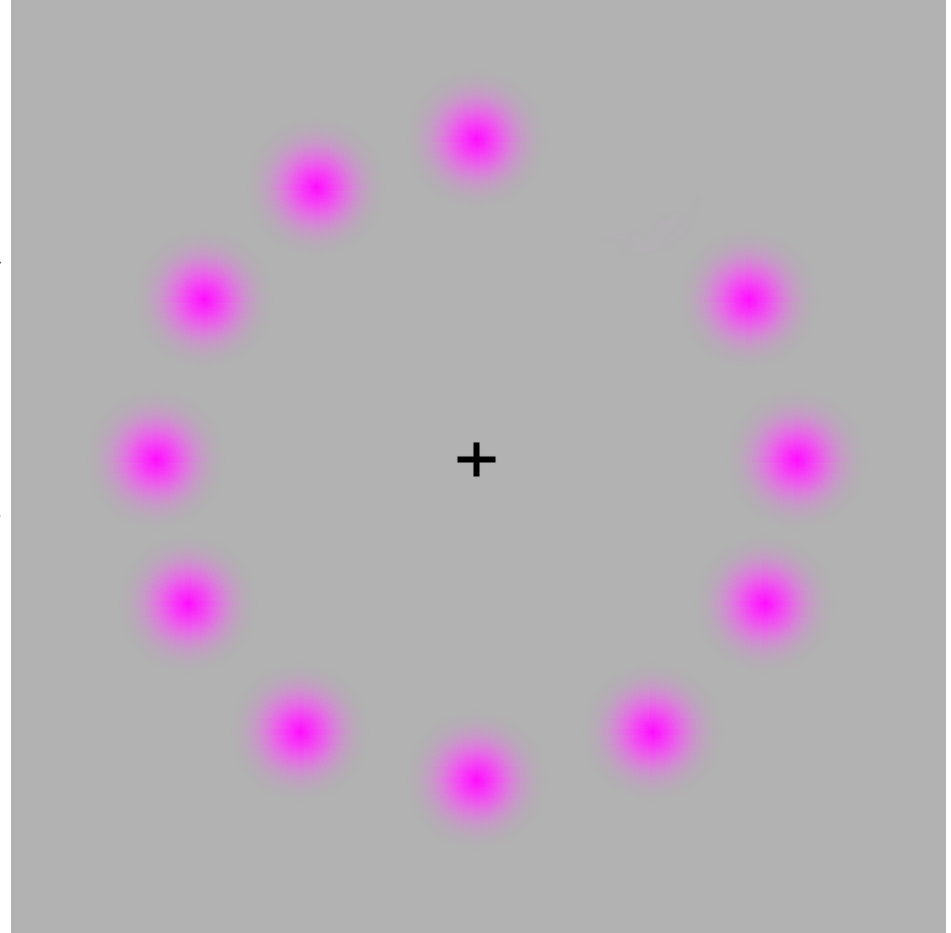
視覺的錯覺

- 算算看，可以找到幾個黑點？

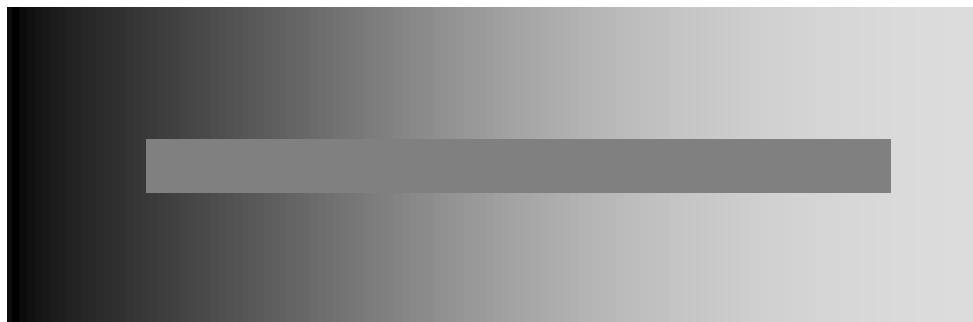


視覺的錯覺

- 盯著中間的 + 字看，在移動的点會變成綠色嗎？
- 再專心盯著中間的 + 字看久一點，周圍的粉紅色斑會不會都消失？



視覺的錯覺



- 中間的細條紋，哪一邊比較亮？

我們聰明的大腦

- 在上一節中，我們有找過自己的盲點
- 用你的右眼再試一次，這條線會如何變化？

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>
<i>I</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>P</i>
<i>Q</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>U</i>	<i>V</i>	<i>W</i>	<i>X</i>



4-6 繞射與視覺解析度

繞射 Diffraction

不是由反射或折射造成的光線偏折

“Any deviation of light rays from a rectilinear path which cannot be interpreted as reflection or refraction”

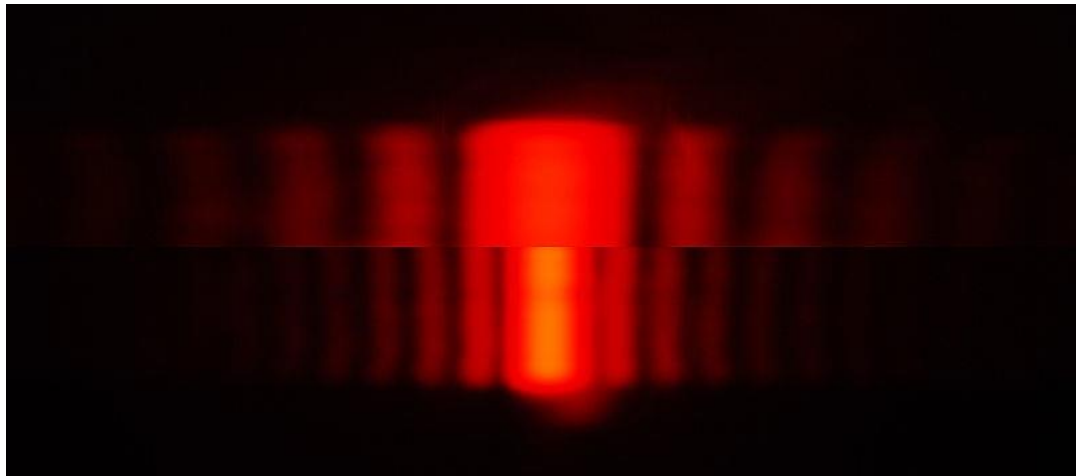
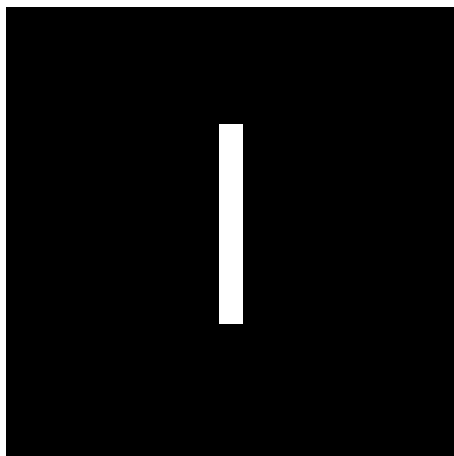
Sommerfeld, ~ 1894

夫朗和斐繞射 Fraunhofer diffraction

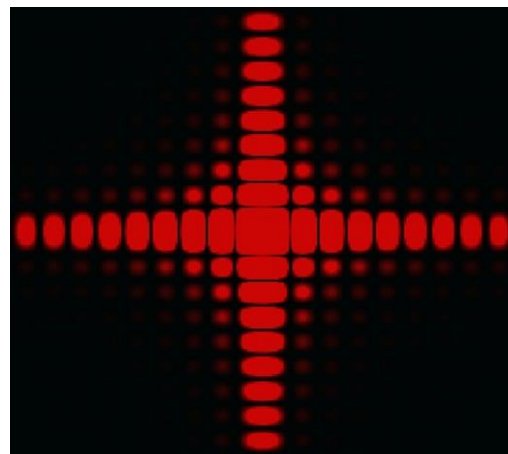
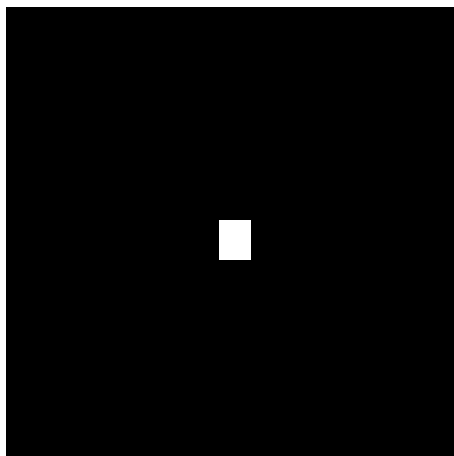
- 也稱為遠場繞射
 - 當觀察屏幕與孔徑的距離遠大於波長時需要考慮
- 透鏡的作用：在遠場產生建設性干涉，形成焦點
 - 若將透鏡視為一個等效孔徑，則聚焦也會受到繞射影響

遠場繞射

長條孔隙

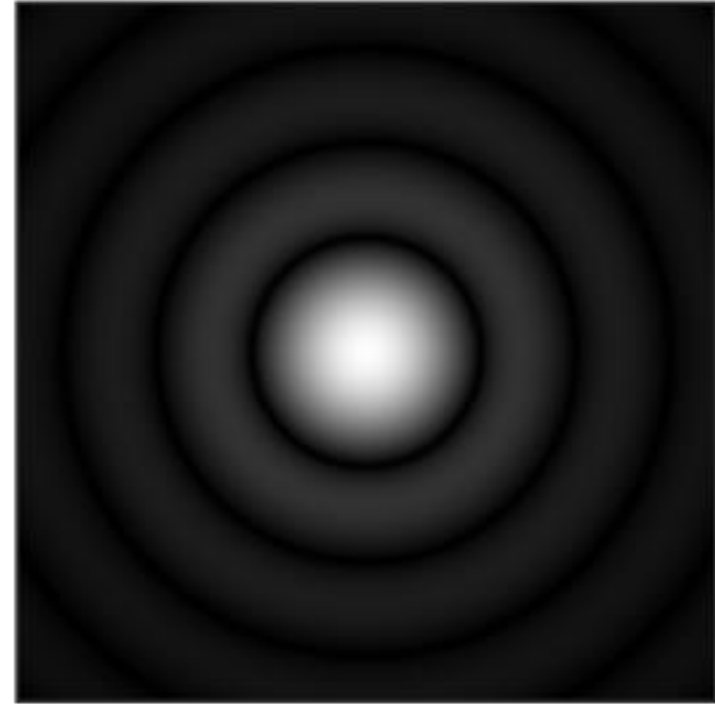
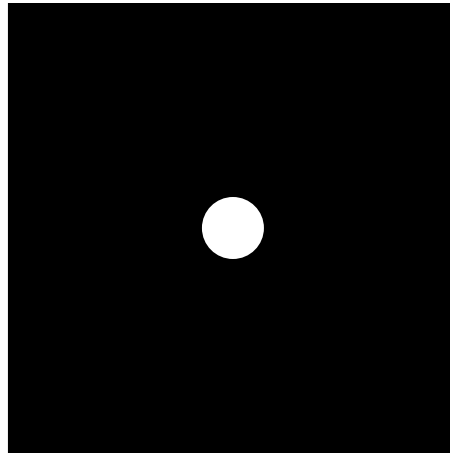


方形孔隙



The Airy Disc

圓形孔隙



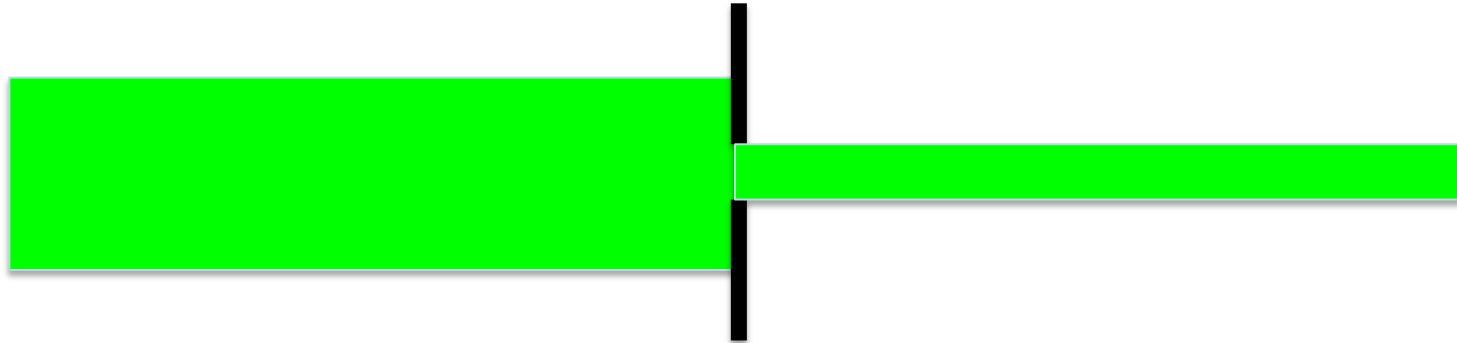
Sir George Biddell Airy: 發明校正散光的眼鏡

繞射：違反直覺的光學現象

- 前面提過，月亮的視角直徑大約**0.5度**。而太陽的視角直徑大約也是**0.5度**，約為手臂伸直時，食指的視角直徑一半。（若沒有適當的濾光片，請勿直接觀察太陽）
- 如果在不透光的黑紙上鑽個小洞，直徑為食指的 **$1/4$** ，手臂伸直拿著這張紙。透過紙上小洞觀察太陽，以幾何光學的概念，可推論看到的光點視角直徑大約是**0.25度**。
- 若鑽孔直徑為食指的 **$1/10$** ，光點直徑會是**0.1度**嗎？
- 若鑽孔直徑為食指的 **$1/100$** ，光點直徑會是**0.01度**嗎？

繞射：違反直覺的光學現象

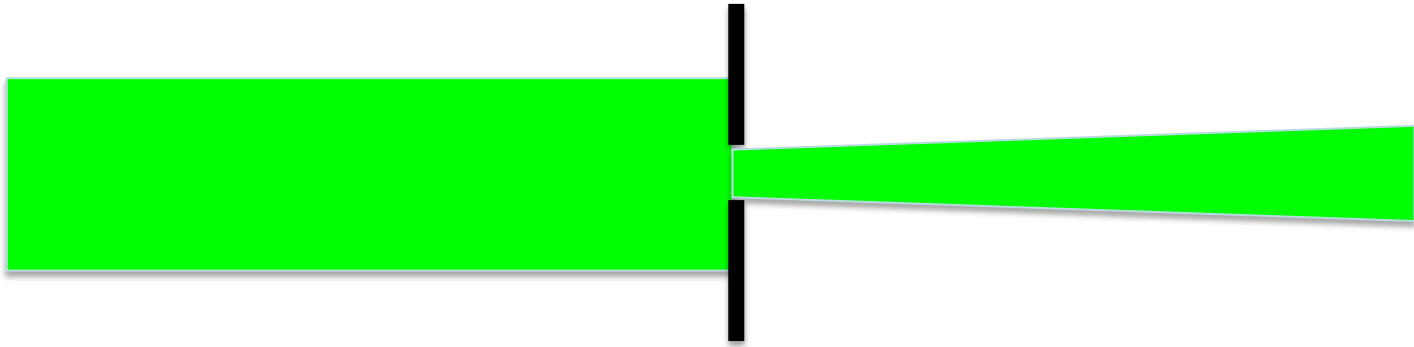
- 讓我們用一道雷射光來看看繞射造成的現象。
- 按照幾何光學光束前進的概念，被一個小洞擋住的雷射光，應該直徑變小，繼續向前傳播。



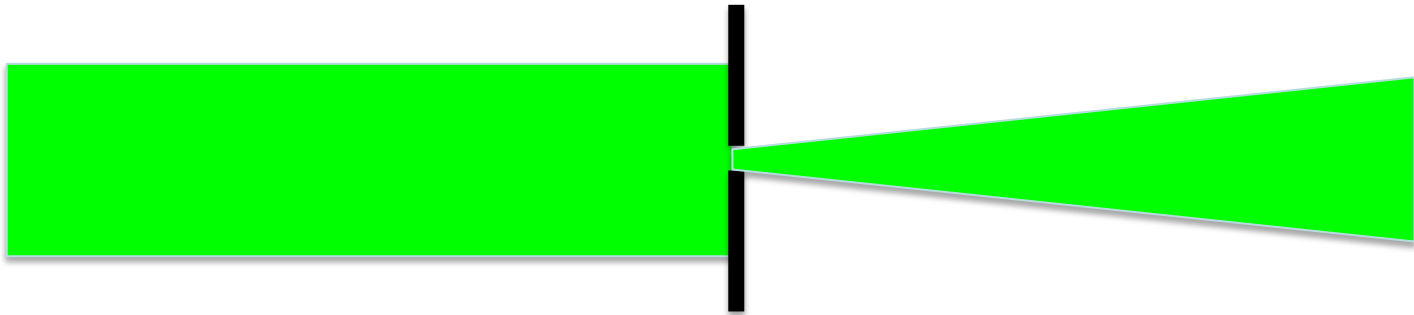
- 但是實際發生的事情是...
 - 讓我們以實驗示範給大家看

繞射：違反直覺的光學現象

- 光束經過小洞後，會向外發散！

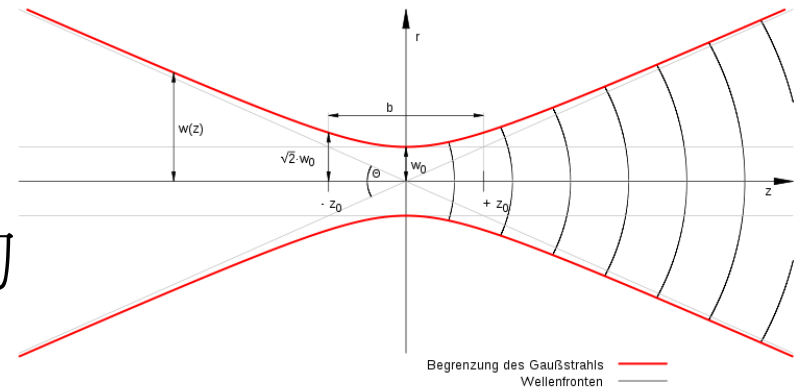


- 洞越小，散開越快！

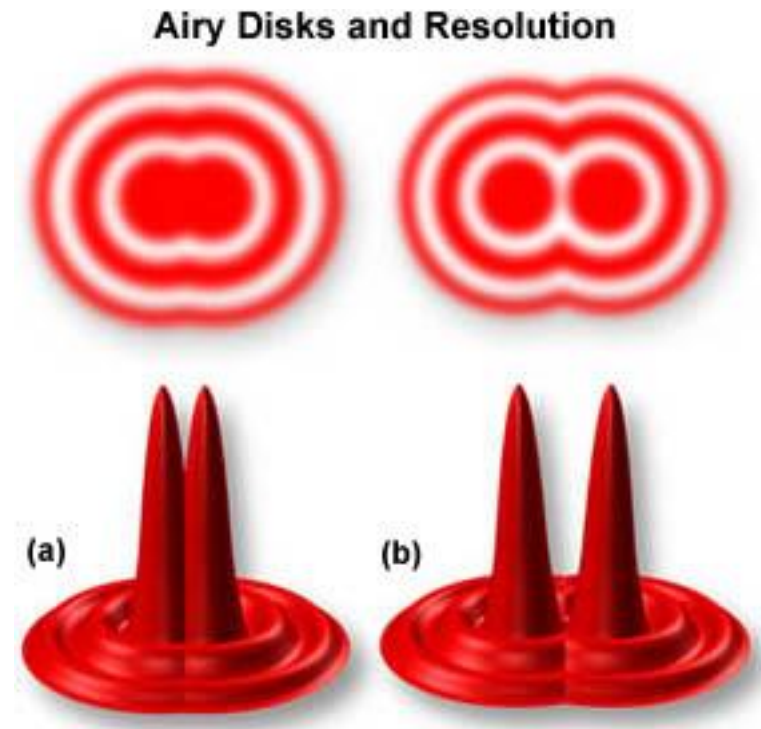
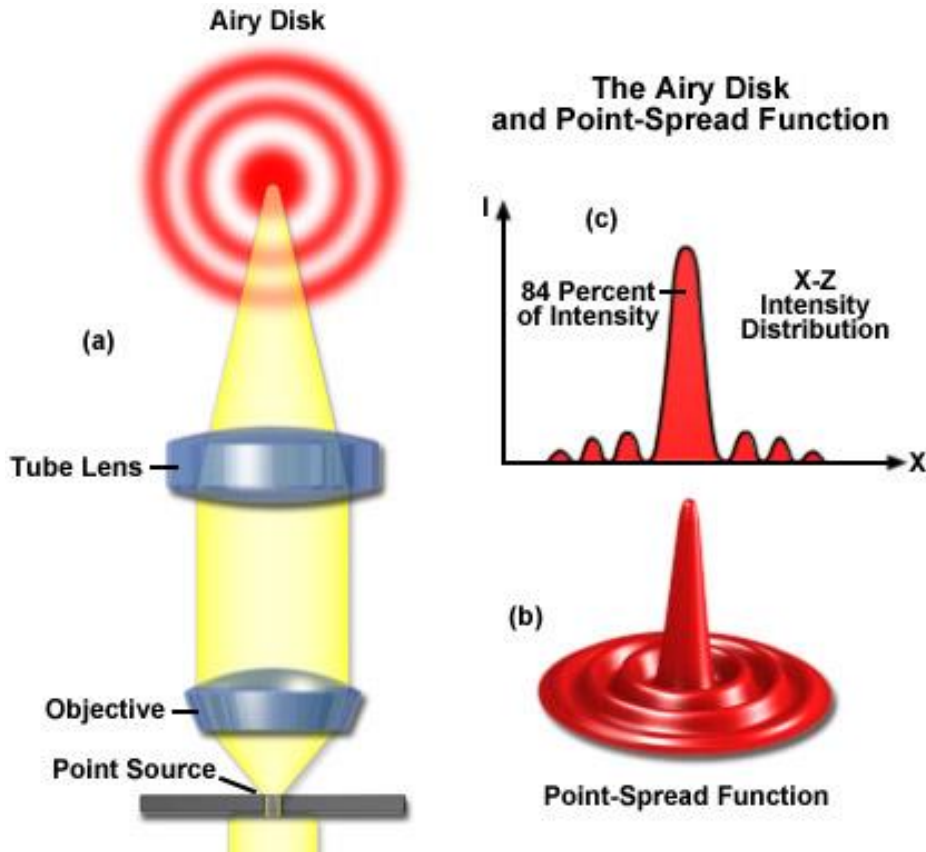


聚焦光斑的大小

- 聚焦：經由建設性干涉，將光會聚到一小點
 - 焦點是無限小的一個點嗎？
- 繞射：將光擠到越小的空間中，光會散開越快
 - 和聚焦相互抗衡
 - 因此焦點不是無限小的一個點
 - 詳細的說明要等到後面章節介紹光的波動特性



光學影像中的解析度概念



眼睛的解析度

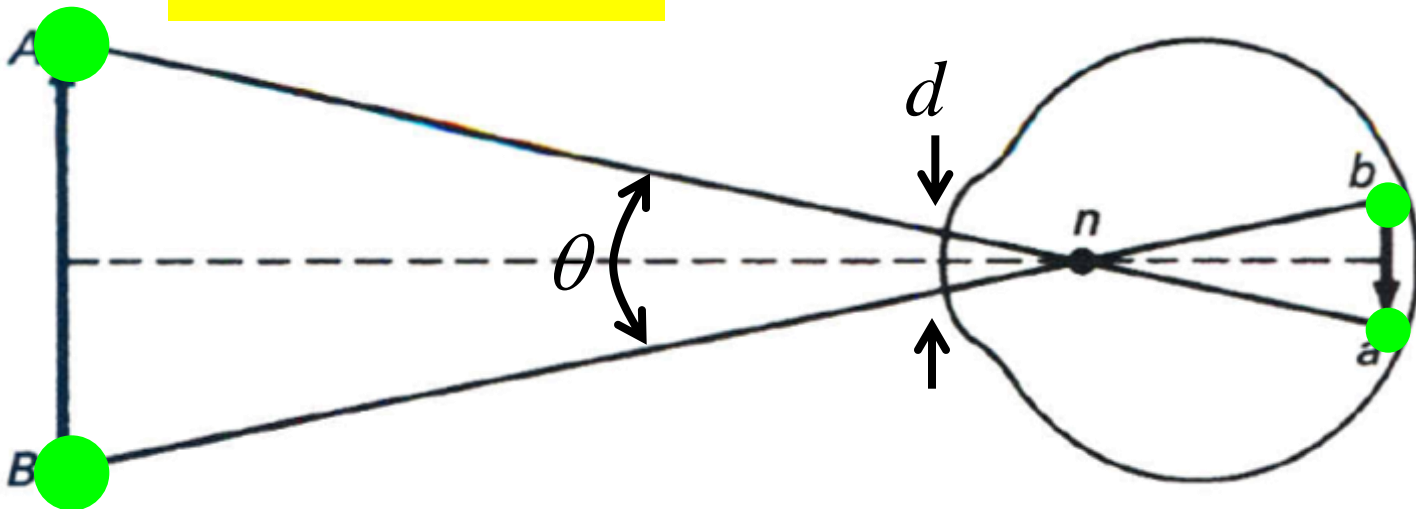
- 以兩個點光源為例
- 眼睛成像系統可以解析的最小視角大小為

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{d}$$

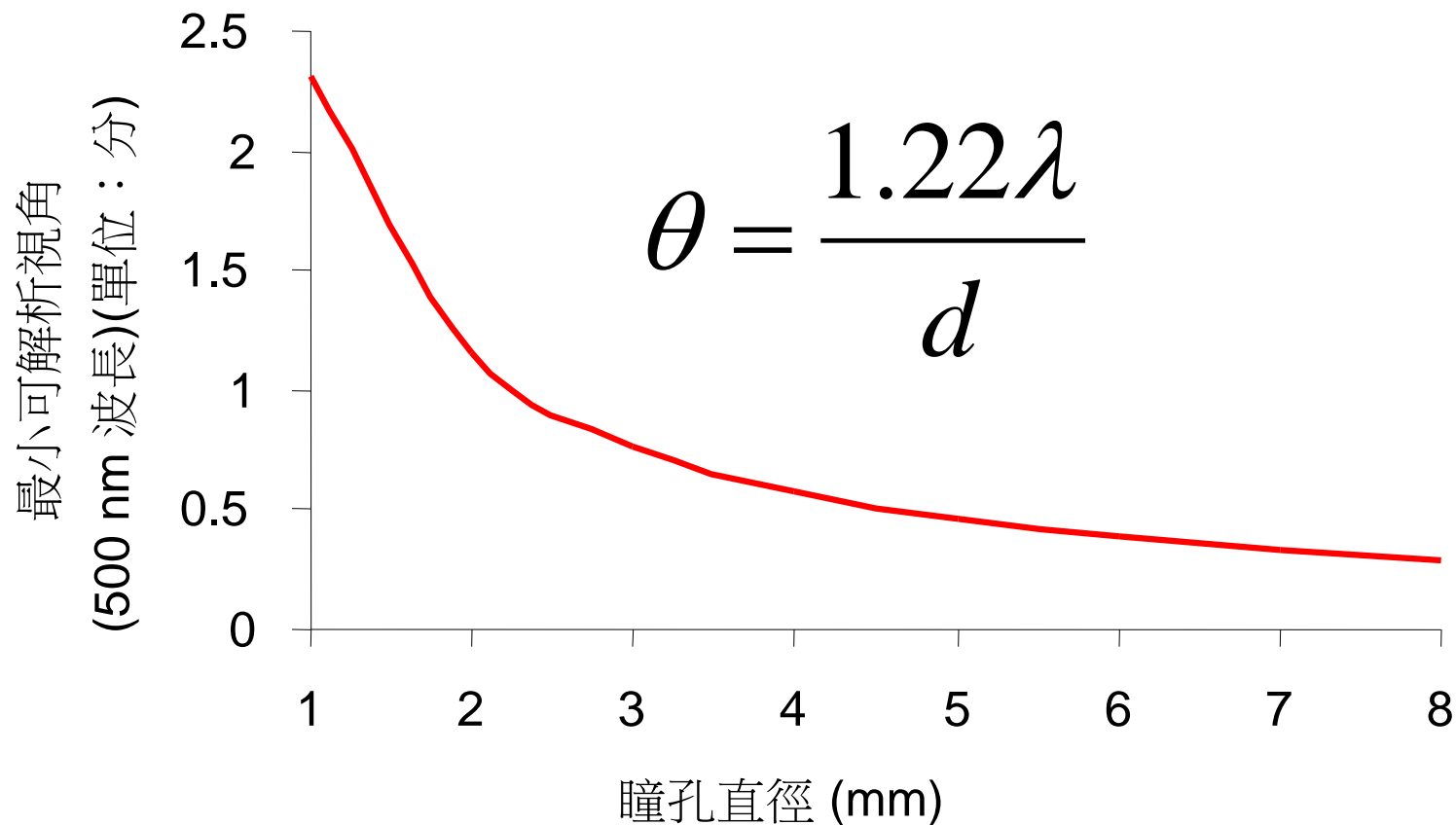
θ = 兩個物體之間的視角

λ = 可見光波長

d = 瞳孔直徑



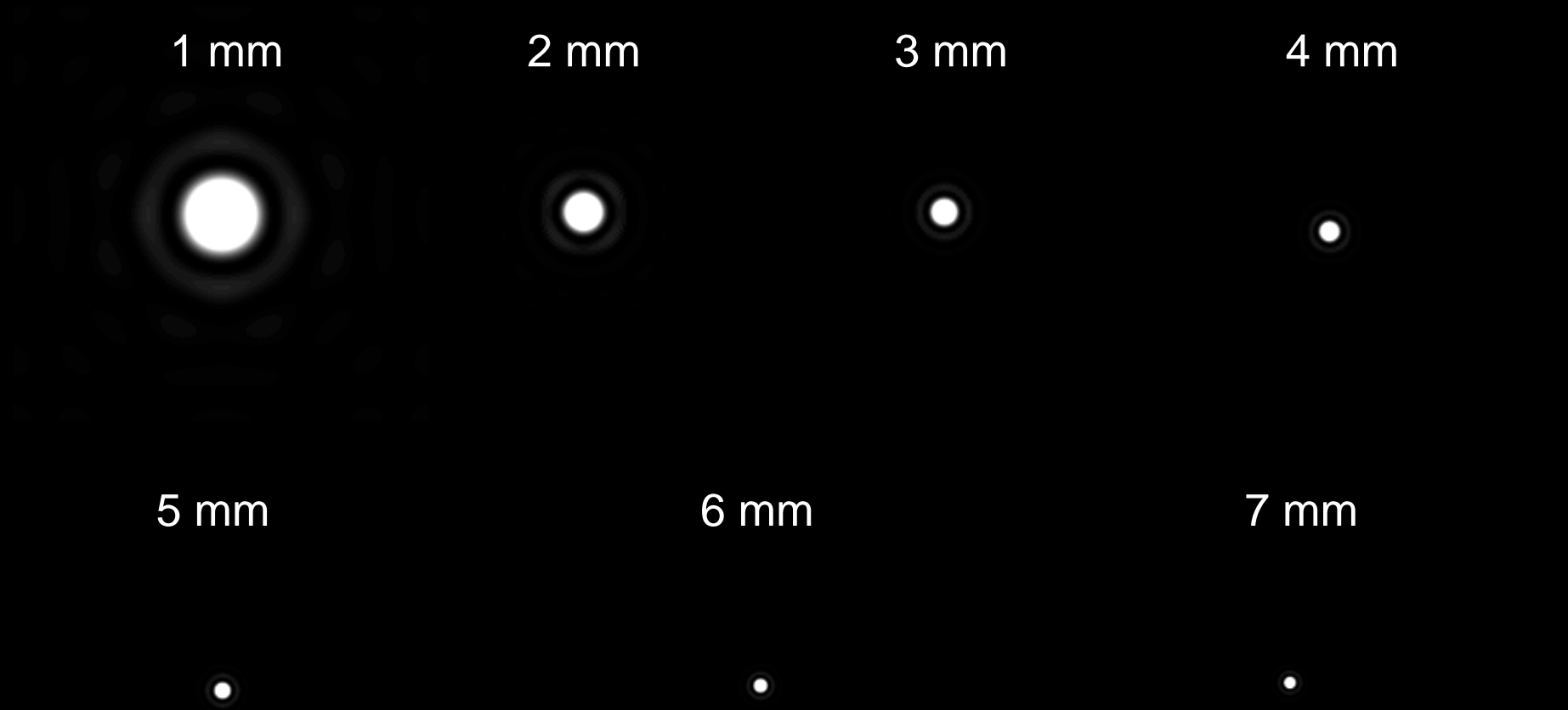
眼睛的解析度



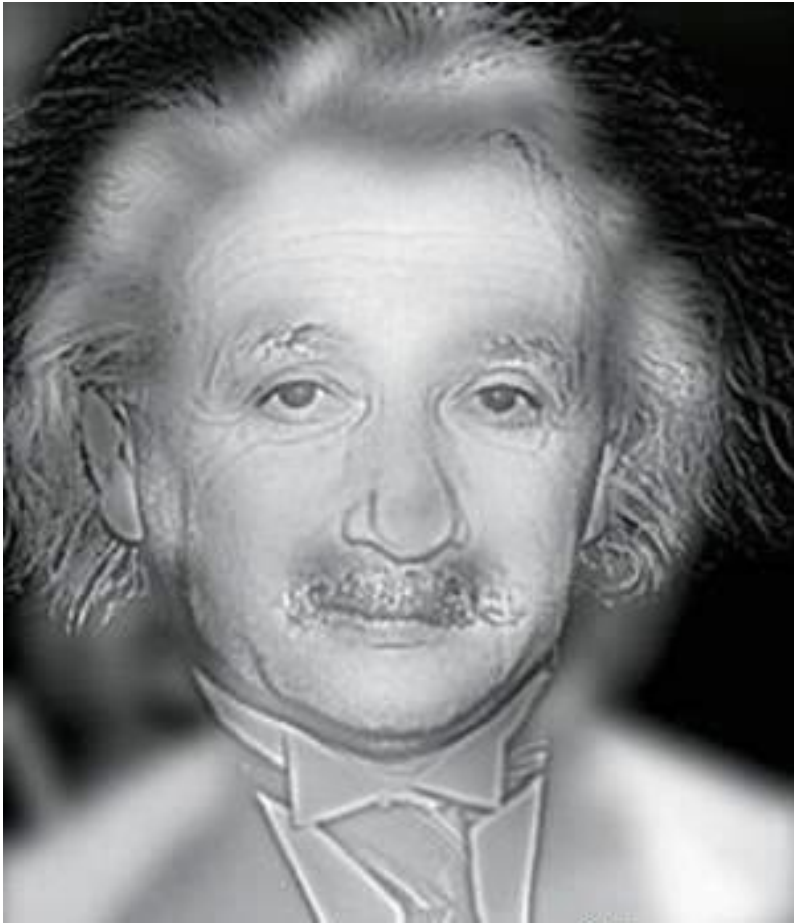
- 亦即瞳孔越大 → 解析度越好

Image of a point source vs. pupil size

perfect eye



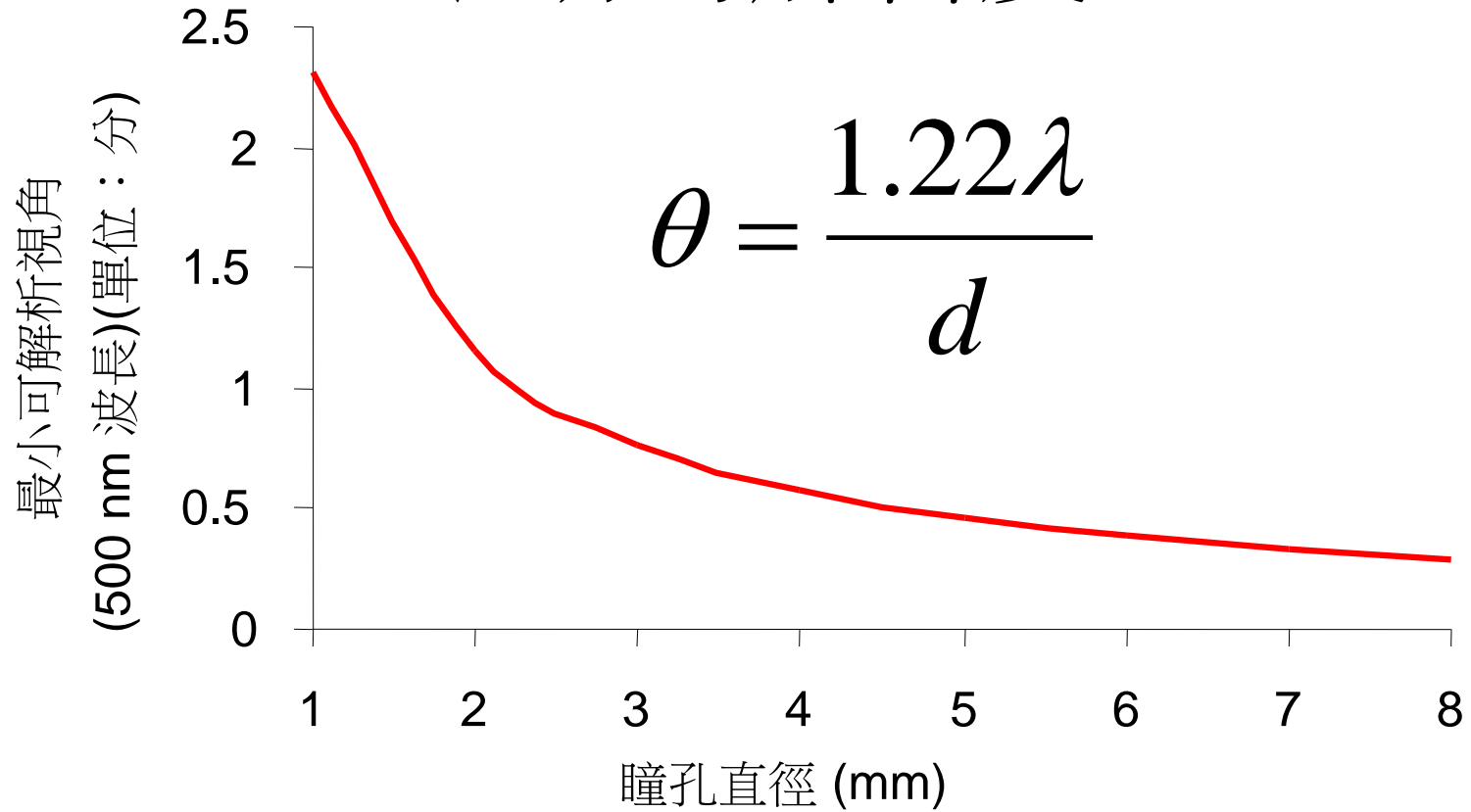
還記得這個現象嗎？



- 請問你/妳看到的是愛因斯坦還是瑪麗蓮夢露？
- 如果把眼睛眯起來，或是把眼鏡取下，請問這時候你/妳看到的是誰？
- 為什麼？
- 眯眼時入射孔徑變小，眼睛解析度降低，因此細節（愛因斯坦）看不清楚，只看到輪廓（瑪麗蓮夢露）

<http://eiie.me/archives/1409>

眼睛的解析度



- 瞳孔越大 → 解析度越好
- 但是前面似乎提過，瞳孔越小，看東西越清楚...
- 兩者互相矛盾嗎？

瞳孔大小與視覺清晰度

- 瞳孔越大
 - 繞射效果越不明顯，理論上解析度越好
 - 前提是假設眼睛成像系統完美
- 瞳孔縮小的好處是
 - 由幾何光學可知景深變大，因此不在焦點的物體也看得清楚
 - 另外如果成像系統有像差（例如上一講中示範的球面像差），則小瞳孔可以減少像差造成的影像模糊
 - 白天的時候，通常瞳孔小於2mm。

Image of a point source vs. pupil size typical eye

1 mm

2 mm

3 mm

4 mm

5 mm

6 mm

7 mm

Image courtesy: Austin Roorda

試試看觀察你自己的眼睛不完美程度

•

試試看觀察你自己的眼睛不完美程度

.

或是自己在家用LED測試

作業

作業 1-1

- 在課程討論中，我們把角膜前後面和水晶體的屈光力直接相加起來計算。我們來看看這樣是不是合理的做法。
- 角膜前後表面屈光力
 - 空氣折射率為1，角膜折射率約為1.376，玻璃體折射率約 1.336
 - 角膜外表面曲率半徑為 7.7 mm，內表面曲率半徑為 6.8 mm
 - 若角膜厚度為0.5 mm，請問角膜總屈光力為何？

作業 1-2

- 角膜+水晶體的屈光力
 - 假設角膜的屈光力為**40 D**，水晶體的屈光力為**20 D**。
 - 若將角膜和水晶體各自等效成一個薄透鏡，且兩者間的距離為**5 mm**。請問兩者結合的總屈光力為何？
 - 和直接相加的 **$40 + 20 = 60 \text{ D}$** 差多少？

作業 2-1

- 請用**4-5**講中提到的眼睛簡化模型，若眼睛近視**5 D**（**500度**），相當於平行光入射的焦點會離視網膜幾公釐？

作業 2-2

- 承上題，若戴一個隱形眼鏡來校正近視，使平行光入射的焦點剛好落在視網膜上，則此隱形眼鏡的屈光度應為？

作業 2-3

- 承上題，若佩戴一副眼鏡來校正近視，假設眼鏡可以適用薄透鏡近似，且眼鏡距離眼睛表面1公分。欲使平行光入射的焦點也剛好落在視網膜上，則此眼鏡的屈光度應為？

作業 3-1

- 假設一個沒有像差的完美人眼，並運用眼睛的簡化模型。如果一個感光細胞的大小是**5**微米，請問眼睛的最佳視角解析度為何？（即只有一個感光細胞被激發的情況下）

作業 3-2

- 近來為了節約能源，有越來越多的交通號誌燈變成**LED**燈。以綠燈為例，在一個綠燈中是由許多**LED**所構成。假設一個綠光**LED**的大小是1公分，且兩個相鄰**LED**的距離為10公分。如果你的視角解析度是 3×10^{-4} rad，你應該能在多遠的距離分辨出綠燈中兩個相鄰的**LED**？

A. 0.1 m – 1 m;

B. 1 m – 10 m;

C. 10 m – 100 m;

D. 100 m – 1000 m.