

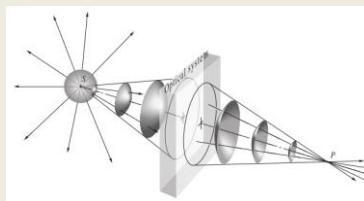
# Óptica geométrica

En el capítulo anterior...  
Lentes...3 rayos  
Prismas  
Espejos

O de cómo seguir manejando rayos para que hagan lo que uno quiera

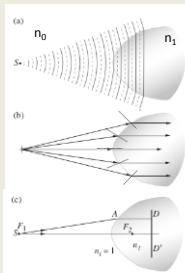
En el capítulo anterior...

Deformando frentes de onda



En el capítulo anterior...

## Usando dióptros (interfases)



La combinación de geometría (una hipérbola en este caso) y cambio de velocidad de propagación ( $n_1 > n_0$ ) da lugar a la deformación del frente de ondas de una manera particular

Esto también puede ser descrito en el lenguaje de rayos y Snell

Y también es consistente con Fermat! La trayectoria de la luz entre dos puntos es la que minimiza el tiempo de recorrido o lo que es lo mismo, la longitud de camino óptico.

La hipérbola tiene "justo" una forma tal que la longitud de camino óptico de cualquier rayo que parta de S y llegue a algún punto del frente DD' sea el mismo.

Esto asegura que todos los rayos de S lleguen en fase al plano DD' y definen por tanto un frente de onda plano.

En el capítulo anterior...

## Dióptros que transforman ondas esféricas en ondas planas



Planteo que LCO de rayos de S que llegan al frente de onda D tiene que ser el mismo. LCO  $n_1 |SA| + n_2 |AD| = cte$ , para todo rayo que pase por A sobre la interfase

Curva de puntos que cumplen que la suma de distancias respecto a un punto (S) y a una recta directriz (D) se mantiene constante son: **hipérbolas** o **elipses**

En el capítulo anterior...

## Dióptros que transforman ondas esféricas en ondas planas



Planteo que LCO de rayos de S que llegan al frente de onda D tiene que ser el mismo. LCO  $n_1 |SA| + n_2 |AD| = cte$ , para todo rayo que pase por A sobre la interfase

$$|SA| + \frac{n_2}{n_1} |AD| = cte'$$

$$\frac{n_2}{n_1} > 1$$

$$|SA| + e |AD| = cte'$$

$$\frac{n_2}{n_1} < 1$$

Los puntos A describen una hipérbola (me lo dijo mi primo que es matemático)

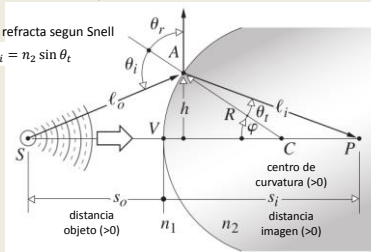
Los puntos A describen una elipse (¿qué ve alguien que observa desde la derecha?)

En el capítulo anterior...

## Que sea esférica!

Cada rayo se refracta según Snell

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$



Cómo podemos relacionar las posiciones del objeto, la imagen y la geometría de la interfase?

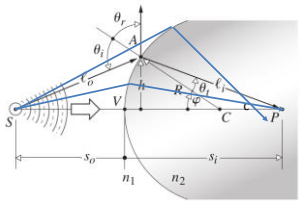
$$LCO = n_1 s_o + n_2 s_i$$

En el capítulo anterior...

### Dióptria Esférica

$$LCO = n_1 l_o(\varphi) + n_2 l_i(\varphi)$$

Para que **TODOS** los rayos emitidos por S lleguen a P, la LCO de las diferentes trayectorias debe ser la misma (y encima la mínima posible, ¿no cierto?)



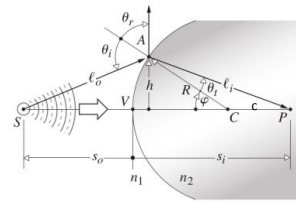
Pero cuando hacemos las cuentas vemos que esto no ocurre: LCO depende de  $\varphi$   
 Por eso **NO TODOS** LOS RAYOS DE S LLEGAN A P por lo que la imagen de un punto no es un punto.

PERO... tambien vimos que si nuestro sistema optico se *saca de encima* los rayos alejados del eje optico la cosa podría funcionar (aproximación paraxial). El LCO de los rayos cercanos al eje ~cte

En el capítulo anterior...

### Dióptria Esférica aprox. paraxial

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{1}{R} (n_2 - n_1)$$



posiciones de fuente e imagen      Parametros de la dioptria



Con luz desde la izquierda...

$s_o$	+ izquierda de V
$s_i$	+ derecha de V
R	+ si C esta a la derecha de V
$y_o, y_i$	+ encima del eje optico

En el capítulo anterior...

### Dióptria esférica

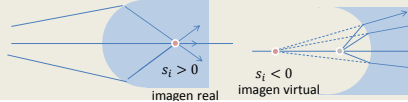
$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{1}{R} (n_2 - n_1)$$

LUZ →



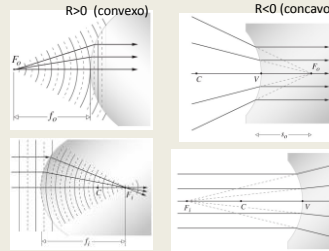
Con luz desde la izquierda...

$s_o$	+ izquierda de V
$s_i$	+ derecha de V
R	+ si C esta a la derecha de V
$y_o, y_i$	+ encima del eje optico



En el capítulo anterior...

### Puntos especiales de la dióptria esférica (foco imagen y foco objeto)



$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{1}{R} (n_2 - n_1)$$

$$f_o = \frac{n_1}{(n_2 - n_1)} R$$

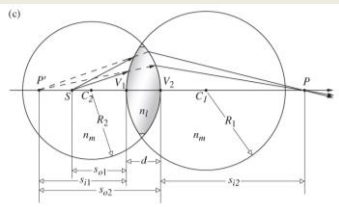
$$f_i = \frac{n_2}{(n_2 - n_1)} R$$

La ubicacion de los puntos focos objeto e imagen de una dioptria esférica en la aproximación paraxial dependen de:  $n_1, n_2$  y R

En el capítulo anterior...

### Lentes (Snell x 2)

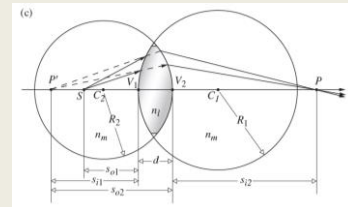
Una lente ↔ dos interfases (material1-material2-material1)



Ya sabemos como encontrar analíticamente la imagen de una fuente puntual que produce una dioptria (...solo que ahora tenemos que concatenar dos veces ese procedimiento)

En el capítulo anterior...

### Lentes (Snell x 2)



Lente **delgada** en aproximación **paraxial**

$$\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{o2}} = \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

$$n_{lm} \equiv \frac{n_l}{n_m}$$

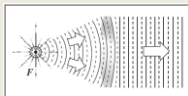
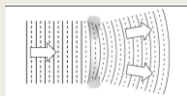
posiciones de fuente e imagen

Parametros de la lente

En el capítulo anterior...

### Lentes delgadas: haciendo foco

Puntos especiales:  $\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$



Donde se forma la imagen cuando incide una onda plana? Llamo a ese punto **foco imagen**  $f_i$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$$

De que punto proviene la onda incidente cuando se transmite una onda plana? Llamo a ese punto **foco objeto**  $f_o$

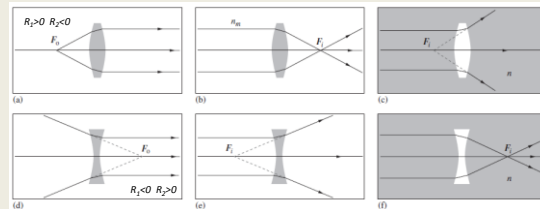
$$\frac{1}{f_o} + \frac{1}{\infty} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$$

Para una lente delgada:  $f_i = f_o = f$   $\frac{1}{f} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$

En el capítulo anterior...

### Focos, geometría y n's

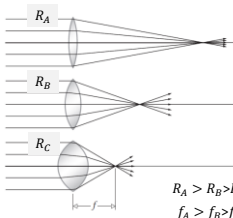
$$\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1) \longrightarrow \frac{1}{f} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$$



### Curvatura y distancia focal

$$\frac{1}{s_{o1}} + \frac{1}{s_{i2}} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1) \longrightarrow \frac{1}{f} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$$

En lentes biconvexas:  $R_1 = -R_2 \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2}{R_1}(n_{lm} - 1)$



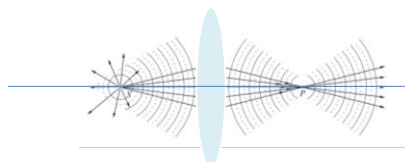
Distancias focales más grandes se obtienen para curvaturas más grandes  $f \sim R$

**Potencia de una lente (dioptrías)**  
Capacidad de quebrar rayos

$$\phi = \frac{1}{f}$$

$R_A > R_B > R_C$   
 $f_A > f_B > f_C$

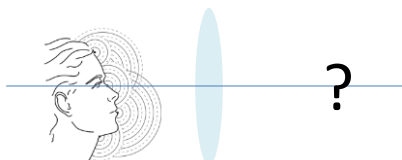
### Lentes delgadas y formación de imágenes (metodo de los 3 rayos 3)



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$$

Hasta ahora vimos como se forman imágenes de objetos ubicados sobre el eje optico.

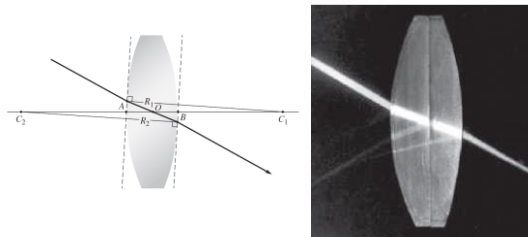
### Lentes delgadas y formación de imágenes (metodo de los 3 rayos 3)



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$$

Hasta ahora vimos como se forman imágenes de objetos ubicados sobre el eje optico. La ecuacion de arriba nos habla sólo de posiciones sobre el eje...no de alturas...

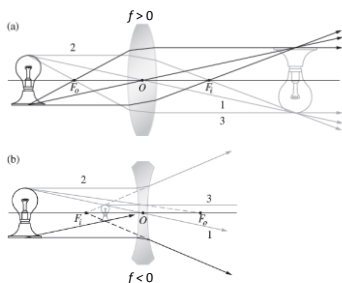
### Rayos particulares (de mucha ayuda)



Para lentes **delgadas** el rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.

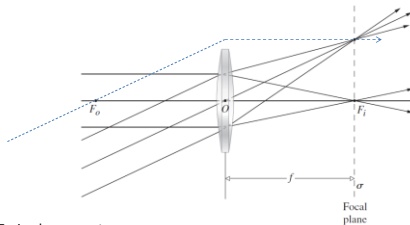
### Lentes delgadas y formación de imágenes (metodo de los 3 rayos 3)

1. el rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.
2. el rayo que pasa por  $f_o$  sale paralelo
3. el rayo que entra paralelo se dirige hacia  $f_i$



$$\frac{1}{f} = \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

### Y si viene del infinito y mas alla?



Teniendo en cuenta que:

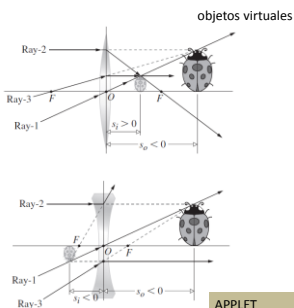
Para lentes delgadas el rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.

El rayo que pasaría por  $f_o$  debe salir paralelo

Un haz de rayos paralelos no alineado con el eje óptico converge a un punto sobre el plano focal de la lente

### Lentes delgadas y formación de imágenes (ejs. con objetos virtuales)

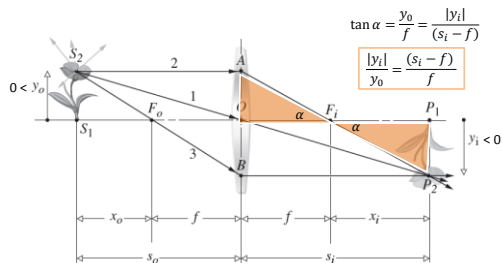
1. el rayo que pasa por el centro de la lente no se desvía.
2. el rayo que entra paralelo se dirige hacia  $f_i$
3. el rayo que pasa por  $f_o$  sale paralelo



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) (n_{lm} - 1)$$

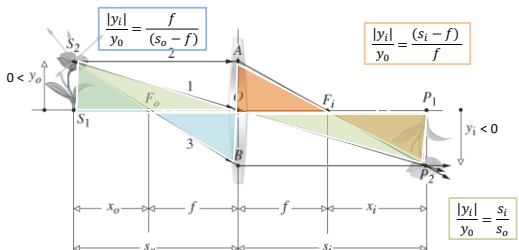
APPLET  
geometric-optics.jar

### Aumento Lateral de una lente



Buscando los triángulos que me sirvan

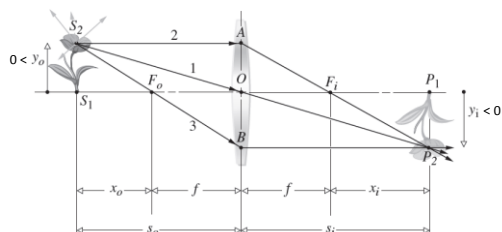
### Aumento Lateral de una lente



notar que  $|y_i| = y_i$

Definimos aumento lateral como  $\rightarrow M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{(f - s_i)}{f} = \frac{f}{(f - s_o)}$

### Aumento Lateral de una lente



$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{(f - s_i)}{f} = \frac{f}{(f - s_o)}$$

- $M_T < 0$  indica imagen invertida
- Notar: no habrá inversión sólo cuando objeto e imagen esten en el mismo sem-espacio

## Aumento Lateral

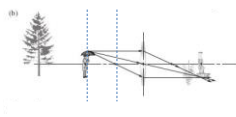
$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{(f - s_i)}{f} = \frac{f}{(f - s_o)}$$

Si  $s_o > 2f$   $-1 < M_T < 0$

Si  $s_o = 2f$   $M_T \equiv \frac{f}{(f - 2f)} = -1$

Si  $f < s_o < 2f$   $M_T < -1$

Si  $s_o < f$   $M_T \equiv \frac{f}{(f - s_o)} > 1$



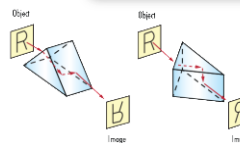
## Prismas

Son dispositivos ópticos utilizados como

- Elementos **dispersores** de haces de luz policromática (por ejemplo en analizadores de espectro).



- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos



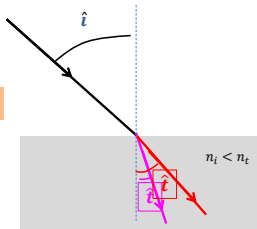
## Prismas dispersores

- La razón del comportamiento dispersivo reside en que el índice de refracción de un material no es constante sino que depende de la frecuencia de la onda que lo atraviesa:  $n = n(\omega)$ .



- Snell hace el resto.

$$n_i \sin \hat{i} = n_t(\omega) \sin \hat{t}(\omega)$$

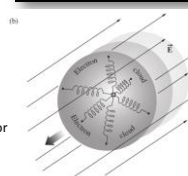


## Dispersion: $n = n(\omega)$

- La onda electromagnética incidente interactúa con las cargas (electrones) del material y las acelera, por lo que emiten también. La onda que atraviesa el material es la superposición de las dos clases de radiación



- Podemos pensar en un movimiento forzado para esas cargas...lo que introduce la dependencia con  $\omega$ , la frecuencia del forzado.



Modelo de Drude (hacamos electrones o el Oscilador armónico forzado Física 1):

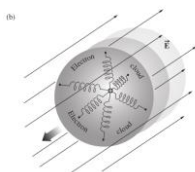
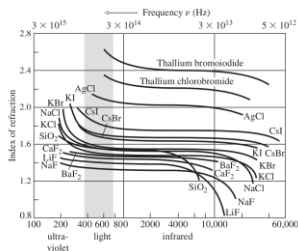
$$F_E + F_k = m_e \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$q_e E_0 \cos \omega t - m_e \omega_0^2 x = m_e \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$x(t) = \frac{q_e/m_e}{(\omega_0^2 - \omega^2)} E_0 \cos \omega t \rightarrow n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\epsilon_0 m_e (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

## Dispersion: $n = n(\omega)$

- Índice de refracción para diferentes cristales ópticos

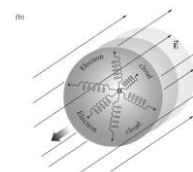
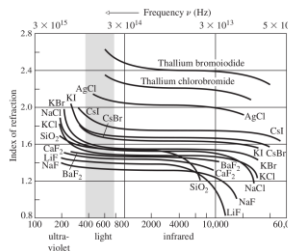


$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\epsilon_0 m_e (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

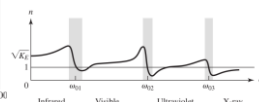


## Dispersion: $n = n(\omega)$

- En un material real hay más de una frecuencia característica  $\omega_0$  (varios tipos de resortes)

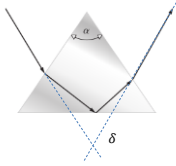


$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\epsilon_0 m_e} \sum \frac{f_i}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)}$$



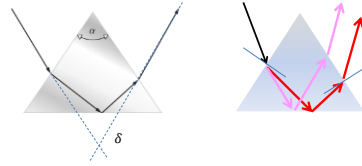
## Prismas Reflectores

- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos sin verse afectados por efecto de la dispersión. Utilizan RTI y el hecho de que la desviación total entre la direcciones de los rayos de entrada y salida,  $\delta$ , resulta independiente de  $w$



## Prismas Reflectores

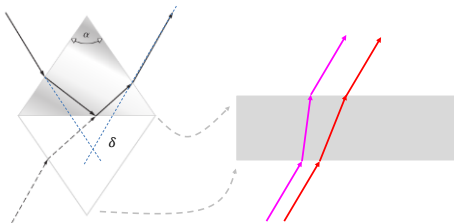
- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos sin verse afectados por efecto de la dispersión. Utilizan RTI y el hecho de que la desviación total entre la direcciones de los rayos de entrada y salida,  $\delta$ , resulta independiente de  $w$



$$n_i \sin \hat{i} = n_t(w) \sin \hat{t}(w)$$

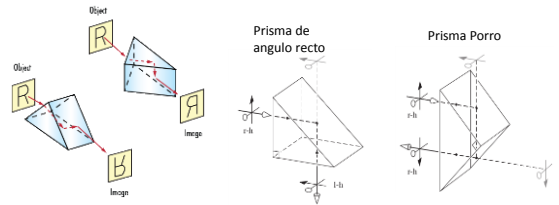
## Prismas Reflectores

- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos sin verse afectados por efecto de la dispersión. Utilizan RTI y el hecho de que la desviación total entre la direcciones de los rayos de entrada y salida,  $\delta$ , resulta independiente de  $w$



## Prismas Reflectores

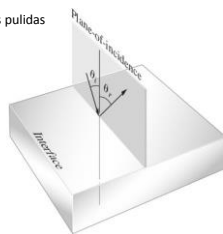
- Elementos **reflectores acromáticos** que cambian la orientación de una imagen o la dirección de propagación de rayos sin verse afectados por efecto de la dispersión. Utilizan RTI y el hecho de que la desviación total entre la direcciones de los rayos de entrada y salida,  $\delta$ , resulta independiente de  $w$



## Espejos

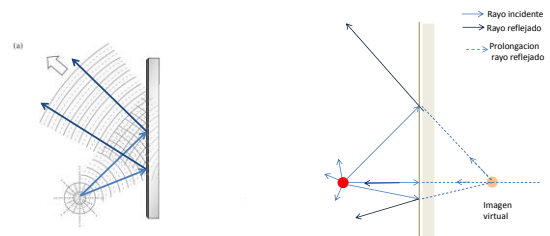
o como escapar del karma de la dispersión

- Tienen la ventaja de no sufrir efectos dispersivos
- La regla de oro es la ley de reflexión
- Construidos utilizando superficies metálicas pulidas



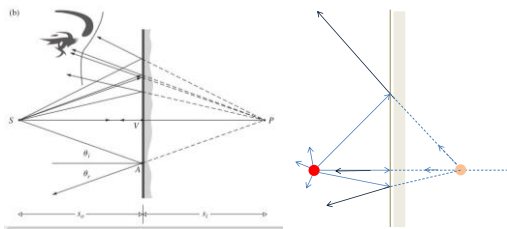
## Espejos planos: formación de imágenes

- Para obtener la imagen de una fuente puntual producida por reflexión sobre una superficie plana aplicamos la ley de reflexión sobre los rayos emitidos por la fuente puntual S.



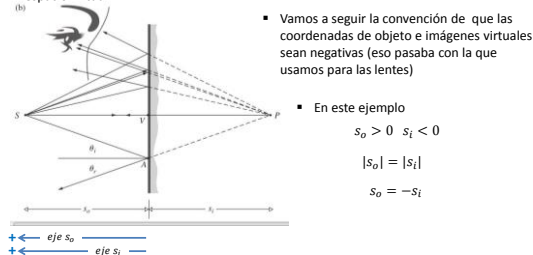
## Espejos planos: formación de imágenes

- Los rayos reflejados emitidos por la fuente puntual S parecen provenir de P
- Decimos que la imagen de la fuente puntual S, es la fuente **virtual** P
- P esta ubicada a la misma distancia de la superficie del espejo que S, pero en un espacio virtual



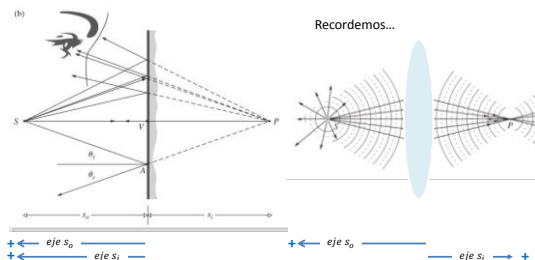
## Espejos: convención de signos

- Los rayos reflejados emitidos por la fuente puntual S parecen provenir de P
- Decimos que la imagen de la fuente puntual S, es la fuente **virtual** P
- P esta ubicada a la misma distancia de la superficie del espejo que S, pero en un espacio virtual



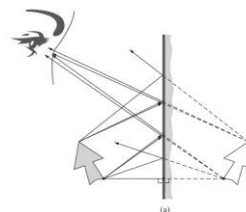
## Espejos: convención de signos

- Vamos a seguir la convención de que lo que las coordenadas de objeto e imágenes virtuales sean negativas (eso pasaba con la que usamos para las lentes)



## Espejos planos: formación de imágenes

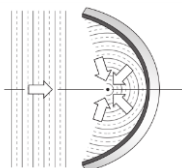
- Para obtener la imagen de un objeto extendido cada punto del mismo se lo considera una fuente puntual que producirá su imagen puntual correspondiente



## Espejos curvos (mas no esféricos)

Todo lo que aprendimos para lentes nos va a servir ahora tambien...

Análogamente a lo que hicimos con dioptras (elementos refractores) nos interesa ver qué geometría de **elementos reflectores** permite transformar una onda plana en una onda esférica

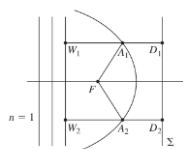


Puntos que definen un frente de onda plano se *reacomodan* en frentes de ondas esféricas que convergen a un punto...para luego seguir como si emanaran del mismo

## Espejos curvos (mas no esféricos)

Todo lo que aprendimos para lentes nos va a servir ahora tambien...

Análogamente a lo que hicimos con dioptras (elementos refractores) nos interesa ver qué geometría de **elementos reflectores** permite transformar una onda plana en una onda esférica



Mantra de los caminos opticos:  
La LCO de rayos que conectan puntos de dos frentes de ondas es siempre la misma

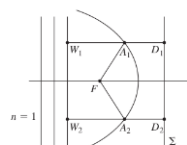
$$LCO|_{W_1 A_1 F} = LCO|_{W_2 A_2 F}$$

$$t|_{W_1 A_1 F} = t|_{W_2 A_2 F}$$

## Espejos curvos (mas no esféricos)

Todo lo que aprendimos para lentes nos va a servir ahora tambien...

Análogamente a lo que hicimos con dioptras (elementos refractores) nos interesa ver qué geometría de **elementos reflectores** permite transformar una onda plana en una onda esférica



Notemos que queda definido tb un plano  $\Sigma$  tal que

$$|A_1F| = |A_1D_1| \quad |A_2F| = |A_2D_2|$$

y en general cualquier punto  $A$  de la superficie tiene que cumplir que

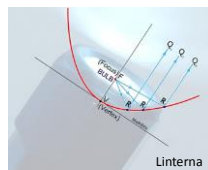
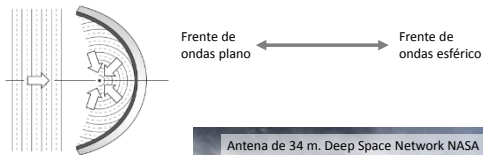
$$|AF| = |AD|$$

que es de la forma de una parábola (me lo dijo mi primo matemático)

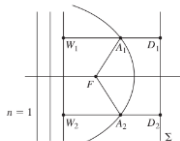
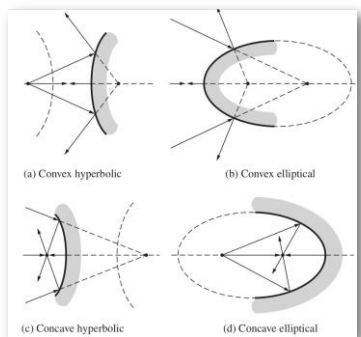
puntos se encuentran a la misma distancia del foco  $F$ , que de la recta directriz  $\Sigma$

$$LCO|_{W_1A_1F} = LCO|_{W_2A_2F}$$

## Espejos parabólicos



## Otros espejos curvos (mas no esféricos)



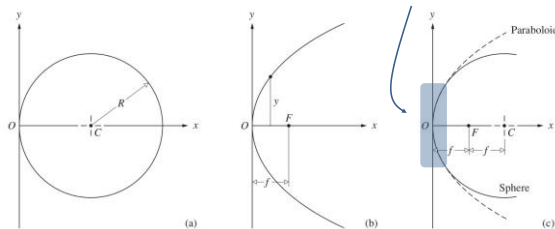
$$|AF| = e|AD|$$

- e=1 paraboloide
- e<1 elipsoide
- e>1 hiperboloide

## Espejos esféricos

Si, ok. Los espejos parabólicos son lo que necesitamos...pero es que los esféricos son taaanto mas fáciles de fabricar!

Todo debería funcionar bien si nuestro sistema óptico está diseñado para trabajar sólo con **rayos paraxiales**

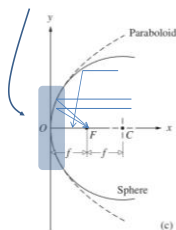


## Espejos esféricos

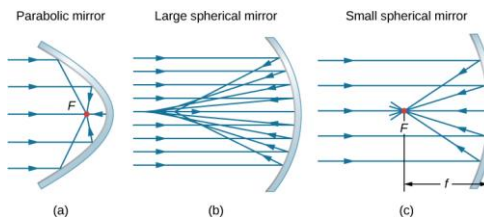
Si, ok. Los espejos parabólicos son lo que necesitamos...pero es que los esféricos son taaanto mas fáciles de fabricar!

Todo debería funcionar bien si nuestro sistema óptico está diseñado para trabajar sólo con **rayos paraxiales**

- En la aproximación paraxial los espejos esféricos podrían actuar como los espejos paraboloideos.
- Si mi sistema óptico esférico no está bien diseñado (por ejemplo no bloquea rayos no-paraxiales) van a aparecer aberraciones en las imágenes producidas (la imagen de un punto será un manchón, por ejemplo)

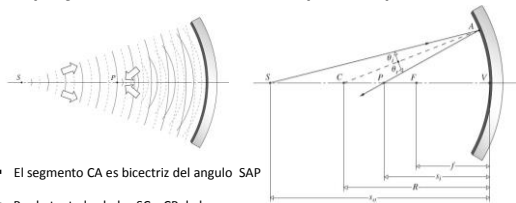


## Ejemplo





### Espejos esféricos en aprox. paraxial



- El segmento CA es bisectriz del ángulo SAP
- Por lo tanto los lados SC y CP de los triángulos SAC y CAP, resultan proporcionales a SA y PA respectivamente (obvio)
 
$$\frac{SC}{SA} = \frac{CP}{PA}$$
- Además:
 
$$\frac{SC}{SA} = \frac{s_o - |R|}{s_o + R} \quad R < 0$$

$$\frac{CP}{PA} = \frac{|R| - s_i}{-s_i - R} \quad R > 0$$

misma convención que con lentes

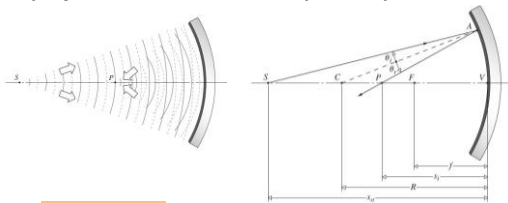
En aprox paraxial:

$$\frac{SA}{PA} \approx \frac{s_o}{s_i}$$

$$\frac{s_o + R}{s_o} = -\frac{s_i + R}{s_i}$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{R} = -\frac{1}{s_i} - \frac{1}{R}$$

### Espejos esféricos en aprox. paraxial



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R}$$

notar que para espejos cóncavos:  $R < 0$   
convexos:  $R > 0$   
y espejos planos?

En aprox paraxial:

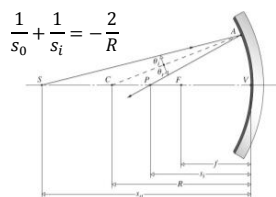
$$\frac{SA}{PA} \approx \frac{s_o}{s_i}$$

$$\frac{s_o + R}{s_o} = -\frac{s_i + R}{s_i}$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{R} = -\frac{1}{s_i} - \frac{1}{R}$$

### Puntos especiales

- Foco imagen,  $f_i$** , es el punto donde se forma la imagen cuando incide una onda plana (objeto se encuentra muy lejos, en el infinito)
- Foco objeto,  $f_o$** , se encuentra en la posición que produce una imagen en el infinito



$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R}$$

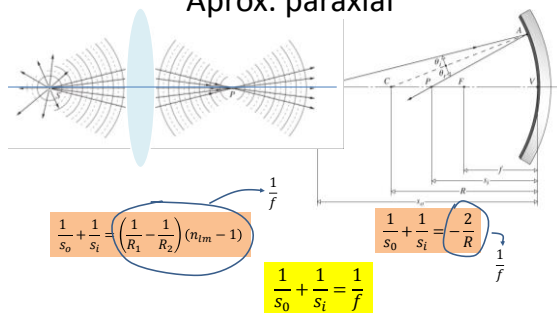
$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f_i} = -\frac{2}{R}$$

$$\frac{1}{f_o} + \frac{1}{\infty} = -\frac{2}{R}$$

$$f_i = f_o = -\frac{R}{2}$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

### Aprox. paraxial



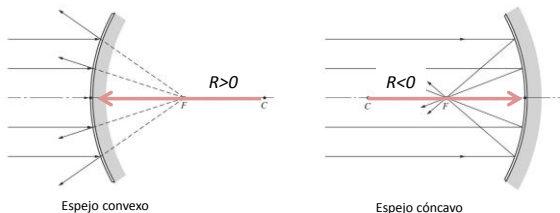
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)(n_{lm} - 1)$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

La optica paraxial de espejos se rige por la misma ecuación que la de lentes, cuando expreso las propiedades del sistema en términos de  $f$

### Puntos especiales

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

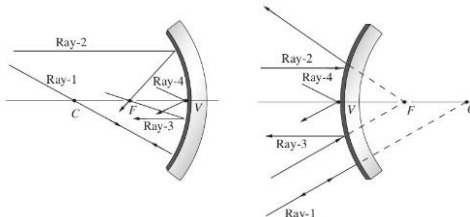


Espejo convexo

Espejo cóncavo

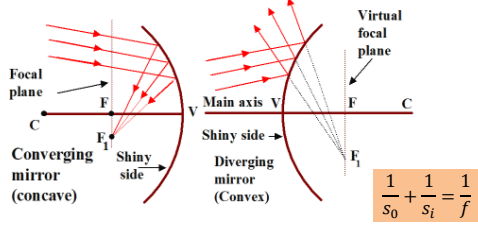
### Trazado de rayos

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



- Rayo que pasa por centro de curvatura (C), vuelve sobre sí mismo
- Rayo incidente paralelo al eje óptico *para* por el foco
- Rayo incidente que pasa por el foco emerge paralelo al eje.
- Rayo que incide en el vertice V (es facil)

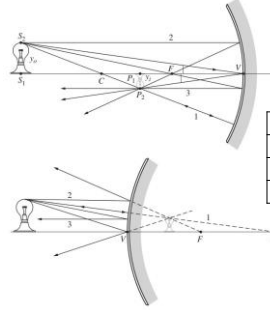
Desde el infinito y mas alla



$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

- Manojo de rayos paralelos convergen en el plano focal.

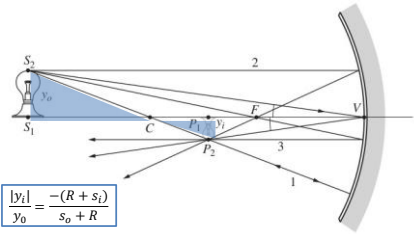
Formación de imágenes  $\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$



$s_0, f_0$	+ izquierda de V
$s_i, f_i$	+ izquierda de V
R	+ si C esta a la derecha de V
$y_0, y_i$	+ encima del eje optico

Aumento lateral

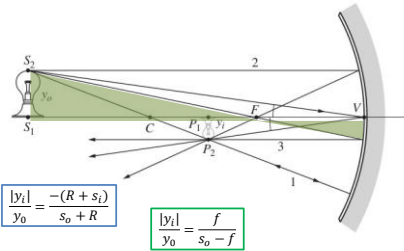
$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{-(R + s_i)}{s_0 + R}$$

Aumento lateral

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

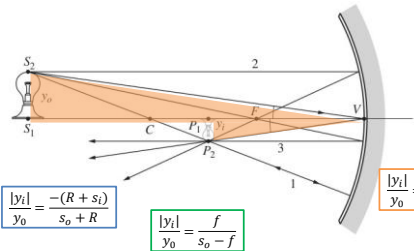


$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{-(R + s_i)}{s_0 + R}$$

$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{f}{s_0 - f}$$

Aumento lateral

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



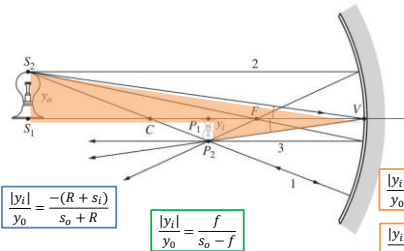
$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{-(R + s_i)}{s_0 + R}$$

$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{f}{s_0 - f}$$

$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{s_i}{s_0}$$

Aumento lateral

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$



$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{-(R + s_i)}{s_0 + R}$$

$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{f}{s_0 - f}$$

$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{s_i}{s_0}$$

$$\frac{|y_i|}{y_0} = \frac{s_i - f}{f}$$

$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_0} = -\frac{s_i}{s_0} = \frac{f}{f - s_0} = \frac{s_i - f}{f}$$

## Aumento Lateral

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = -\frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

$$M_T \equiv \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = \frac{f}{f - s_o} \equiv \frac{s_i - f}{f}$$

