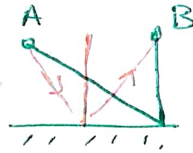
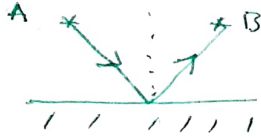


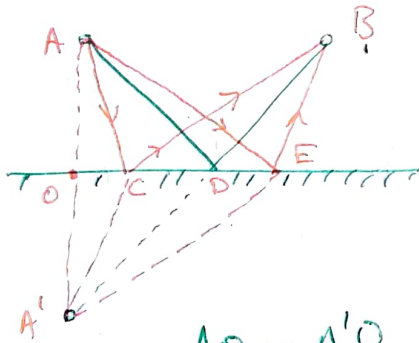
# FERMAT İlkesi

①  
1-10-19

MÖ 244 Hero  $\Rightarrow$  ışık en kısa yolu takip eder.



## YANSIMA (REFLECTION)



$$AO = A'O$$

$$AOC = A'OC \text{ çs wegen}$$

A' B'ye en kısa yol hangisidir?



en kısa yol.

A'DB

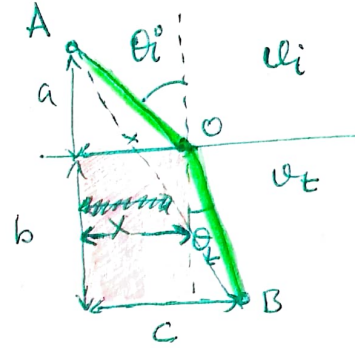
depru üzerindeki yol en kısa yoldur.

## KIZILMA (REFRACTION)

$n_I$  en kısa yoldan gitmez ışık.

$n_{II}$   $A \rightarrow B$  en kısa zamanda gider

## FERMAT



$v_I > v_{II}$  ; II ortamda ışık daha yavaş.

A B t sürede ulaşır.

$$t = \frac{AO}{v_I} + \frac{OB}{v_{II}}$$

X  $\rightarrow$  O noktasını konumunu verir.

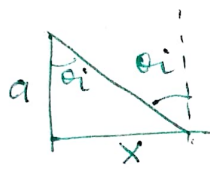
$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{b^2 + (c-x)^2}}{v_{II}}$$

X ne olmalı ki t minimum olsun

$$\frac{dt}{dx} = 0 \text{ olmalı}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 2x (a^2 + x^2)^{-1/2}}{v_I} + \frac{(-1) \cdot 2(c-x) [b^2 + (c-x)^2]^{-1/2}}{v_{II}}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v_I (a^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{c-x}{v_{II} [b^2 + (c-x)^2]^{1/2}} = 0$$



$$\frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \sin \theta_i$$



$$\sin \theta_t = \frac{c-x}{\sqrt{b^2 + (c-x)^2}}$$

$$\frac{dt}{dx} = 0 = \frac{\sin \theta_i}{v_i} - \frac{\sin \theta_t}{v_t}$$

$$\frac{\sin \theta_i}{v_i} = \frac{\sin \theta_t}{v_t}$$

$$v = \frac{c}{n} \Rightarrow v_i = \frac{c}{n_i}; v_t = \frac{c}{n_t}$$

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

SNELL YASASI

FERMAT İlkesi  $\Rightarrow$  minimum zaman

Bazı durumlarda minimum zamanı veren birden fazla yol olabilir.

Eliptik aukur ayna sonsuz yol var.



Bir optik sistemde

- verilen iki nokta arasında yayılan ışık ışını tarafından takip edilecek gerçek yol
- ışının optiksel yolunu
- [birinci-derce bir yaklaşıklıkta]
- gerçek yolun yakın komşuluğundaki diğer yollara eşit yapacak olandır.

Belli bir integrali minimum yapan bir fonksiyonun varyasyon analizi ile betirilmesi.

TERSİNEBİLME (reversibility)

İLKEİ

A  $\rightarrow$  B giderse

B  $\rightarrow$  A gider

optik sistemde ışının yönü zıt çevrilirse geldiği yolu takip eder.



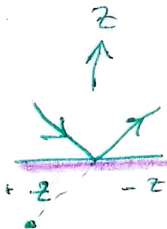
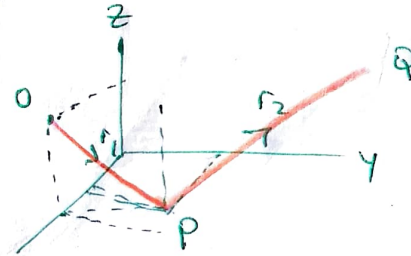
DÜZLEM AYNA DA YANSIMA

düz

~~paralel gelen ışık~~ yüzey pürüzlü (rough) dâimî yansımaya

paralel gelen ışık paralel yansır

paralel gelen ışık saçılır.

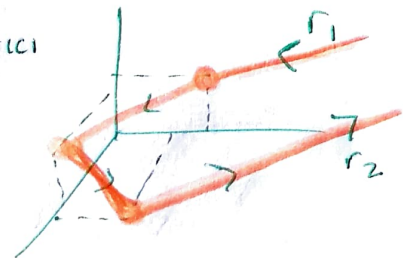


x

OP xy düzleminden yansıyor

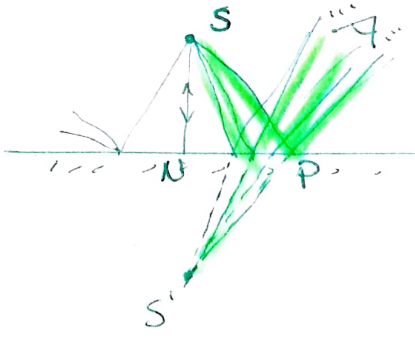
$$\hat{r}_1 = (x, y, z) \rightarrow \hat{r}_2 = (x, y, -z)$$

KÖŞE yansıtıcı



$$r_1 = (x, y, z) \Rightarrow r_2 = (-x, -y, -z)$$

DÜZLEM aynada görüntü (2) oluşması 1.10.19



S'deki cisimden gelen ışınlar aynadan yansır  $SNP$   $S'NP$  üçgeni oluşur.

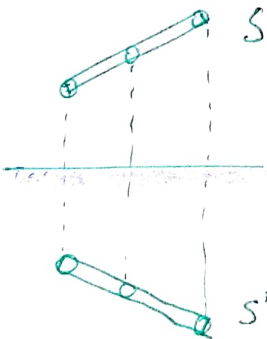
$S'N = SN$  uzaklığı eşit.

görüntü  $S'$  den kaynaklanıyor gibi gözükür.

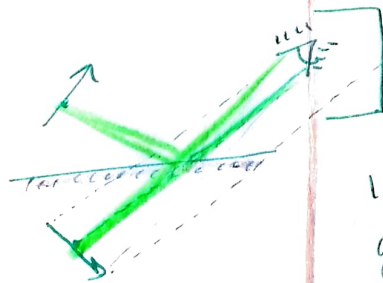
gerçek ışınların habiri ayna düzleminin arapısında değildir.

\* Dolayısıyla görüntü sanal zahiri (imaginary) görüntü olarak adlandırılır.

\*  $S'$  gerçek görüntü olsaydı ekrana üzerine düşürülebilirdi.

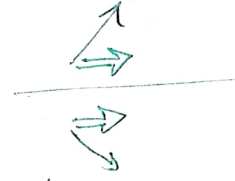


→ Boyu aynı → aynı büyüklükte  
→ her nokta simetrik olarak aynı mesafede uzaklığında bulunur.

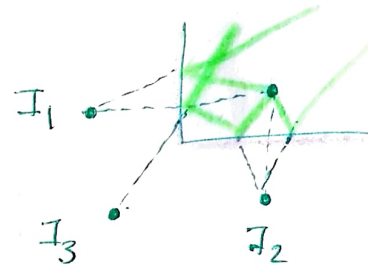


görüntünün konumu gözün konumuna bağlı değildir.

→ görüntü esit mesafede aynı büyüklükte (Birim büyüklükte) sahip  
→ cisim ve görüntünün emine yönelimleri aynı



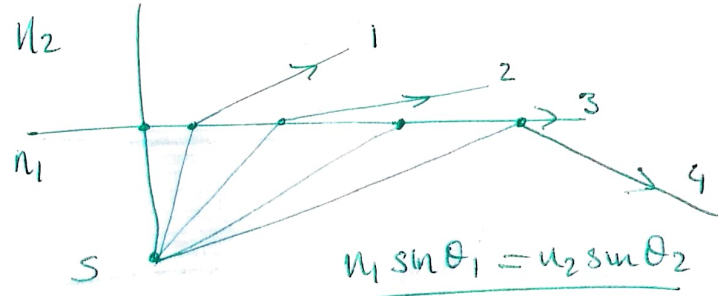
→ sağ eli bir cisim sol eli gözün  $x y z \rightarrow x y - z$



$I_1 I_2$  birer yansıma oluşur.

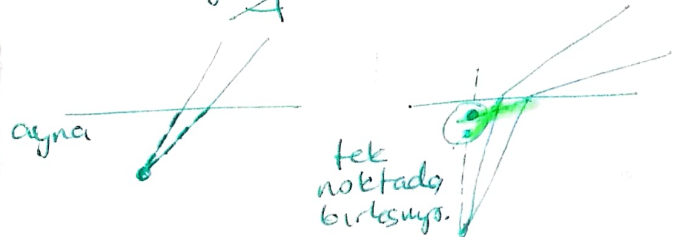
$I_3$  iki yansıma oluşur.

DÜZLEM yüzeyden KIRILMA  $n_1 > n_2$



$n_1 = 1.33$  su  
 $n_2 = 1.0$  hava

S noktasal kaynaktan çıkan ışık kırılır. Bu ışıklar tarafından görüntü belirlenmez çünkü doğrusal olarak tek kaynaktan çıkıyor olarak görülür.



→ Kırılan ışınların kesikli aralığı aynı noktadan çıkmıyor

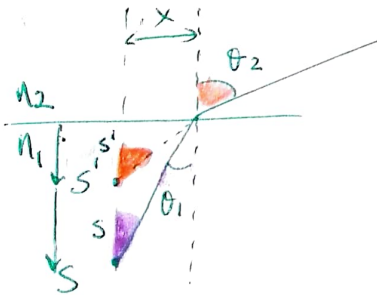
→ Fakat yüzey normali ile çok küçük açılar yapacak şekilde yayılan ışınlar için makul bir görüntü elde edilebilir.

paraksiyel ışınlar  $\Rightarrow$  optik sistemin merkezi eksenine yakın ışınlardır. böylelikle optik eksenle küçük açılar yaparlar.

→ görüntüyü oluşturmak için sadece bu şekilde paraksiyel ışınların izini verdiğini bu yaklaşımlarda gelme ve kırılma açıları küçük.

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta \text{ (radyan)}$$

$$n_1 \sin \theta_1 \Rightarrow n_1 \tan \theta_1 = n_2 \tan \theta_2$$



$$\tan \theta_1 = \frac{X}{S} \quad ; \quad \tan \theta_2 = \frac{X}{S'}$$

$$n_1 \frac{X}{S} = n_2 \frac{X}{S'}$$

S cisim derinliği

yüzey altında dik uzaklık

$$S' = \frac{n_2}{n_1} S$$

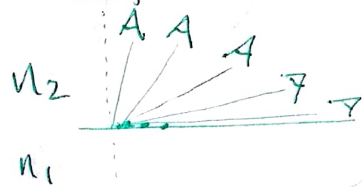
Suya yukarıdan bakıldığında

$$\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta$$

gerekte olduklarından daha YAKIN gözükürler.

$$S' = \frac{1}{1.33} S \Rightarrow \approx \frac{3}{4} S = S'$$

$\theta_2$   $\frac{3}{4}$  küçük olduğu zamanda da makul retinal görüntü oluşur. diyafram = göz bebeği \* ışınların küçük devrinin geçmesi ve izni verir. ışık yolları çok az farklıdır  $\Rightarrow$  Bakma açısına göre derinlik değişecektir.



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 \sin \theta_c = n_2$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

$\theta_c$  = kritik açı

max açı dışarı geçebilecek

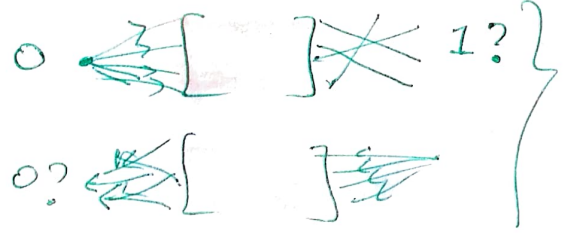
$$\theta_1 > \theta_c \quad \text{izn yansım}$$

# OPTİK bir SİSTEMDE 1.10.19 (3) GÖRÜNTÜLEME

gerçek bir cisim görüntülenek için her cisim noktası ve eşleniği için o'dan çıkıp giden I'dan geçen her

IDEAL olmayan GÖRÜNTÜLER  
IŞIK SİĞİRTME KIRILMA  
sacılması

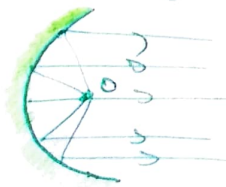
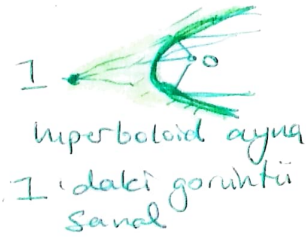
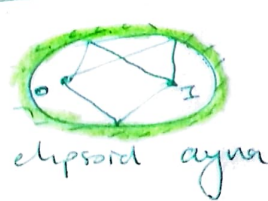
nedenleri ile oluşur.



Sistem sapmaları

$\lambda$  - dalga boyu. kırınım etkileri var  
 $\lambda \rightarrow 0$  kırınım etkileri kalkar.

Kusursuz görüntü oluşturan yansıtıcı veya kırıcı yüzeylere KARTEZİEN yüzeyler denir

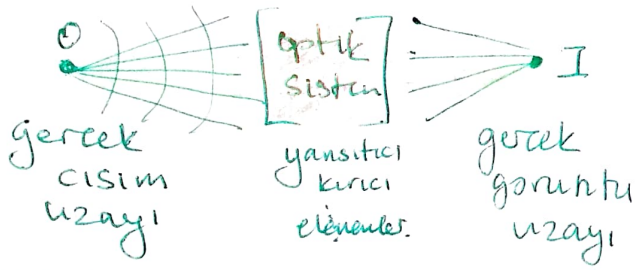


paraboloid ayna

ışınlar O görüntü oluşturur.

Cisim, görüntü arasında

eş zamanlı ışınlara oluşur  $\Rightarrow$  Fermat



ışınlar

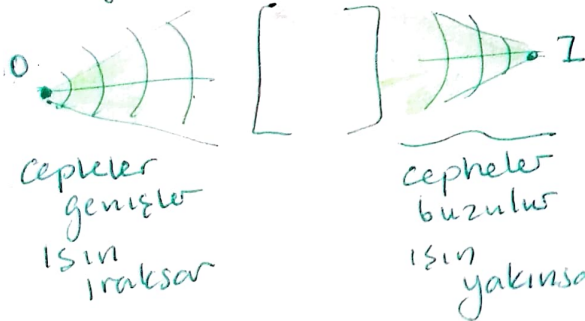
$\rightarrow$  Işınlardan cisimden [O'dan] her yöne radyal olarak dağılır.



Dalga cephesi boyunca aynı sürde yayılır.

$\rightarrow$  Işınlara dik olan küresel yüzeyler dalga cephesi dir.

$\rightarrow$  gerçek cisim uzayında ışınlardan IRAKSAR ve dalga cepheleeri genişler.



O  $\rightarrow$  I her ışın aynı geçiş sürasına sahiptir.

Bu ışınlardan eş zamanlıdır (isochronous)

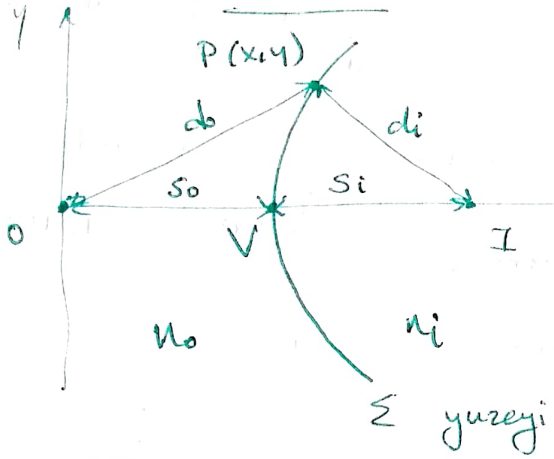
I  $\rightarrow$  O tersinebilirlik ilkesi

O ; I noktaları optik sistem için eşlenik (conjugate) noktaları olarak bilinir.

Kirinin ile gornu olusturan

Kartzyen yuzeyler

Karmasik?!



Her 0 cikan isin OPI I dan gavesidir

✗ İsteyen sey ✗

OV I isini OPI eşzamanlıdır.

eşzamanlı isinlar aynı uguluktadır.

$$t = \frac{x}{v} = \frac{nx}{c} \quad t \sim nx$$

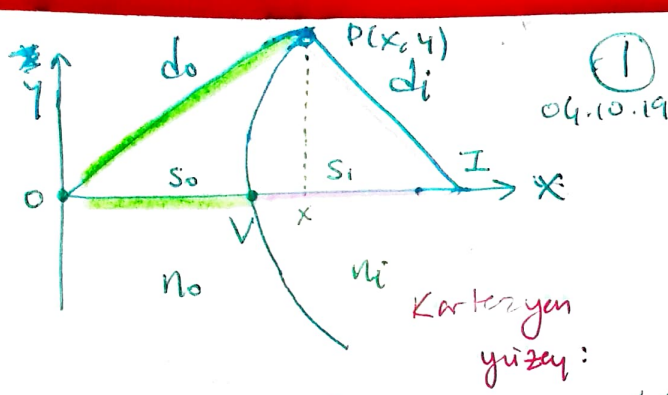
$$n_0 d_0 + n_i d_i = n_0 S_0 + n_i S_i = sbt$$

[P(x, y) noktası] için

$$n_0 \sqrt{x^2 + y^2} + n_i \left[ y^2 + (S_0 + S_i - x)^2 \right]^{1/2} = sbt$$

$$d_0 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$d_i = \sqrt{y^2 + (S_0 + S_i - x)^2}$$



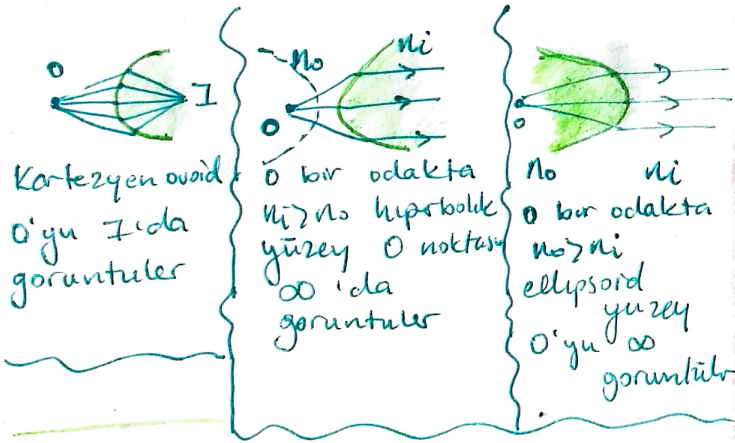
OPI ışını ve OVI ışını eşzamanlıdır.

$$t = \frac{x}{v} = \frac{nx}{c} \quad t \text{ her iki ışın için aynı.}$$

$$n_o d_o + n_i d_i = n_o s_o + n_i s_i = s b t$$

$$s b t = n_o (x^2 + y^2)^{1/2} + n_i [y^2 + (s_o + s_i - x)^2]^{1/2}$$

$$s b t = n_o s_o + n_i s_i \quad \text{Kartzyen oval denklemi}$$



→ Sapma olmaksızın görüntü oluşması sadece O noktası için geçerlidir.

→ Diğer noktalar separ kusur!

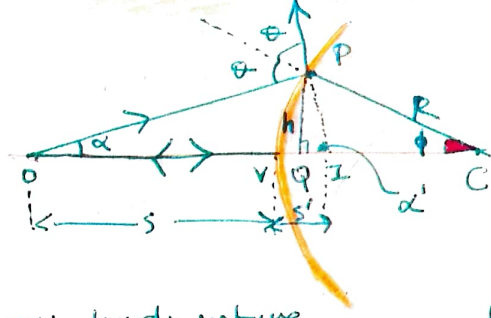
→ gerçek cisim ne kadar büyükse görüntüsü o kadar daha az keski olur.

→ doğru optik yüzey küreseldir hiperboloid değil.

→ aberration ≡ sapma

$$\left( \frac{R}{r} \right) \quad R \rightarrow \infty \quad \left| \quad \frac{R}{r} \rightarrow \infty \right.$$

KÜRESEL YANSIMA



Dış bükümlü ayna

iki ışın

OV kendi üstüne geri yansır.

$$\frac{OP}{OV}$$

OP P'den yansır

İki ışın da I'ya gelir.

geriye doğru yığılan ışınların kesişimi O'ya eşlenik olan I noktasındadır.

Ayna arkasında oluşan görüntü SANAL

S cisim uzaklığı ; Küresel

S' görüntü uzaklığı

$$\sin \phi = \phi - \frac{\phi^3}{3!} + \frac{\phi^5}{5!} - \dots$$

$$\cos \phi = 1 - \frac{\phi^2}{2!} + \frac{\phi^4}{4!} - \dots$$

$\phi$  yeterince küçük ;  $\sin \phi \approx \phi$

$$\cos \phi \approx 1$$

$$\theta = \alpha + \phi$$

$$2\theta = \alpha + \alpha'$$

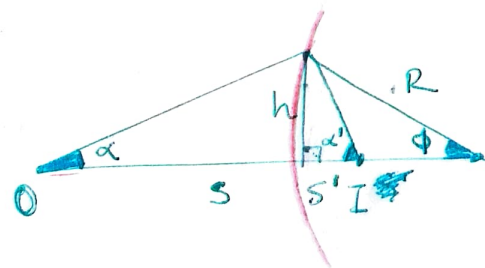
$$-2\phi = \alpha - \alpha'$$

$$\phi \approx \tan \phi$$

$$-2 \frac{h}{R} = \frac{h}{s} - \frac{h}{s'}$$

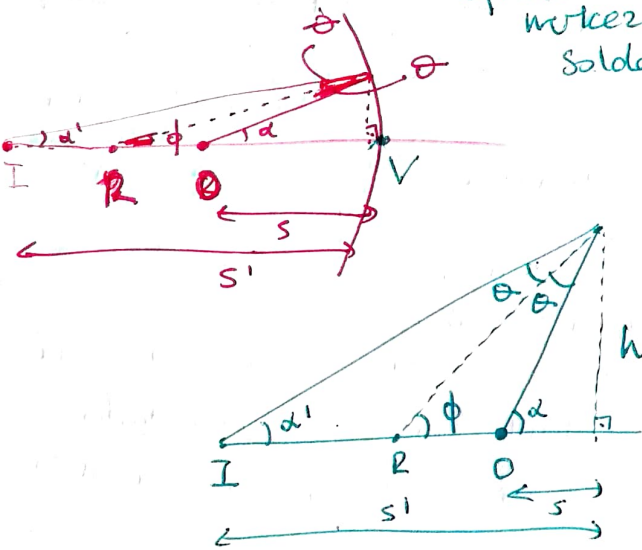
$$-\frac{2}{R} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s'} \quad \text{DİŞ BÜKÜMLÜ AYNA}$$

R = yarıçap  
S = cisim S' = görüntü



$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{R}$$

KÜRESEL  
İÇ  
BÜKEY  
eşrilik  
merkezi  
solda



$$\alpha = \alpha' + 2\theta \quad \left. \begin{array}{l} \alpha = \phi + \theta \\ \alpha - 2\phi = \alpha' - 2\phi \end{array} \right\} \theta \text{ yok et}$$

$$\alpha + \alpha' = 2\phi$$

$$\frac{h}{s} + \frac{h}{s'} = +\frac{2h}{R} \quad ?!$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = -\frac{2}{R}$$

→ ışın

O (cisim)    C merkez    I görüntü    V merkez aynesi simetri

eger O V +s cisim gerçek



V O -s cisim sanal?



I V görüntü  
s' > 0, s' +, gerçek



s' < 0; -s' sanal



R < 0  
İçbükey



disbükey  
R > 0

f: fokal = fokus = odak noktası

f = -R/2    f > 0 içbükey

f < 0 dışbükey

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \underline{\underline{f, s, s' \xrightarrow{+} -}}$$

$$\frac{s' + s}{ss'} = \frac{1}{f}$$

$$s'f + sf = ss'$$

$$s'(f - s) = -fs$$

$$\boxed{s' = \frac{fs}{s - f}}$$

s → yerleştir

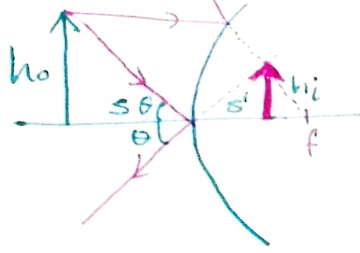
f  $\xrightarrow{+}$  ? yerleştir

s için ağız.

4.10.19

(2)

cismin büyüklüğü / uzunluğu



$$\frac{h_o}{s} = \frac{h_i}{s'}$$

görüntü uzunluğu

$$h_i = h_o \frac{s'}{s}$$

uzunluk

büyütmesi

$$|m| = \frac{h_i}{h_o} = \frac{s'}{s}$$

$$m = -\frac{s'}{s}$$

→ görüntü cisim ile aynı yönlüde ise



$$m = +$$

görüntü



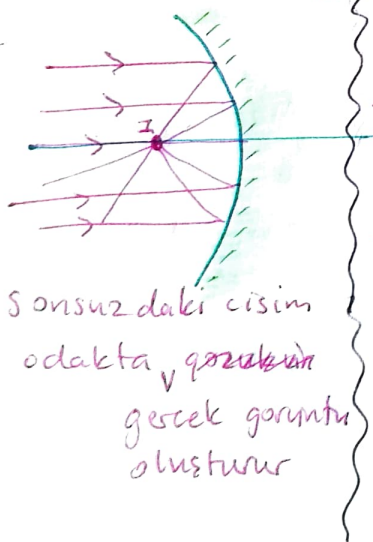
cisim ile zıt yönlüdeyse



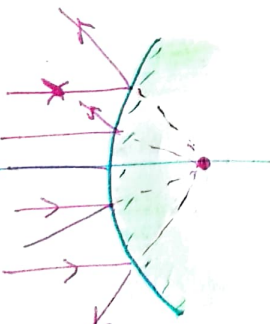
$$m = -$$

örneğin  $s' (-)$  ise  $(+)$  büyütme için

$$m = -\frac{s'}{s}$$



Sonsuzdaki cisim odakta, gözleğin gerçek görüntü oluşturur



Sonsuzdaki cisim odakta, sanal görüntü oluşturur.

örnek: 3cm yüksekliğinde bir cisim odak uzaklığı 10cm olan dışbükey ve içbükey karenel aynadan 20cm uzapla yerleştiriliyor  $s'$ ;  $h'$ ?  $m$ ?

dışbükey

$$f = -10\text{cm}$$

$$s = 20\text{cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{20} + \frac{1}{s'} = -\frac{1}{10} \Rightarrow \frac{1}{s'} = -\frac{3}{20}$$

$$s' = -\frac{20}{3}\text{cm}$$

$$m = -\frac{s'}{s} = \frac{h'}{h} = -\frac{-20/3}{20} = +\frac{1}{3}$$



3'te bir küçültme yön ayn.

içbükey



$$f = +10\text{cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{20} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{10}$$

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{20} \quad s' = 20\text{cm}$$

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{20}{20} = -1$$



boyu aynı ters çevrilmiş

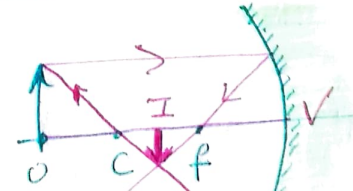
ışın çizme

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad f > 0$$

$$s > 0; s' > 0$$

$$m = (-) \text{ ters}$$

$$m < 1 \text{ küçült}$$



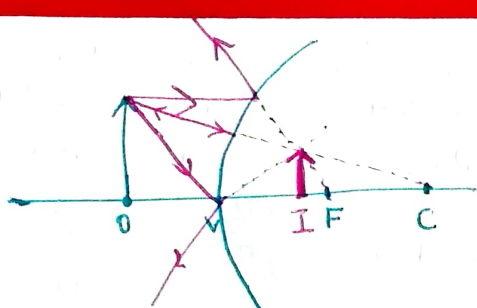
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad f > 0$$

$$s > 0; s' < 0$$

$$m = (+) \text{ düz}$$

$$m > 1 \text{ büyümüş}$$





$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad f < 0 \text{ (convex) disbükey}$$

$$S(+); S'(-) \quad |m| < 1 \text{ küçültmüş}$$

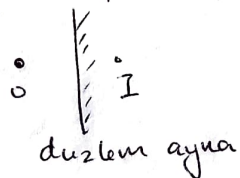
$$m = -\frac{s'}{s} = (+) \text{ aynı yönde}$$

- Paralel ışın F' odak noktasına geçen doğru boyunca yansır
- F odaktan geçen ışın paralel yansır
- C merkezden geçen ışın, geri merkezden yansır.
- Herhangi yüzeye gelen ışın, merkezden geçen N normal açısıyla ile aynı açı ile yansır

iki ışın kesişmesi ~~ve~~ görüntüyü belirlemek için yeterlidir !!

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad R \rightarrow \infty \quad f \rightarrow \infty$$

$$\textcircled{1} \quad \frac{1}{s} = -\frac{1}{s}$$



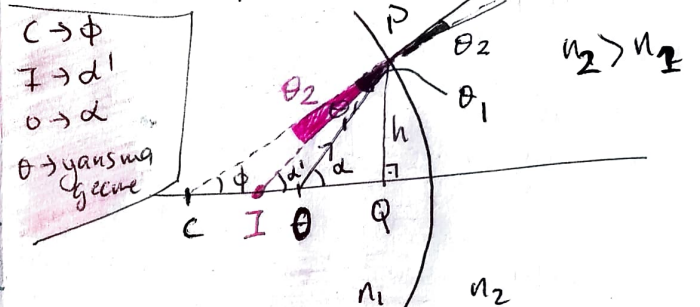
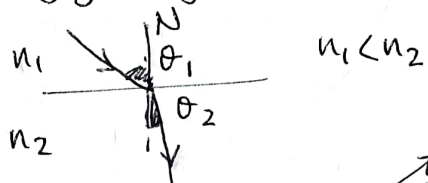
$$\textcircled{2} \text{ if } s = f \quad s' \rightarrow \infty$$

$$\textcircled{3} \text{ if } s = \infty \quad s' \rightarrow f$$

## KURSEL YÜZEYDE KIRILMA

Snell yasası  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

$\theta_1, \theta_2$  ışın'a çizilen N normal açısıyla yopılan açıdır.



Kırılan iki ışının kesişmesi I'dan çıkıyormuş gibi görürüz

$$\text{CPO} \quad \alpha = \phi + \theta_1 \quad \theta_1 = \alpha - \phi$$

$$\text{CPI} \quad \alpha' = \phi + \theta_2 \quad \theta_2 = \alpha' - \phi$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

küçük açı (paraksiyel)  $n_1 \theta_1 \approx n_2 \theta_2$

$$n_1 (\alpha - \phi) = n_2 (\alpha' - \phi)$$

$\theta \approx \sin \theta = \tan \theta$

$$n_1 \left( \frac{h}{s} - \frac{h}{R} \right) = n_2 \left( \frac{h}{s'} - \frac{h}{R} \right)$$

$$\frac{n_1}{s} - \frac{n_2}{s'} = \frac{n_1 - n_2}{R}$$

gerçek cisim / görüntü  $\Rightarrow +$   
 sanal " "  $\Rightarrow -$   
 $s' < 0 ; R < 0$

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$R \rightarrow \infty$  küre  $\rightarrow$  düzlem

$$s' = -\frac{n_2}{n_1} s \quad (\text{görüntü uzaklığı})$$

4.10.19

(3)

gerçek cisim için  $s > 0$

$$s' = -\frac{n_2}{n_1} s ; s' < 0 (-) \quad \text{sanal görüntü}$$

küçük açı yaklaşımı

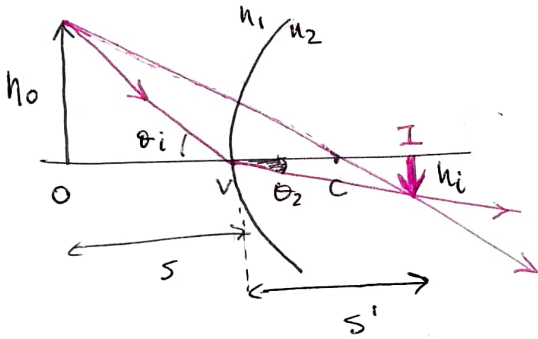
$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

$$n_1 \frac{h_o}{s} = n_2 \frac{h_i}{s'}$$

uzunluk büyütme katsayısı

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{n_1 s'}{n_2 s} \quad m < 0 \text{ ters görüntü}$$

$$m > 0 \text{ düz görüntü}$$



$$n_1 > n_2 \quad m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{n_1 s'}{n_2 s}$$

örnek  $R = 5\text{cm}$  dışbükey küresel yüzey  
30cm uzaklıkta bir cisim hava ortamındadır.  $n_2 = 1.33$   
 $n_1 = 1.0$

görüntü uzaklığı?  
uzunluk büyütme katsayısı?

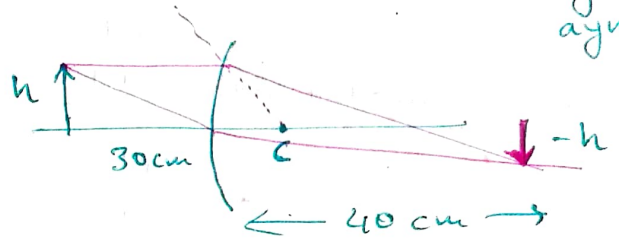
$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$\frac{1}{30} + \frac{1.33}{s'} = \frac{1.33 - 1}{5}$$

$$s' = +40\text{cm} \quad \text{görüntü gerçek}$$

gerçek ışınların kırıldığı yüzeyin sağ tarafında olduğunu gösterir.

$$m = -\frac{n_1 s'}{n_2 s} = -\frac{1(40)}{(1.33)30} = -1 \quad \text{ters boyu aynı}$$

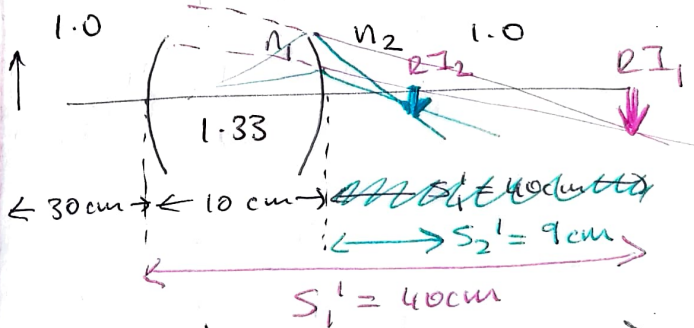


→ şimdi kırıcı ortamın 10cm kalınlığında olduğunu ve  $R = 5\text{cm}$  olan ikinci içbükey yüzey → kalın mercekle olduğunu kabul edelim.

→ (1) yüzeyin kırıcılığı değişmez görüntü yine 40cm oluşur. Fakat (2) yüzey bu görüntüyü yakalar ve tekrar kırar.

→ yüzey (1) tarafından oluşturulan gerçek görüntü yüzey (2) için sanal bir cisim olacaktır.

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$



$$s = (40 - 10)\text{cm} \quad R = -5\text{cm} \quad s_2 = -30\text{cm}$$

$$\frac{1.33}{-30} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1 - 1.33}{-5} \Rightarrow s_2' = 9\text{cm}$$

$$m = -\frac{n_1 s'}{n_2 s} = -\frac{(1.33)9}{(1)(-30)} = +\frac{2}{5}$$

(2) yüzeye gelen cisim ile aynı yönde ve  $\frac{2}{5}$  oranında büyünür

görüntü gerçek değilse  
sanal (-) denot edilir.

## İNCE MERCEKLER

→ küresel yüzeylerde iki kırılma oluşur.  
mercek kalınlığı ihmal edilir

$R_1$  (1) yüzey yarıçapı

$R_2$  (2) yüzey yarıçapı

$$n_1 \left( \frac{R_1}{n_2} - \frac{R_2}{n_2} \right) n_1$$

$$(1) \quad \frac{n_1}{s_1} + \frac{n_2}{s_1'} = \frac{n_2 - n_1}{R_1}$$

$$(2) \quad \frac{n_2}{s_2} + \frac{n_1}{s_2'} = \frac{n_1 - n_2}{R_2}$$

$t$  = merceğin kalınlığı

$$s_2 = t - s_1' \quad t \rightarrow 0$$

ince mercek yaklaşımı

$$s_2 = -s_1'$$

$$(1) + (2) \quad \frac{n_1}{s_1} + \frac{n_2}{-s_2} + \frac{n_2}{s_2} + \frac{n_1}{s_2'} = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$n_1 \left( \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2'} \right) = \frac{n_2 - n_1}{1} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

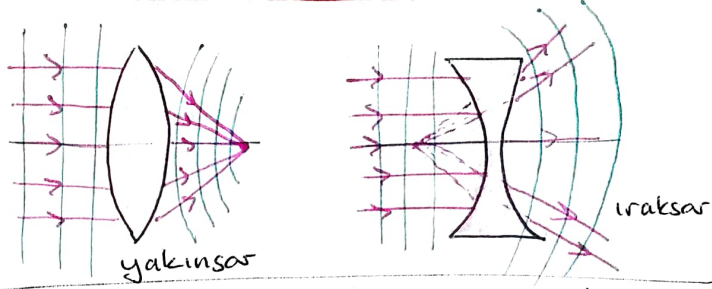
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$\frac{1}{f}$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

mercek yapımcağı denklemi



göç zaman  $n_1 = 1$  (hava)

$$\frac{1}{f} = n_2 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

## ışın gizimi

ışın 1 cisim ucundan optik ekseneye paralel mercek yüzeyinden kırılır. yakınsak merceğin sapdaki odak noktasından (F) geçer.

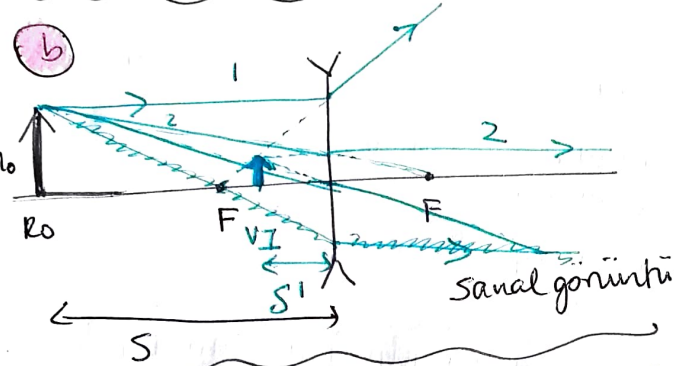
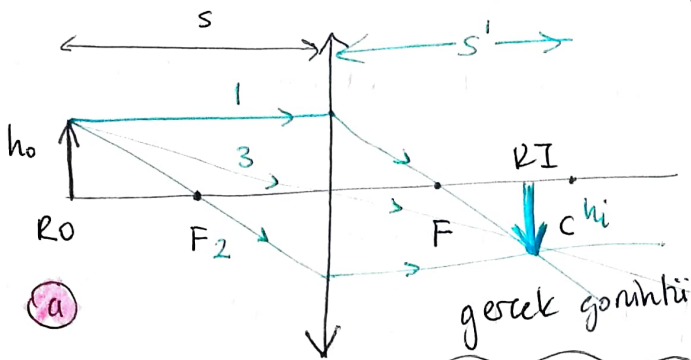
veya ıraksak merceğin soldaki (F) odakten geliyormuş gibi mercek yüzeyinden kırılan paralel ışın.

ışın 2 cisim ucundan ayrılan yakınsak merceğin sol odak (F) noktasından geçer, mercek yüzeyden kırılır; ekseneye paralel gider. veya ıraksak merceğin sapda odak (F) noktasından doğru gider, mercekte kırılır ve paralel gider

ışın 3 cismin ucundan çıkan ışın ıraksak veya yakınsak merceğin doğrudan merkezinden geçer ve değişikliğe/kırılmaya uğramaz.

04.10.19

(4)



→ merceğin sapında bulunan kişi bu ışınları cisimden geliyor gibi görür. Işıkların gerçeğe doğru uzantılarının kesiştiği / (muş gibi) görüldüğü noktada cismin ucunu görür.

→ 2 ışın yeterlidir.

→ dışbükey (yakınsak) mercekte ışınları eksenin doğru tarafına kırar.

→ içbükey (ıraksak) mercekte ışınları eksenin uzak tarafına kırar.

$$\frac{h_o}{s} = \frac{h_i}{s'} ; |m| = \left| \frac{h_i}{h_o} \right| = \left| \frac{s'}{s} \right|$$

(a) 'da  $s > 0$   $s' > 0$   $m < 0$  ters

(b) 'de  $s > 0$   $s' < 0$   $m > 0$  düz

(a) ve (b)  $m = -\frac{s_2}{s_1} = -\frac{s'}{s}$

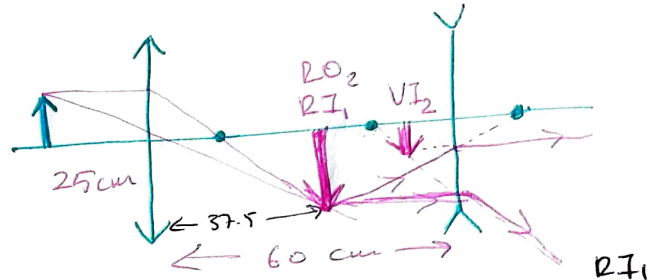
Örnek: İki mercekle sistemi ile elde edilen ara ve son görüntüleri bulunuz.

$f_1 = 15 \text{ cm}$   $f_2 = 15 \text{ cm}$  aravesafe 60 cm

• cisim 25 cm uzakta

(1) dışbükey

(2) içbükey



(1)  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$   $s' = \frac{s_1 f}{s_1 - f} = \frac{(25)(15)}{25 - 15} = +37.5 \text{ cm}$  gerçek

(1) dışbükey  $f = +15 \text{ cm}$

$m_1 = -\frac{s'_1}{s_1} = -\frac{37.5}{25} = -1.5$  ters büyütme

(2) içbükey  $f = -15 \text{ cm}$

$s'_2 = \frac{s_2 f}{s_2 - f}$  ;  $s_2 = 60 - 37.5 = 22.5 \text{ cm}$  (+)

$= \frac{(22.5)(-15)}{22.5 - (-15)} = -9 \text{ cm}$  (sanal)  $V I_2$

$m_2 = -\frac{s'_2}{s_2} = -\frac{-9}{22.5} = +0.4$   $s_2$  ile aynı yönde

Toplam büyütme

$m = m_1 m_2$

$= (-1.5)(0.4)$

$= -0.6$  orijinal cismin %60 boyutunda ve ters

02ET

İnce mercek denklemi  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$

$$s_1' = \frac{s_1 f}{s_1 - f} ; f = 15 \text{ cm}$$

$$= \frac{(25)(15)}{25 - 15} = 37.5 \text{ cm}$$

$$s_2' = \frac{s_2 f}{s_2 - f} \quad f = +15 \text{ cm}$$

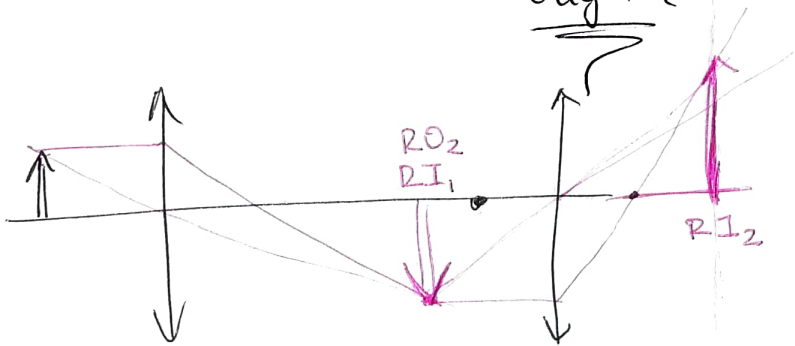
$$s_2 = 60 - 37.5 = 22.5 \text{ cm}$$

$$= \frac{(22.5)(15)}{22.5 - 15} = 45 \text{ cm}$$

$$M_1 = -\frac{37.5}{15} = -1.5$$

$$M_2 = -\frac{45}{37.5} =$$

$$M = M_1 M_2 = \frac{45}{15} = +3 \text{ kat büyütme}$$



### YANSIMA

#### Küresel Yüzey

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad f = -R/2$$

$$m = -s'/s$$

• içbükey  $f > 0$   $R < 0$   
(concave)

• dışbükey  $f < 0$   $R > 0$   
(convex)

#### Düzlemsel yüzey

$$s' = -s$$

$$m = +1$$

### KIRILMA (TEK YÜZEY)

#### Küresel Y.

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$m = -n_1 s' / n_2 s$$

içbükey  $R < 0$

dışbükey  $R > 0$

#### Düzlemsel

$$s' = -\frac{n_2}{n_1} s$$

$$m = +1$$

### KIRILMA İNCE MERCEK

#### Küresel yüzey

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$m = -s'/s$$

içbükey  $f < 0$

dışbükey  $f > 0$



# VERGENCE

KIRINIM GÜCÜ  
(KIRILIM?)

8.10.19

(1)

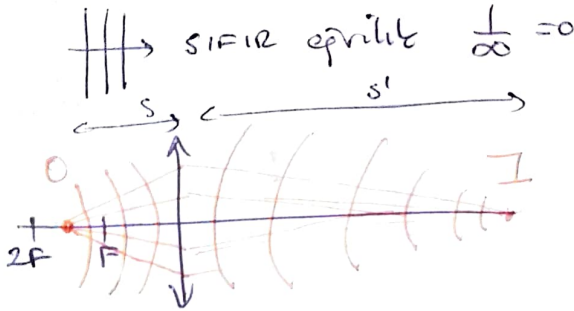
ince mercek denklemleri

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

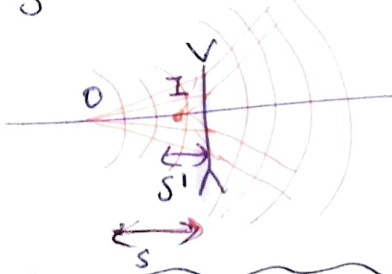
1) uzaklıkların terslerinin toplamı odak uzaklığının tersine eşittir.

2) cisim ve görüntü uzaklıkları tersleri

merceğe giden 0, I konumlarında merkezlenen dalgı cepkelerinin eğriliğini tanımlar.



$$\frac{1}{s} = V \text{ (eğriliği)} \quad \frac{1}{s'} = V' \text{ eğriliği}$$



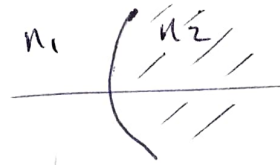
$$V + V' = P$$

merceğin kırma gücü  
(gözlük numarası)  
optometri

$$\frac{1}{0.2m} = 5 \text{ Dioptri} \equiv \text{gözlük numarası}$$

$$20cm = f$$

Dalgaların eğrilik derecesini göz önünde bulundurus.



$$\frac{n_2 - n_1}{R} \equiv \text{kırıcı yüzey gücü}$$

P  $\equiv$  dalganın eğriliğini değiştirme gücü

$\Rightarrow$  İnce mercekler temas edebilecek şekilde beraber yerleştirildiklerinde

$f \equiv$  tek bir değere indirgenir

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_1'} = \frac{1}{f_1} \quad \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1}{f_2}$$

1. mercek görüntüsü  $s_1'$  }  $s_2 = -s_1'$   
2. mercek cisimi  $s_2$

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}$$

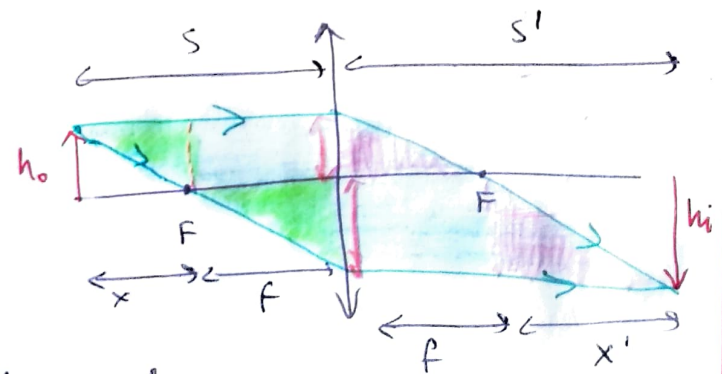
temas eden ince mercekler

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots$$

kırılma kırınım güçleri

$$P = P_1 + P_2 + \dots$$

## İNCE MERCEK İÇİN NEWTON denklemleri



$$\frac{h_i}{h_o} = \frac{f}{x} \Leftrightarrow \frac{h_i}{h_o} = \frac{x'}{f} \quad \left\{ \begin{array}{l} m = -\frac{f}{x} \\ = -x'/f \end{array} \right.$$

büyütme  
(-) ters görüntü

$$xx' = f^2$$

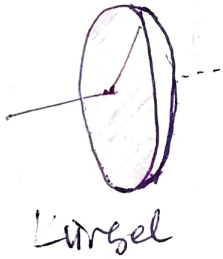
$XX' = f^2$  bazen  
daha  
kullanılırlar.

## Silindirik mercekle

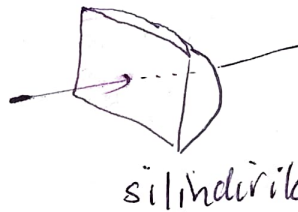
- astigmatizmi düzeltmede kullanılırlar
- noktaları düz çizgi gibi gösterirler

Küresel mercek → dâireye

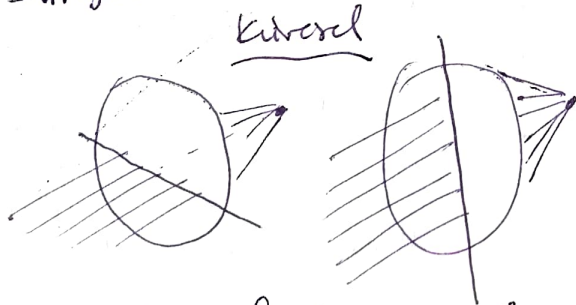
- optik eksen eriklenmez;
- simetri eksenidir
- yüzey eğriliklerinin eksenine dâğırsız



Küresel



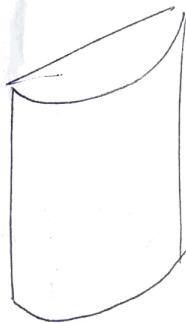
Silindirik



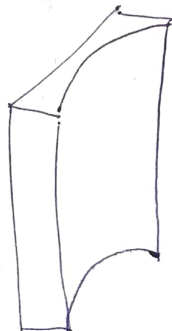
Küresel

yatay & dikey ışınlar

aynı F noktasında toplanır.

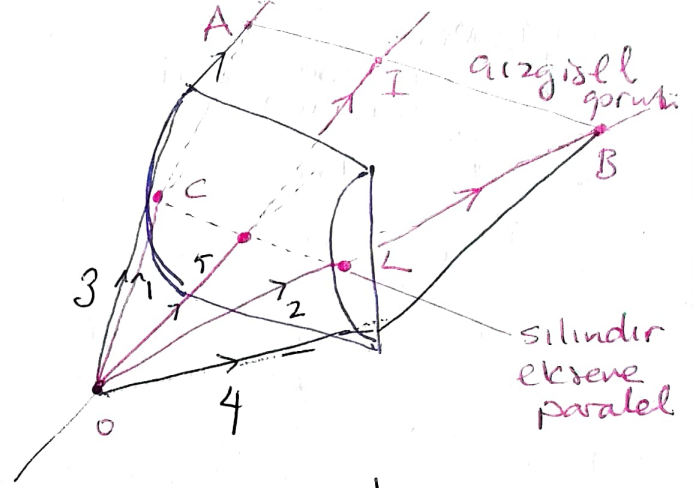


dışbükey



içbükey

Silindirik



$$\frac{AB}{CL} = \frac{s+s'}{s}$$

1,2,3 A'da odaklanır.

2,4 B'de odaklanır.

† yatay kesim boyunca 1,5,2  
ışınlarında odaklanma olmaz.

## 2. unit Örnekler - devam

2.11 İki katlı ayna cisminin 2 katı bir görüntüyü ekranda oluşturuyor. Hem ekran hem cisim hareket ettiriliyor. ekranda 3 katı büyüklüğünde görüntü oluyor.

Bu şekilde ekran 75cm hareket ettiyse cisim ne kadar hareket etmiştir?  $f?$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$



ekran  $\rightarrow$  gözetik görüntü

$$2 \text{ kat} = m$$

$$s_1 \rightarrow s_1' \quad m = 2 = \frac{s_1'}{s_1}$$

Ekran ve  $s'$  aynı

$$s_2 \rightarrow s_2' \quad m = 3 = \frac{s_2'}{s_2}$$

$s_1; s_1'$   
 $s_2; s_2'$   
 $f$  } bilinmiyor.

$$f = \frac{s_1 s_1'}{s_1 + s_2'} = f = \frac{s_2 s_2'}{s_2 + s_2'}$$

$$s_2' - s_1' = 75 \text{ cm}$$

$$\frac{s_1'}{s_1} = 2 = \frac{f}{s_1 - f} \Leftrightarrow \frac{s_2'}{s_2} = 3 = \frac{f}{s_2 - f}$$

$$2s_1 = 3f$$

$$3s_2 = 4f$$

$$f =$$

$$s_2' - s_1' = 75 \text{ cm} = f \frac{s_2}{s_2 - f} - f \frac{s_1}{s_1 - f}$$

$$75 = f \frac{\frac{4}{3}f}{\frac{1}{3}f} - f \frac{\frac{3}{2}f}{\frac{1}{2}f}$$

$$75 = [4 - 3]f \quad f = 75 \text{ cm}$$

$$s_1 = \frac{3}{2}f \Rightarrow 112.5 \text{ cm}$$

$$s_2 = \frac{4}{3}f \Rightarrow 100 \text{ cm}$$

$$s_1 \rightarrow s_2$$

112.5  $\rightarrow$  100  
12.5 cm kaydırılmış

2.13) Kırılmanın paralel ışınlar oluşturmada için bir cisim küresel yüzey önünde veya yerleştirilebilir?

Tek küresel yüzeyin odak uzaklığı nedir?

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

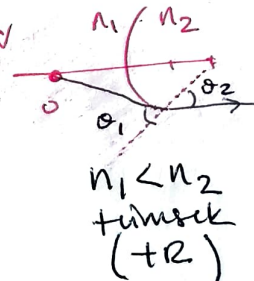
$s' \rightarrow \infty \Rightarrow$  paralel ışın demek

$$\frac{n_1}{s} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad ; \quad s = R \left( \frac{n_1}{n_2 - n_1} \right)$$

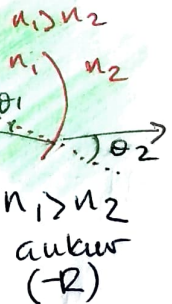
$$f = s = R \left( \frac{n_1}{n_2 - n_1} \right)$$

$R > 0$  ;  $s > 0$   
 $n_2 > n_1$  ~~convex~~ <sup>concave</sup>

$s > 0$  okalı  
Aukur  $R \rightarrow -R$   
 $n_1 > n_2$



$n_1 < n_2$   
tümsek  
(+R)



$n_1 > n_2$   
aukur  
(-R)

2.16 odak uzaklığı 25cm olan düzlem - dışbükey merceğin  $n=1.52$  yapılacaktır.

mercek yapımında kullanılacak zımpara / parlatma aletlerin eğrilik yarıçapı nedir?

$$\begin{array}{l} R_1 \rightarrow R \\ R_2 \rightarrow \infty \\ \frac{1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{\infty} \right) \end{array}$$

$$\frac{1}{25} = \frac{1}{f} = \frac{1.52 - 1}{1} \frac{1}{R} \quad R = (0.52) 25 \approx 13 \text{ cm}$$

2.17  $R_1 = 5 \text{ cm}$   $R_2 = 10 \text{ cm}$   
 $n = 1.5$  içbükey dışbükey  $f = ?$

$$\frac{1}{f} = 0.5 \left( \frac{1}{-5} - \frac{1}{+10} \right) = -\frac{0.5(3)}{10}$$

$$f = -20/3 \text{ cm}$$

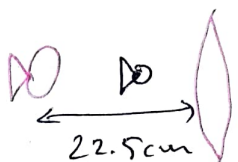
$R_1 = 10 \text{ cm}$  dışbükey  $R_2 = 5 \text{ cm}$  içbükey

$$\frac{1}{f} = 0.5 \left[ \frac{1}{10} - \left( \frac{1}{-5} \right) \right] = +\frac{20}{3} \text{ cm}$$

$$M_1 = -\frac{n_1}{n_2} \frac{S_1'}{S_1} \quad \textcircled{I} ; M_2 = -\frac{n_2}{n_3} \frac{S_2'}{S_2}$$

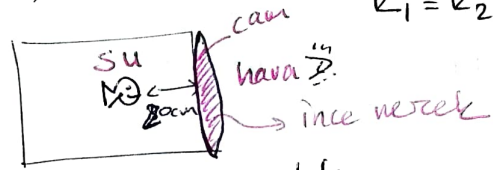
$$S_1' = -S_2$$

$$M_1 M_2 = \left[ M = \frac{n_1}{n_3} - \frac{S_2'}{S} \right] = 1.5$$



1.5 kat büyük  
Zahirî görüntü

2.18) Akvaryum ;  $R_1 = R_2 = 30 \text{ cm}$



Balık 20cm uzakta.  
 $\rightarrow$  mercekten bakınca balık nerede görülür?  
 $\rightarrow$  büyütme ne kadar?

$$\begin{array}{l} n_1 = 4/3 \\ n_2 = 1.5 \\ n_3 = 1.0 \end{array}$$

$$\textcircled{I} \quad \frac{n_1}{S_1} + \frac{n_2}{S_1'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$\textcircled{II} \quad \frac{n_2}{S_2} + \frac{n_3}{S_2'} = \frac{n_3 - n_2}{R}$$

$$\textcircled{I} + \textcircled{II} \quad S_1' = -S_2$$

$$\frac{n_1}{S_1} + \frac{n_2}{S_1'} + \frac{n_2}{(-S_1')} + \frac{n_3}{S_2'} = \left[ \frac{n_2 - n_1}{+R} + \frac{n_3 - n_2}{-R} \right]$$

$$\frac{n_1}{S_1} + \frac{n_3}{S_2'} = \left[ \frac{n_2 - n_1}{+R} + \frac{n_3 - n_2}{-R} \right]$$

$$\frac{n_1}{S_1} + \frac{n_3}{S_2'} = \left[ \frac{n_2 - n_1 + n_2 - n_3}{R} \right]$$

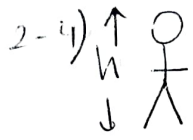
$$\frac{n_1}{S_1} + \frac{n_3}{S_2'} = \frac{2n_2 - (n_1 + n_3)}{R}$$

$$\frac{4/3}{20} + \frac{1}{S_1'} = \frac{2(1.5) - [1 + 4/3]}{30}$$

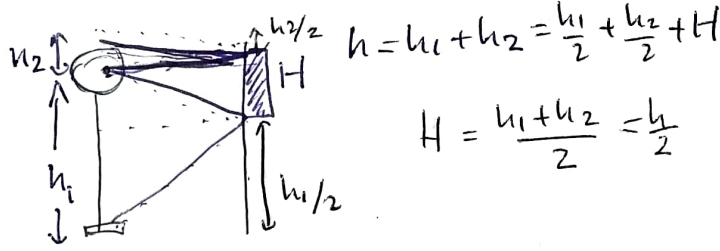
$$-\frac{1}{15} + \frac{2}{30} = \frac{1}{S_1'}$$

$$\textcircled{b} \quad S_1' = \left( -\frac{4}{90} \right)^{-1} = -22.5 \text{ cm}$$

$$\text{Büyütme} \Rightarrow m = -\frac{S_1' n_1}{S n_3} = \frac{+22.5 \cdot 4/3}{20 \cdot 1} = 1.5$$

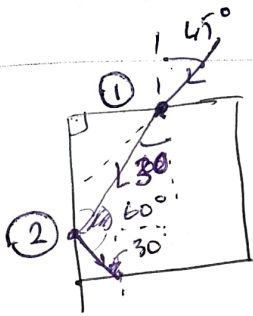


kışının kendisini tamamen görürken için minimum ayna boyu nedir?



kışının boyunun yarısı kadar 1.80 cm 90 cm ayna gerekir.

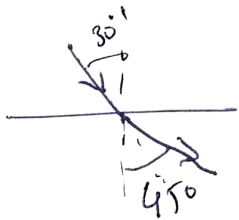
2.5)



küp  
 $n_1 = 1.414$  (iç)  
 $n_2 = 1.0$  (dış)

①  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$   
 $1 \frac{\sqrt{2}}{2} = 1.414 \sin \theta_2$ ;  $\theta_2 = 30^\circ$

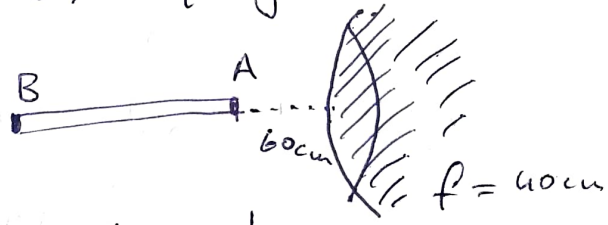
②  $(1.414) \sin 60^\circ = n_1 \sin \theta_1$   
 $\frac{\sqrt{3}}{2} > 1$  iç yansıma olur.



③  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$   
alt  $\frac{\sqrt{2}}{2} = 1 \frac{\sqrt{2}}{2}$   
 $45^\circ \checkmark$

Her ağı 60° olsa nasıl olur?

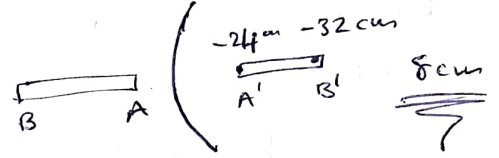
2.9) dübükey ayna



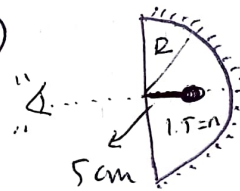
$\frac{1}{x_A} + \frac{1}{x_A'} = \frac{1}{f}$   $f = -40 \text{ cm}$

$\frac{1}{60} + \frac{1}{s_A'} = \frac{1}{-40}$   $s_A' = -24 \text{ cm}$

$\frac{1}{160} + \frac{1}{s_B'} = \frac{1}{-40}$   $s_B' = -32 \text{ cm}$



2.10)



$R = 7.5 \text{ cm}$   
cam içinde (5 cm) kabarcık kalmış  
 $n_{\text{cam}} = 1.5$

Düzlemsel eksen boyunca kabarcığın izi görünür mü?  
Başarılar her yerde?

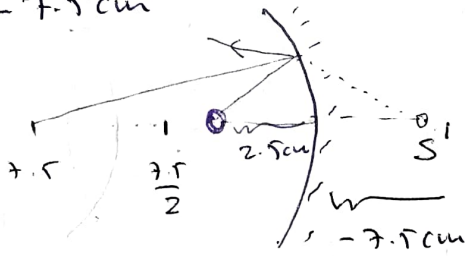
① arayüzden gelen ışınlar  
 $\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{1}{R}$   
 $\frac{1.5}{5} + \frac{1}{s'} = 0$   
 $s' = -3.33 \text{ cm}$   
cam içinde

II aynadan yansıyan ışınların arayüzden kırılması sonucu oluşan görüntü tabukay  $R = -7.5 \text{ cm}$

yansıma  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = \frac{-2}{R}$

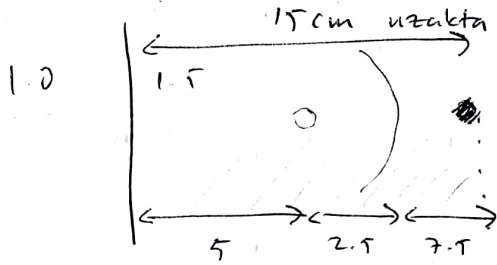
$\frac{1}{2.5} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{7.5}$

$$S_1' = -7.5 \text{ cm}$$



$$m = -\frac{n_1}{n_2} \frac{S'}{S} = -\frac{(1.5)}{1} \frac{(-10)}{5}$$

$$m = +3 \quad \text{3 times magnification}$$



$$\frac{n_1}{S} + \frac{n_2}{S_2'} = 0$$

$$\frac{1.5}{15} + \frac{1}{S_2'} = 0 \quad S_2' = -10 \text{ cm}$$

1. görüntü 3.3 cm içeride

2. görüntü 10 cm dışarıda

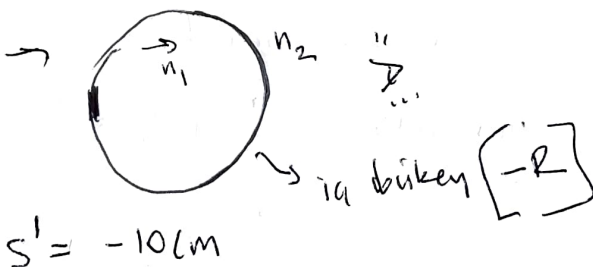
$$2.12 \quad |2R = 5 \text{ cm}|$$

airizi nerede görürüz  
büyüme ve kademeler?

$$\frac{n_1}{S} + \frac{n_2}{S'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

ön taraftan airizi 5 cm içinde kalıyor.

$$\frac{1.5}{5} + \frac{1}{S'} = \frac{1 - 1.5}{(-5/2)}$$



$$S' = -10 \text{ cm}$$

2.19) İki mercekle 1  $f_1 = -5 \text{ cm}$   
 2  $f_2 = +20 \text{ cm}$

a) İkisi birbirine yığılırsa  
 yeni odak uzaklığı nedir?

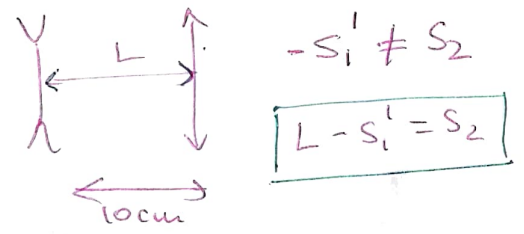
nesneler  
 yok  
 $f$

$$-s'_1 = s_2$$

$$(f)^{-1} = \left( \frac{1}{-5} + \frac{1}{20} \right)$$

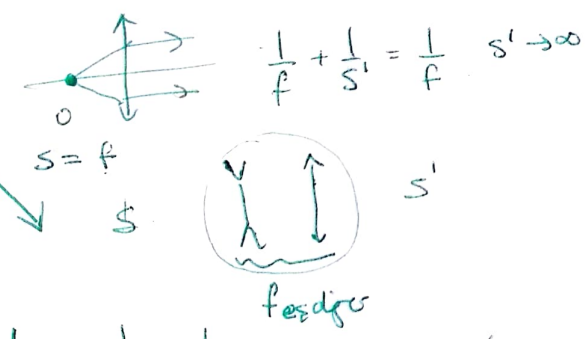
$$f = 20/3 \text{ cm}$$

b) Eğer arada 10 cm mesafe olursa  
 yeni odak uzaklığı nedir?



$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} \quad ; \quad \frac{1}{f_2} = \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s'_2}$$

Lensin odak uzaklığı



$$\frac{1}{f_{eq}} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} \quad s'_1 = \frac{s_1 f_1}{s_1 - f_1}$$

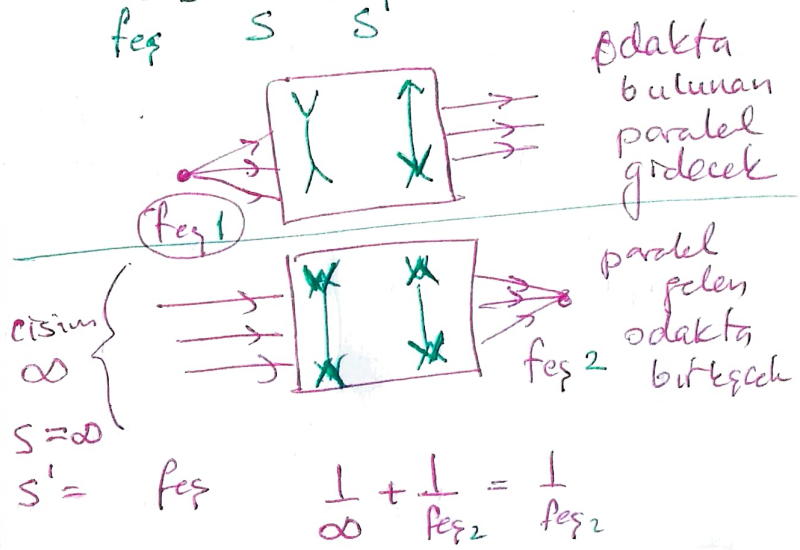
$$s_2 = L - s'_1 = L - \frac{s_1 f_1}{s_1 - f_1} ?$$

$$\frac{1}{f_2} = \left[ \frac{1}{L - \frac{s_1 f_1}{s_1 - f_1}} \right] + \frac{1}{s'_2} \quad f_2 = +20 \text{ cm}$$

$$s'_2 = \frac{f_2 s_2}{s_2 - f_2}$$

$$f_1 = \frac{s_1 s'_1}{s_1 + s'_1} \quad f_2 = \frac{s_2 s'_2}{s_2 + s'_2} \quad \left[ \begin{array}{l} f_1 = -5 \text{ cm} \\ f_2 = 20 \text{ cm} \end{array} \right]$$

$$\frac{1}{f_{eq}} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$



$$s_1 \rightarrow \infty$$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f_1} \quad s'_1 = f_1 \quad [f_1 < 0]$$

$$s_2 = L - f_1$$

$$\frac{1}{(L - f_1)} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{f_2} \quad s'_2 \equiv \text{odakta} = \frac{1}{\text{birleşen ışınlar}}$$

$$s'_2 = \frac{1}{\frac{1}{f_2} - \frac{1}{L - f_1}}$$

$$\frac{1}{f_2} - \frac{1}{L - f_1} = \frac{1}{s'_2} \quad [f_2 > 0]$$

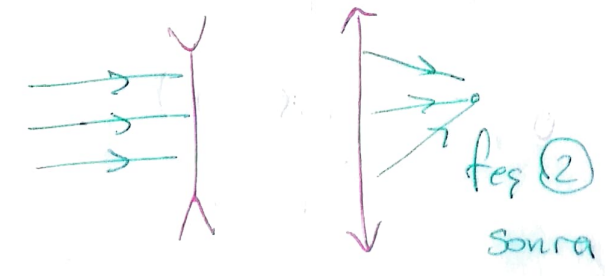
$$\frac{L - f_1 - f_2}{f_2 [L - f_1]} = \frac{1}{s'_2} \quad ; \quad s'_2 = \frac{f_2 [L - f_1]}{L - (f_1 + f_2)}$$

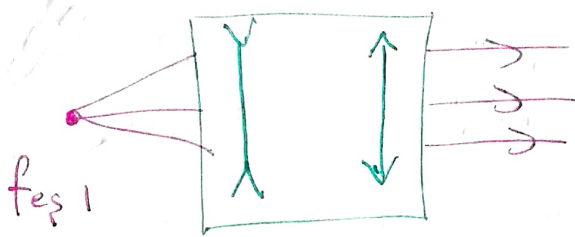
$$s'_2 = \frac{20 [10 - (-5)]}{10 - (-5 + 20)} = \frac{20 (15)}{-5}$$

$$f_2 = +20 \text{ cm}$$

$$f_1 = -5 \text{ cm}$$

$$f_{eq2} = -60 \text{ cm}$$





önceki odak noktası

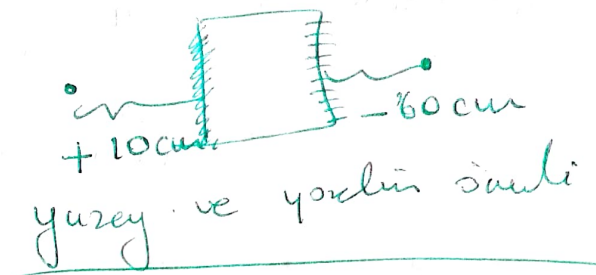
$$f_1 = -5 \text{ cm}$$

$$f_2 = +20 \text{ cm}$$

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$s_1 = f_1$$

$$\frac{1}{f_{es1}} + \frac{1}{s_1'} = \frac{1}{f_1}$$



$$\frac{1}{f_{es1}} + \frac{1}{s_1'} = \frac{1}{f_1} \quad s_1' = \left( \frac{f_{es1} - f_1}{f_{es1} f_1} \right)^{-1}$$

$$s_2 = L - s_1'$$

$$\frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1}{f_2}$$

$s_2' \rightarrow \infty$

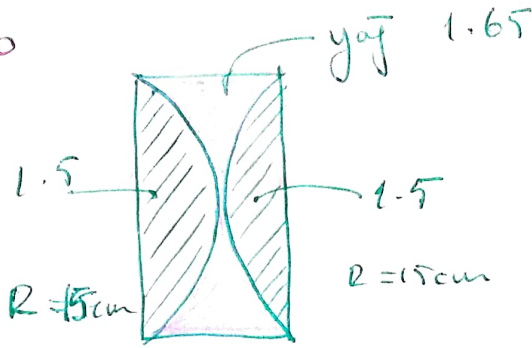
$$s_2 = f_2$$

$$L - \frac{(f_{es1} \cdot f_1)}{[f_{es1} - f_1]} = s_2 = f_2$$

$$10 - \frac{(f_{es1}) \cdot (-5)}{[f_{es1} - 5]} = 20$$

$$\frac{2f'' - 10 = f''}{f_{es1}'' = +10 \text{ cm}} + 10 = \frac{f''}{f'' - 5}$$

2.20



odak uzaklığı nedir?

hava ortamında  
bulunan 3 ince  
mercek. $f_{eq} = ?$ 

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} = \frac{1}{f_{eq}}$$

$$f_1? \quad \frac{1}{f_1} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1.5 - 1}{1} \left( 0 - \frac{1}{-15} \right)$$

$$f_1 = 30 \text{ cm}$$

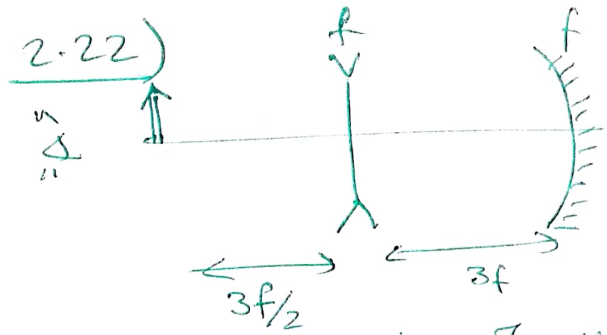
$$f_3? \quad \frac{1}{f_3} = \frac{1.5 - 1}{1} \left( \frac{1}{15} - \frac{1}{\infty} \right)$$

$$f_3 = 30 \text{ cm}$$

$$f_2? \quad \frac{1}{f_2} = \frac{1.65 - 1}{1} \left[ -\frac{1}{15} - \left( \frac{1}{15} \right) \right]$$

$$f_2 = -\frac{150}{13} \text{ cm}$$

$$\left[ \frac{1}{30} + \frac{1}{30} - \frac{13}{150} \right]^{-1} = -50 \text{ cm} = f_{eq}$$

ayna ve kalın kenarlı mercek  
aynı odak uzaklığına sahiptir.cisim  $3f/2$  'ye ~~konur~~ mercek  
ayna - mercek  $3f$  uzaklığındaysa  
son görüntü?

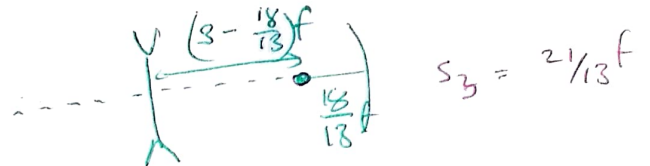
$$\textcircled{1} \quad \frac{1}{3f/2} + \frac{1}{s_1'} = -\frac{1}{f} \quad s_1' = -3f/5 \quad m_1 = 2/5$$

$$s_2 = L - s_1' = 3f - (-3f/5) = 18f/5$$

$$\frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_2'} = +\frac{1}{f}$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{5}{18f} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1}{f} \quad \frac{1}{s_2'} = \frac{13}{18f}$$

$$s_2' = \frac{18}{13}f \quad m_2 = -5/13$$

aynadan yansılıktan sonra  
lensten tekrar geçerse.

$$\frac{1}{(21/13)f} + \frac{1}{s_3'} = -\frac{1}{f}$$

$$= -1 - \frac{13}{21}$$

$$s_3' = -21/34f$$

$$m_3 = +13/34$$

