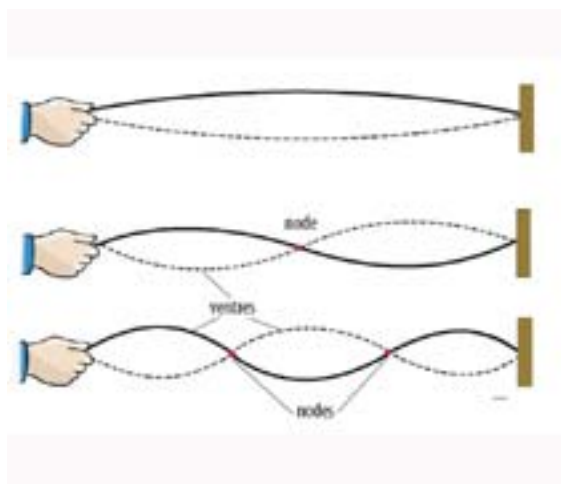
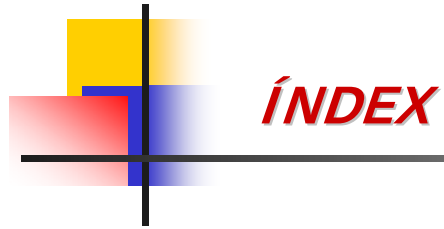


Tema 5. Fenòmens ondulatoris





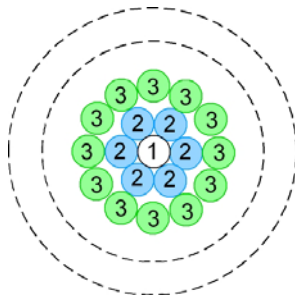
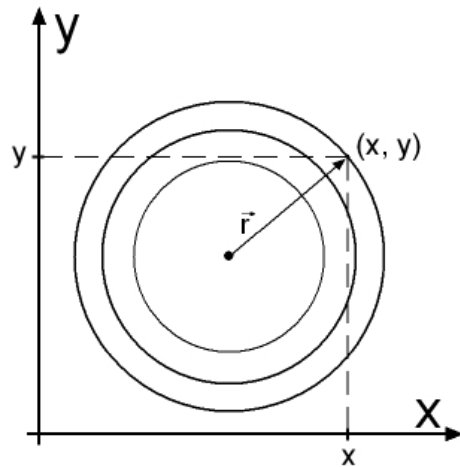
- **5.0. Conceptes previ: Front d'ona i raig d'ona**
- **5.1. Comprensió i aplicació del principi de Huygens**
- **5.2. Reflexió i refracció**
- **5.3. Difracció**
- **5.4. Polarització**
- **5.5. Interferències (Principi de superposició)**
- **5.6. Ones estacionàries**
- **5.7. Efecte Doppler**

http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/Ondasbachillerato/ondasCaract/ondas-Caract_indice.htm

<http://web.educastur.princast.es/proyectos/fisquiweb/MovOnd/index.htm>

5.0. Conceptes previs

Ones 2D o bidimensional: la pertorbació es propaga en un medi bidimensional (superfície), els seus punts es localitzen mitjançant un sistema de coordenades cartesianes x, y .

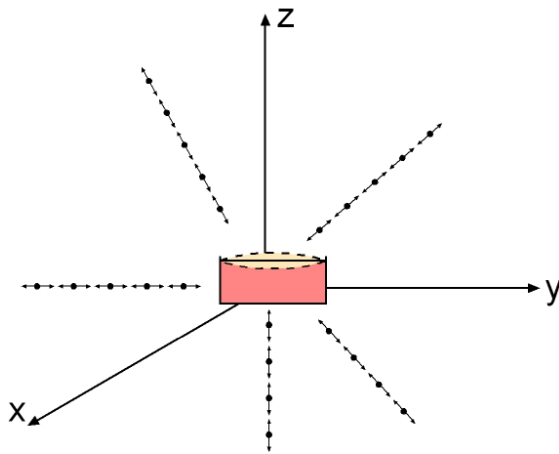


- Ones que apareixen en la superfície de l'aigua al llançar un objecte a un llac, piscina ...
- A partir del punt d'impacte, la pertorbació es propaga a la mateixa velocitat en totes les direccions sobre la superfície. ,
- L'impacte produeix una oscil·lació complicada de les partícules superficials afectades pel mateix.

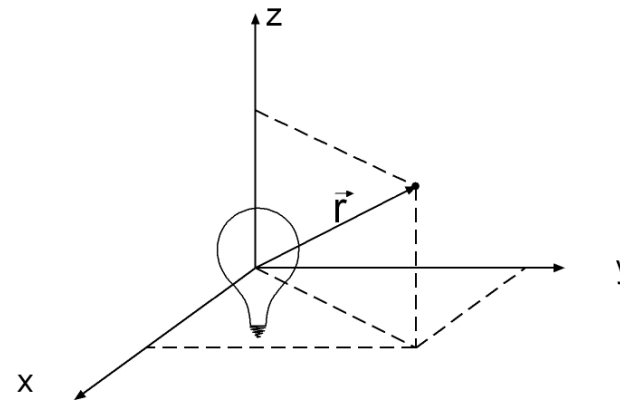
La funció d'ona seria $f(x, y, t) = f(\vec{r}, t)$

Ones 3D o tridimensional: la pertorbació es propaga en un medi tridimensional (l'espai real), els seus punts es localitzen mitjançant un sistema de coordenades cartesianes (x,y,z) .

Exemples



• El so que produeix el tambor es propaga en totes direccions.

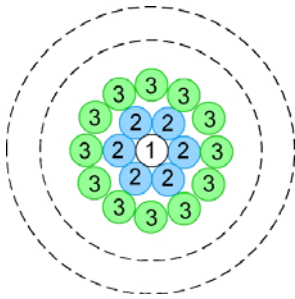


• La llum que emet una bombeta es propaga en totes direccions.

La funció d'ona seria $f(\vec{r}, t)$

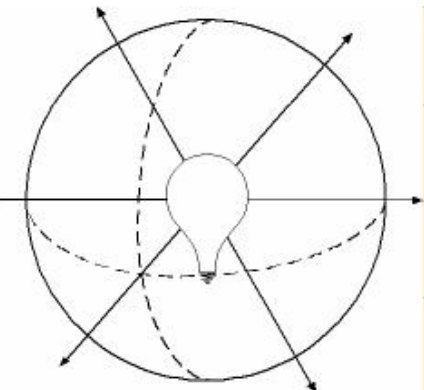
FRONT D'ONA: Conjunt de punts del medi als que la pertorbació arriba al mateix temps. (EN AQUESTS PUNTS EL VALOR DE LA PERTURBACIÓ ÉS EL MATEIX, ÉS A DIR, **TOTS ELS PUNTS QUE FORMEN UN FRONT D'ONA TENEN EL MATEIX ESTAT DE VIBRACIÓ, I DIEM QUE TOTS ELS PUNTS ESTAN EN FASE.**

- **Corda** → Els fronts d'ona estan constituïts per un sol punt.



- **Ones bidimensionals** → Els fronts d'ona són cercles concèntrics, el centre dels quals és el punt d'impacte de l'objecte.

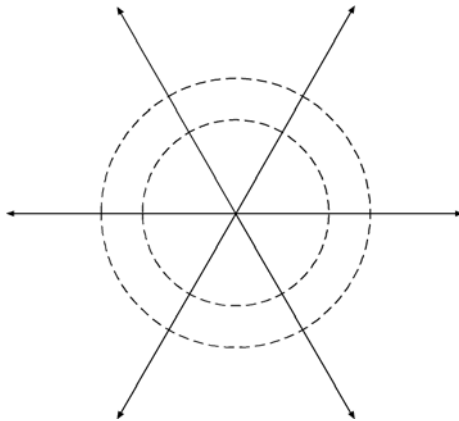
- **Ones tridimensionals ("bombeta puntual")** → Els fronts d'ona són esferes el centre de les quals és la bombeta.



RAIG D'ONA: Línia dirigida perpendicularment al front d'ona que indica el moviment del mateix (indica la direcció de propagació de l'ona).

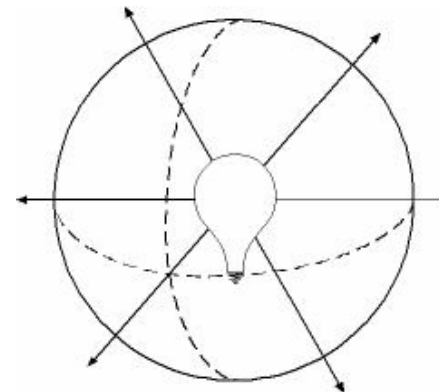
Exemples

Ones produïdes en la superfície de l'aigua per un objecte puntual.

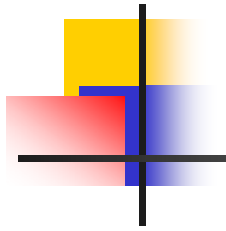


Fronts d'ona: Cercles concèntrics.
Raigs: direcció radial i el sentit que correspon a la propagació de l'ona.

La llum que emet una bombeta es propaga en totes direccions



Fronts d'ona: Esferes concèntriques
Raigs: direcció radial i el sentit que correspon a la propagació de l'ona.



ONES PLANES, CIRCULARS I ESFÈRIQUES: Les ones també poden classificar-se segons la forma geomètrica dels seus fronts d'ona.

- Ones planes

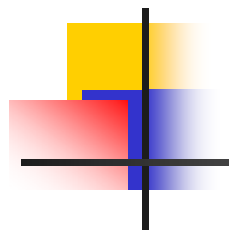
2D → Els fronts d'ones són línies paral·leles entre sí.

- Llançant un bastó a l'aigua ,

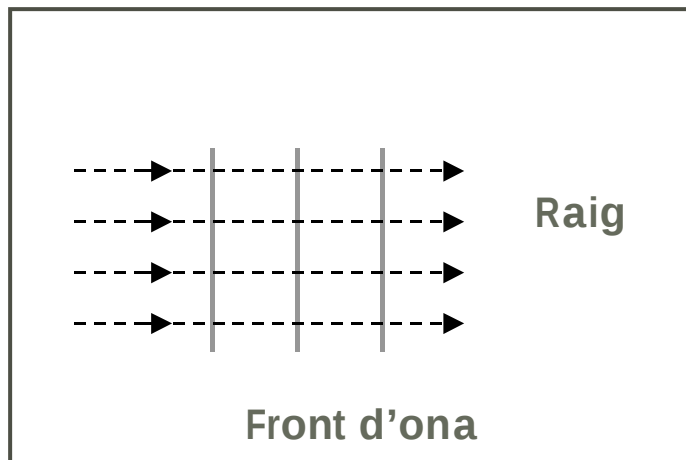
3D → Els fronts d'ona són plans.

- Els fronts d'ona procedents d'una bombeta puntual situats molt lluny del focus emissor (de la bombeta).

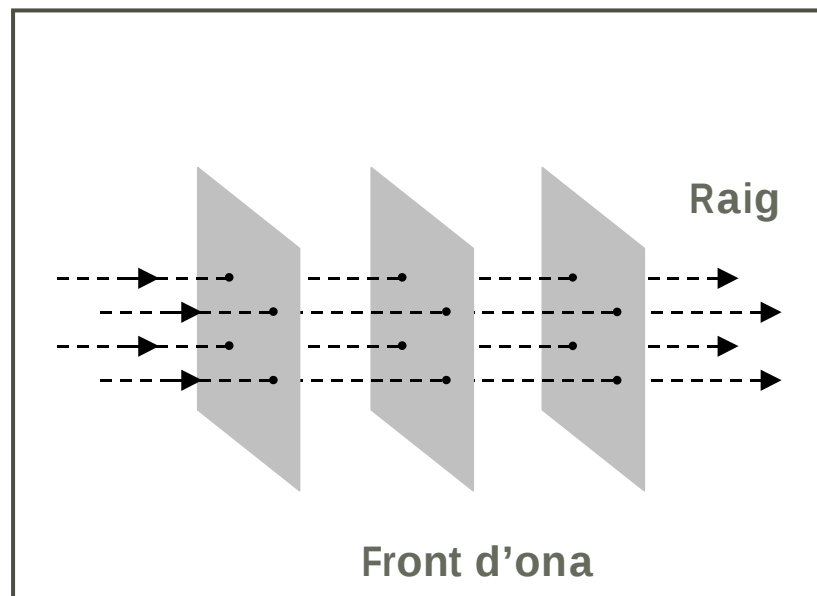
En els dos casos, els rajos són línies rectes,
perpendiculars als front d'ona i paral·lels entre sí.



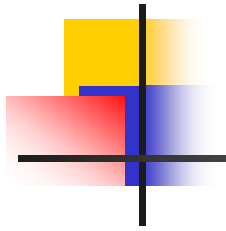
ONES PLANES



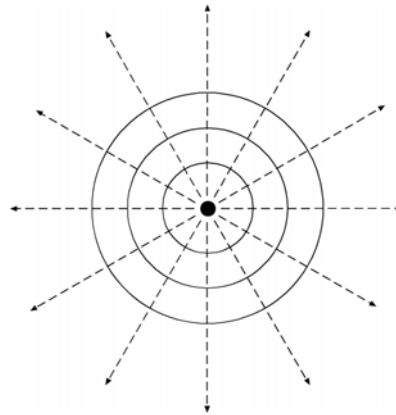
Ona 2 D



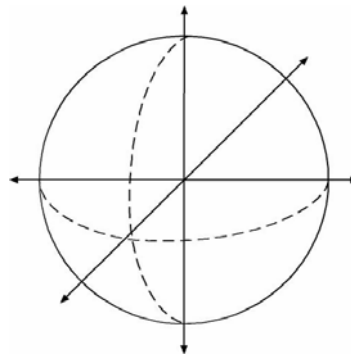
Ona 3 D



ONES CIRCULARS: Corresponen a una font puntual en el cas 2D.



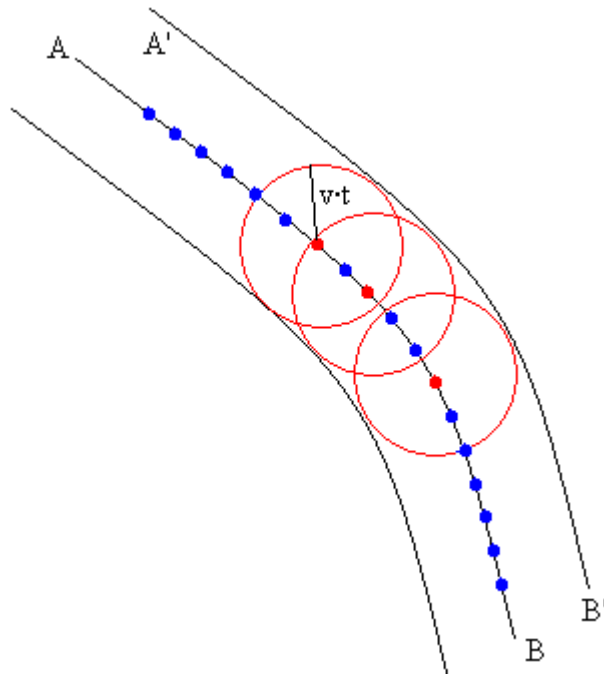
ONES ESFÈRIQUES: Corresponen a una font puntual en el cas 3D.



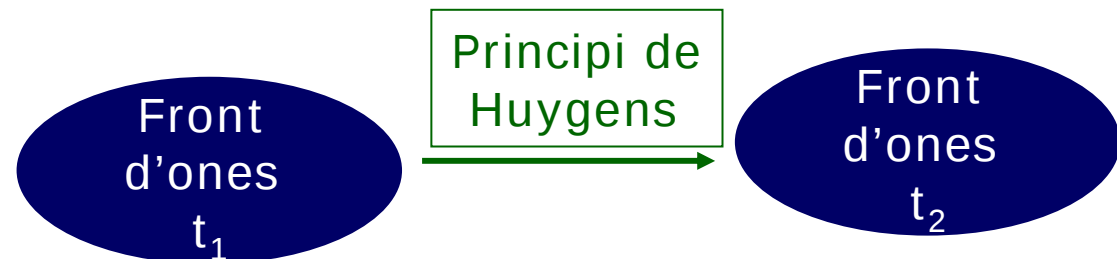
5.2. Comprensió i aplicació del principi de Huygens

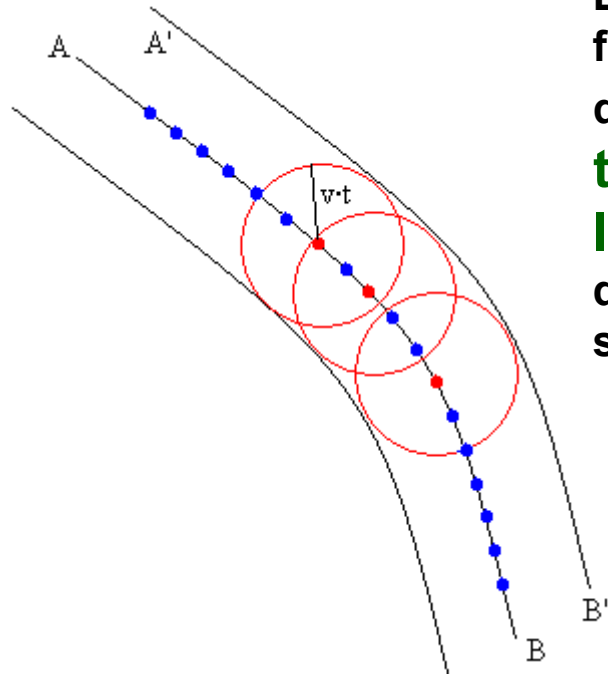
Ara estudiarem la propagació d'ones utilitzant el mètode descobert per **Huygens (1629-1695)**.

Aquest mètode explica com podem construir un front d'ones conegut el front d'ones en un instant anterior. Així, coneixent els successius fronts d'ona, és possible saber com tindrà lloc la propagació d'un moviment ondulatori.



El **principi de Huygens** proporciona un mètode geomètric per conèixer, a partir d'una forma coneguda del front d'ones en un instant temps, la forma que adoptarà aquest front en altre instant de temps posterior.





El **principi de Huygens** suposa que cada punt del front d'ones es comporta com un nou focus d'ones, que **crea una sèrie d'ones esfèriques que tenen la mateixa freqüència i velocitat que l'ona primària**. El nou front d'ones en un instant donat, és l'envolupant “envelope” de totes les ones secundàries.

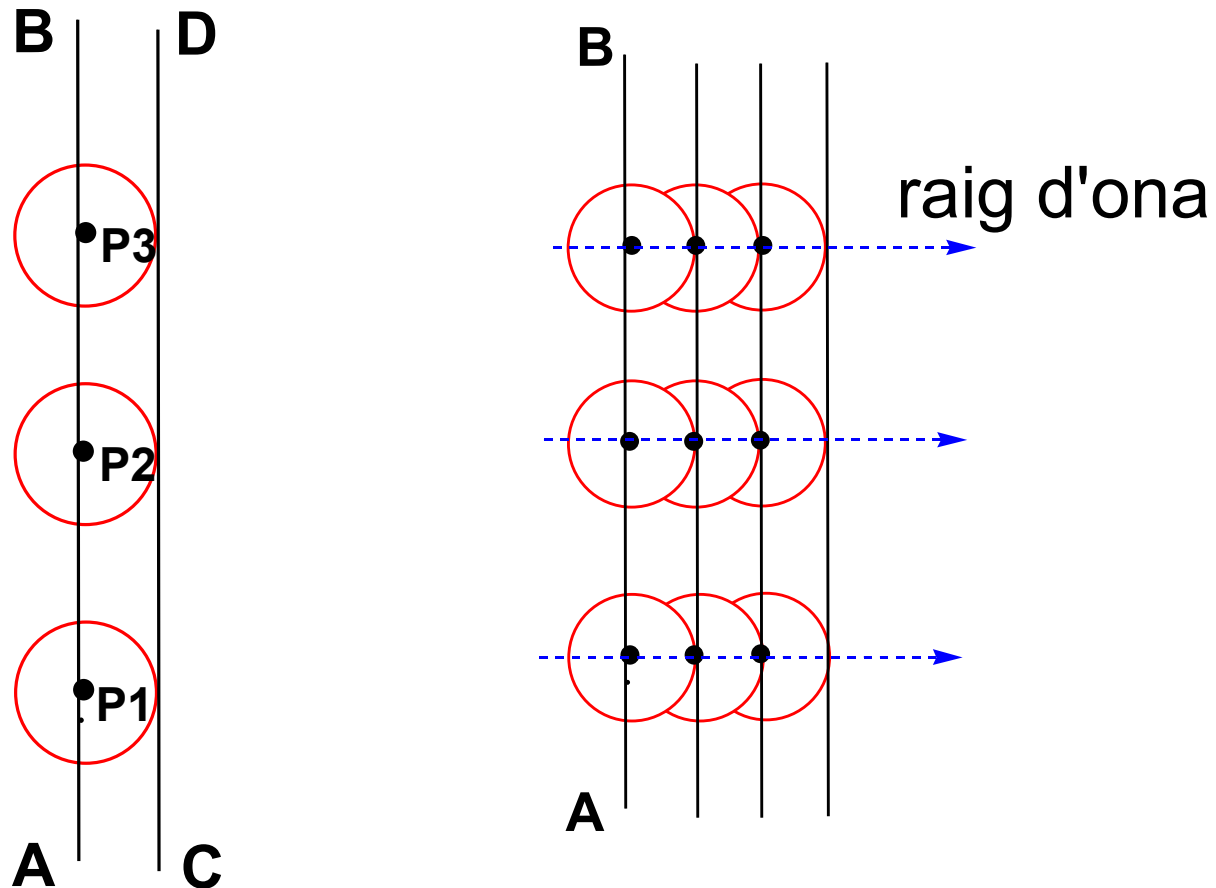
Suposem el front d'ones inicial AB. Sobre el front d'ones situem diferents punts (vermell i blau) que actuen com focus d'ones secundàries. Per determinar el nou front d'ones A'B' en l'instan t, dibuixem circumferències de radi $(r) = v \cdot t$ centrades en els punts vermells (que hem agafat com a nous focus). L'envolupant de totes les circumferències és el nou front d'ones en l'instan t.

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad \longrightarrow \quad \lambda = v \cdot T$$

$$v = \frac{r(\text{dist})}{t}$$

$$\text{Distància } (r) = v \cdot t$$

Considerem un front d'ones pla AB, els punts P1, P2, P3 actuen com a focus d'ones secundàries. La superfície envolupant d'aquestes ones secundàries, indicada per la línia CD, constitueix un nou front d'ones.



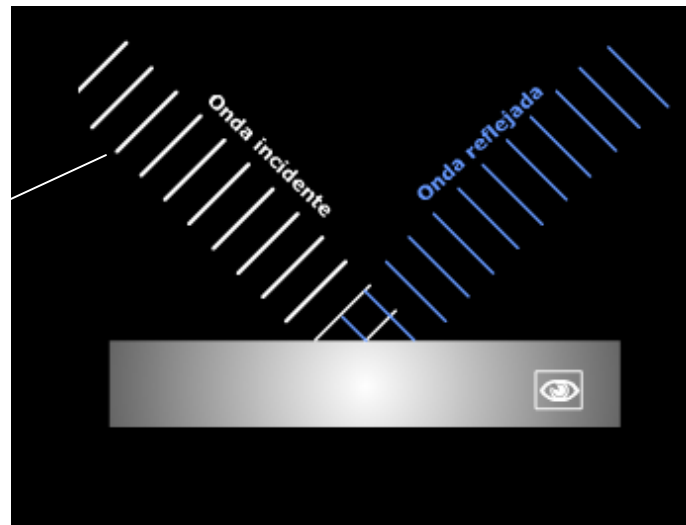
5.2. Reflexió i refracció d'una ona

El **principi de Huygens** permet explicar satisfactòriament certs fenòmens ondulatoris, com, la reflexió, la refracció i la difracció.

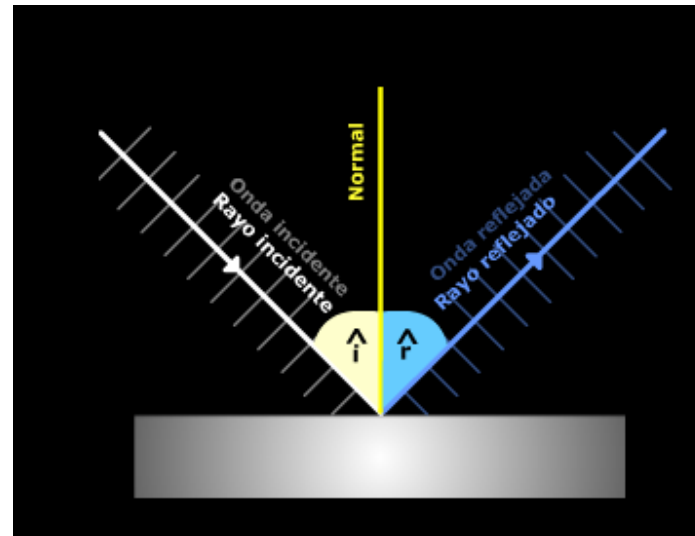
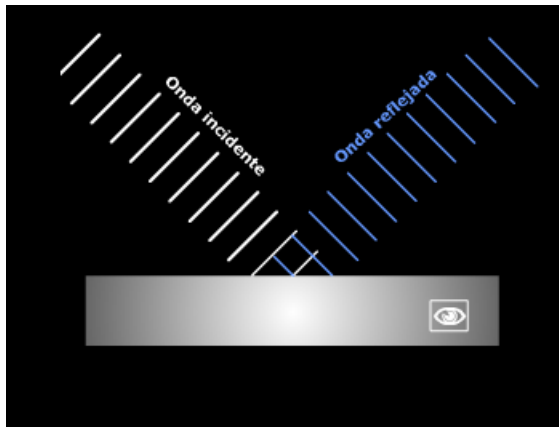
REFLEXIÓ “rebot”

La reflexió es produeix quan una ona troba en el seu recorregut una superfície (que separa dos medis) sobre la qual rebot. Després de la reflexió l'ona continua propagant-se en el mateix medi i els paràmetres (velocitat, longitud d'ona, freqüència, període) continuen sent els mateixos.

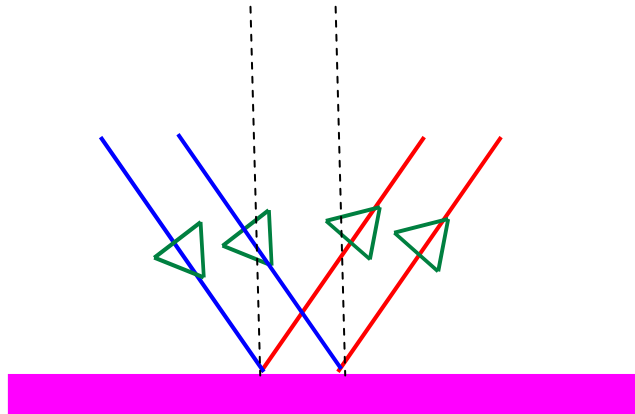
Representem els fronts d'ona plans que indiquen la propagació de l'ona



Per facilitar l'estudi representem un **raig d'ona**



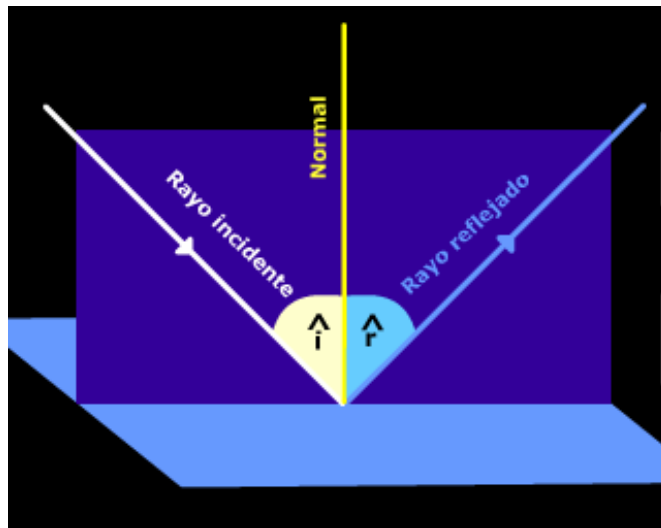
- Raig incident (ona incident)
- Raig reflectit (ona reflectida)
- Normal (línia perpendicular a la superfície en el punt d'incidència)
- i (angle d'incidència)
- r (angle de reflexió)



Lleis de la reflexió

1. Angle d'incidència = angle de reflexió
 $i = r$

2. El raig incident, el raig reflectit i la normal es troben en el mateix pla.



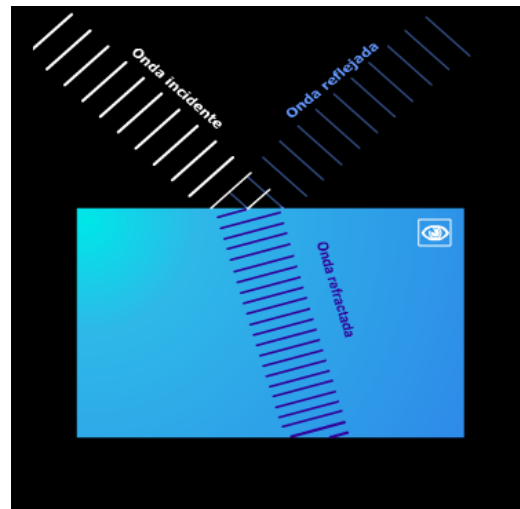
En el cas del so la reflexió correspon a l'eco i en el cas de la llum la reflexió es produeix en els miralls.

REFRACCIÓ

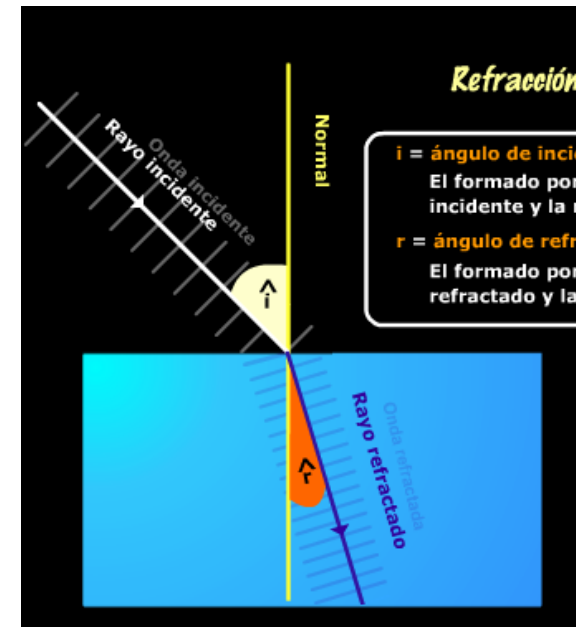
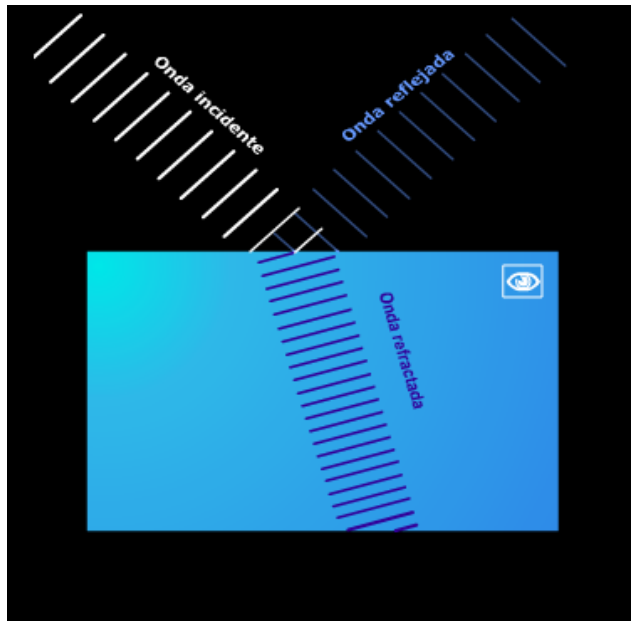
La refracció consisteix en una variació tant de la direcció de propagació de l'ona com del seu medi de propagació.

L'ona refractada sofreix alguns canvis com a conseqüència del seu canvi de medi:

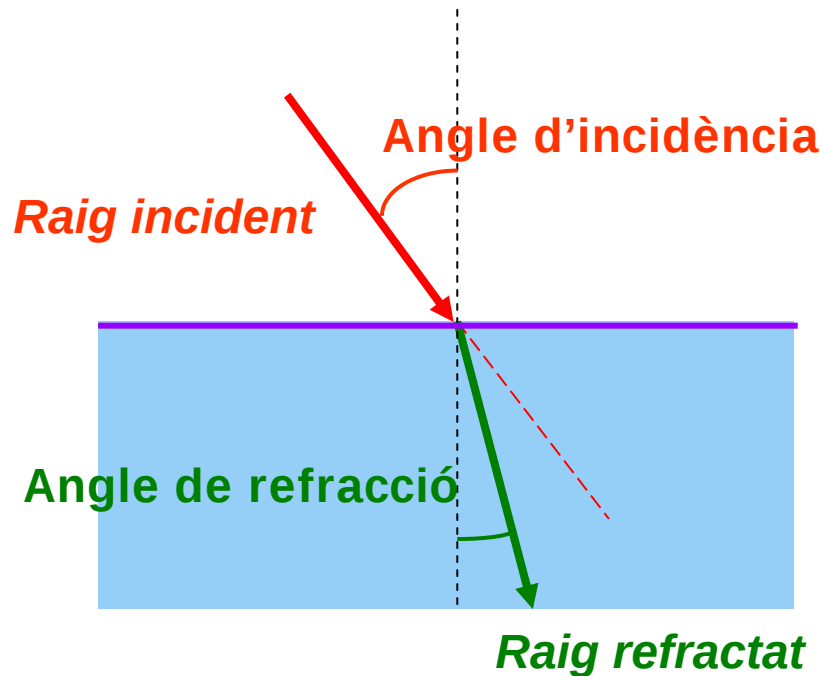
- **Canvia la direcció de propagació de l'ona** (s'aproxima o s'allunya de la normal).
- **Canvia la seva velocitat de propagació.**
- Encara que la seva freqüència queda inalterada, la seva **longitud d'ona es modifica** ($v = \lambda \cdot f$)



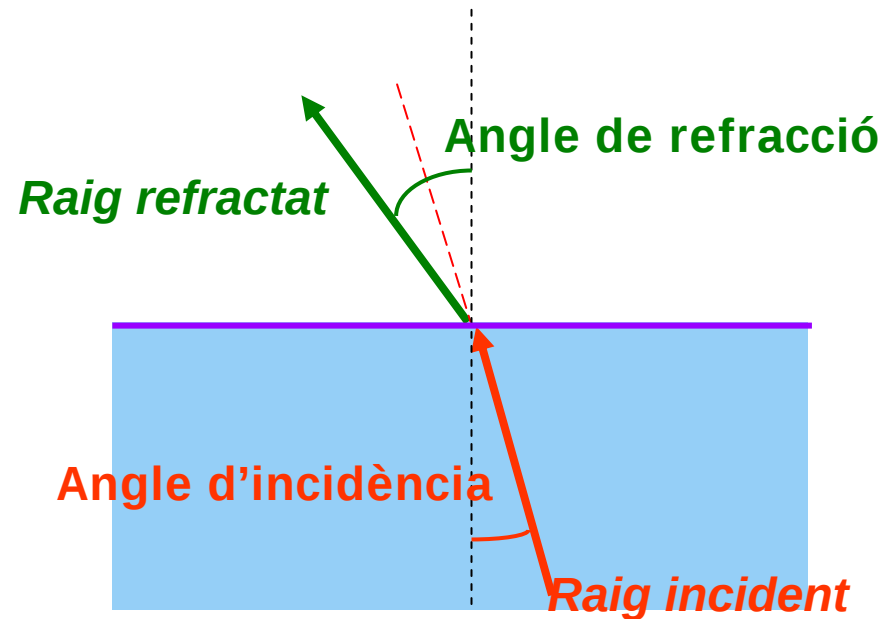
Per facilitar l'estudi representem un **raig d'ona**



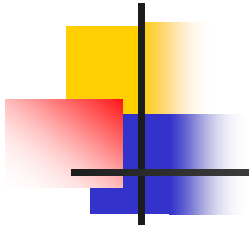
- Raig incident (ona incident)
- Raig refractat (ona reflectida)
- Normal (línia perpendicular a la superfície en el punt d'incidència)
- i (angle d'incidència)
- r (angle de refracció)



En aquest cas, el raig d'ona s'acosta a la normal quan passa de l'aire a l'aigua.



En aquest cas, el raig d'ona s'allunya a a la normal quan passa de l'aire a l'aigua.



Per les ones lluminoses (la llum), es parla de **l'índex de refracció del medi**.

**ÍNDEX DE REFRACCIÓ
DEL MEDI (n)**

Una magnitud que mesura la relació entre la velocitat de la llum en el buit o en l'aire (c) i el seu valor en un medi determinat (v).

$$n = \frac{c}{v}$$

(velocitat de la llum en l'aire o buit, $3 \cdot 10^8$ m/s)

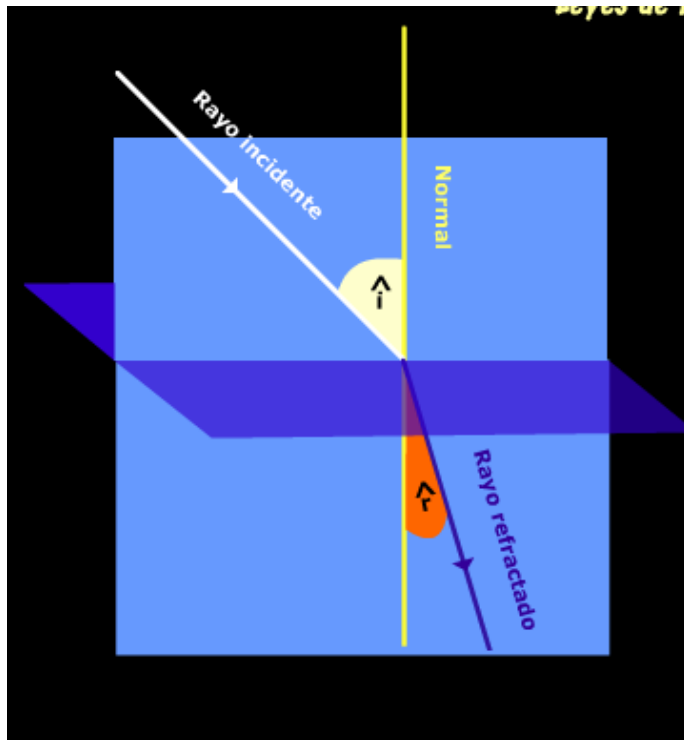
(velocitat de la llum un altre medi)

La taula següent mostra l'índex de refracció d'algunes substàncies.

Substància	Índex de refracció (n)
Aire	1,00
Aigua	1,33
Vidre lleuger	1,54

Ordena la velocitat de la llum de major a menor:

v (en l'aire) > v (en l'aigua) > v (vidre)



Lleis de la refracció

1. El raig incident, el raig reflectit i la normal es troben en el mateix pla.
2. Entre l'angle d'incidència i el de refracció existeix la següent relació

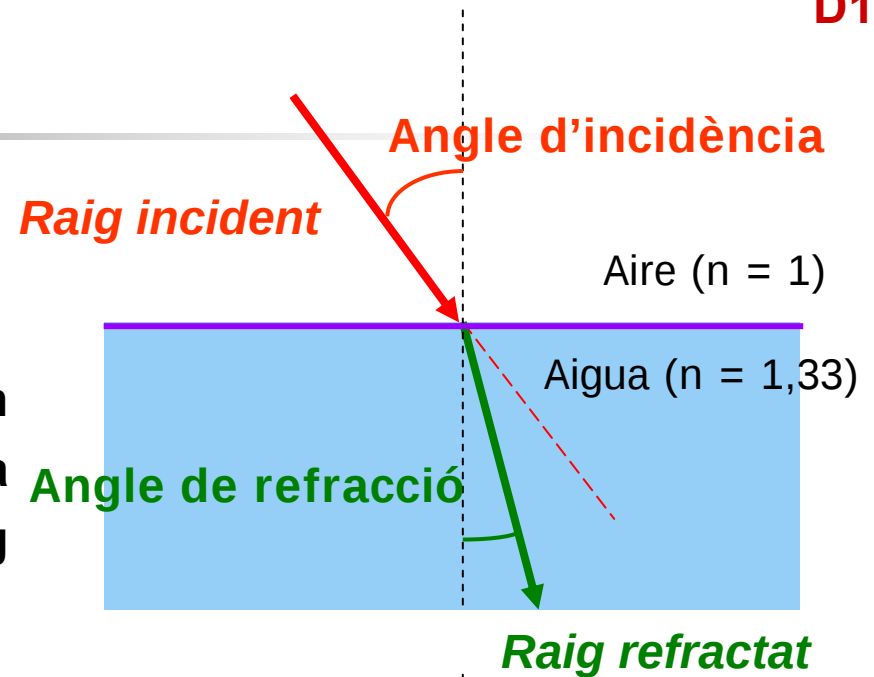
LLEI DE SNELL:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

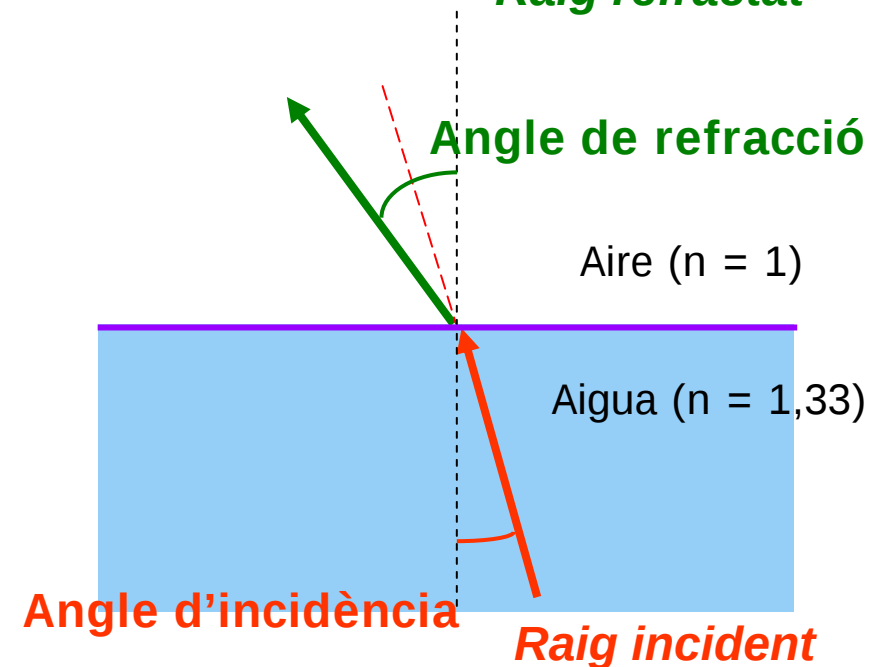
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Com podem dibuixar el raig refractat?

- Si el raig de llum, passa a un medi on l'index de refracció (n) és més gran (la seva velocitat més petita), el raig refractat s'acosta a la normal.



- Si el raig de llum, passa a un medi on l'index de refracció (n) és més petit (la seva velocitat més gran), el raig refractat s'allunya a la normal.

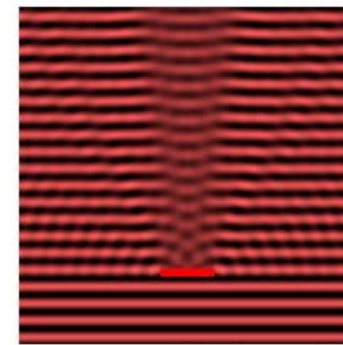
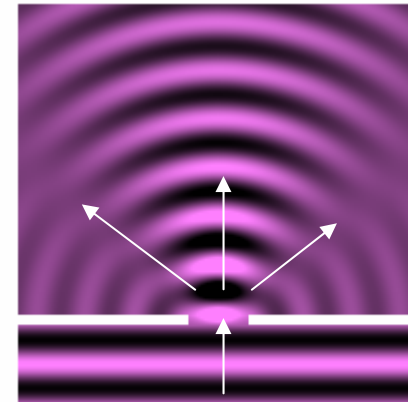


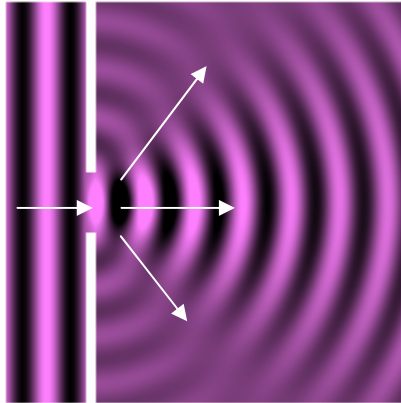
5.3. Difracció (no confondre amb la refracció)

Difracció: Consisteix en la desviació que pateix una ona, quan aquesta travessa un obstacle que té unes dimensions iguals o inferiors al longitud d'ona. L'ona difractada es propaga en totes les direccions.

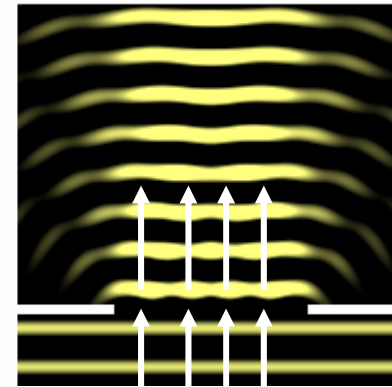
• L'obstacle pot ser:

- Una paret amb una petita obertura (de la mida de la longitud d'ona), que només deixa passar una petita porció del front d'ona.
- un petit objecte que impedeixi la transmissió de l'ona. Els punts que voregen l'obstacle es comporten com un nou focus emissor d'ones. De tal manera que es capaç d'envoltar-lo.

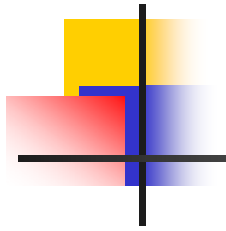




L'ona a l'atravessar l'escletxa s'obre, en lloc de seguir la direcció del raig incident, es forma una gran nombre de rajos. L'ona canvia la seva direcció quan travessa l'obertura, i això ens explicaria que l'ona pot arribar a punts on, en principi, si viatges en línia recta no arribaria.



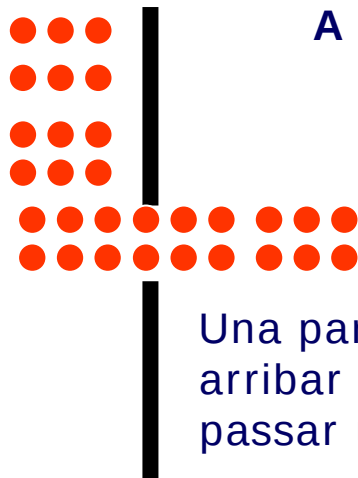
Quan l'obertura té unes dimensions superiors a la longitud de l'ona, no es produeix la difracció. L'ona es propaga seguint la direcció rectílinia dels raigs.



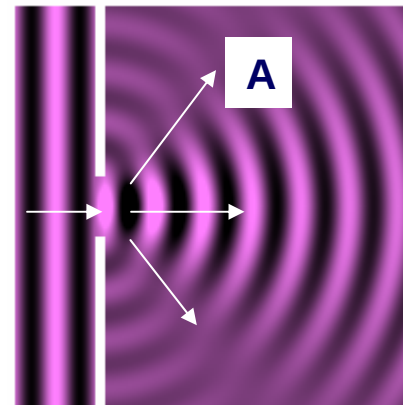
El fenomen de la difracció ens permet explicar perquè podem escoltar una conversa a l'altra banda d'una habitació. El front d'ona troba una petita obertura, i es propaga a partir d'aquesta en totes direccions.

La difracció és una propietat característica del moviment ondulatori, ja que aquest fenomen va permetre admetre que la llum es comportava com una ona, i no com una partícula. Avui dia s'accepta que la llum té un doble comportament ona-partícula.

Això ho estudiarem més endavant.



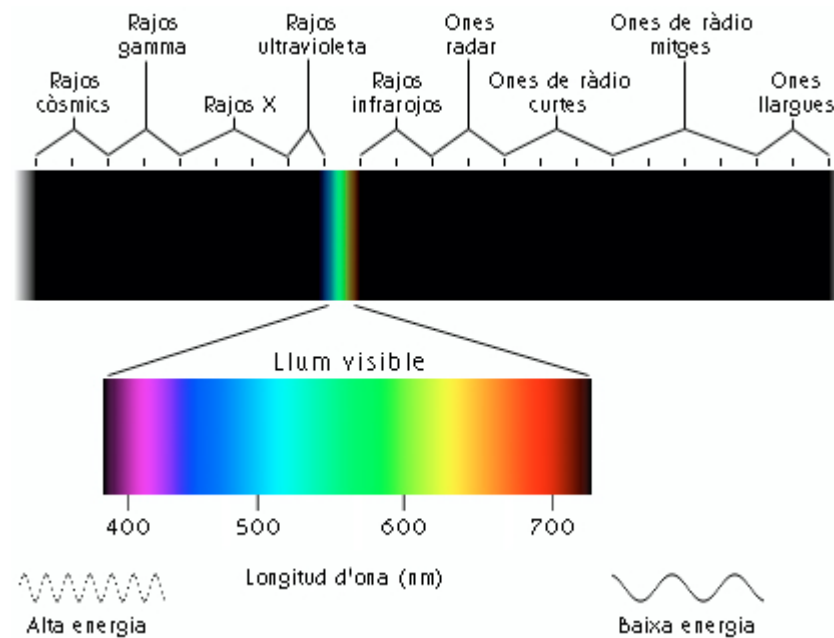
Una partícula no pot arribar al punt A al passar un obstacle.



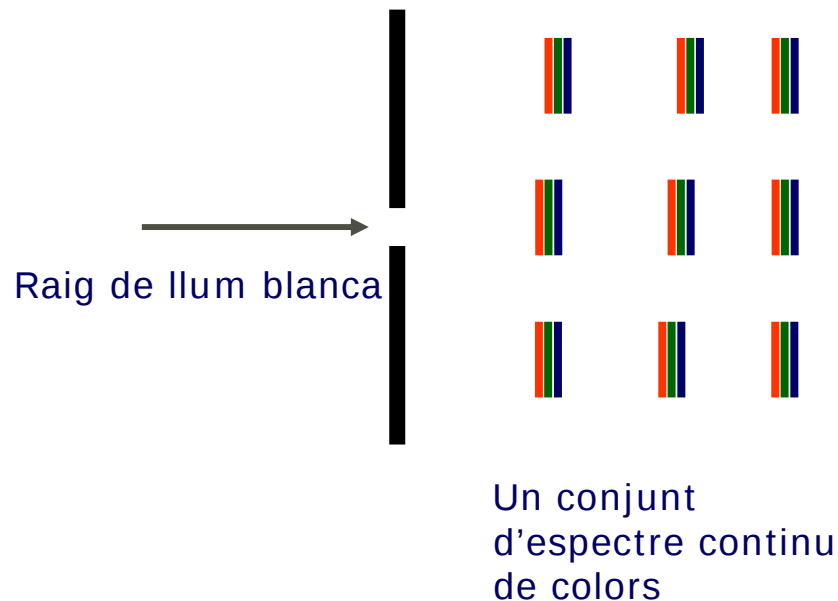
La llum es comporta com una ona i pot arribar al punt A al passar una obertura.

En el cas de la llum:

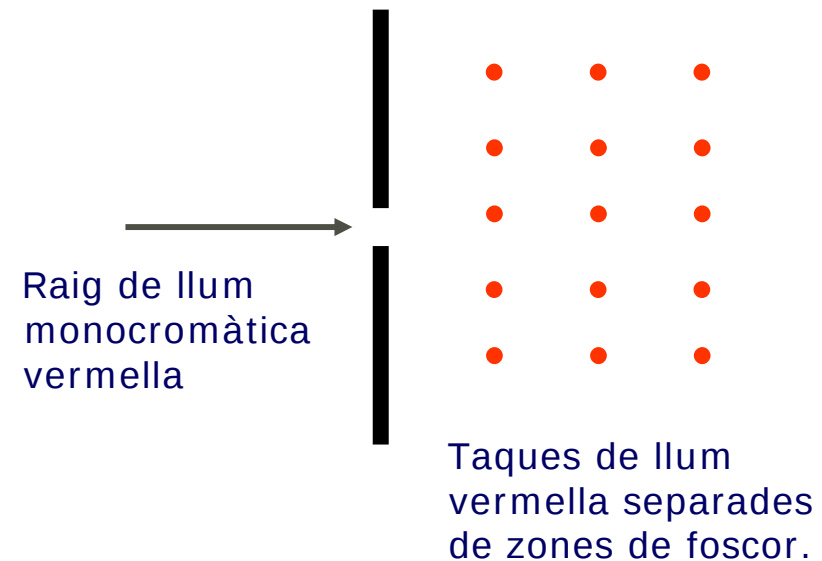
La llum blanca correspon a la suma de vàries llums de longitud d'ona entre 400 nm i 700 nm. NOTA : $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$.

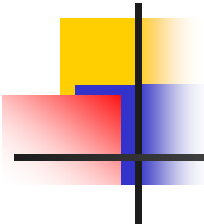


En el cas de la llum visible al difractar-se també, s'observa la dispersió de la llum (la descomposició de la llum blanca)



El làser, emet llum monocromàtica, d'una sola longitud d'ona, per exemple $\lambda = 630 \text{ nm}$, correspon a una longitud d'ona de la regió vermella.





5.4. Polarització

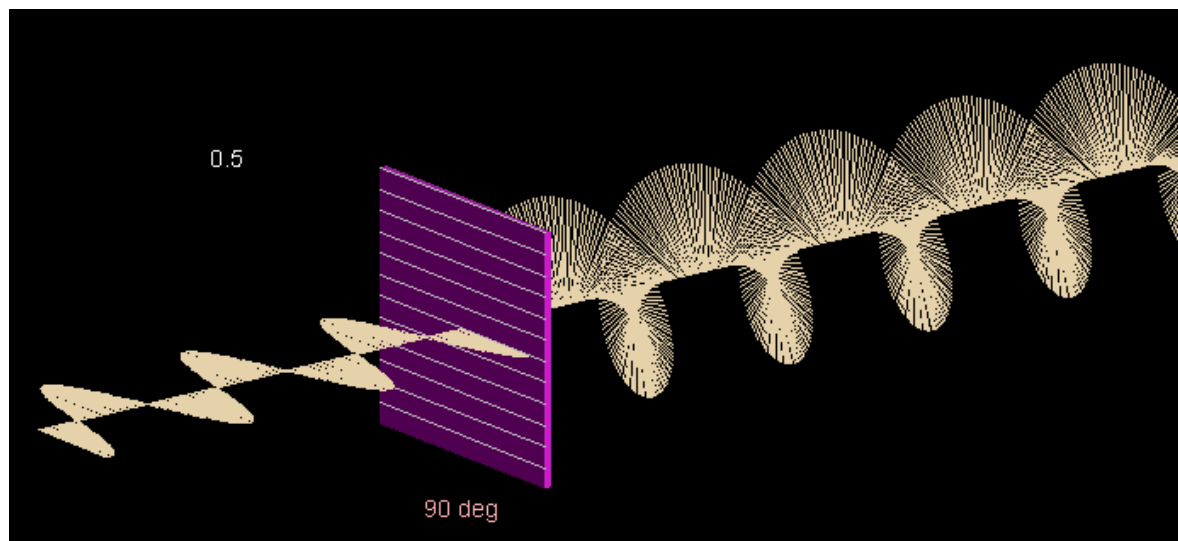
Polarització: NOMÉS TÉ SENTIT PARLAR DE POLARITZACIÓ PER LES ONES TRANSVERSALS (com la llum).

La direcció d'oscil·lació de les partícules del medi és perpendicular a la direcció de propagació de l'ona.

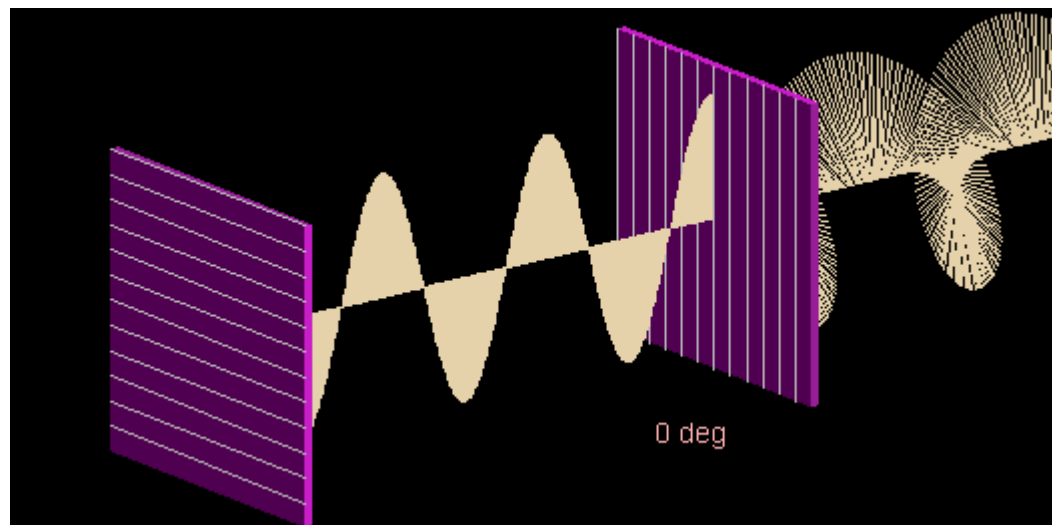
Una ona no està polaritzada quan són igualment possibles totes les direccions d'oscil·lacions del medi.

En canvi quan només es possibles una única direcció de vibració (perpendicular a la direcció de propagació), es diu que l'ona està polaritzada linealment.

Arriba l'ona
polaritzada

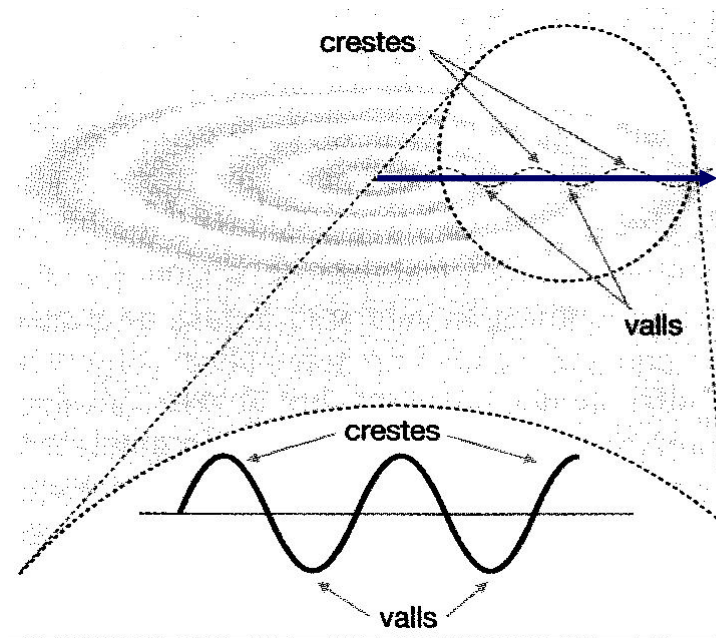


No arriba
l'ona



5.5. Interferències (principi de superposició)

RECORDEM CONCEPTES:

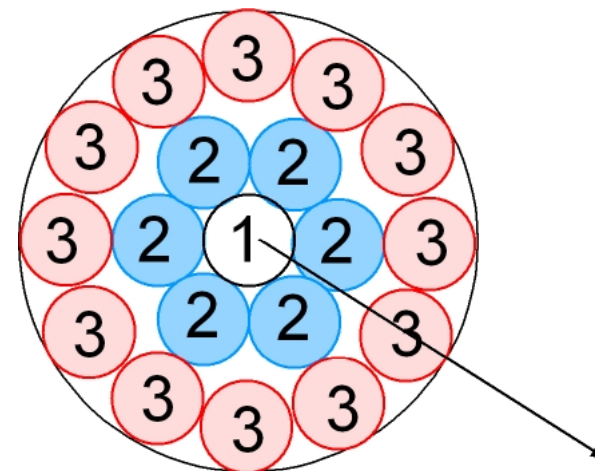


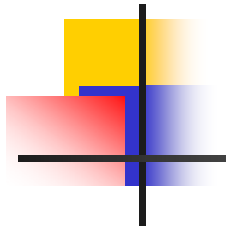
En els punts 3, l'ona arriba al mateix instant i tots els punts es troben en mateix estat d'oscil·lació i vibració

Ones harmòniques

Front d'ona circular

Raig d'ona perpendicular al front d'ona





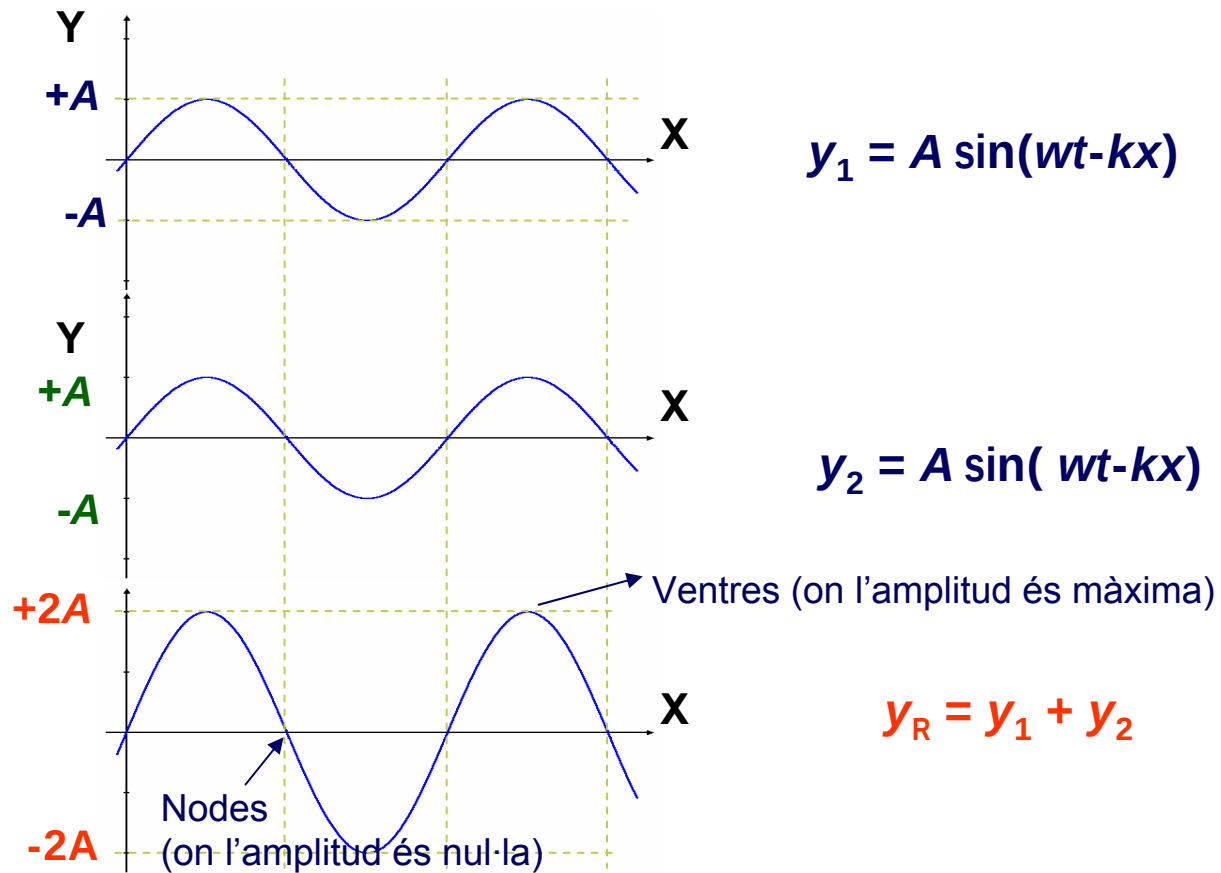
Només tractarem matemàticament interferències d'ones harmòniques

- Quan dues o més ones es troben en un punt diem que s'ha produït una interferència.

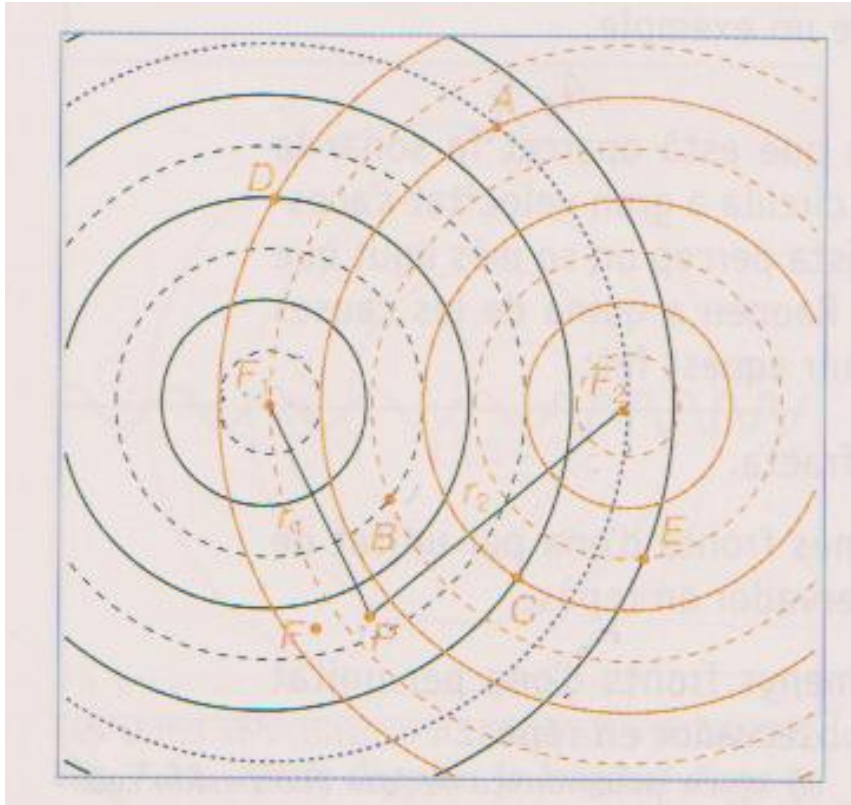
PRINCIPI DE SUPERPOSICIÓ: si dues o més ones interfereixen en un punt, aleshores la funció d'ona resultant és la suma de les funcions d'ona de cadascuna d'elles.

$$\left. \begin{array}{l} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ \dots \end{array} \right\} y_R = y_1 + y_2$$

Només considerarem la interferència d'ones que provenen de focus puntuals, que emeten ones **DE LA MATEIXA FREQUÈNCIA, LONGITUD D'ONA I AMPLITUD**, el desfasament entre les dues fonts es manté constant: en aquestes condicions diem que les fonts productores d'ones són **COHERENTS**.



Interferència de dues ones harmòniques coherents en un instant t .



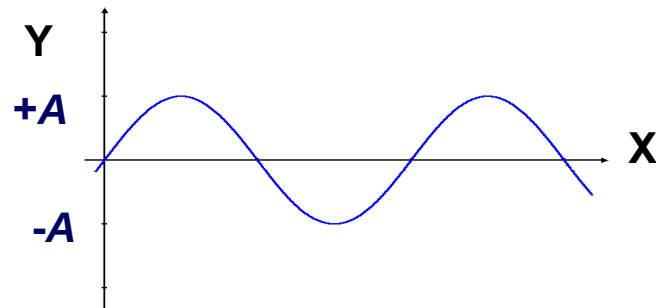
**Les línies contínues
corresponen a crestes.**

**Les línies discontinúes a
valls.**

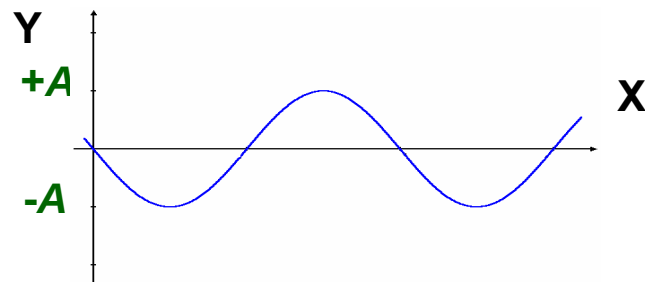
Punt D, coincideixen dues
crestes.

Punt A, coincideix una cresta i
una vall.

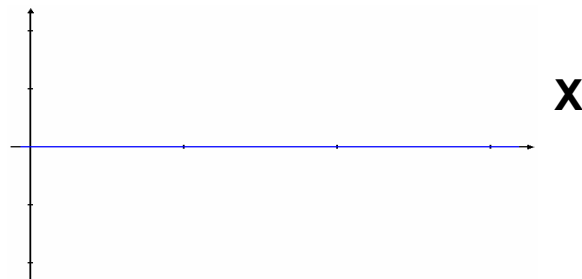
Punt B, dues valls.



$$y_1 = A \sin(wt - kx)$$

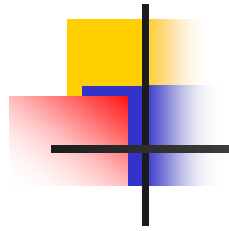


$$y_2 = A \sin(wt - kx + \Pi)$$



**No hi ha
interferència**

Interferència de dues ones harmòniques coherents desfasades Π rad entre elles en un instant t .

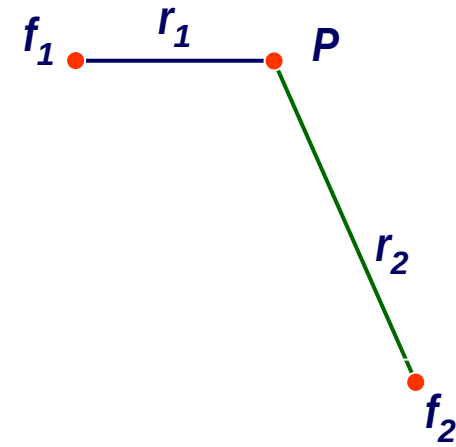


$$y_1 = A \sin(\omega t - kr_1)$$

$$y_2 = A \sin(\omega t - kr_2)$$

$$y_R = y_1 + y_2$$

$$y_R = A \sin(\omega t - kr_1) + A \sin(\omega t - kr_2)$$



Necessitem recordar-nos d'aquesta transformació trigonomètrica.

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

$$A = \omega t - kr_1$$

$$B = \omega t - kr_2$$

$$y_R = A \sin(\omega t - kr_1) + A \sin(\omega t - kr_2)$$

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

$$y_R = A \left[\sin(\omega t - kr_1) + \sin(\omega t - kr_2) \right]$$

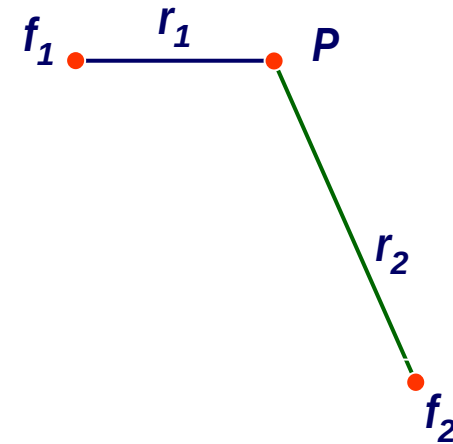
$$y_R = A \left[2 \sin \frac{\omega t - kr_1 + \omega t - kr_2}{2} \cdot \cos \frac{\omega t - kr_1 - \omega t + kr_2}{2} \right]$$

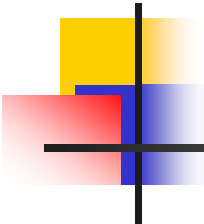
$$y_R = 2A \sin \frac{2\omega t - k(r_1 + r_2)}{2} \cos \frac{k(r_2 - r_1)}{2}$$

$$y_R = \underbrace{2A \cos \frac{k(r_2 - r_1)}{2}}_{\text{cte}} \sin \left(\omega t - k \frac{r_1 + r_2}{2} \right)$$

és cte amb el temps i correspon a A_R (amplitud resultant)

$$y_R = A_R \sin \left(\omega t - k \frac{r_1 + r_2}{2} \right)$$





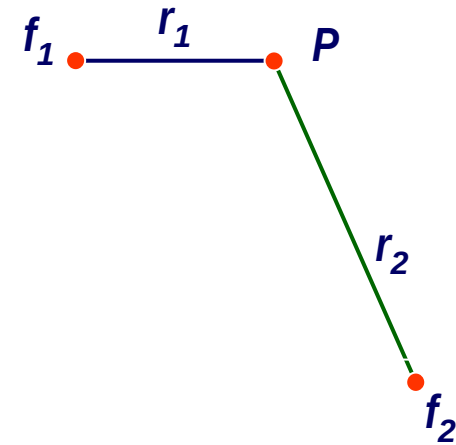
$$y_R = A_R \sin\left(\omega t - k \frac{r_1 + r_2}{2}\right)$$

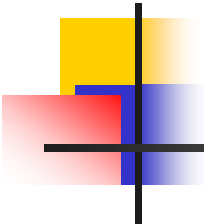
L'ona resultant té la mateixa freqüència i longitud d'ona que les ones que interfereixen.

Si recordem l'expressió $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$A_R = 2 A \cos \frac{k(r_2 - r_1)}{2} ; A_R = 2 A \cos \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{2\lambda} , A_R = 2 A \cos \frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda}$$

$\Delta\phi$ (diferència de fase entre les dues ones)





$$A_R = 2 A \cos \frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda}$$

Interferència constructiva. Es dona en els punts on l'amplitud resultant és màxima. Per tant, aquest punt és un VENTRE.

$$A_R = 2 A \underbrace{\cos \frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda}}_{\pm 1}$$

$$\frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} = n\pi$$

$$r_2 - r_1 = n\lambda$$

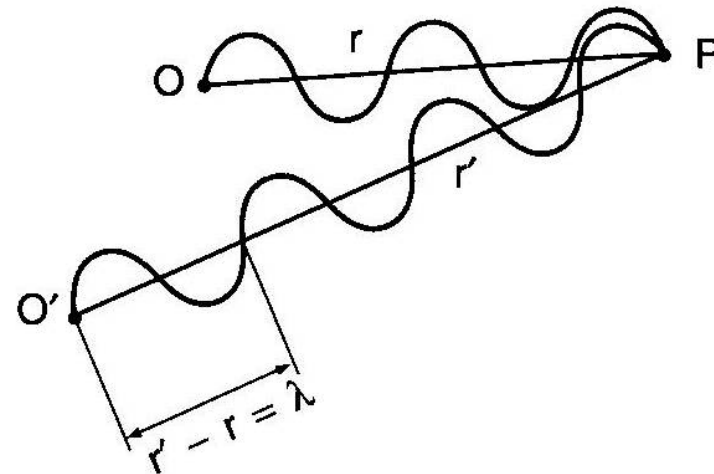
$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

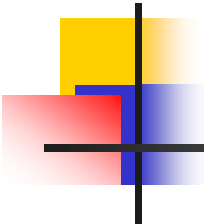
La diferència dels camins recorreguts siguin un nombre enter de longituds d'ona.

$$\Delta\phi = k(r_2 - r_1) = k n \lambda = \frac{2\pi}{\lambda} n \lambda$$

$$\Delta\phi = 2\pi n; \text{ on } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Les ones arriben en concordança de fase.





$$A_R = 2 A \cos \frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda}$$

Interferència destructiva. Es dona en els punts on l'amplitud resultant és nul·la. Per tant, aquest punt és un NODE.

$$A_R = 2 A \underbrace{\cos \frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda}}_{\pm 0} \quad \frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} = (2n+1) \frac{\pi}{2}$$

$$r_2 - r_1 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

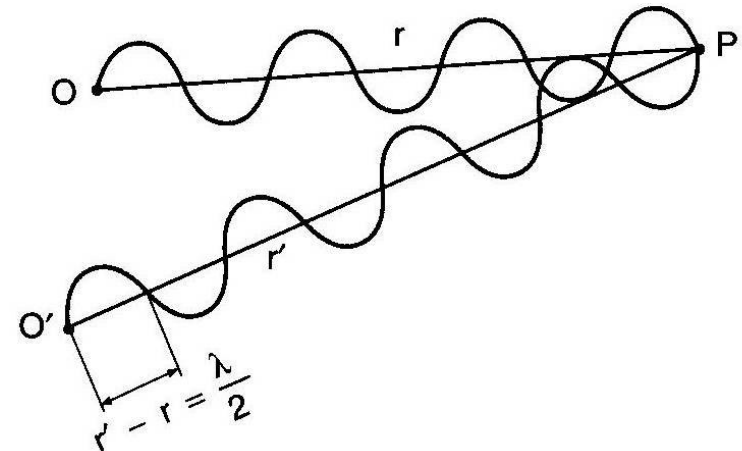
$$n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

La diferència dels camins recorreguts siguin un nombre imparell de semilongitud d'ona.

$$\Delta\phi = k (r_2 - r_1) = k (2n + 1) \frac{\lambda}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta\phi = (2n+1) \pi; \text{ on } n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

Les ones arriben en oposició de fase.



Pàg. 131. Problema 11. Dues ones que es propaguen interfereixen en un punt a 1,5 m del focus emissor d'una ona i a 1,75 m de l'altre.

Si l'equació de les dues és $y = 0,25 \cos 4\pi (10t - x)$ en m, determina:

- La longitud d'ona de l'ona resultant
- Si en el punt considerat, la interferència és constructiva o destructiva.

a) Com la ona resultant té la mateixa freqüència i longitud d'ona que les ones que interfereixen.

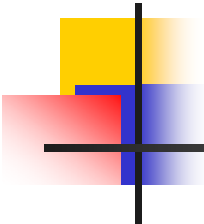
$$y = 0,25 \cos 4\pi (10t - x) = 0,25 \cos (\underbrace{40\pi}_{\omega} t - \underbrace{4\pi}_{k} x) \text{ en m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} ; \lambda = \frac{2\pi}{4\pi} = 0,5 \text{ m.}$$

b) $r_2 - r_1 = 1,75 \text{ m} - 1,5 \text{ m} = 0,25 \text{ m}$; justament la diferència de recorregut de les ones és un nombre enter de la meitat de la longitud d'ona.

$$r_2 - r_1 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{Interferència destructiva}$$

$$r_2 - r_1 = n\lambda \quad \text{Interferència constructiva.}$$



En el supòsit, més general, d'interferència d'ones de la mateixa freqüència i longitud d'ona però diferent amplitud, les condicions perquè es produeixen interferència constructiva o destructiva són les que hem trobat anteriorment.

Tanmateix, en la interferència destructiva, l'amplitud és mínima però no nul·la.