

Óptica Adaptativa ('Adaptive Optics')

Objetivo: restauración de imágenes borradas por

- turbulencia atmosférica
- aberraciones en el ojo
- aberraciones en microscopía

En genl.: distorsiones dinámicas donde necesito procesamiento a tiempo real

(en uso intensivo en astronomía desde 1990's)

'Def': control a tiempo real de la luz en forma de luz coherente, en genl. control de la fase de la luz.

Ej:

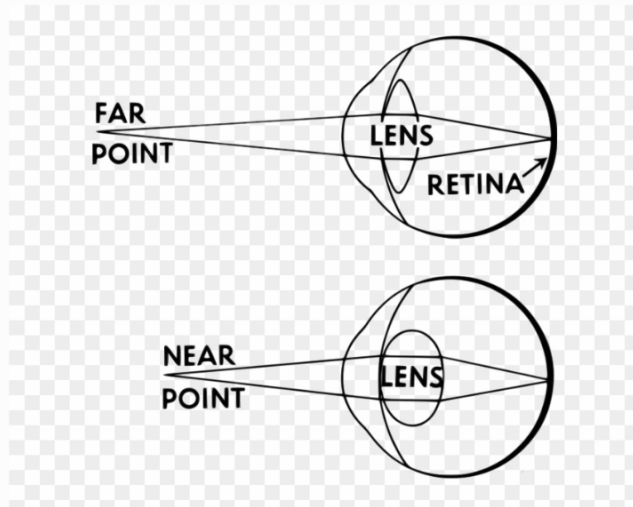
acomodación

(otra forma de

control de

fase de la

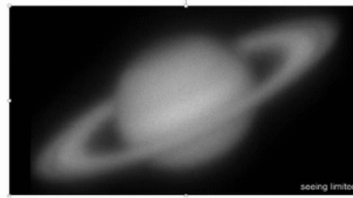
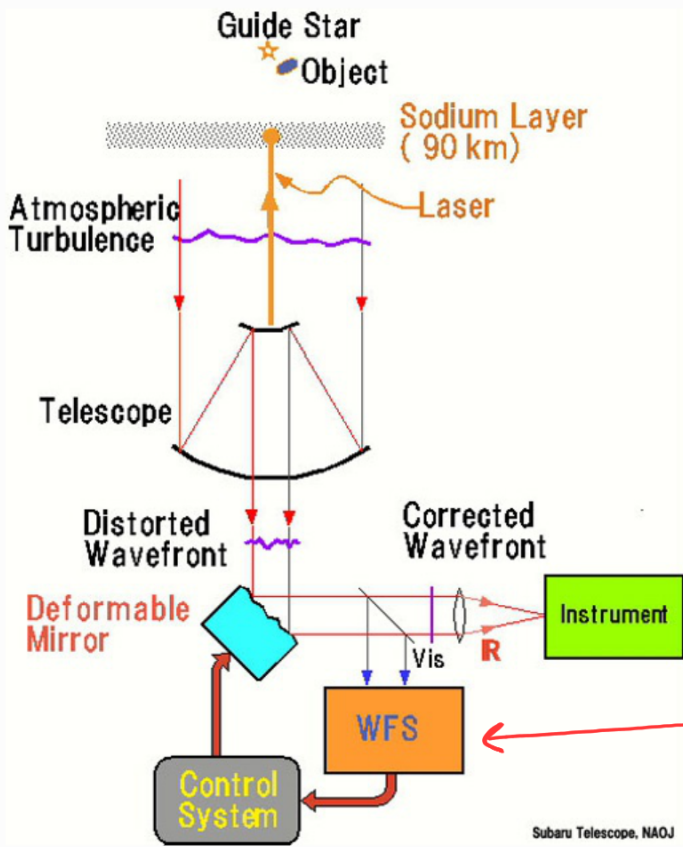
luz)



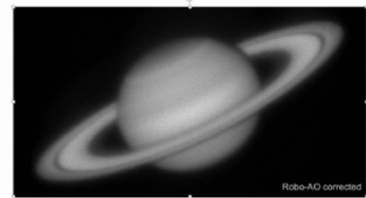
(También tengo control de la intensidad con el iris)

Ej: astronomía



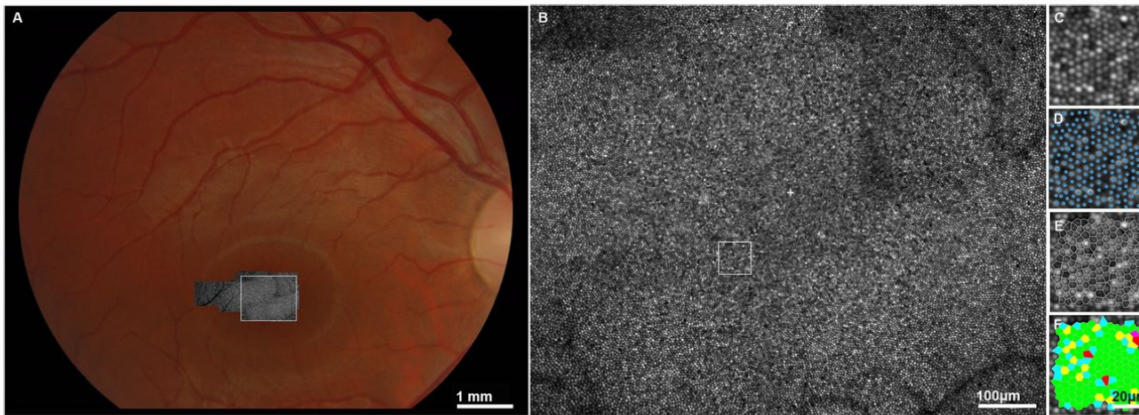


(sun control)



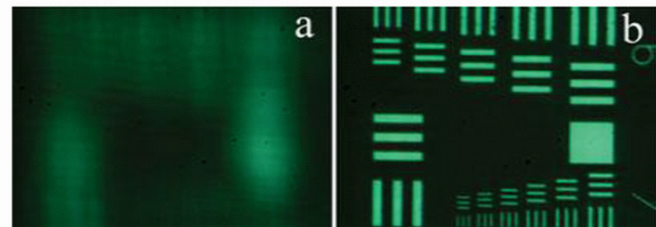
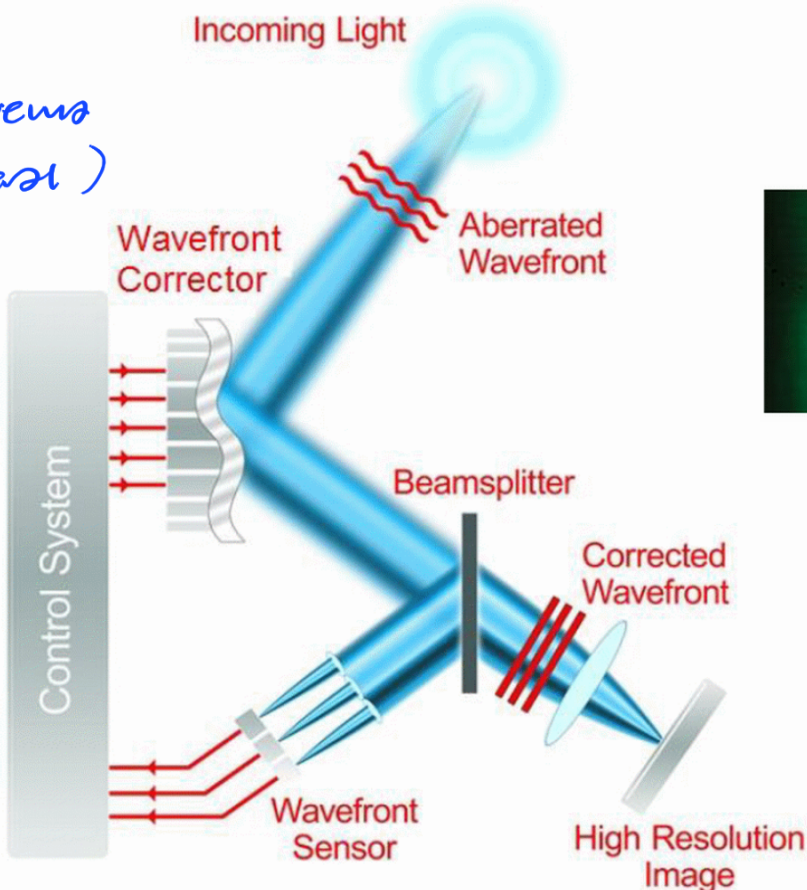
(con control proceso deblur)

Wave-front sensing



Imag. de la retina en oftalmología (conos: ~2 μm)

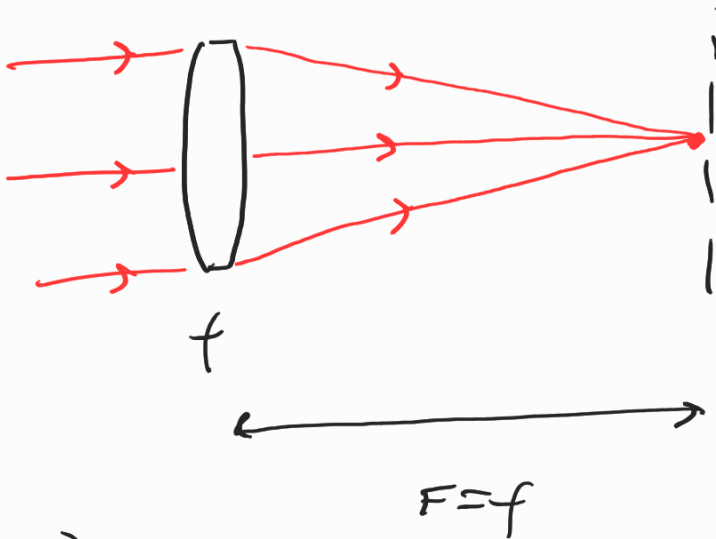
(Esquema general)



- Ventajas:
 - 1) Corrección total perturbación conocida
 - 2) wavefront sensing
 - 3) sistema de corrección

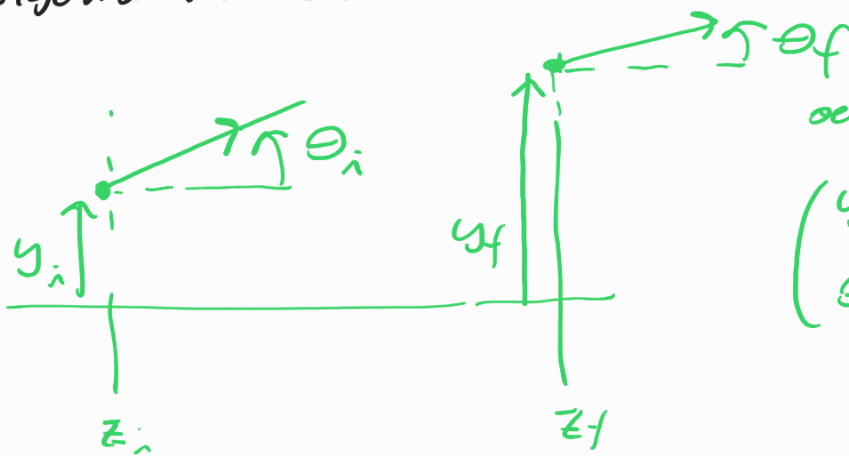
2) Principios básicos para la corrección: conjugación de fase

Ej: corrección en un sistema por transmisión



(Previa)

• Álgebra matricial: ABCD



$$\begin{pmatrix} y_f \\ \theta_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \end{pmatrix}$$

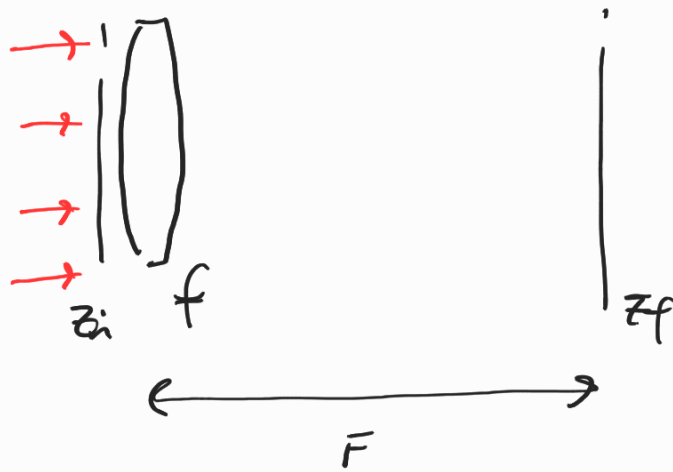
$$y_f = Ay_i + B\theta_i \quad (B=0) = Ay_i$$

$$\theta_f = Cy_i + D\theta_i$$

: si $B=0$, todos los rayos salientes de y_i , llegan a y_f : el plano z_f está conjugado con z_i .

\Leftrightarrow $B=0$ es la condición de formación de imagen

Volviendo al problema original:

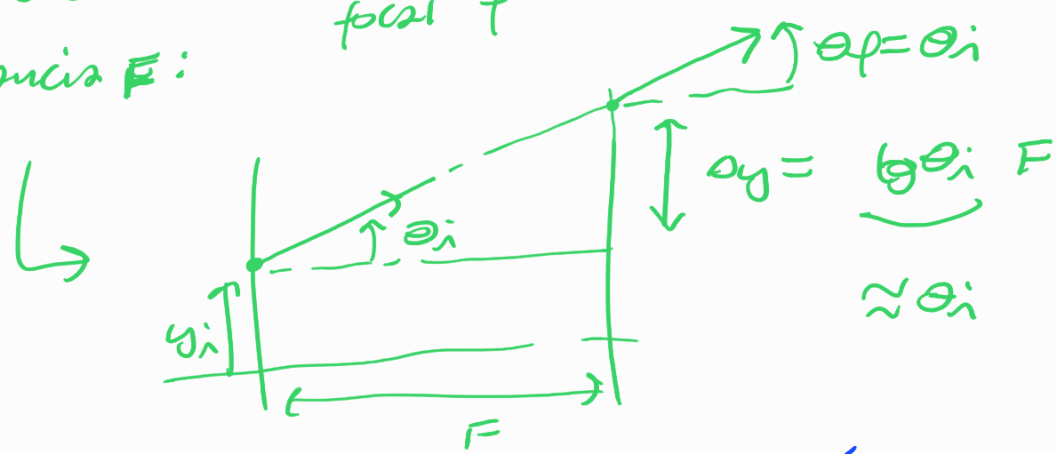


Entran rayos paralelos al eje óptico, ¿cómo convergen?

$$\begin{pmatrix} y_f \\ \theta_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \quad \\ \quad \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \end{pmatrix} \left(\Rightarrow \text{para todos los rayos entrantes} \right)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - F/f & F \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$$

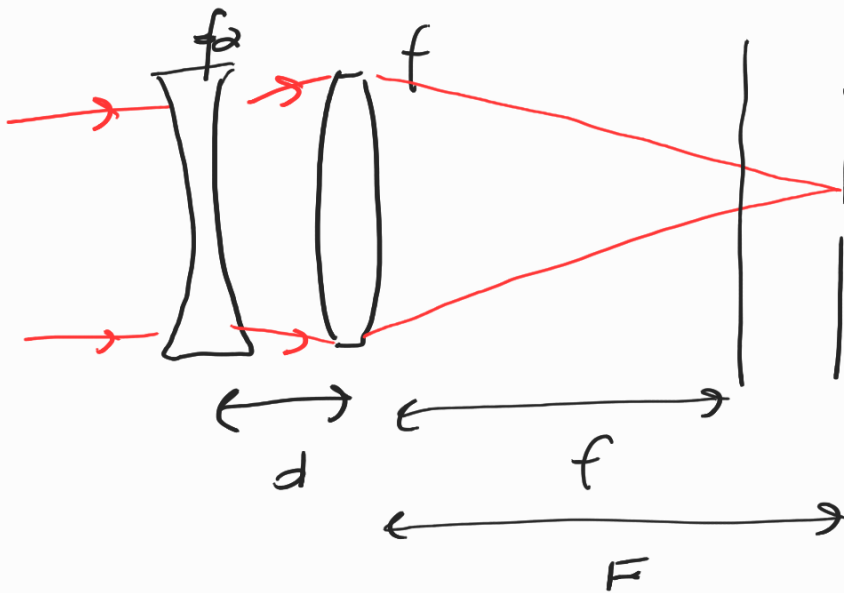
propagación sobre una distancia F: lente de distancia focal f



(*) si $A = 1 - F/f = 0$, $y_f = 0 \forall$ rayos (e independ. de y_i) ; si la salida fuera un haz de rayos paralelos con $\theta_i \neq 0$, $A = 0$ los lleva a todos a $y_f = \frac{F}{f} \theta_i$

Intravencimos ahora una abstracción en forma de fase (perfil

de fase de una lente)



$$\begin{pmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_a} & 1 \end{pmatrix} =$$

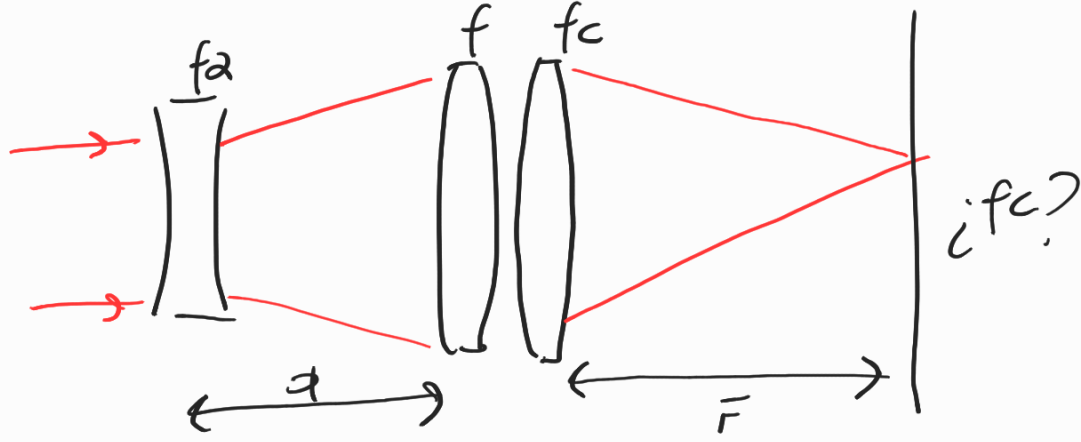
$$= \begin{pmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - d/f_a & d \\ -\left(\frac{1}{f} + \frac{1}{f_a} - \frac{d}{f f_a}\right) & 1 - d/f \end{pmatrix} \quad \left(\begin{array}{l} f_{eq}: \text{distancia focal} \\ \text{equivalente de} \\ \text{las lentes } f_a \text{ y } f \end{array} \right)$$

$$= \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad \Delta = 1 - d/f_a - F \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{f_a} - \frac{d}{f f_a} \right) = 0:$$

$$F = \frac{(1 - d/f_a)}{\left(\frac{1}{f} + \frac{1}{f_a} - \frac{d}{f f_a} \right)}$$

sin cambiar el plano focal!

• si muevo el sensor hasta ahí, veo un foco



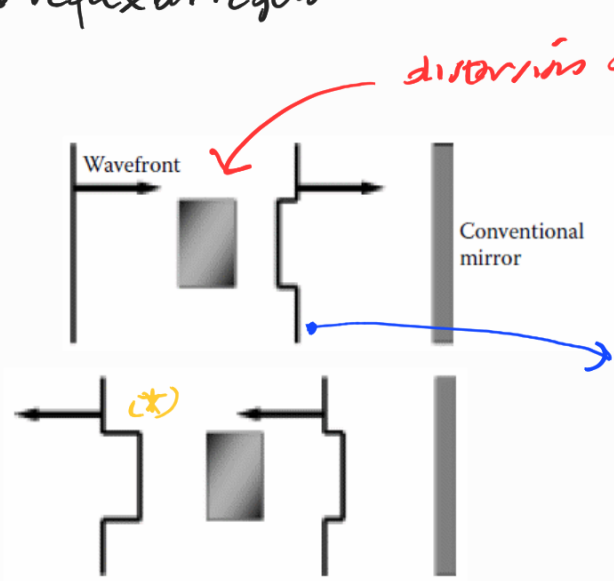
Para lograr $F = f$: $f_c = \left(\frac{1}{F} - \frac{1}{f} - \frac{1}{(f_a d)} \right)^{-1}$

f_c : fase de compensación, $d \approx 0$: $|f_c \approx -f_a|$

\Rightarrow la compensación es por conjugación de fase

Ej. por reflexión

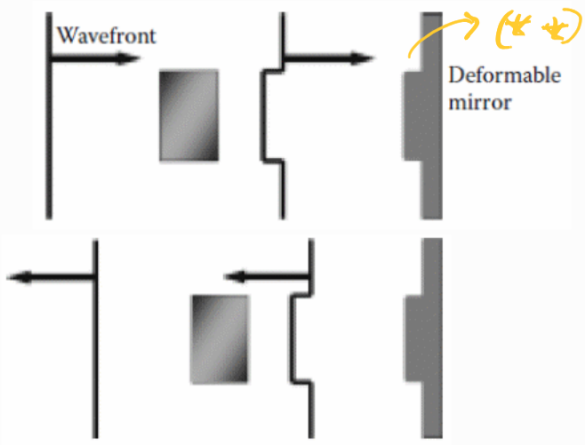
- reflexión regular



distorsión del medio de propagación, medio de índice de refracción n ($n > n_{\text{medio}}$)

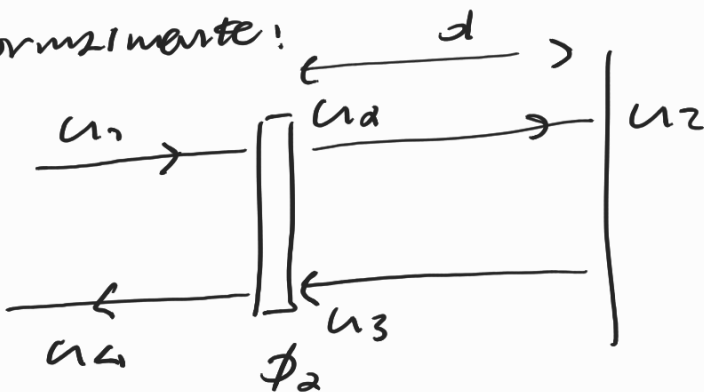
los pts. que estaban en fase en un plano, pasan a estar en fase en esta superficie

- SO: modo compensar por el cambio de fase introducido por la aberración con un espejo deformable



Obs. (*) y (**): hay algunos artefactos en el punto que proviene de cruzar el eje por la aberración, que es sólo para poder ver el problema en forma unidimensional

Formalmente:



$$u_2 = |u_2| e^{jK\phi_2} \leftarrow \text{fase de la aberración}$$

$$u_2 = \frac{jK e^{jKd}}{2\pi d} \iint_{(\text{apertura})} dx_2 dx_2' u_2 e^{jK/2d [(x_2 - x_2')^2 + (y_2 - y_2')^2]}$$

(propagación)

(op con los sig's!)

2 la salida del espejo!

$$u_2 e^{jK\phi_c} \leftarrow \text{conjugación}$$

$$u_4 = e^{2j\phi_2} e^{jK\phi_c} |u_2| \left(\dots \right)$$

↑
doble paraje

$$u_4 = |u_2| \text{ si } \phi_c = -2\phi_2$$

• si nos olvidamos del doble paraje por la aberración:

$$\boxed{\phi_c = -\phi_2}$$

conjugación de fase

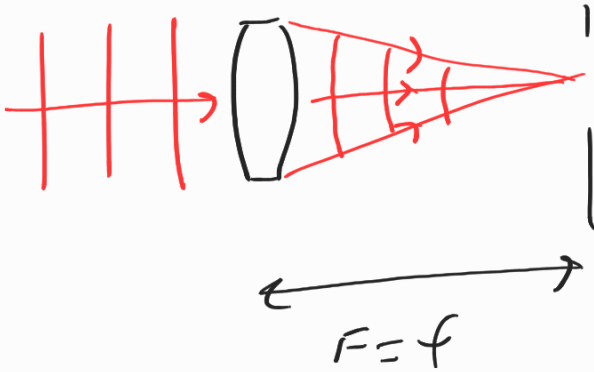
⇒ necesito pensar la fase intrínseca por la aberración y comunicársela al espejo como conjugada! $e^{j\phi_2} \rightarrow e^{-j\phi_2}$ en el espejo

2) Senzors de la fase!

sensor Shack-Hartmann

• Tal como vimos en 7) !

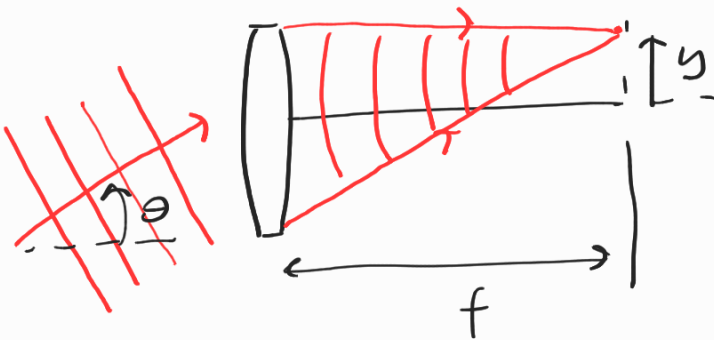
Fronte de ondes con $\vec{k} \parallel$ eje óptico



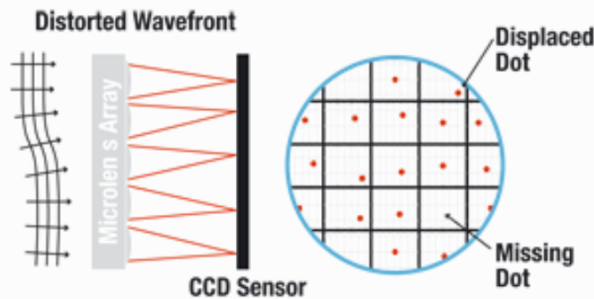
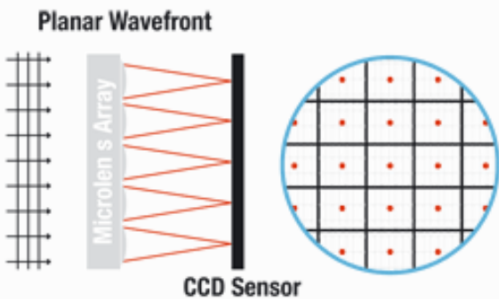
• Qué sucede si el frente de onda tiene una inclinación?

↳ Tenemos un haz de rayos a la entrada a la lente formando un ángulo θ

$$\Rightarrow y = F \theta$$



para cada lente de 1 arreglo, podemos considerar a la entrada un frente

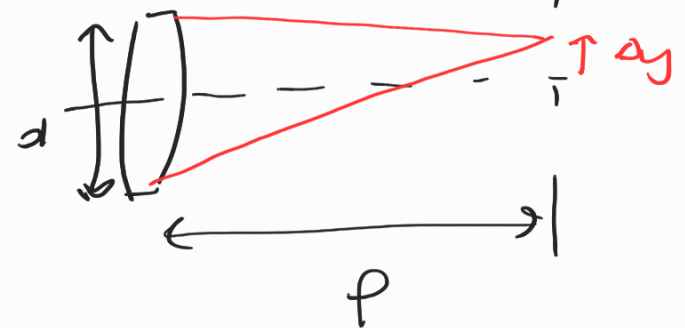


localmente plano e inclinado con respecto al eje óptico local

obtengo un patrón de focos corridos, luego que inferir $\phi_2(x, y)$

El Mido las inclinaciones con una cierta resolución y en un rango dinámico!

• resolución: $\theta_{min} = \frac{\Delta y_{min}}{f}$



dependiente de la precisión con que determino el centroide del foco, por ejemplo

• rango dinámico: $\theta_{max} = \frac{\Delta y_{max}}{f} = \frac{(d/2)}{f}$

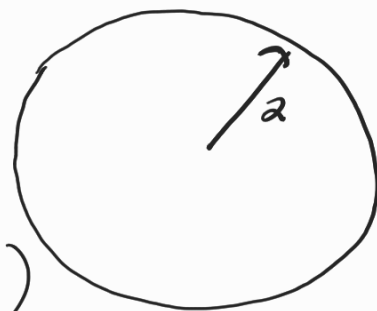
3) ¿Cómo comunicar la aberración detectada?

El Polinomios de Zernike!

Apagamos una apertura circular de radio a

representamos la aberración como

$w = w(\rho, \theta)$, $\rho = r/a \in [0, 1]$



función de aberración que quea sobre el frente de onda

$w(\rho, \theta) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j Z_j(\rho, \theta)$

$j=1$ es un indicador del elemento de la suma, lo importante por n, m !

donde! $m \neq 0$: $Z_{j\text{ par}}(\rho, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \cos(m\theta)$

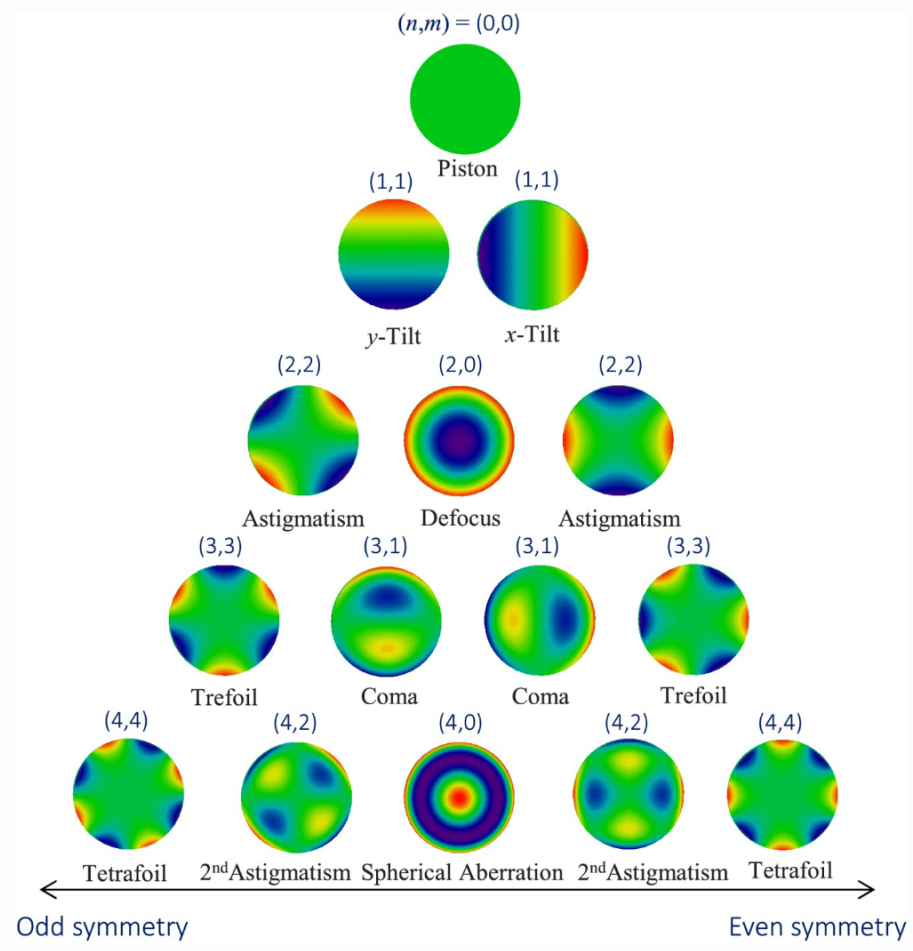
$Z_{j\text{ impar}}(\rho, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \sin(m\theta)$

$$m \Rightarrow : Z_j(\rho, \theta) = \sqrt{n+1} R_n^m(\rho)$$

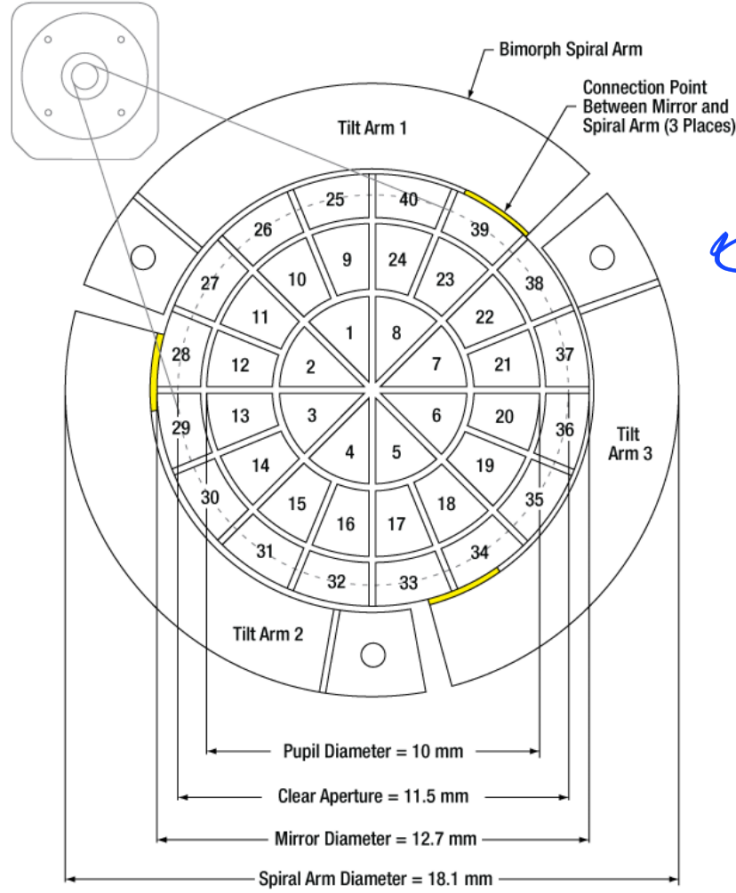
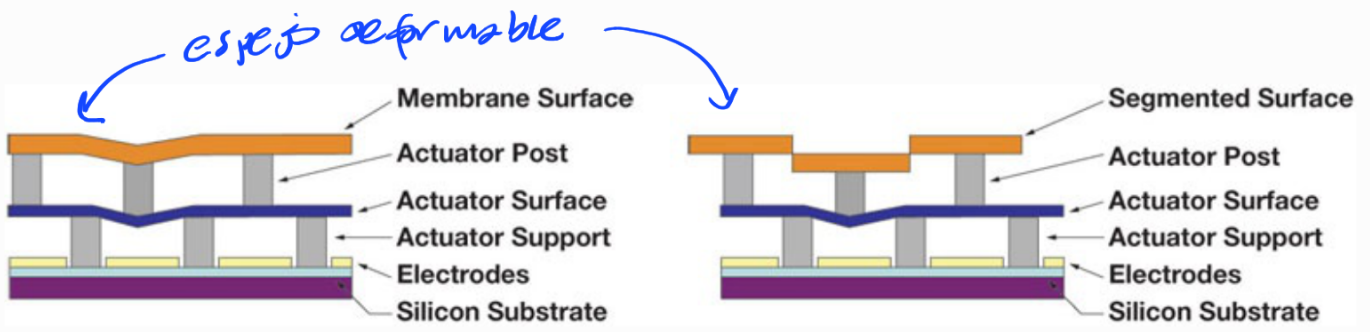
(Z formen eine gute orthonormale!)

$$\frac{\int_0^1 \rho d\rho \int_0^{2\pi} d\theta Z_j(\rho, \theta) Z_{j'}(\rho, \theta)}{\int_0^1 \int_0^{2\pi} \rho d\rho d\theta} = \delta_{jj'}$$

donc: $R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! (\frac{n+m}{2} - s)! (\frac{n-m}{2} - s)!}$



En esta base es que encierra la información de los modos que le paso al efecto de aberración:



baso adaptado a la representación polar