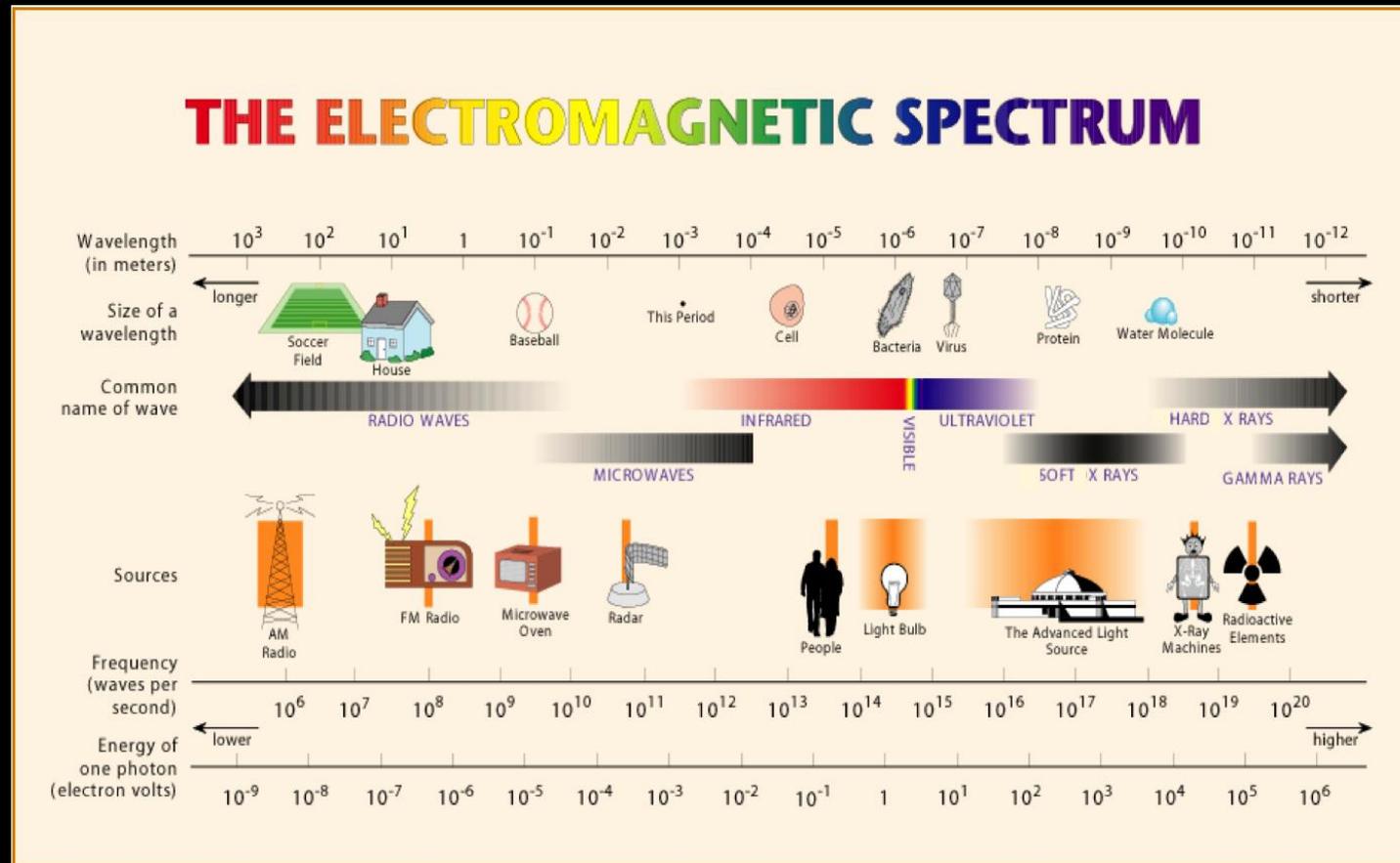


# La lumière et ses propriétés



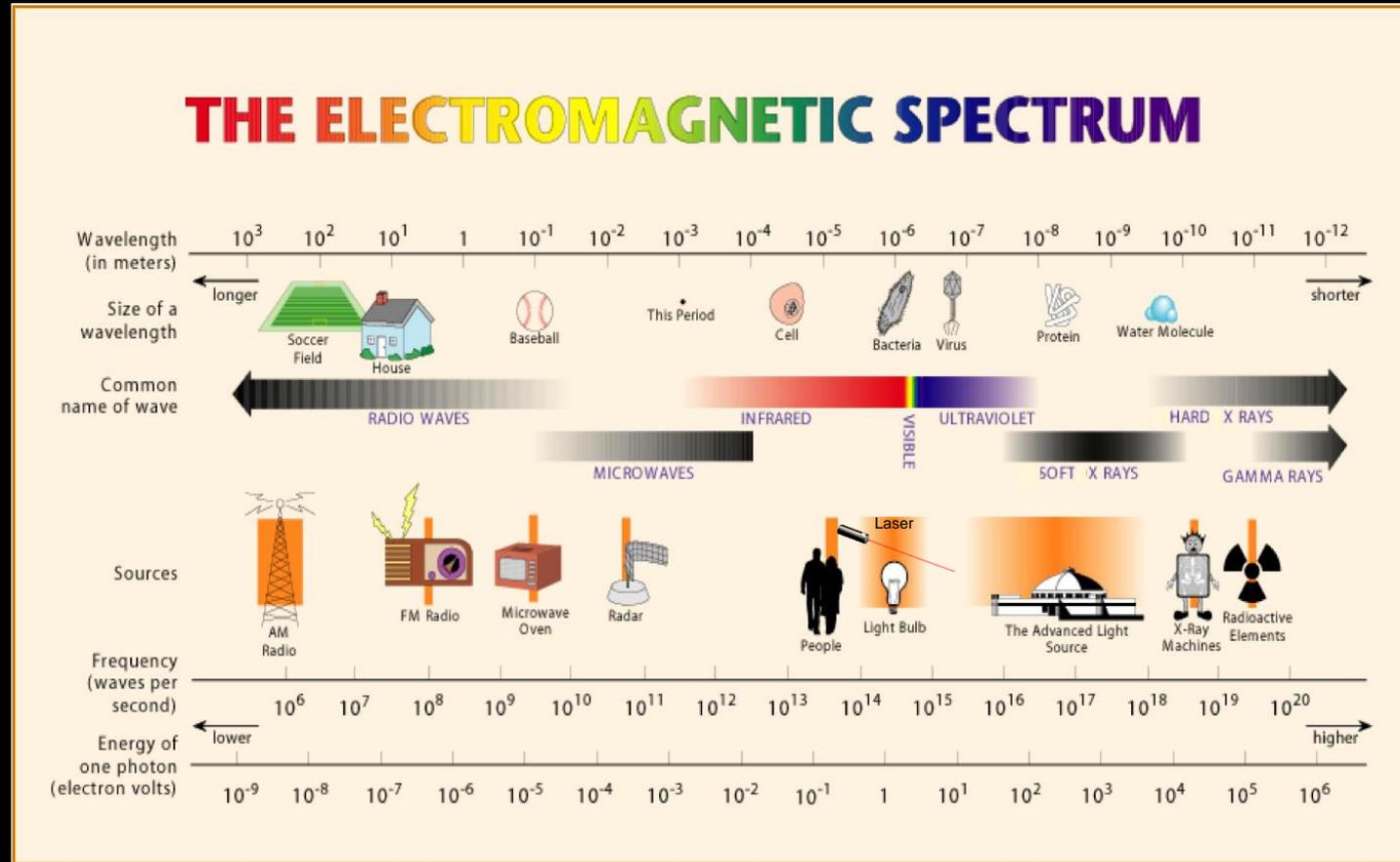
de l'infra-rouge aux rayons X.

Sylvain Ravy

Laboratoire de physique des solides

CNRS, Université Paris-Saclay

# La lumière et ses propriétés



de l'infra-rouge aux rayons X.

Sylvain Ravy

Laboratoire de physique des solides

CNRS, Université Paris-Saclay

# La lumière et ses propriétés



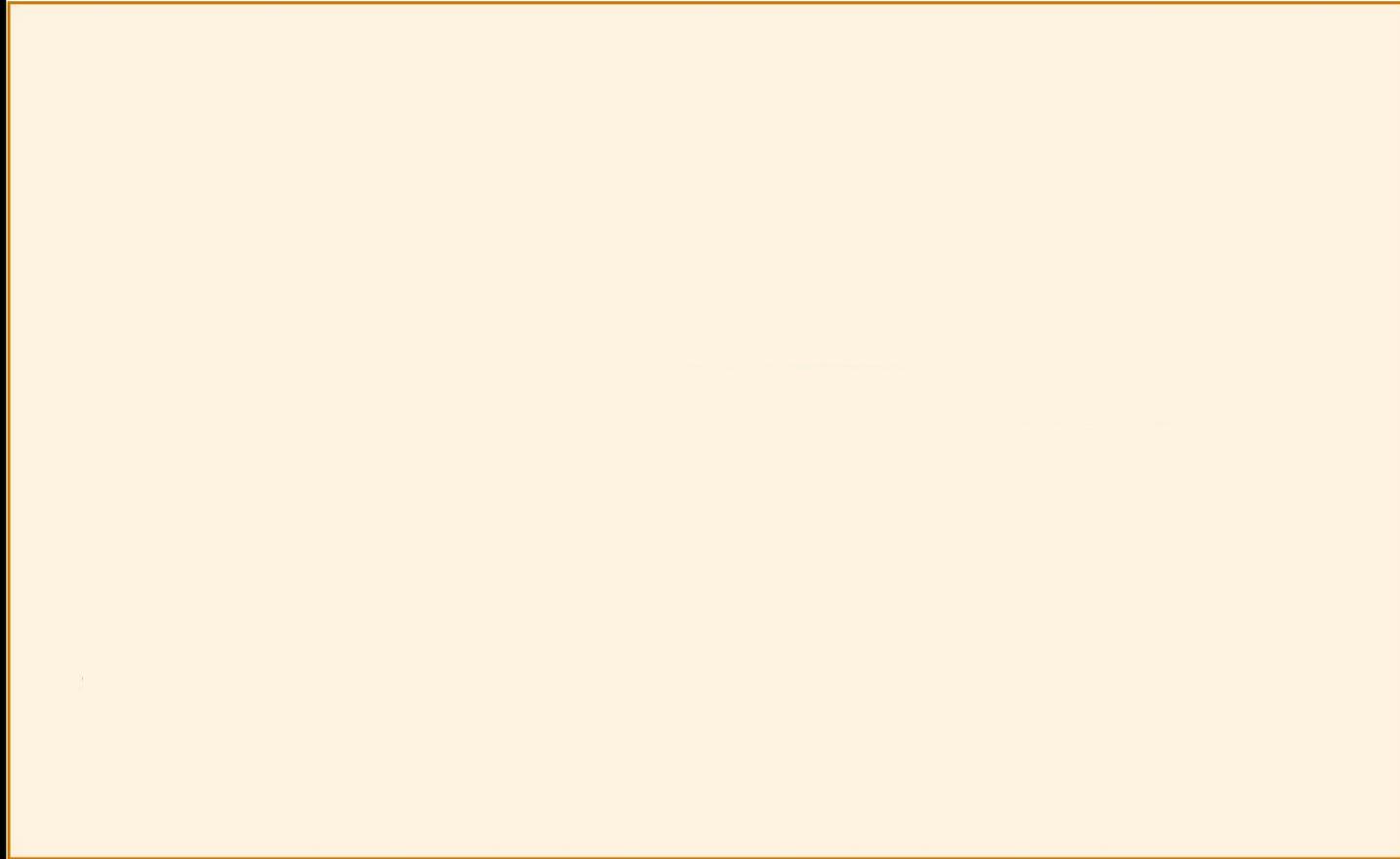
de **l'infra-rouge** aux rayons X.

**Sylvain Ravy**

Laboratoire de physique des solides  
CNRS, Université Paris-Saclay

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>

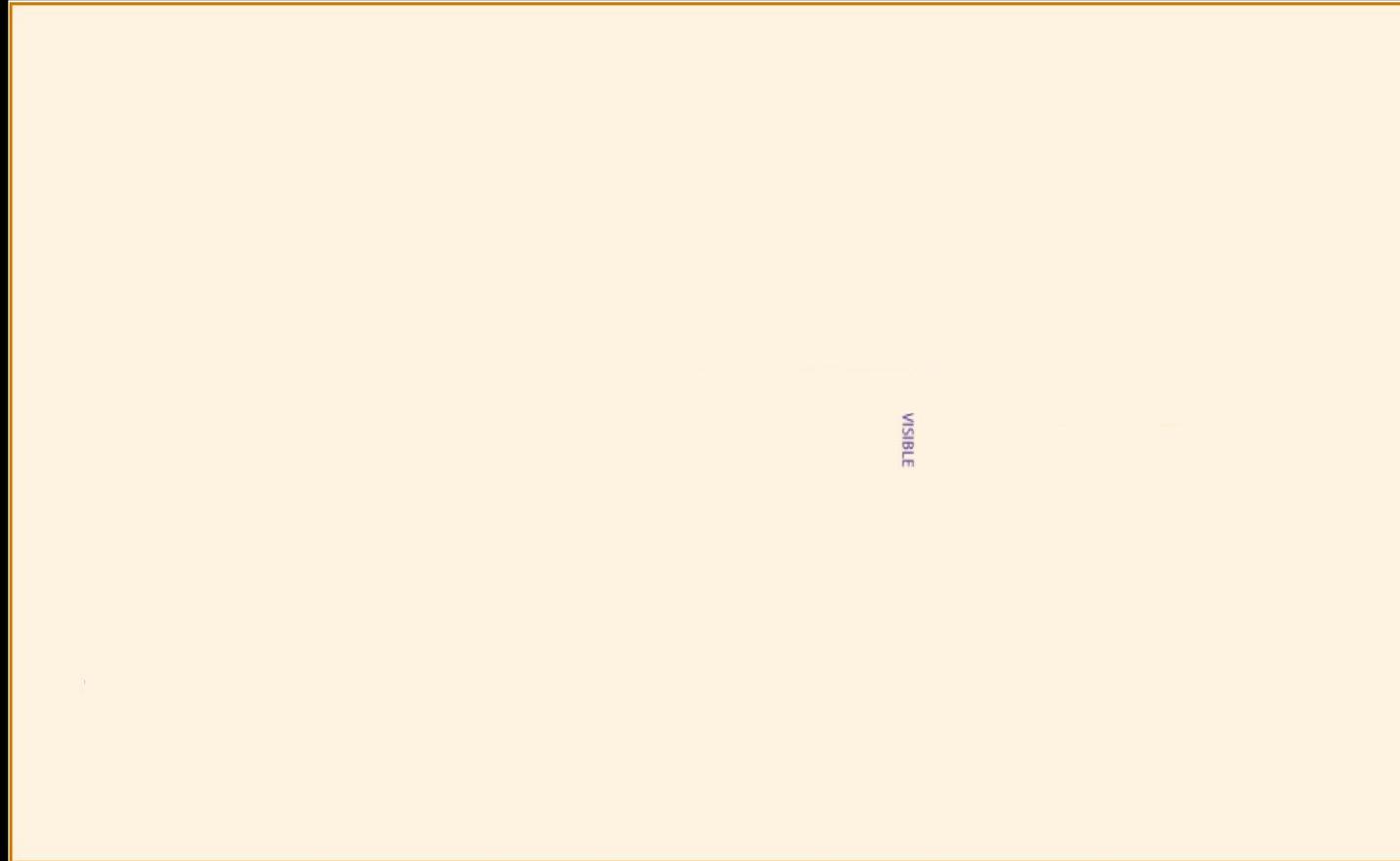


# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



# Le spectre électromagnétique

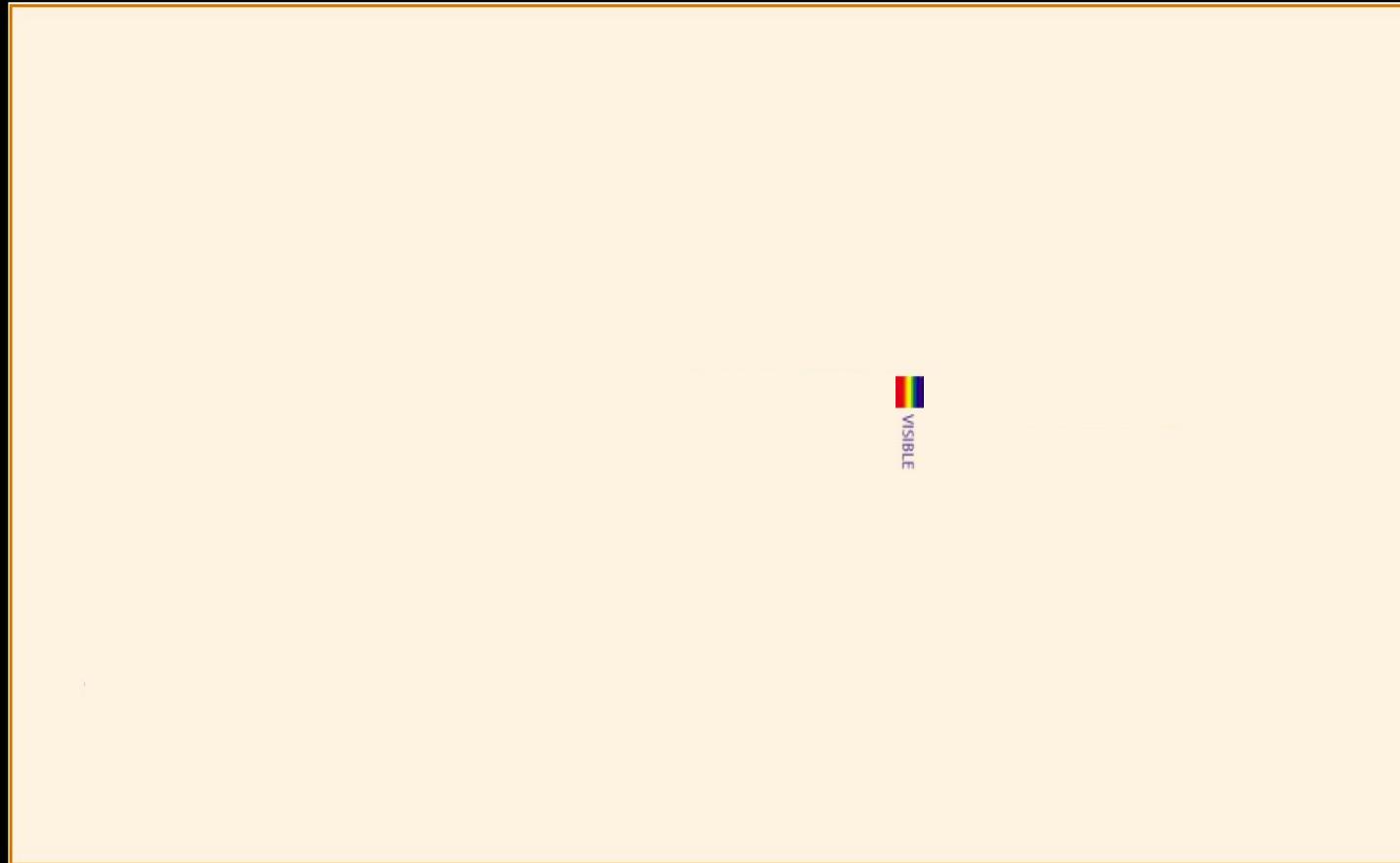
Avant le XVII<sup>e</sup>



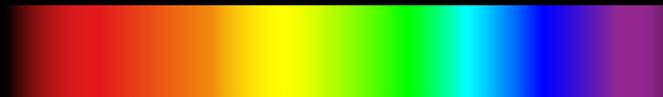
Kepler 1610



Newton 1666



VISIBLE



# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



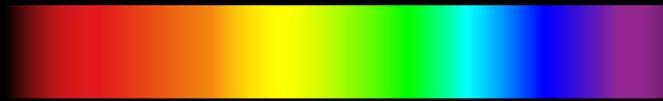
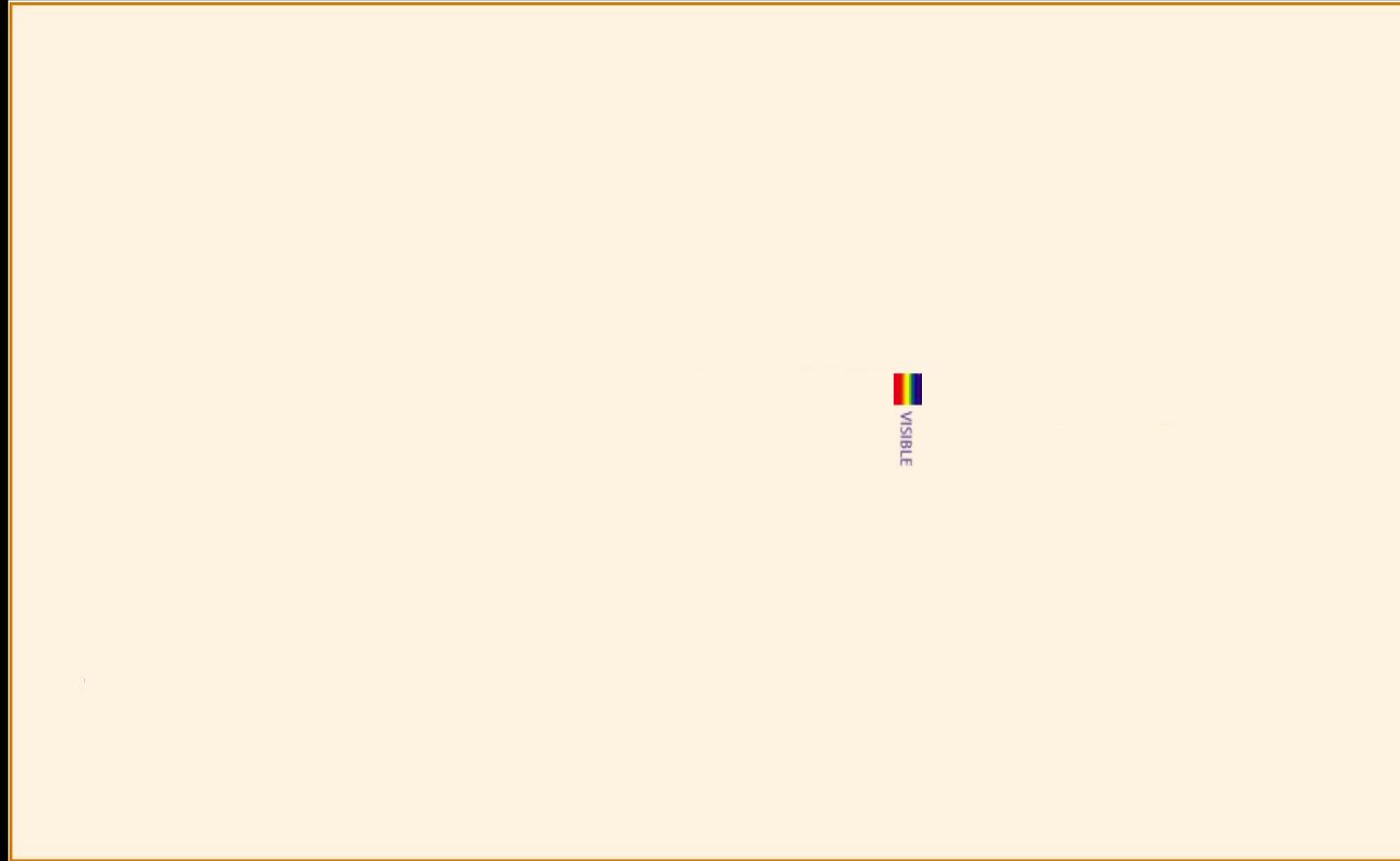
Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666



# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610

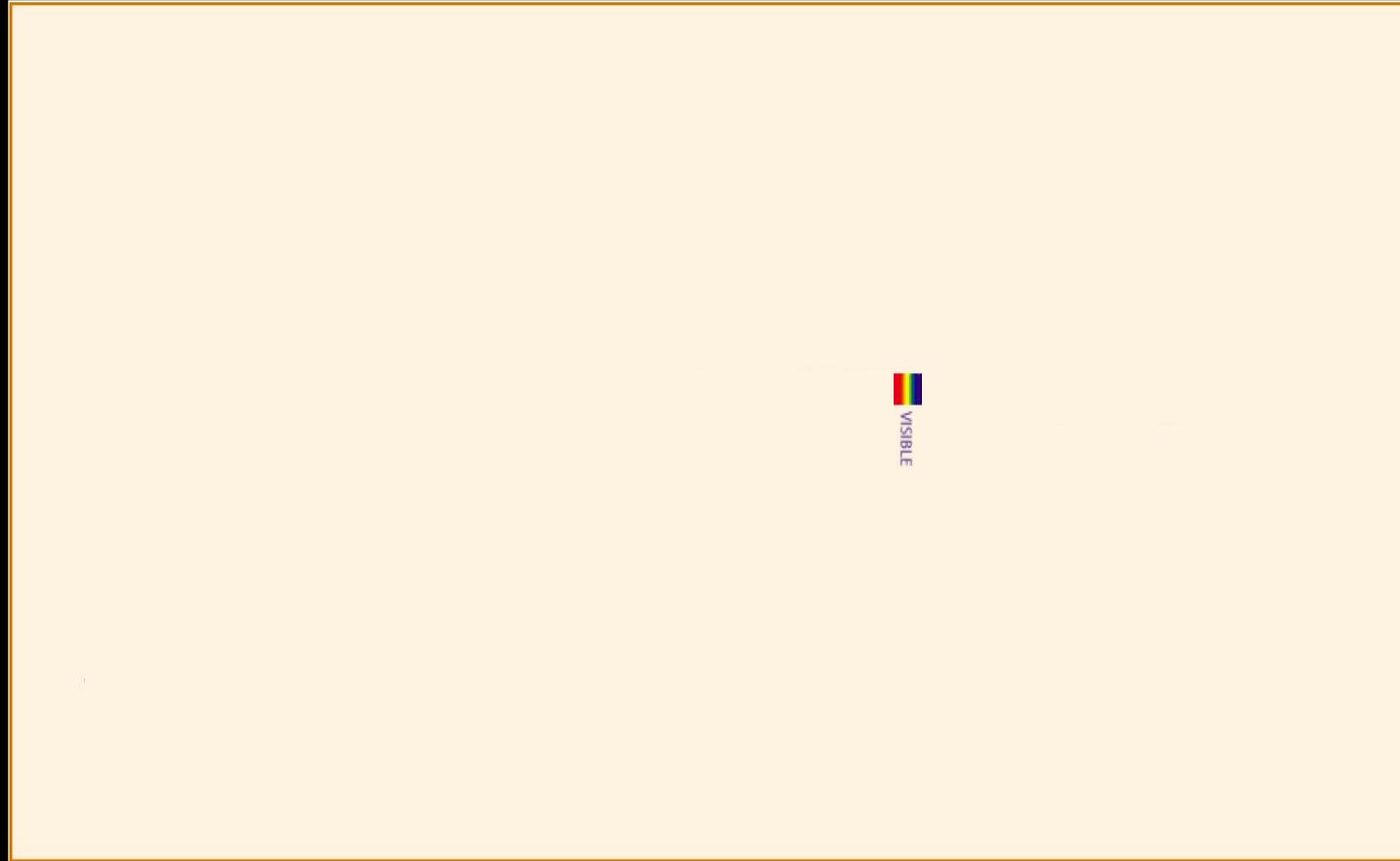


Huygens 1678



Newton 1666

XVIII<sup>e</sup>



# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610

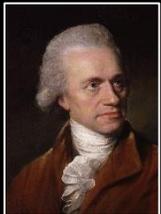


Huygens 1678

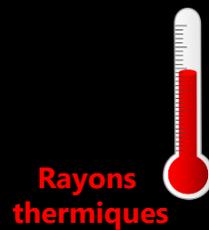
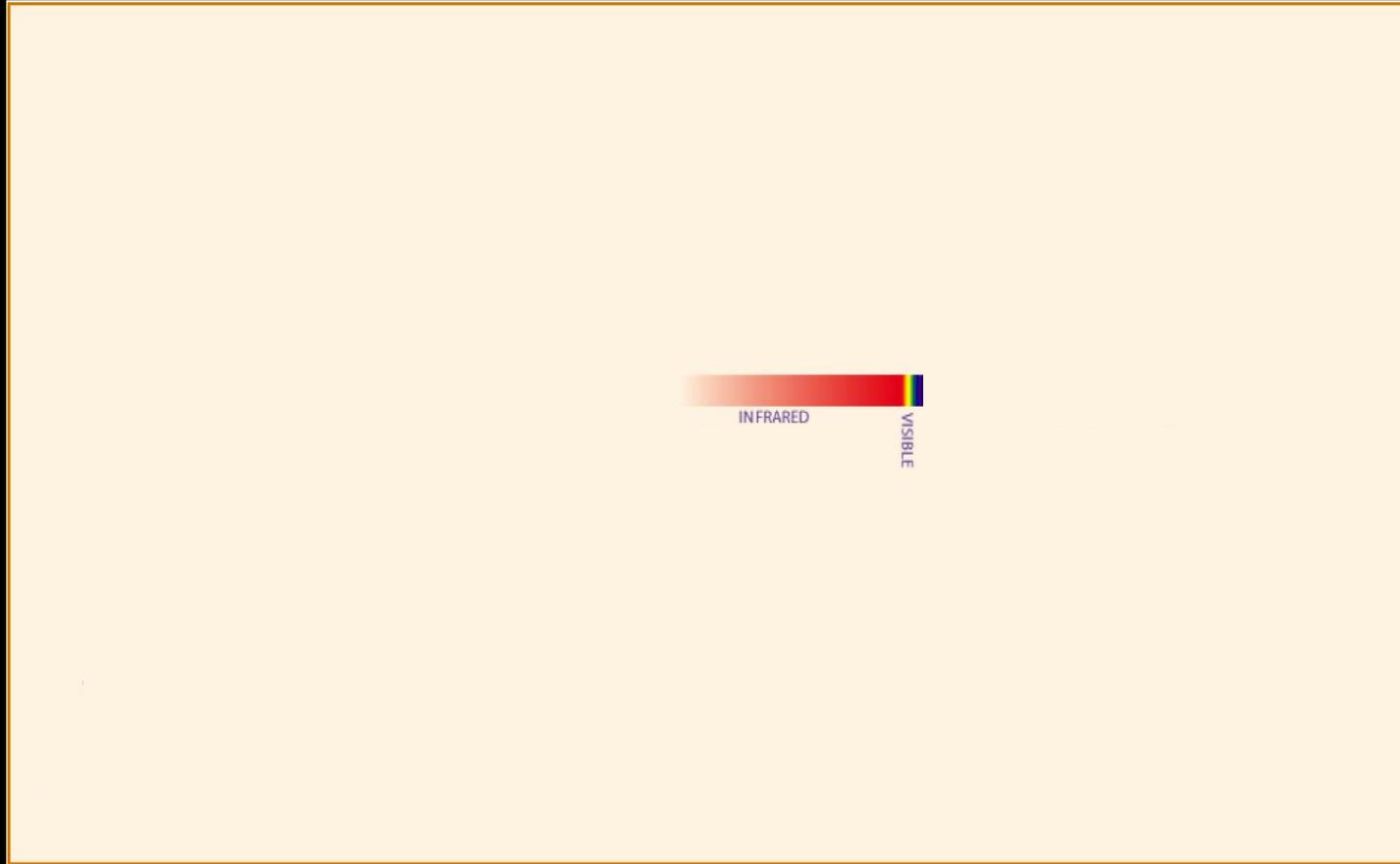


Newton 1666

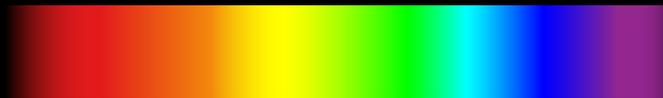
XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



Rayons  
thermiques



# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

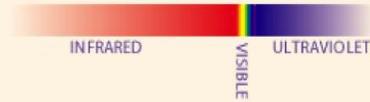
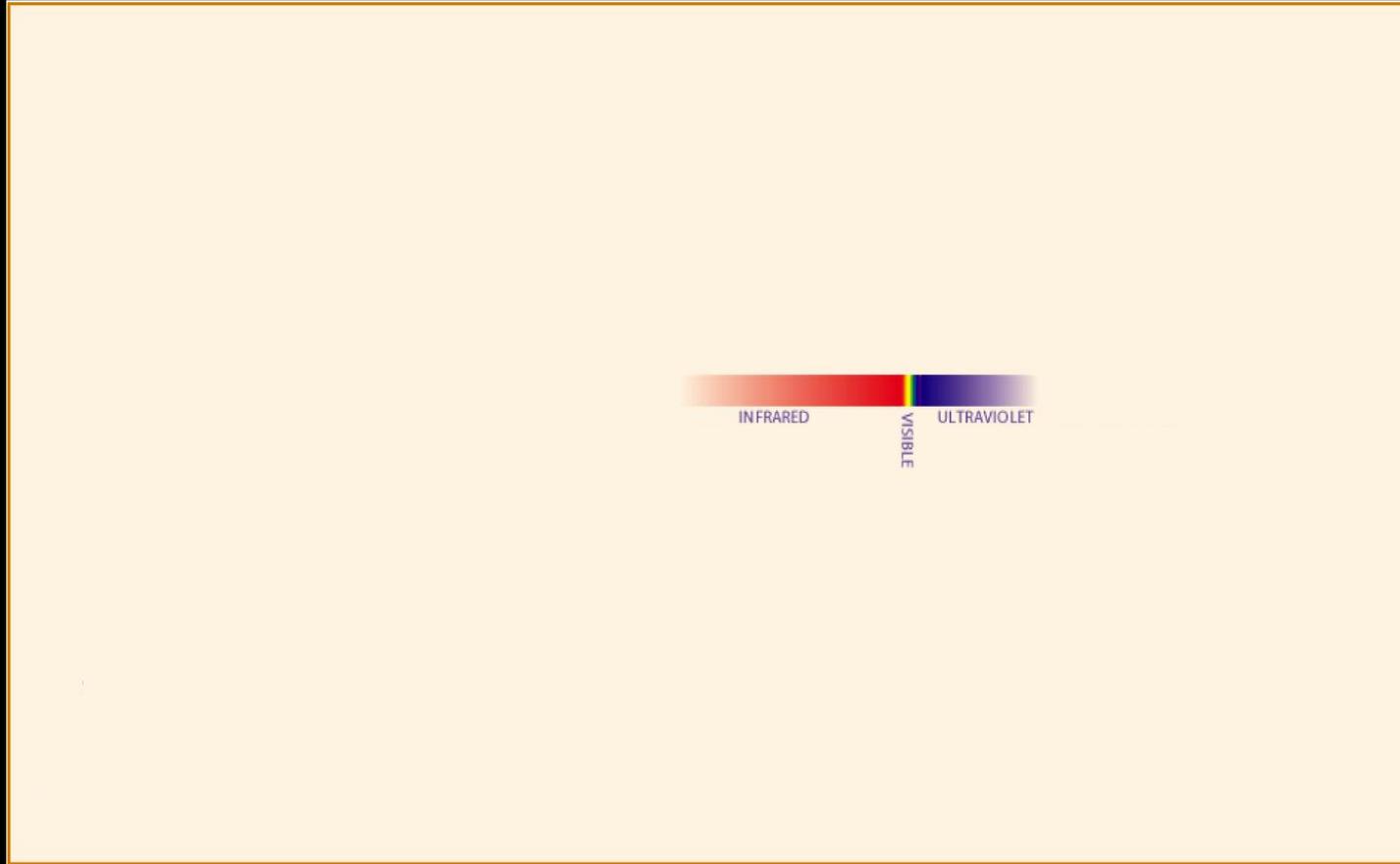
XVIII<sup>e</sup>



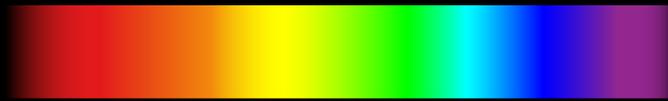
Herschel 1800  
IR



Ritter 1801  
UV



Rayons  
thermiques



AgCl

Rayons  
chimiques

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

XVIII<sup>e</sup>



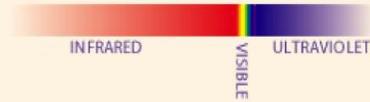
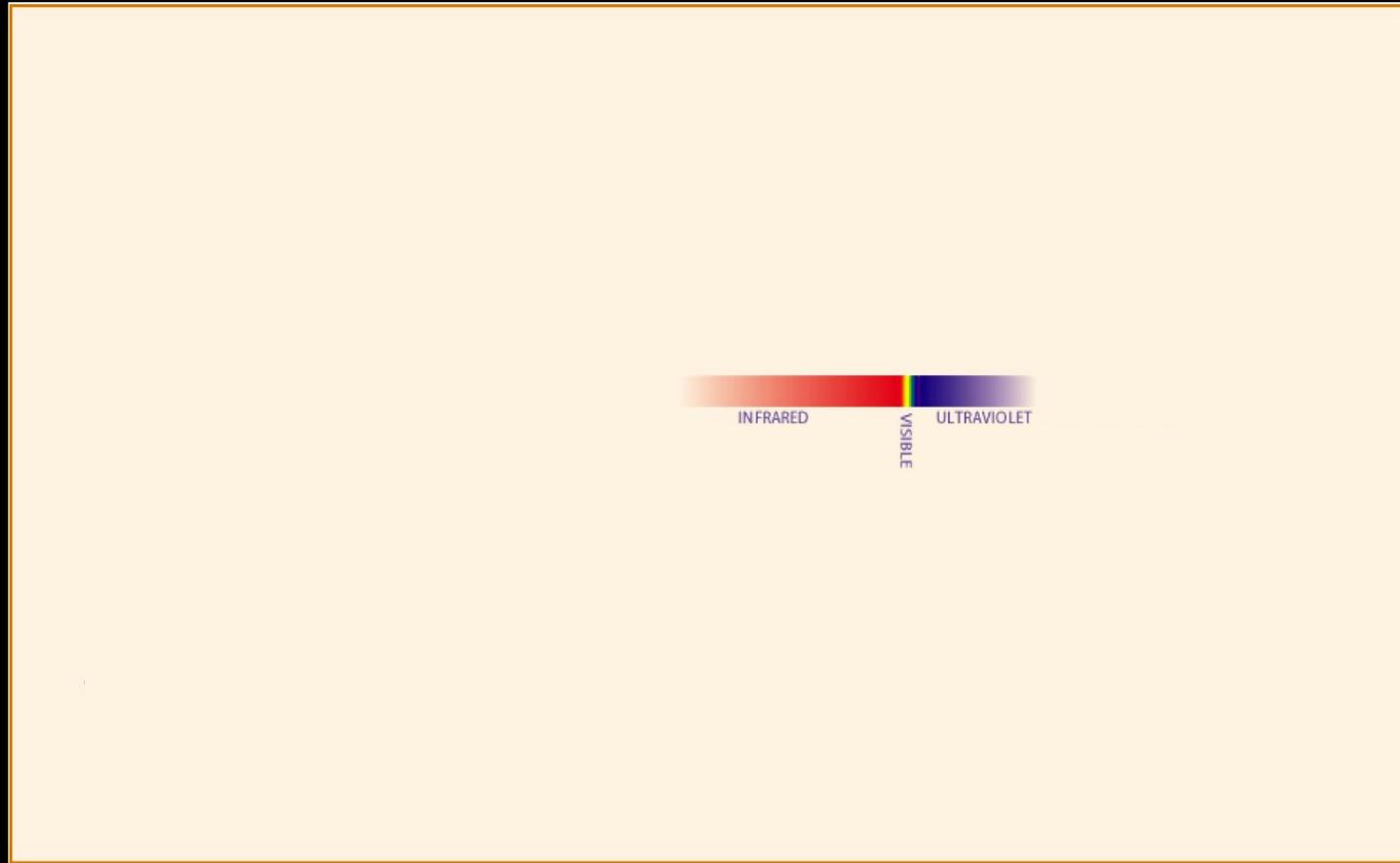
Herschel 1800  
IR



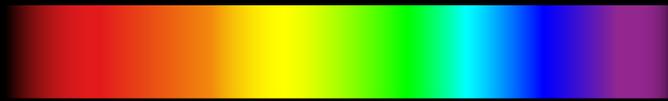
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Rayons  
thermiques



Rayons  
chimiques

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



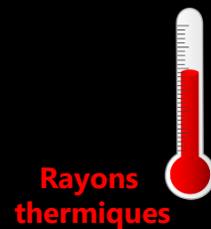
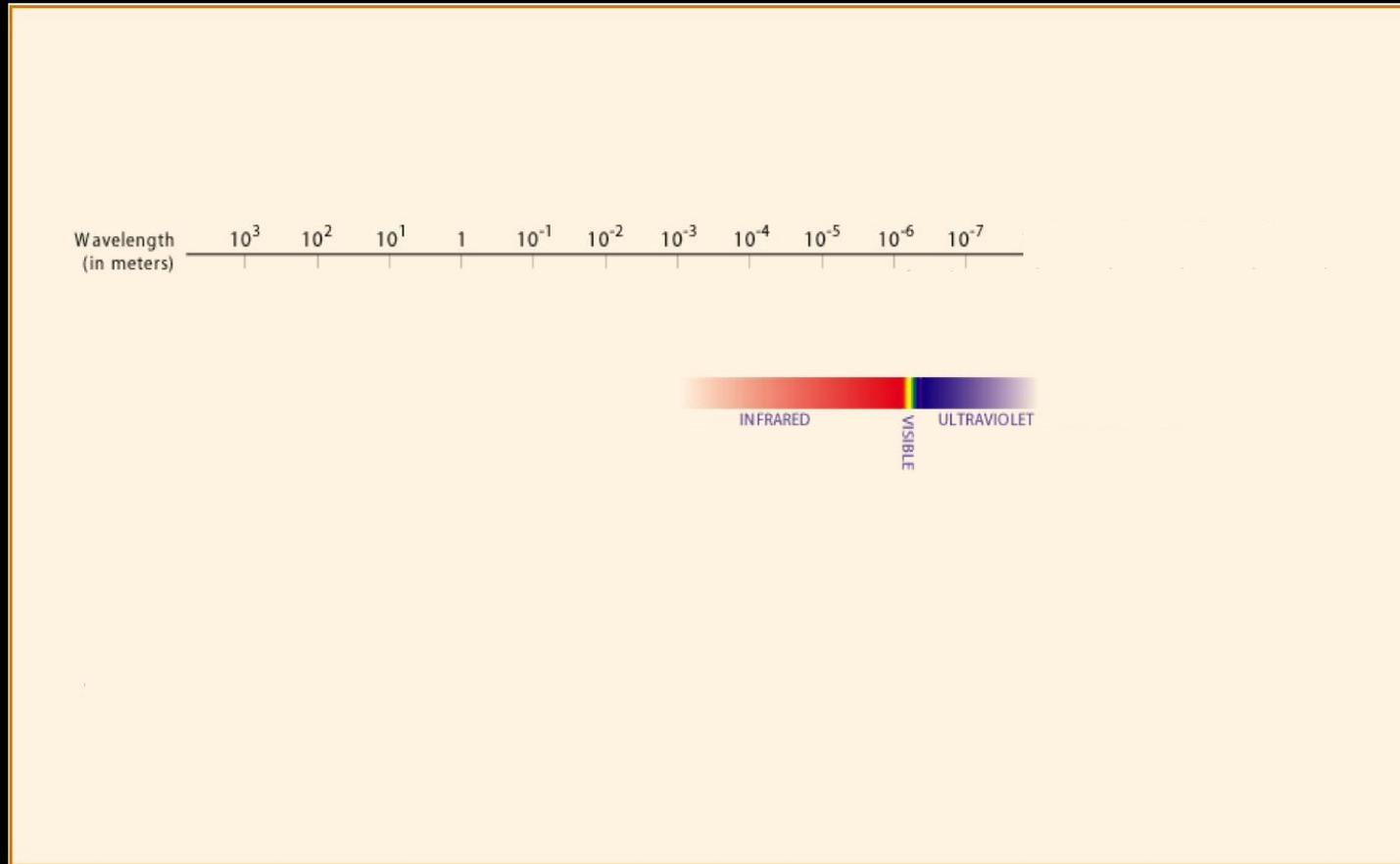
Ritter 1801  
UV



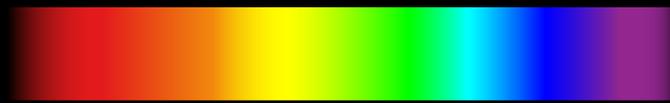
Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Rayons  
thermiques



Rayons  
chimiques

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



Ritter 1801  
UV



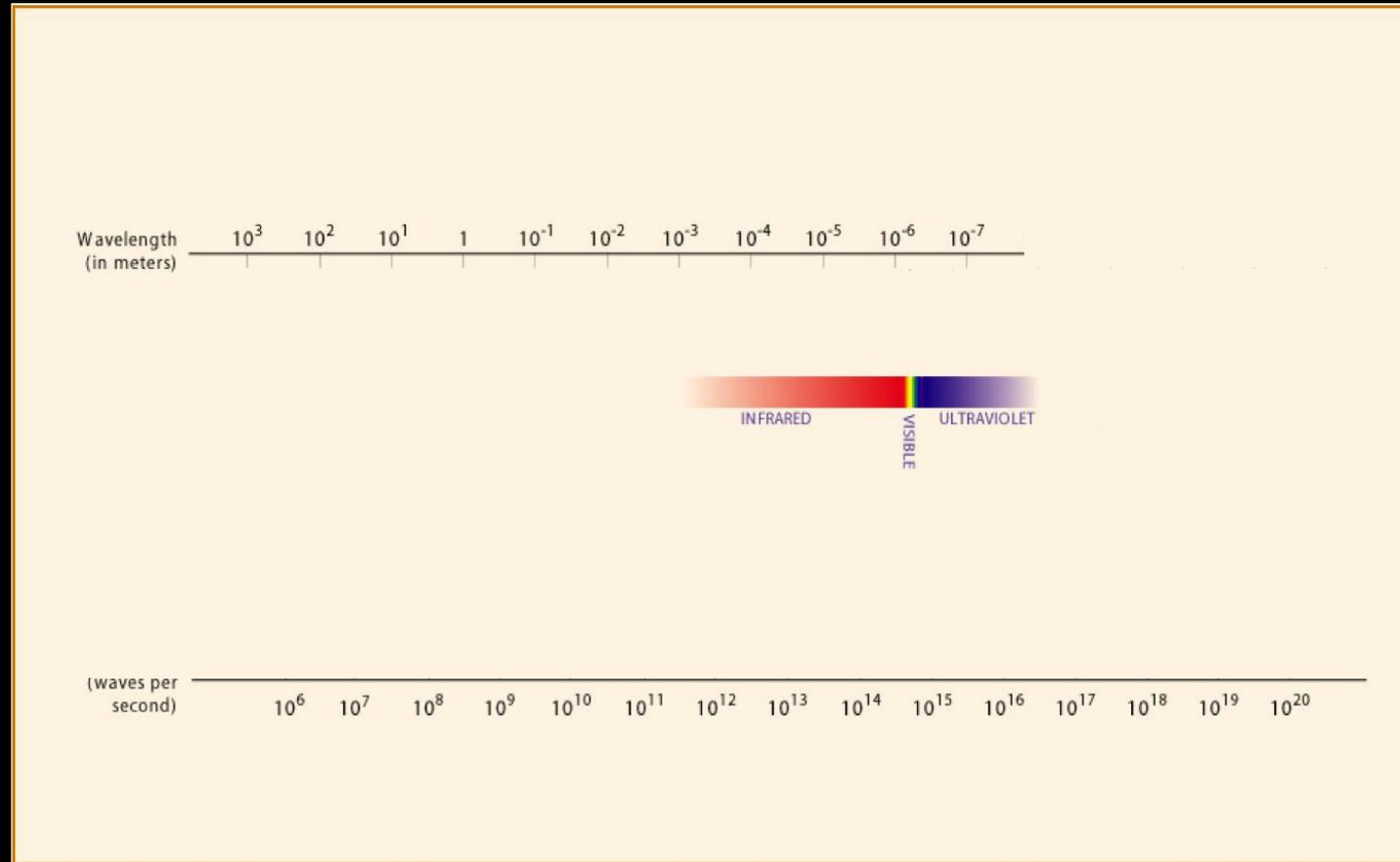
Young 1801  
Ondes



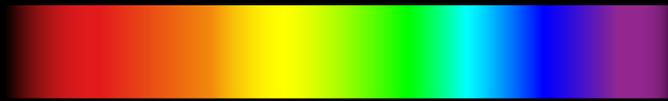
Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Maxwell 1861  
Ondes EM



Rayons  
thermiques



AgCl

Rayons  
chimiques

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

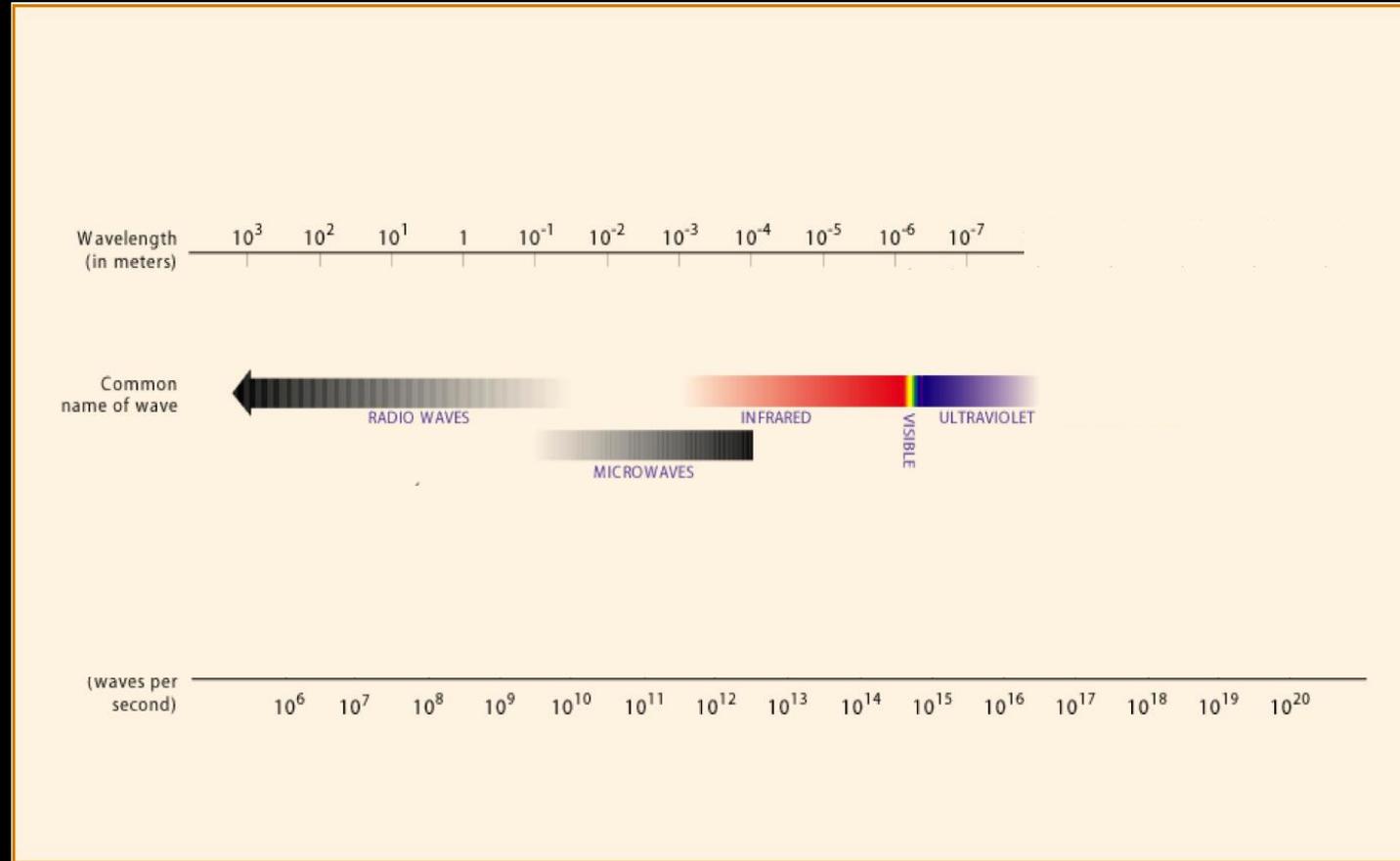
XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



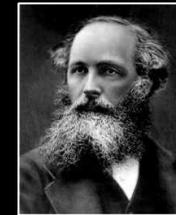
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Maxwell 1861  
Ondes EM



Hertz 1887  
Radio ; PE



Rayons  
thermiques



Rayons  
chimiques

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610

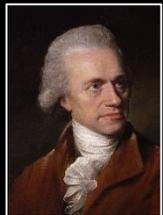


Huygens 1678



Newton 1666

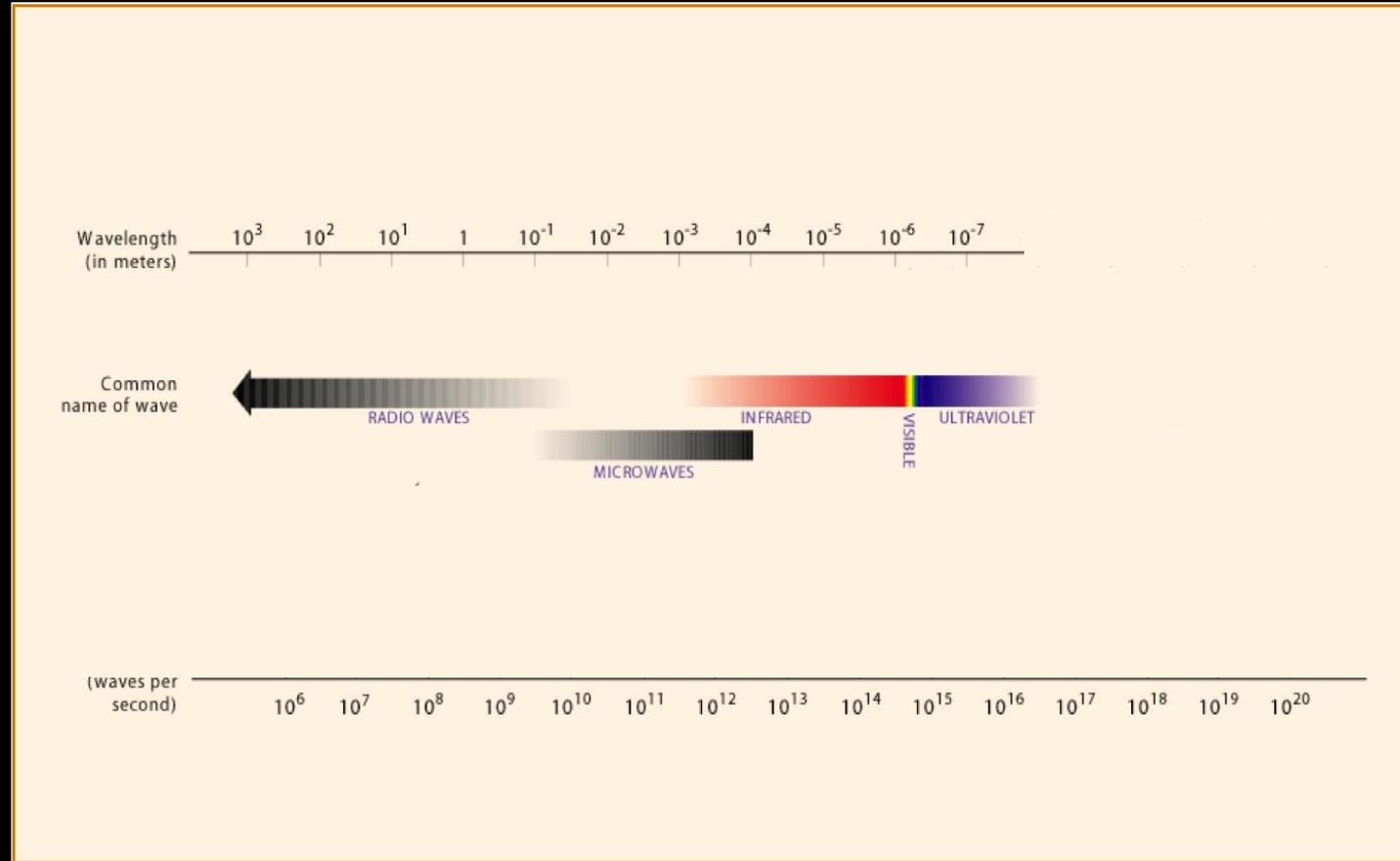
XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



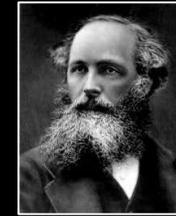
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



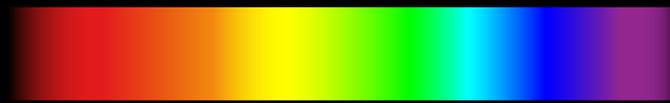
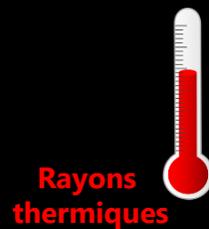
Maxwell 1861  
Ondes EM



Hertz 1887  
Radio ; PE



Röntgen 1895  
RX



Rayons chimiques

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

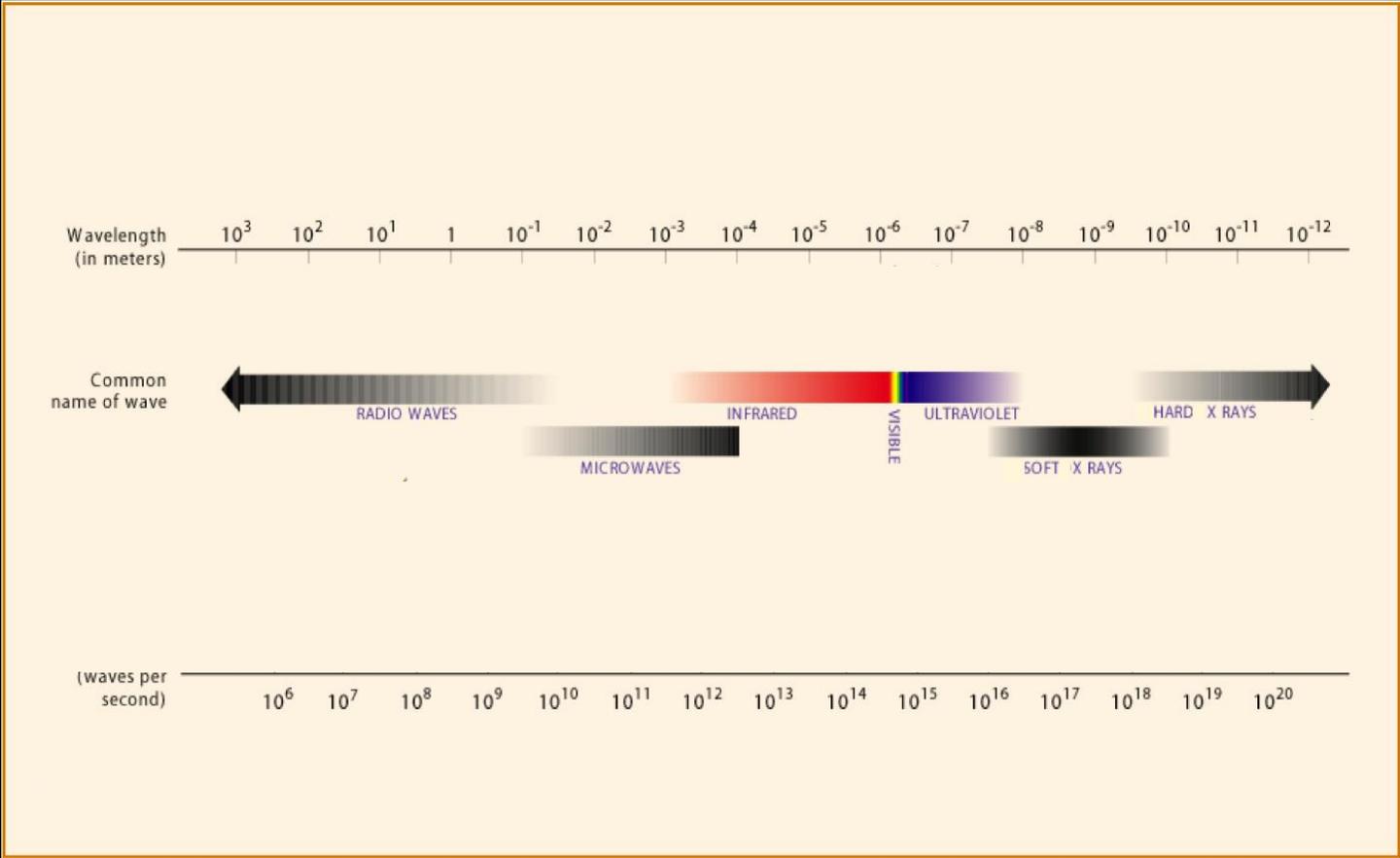
XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



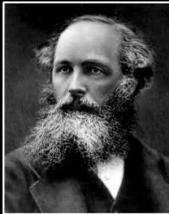
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Maxwell 1861  
Ondes EM



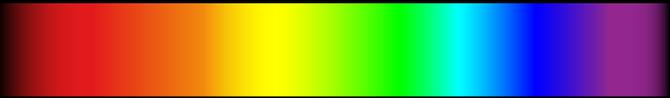
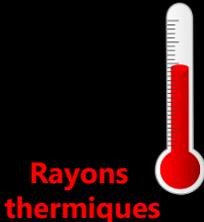
Hertz 1887  
Radio ; PE



Röntgen 1895  
RX



Laue 1912  
Diffraction



Rayons chimiques

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

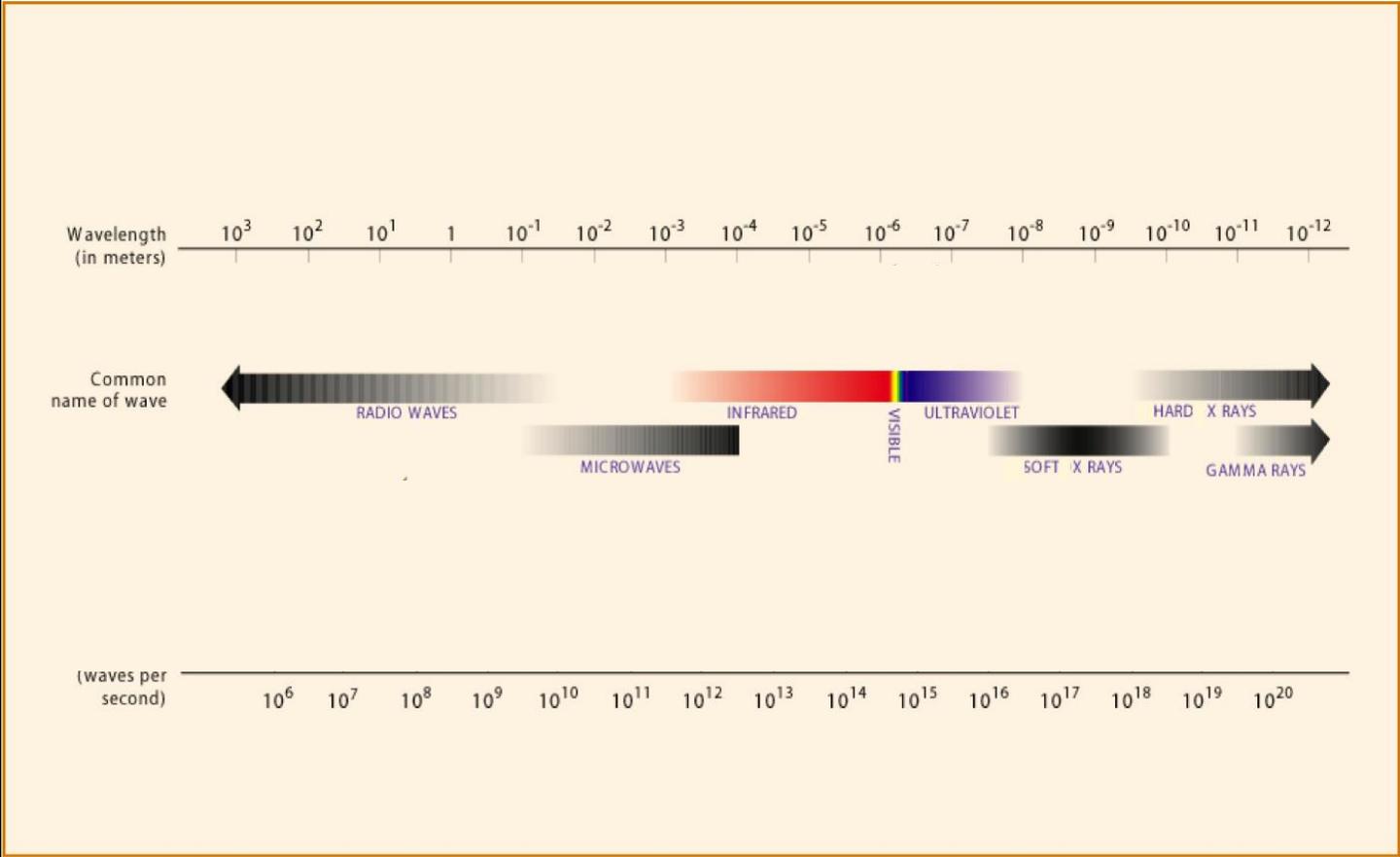
XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



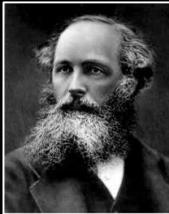
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Maxwell 1861  
Ondes EM



Hertz 1887  
Radio ; PE



Röntgen 1895  
RX



Laue 1912  
Diffraction



Rayons  
thermiques



Rayons  
chimiques

# Le spectre électromagnétique

## Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666

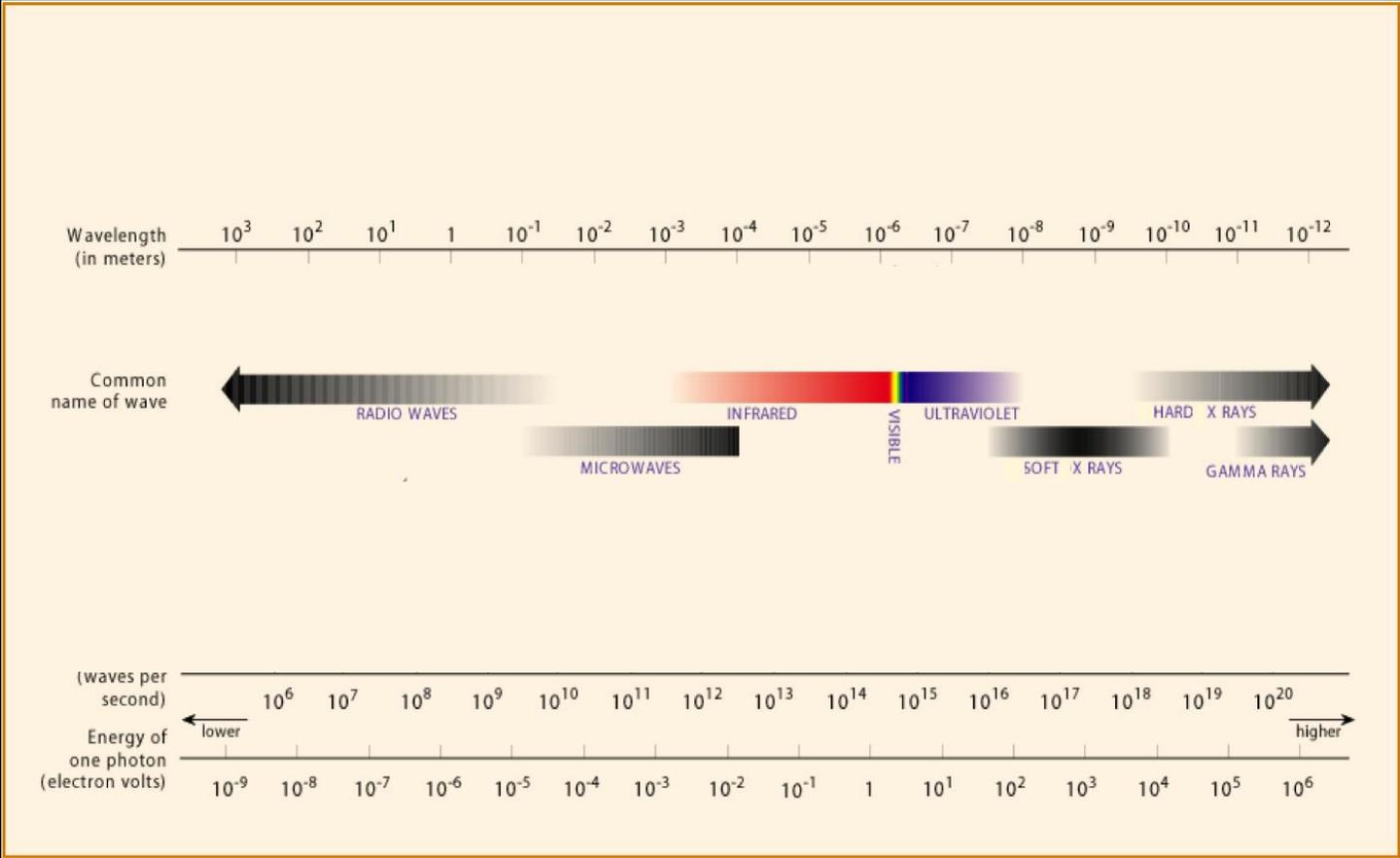
## XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



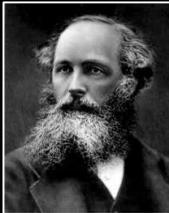
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Maxwell 1861  
Ondes EM



Hertz 1887  
Radio ; PE



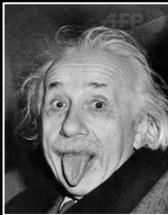
Röntgen 1895  
RX



Laue 1912  
Diffraction



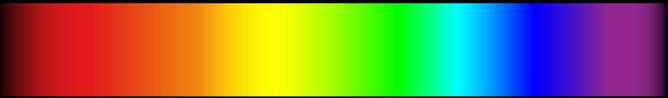
Planck 1900



Einstein 1905



Rayons  
thermiques



Rayons  
chimiques

$E = h\nu$

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610

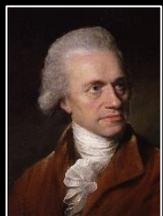


Huygens 1678



Newton 1666

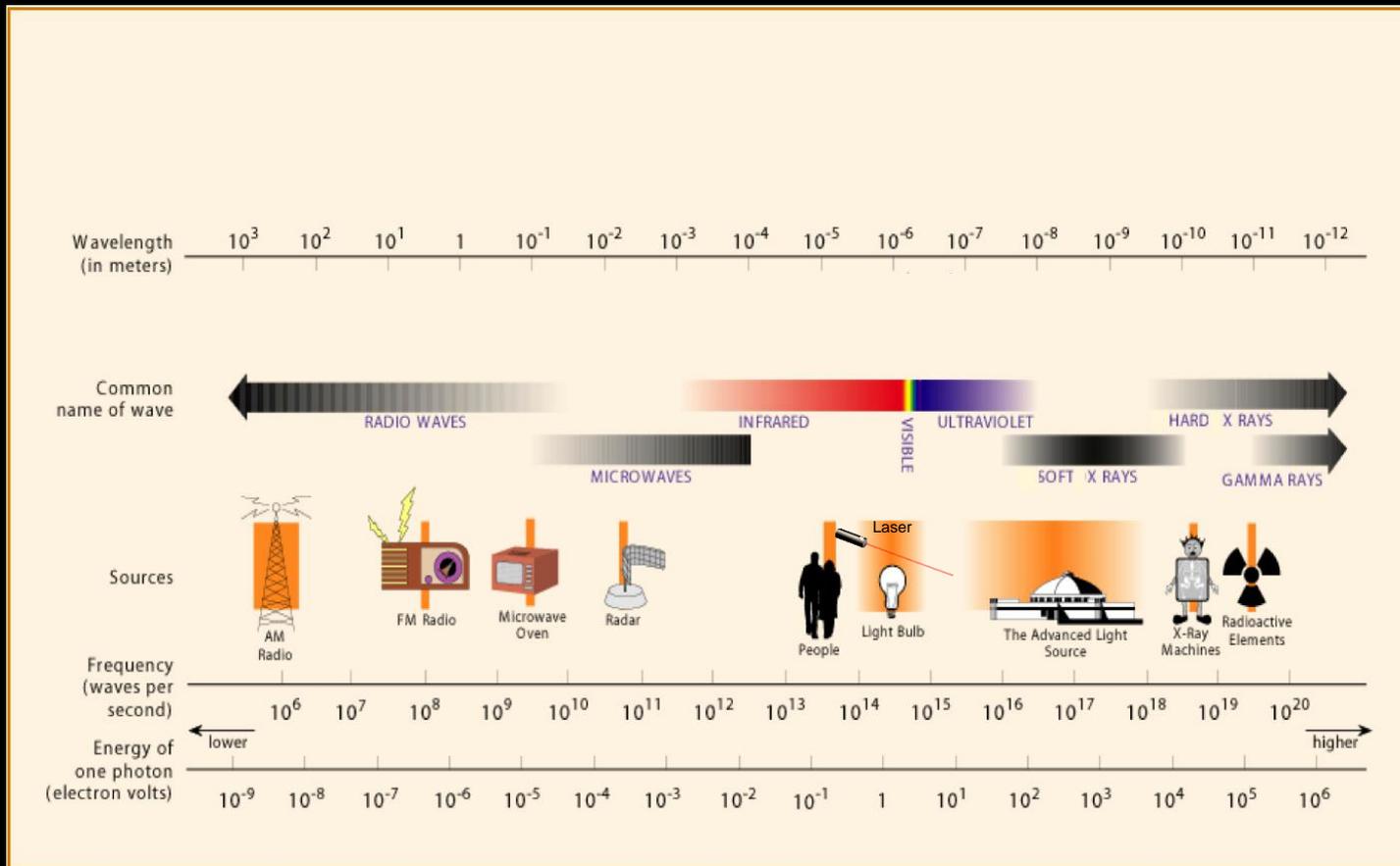
XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



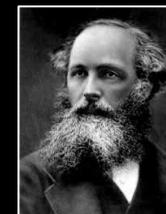
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Maxwell 1861  
Ondes EM



Hertz 1887  
Radio ; PE



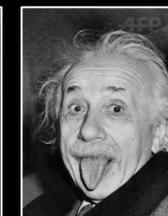
Röntgen 1895  
RX



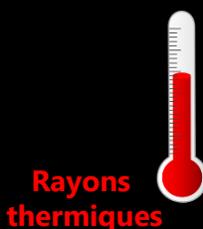
Laue 1912  
Diffraction



Planck 1900



Einstein 1905



Rayons  
thermiques



Rayons  
chimiques

$$E = h\nu$$

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610

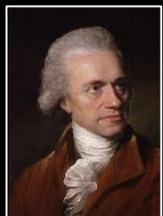


Huygens 1678



Newton 1666

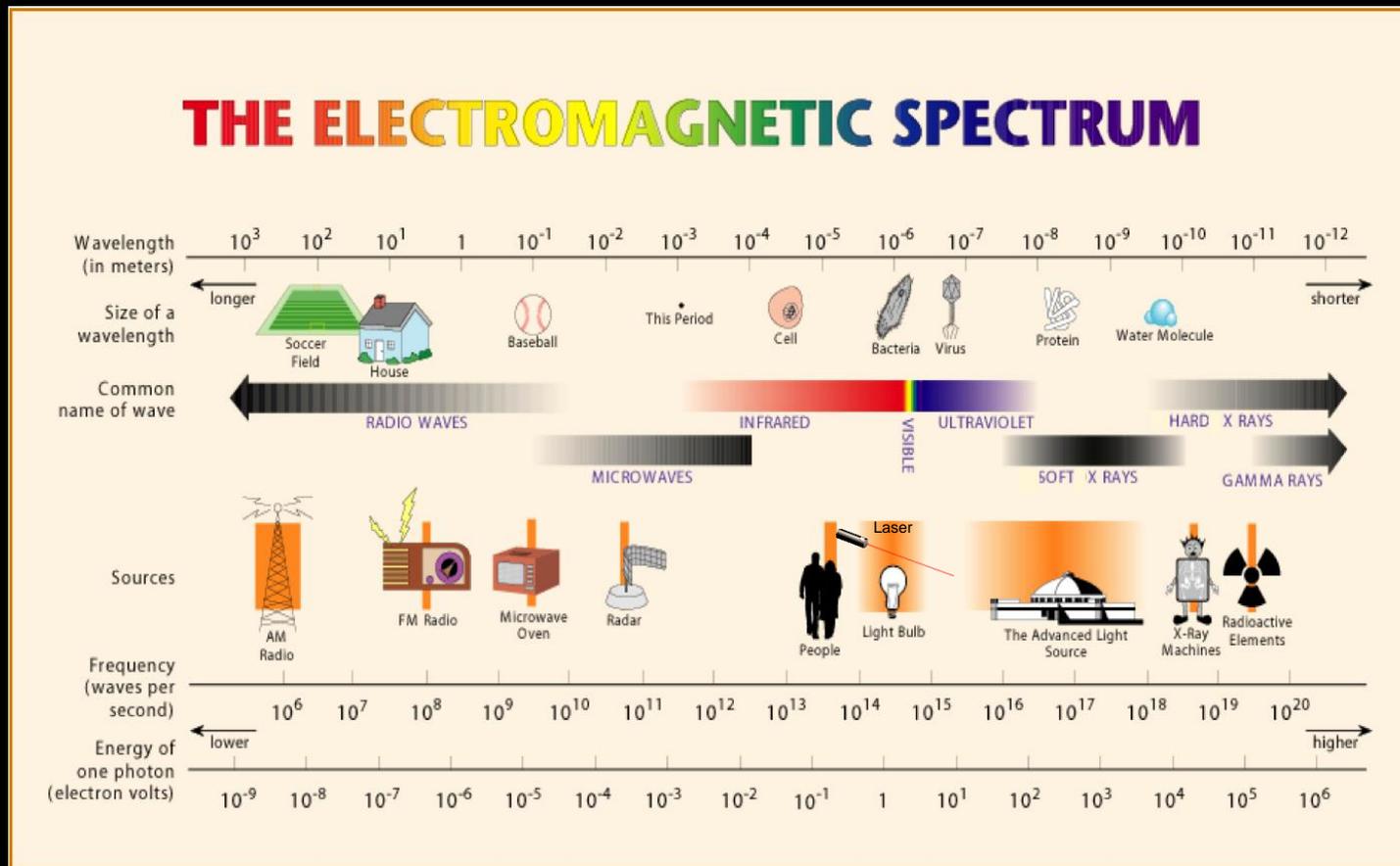
XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



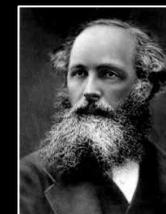
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Maxwell 1861  
Ondes EM



Hertz 1887  
Radio ; PE



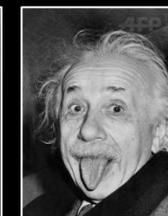
Röntgen 1895  
RX



Laue 1912  
Diffraction

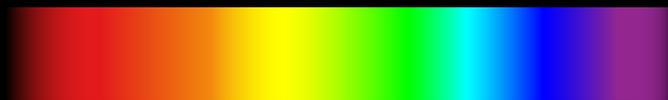


Planck 1900



Einstein 1905

Rayons  
thermiques



AgCl

Rayons  
chimiques

$$E = h\nu$$

# Le spectre électromagnétique

Avant le XVII<sup>e</sup>



Kepler 1610

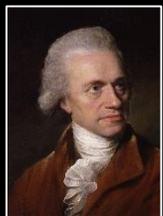


Huygens 1678



Newton 1666

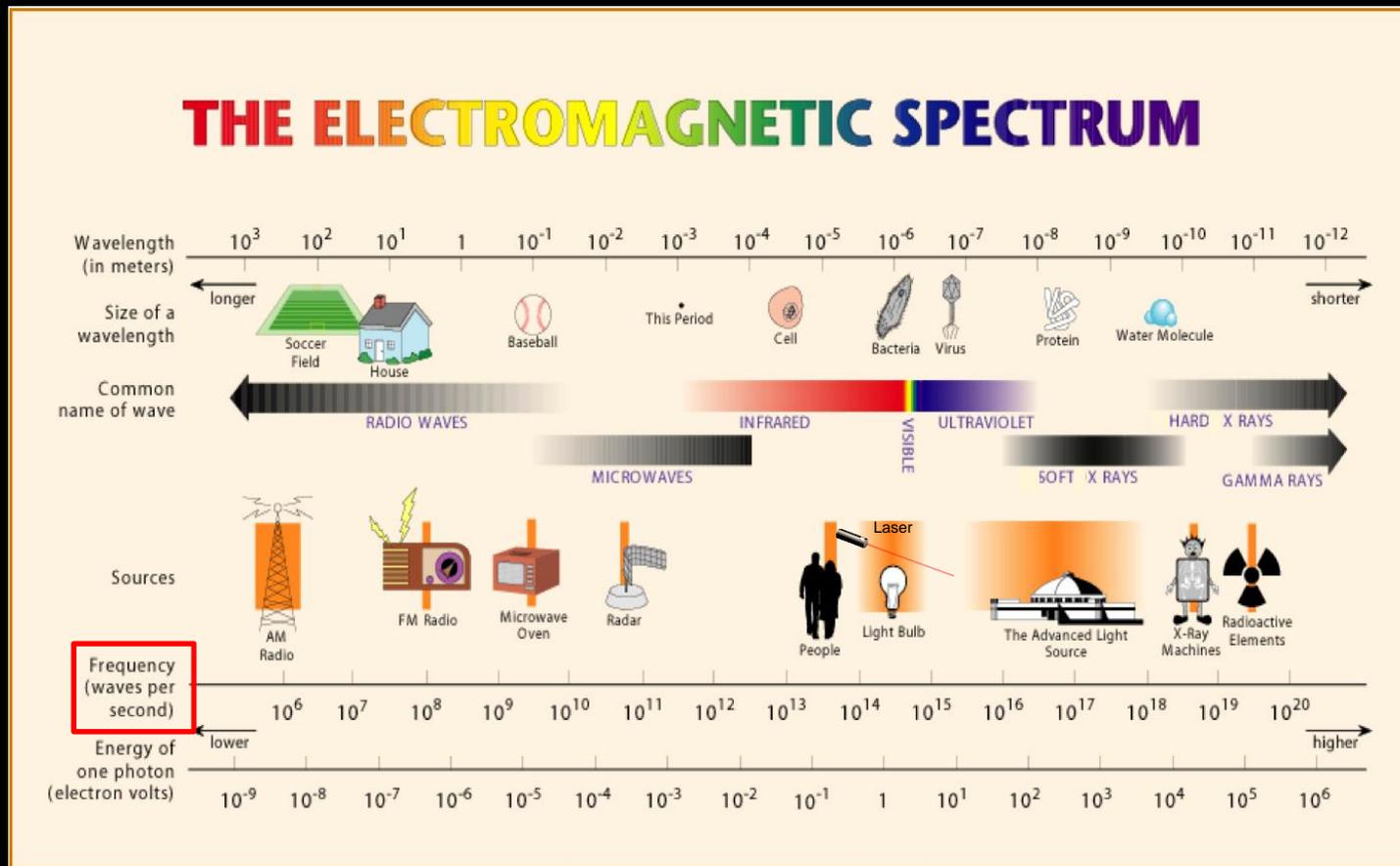
XVIII<sup>e</sup>



Herschel 1800  
IR



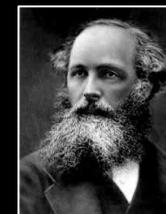
Ritter 1801  
UV



Young 1801  
Ondes



Fresnel 1815  
Opt. Ondul.



Maxwell 1861  
Ondes EM



Hertz 1887  
Radio ; PE



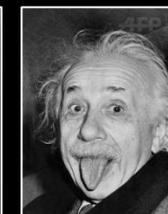
Röntgen 1895  
RX



Laue 1912  
Diffraction



Planck 1900



Einstein 1905

Rayons  
thermiques



Rayons  
chimiques

$$E = h\nu$$

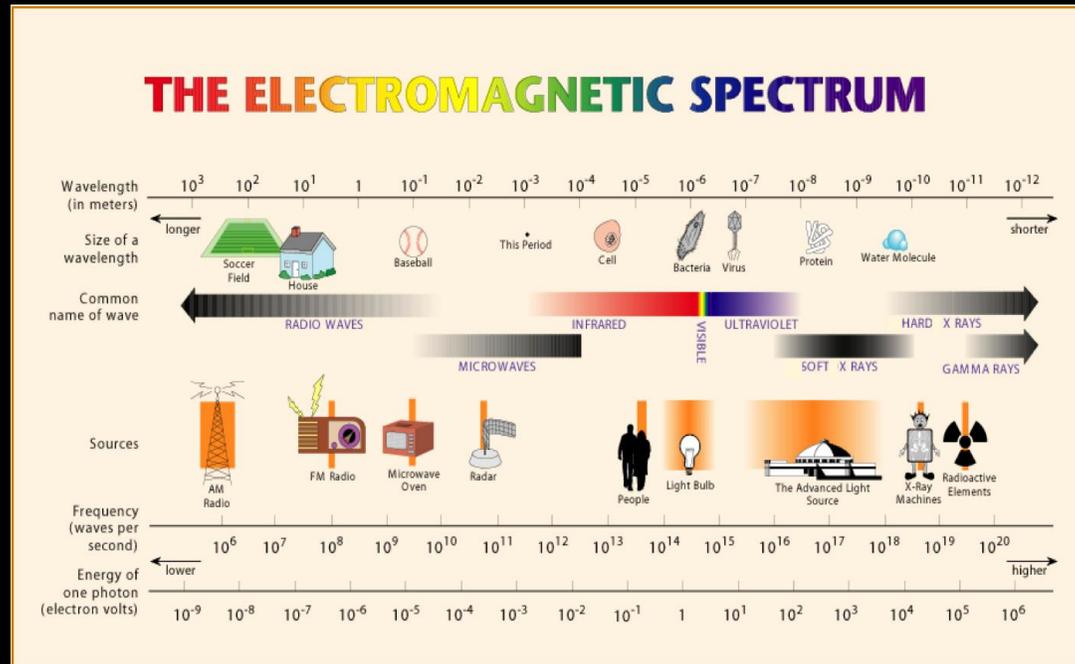
# Une onde et un corpuscule



1773-1829

1788-1827

~ 1800



Les ondes sont caractérisées par leur :

Fréquence  $\nu$  (Hz), longueur d'onde  $\lambda$  ds le vide

$$\lambda = \frac{c}{\nu} (\text{Å}, \text{nm}, \mu\text{m})$$

Doivent être utilisées pour la diffusion ou diffraction

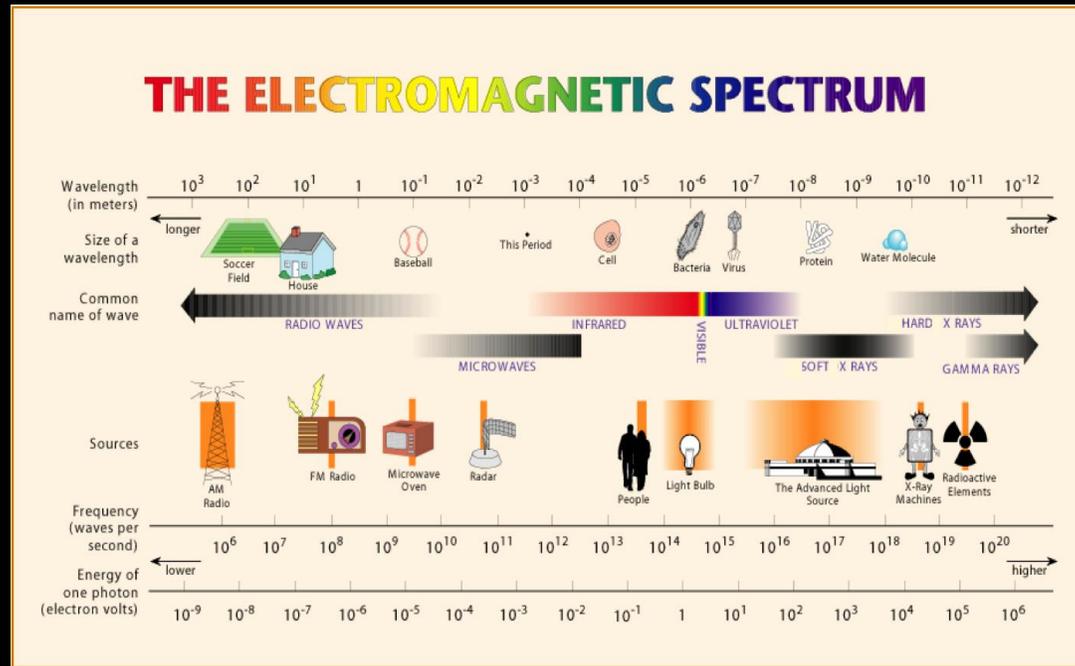
# Une onde et un corpuscule



1773-1829

1788-1827

~ 1800



Les ondes sont caractérisées par leur :



Frequence  $\nu$  (Hz), longueur d'onde ds le vide

$$\lambda = \frac{c}{\nu} (\text{Å}, \text{nm}, \mu\text{m})$$

Doivent être utilisées pour la diffusion ou diffraction

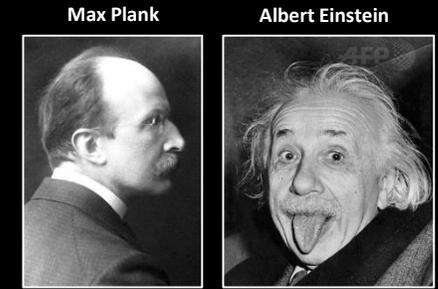
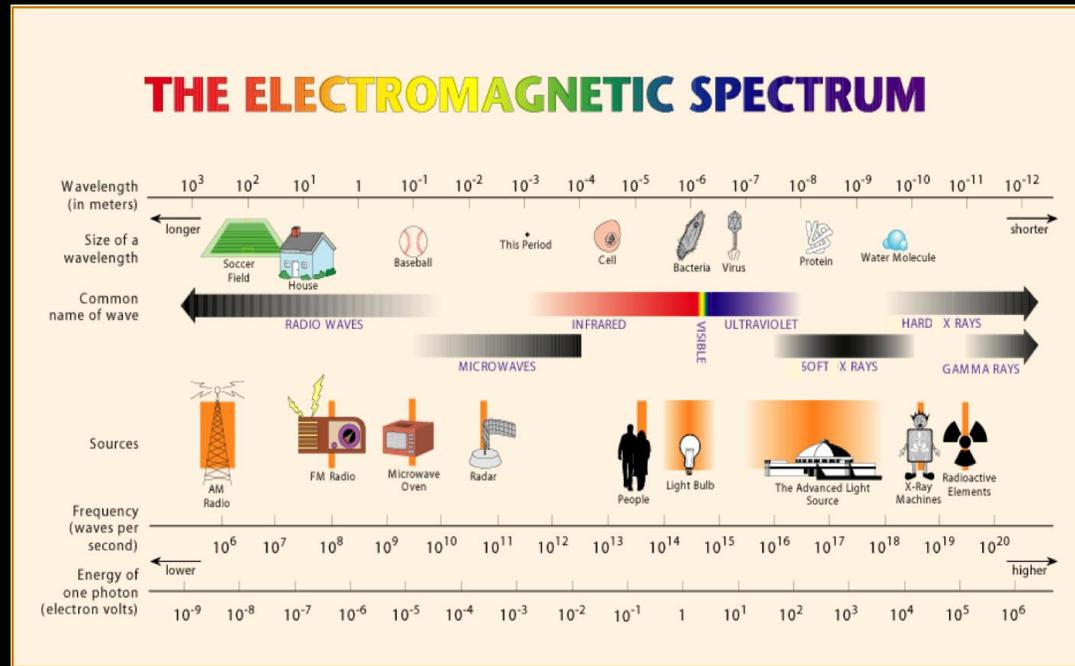
# Une onde et un corpuscule



1773-1829

1788-1827

~ 1800



1858-1947

1879-1955

~ 1900

Les ondes sont caractérisées par leur :



Frequence  $\nu$  (Hz), longueur d'onde ds le vide

$$\lambda = \frac{c}{\nu} (\text{\AA}, \text{nm}, \mu\text{m})$$

Doivent être utilisées pour la diffusion ou diffraction

Photons sont caractérisés par :



Energie  
 $E = h\nu$  (eV)

Doivent être utilisés pour les phénomènes d'absorption

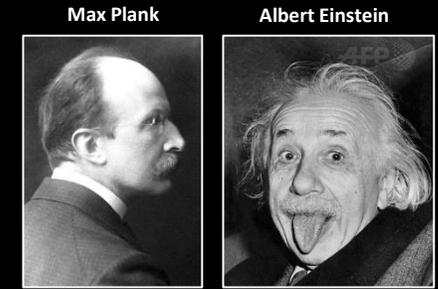
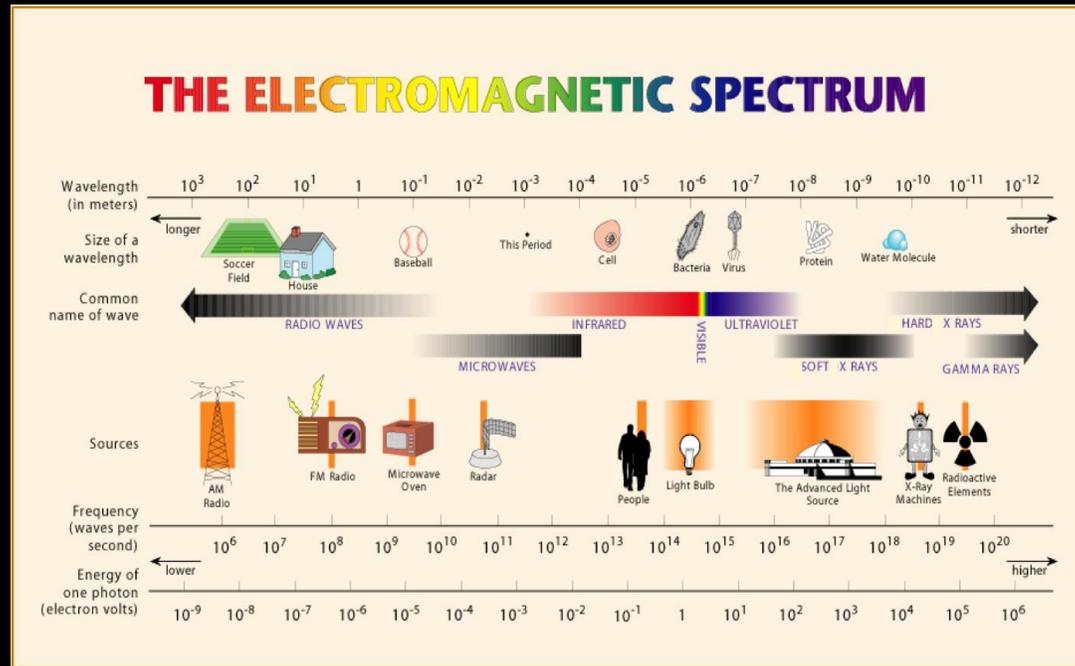
# Une onde et un corpuscule



1773-1829

1788-1827

~ 1800



1858-1947

1879-1955

~ 1900

Les ondes sont caractérisées par leur :



Fréquence  $\nu$  (Hz), longueur d'onde  $\lambda$  ds le vide

$$\lambda = \frac{c}{\nu} (\text{Å}, \text{nm}, \mu\text{m})$$

Doivent être utilisées pour la diffusion ou diffraction

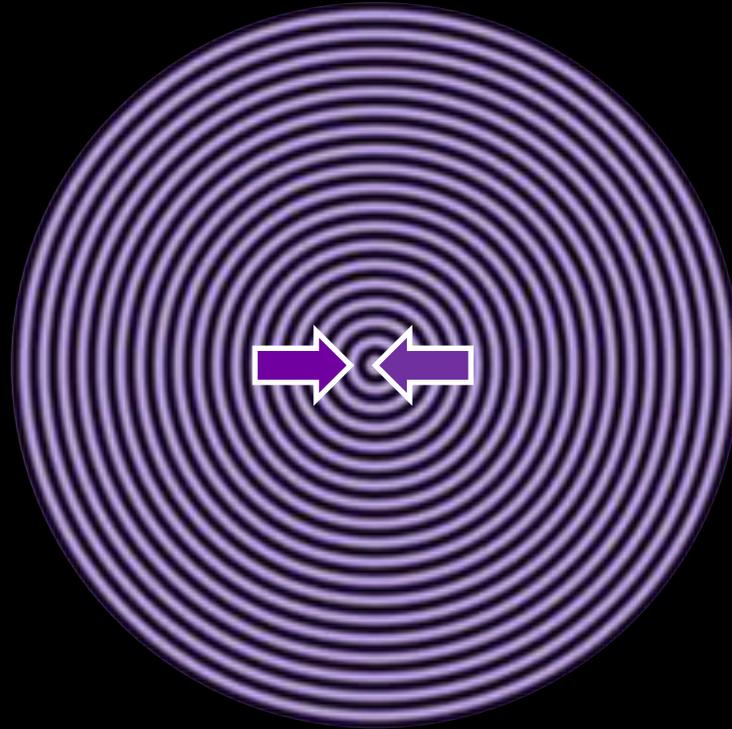
Complémentarité

Photons sont caractérisés par :



Energie  
 $E = h\nu$  (eV)

Doivent être utilisés pour les phénomènes d'absorption

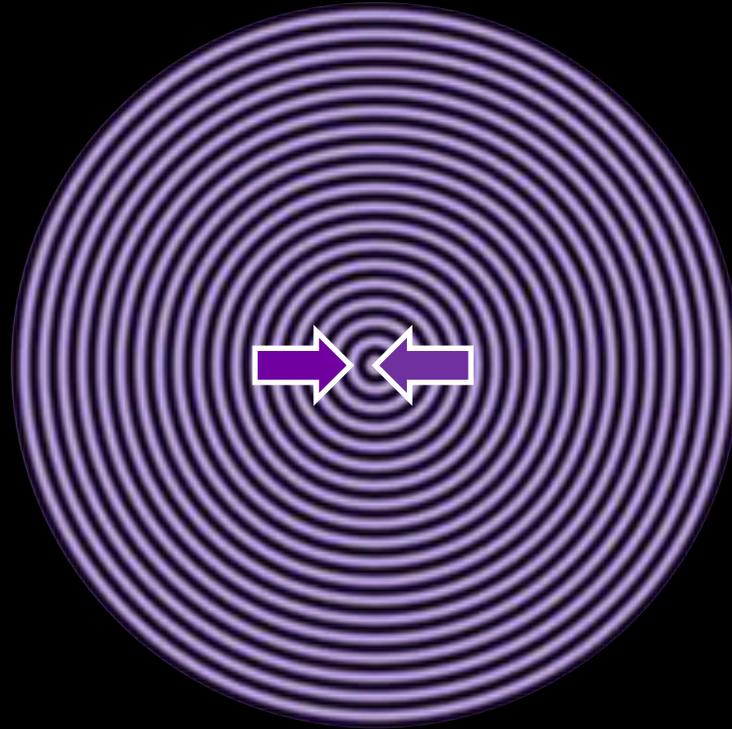


## Longueur d'onde

Infra-rouge L : 350  $\mu\text{m}$  ; M : 40  $\mu\text{m}$  ; P : 2,5  $\mu\text{m}$  ; Visible : 700 nm à 400 nm ; UV : 100-400 nm ; XUV : 10 nm ; RX : 0,1-1 nm

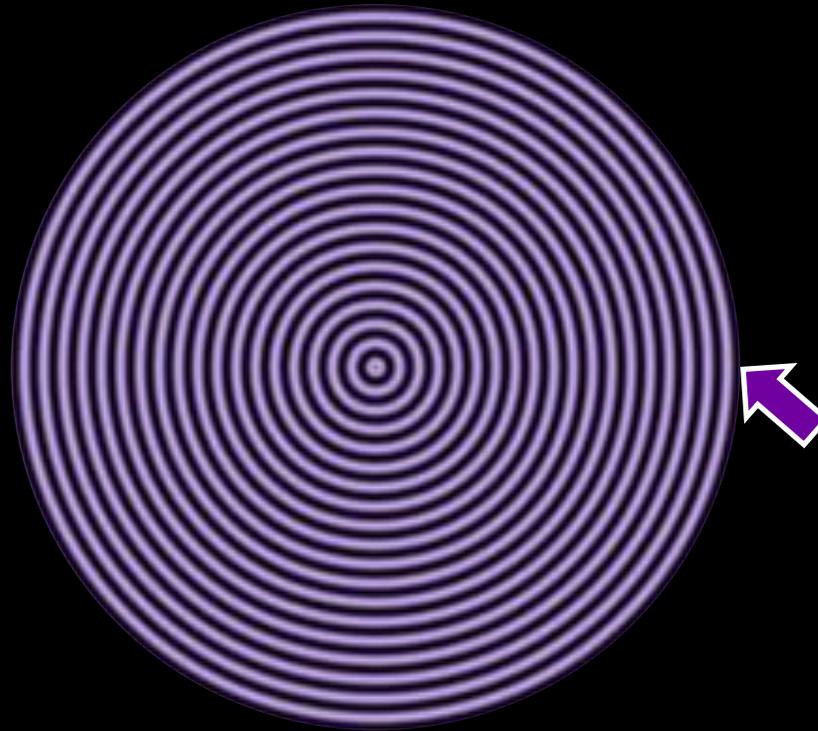
**Vecteur d'onde :**

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



**Longueur d'onde**

**Infra-rouge L : 350  $\mu\text{m}$  ; M : 40  $\mu\text{m}$  ; P : 2,5  $\mu\text{m}$  ; Visible : 700 nm à 400 nm ; UV : 100-400 nm ; XUV : 10 nm ; RX : 0,1-1 nm**

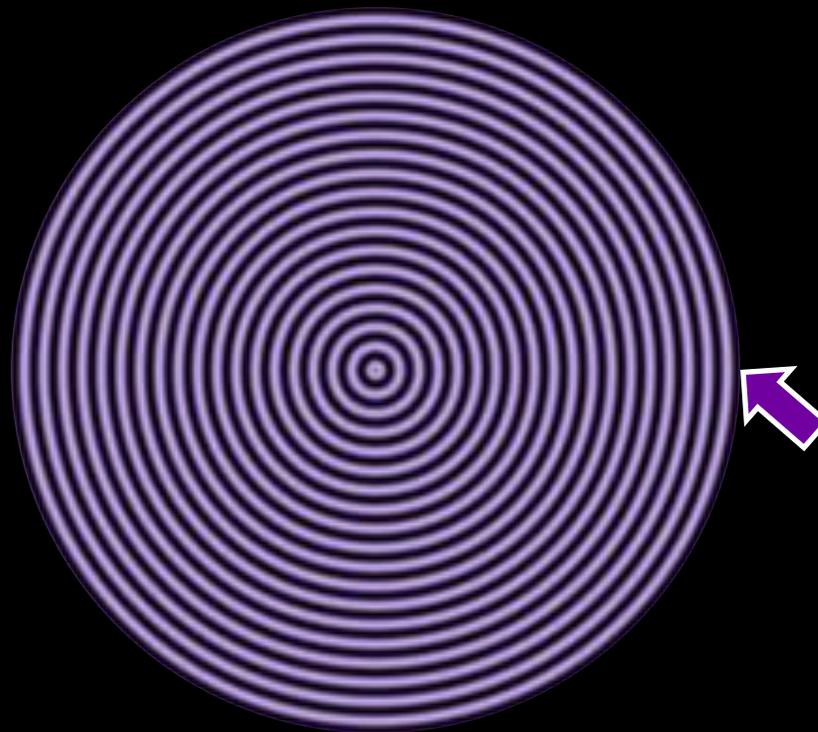


## Fréquence $\nu$

Infra-rouge L : 800 GHz ; M : 120 THz ; P : 430 THz ; Visible : 400 à 750 THz ; UV : 750-3000 THz ; XUV :  $10^{16}$  Hz ; RX :  $10^{18}$  Hz

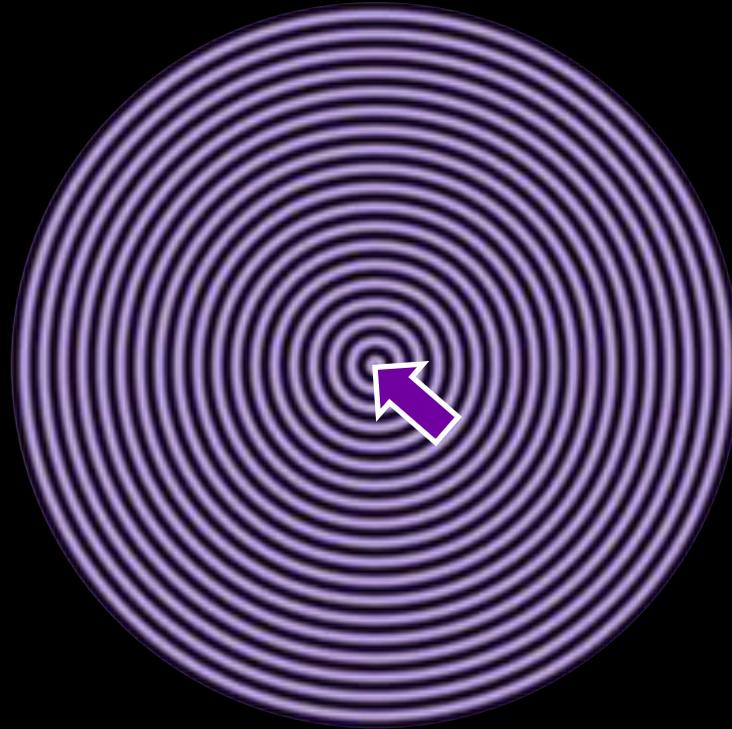
**Pulsation :**

$$\omega = 2\pi\nu$$



**Fréquence  $\nu$**

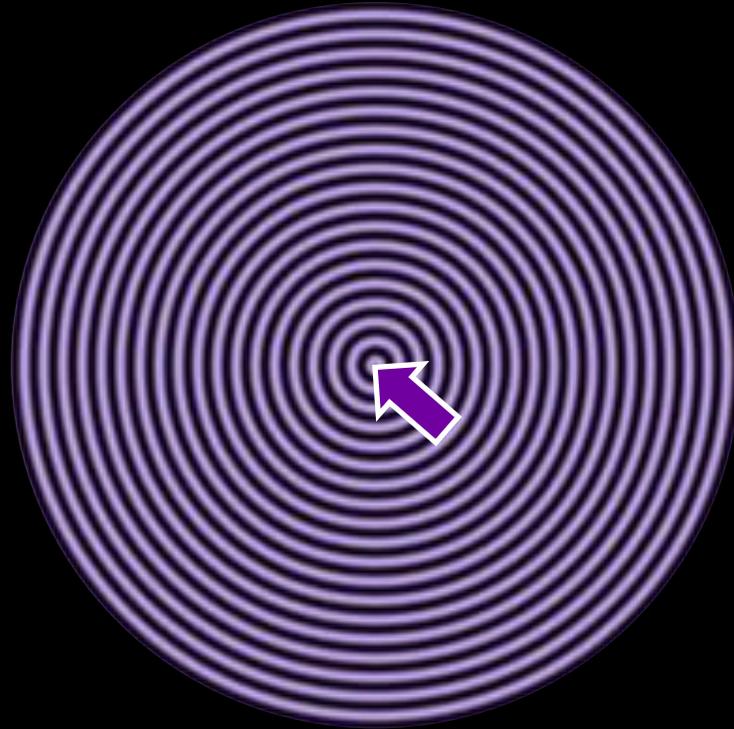
**Infra-rouge L : 800 GHz ; M : 120 THz ; P : 430 THz ; Visible : 400 à 750 THz ; UV : 750-3000 THz ; XUV :  $10^{16}$  Hz ; RX :  $10^{18}$  Hz**



**Vitesse (de phase)**

**Lumière :  $c = 299\,792\,458$  m/s**

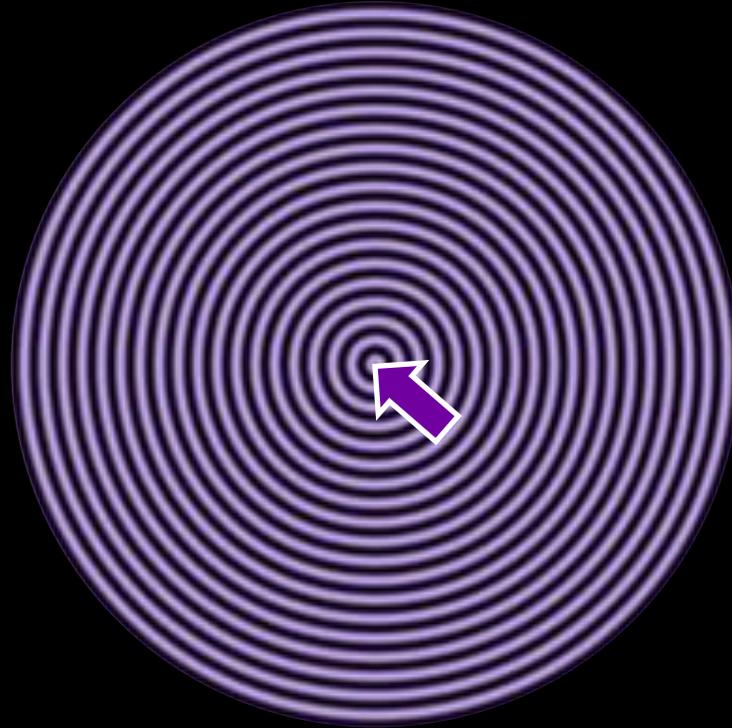
$$\omega = kv_{ph}$$



**Vitesse (de phase)**

Lumière :  $c = 299\,792\,458$  m/s

$$\omega = kv_{ph}$$



$$\lambda = \frac{v_{ph}}{\nu}$$

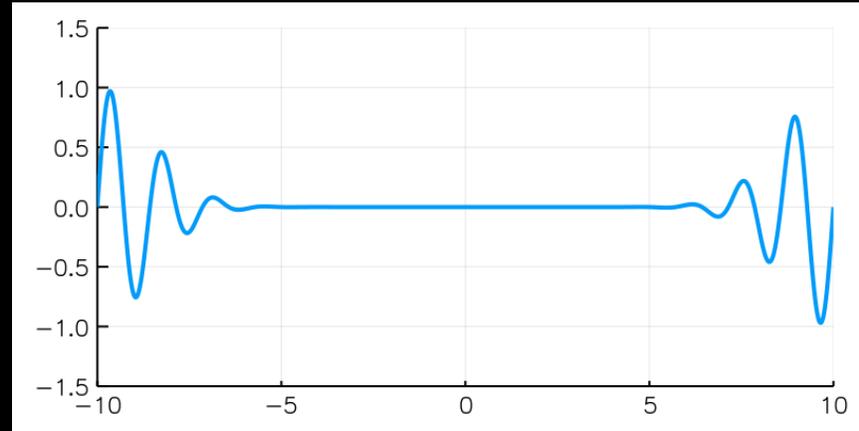
**Vitesse (de phase)**

Lumière :  $c = 299\,792\,458$  m/s

# Vitesse de phase – vitesse de groupe

1839 W. R. Hamilton : « vitesse à laquelle la lumière conquiert l'obscurité »

G. Stokes (1876) Lord Rayleigh (1877)

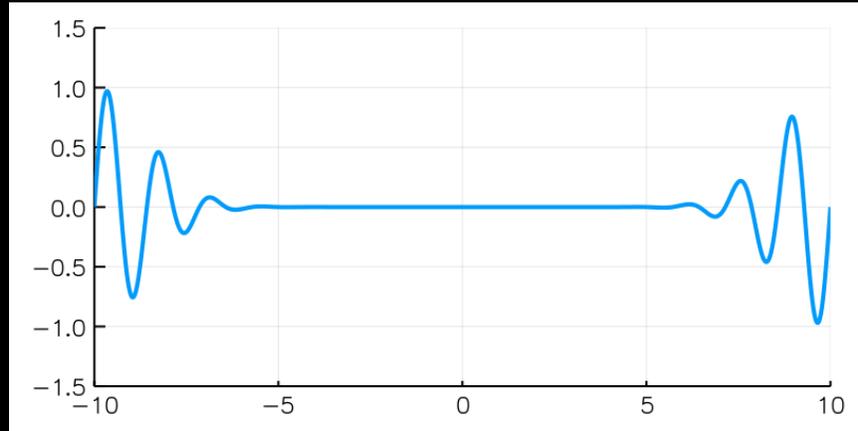


$$E = E_0 \cos(\omega t - kz)$$

# Vitesse de phase – vitesse de groupe

1839 W. R. Hamilton : « vitesse à laquelle la lumière conquiert l'obscurité »

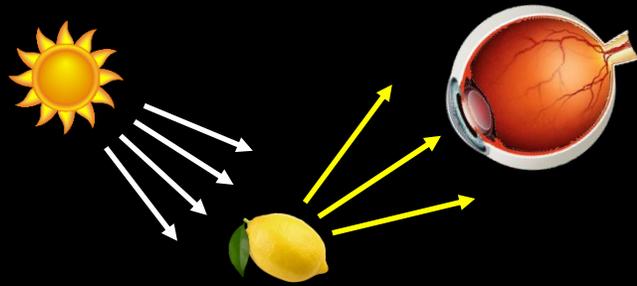
G. Stokes (1876) Lord Rayleigh (1877)



$$E = E_0 \cos(\omega t - kz)$$

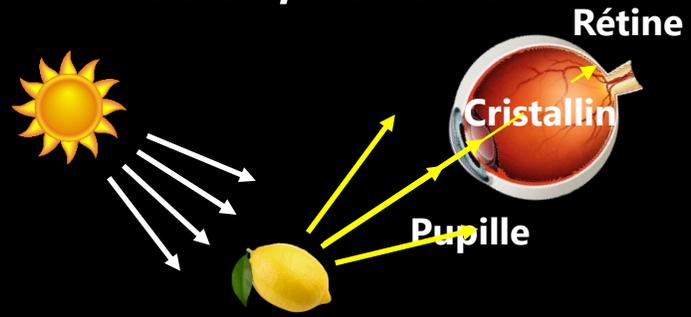
$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

## Diffusion, Réflexion



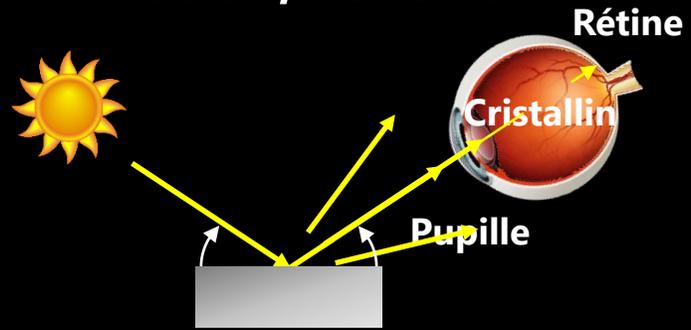
**Kepler (1610)**

# Diffusion, Réflexion



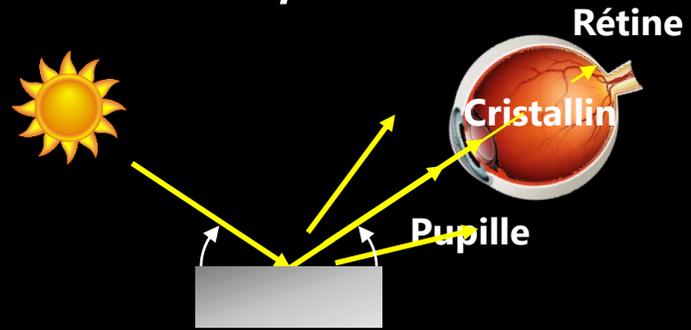
**Kepler (1610)**

# Diffusion, Réflexion



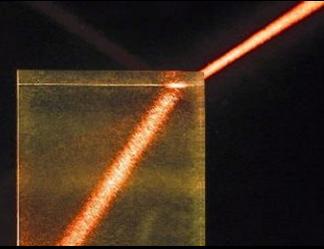
**Kepler (1610)**

## Diffusion, Réflexion

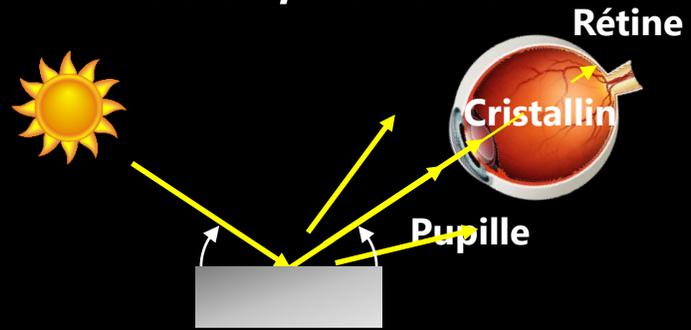


**Kepler (1610)**

## Réfraction

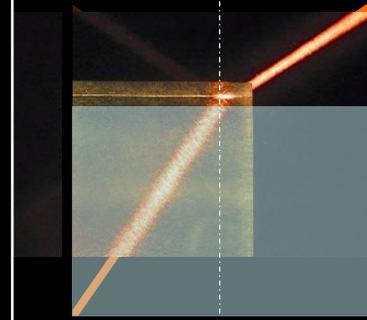


## Diffusion, Réflexion

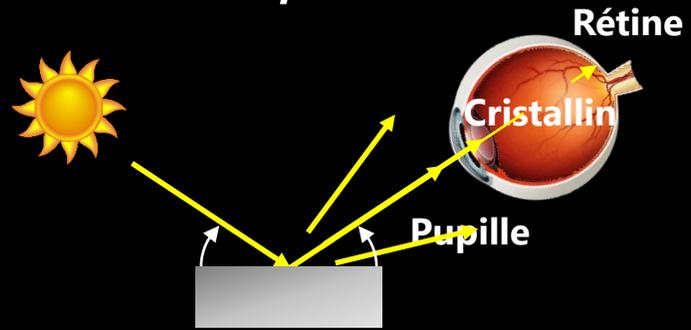


Kepler (1610)

## Réfraction

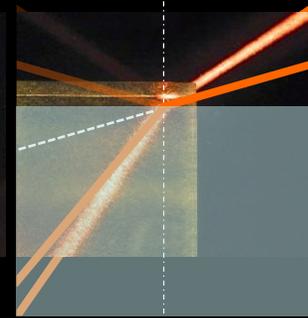


## Diffusion, Réflexion

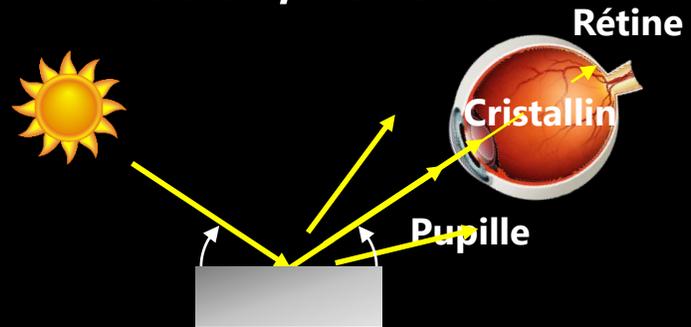


**Kepler (1610)**

## Réfraction

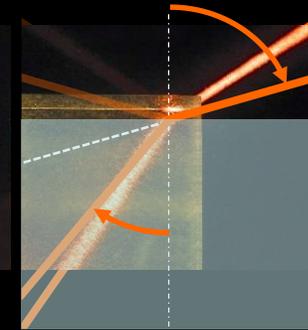


## Diffusion, Réflexion



**Kepler (1610)**

## Réfraction

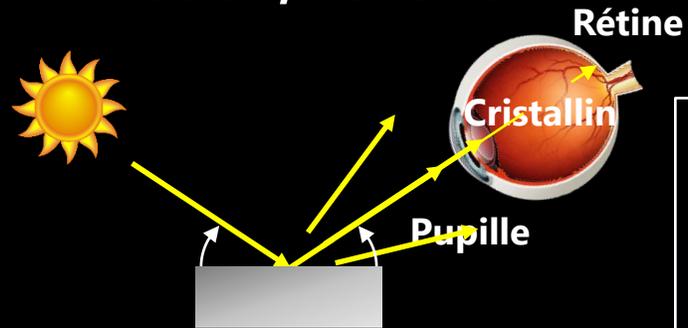


Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

$$\sin \theta = n \sin \theta_r$$

## Diffusion, Réflexion



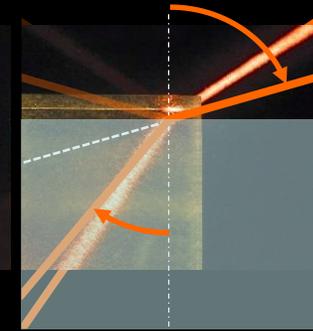
**Kepler (1610)**

## Dispersion



**Newton (1666)**

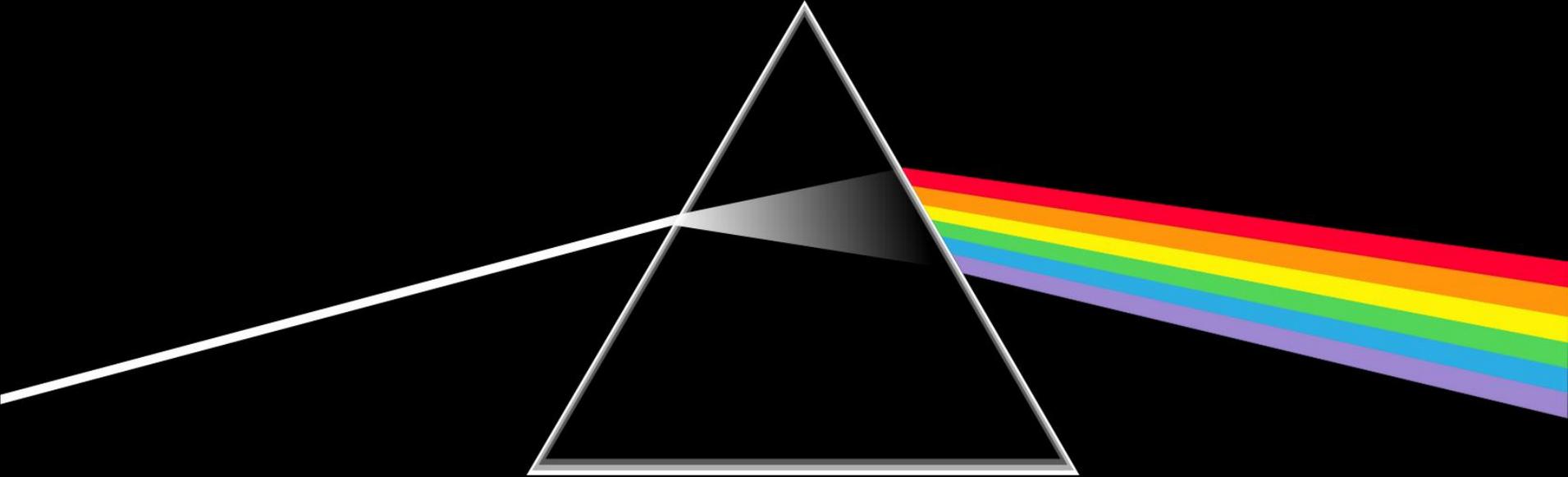
## Réfraction

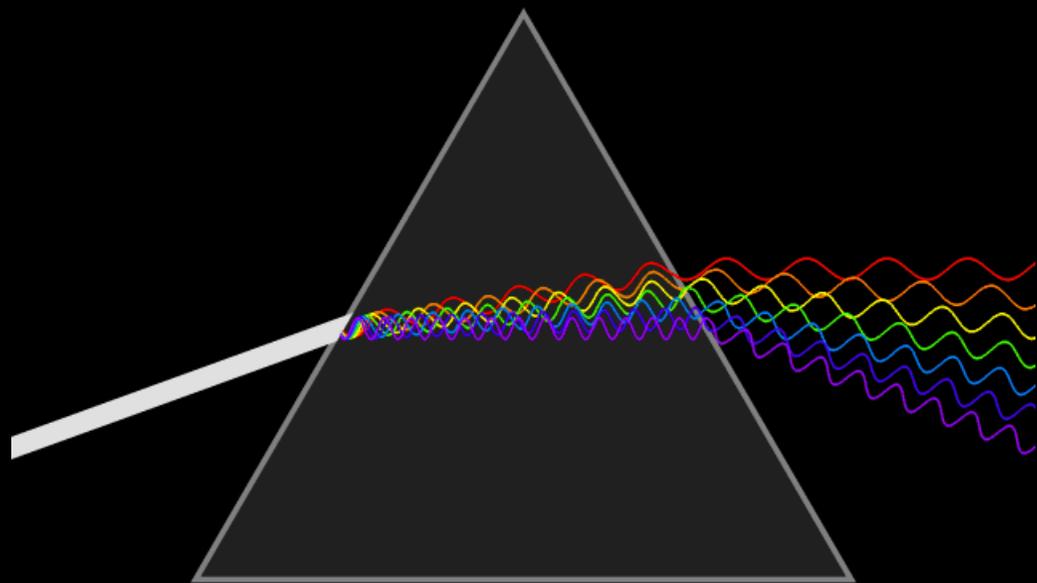


Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

$$\sin \theta = n \sin \theta_r$$





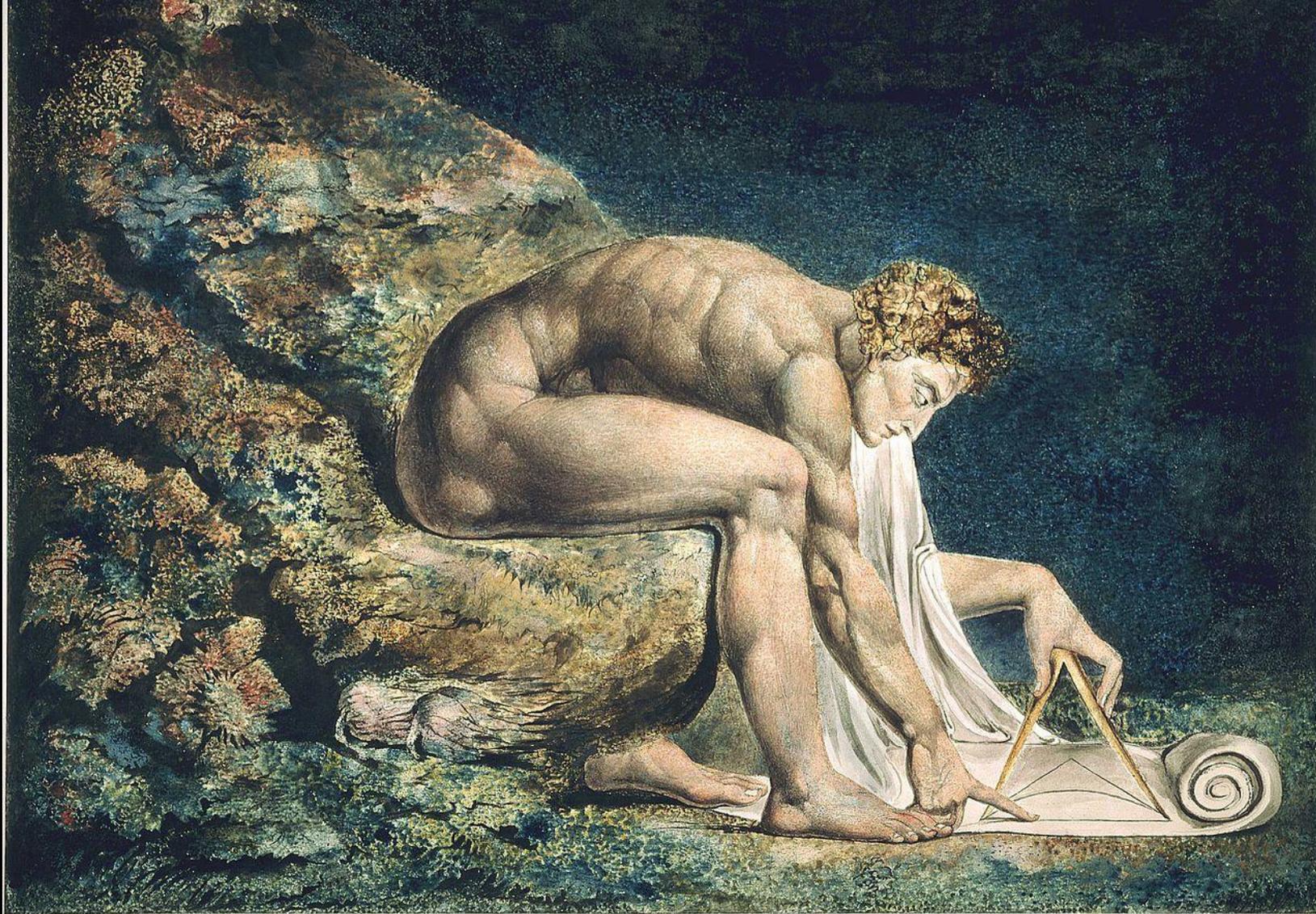




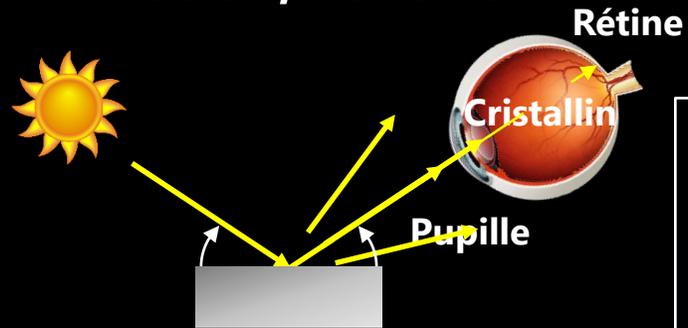
**Newton (1795-1805)**

**William Blake (1757-1827)**

**“Art is the Tree of life  
Science is the Tree of Death”**



## Diffusion, Réflexion



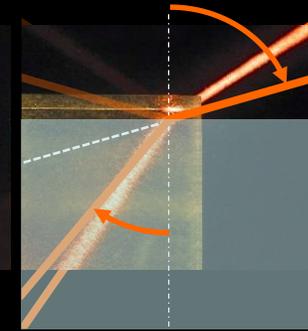
**Kepler (1610)**

## Dispersion



**Newton (1666)**

## Réfraction



Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

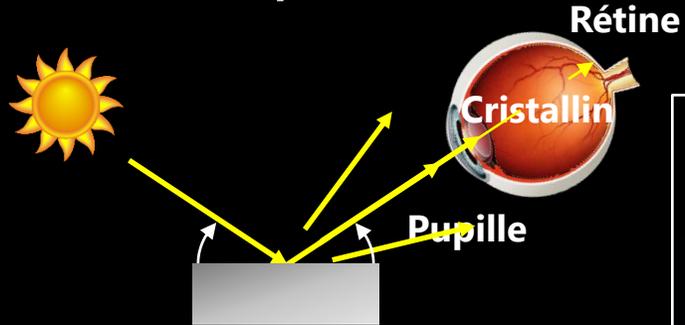
$$\sin \theta = n \sin \theta_r$$

## Biréfringence



**Bartholin (1669)**

## Diffusion, Réflexion



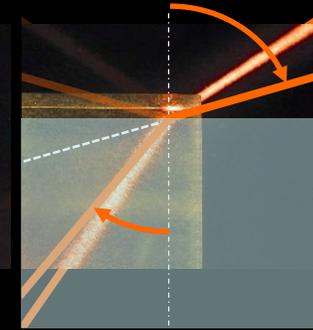
**Kepler (1610)**

## Dispersion



**Newton (1666)**

## Réfraction



Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

$$\sin \theta = n \sin \theta_r$$

## Biréfringence



**Bartholin (1669)**

## Vitesse

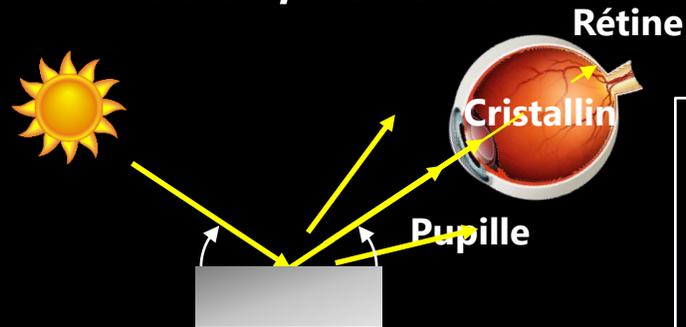
**299 792 458 m/s**

Son : 340 m/s



**Römer (1676)**

## Diffusion, Réflexion



Kepler (1610)

## Dispersion



Newton (1666)



## Biréfringence



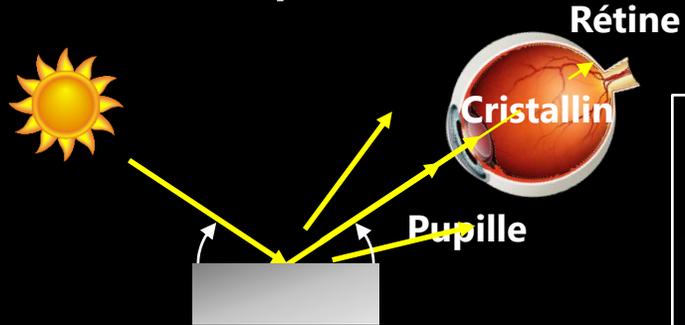
Bartholin (1669)

1967 : **Seconde** définie fréquence transition hyperfine du  $^{133}\text{Cs}$  à 9,192 631 770 GHz (à  $10^{-14}$ )

1983 : **Mètre** défini par La vitesse de la lumière  $c$ , fixée à 299 792 458 m/s :

2019 : **kg, A, K, Mol, cd**  
Définis en fixant :  $h, e, k, N, K_{cd}$

## Diffusion, Réflexion



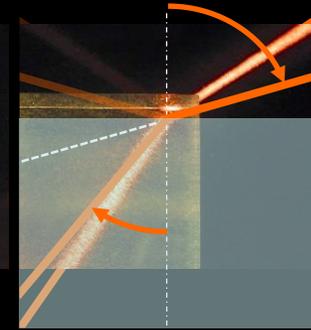
**Kepler (1610)**

## Dispersion



**Newton (1666)**

## Réfraction



Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

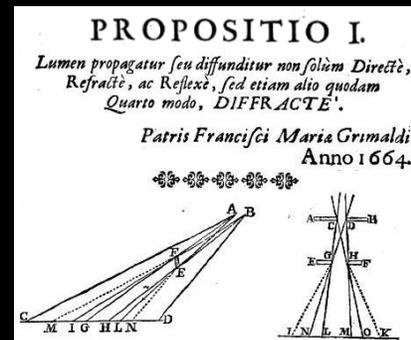
$$\sin \theta = n \sin \theta_r$$

## Biréfringence



**Bartholin (1669)**

## Diffraction



**Grimaldi (1664)**

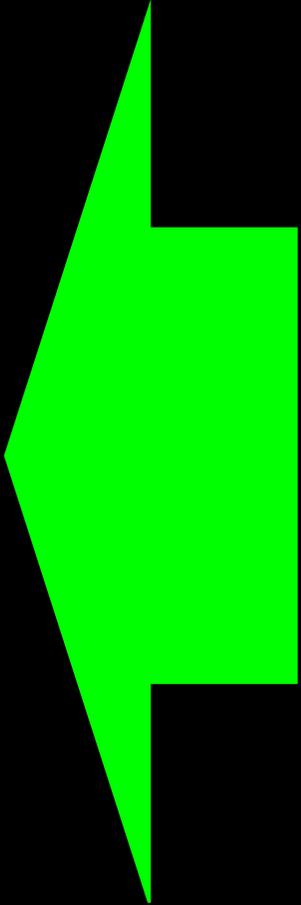
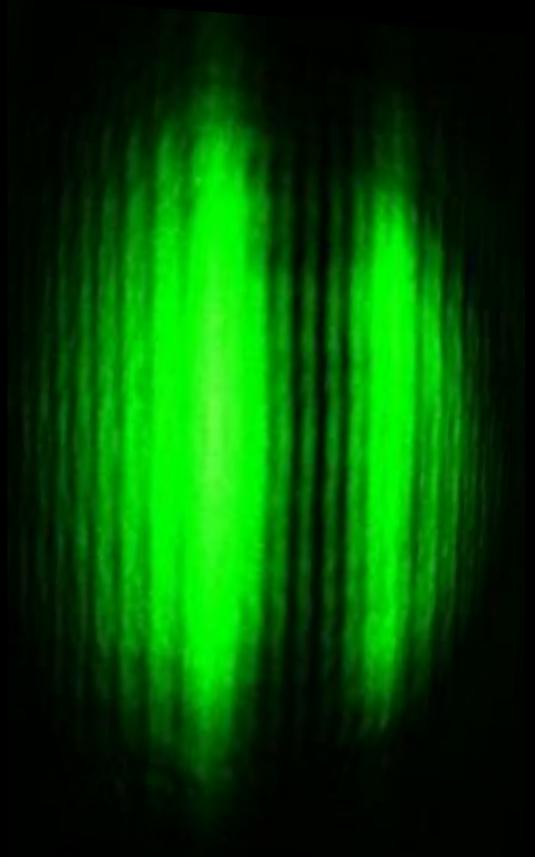
## Vitesse

**299 792 458 m/s**

**Son : 340 m/s**



**Römer (1676)**



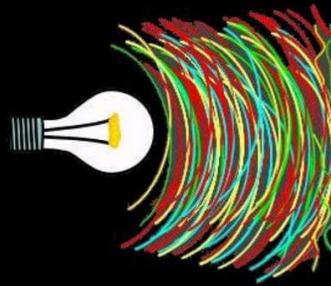
# Il manque...

**La polarisation**



**É. L. Malus 1809**

**La cohérence**



**É. Verdet 1865**

**L'absorption EP**



**H. Hertz 1887**

# Christiaan Huygens

## 1629-1695

Fils de Suzanna van Baerle et **Constantijn Huygens**  
Homme d'état, poète, compositeur,

Ami de Rembrandt, Descartes, secrétaire des *Stadtholder*



1652 : Règles du choc (q<sup>té</sup> de mvt)

1655 : Découvre les **anneaux de Saturne**  
et le satellite Titan

1658 : Découvre le pendule isochrone

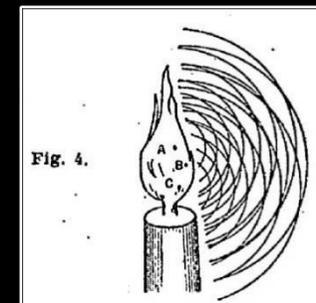
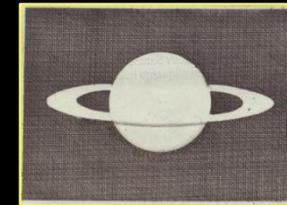
1666-1681 : à 37 ans, il rejoint **l'Académie des sciences**

1673 : Avec Denis Papin : moteur à explosion

**1678 : Traité de la lumière**

Dans lequel il explore le concept d'onde lumineuse.

1681 : Rentre à La Haye (révocation de l'Edit de Nantes)



# Christiaan Huygens

## 1629-1695

Fils de Suzanna van Baerle et **Constantijn Huygens**  
Homme d'état, poète, compositeur,

Ami de Rembrandt, Descartes, secrétaire des *Stadtholder*



1652 : Règles du choc (q<sup>té</sup> de mvt)

1655 : Découvre les **anneaux de Saturne**  
et le satellite Titan

1658 : Découvre le pendule isochrone

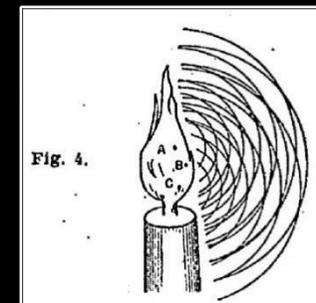
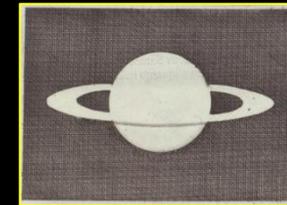
1666-1681 : à 37 ans, il rejoint **l'Académie des sciences**

1673 : Avec Denis Papin : moteur à explosion

**1678 : Traité de la lumière**

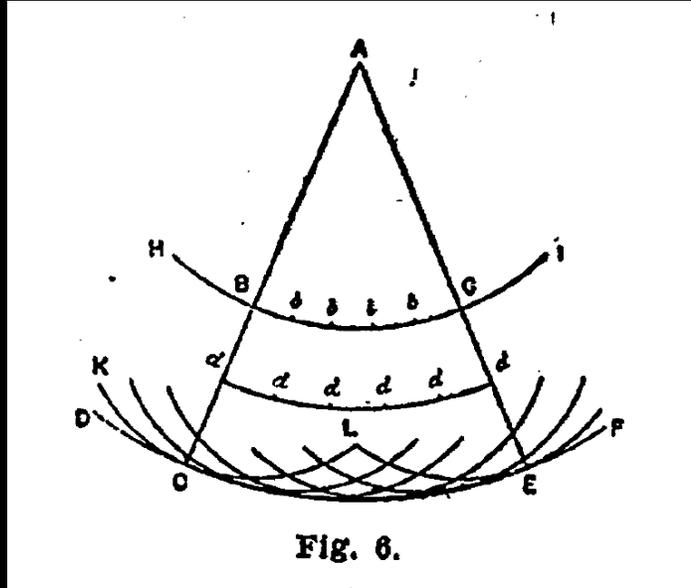
Dans lequel il explore le concept d'onde lumineuse.

1681 : Rentre à La Haye (révocation de l'Edit de Nantes)



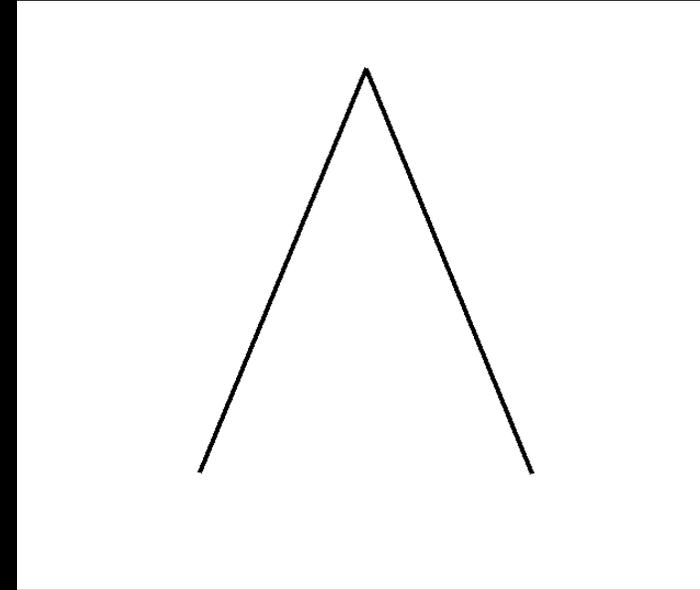
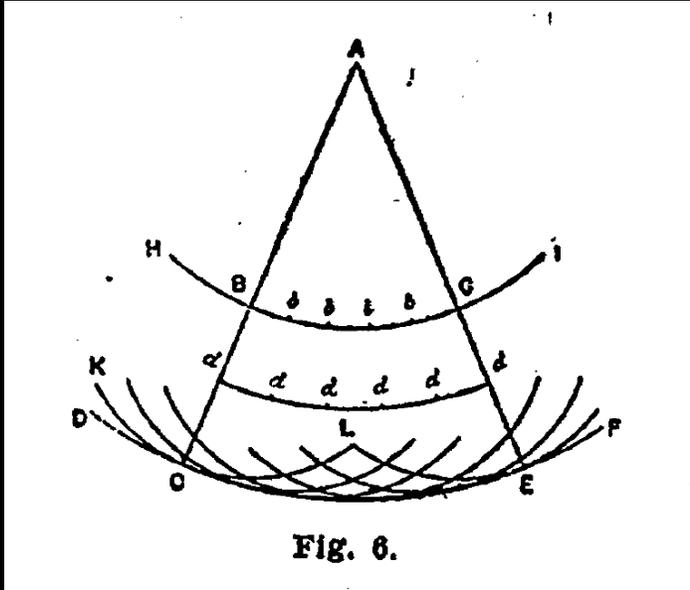
# Le principe d'Huygens et l'æther

Huygens ne s'intéresse qu'au front d'onde



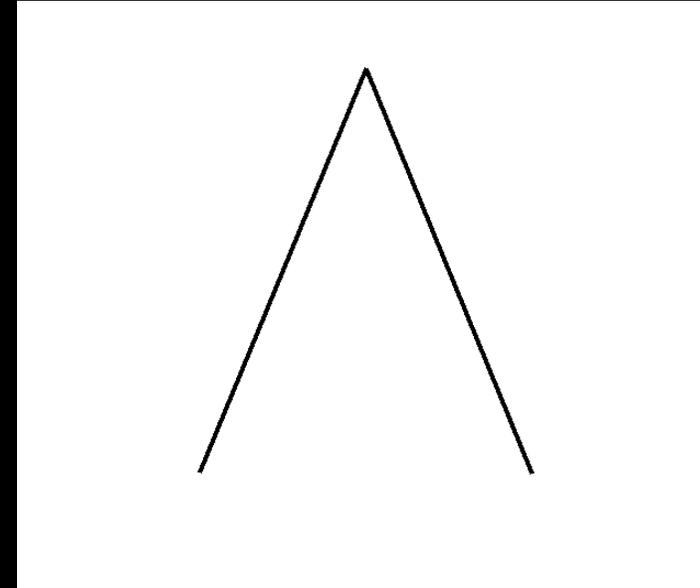
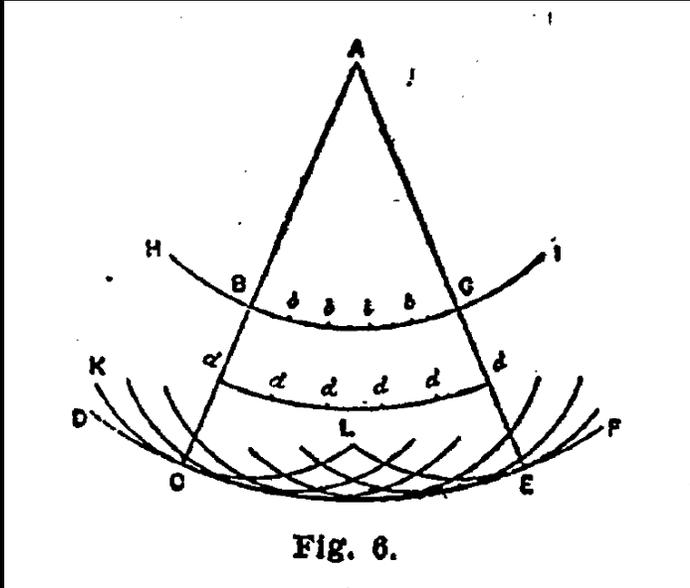
# Le principe d'Huygens et l'æther

Huygens ne s'intéresse qu'au front d'onde



# Le principe d'Huygens et l'æther

Huygens ne s'intéresse qu'au front d'onde

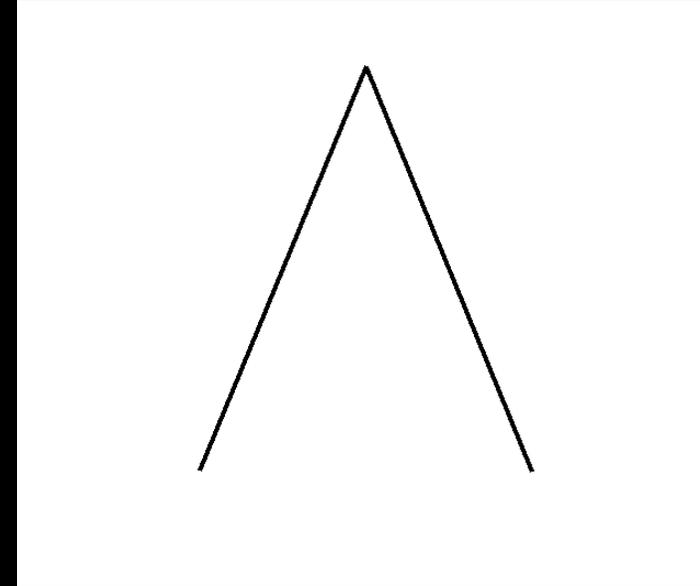
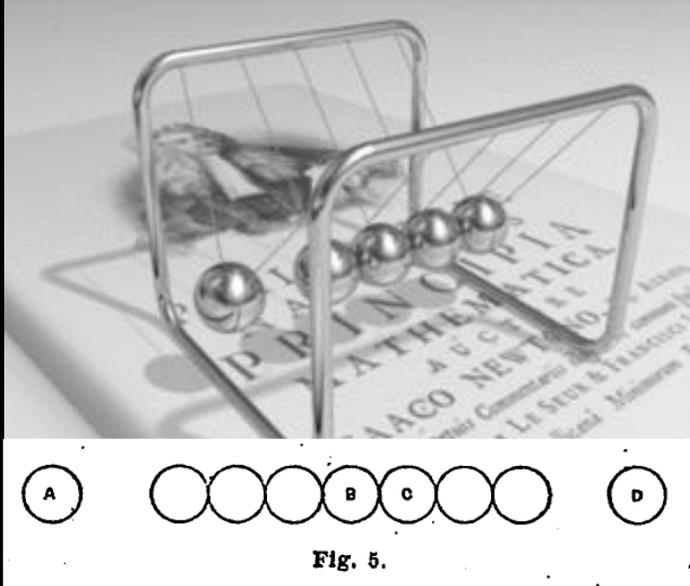


Les vagues se propagent sur l'eau,  
Le son se propage dans l'air,  
La lumière se propage sur...

la matière éthérée, l'éther lumineux ou l'æther

# Le principe d'Huygens et l'æther

Huygens ne s'intéresse qu'au front d'onde

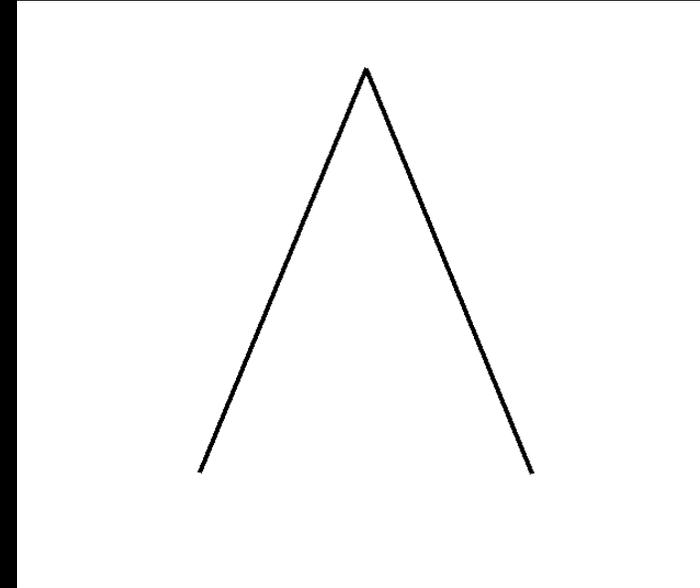
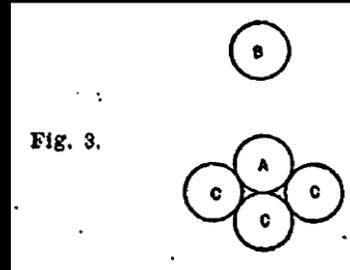
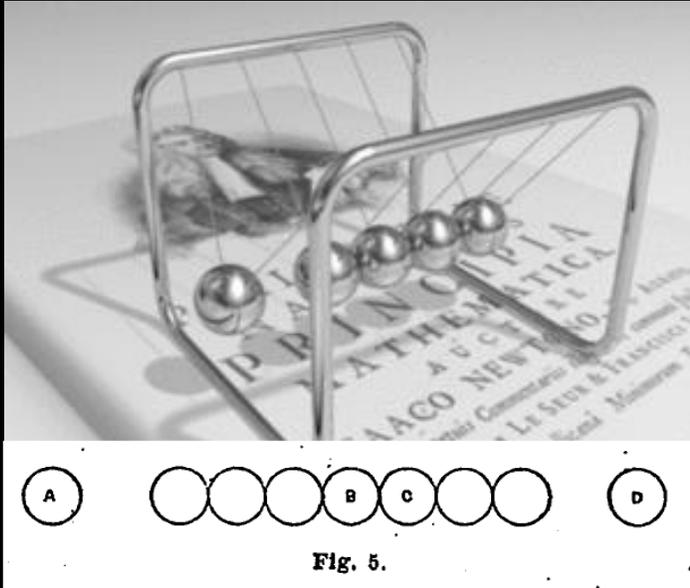


Les vagues se propagent sur l'eau,  
Le son se propage dans l'air,  
La lumière se propage sur...

la matière éthérée, l'éther lumineux ou l'æther

# Le principe d'Huygens et l'æther

Huygens ne s'intéresse qu'au front d'onde

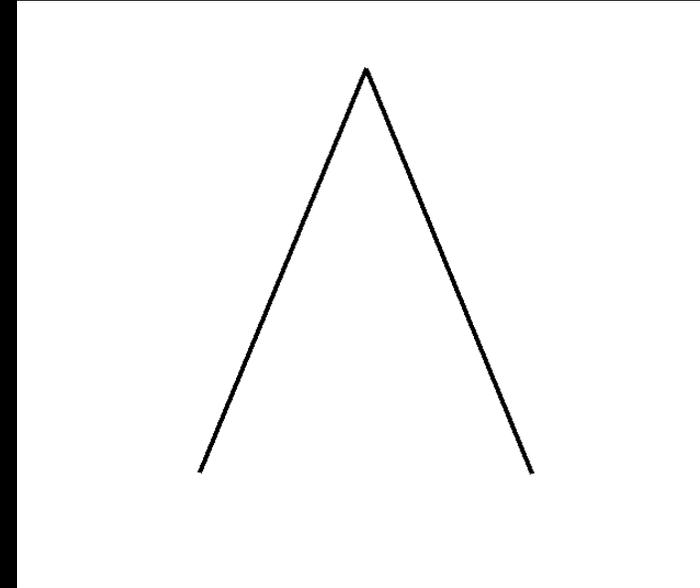
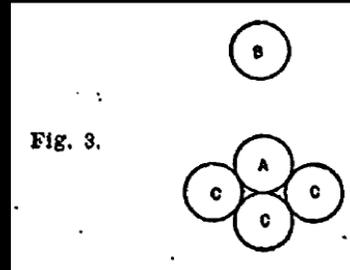
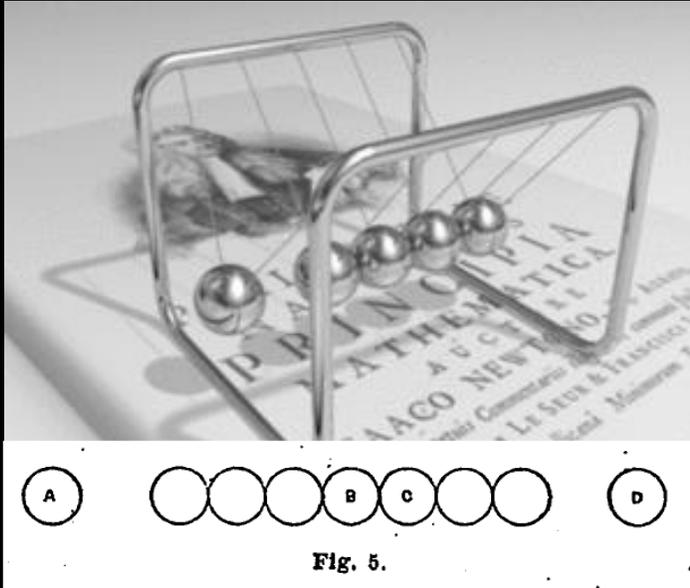


Les vagues se propagent sur l'eau,  
Le son se propage dans l'air,  
La lumière se propage sur...

la matière éthérée, l'éther lumineux ou l'æther

# Le principe d'Huygens et l'æther

Huygens ne s'intéresse qu'au front d'onde

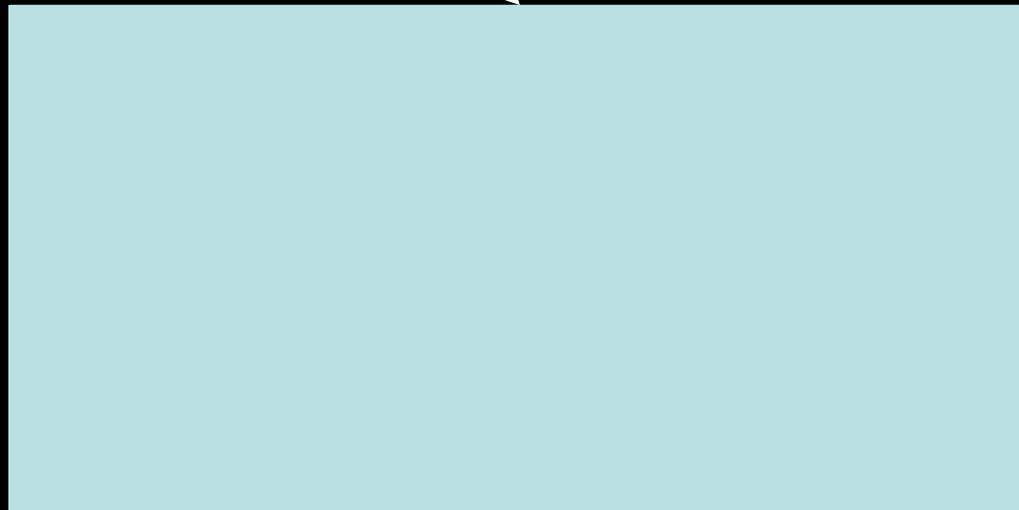
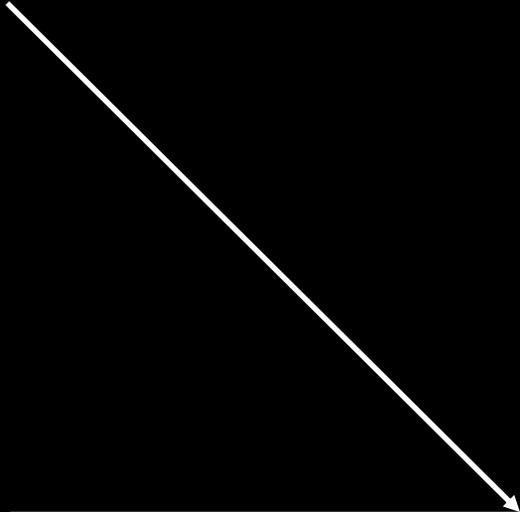


Les vagues se propagent sur l'eau,  
Le son se propage dans l'air,  
La lumière se propage sur...

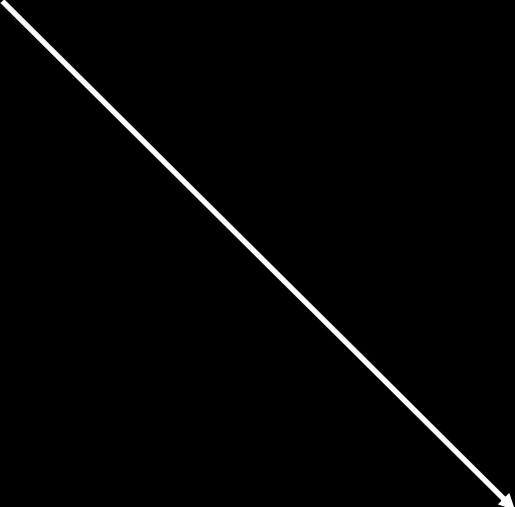
la matière éthérée, l'éther lumineux ou l'æther

Huygens applique son principe à un changement de milieu

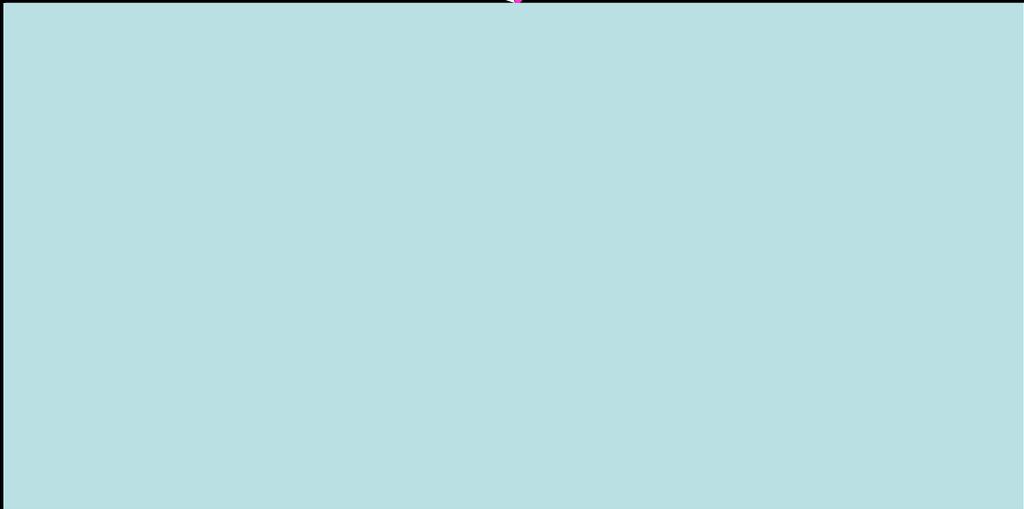
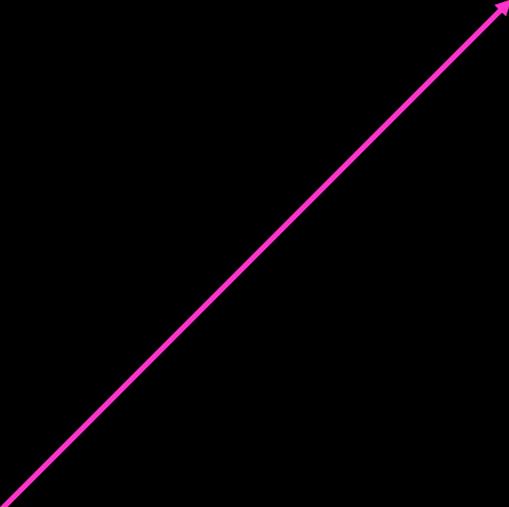
**Onde incidente**



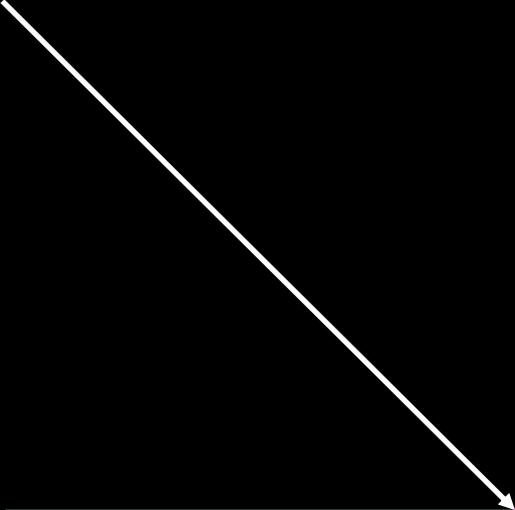
Onde incidente



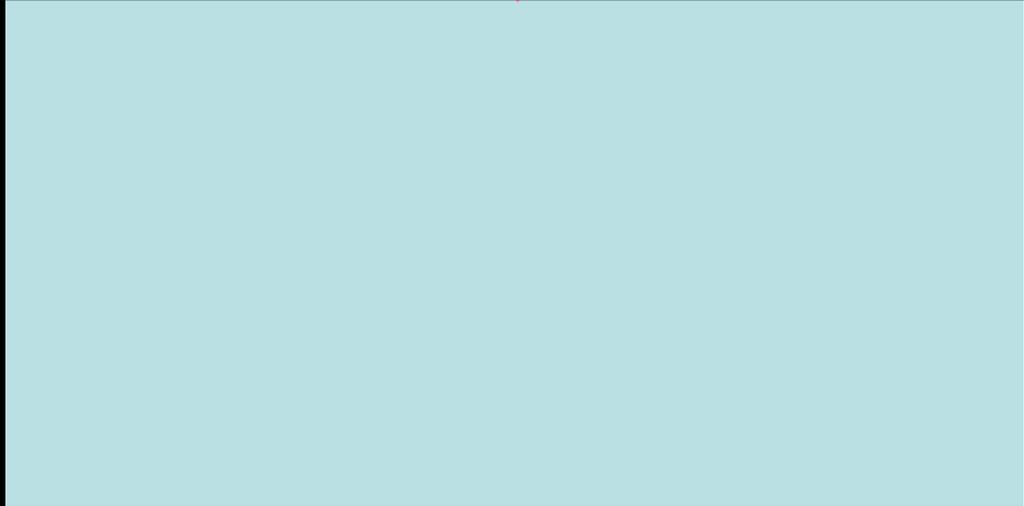
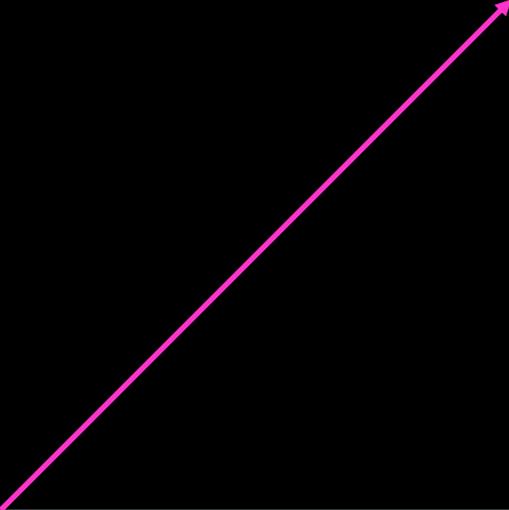
Onde réfléchie



Onde incidente

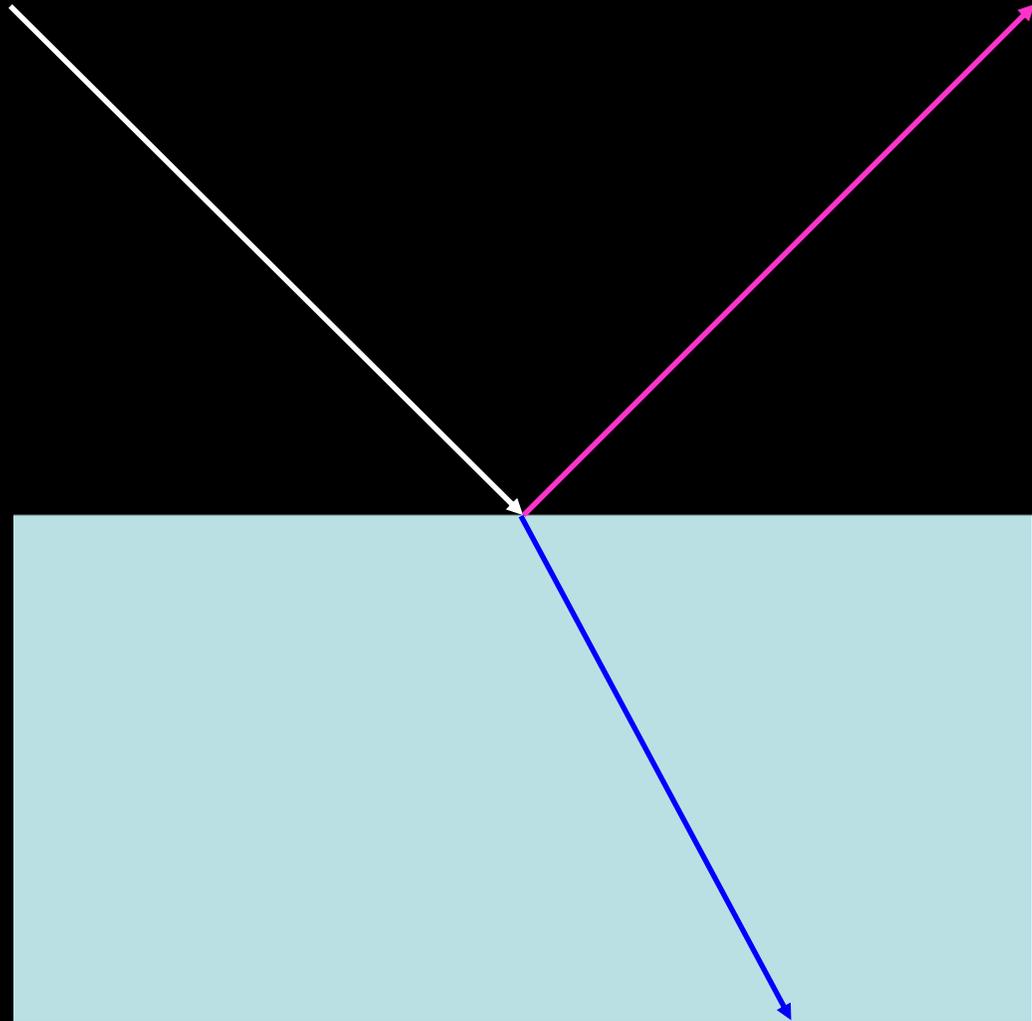


Onde réfléchie



Onde incidente

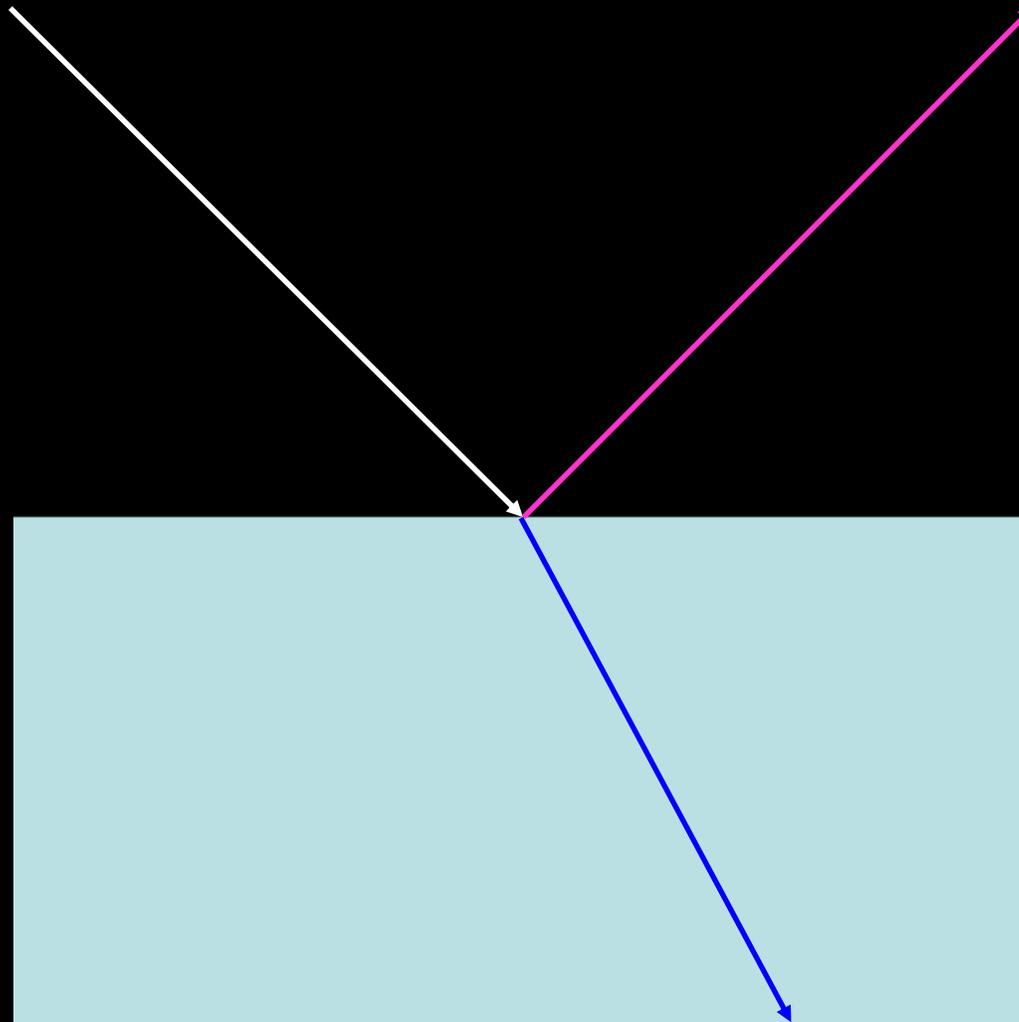
Onde réfléchie



Onde réfractée : changement de vitesse = changement de direction

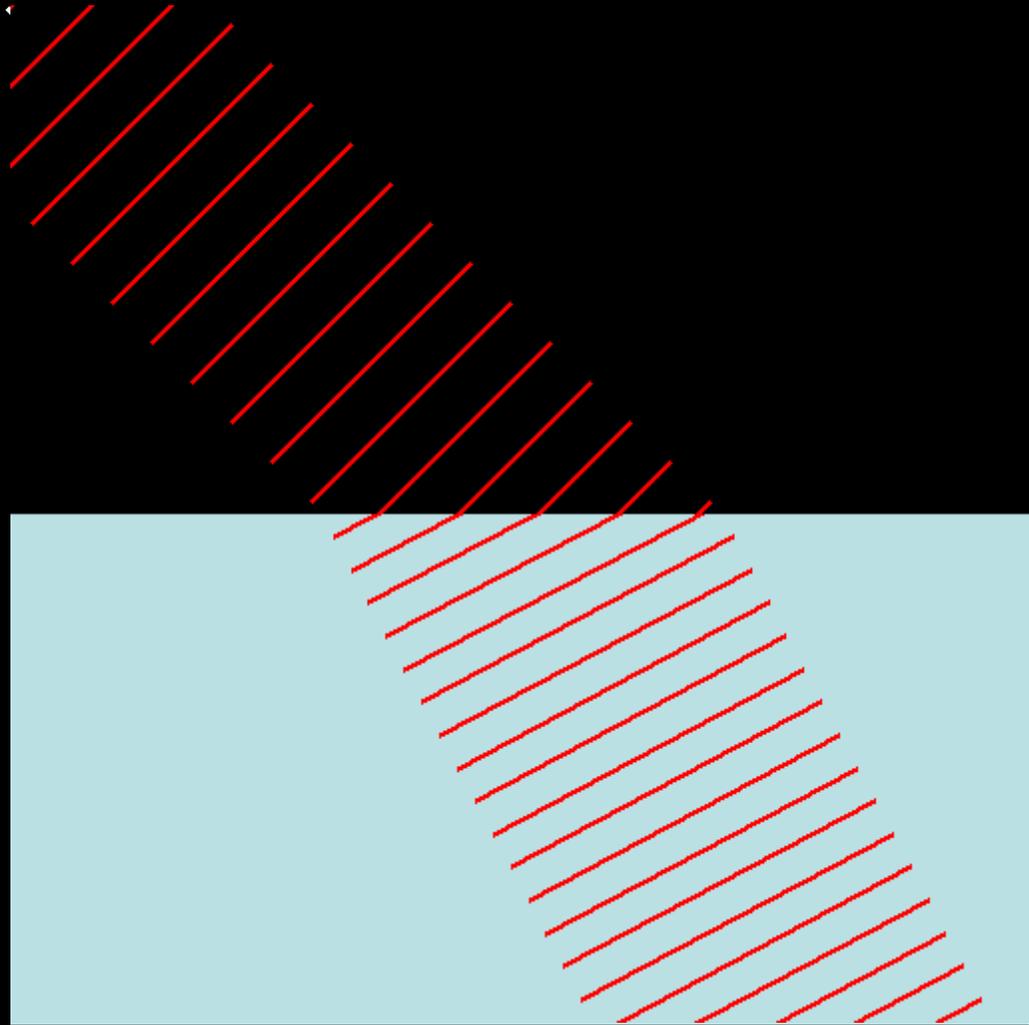
Onde incidente

Onde réfléchie



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

Onde réfractée : changement de vitesse = changement de direction



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

Onde réfractée : changement de vitesse = changement de direction

# Indice de réfraction

$$v_{ph} = \frac{c}{n}$$

# Indice de réfraction

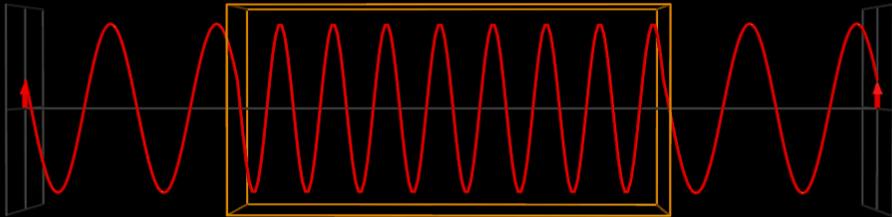
$$v_{ph} = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{k}$$

# Indice de réfraction

$$v_{ph} = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{k}$$

La pulsation  $\omega$  ne varie pas, c'est donc la longueur d'onde qui change

$$E = E_0 \cos(\omega t - nkz)$$

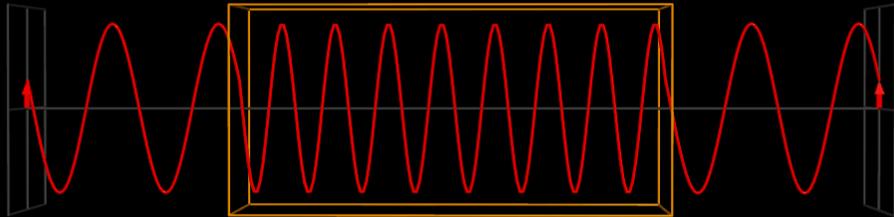


# Indice de réfraction

$$v_{ph} = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{k}$$

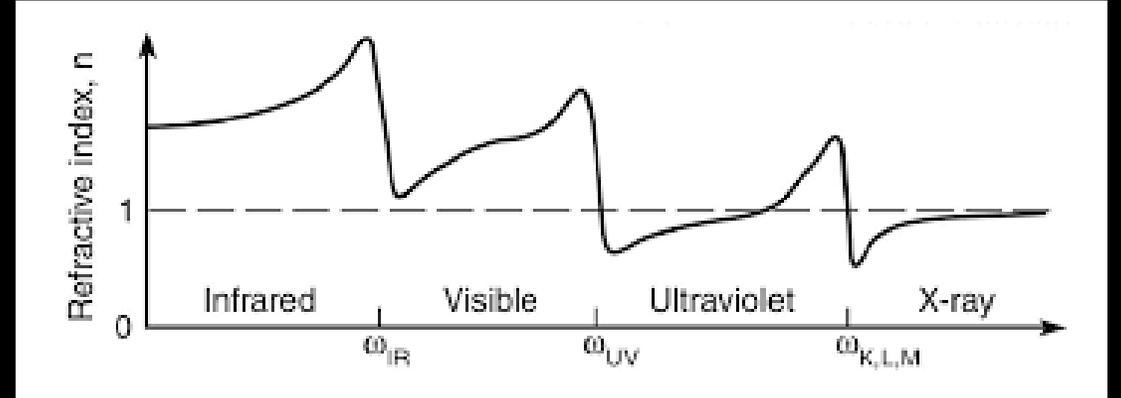
La pulsation  $\omega$  ne varie pas, c'est donc la longueur d'onde qui change

$$E = E_0 \cos(\omega t - nkz)$$

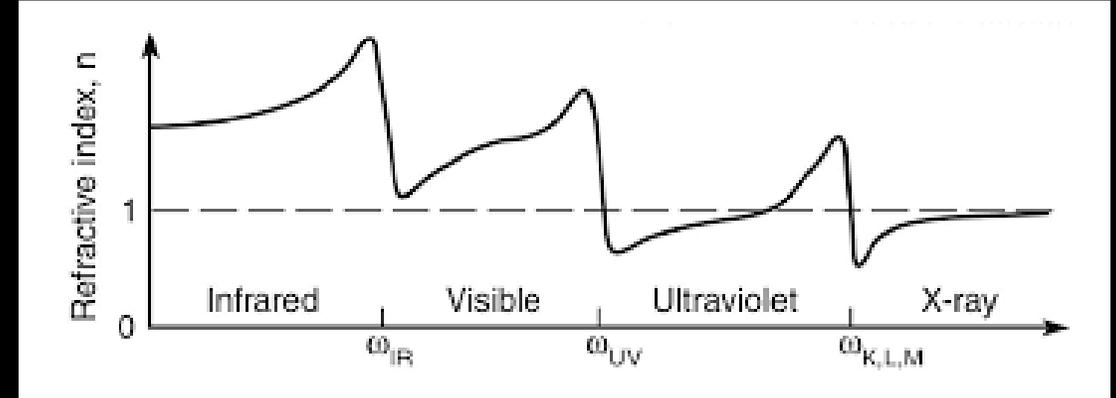
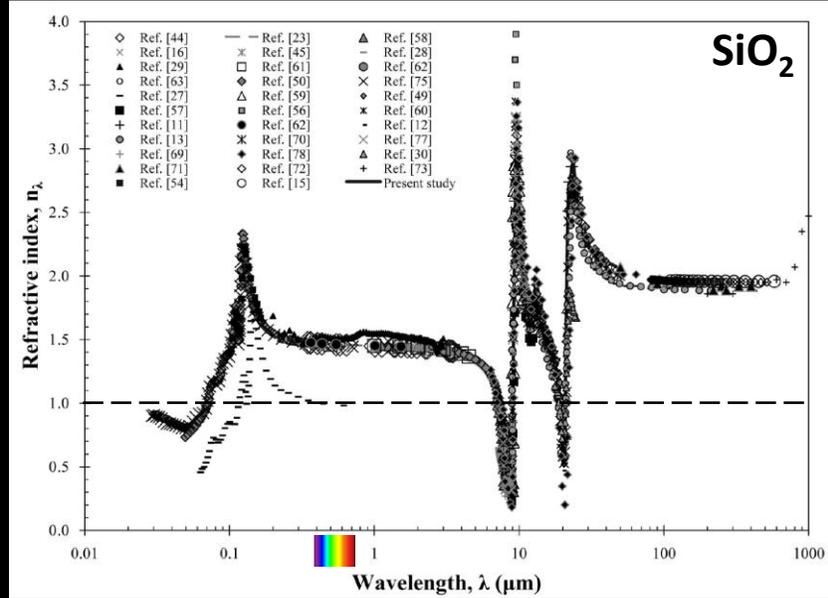


Dispersion  
 $n(\omega)$

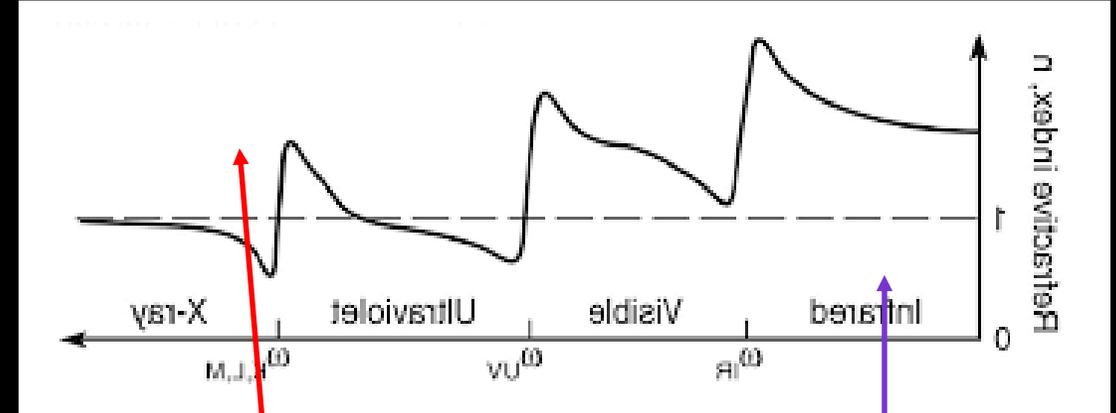
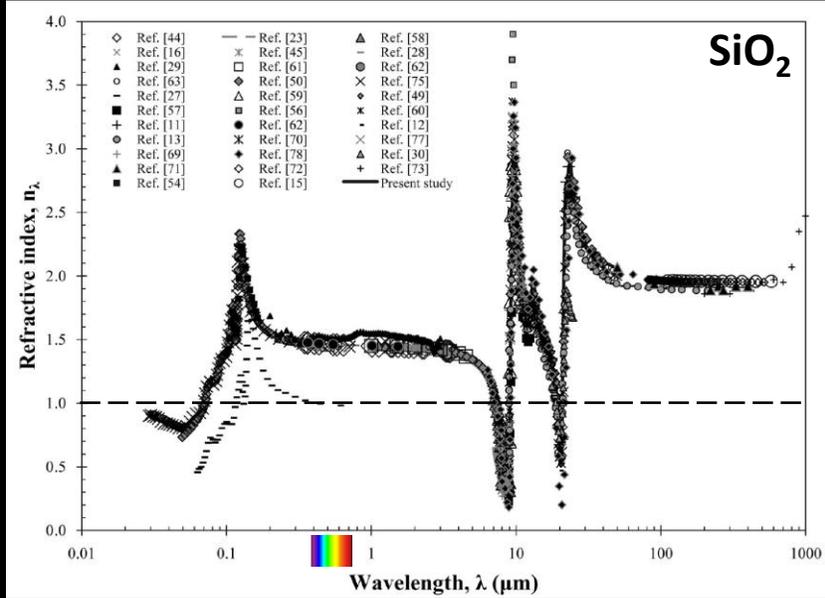
# Dispersion



# Dispersion



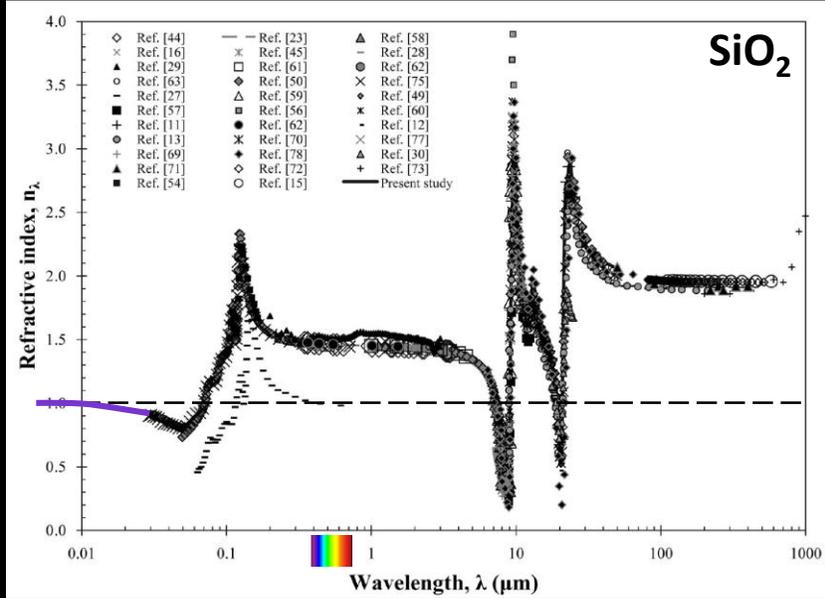
# Dispersion



Forts indices dans l'IR

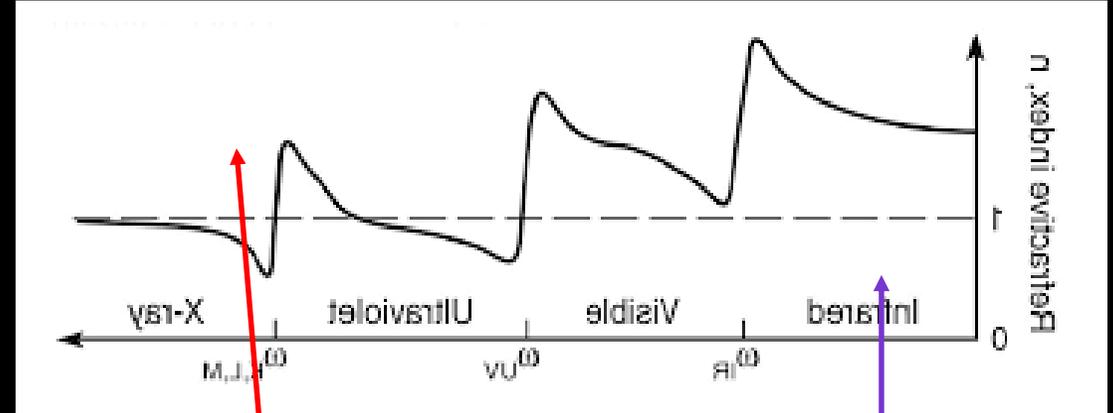
Faibles indices dans l'UV et RX  
 $n < 1$  !

# Dispersion



$$n = 1 - \delta$$

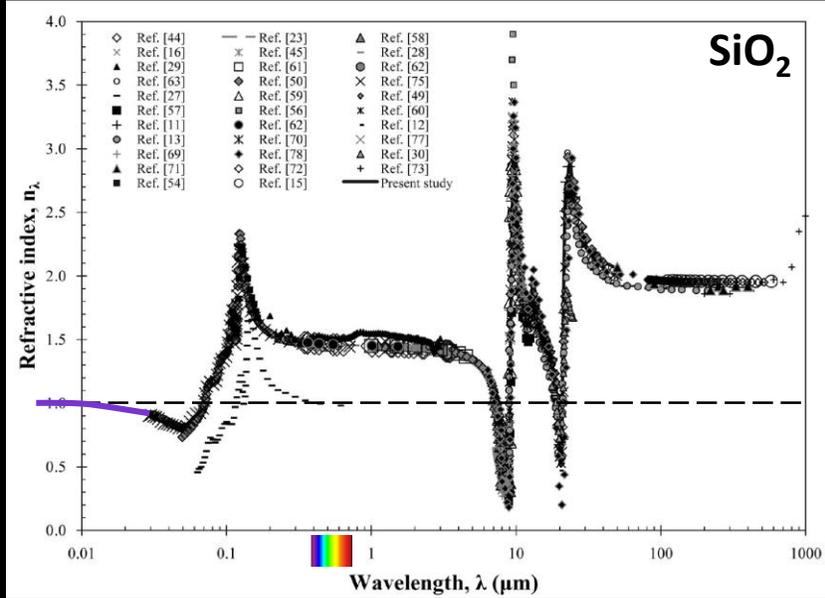
$$\delta \sim 10^{-5}$$



Forts indices dans l'IR

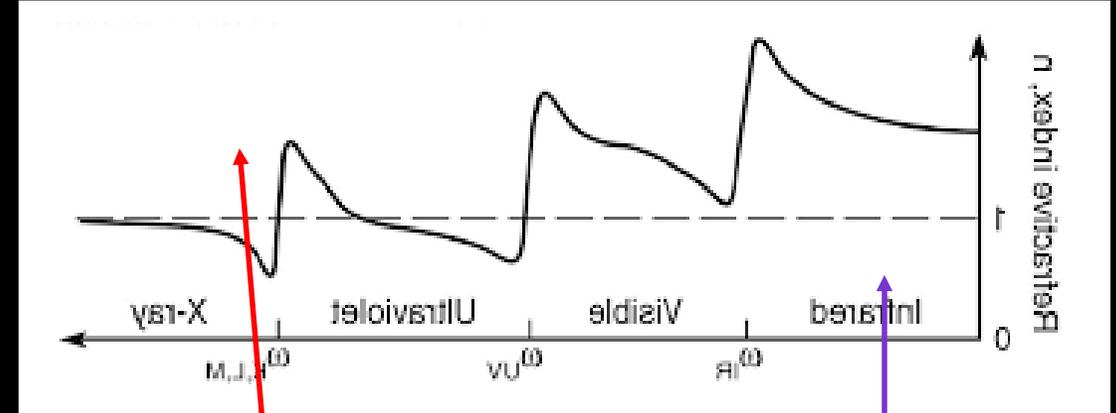
Faibles indices dans l'UV et RX  
 $n < 1$  !

# Dispersion



$$n = 1 - \delta$$

$$\delta \sim 10^{-5}$$



Forts indices dans l'IR

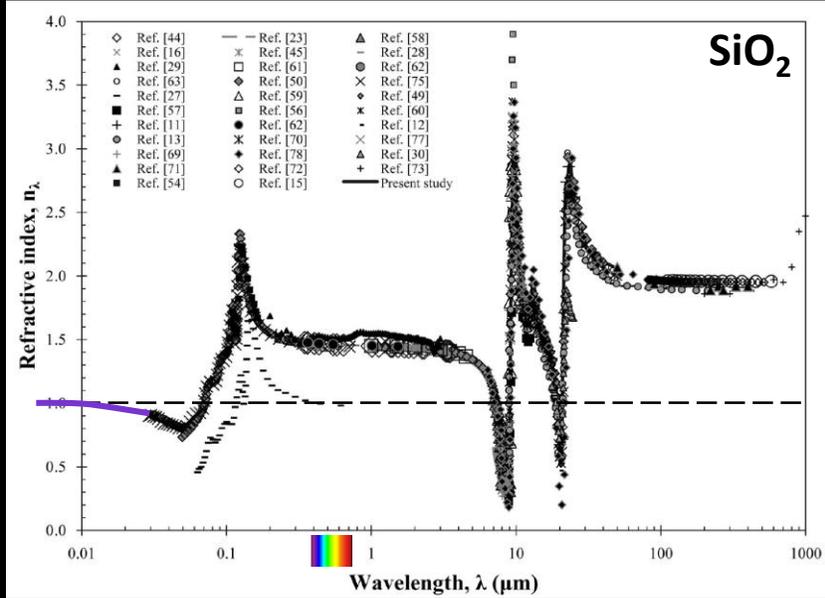
Faibles indices dans l'UV et RX  
 $n < 1$  !

$$P = \epsilon_0 \chi(\omega) E$$

Densité volumique de moments dipolaires

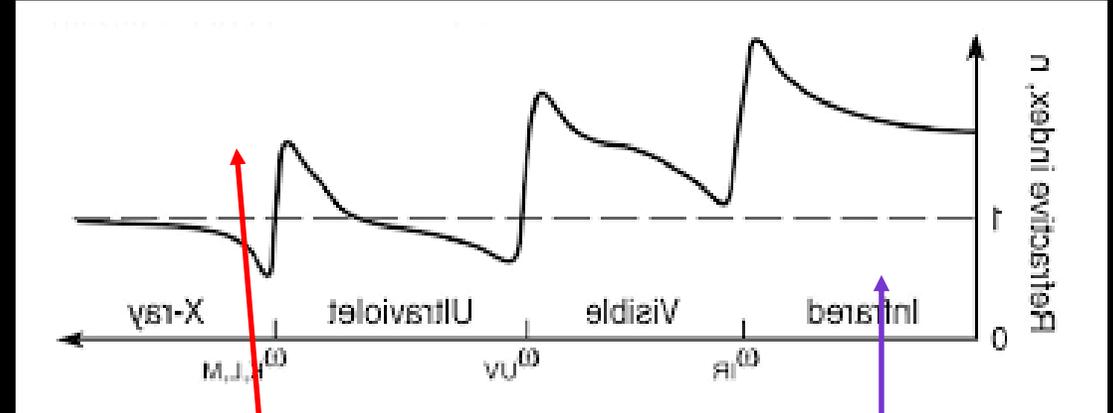
$$n^2 = 1 + \chi(\omega)$$

# Dispersion



$$n = 1 - \delta$$

$$\delta \sim 10^{-5}$$



Forts indices dans l'IR

Faibles indices dans l'UV et RX  
 $n < 1$  !

$$P = \epsilon_0 \chi(\omega) E$$

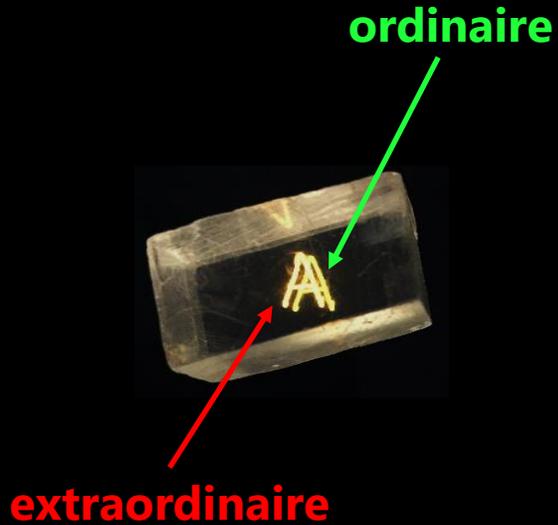
Densité volumique de moments dipolaires

$$n^2 = 1 + \chi(\omega)$$

Anisotropie...

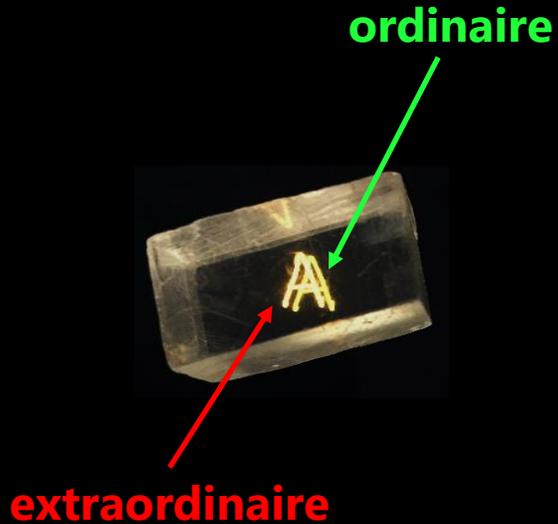
# Huygens et la biréfringence (1678)

Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?

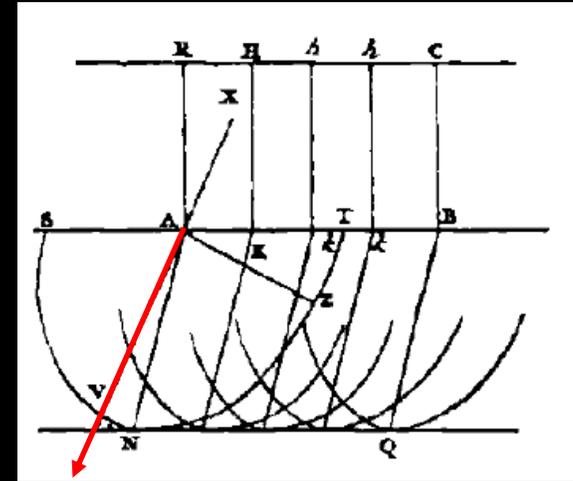


# Huygens et la biréfringence (1678)

Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



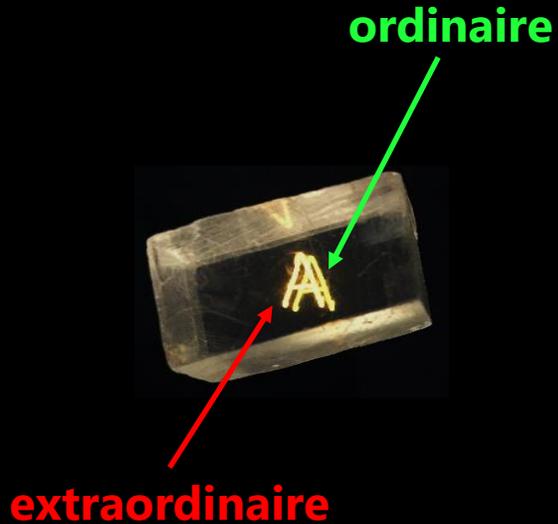
Vitesse de la lumière  
**anisotrope**





# Huygens et la biréfringence (1678)

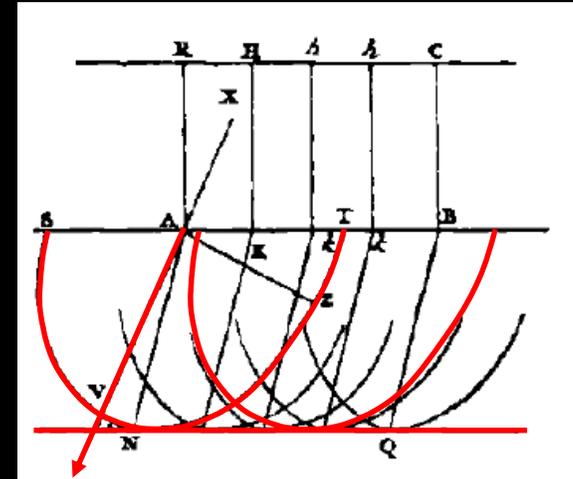
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

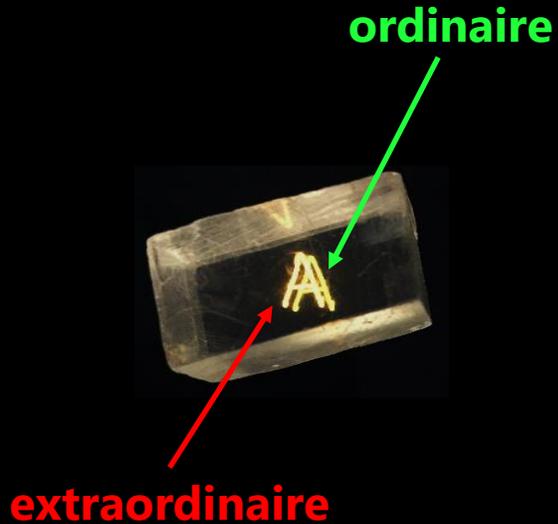
Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



# Huygens et la biréfringence (1678)

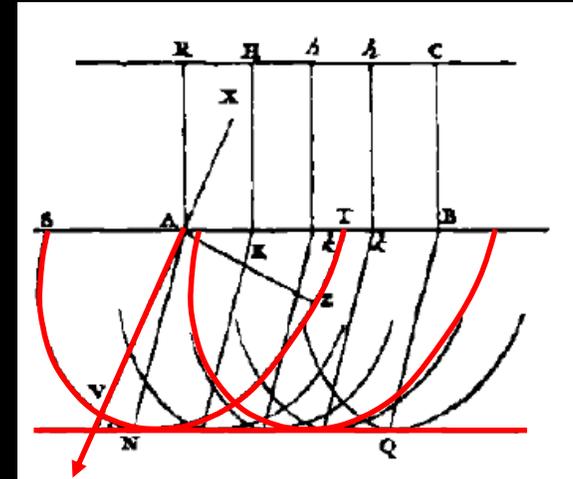
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

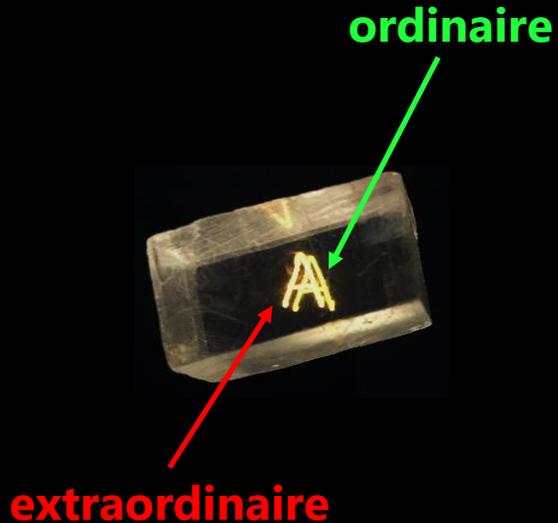
Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



# Huygens et la biréfringence (1678)

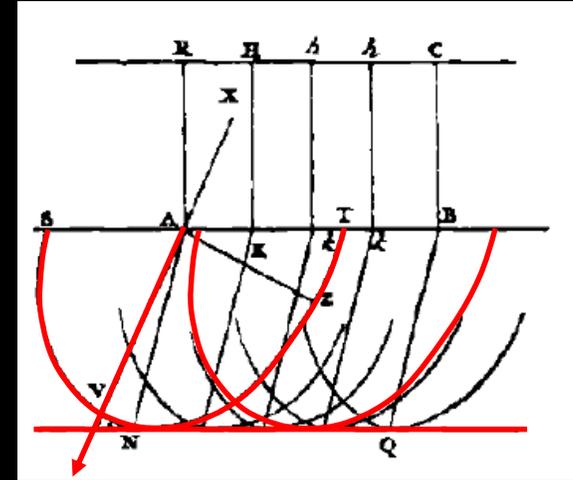
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



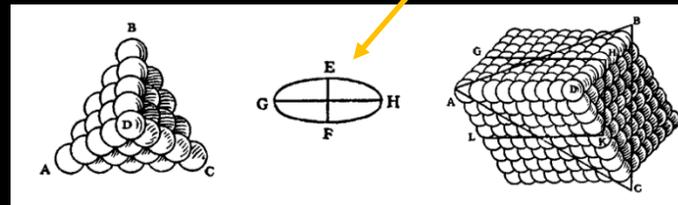
Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



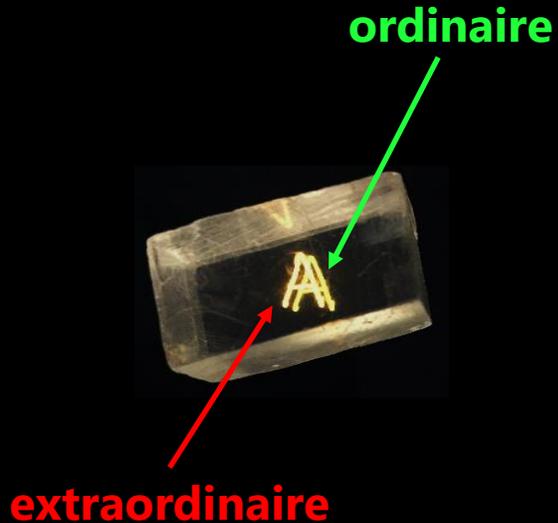
Huygens postule que le cristal est fait de  
particules **allongées**



Avec presque 100 ans d'avance Huygens postule  
**la structure atomique de la matière !**

# Huygens et la biréfringence (1678)

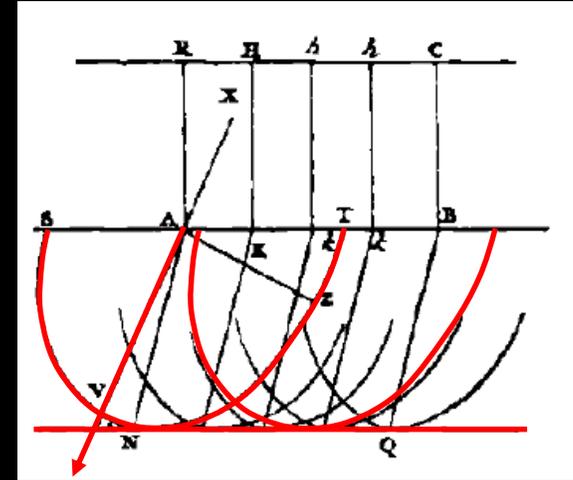
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



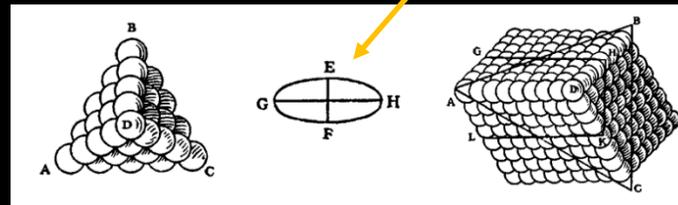
Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



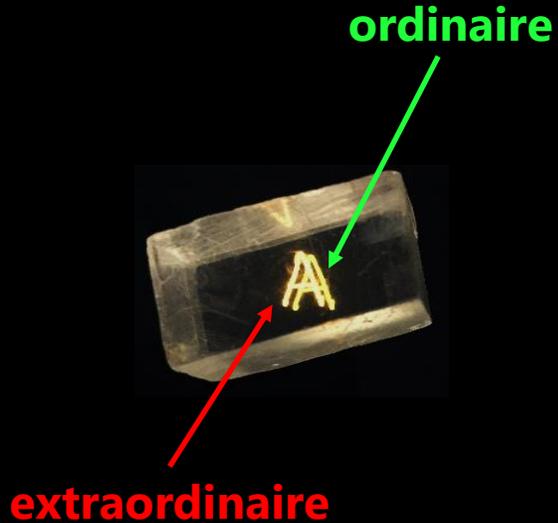
Huygens postule que le cristal est fait de  
particules **allongées**



Avec presque 100 ans d'avance Huygens postule  
**la structure atomique de la matière !**

# Huygens et la biréfringence (1678)

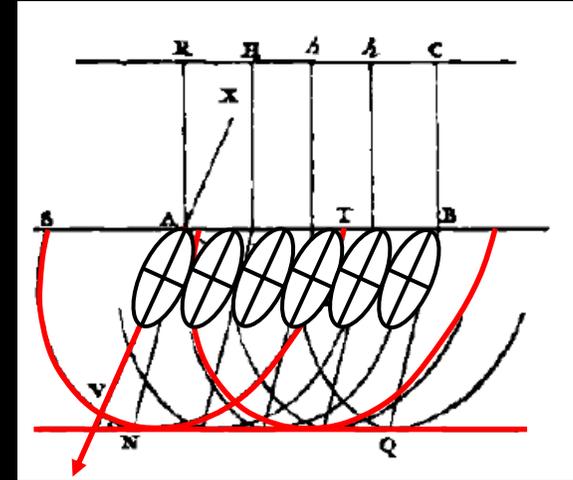
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



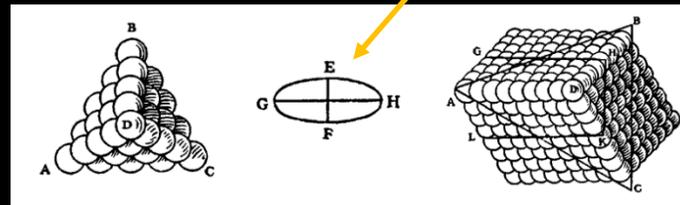
Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



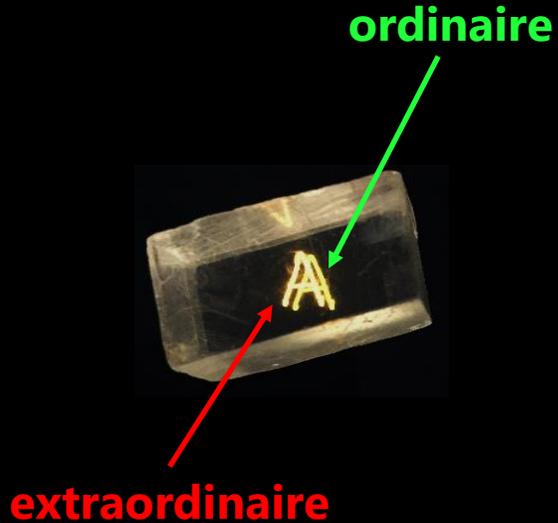
Huygens postule que le cristal est fait de  
particules **allongées**



Avec presque 100 ans d'avance Huygens postule  
**la structure atomique de la matière !**

# Huygens et la biréfringence (1678)

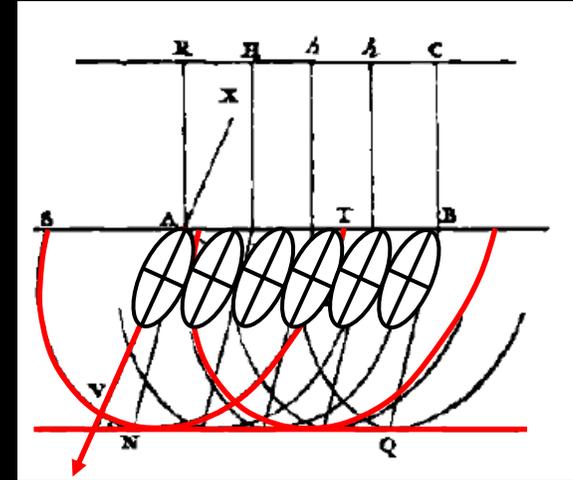
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



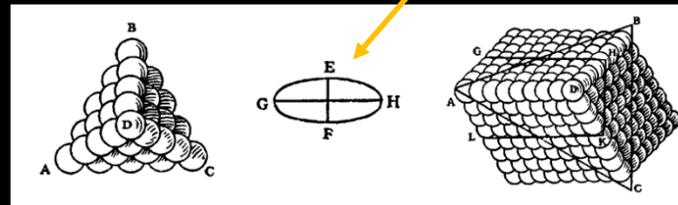
Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



Huygens postule que le cristal est fait de  
particules **allongées**



Pourquoi un **rouge** et un **vert** ?

Avec presque 100 ans d'avance Huygens postule  
**la structure atomique de la matière !**

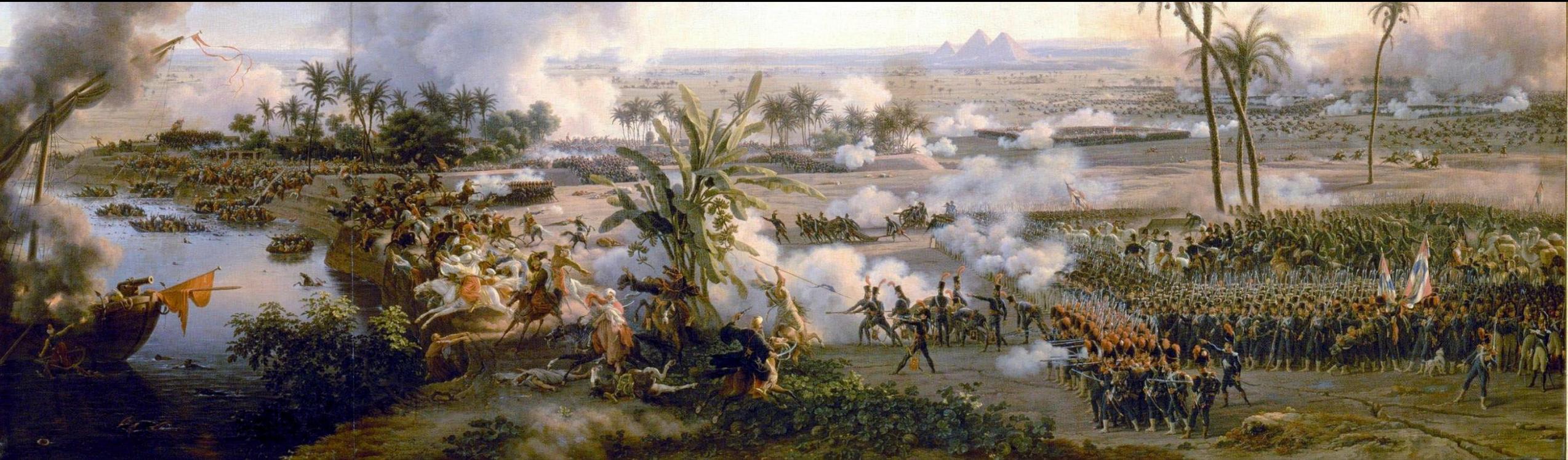
# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel 1815



# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel 1815



La bataille des pyramides, Louis-François Lejeune (1806)

# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel 1815



La bataille des pyramides, Louis-François Lejeune (1806)

# La polarisation de la lumière

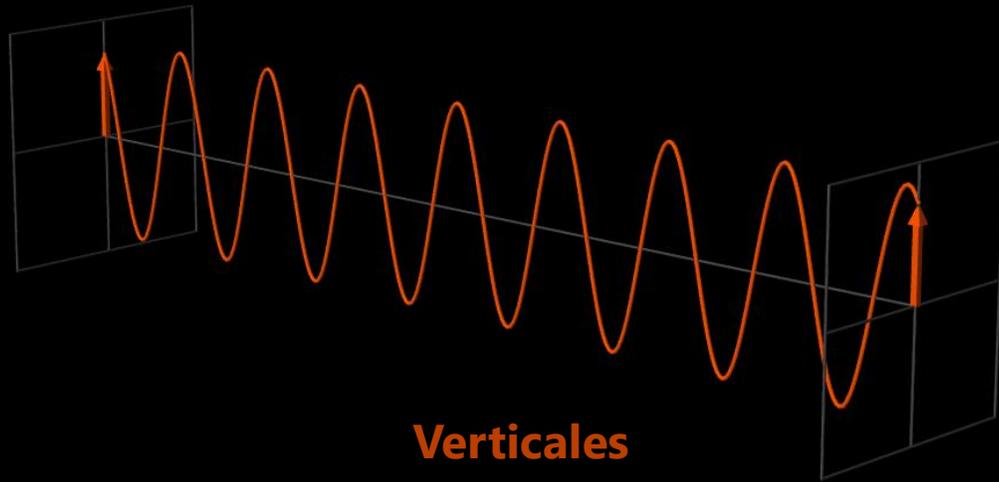
Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :

# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

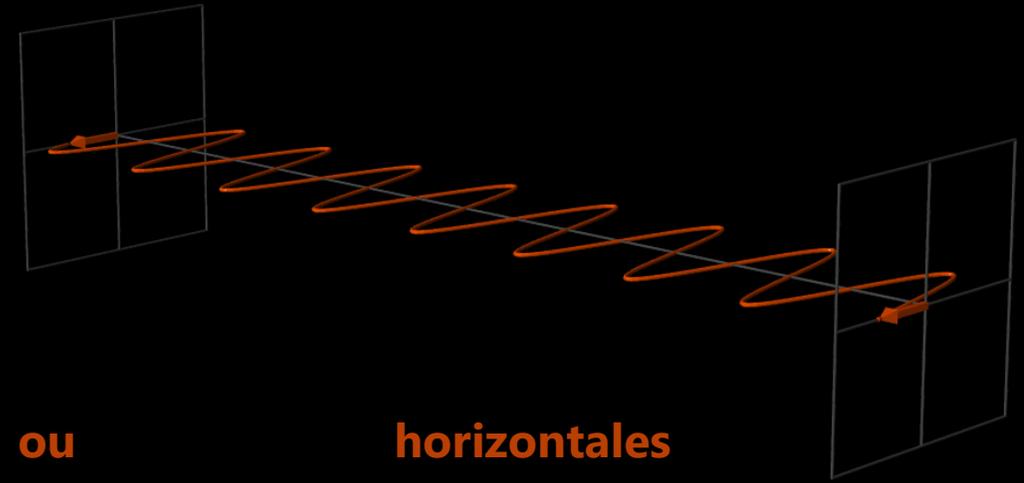
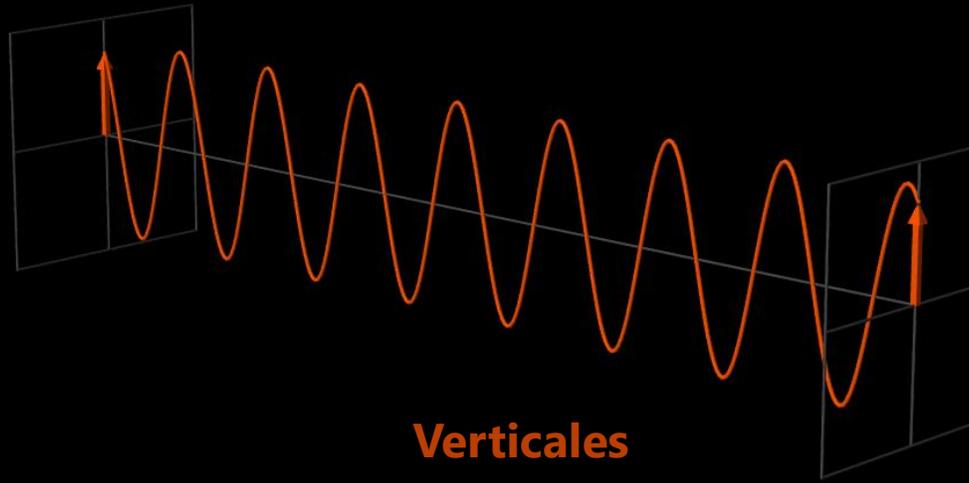
La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

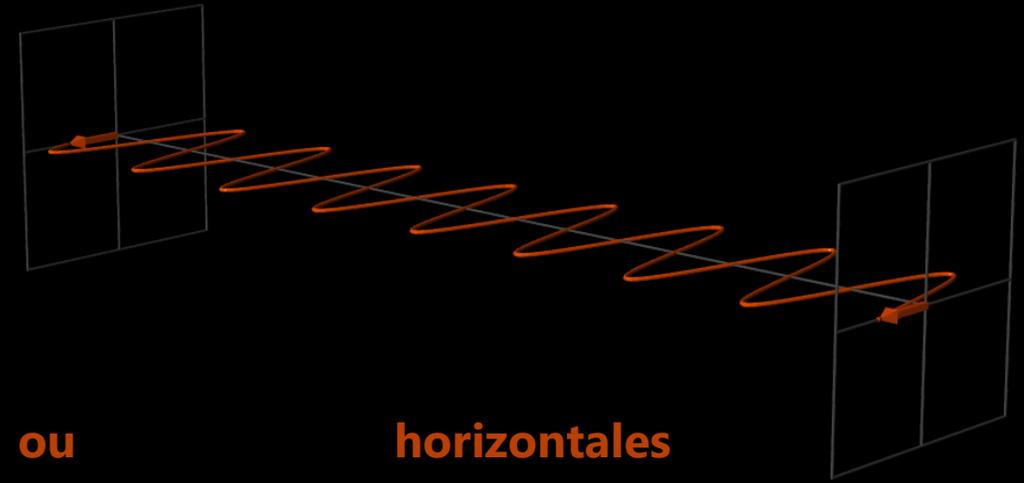
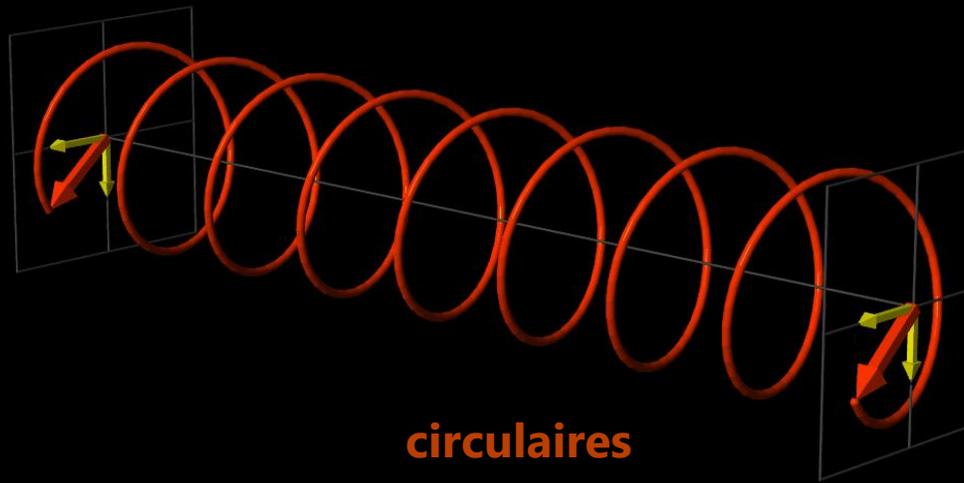
La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

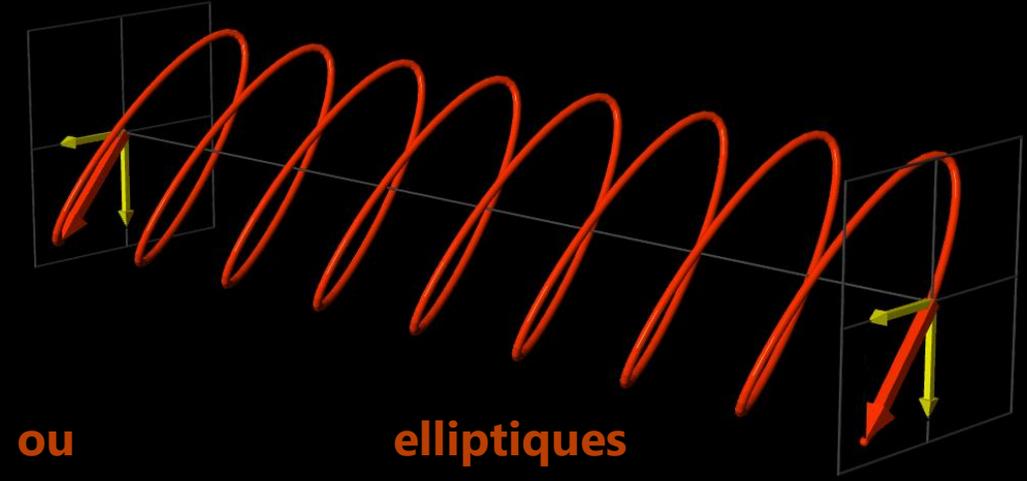
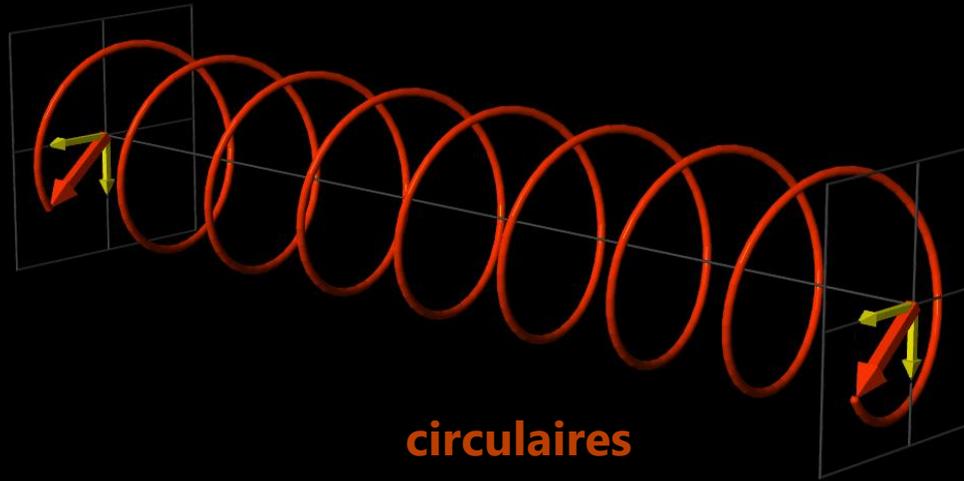
La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

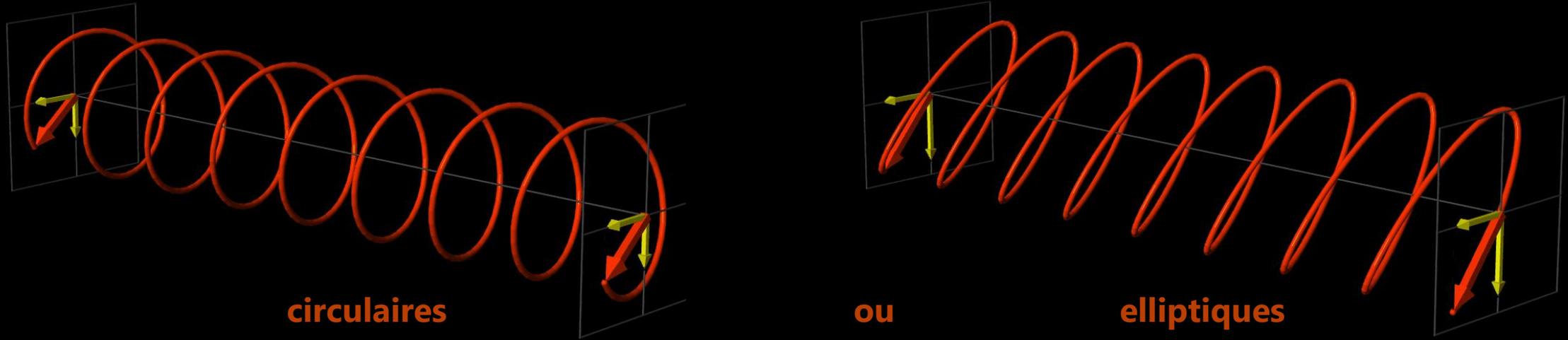
La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



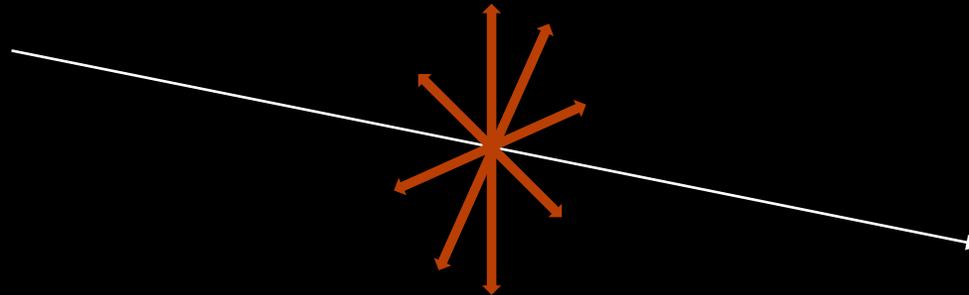
# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



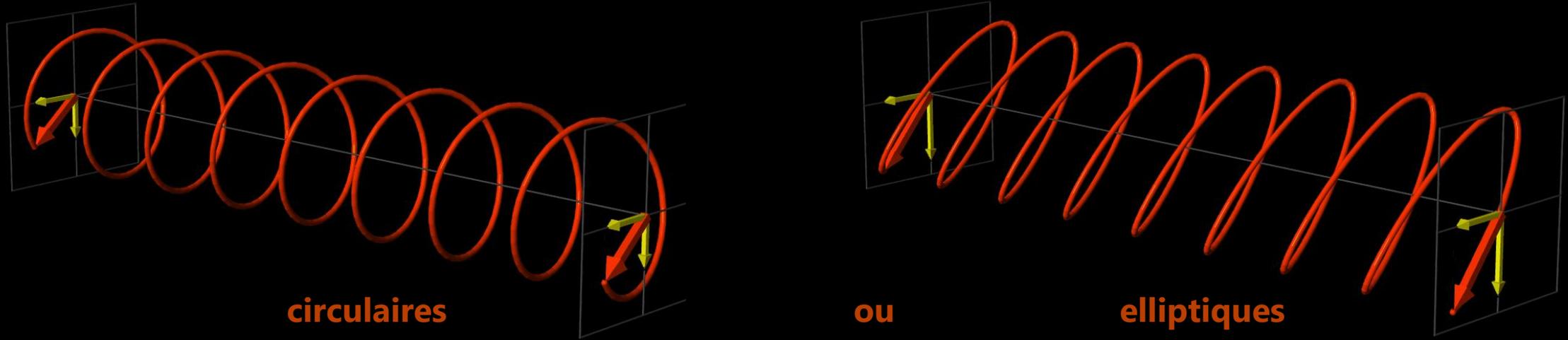
En fait, la lumière naturelle n'est pas (trop) polarisée



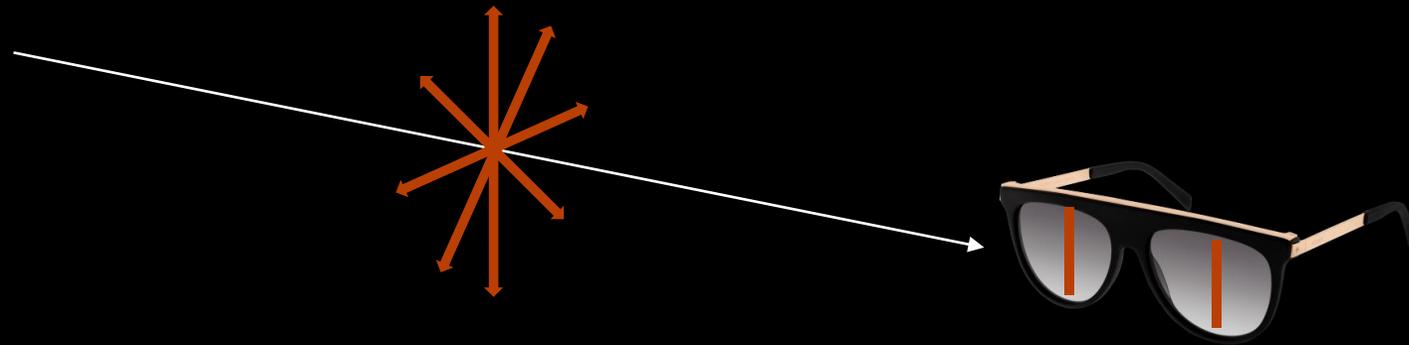
# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



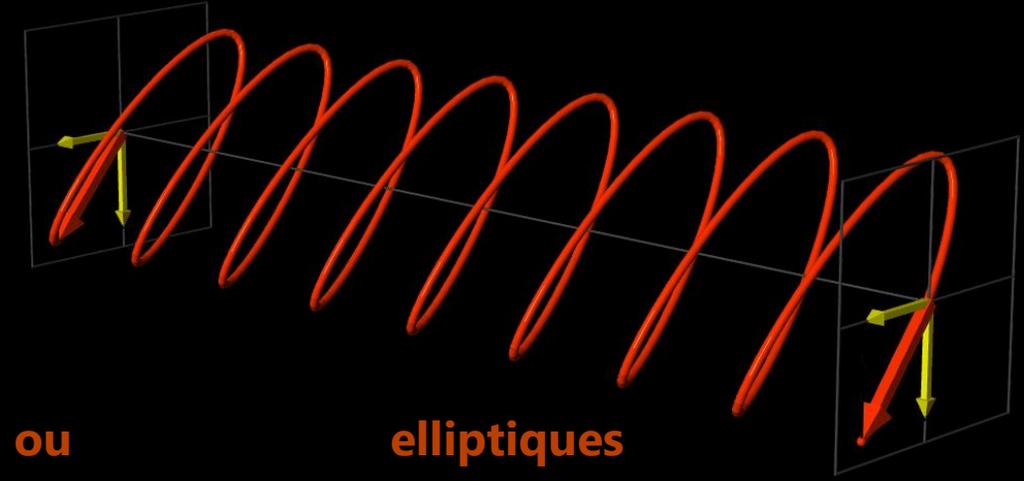
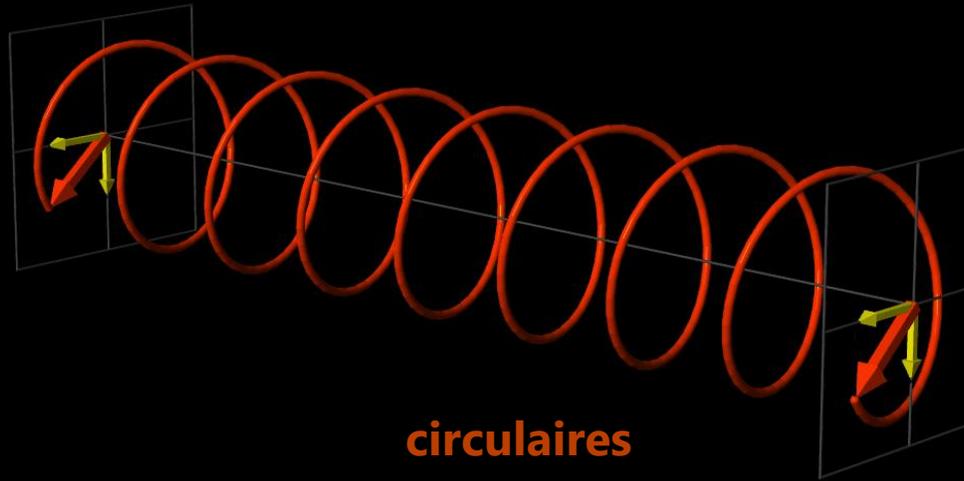
En fait, la lumière naturelle n'est pas (trop) polarisée



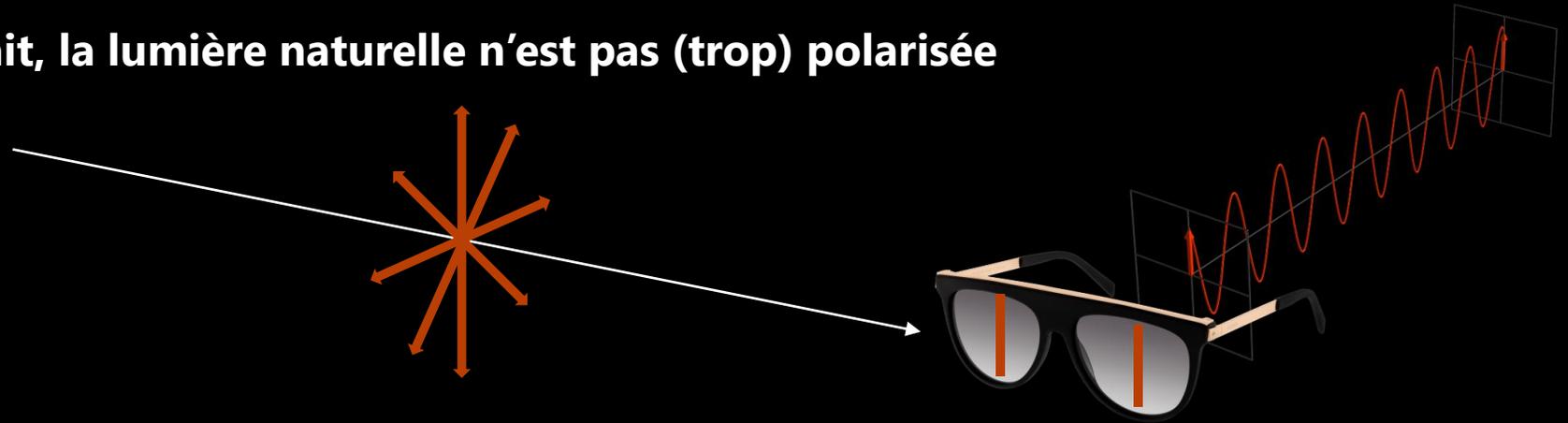
# La polarisation de la lumière

Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



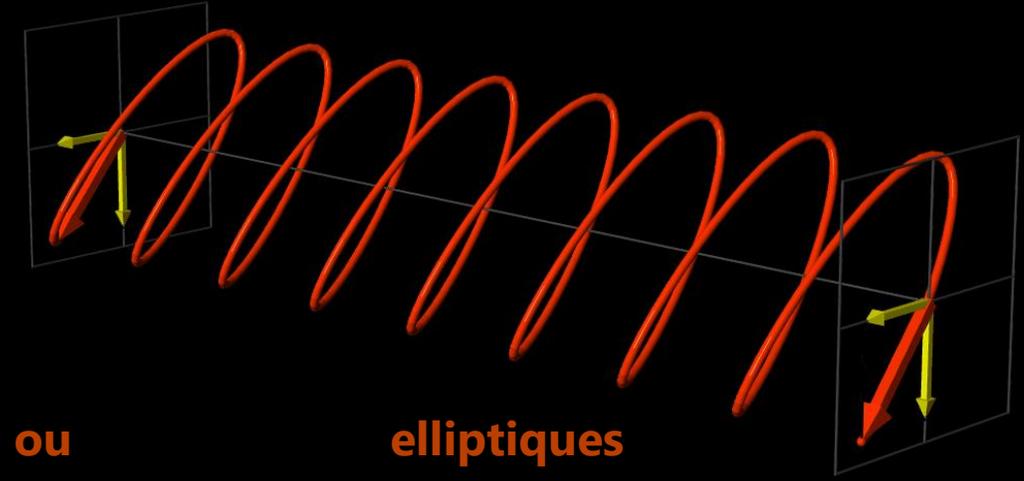
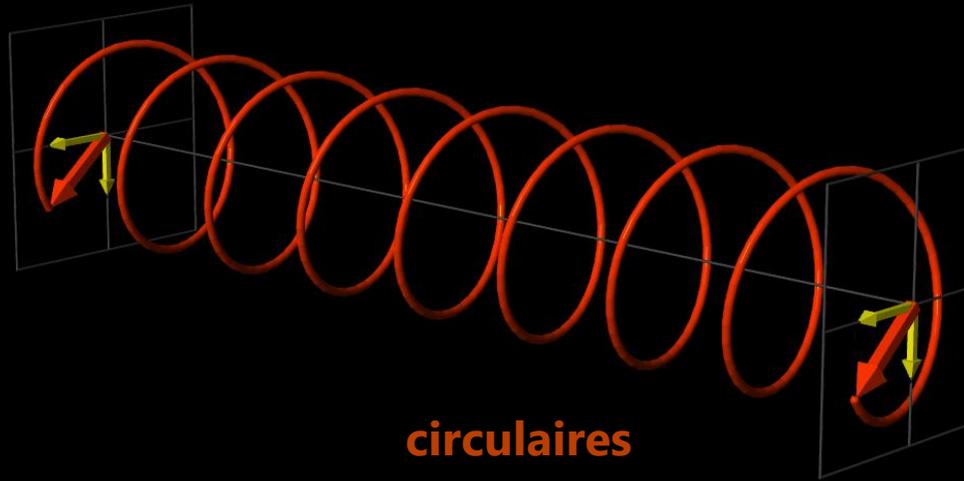
En fait, la lumière naturelle n'est pas (trop) polarisée



# La polarisation de la lumière

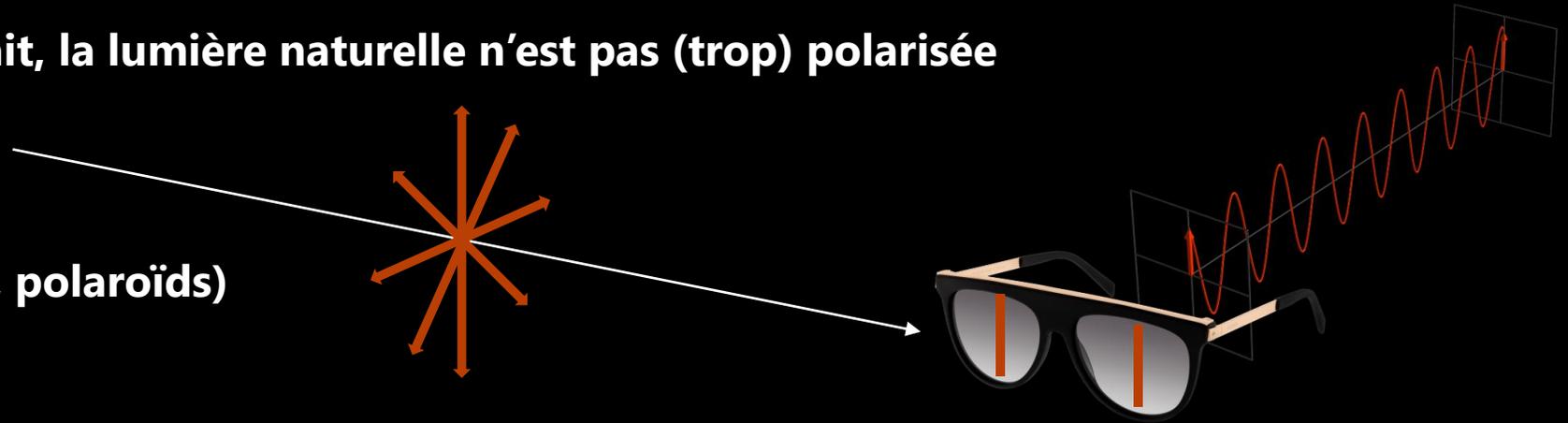
Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



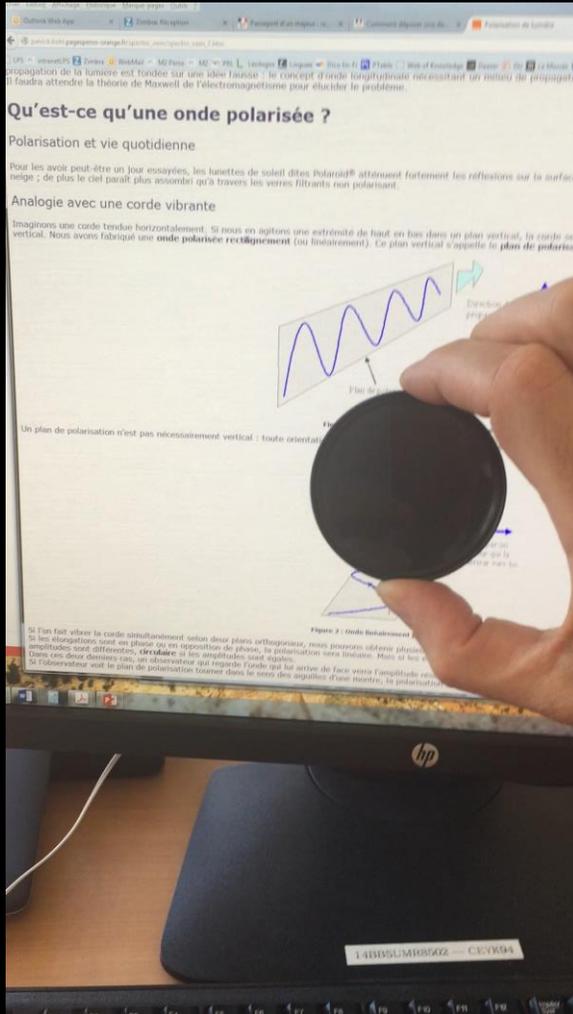
En fait, la lumière naturelle n'est pas (trop) polarisée

- Utilisation polariseurs (Nicols, polaroïds)
- Laser (filtre de Wollaston)
- Le ciel à 90°
- Synchrotron (polar H)



# Huygens et la biréfringence (1678)

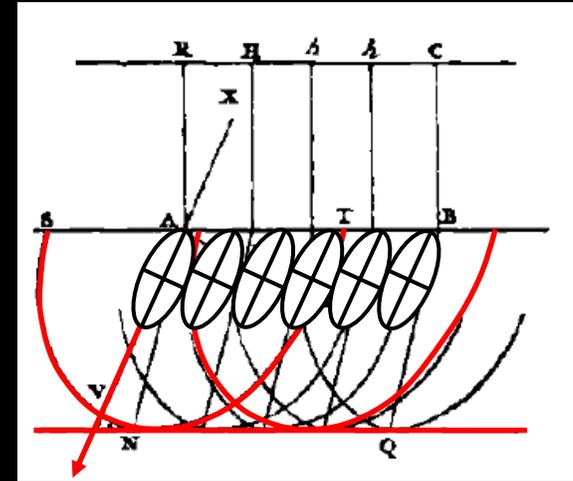
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



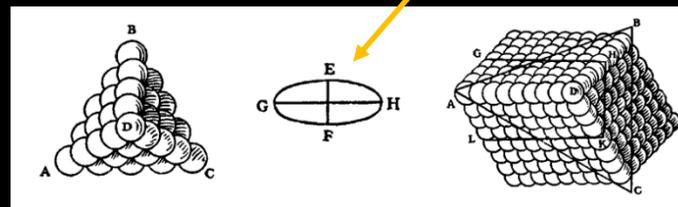
Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



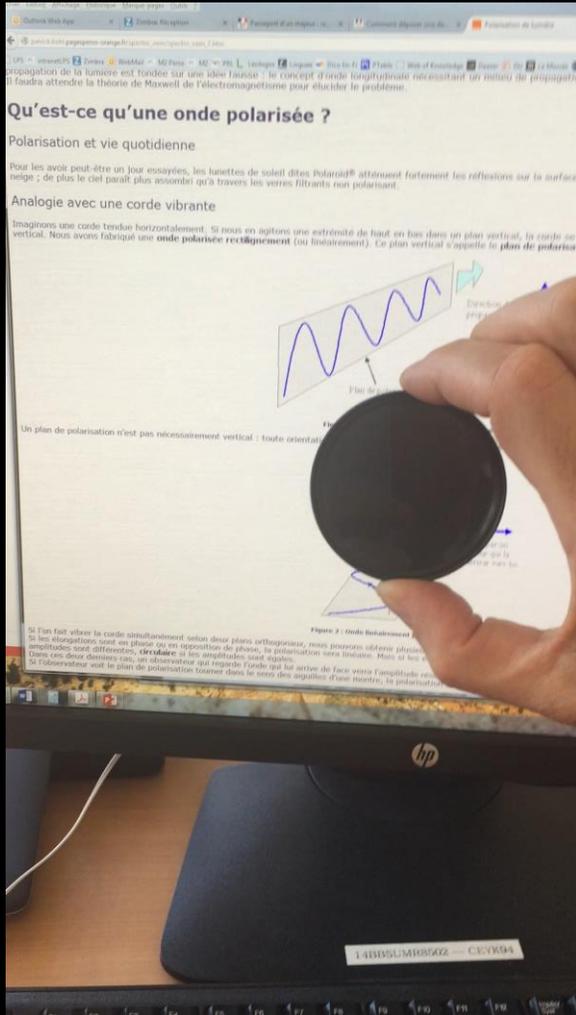
Huygens postule que le cristal est fait de  
particules **allongées**



Avec presque 100 ans d'avance Huygens postule  
**la structure atomique de la matière !**

# Huygens et la biréfringence (1678)

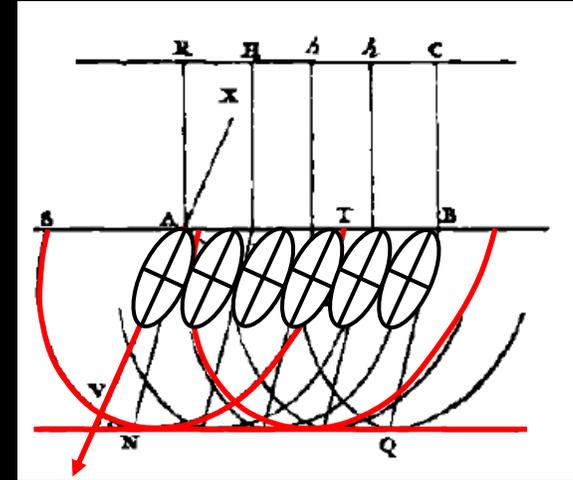
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



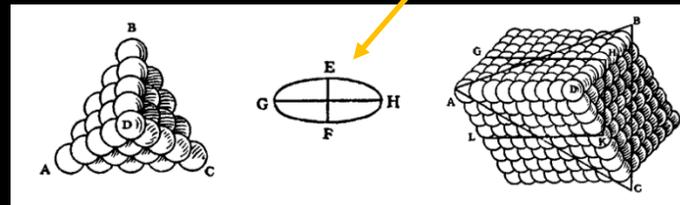
Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



Huygens postule que le cristal est fait de  
particules **allongées**



Faisceaux **rouge** et **vert**  
n'ont pas la même  
polarisation

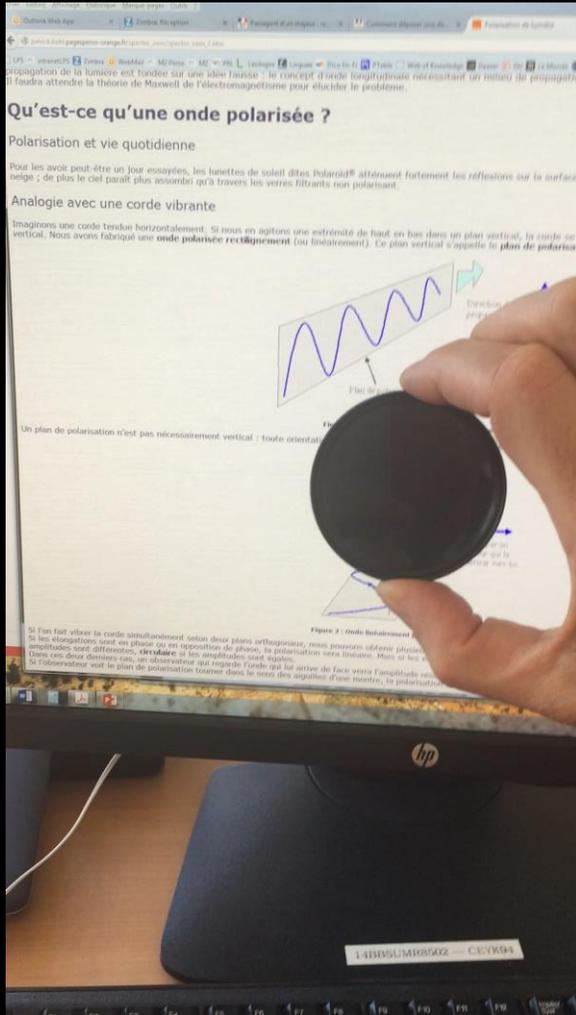
Double réfraction  
des RX aux IR

Avec presque 100 ans d'avance Huygens postule  
la **structure atomique de la matière** !

$n(\omega)$  et aussi tenseur  
(biréfringence circulaire 1811)

# Huygens et la biréfringence (1678)

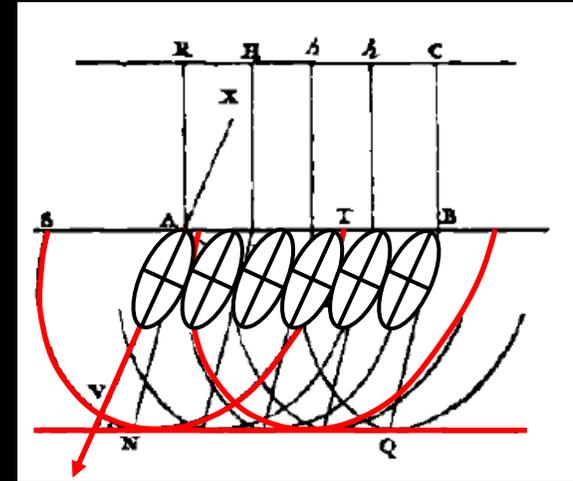
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



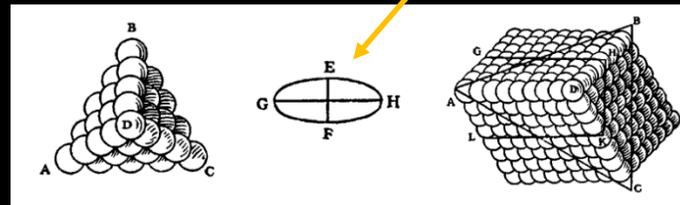
Vitesse de la lumière  
**anisotrope**

Les fronts d'onde :  
**Ellipses**

Le rayon **dévie**



Huygens postule que le cristal est fait de  
particules **allongées**



Faisceaux **rouge** et **vert**  
n'ont pas la même  
polarisation

Double réfraction  
des RX aux IR

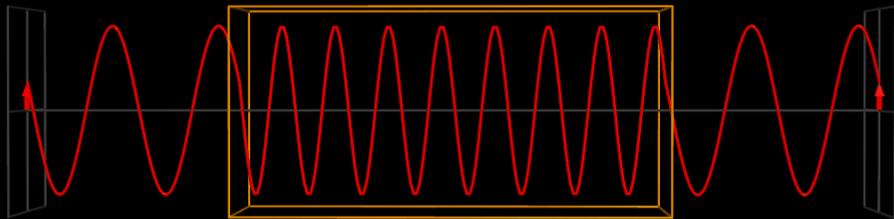
Avec presque 100 ans d'avance Huygens postule  
la **structure atomique de la matière** !

$n(\omega)$  et aussi tenseur  
(biréfringence circulaire 1811)

# Indice de réfraction complexe

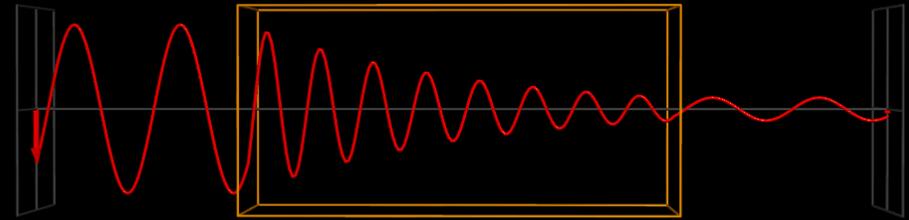
$$v_{ph} = \frac{c}{n} = \frac{\lambda}{\nu}$$

$$E = E_0 \cos(2\pi\nu t - nkz)$$



**Dispersion**  
 $n(\omega)$

$$E = E_0 e^{-k\kappa z} \cos(2\pi\nu t - nkz)$$



**Absorption**  
 $\mu(\omega)$

$$\bar{n} = n + i\kappa$$

$$\mu = 2k\kappa$$

**Dispersion et absorption sont reliées !**

# Relation Kramers-Kronig

1926-27 : Dispersion et absorption (**Kronig**, 1 équation, RX)

Plus tard 1942, Kronig montrera que ces relation dérivent de la **linéarité** et la **causalité**.

$$n(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \mathcal{P} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \kappa(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

$$\kappa(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \mathcal{P} \int_0^{\infty} \frac{n(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

# Relation Kramers-Kronig

1926-27 : Dispersion et absorption (**Kronig**, 1 équation, RX)

Plus tard 1942, Kronig montrera que ces relation dérivent de la **linéarité** et la **causalité**.

$$n(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \mathcal{P} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \kappa(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

$$\kappa(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \mathcal{P} \int_0^{\infty} \frac{n(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

Permet d'obtenir ce **qu'on ne sait pas mesurer**  
par exemple **n** dans le domaine RX  
ou l'absorption en IR

# Relation Kramers-Kronig

1926-27 : Dispersion et absorption (**Kronig**, 1 équation, RX)

Plus tard 1942, Kronig montrera que ces relation dérivent de la **linéarité** et la **causalité**.

$$n(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \mathcal{P} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \kappa(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

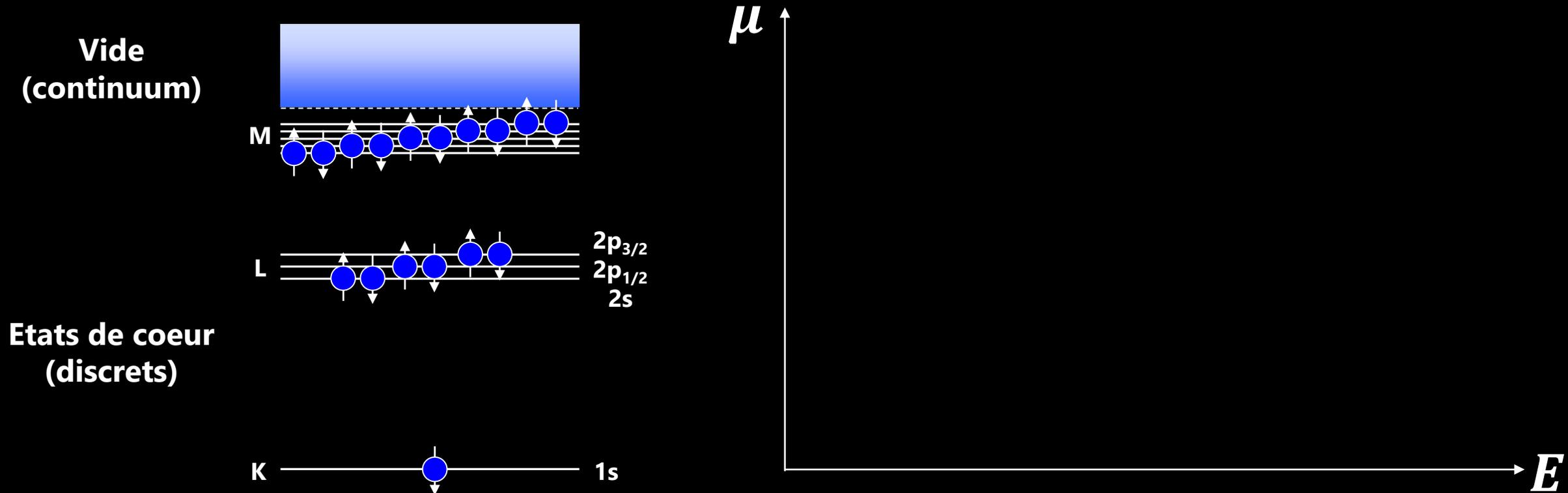
$$\kappa(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \mathcal{P} \int_0^{\infty} \frac{n(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

Permet d'obtenir ce **qu'on ne sait pas mesurer**  
par exemple **n** dans le domaine RX  
ou l'absorption en IR

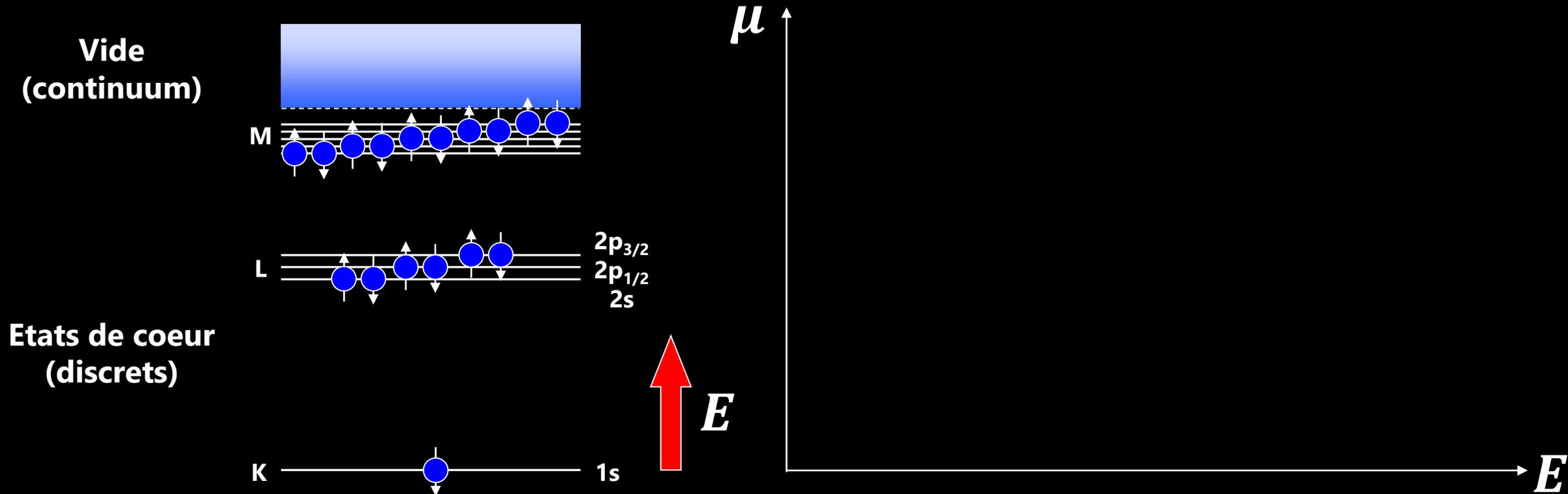
Réponses **non-linéaires** :

Effet Kerr (1875), Magn-Opt KE (1877), Pockels (1893),  
et avec les lasers : génération d'harmonique (1961)

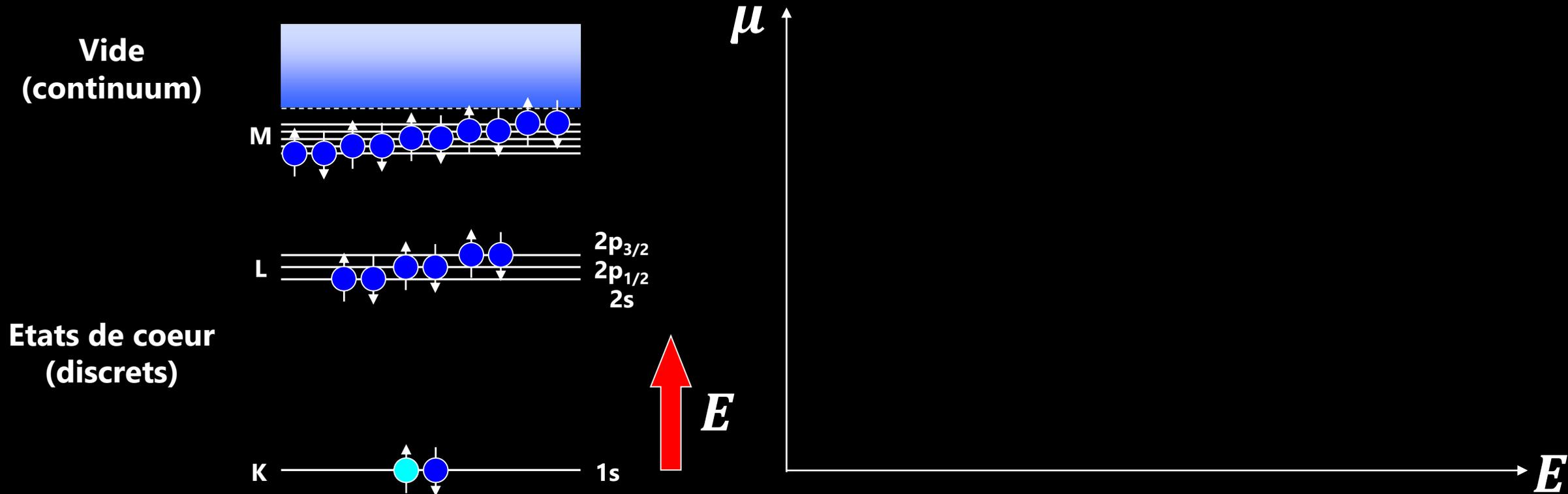
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



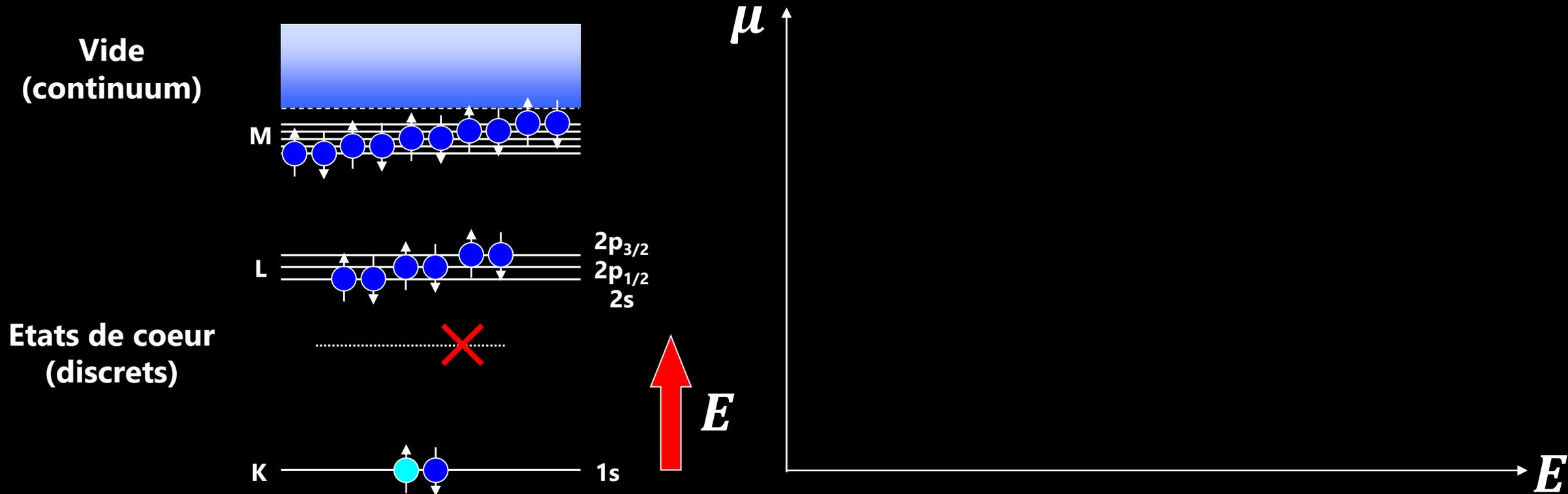
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



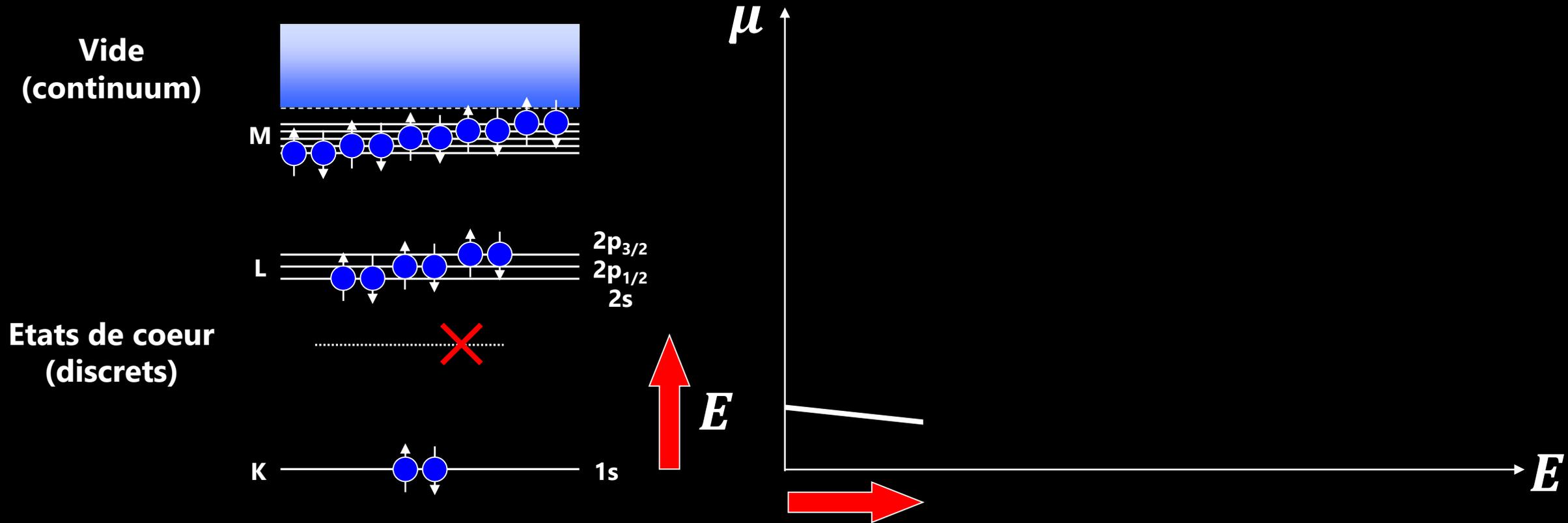
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



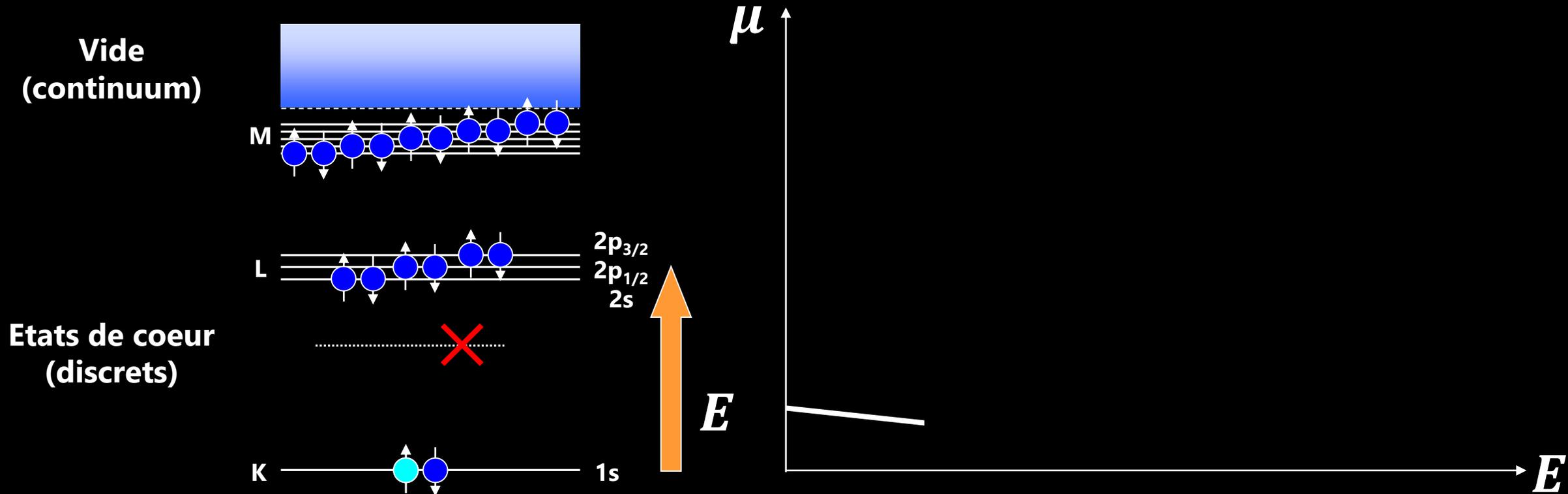
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



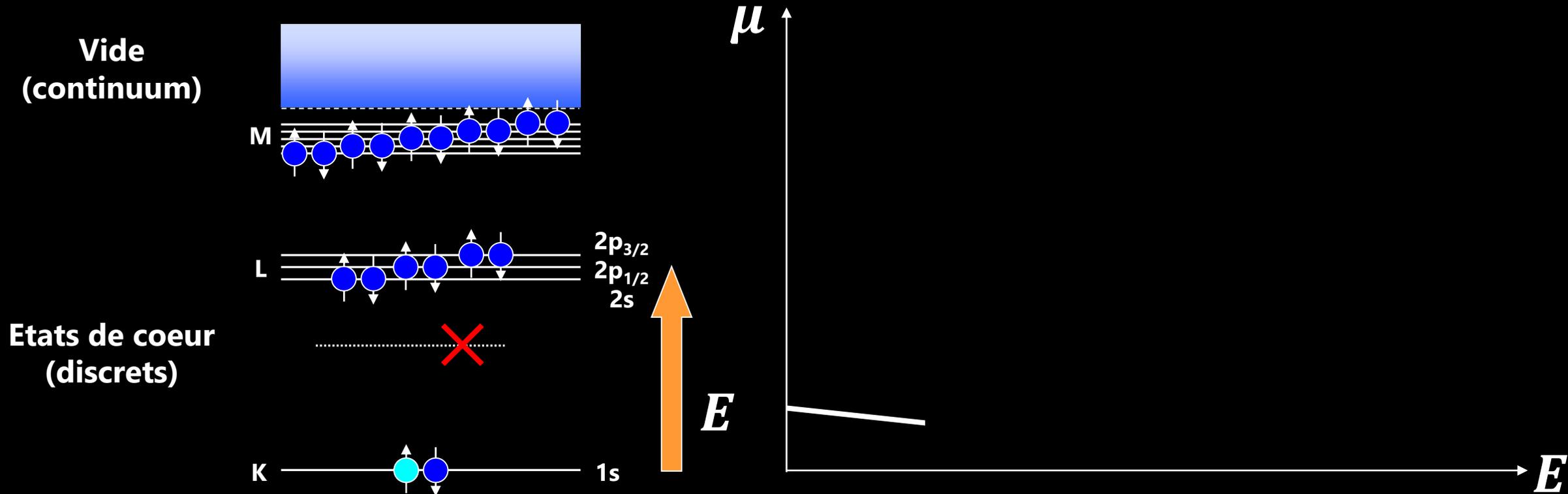
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



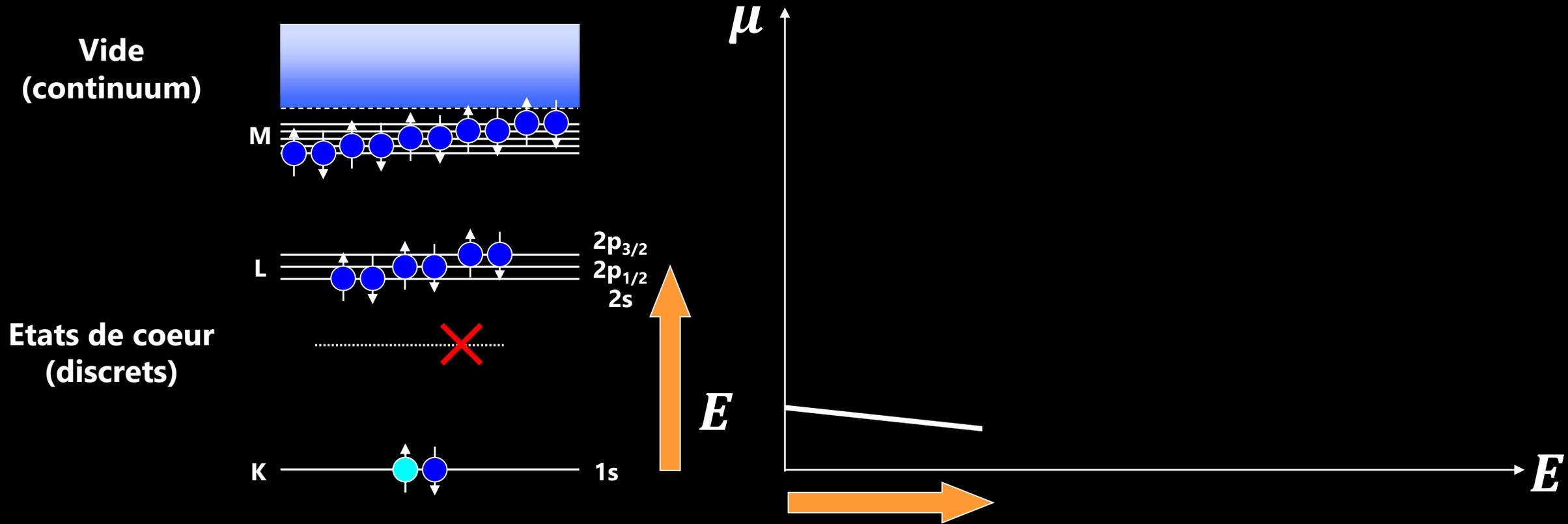
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



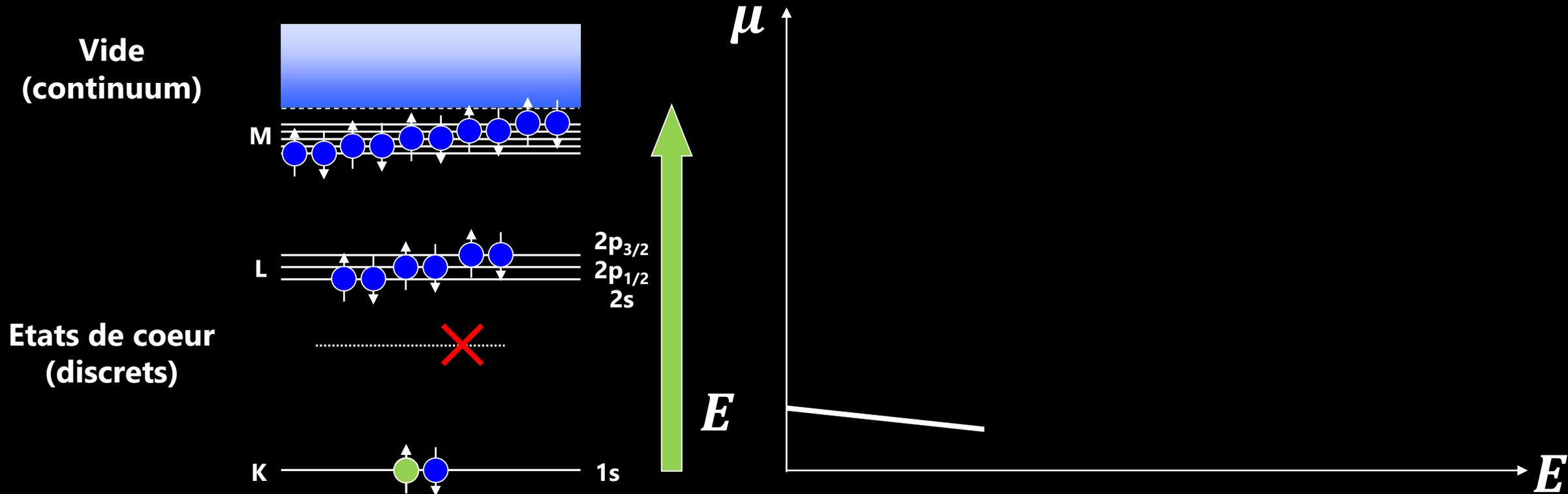
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$

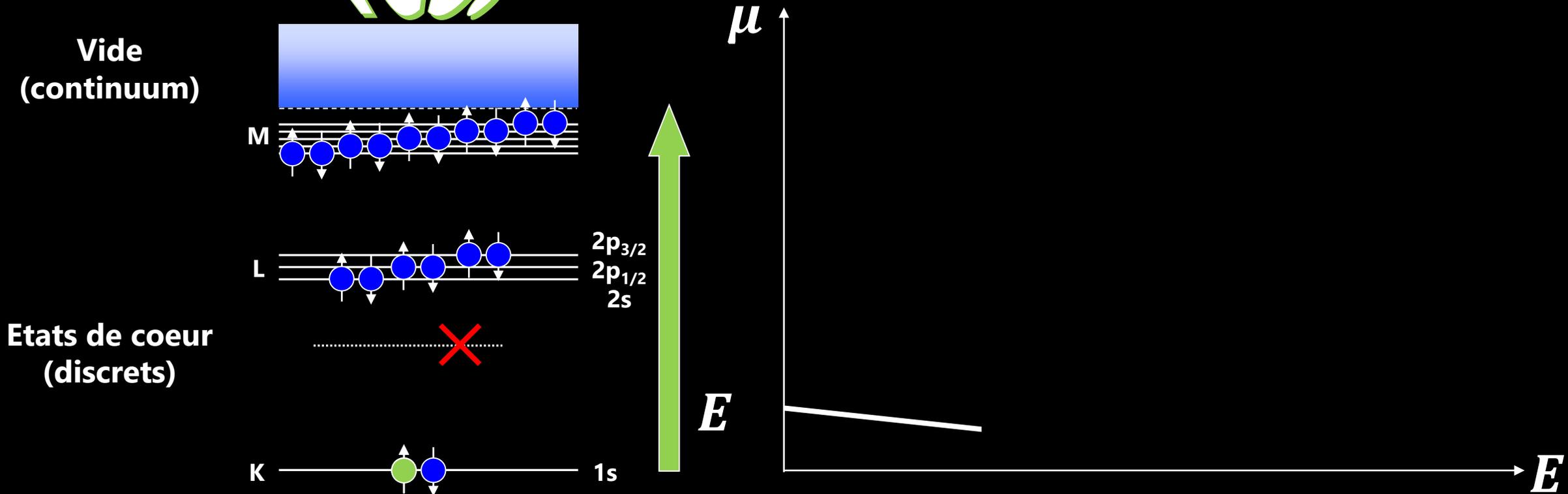


# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



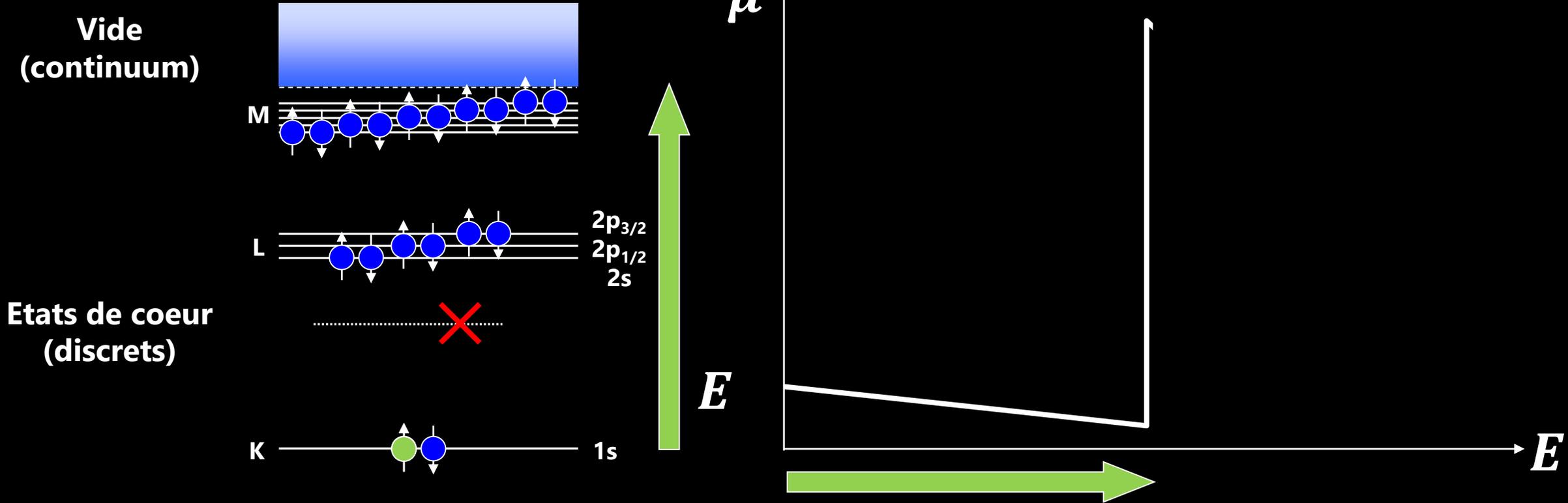
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$

**Yes!**

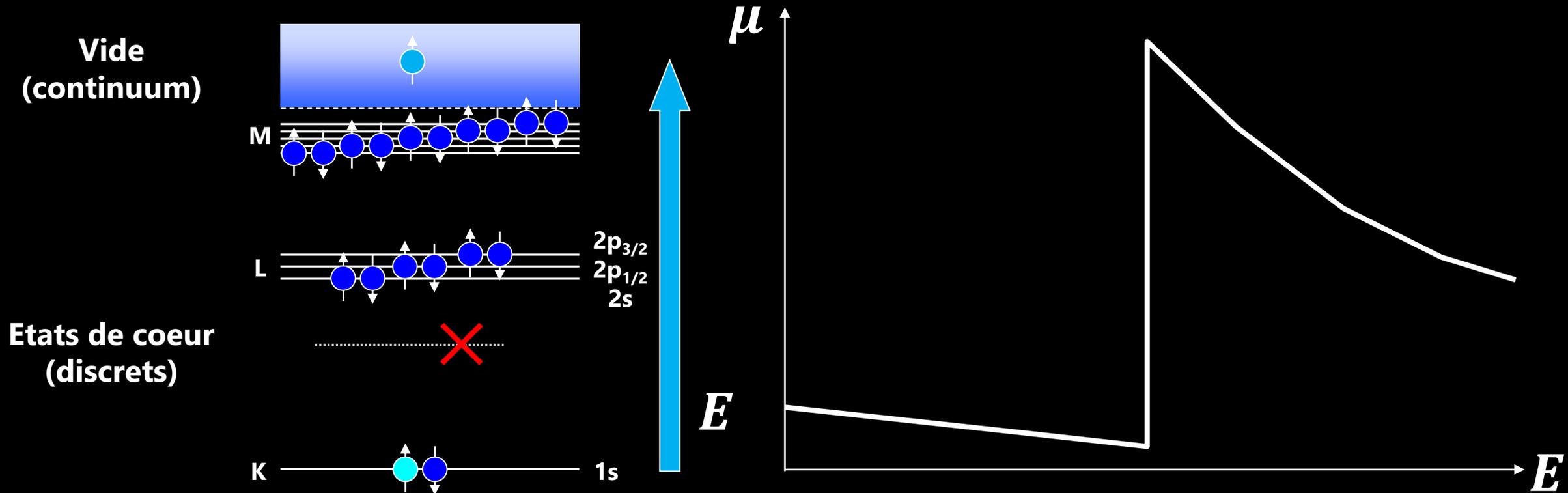


# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$

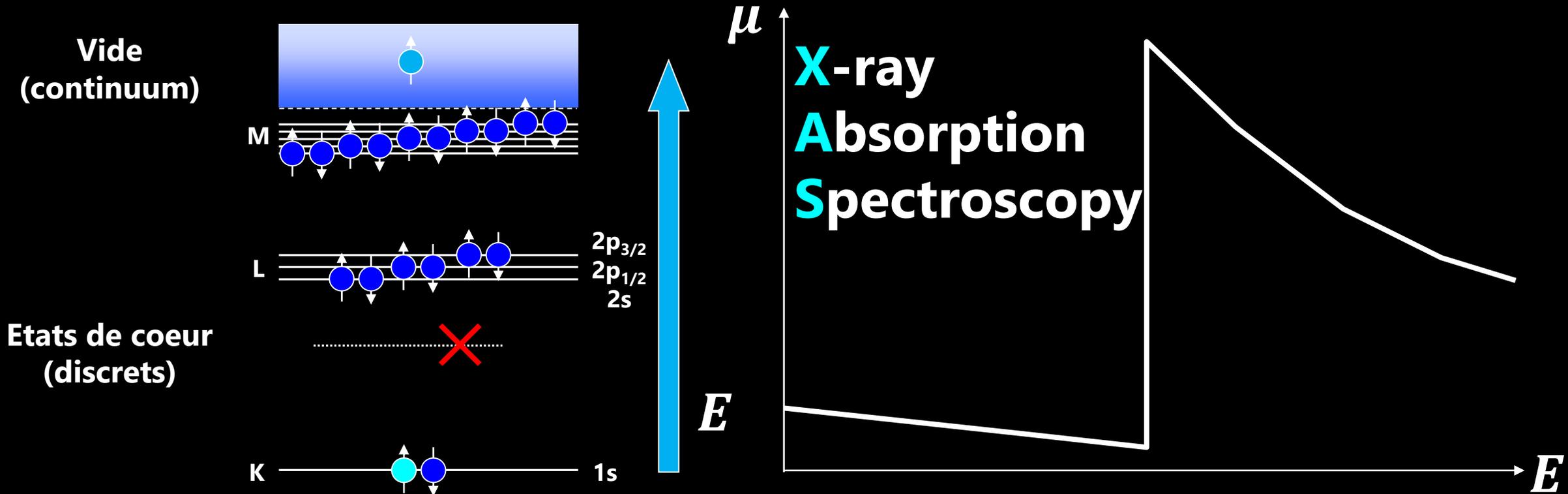
**Yes!**



# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



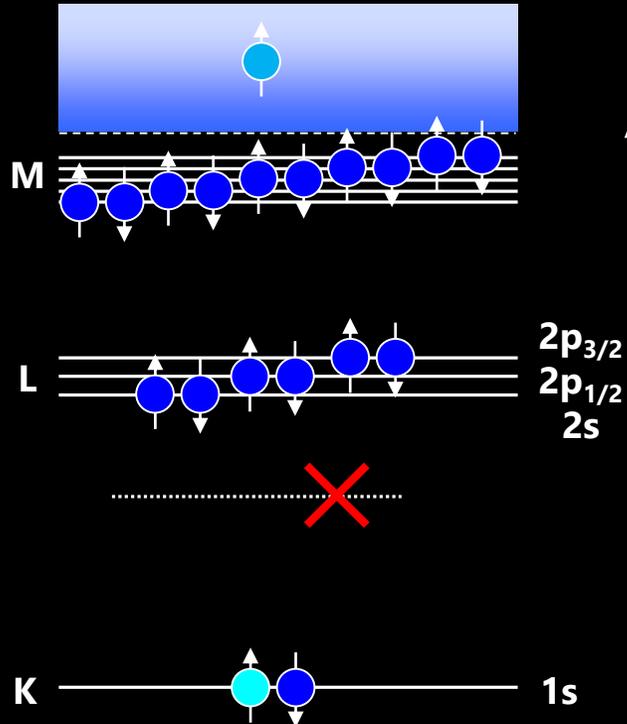
# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$



# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$

## Photo-électron

Vide  
(continuum)



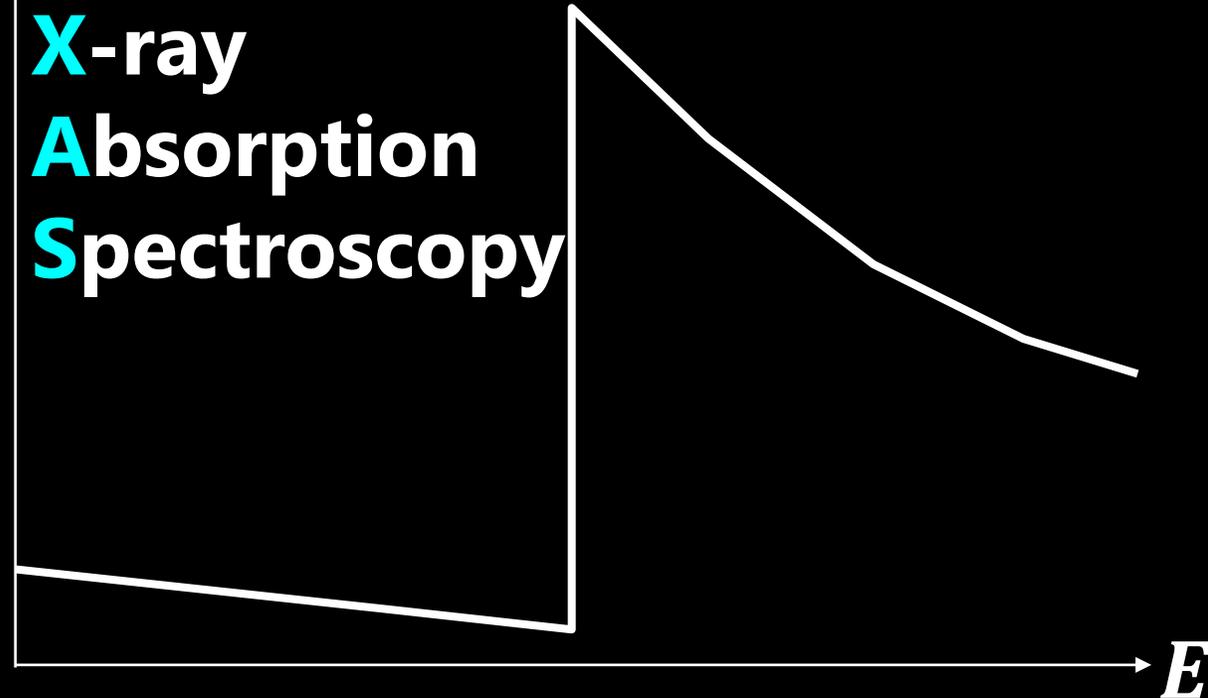
Etats de coeur  
(discrets)



$E$

$\mu$

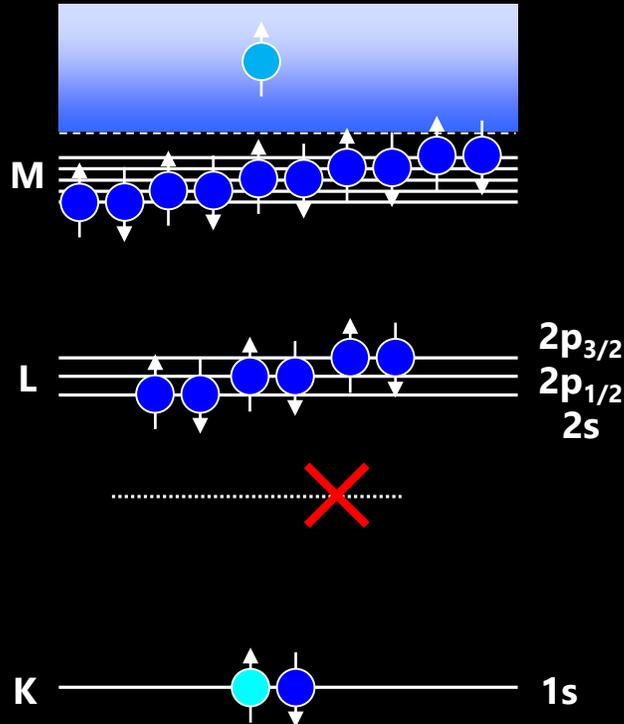
X-ray  
Absorption  
Spectroscopy



# Absorption phase solide : augmentation forte de $\mu$

## Photo-électron

Vide  
(continuum)



Etats de coeur  
(discrets)

$\mu$

X-ray  
Absorption  
Spectroscopy

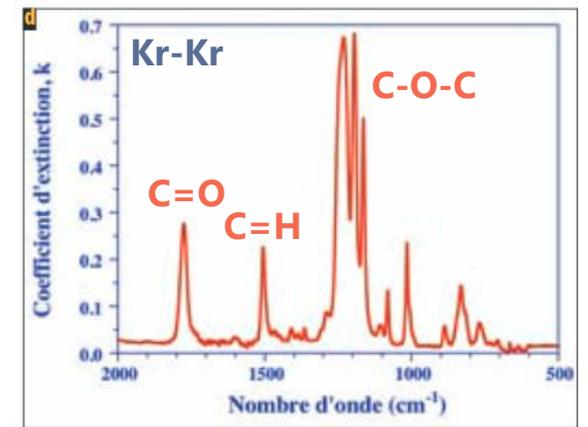
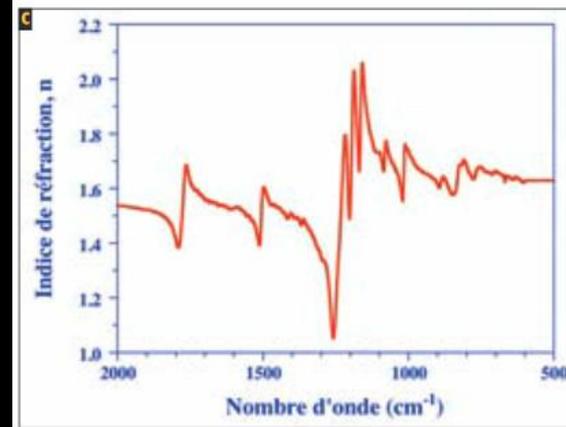
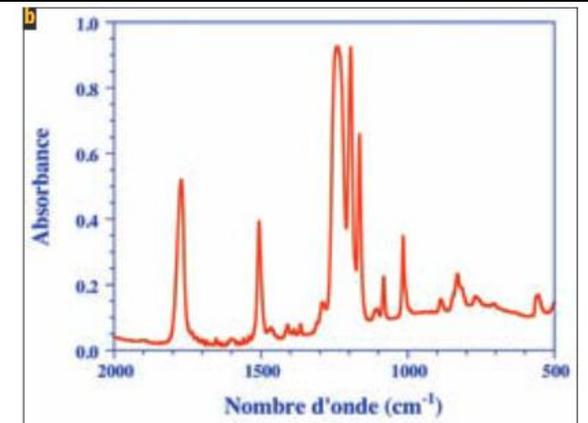
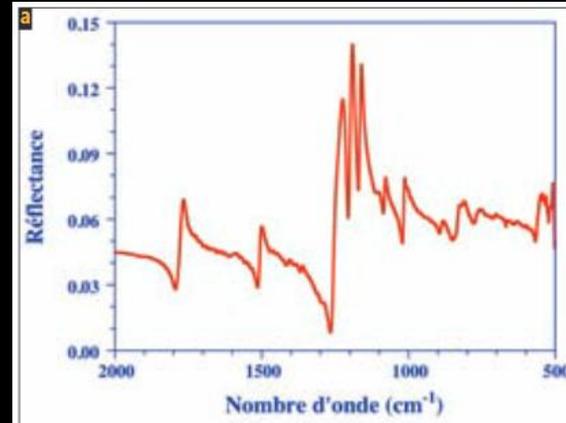
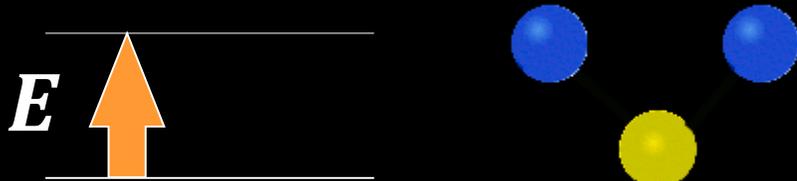
$E$

$E$

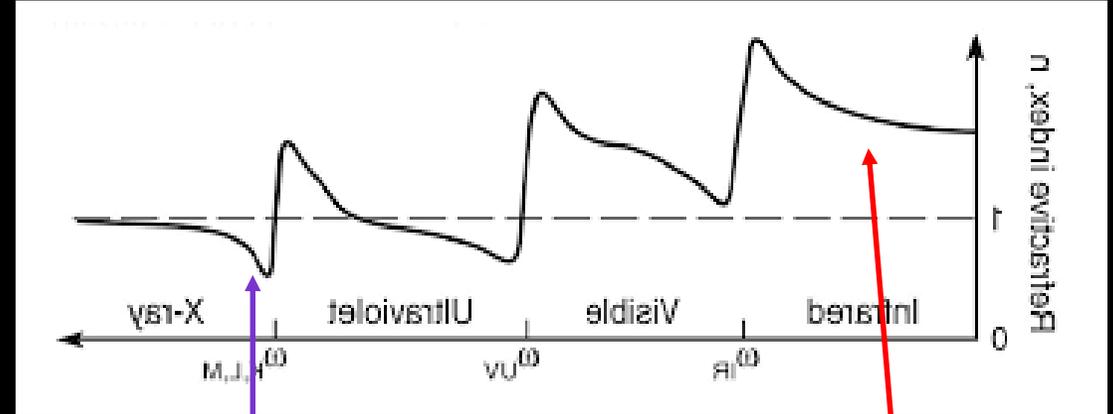
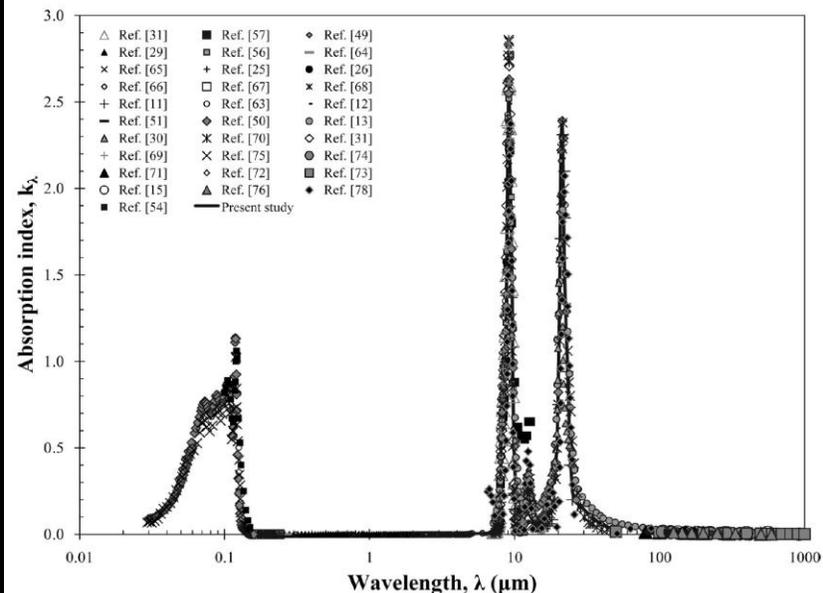
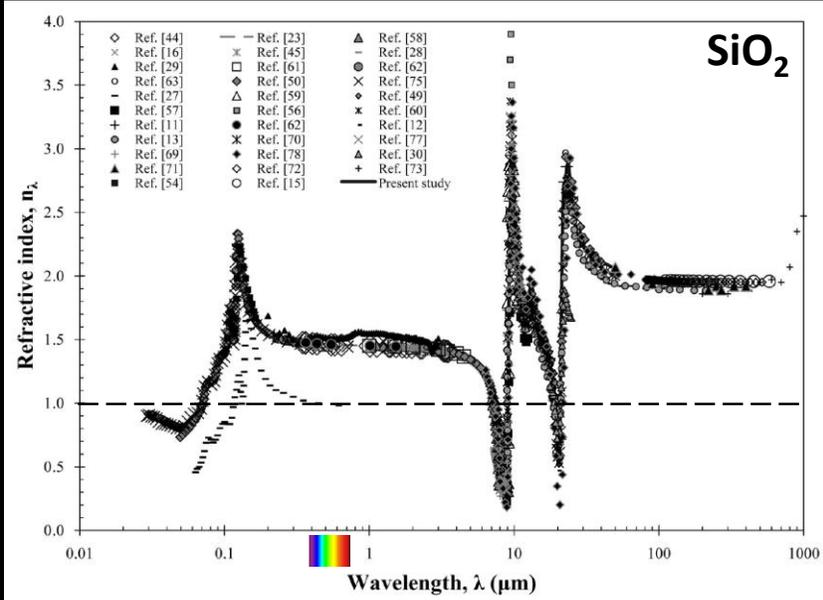
Element specific  
K-edge, L-edge, etc.

# Absorption infrarouge

Infrarouge absorbé à la résonance  
des vibrations moléculaires  
(qui font varier le moment dipolaire)



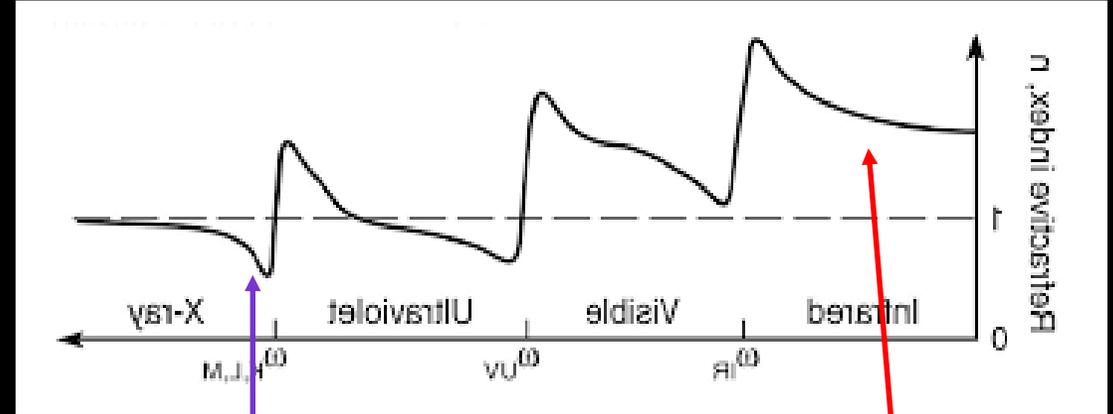
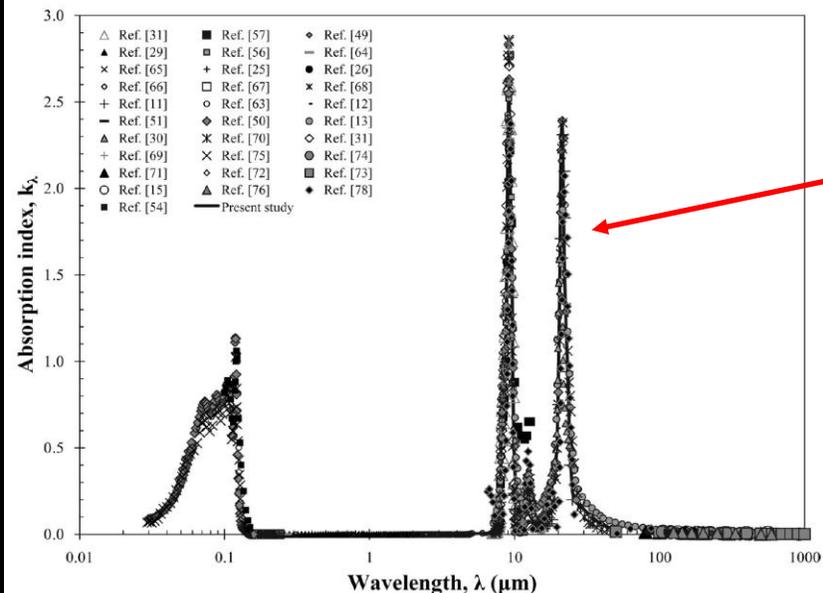
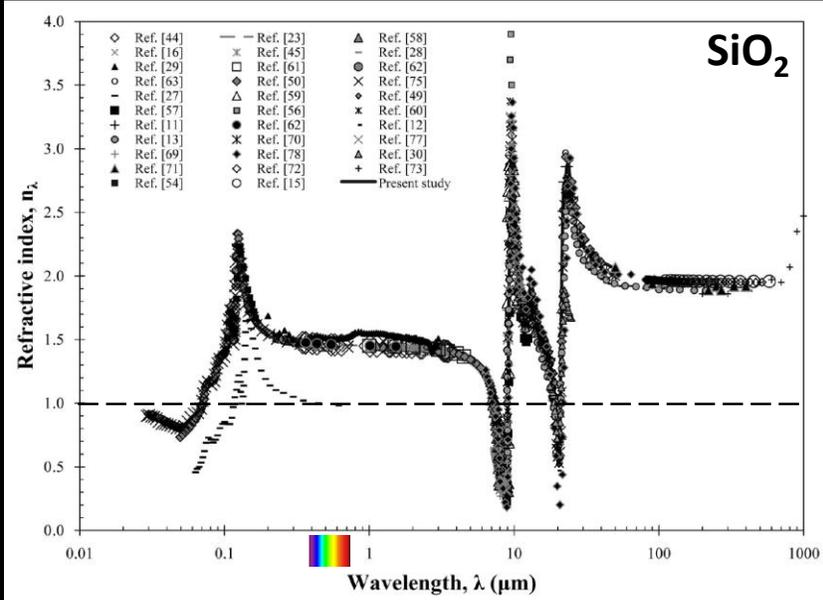
# Dispersion-absorption



Faibles indices dans l'UV et RX  
 $n < 1$  !

Forts indices dans l'IR

# Dispersion-absorption



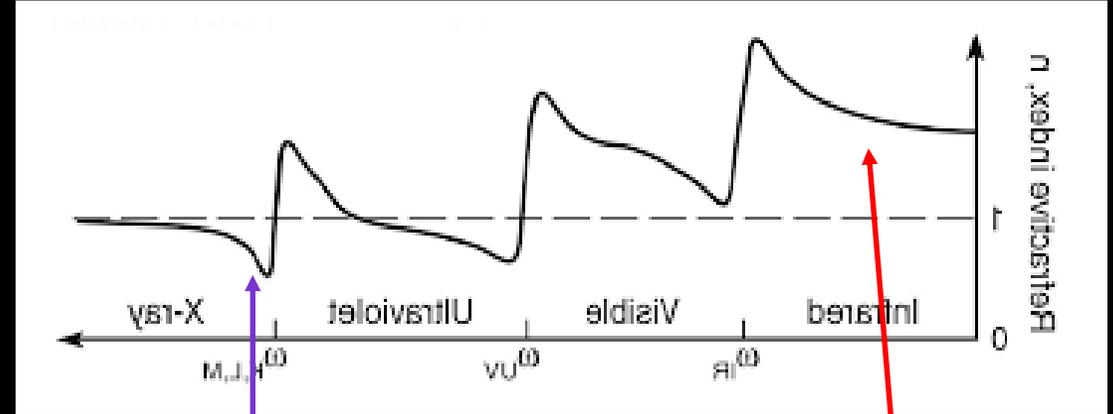
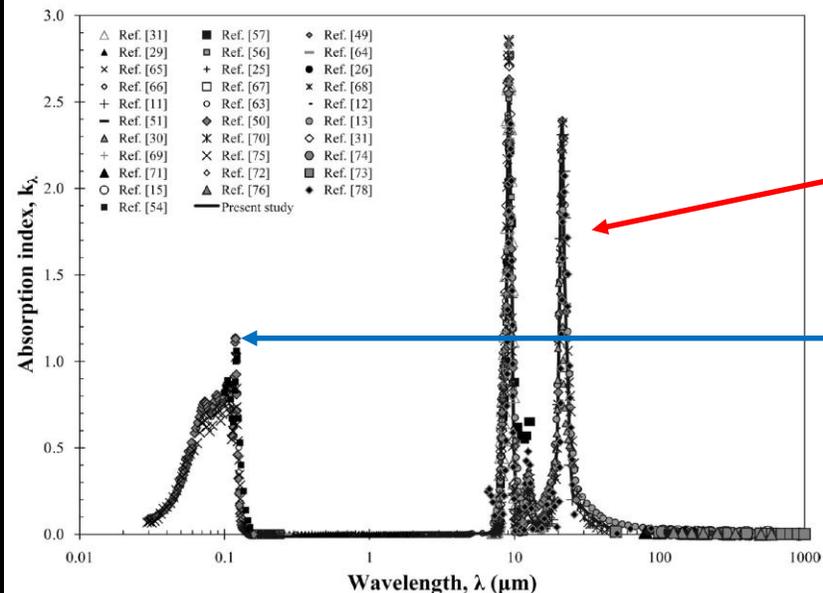
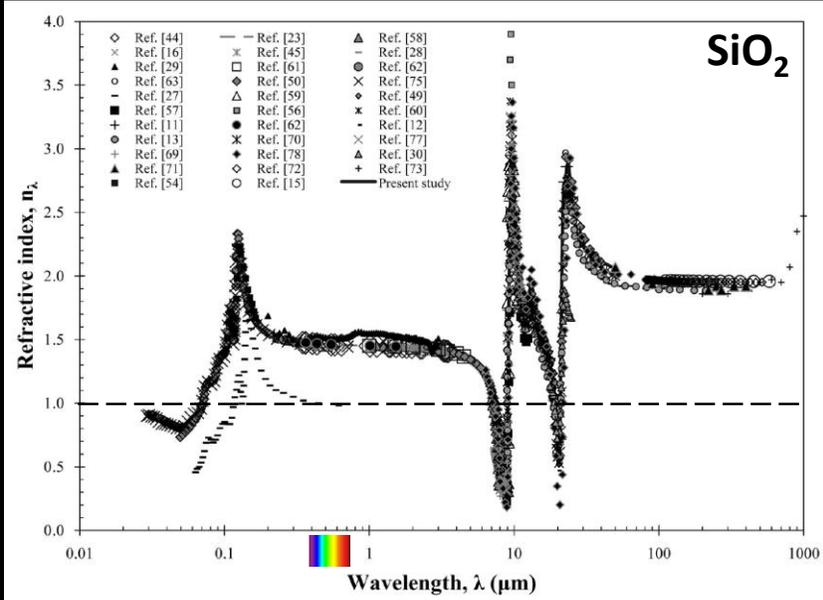
Faibles indices dans l'UV et RX  
 $n < 1$  !

Forts indices dans l'IR

Diverses résonances des vibrations des ponts Si-O-Si :



# Dispersion-absorption



Faibles indices dans l'UV et RX  
 $n < 1$  !

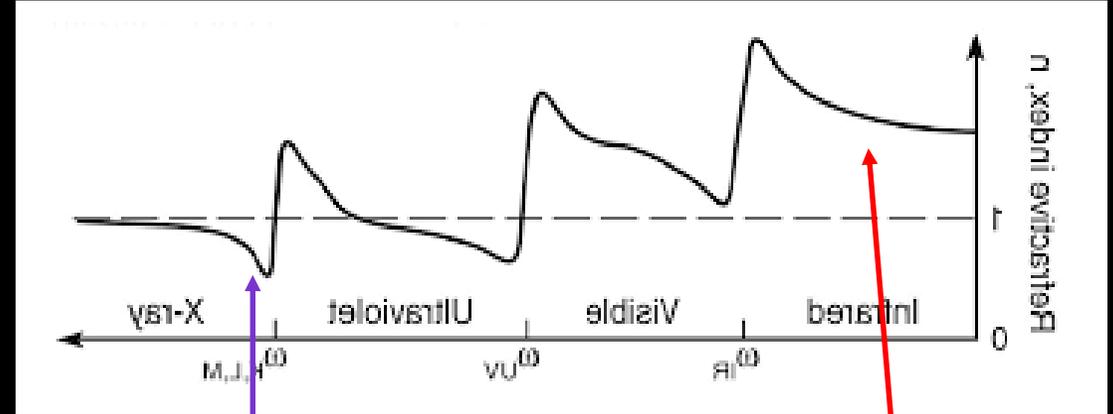
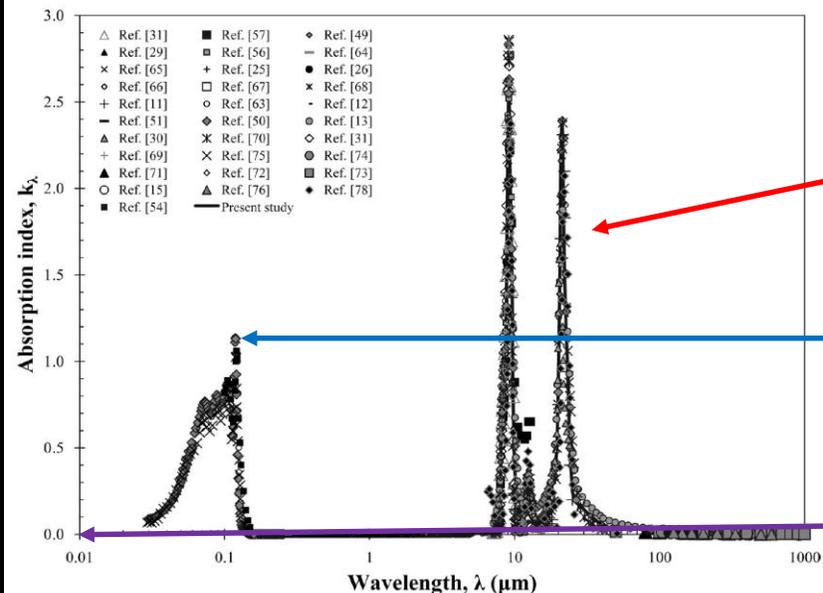
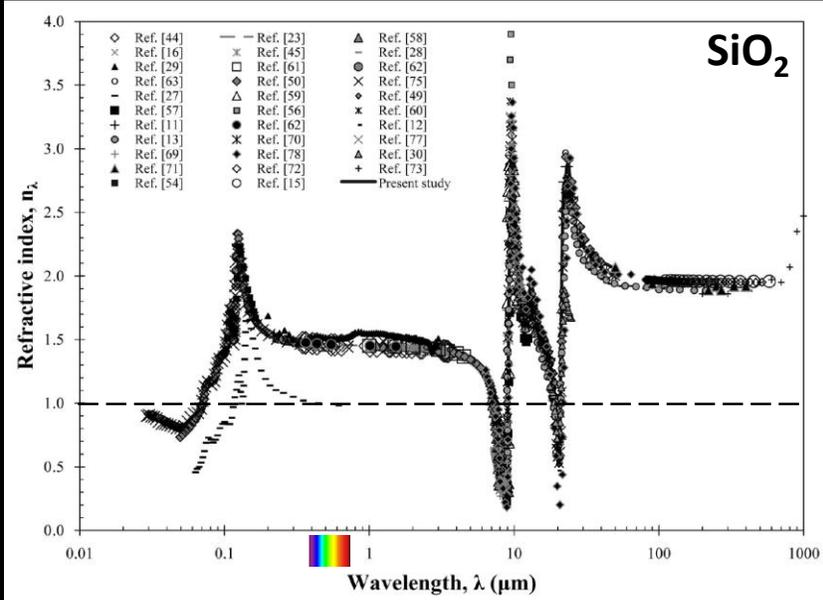
Forts indices dans l'IR

Diverses résonances des vibrations des ponts Si-O-Si :



Absorption électrons de liaison Si-O + défauts

# Dispersion-absorption



Faibles indices dans l'UV et RX  
 $n < 1$  !

Forts indices dans l'IR

Diverses résonances des vibrations des ponts Si-O-Si :

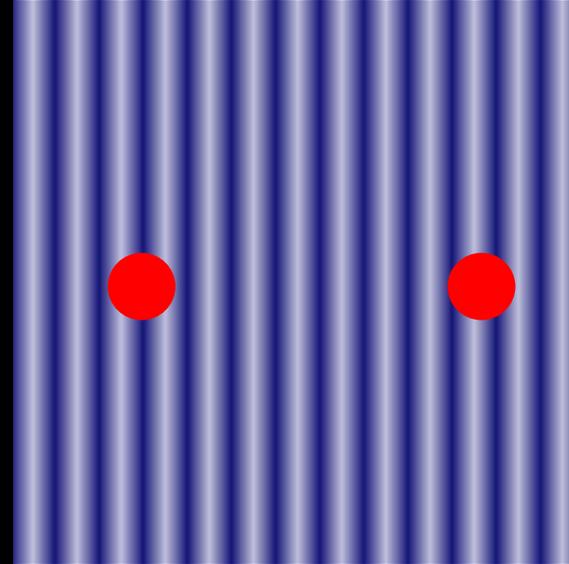
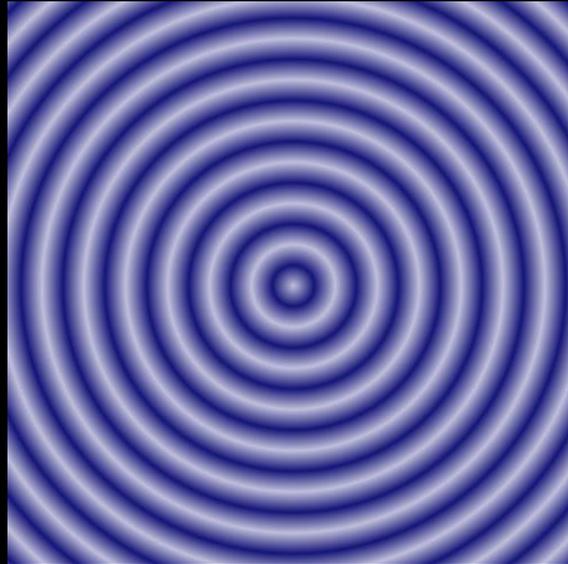


Absorption électrons de liaison Si-O + défauts

Absorption électrons des couches profondes de Si et O

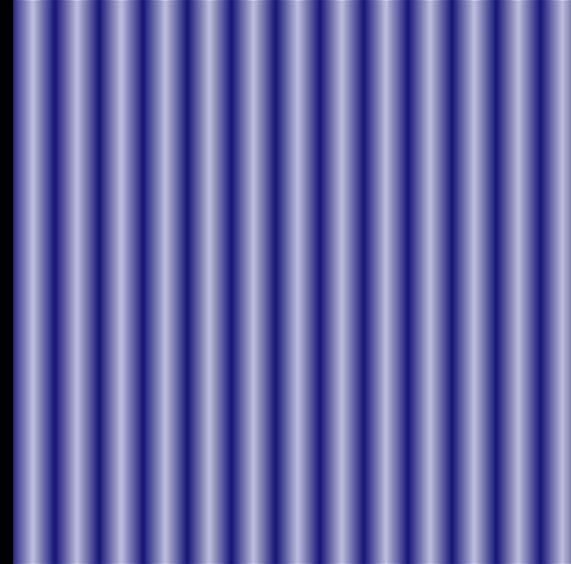
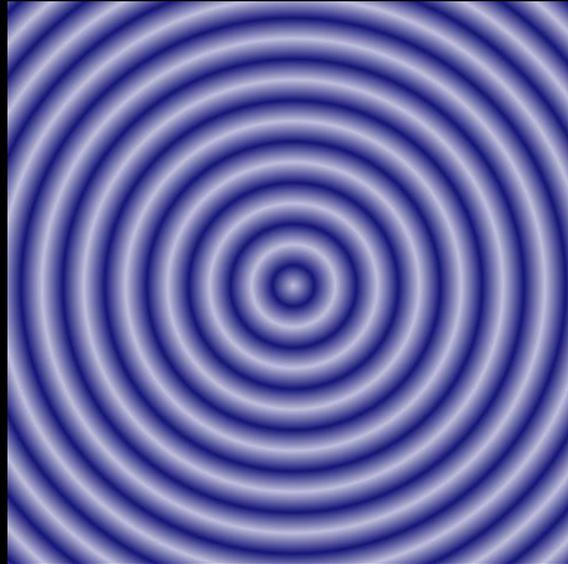
# Qu'est-ce que la cohérence?

Une onde est cohérente si elle est **parfaitement** plane ou sphérique ou...



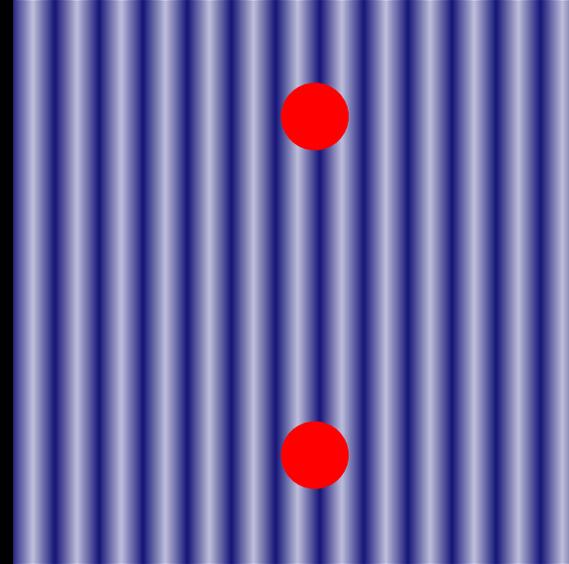
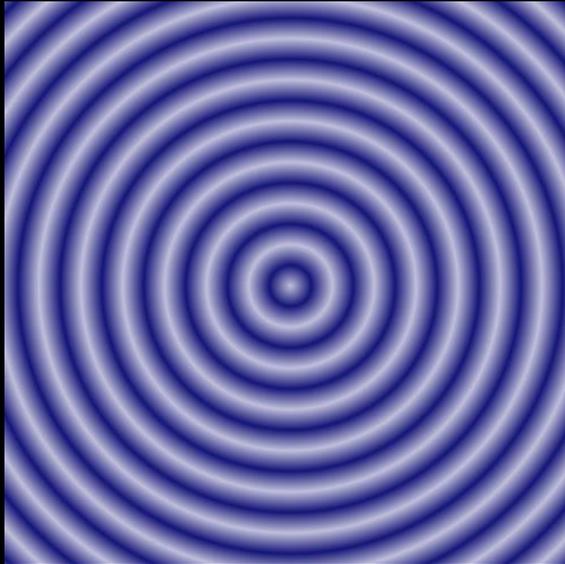
# Qu'est-ce que la cohérence?

Une onde est cohérente si elle est **parfaitement** plane ou sphérique ou...



# Qu'est-ce que la cohérence?

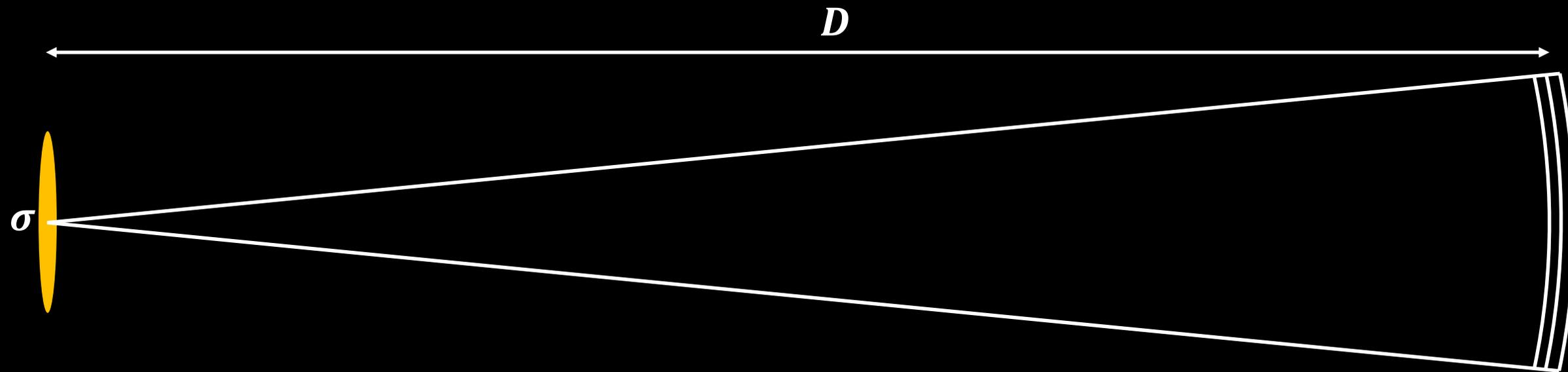
Une onde est cohérente si elle est parfaitement plane ou sphérique ou...



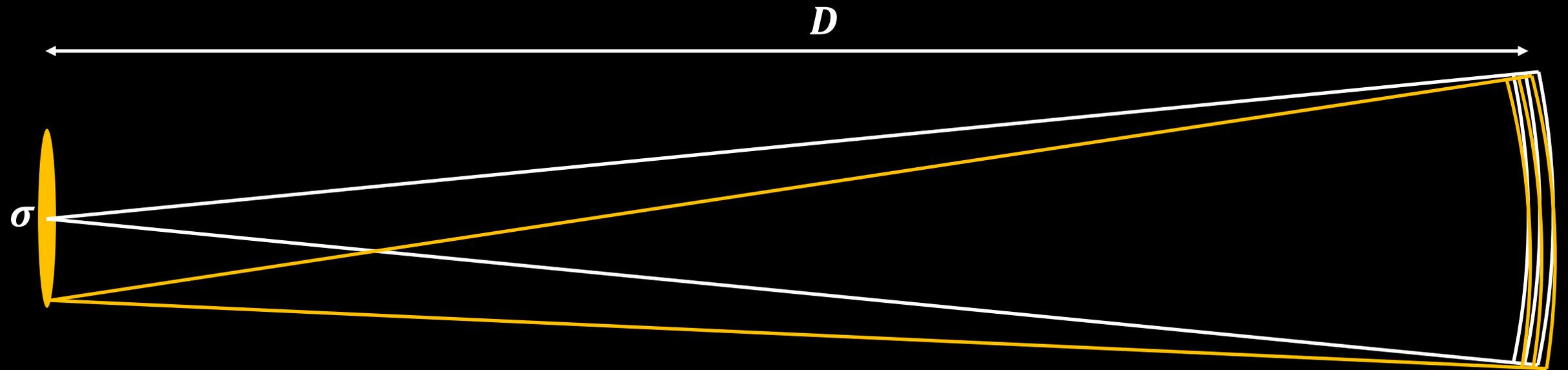
**Corrélation du champ entre deux points :**

- **Dans la direction du faisceau : cohérence longitudinale (temporelle)**
  - **Transversalement : cohérence transverse**

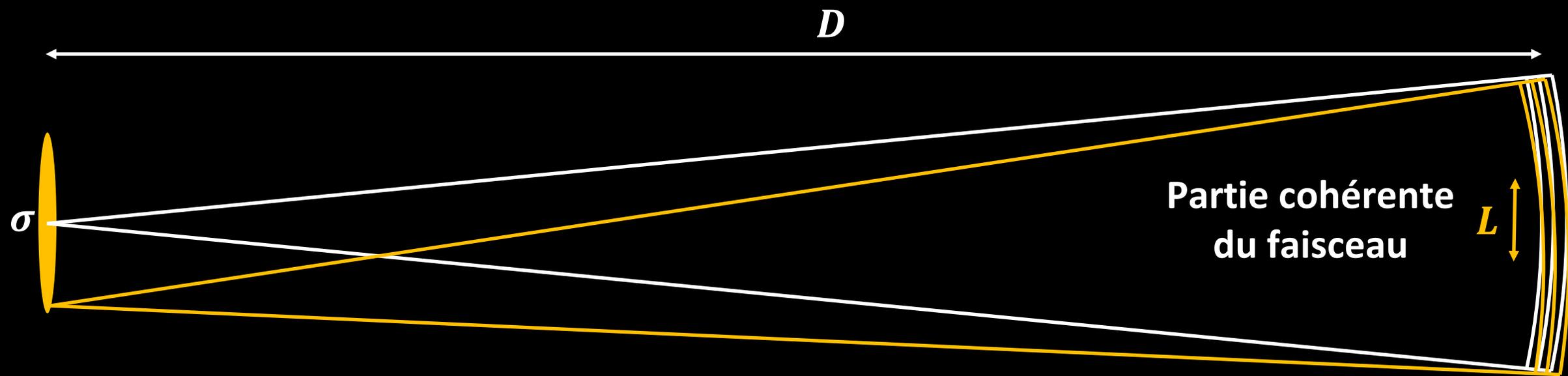
# Brillance et Cohérence



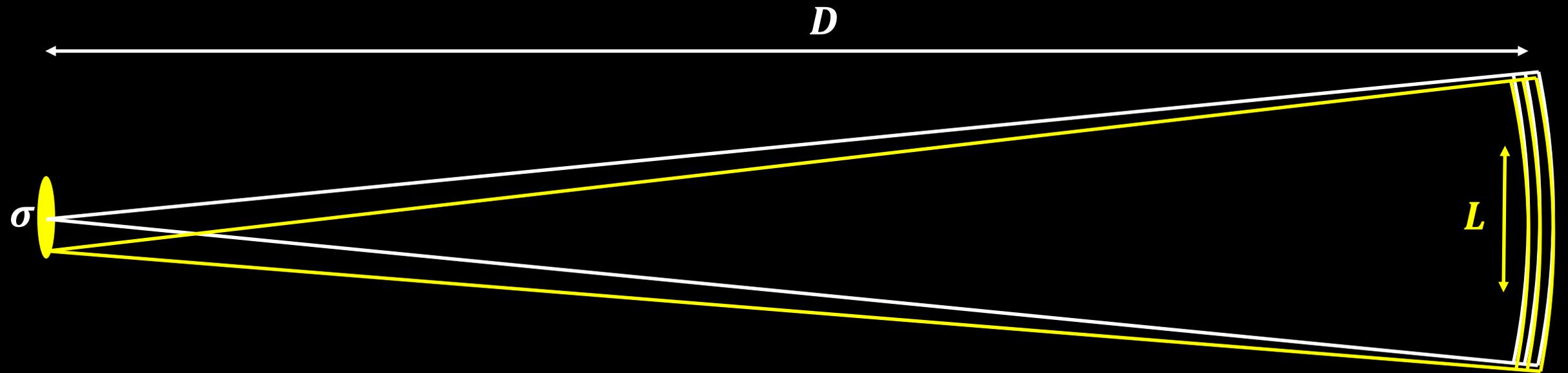
# Brillance et Cohérence



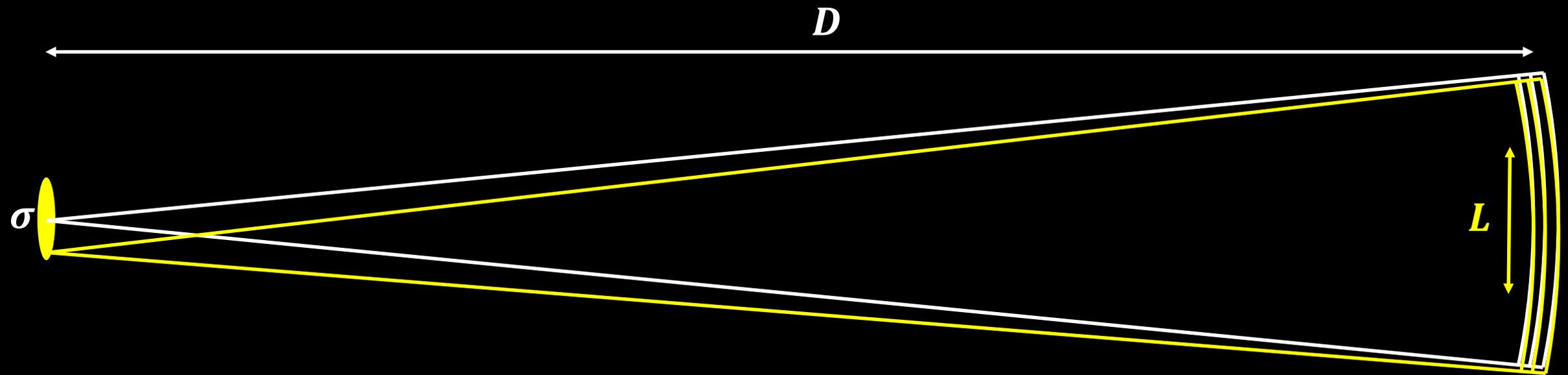
# Brillance et Cohérence



# Brillance et Cohérence

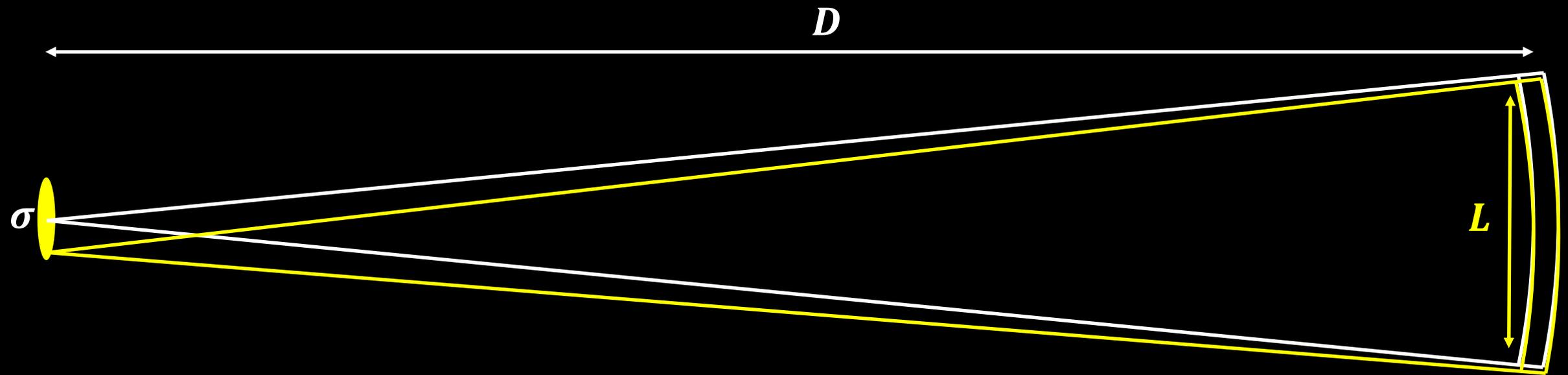


# Brillance et Cohérence



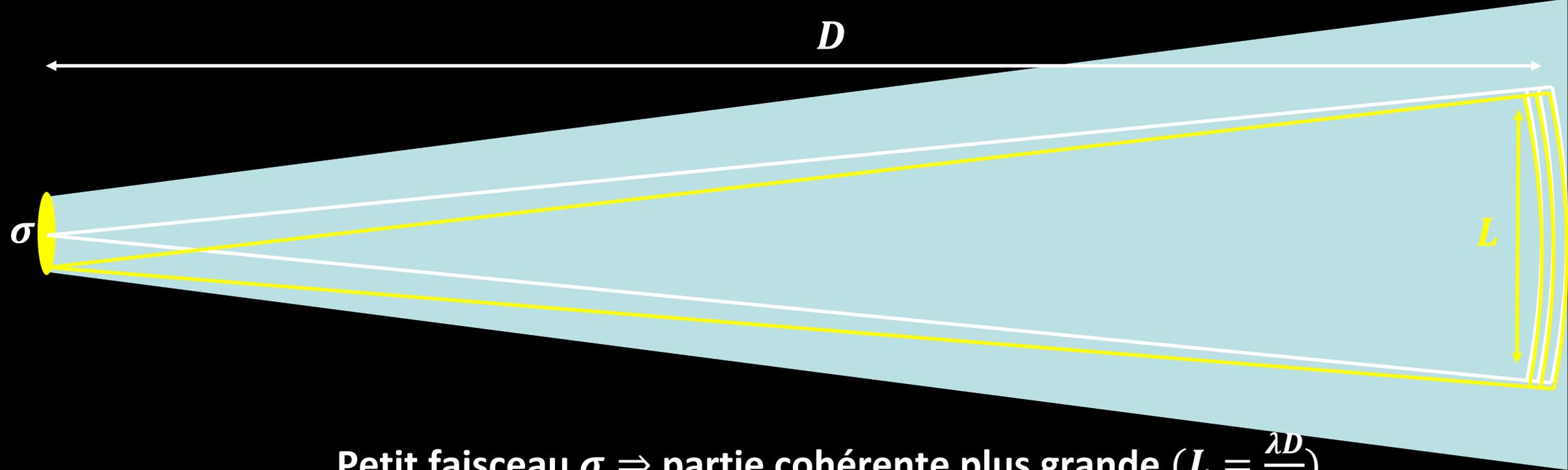
Petit faisceau  $\sigma \Rightarrow$  partie cohérente plus grande ( $L = \frac{\lambda D}{\sigma}$ )

# Brillance et Cohérence



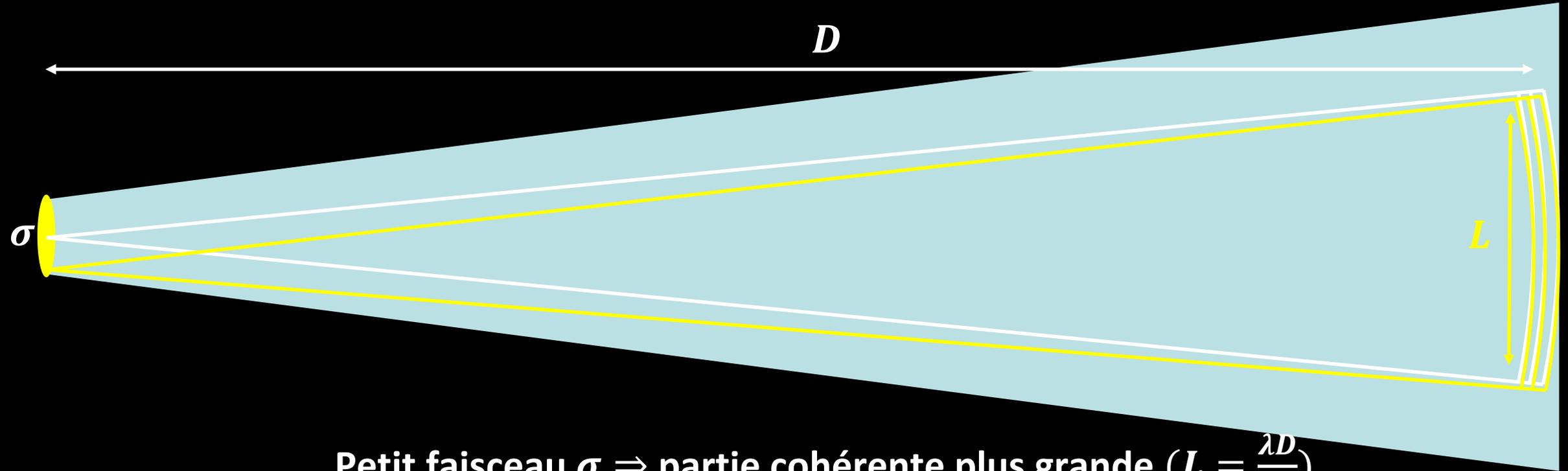
Petit faisceau  $\sigma \Rightarrow$  partie cohérente plus grande ( $L = \frac{\lambda D}{\sigma}$ )

# Brillance et Cohérence



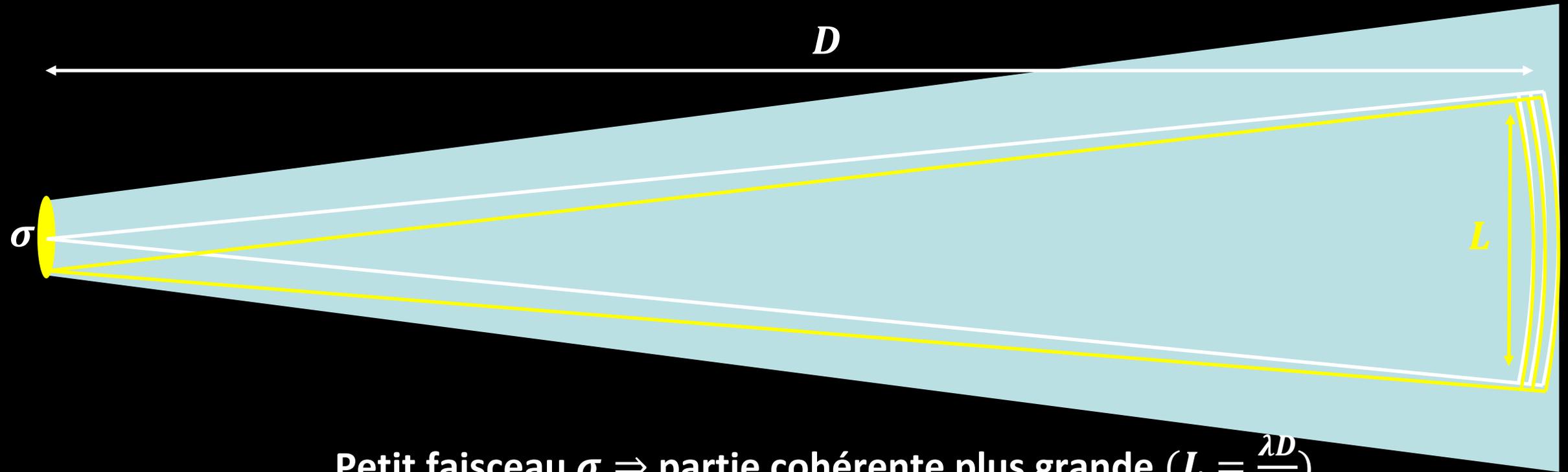
Petit faisceau  $\sigma \Rightarrow$  partie cohérente plus grande ( $L = \frac{\lambda D}{\sigma}$ )

# Brillance et Cohérence



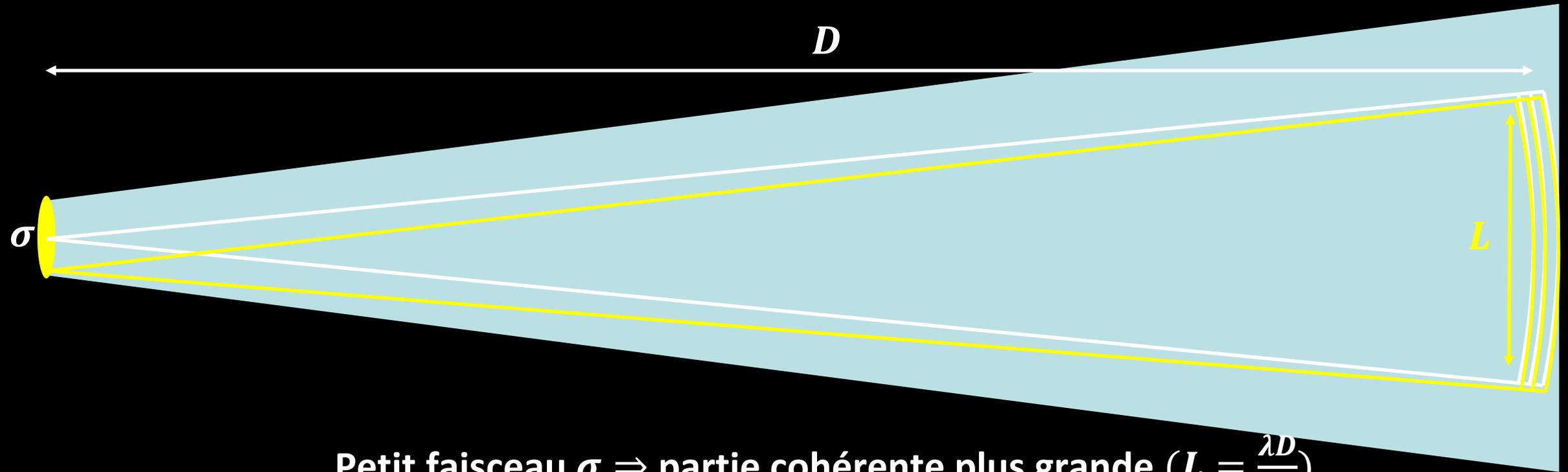
**Petit faisceau  $\sigma \Rightarrow$  partie cohérente plus grande ( $L = \frac{\lambda D}{\sigma}$ )**  
**Petite divergence  $\sigma' \Rightarrow$  plus de flux dans la partie cohérente**

# Brillance et Cohérence



Petit faisceau  $\sigma \Rightarrow$  partie cohérente plus grande ( $L = \frac{\lambda D}{\sigma}$ )  
Petite divergence  $\sigma' \Rightarrow$  plus de flux dans la partie cohérente  
Limite de diffraction  $\sigma\sigma' = \frac{\lambda}{4\pi}$

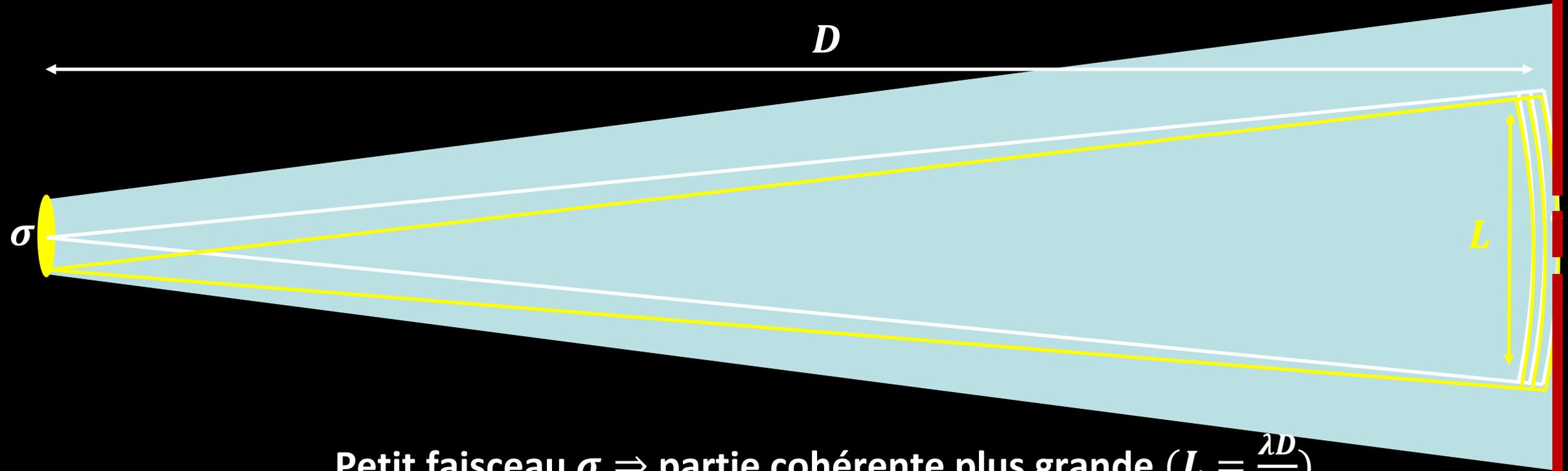
# Brillance et Cohérence



Petit faisceau  $\sigma \Rightarrow$  partie cohérente plus grande ( $L = \frac{\lambda D}{\sigma}$ )  
Petite divergence  $\sigma' \Rightarrow$  plus de flux dans la partie cohérente  
Limite de diffraction  $\sigma\sigma' = \frac{\lambda}{4\pi}$

**Les sources brillantes ( $B = I/dSd\Omega$ ) sont plus cohérentes !**

# Brillance et Cohérence



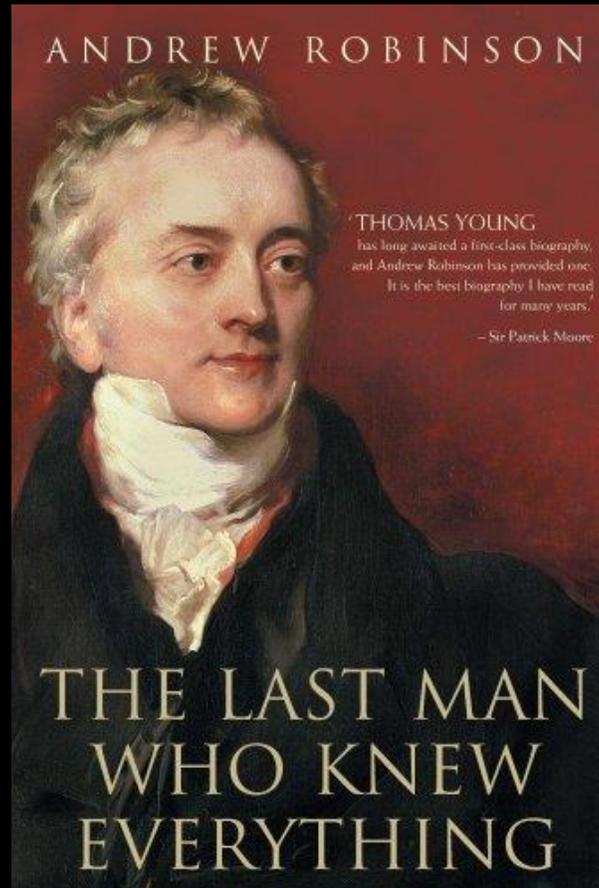
Petit faisceau  $\sigma \Rightarrow$  partie cohérente plus grande ( $L = \frac{\lambda D}{\sigma}$ )  
Petite divergence  $\sigma' \Rightarrow$  plus de flux dans la partie cohérente  
Limite de diffraction  $\sigma\sigma' = \frac{\lambda}{4\pi}$

**Les sources brillantes ( $B = I/dSd\Omega$ ) sont plus cohérentes !**

Un objet ne diffracte que **s'il est plus petit que  $L$**

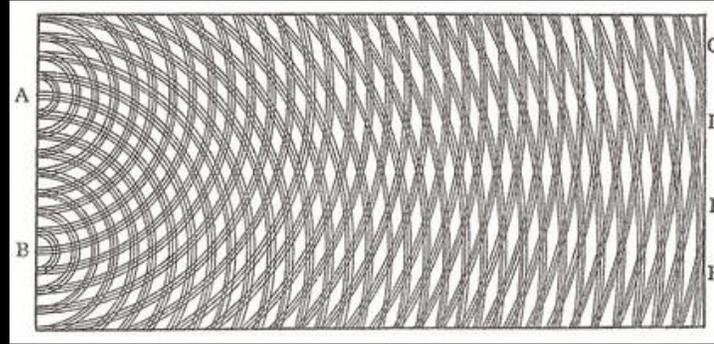
# 1801 : Thomas Young découvre les interférences

En 1802, il démontre les effets d'interférence grâce à sa  
**Cuve à ondes** (ripple tank)



# 1801 : Thomas Young découvre les interférences

En 1802, il démontre les effets d'interférence grâce à sa  
**Cuve à ondes** (ripple tank)



# 1801 : Thomas Young découvre les interférences

En 1802, il démontre les effets d'interférence grâce à sa  
**Cuve à ondes** (ripple tank)



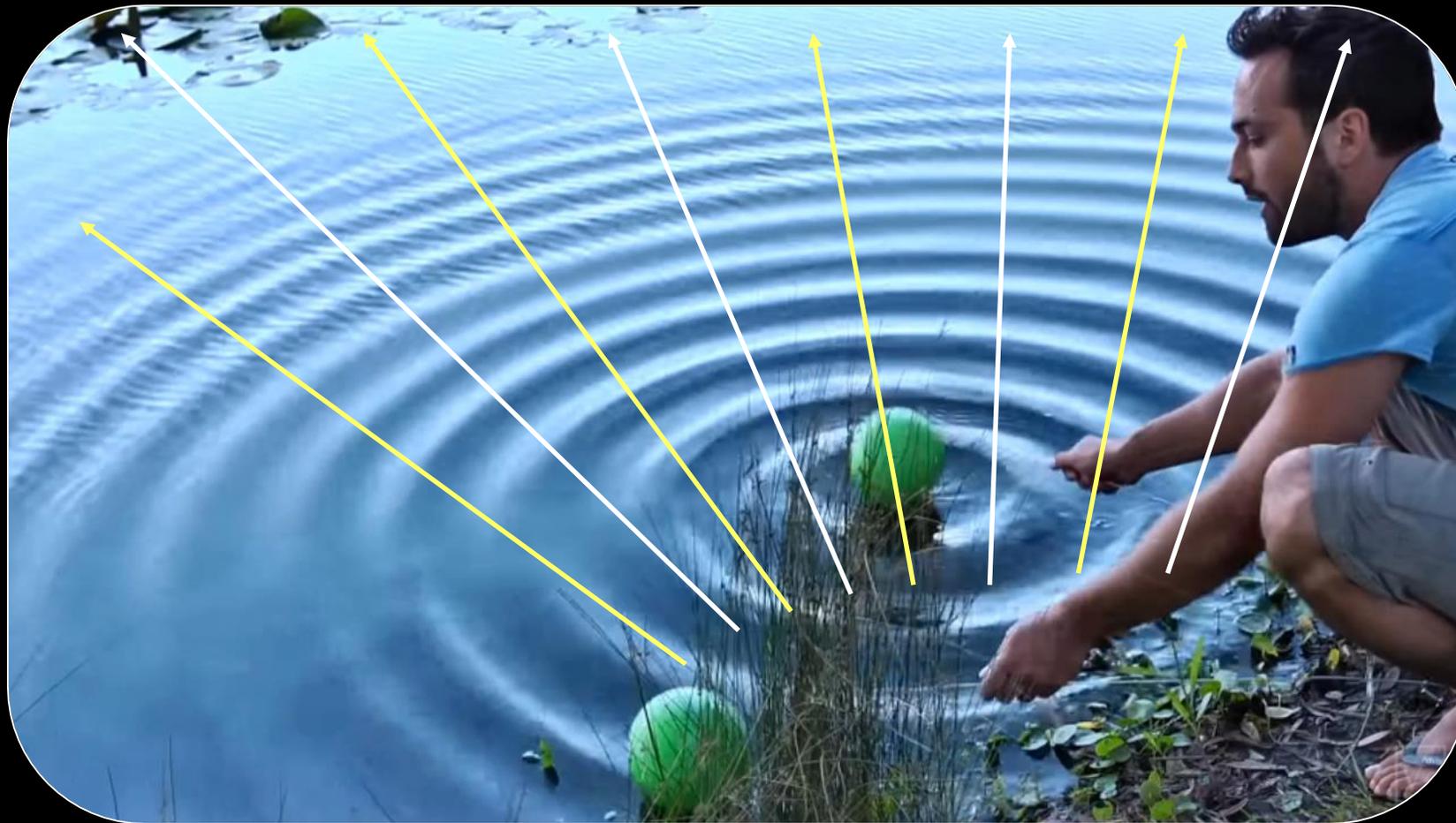
# 1801 : Thomas Young découvre les interférences

En 1802, il démontre les effets d'interférence grâce à sa  
**Cuve à ondes** (ripple tank)

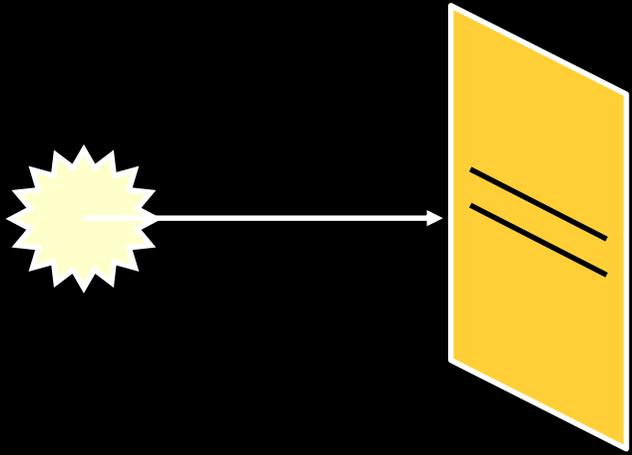


# 1801 : Thomas Young découvre les interférences

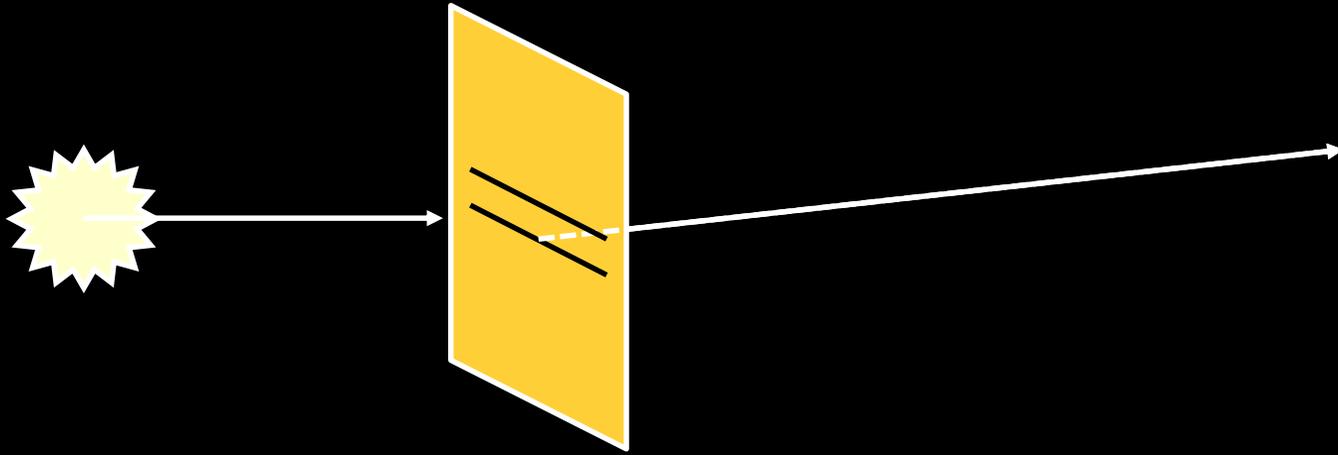
En 1802, il démontre les effets d'interférence grâce à sa  
**Cuve à ondes** (ripple tank)



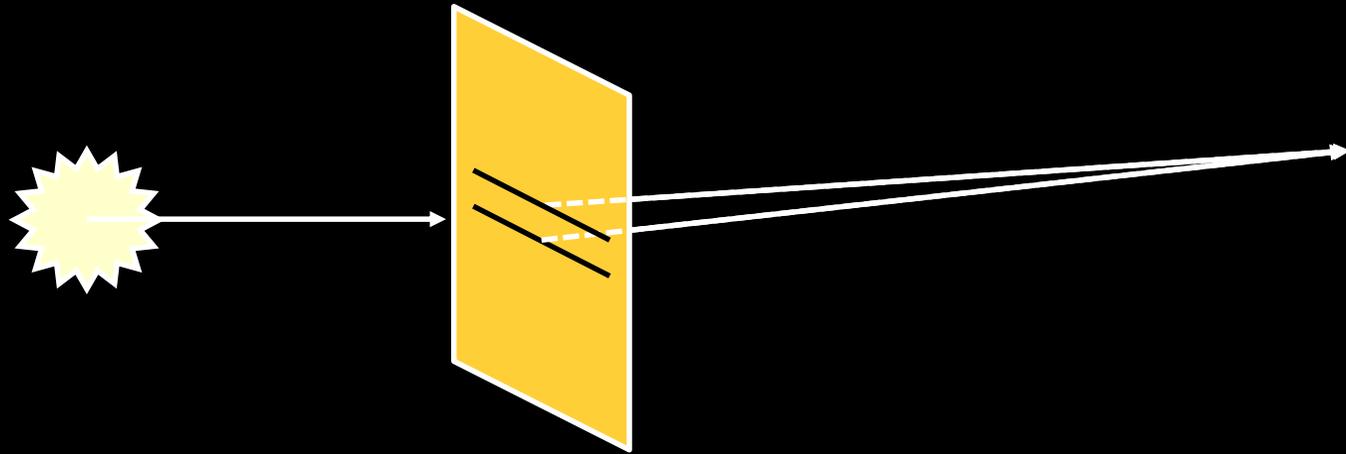
# L'expérience des trous d'Young



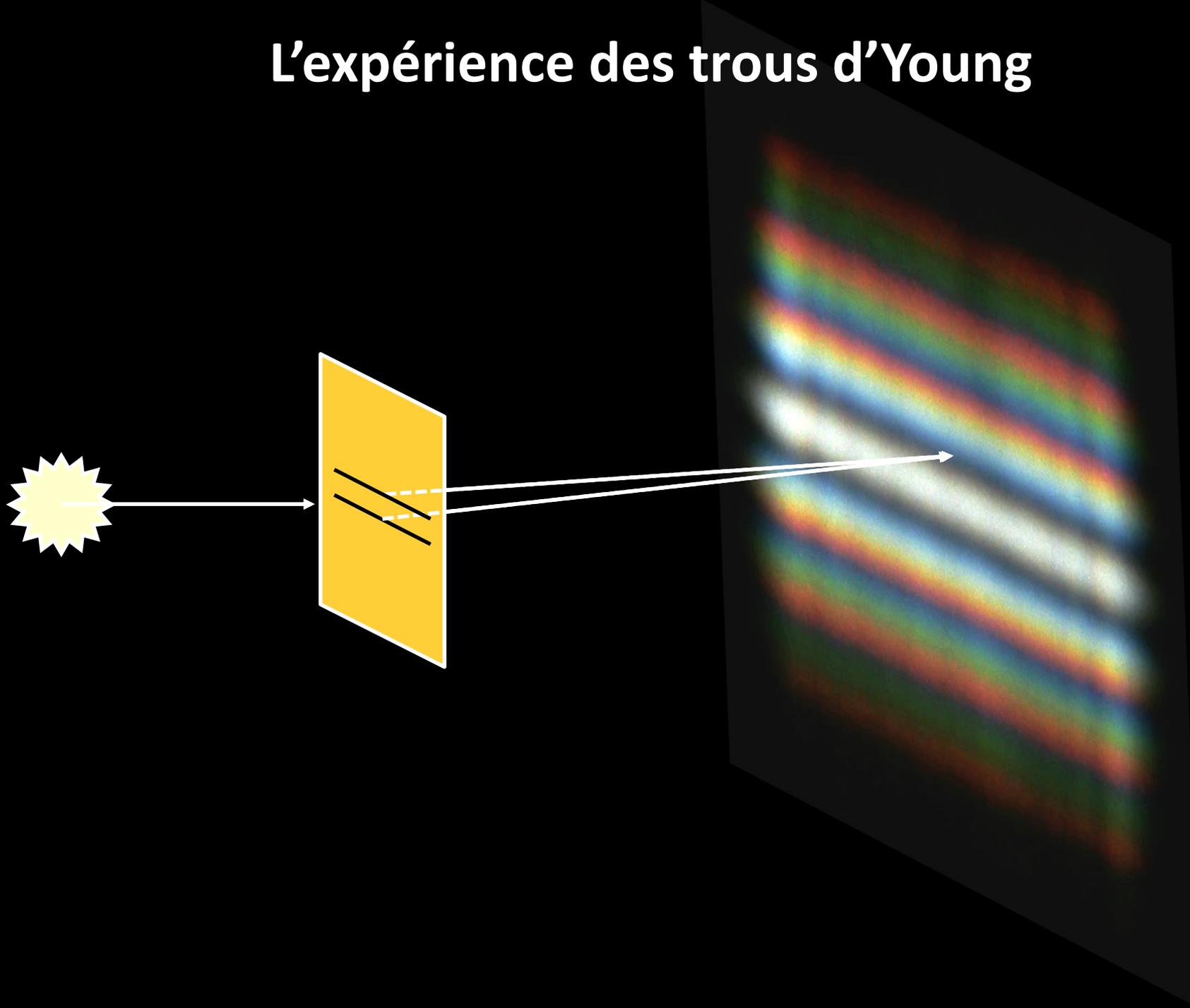
# L'expérience des trous d'Young



# L'expérience des trous d'Young

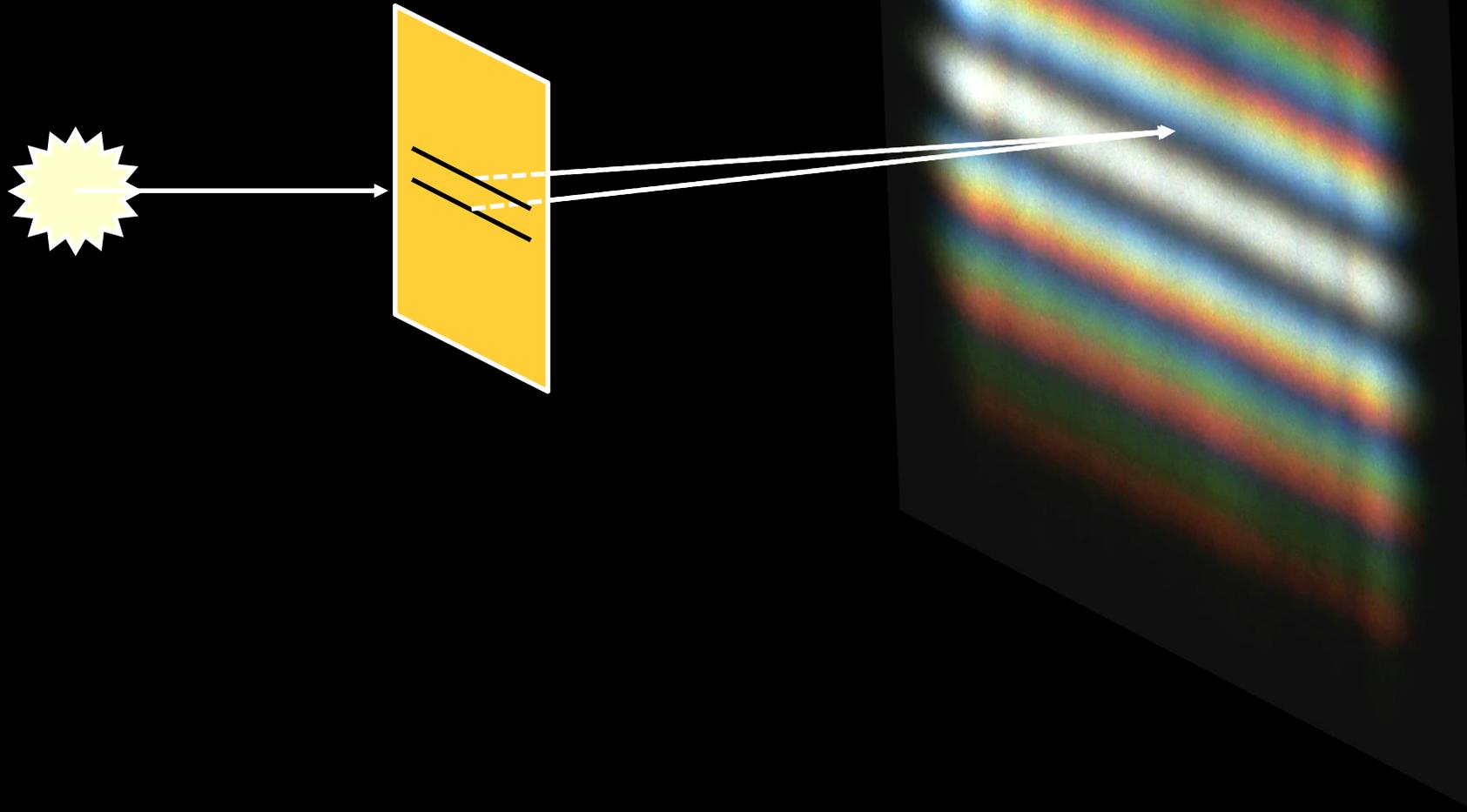


# L'expérience des trous d'Young



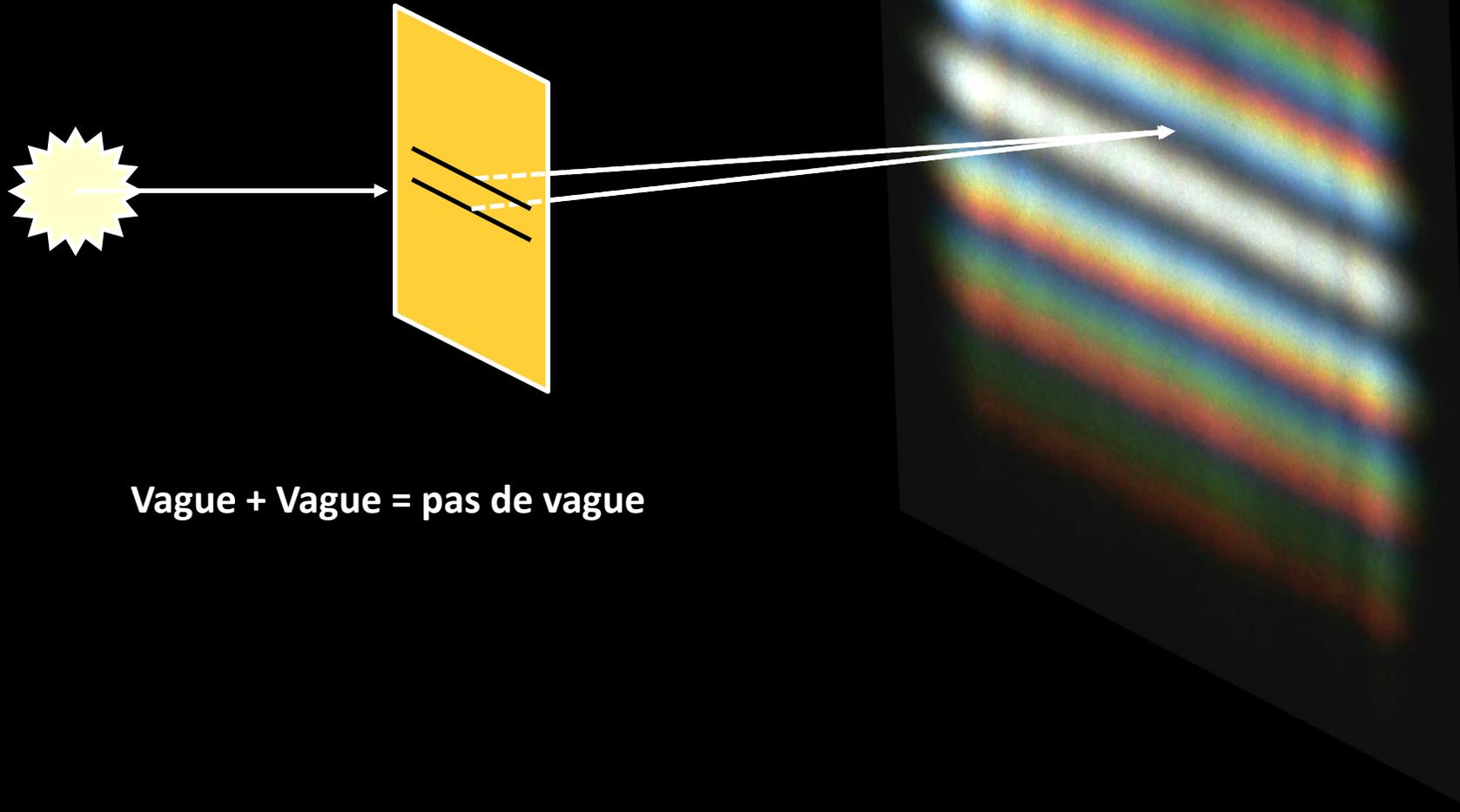
# L'expérience des trous d'Young

Lumière + lumière = pas de lumière



# L'expérience des trous d'Young

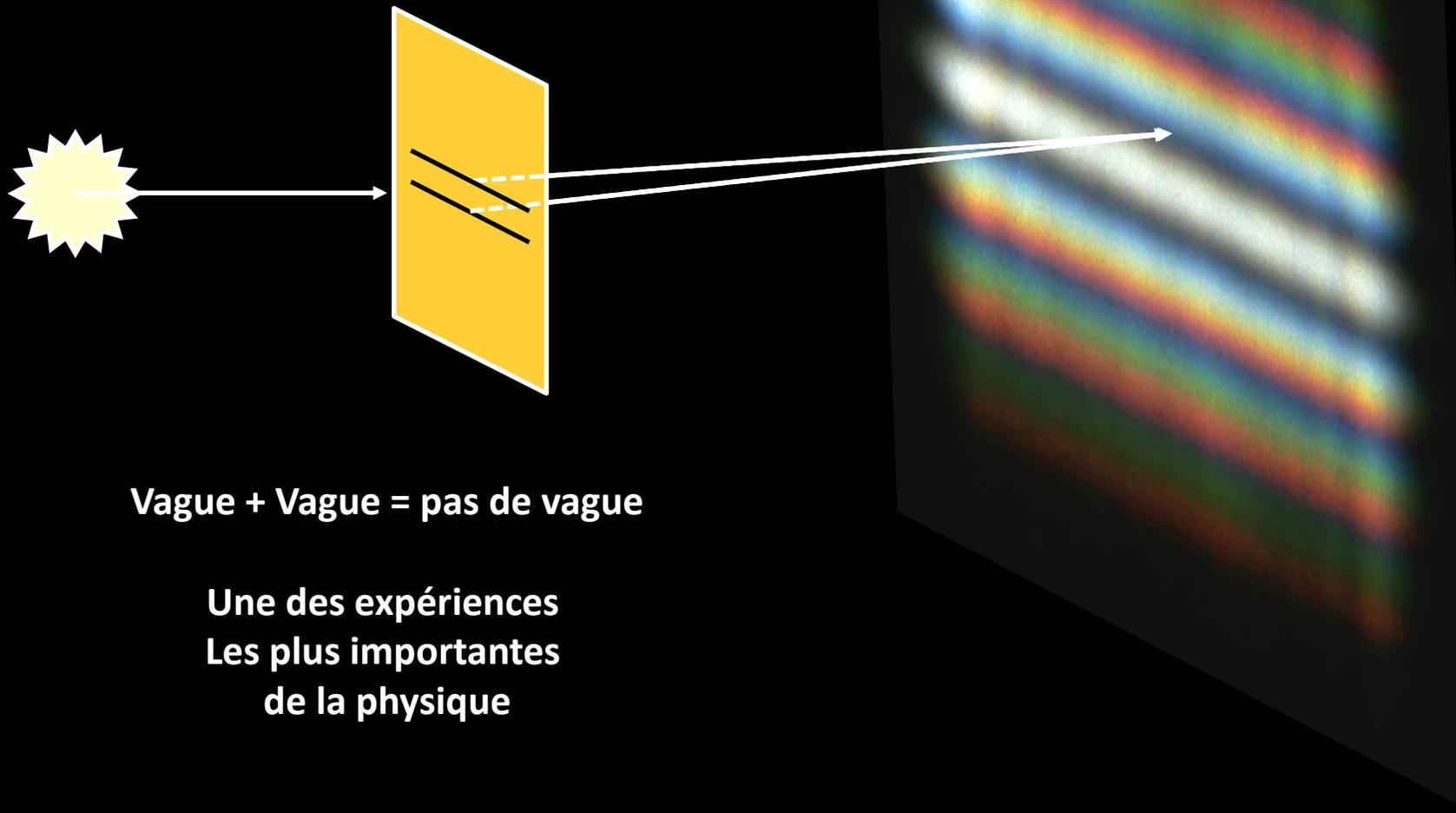
Lumière + lumière = pas de lumière



Vague + Vague = pas de vague

# L'expérience des trous d'Young

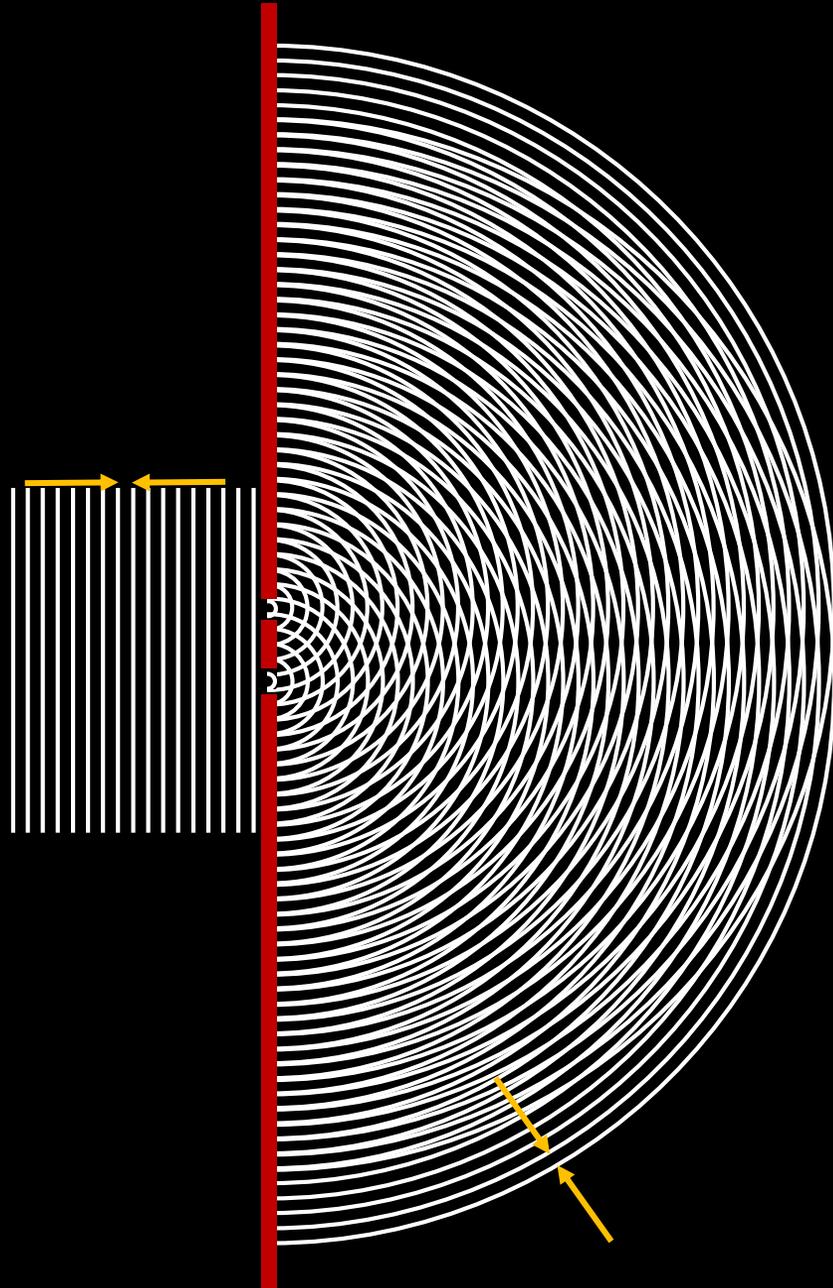
Lumière + lumière = pas de lumière



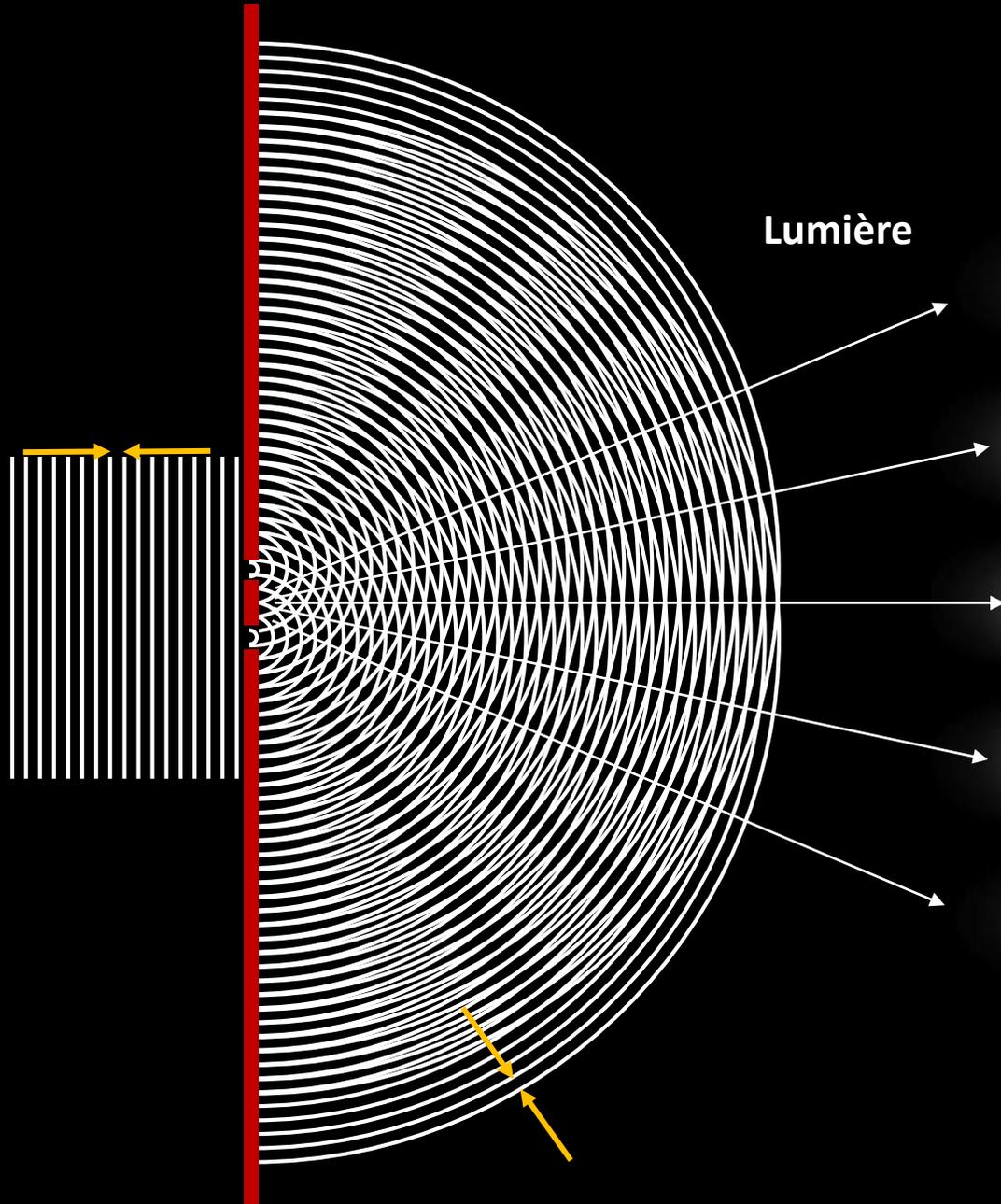
Vague + Vague = pas de vague

Une des expériences  
Les plus importantes  
de la physique

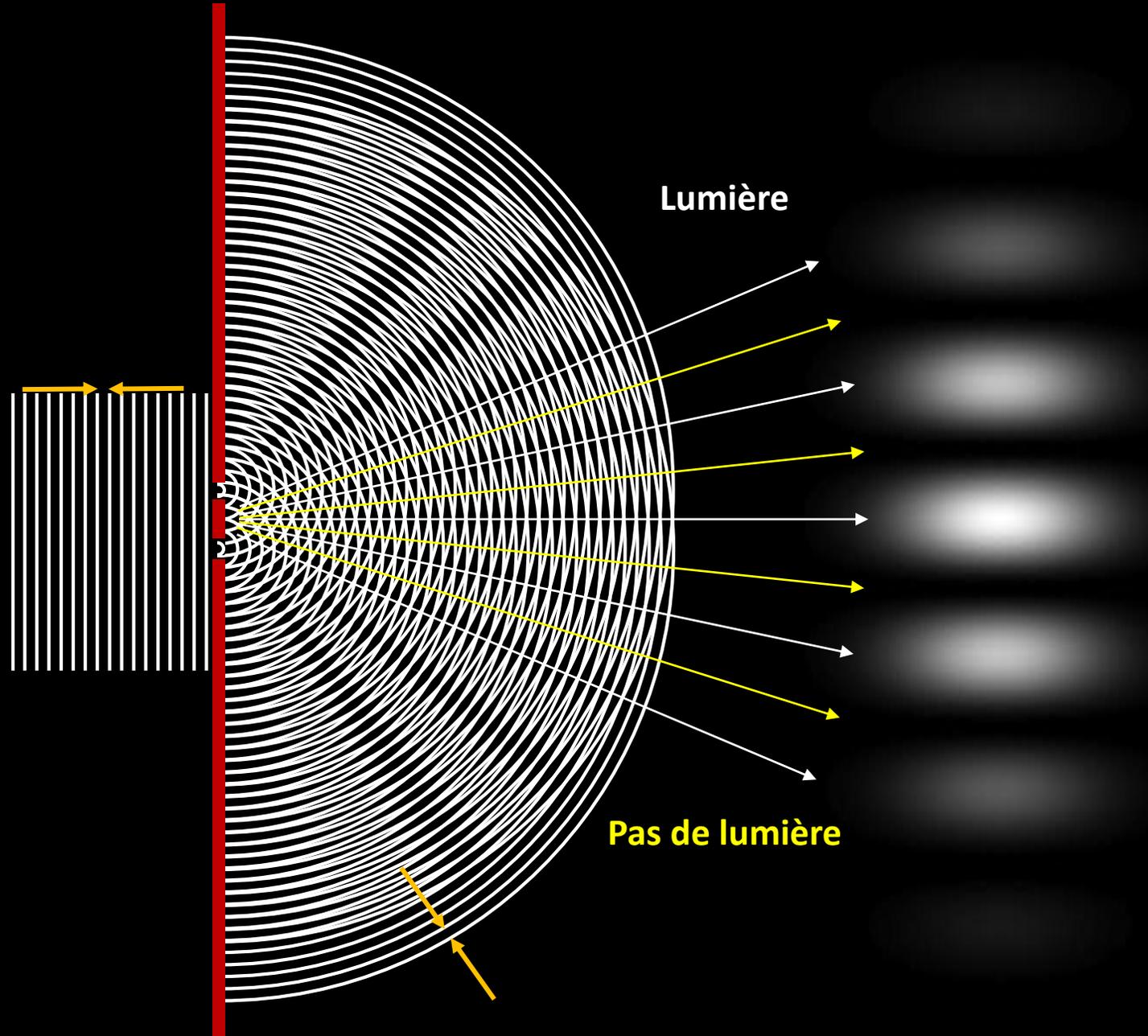
# Principe d'interférence (1803)



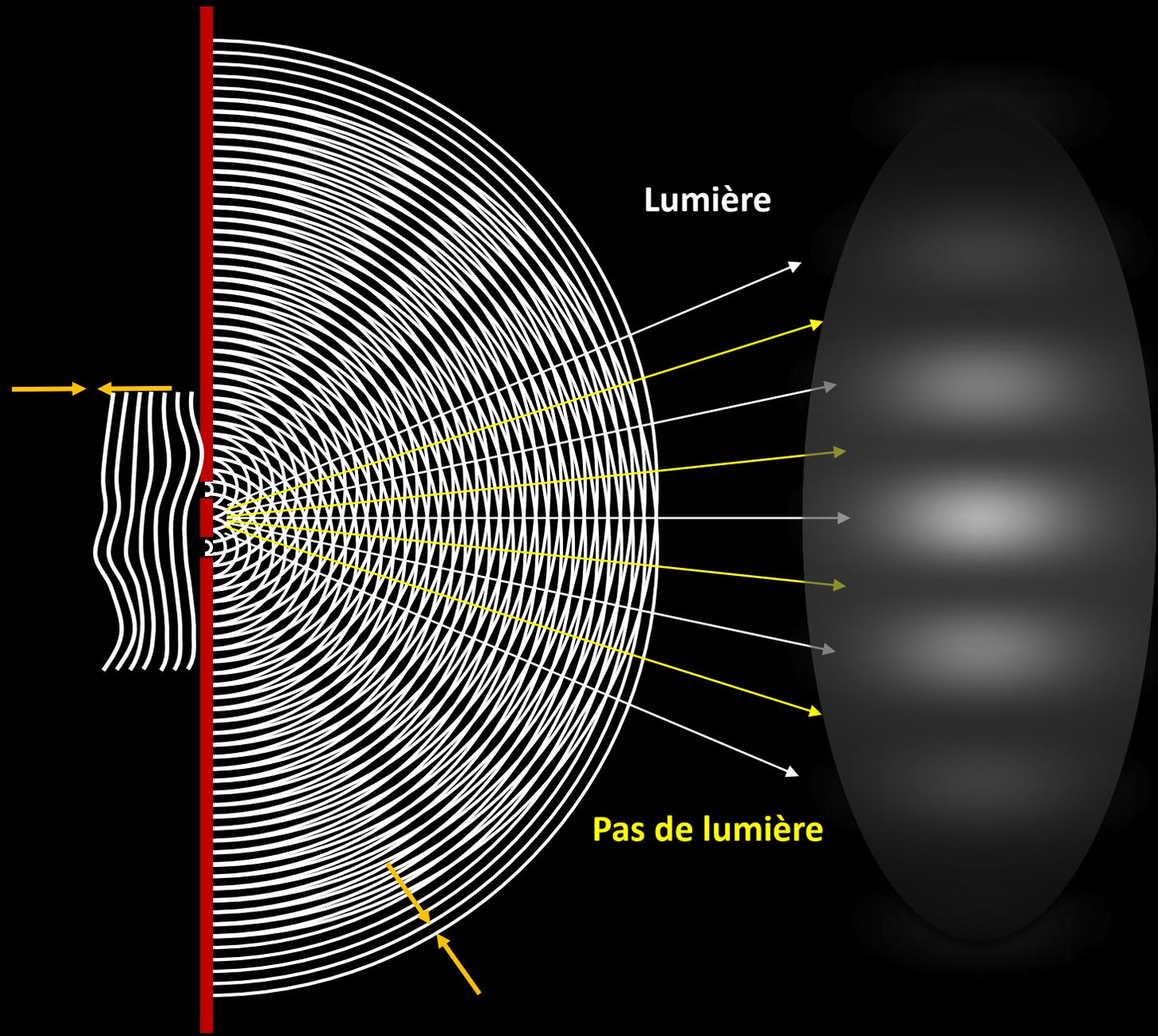
# Principe d'interférence (1803)



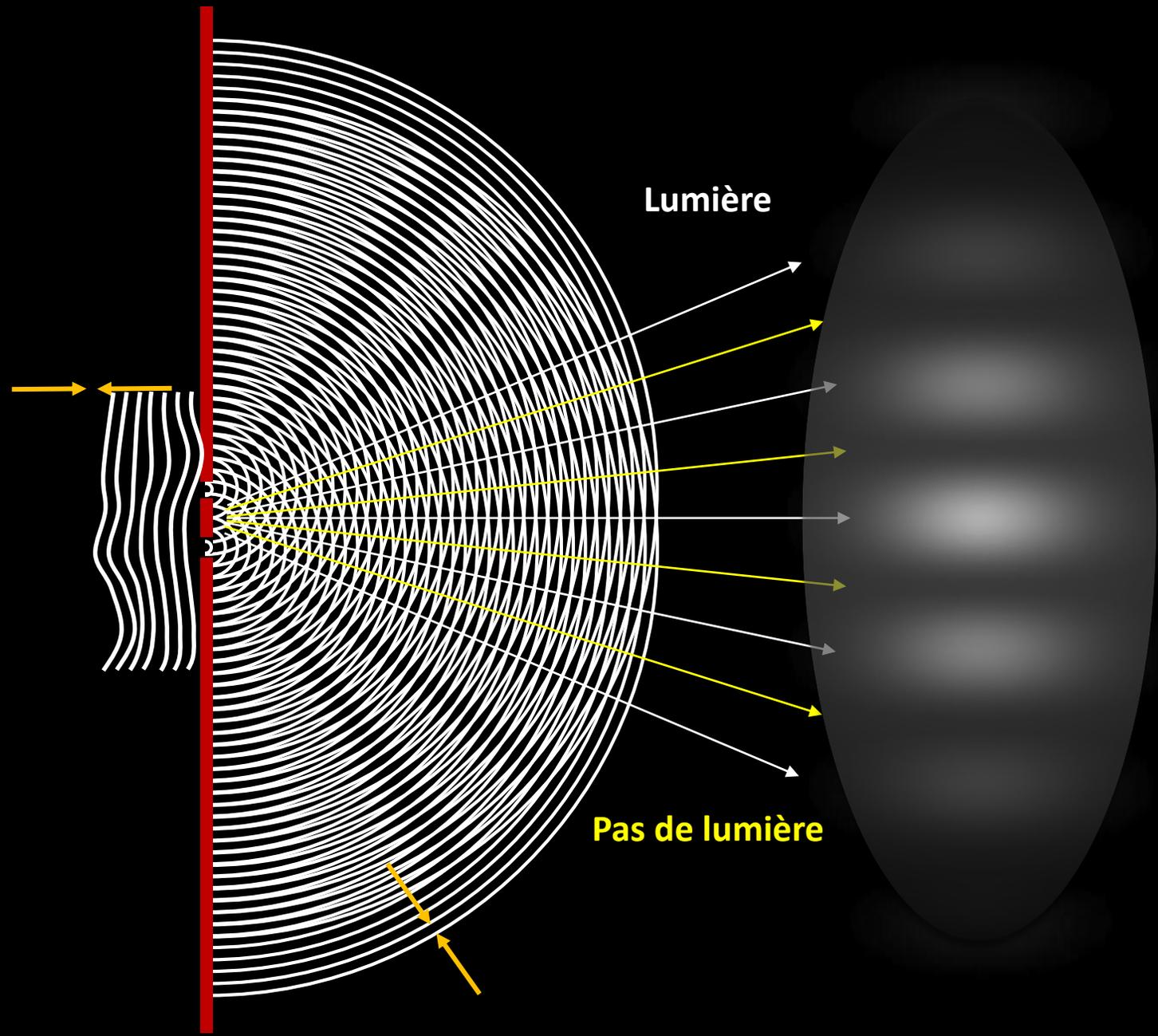
# Principe d'interférence (1803)



# Principe d'interférence (1803)



# Principe d'interférence (1803)

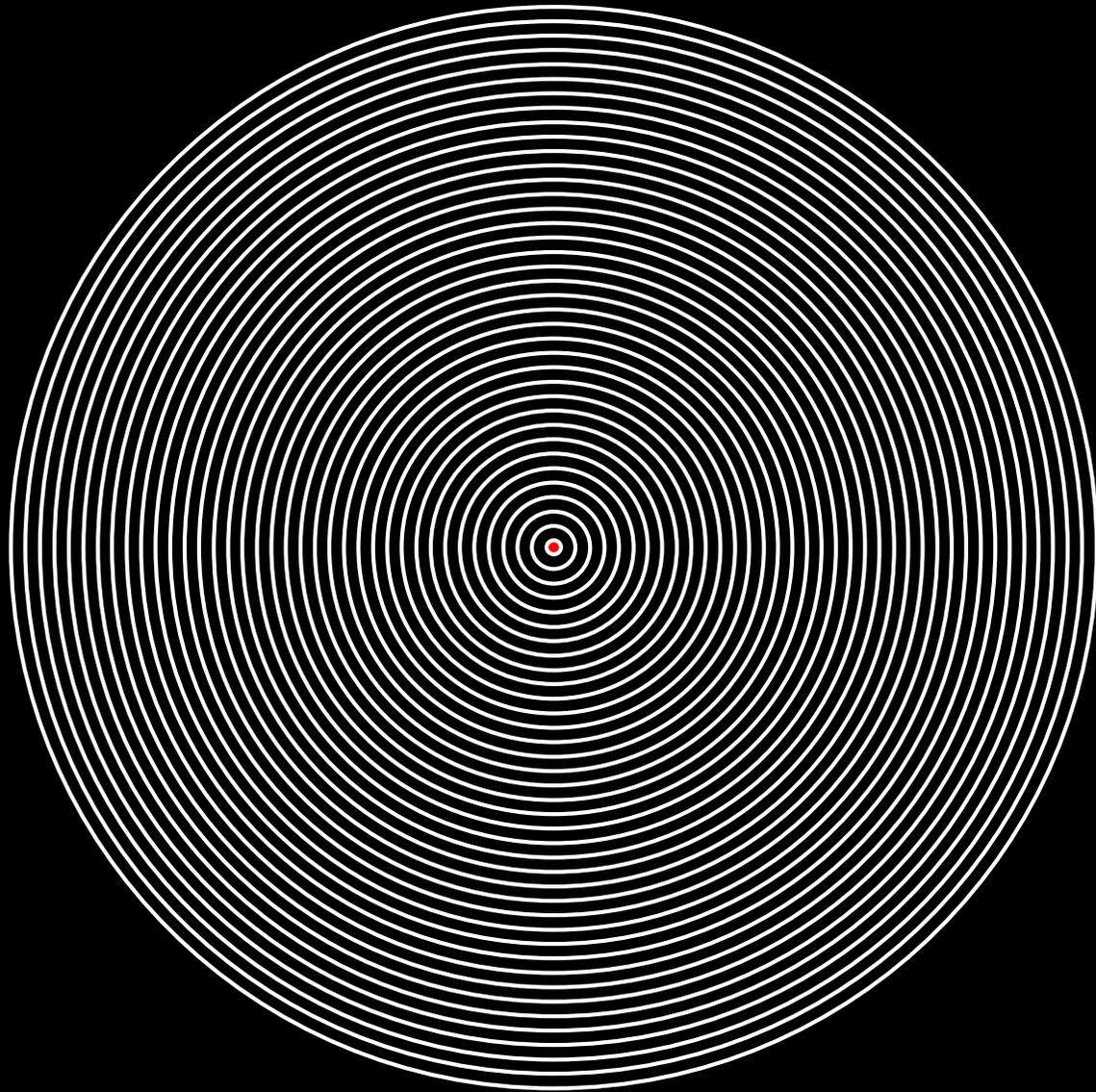


**Contraste de frange  
(Visibilité)  
cohérence de l'onde  
Taille de la source**

**Interférométrie**

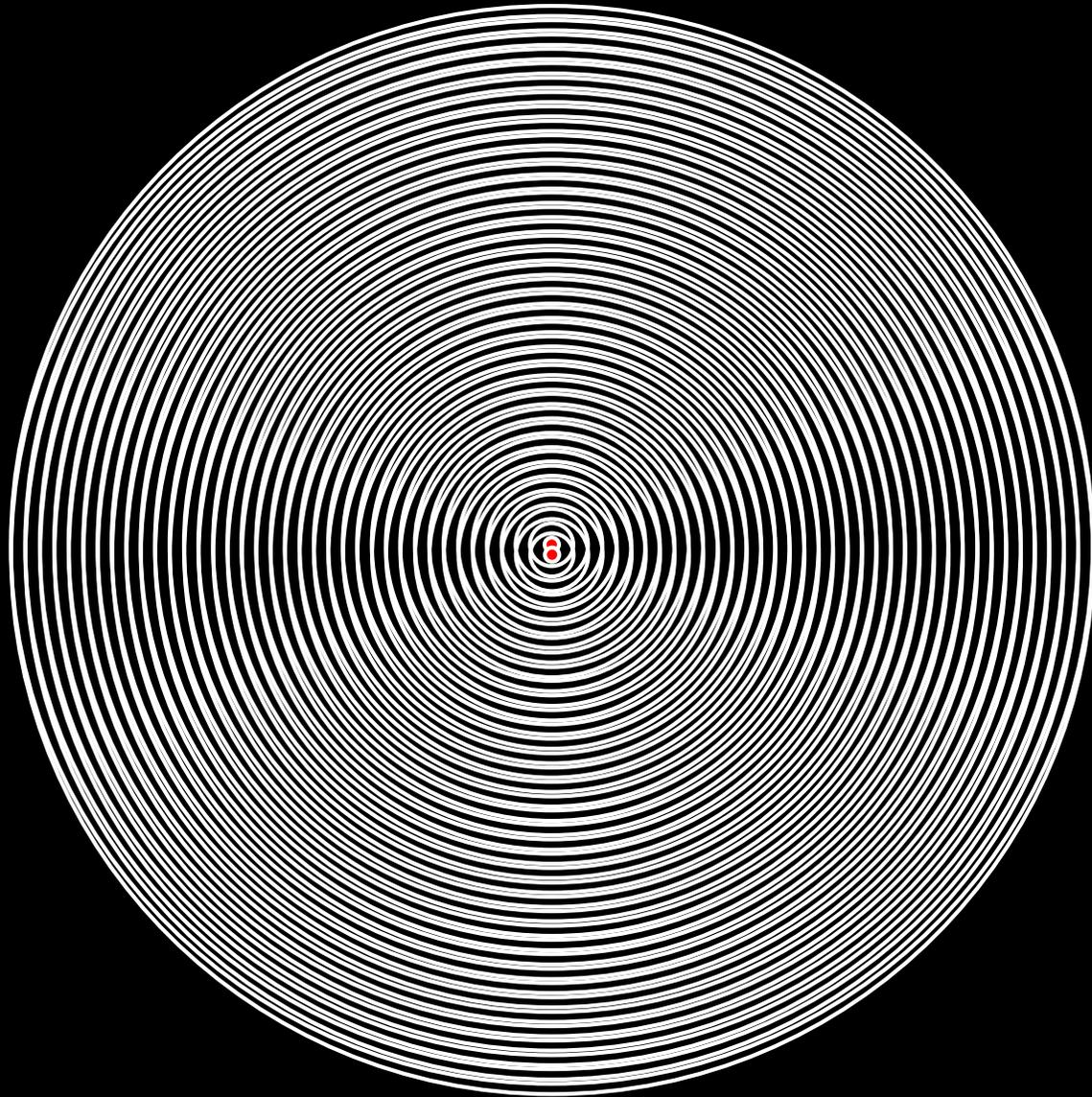
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



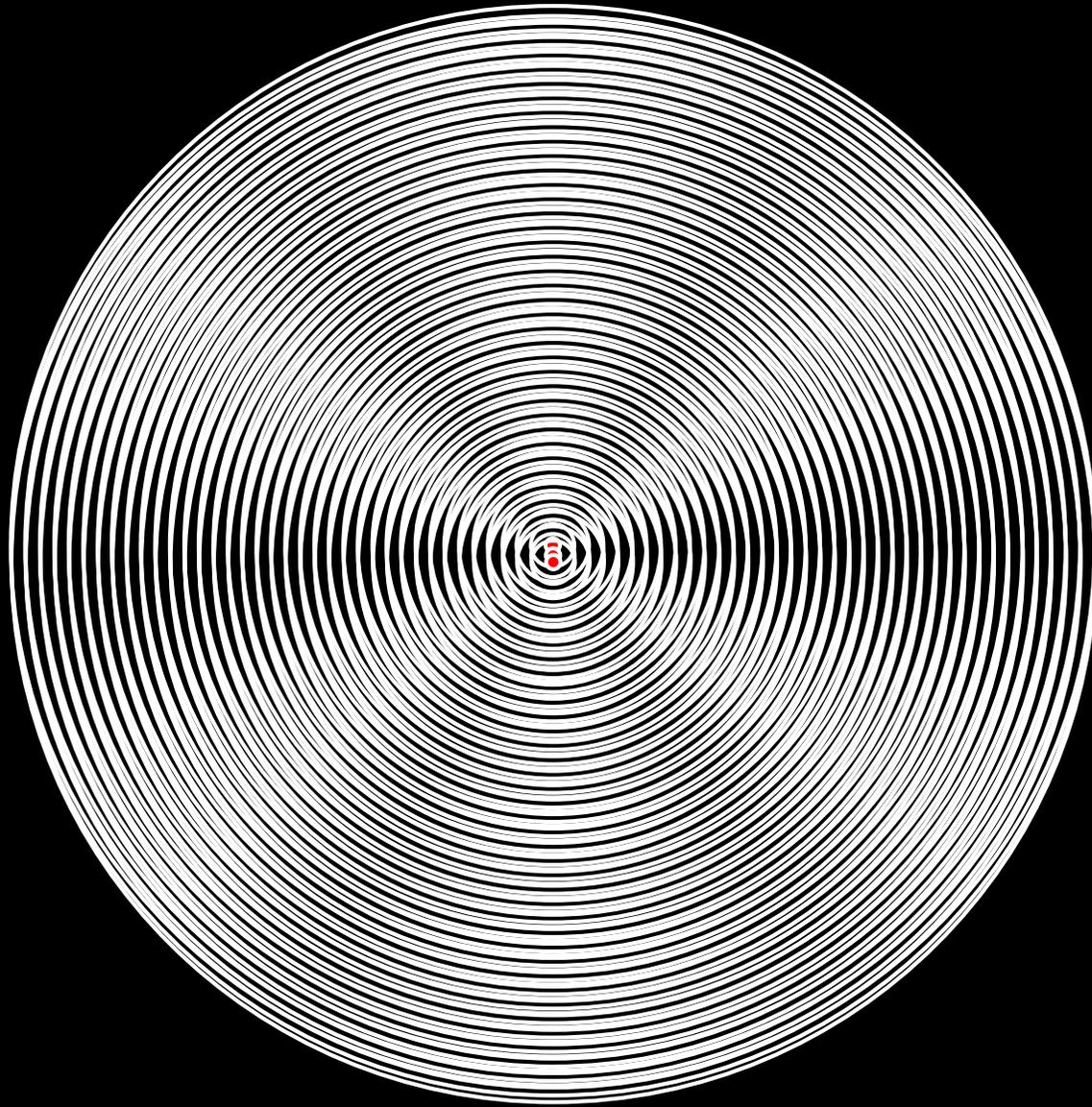
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



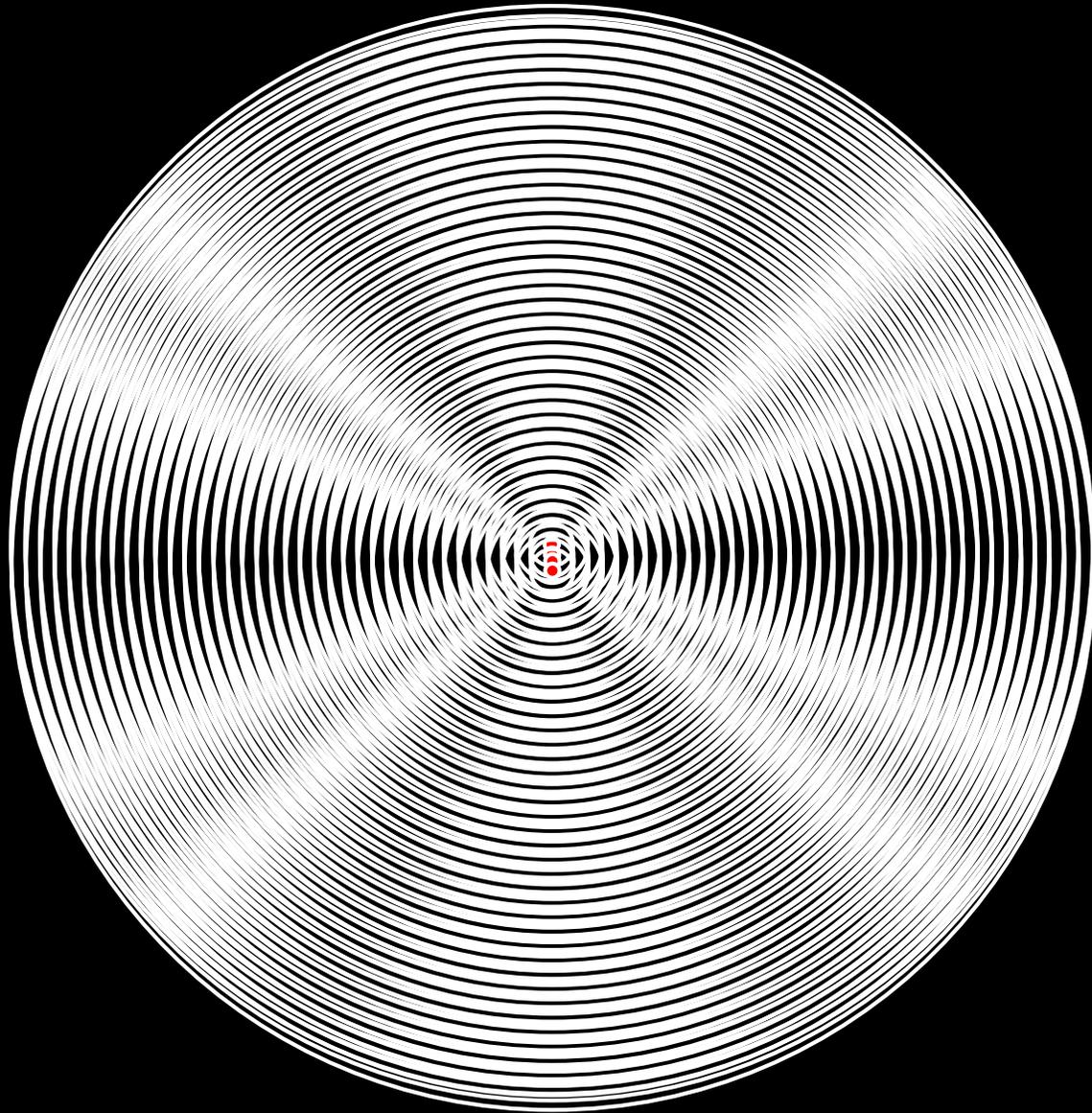
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



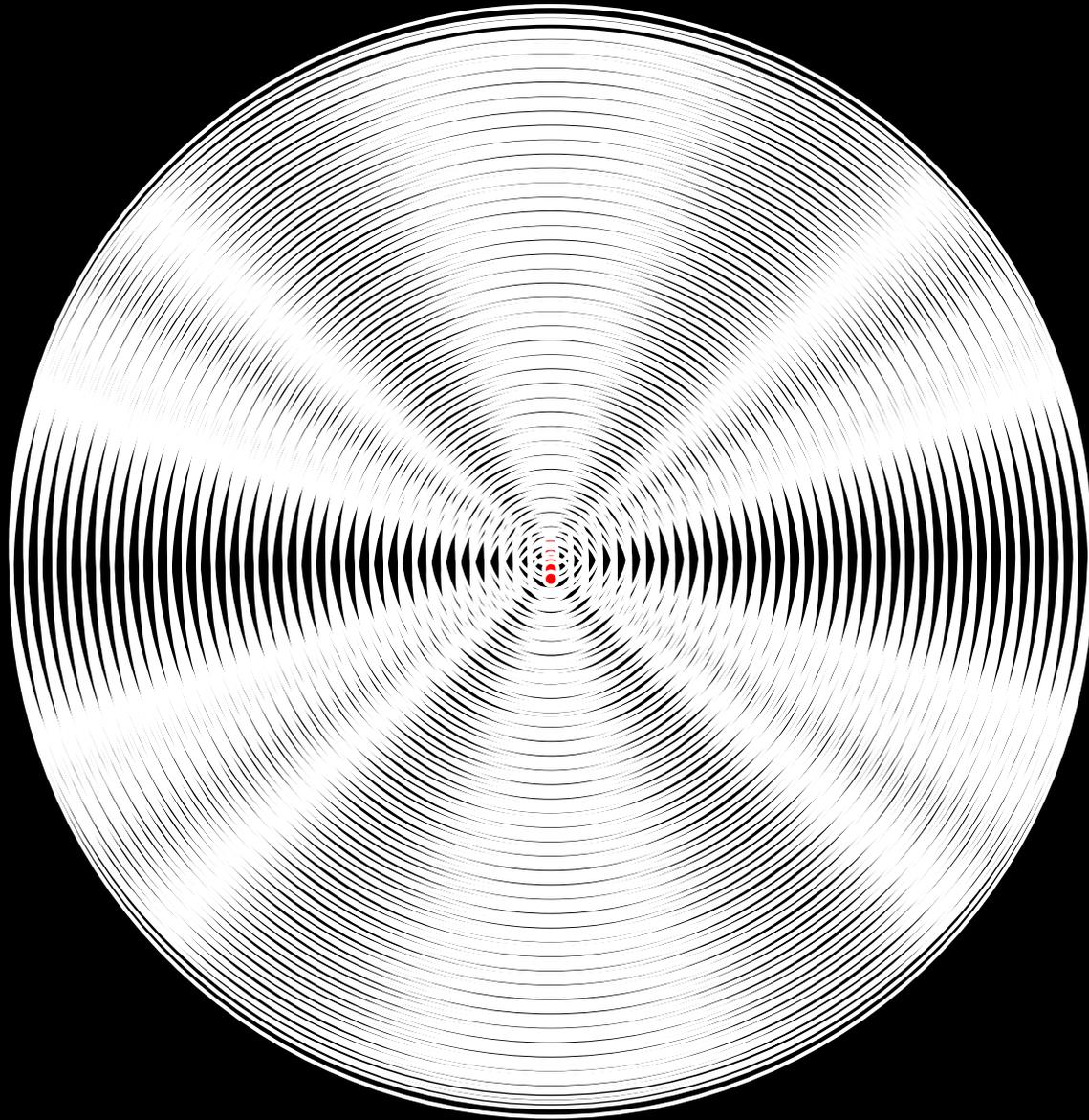
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



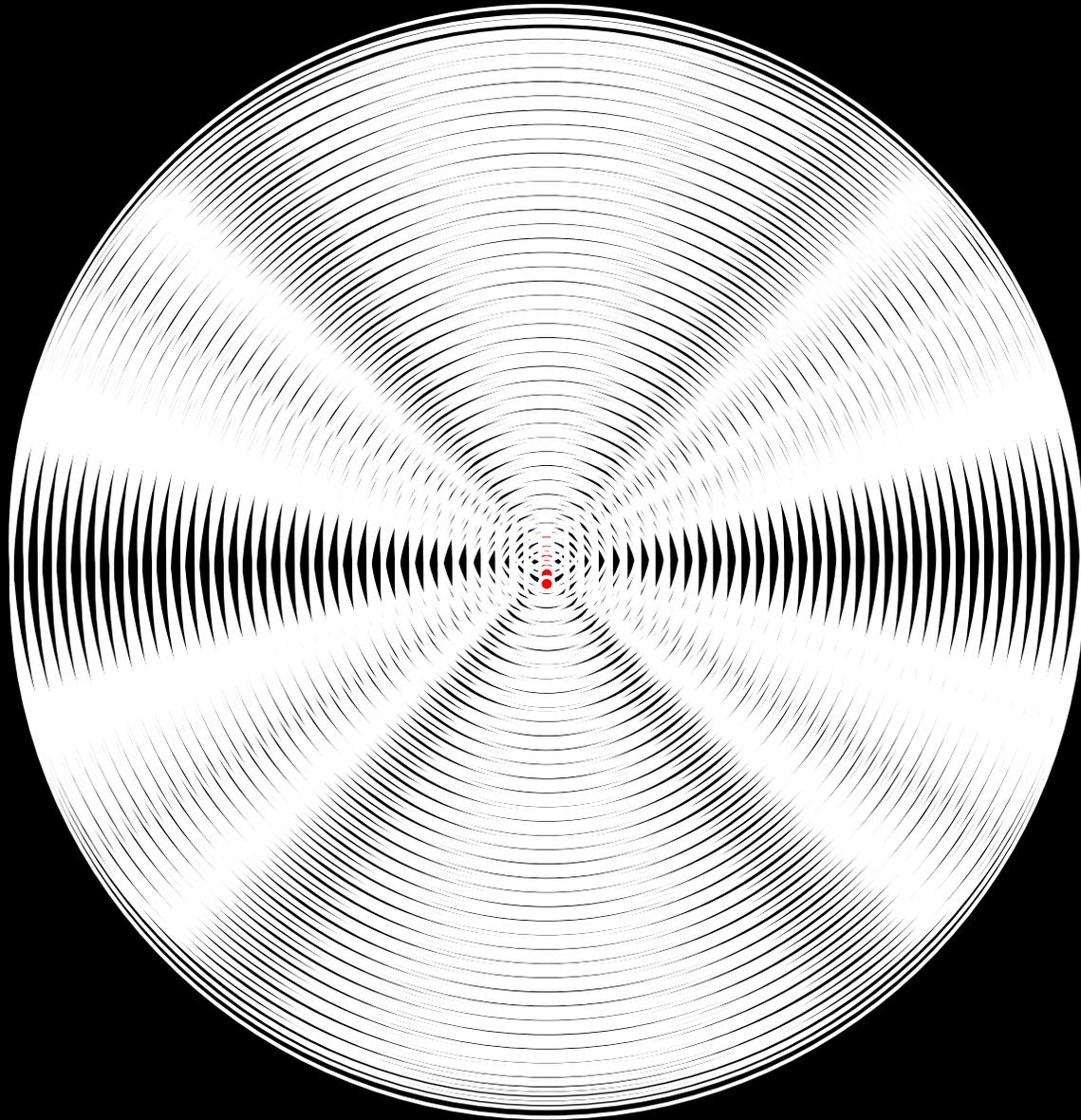
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



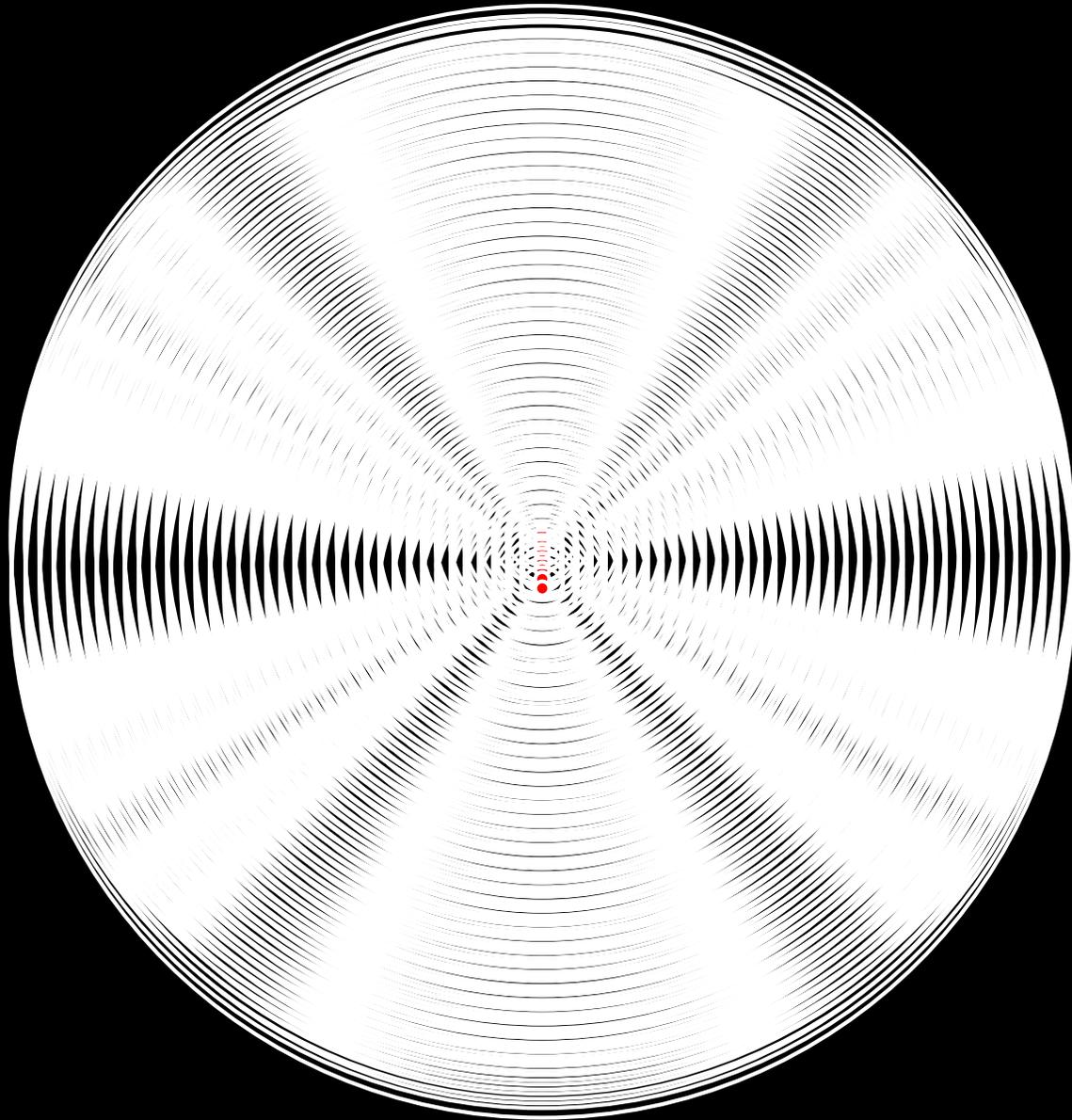
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



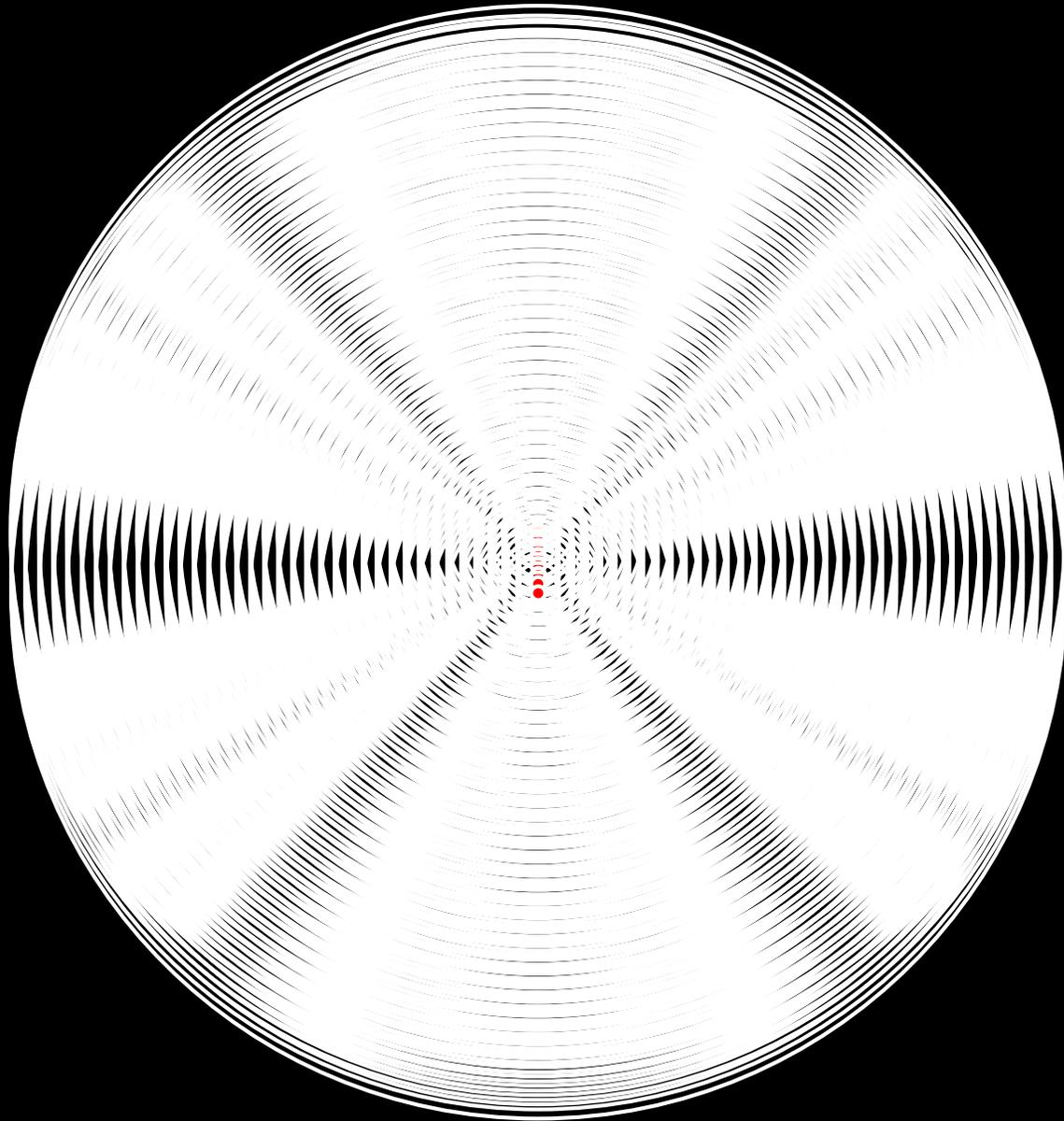
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



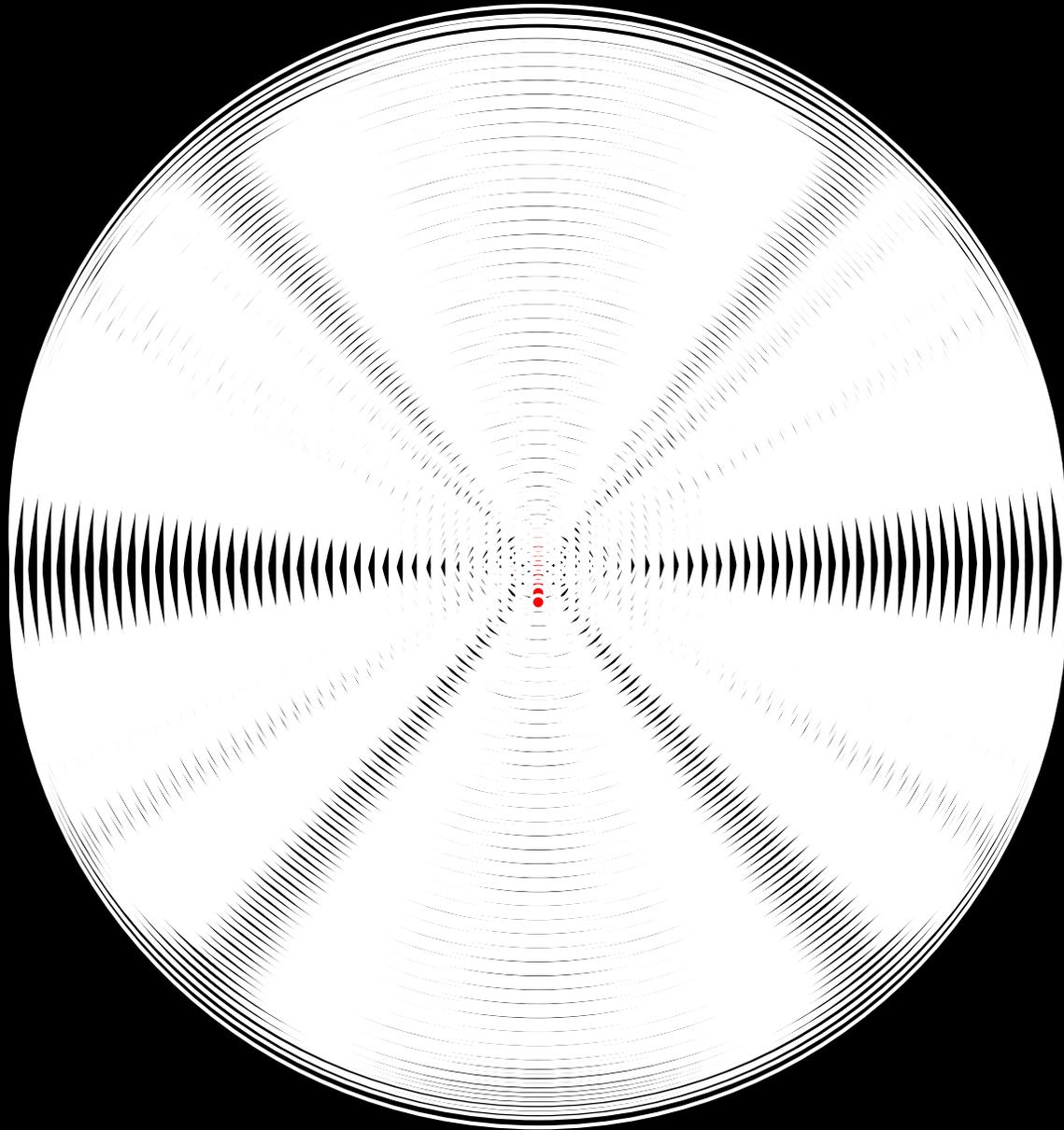
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



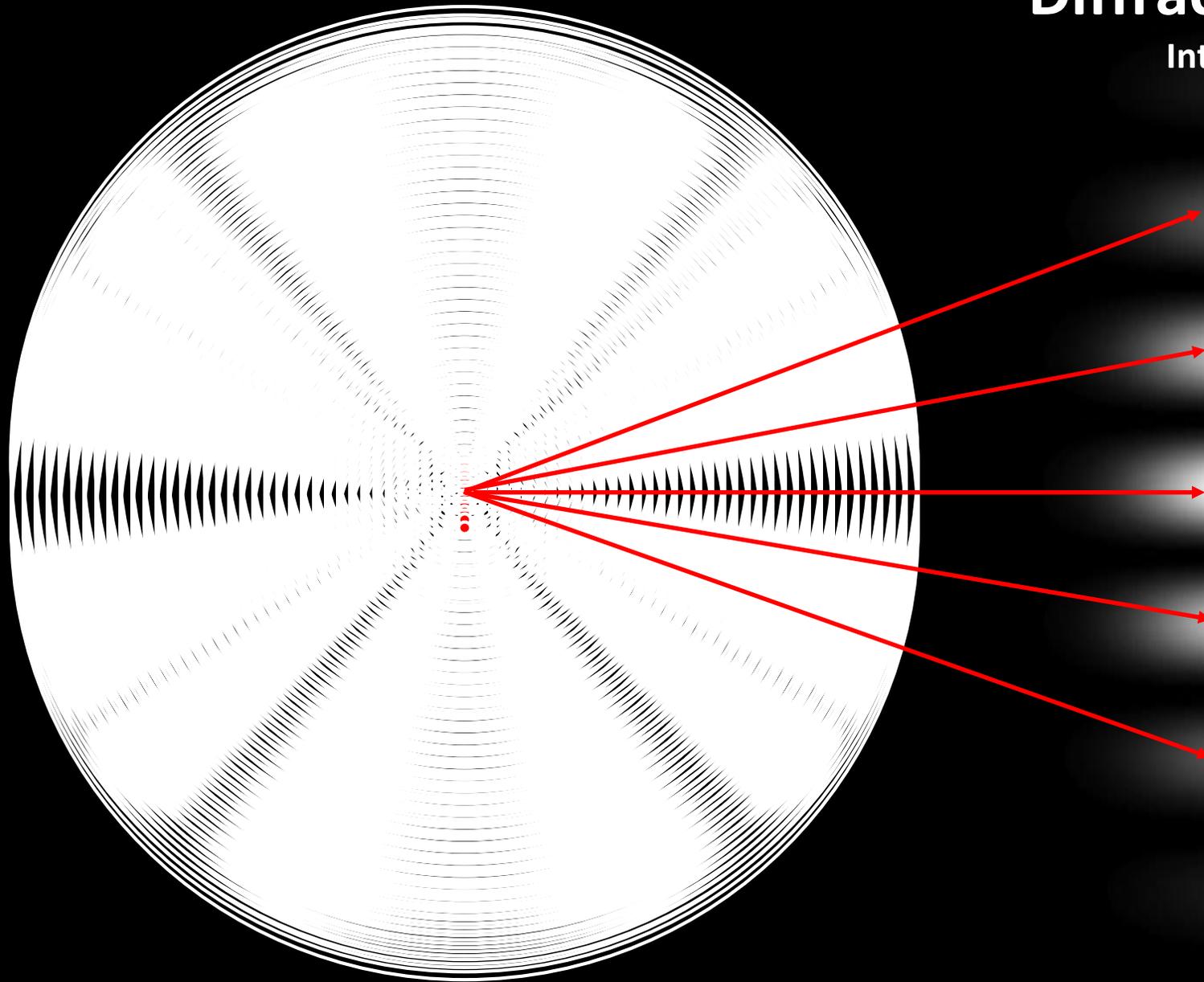
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



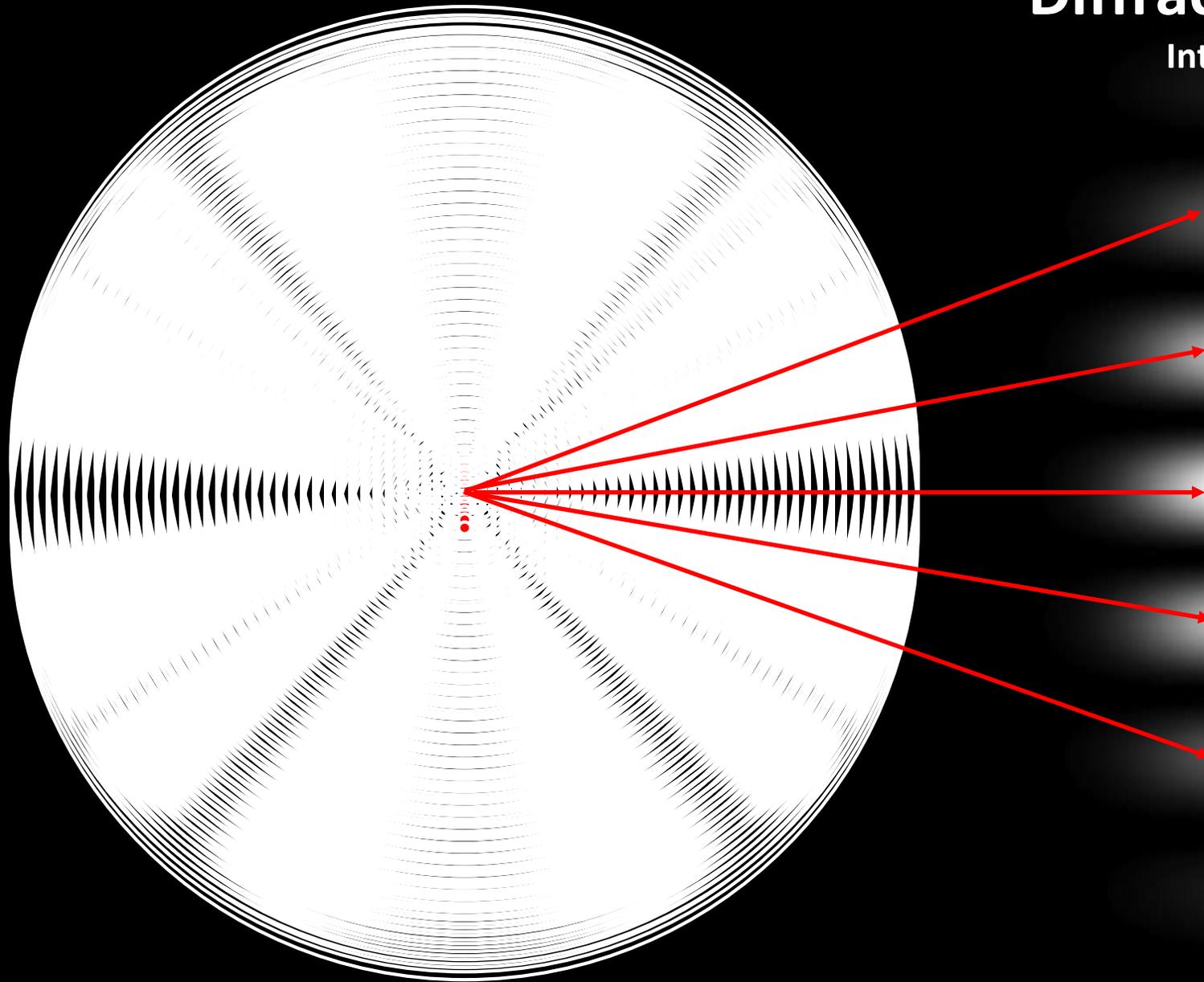
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



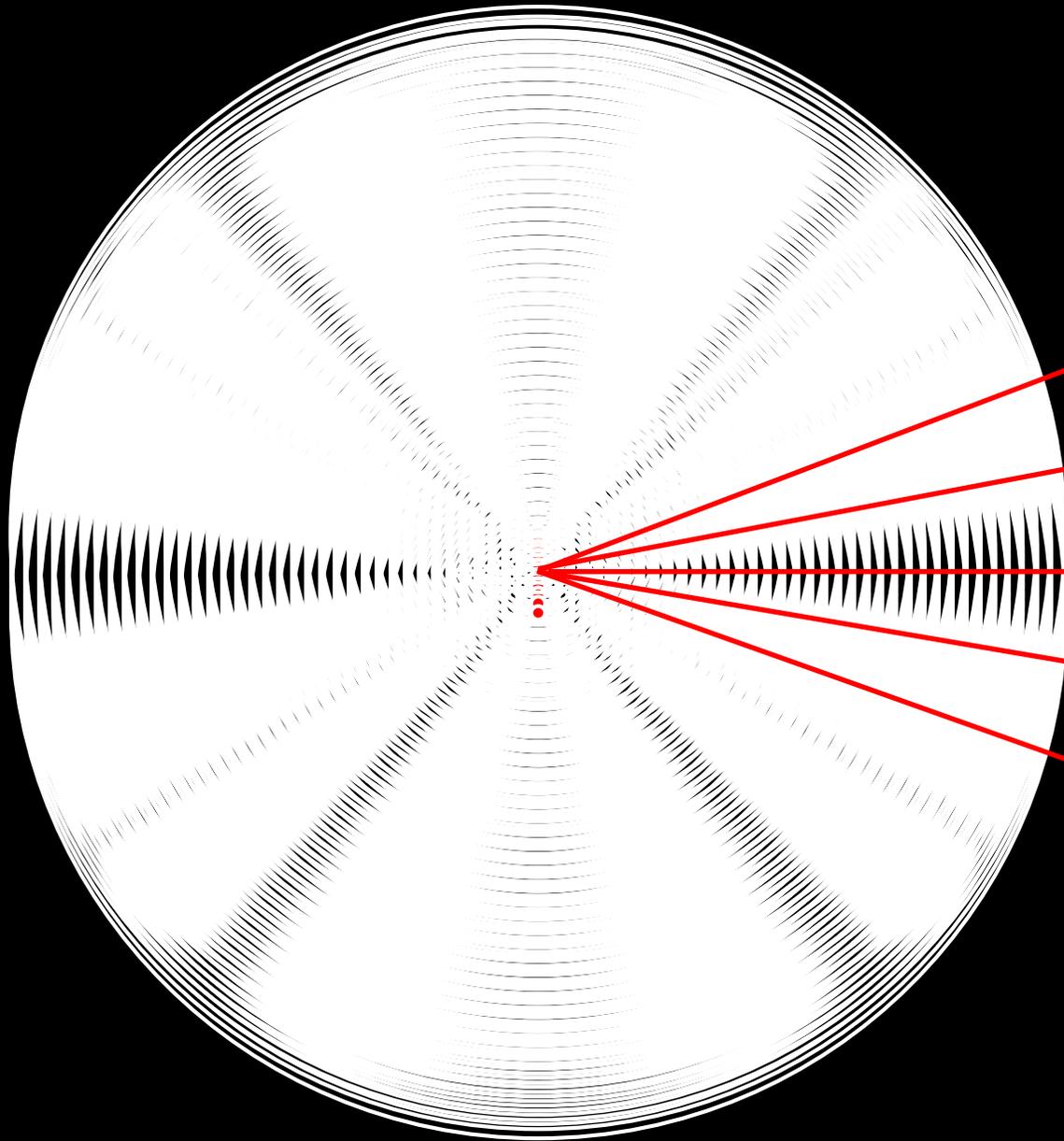
# Diffraction : principe

Interférence (1803)



# Diffraction : principe

Interférence (1803)

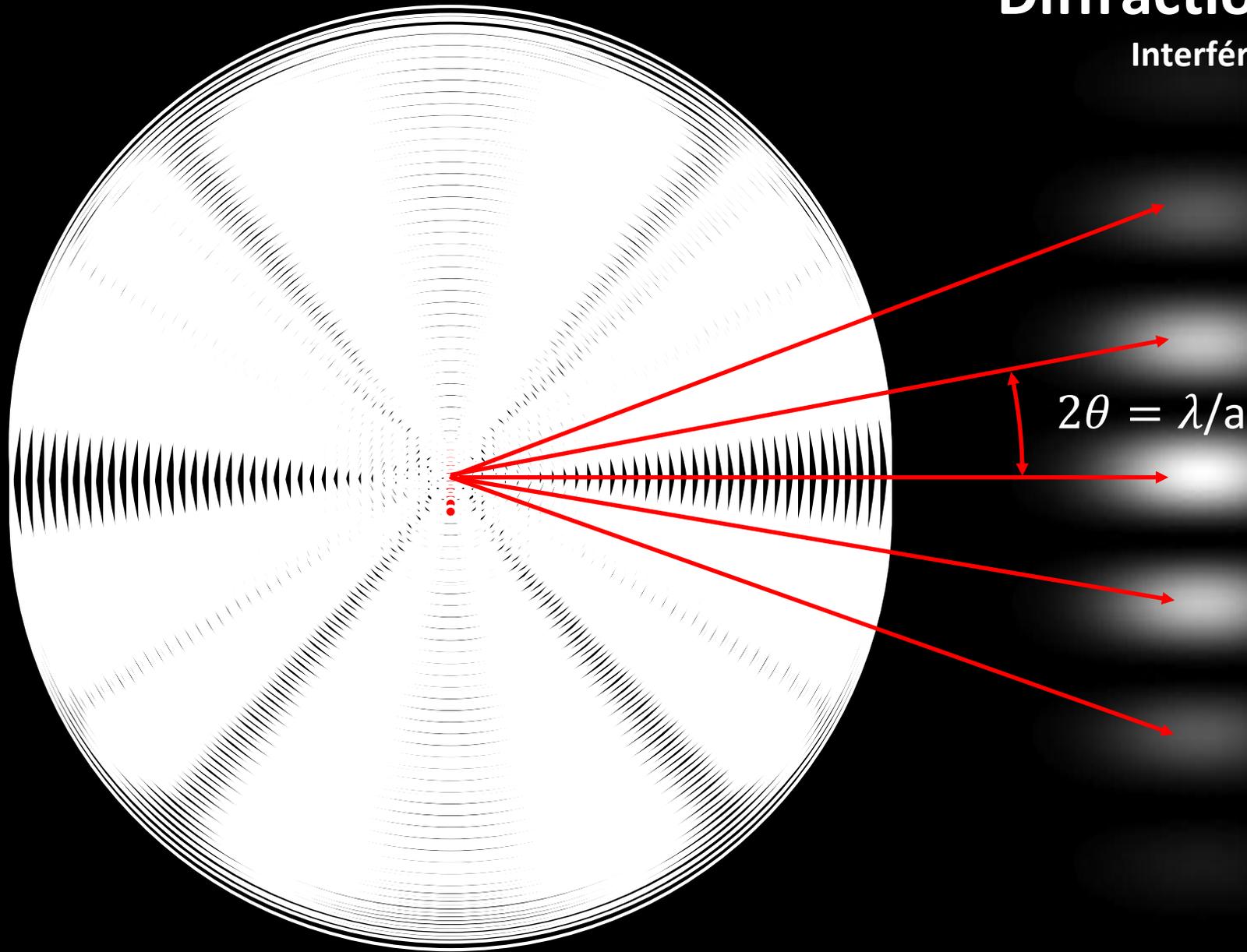


Pour observer  
des franges  
 $\lambda$  doit être **plus petit**  
que  $a$

Sinon : diffusion

# Diffraction : principe

Interférence (1803)

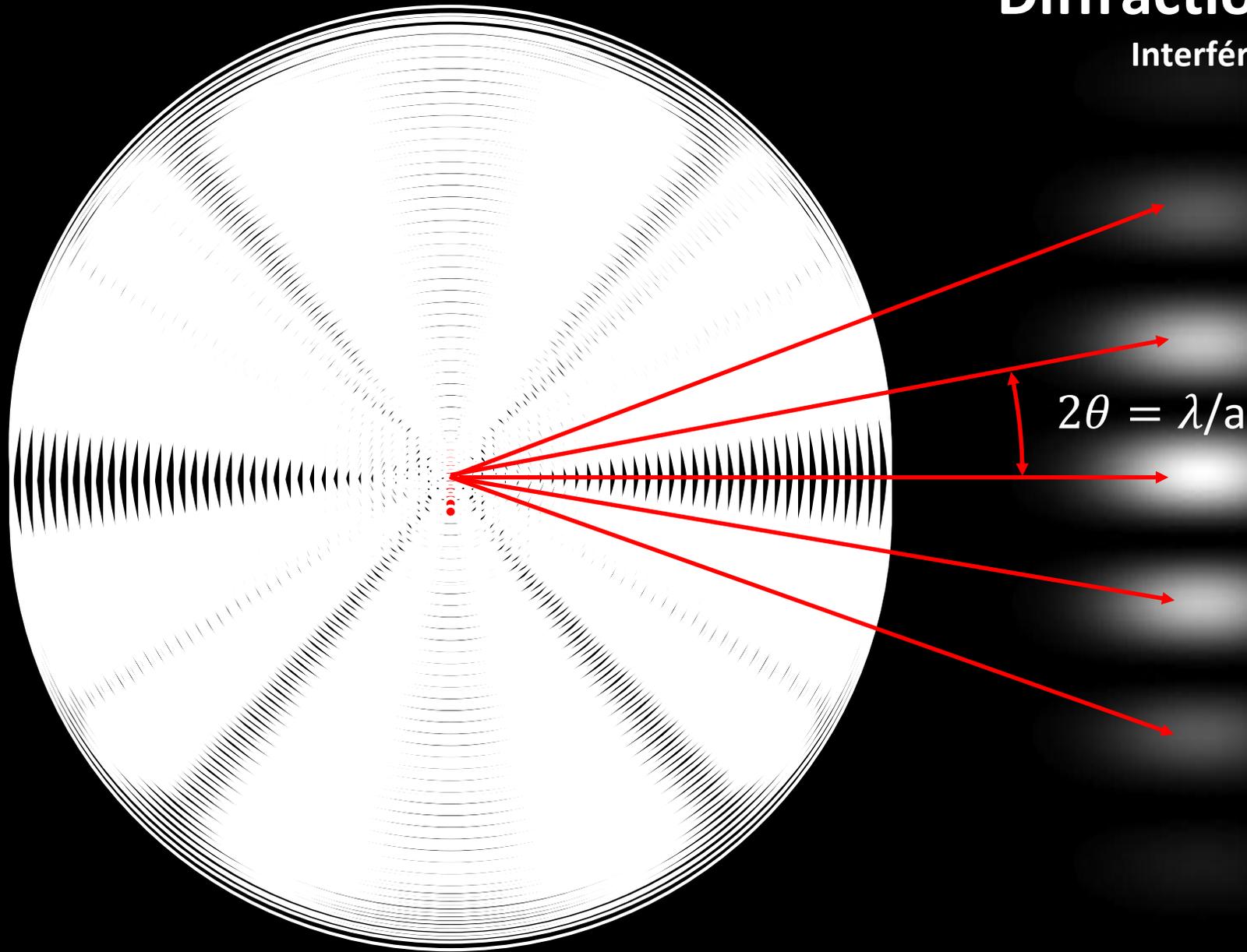


Pour observer  
des franges  
 $\lambda$  doit être **plus petit**  
que  $a$

Sinon : diffusion

# Diffraction : principe

Interférence (1803)



Principe de la  
**goniométrie X**

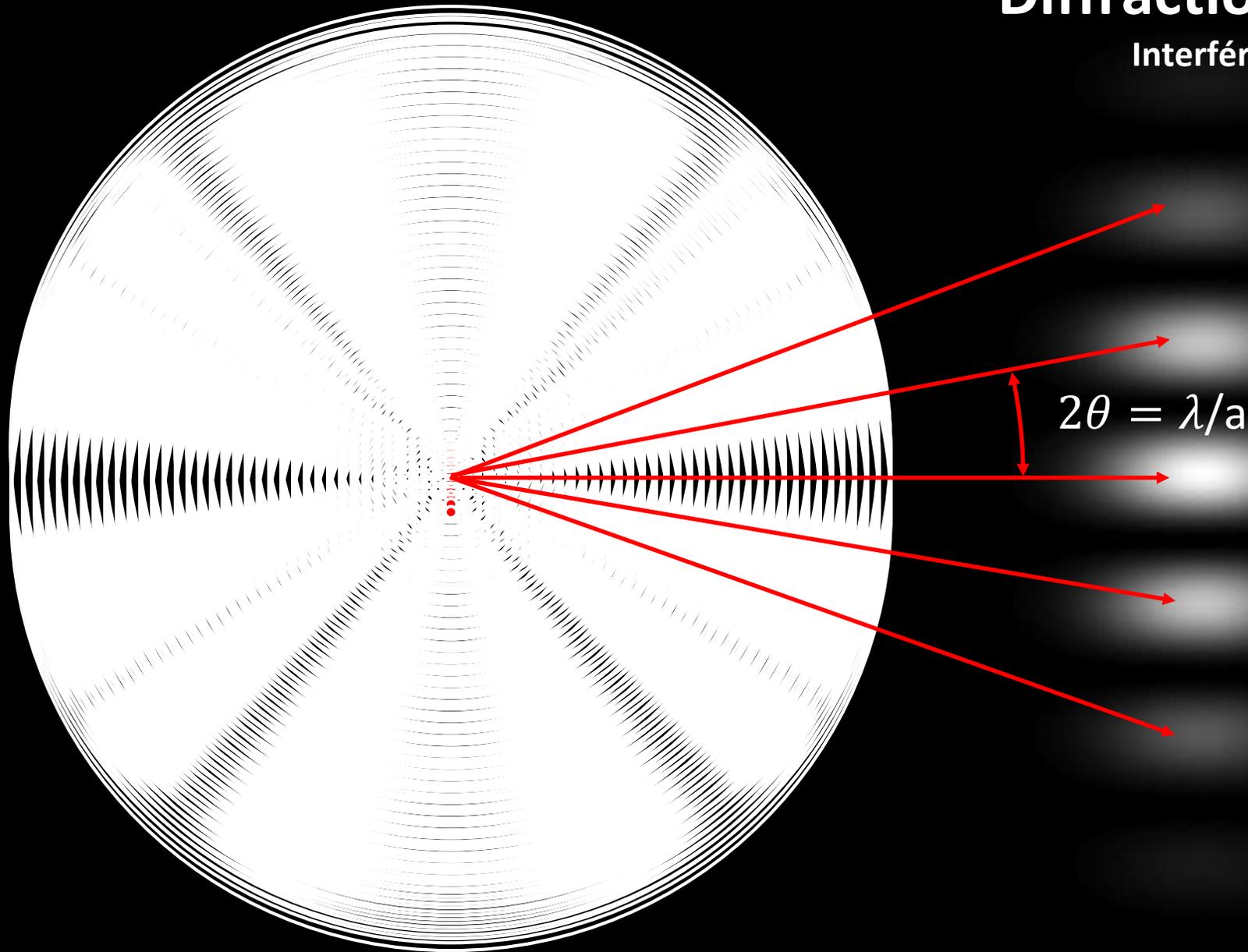
$$2\theta = \lambda/a$$

Pour observer  
des franges  
 $\lambda$  doit être **plus petit**  
que  $a$

Sinon : diffusion

# Diffraction : principe

Interférence (1803)



Principe de la  
**goniométrie X**

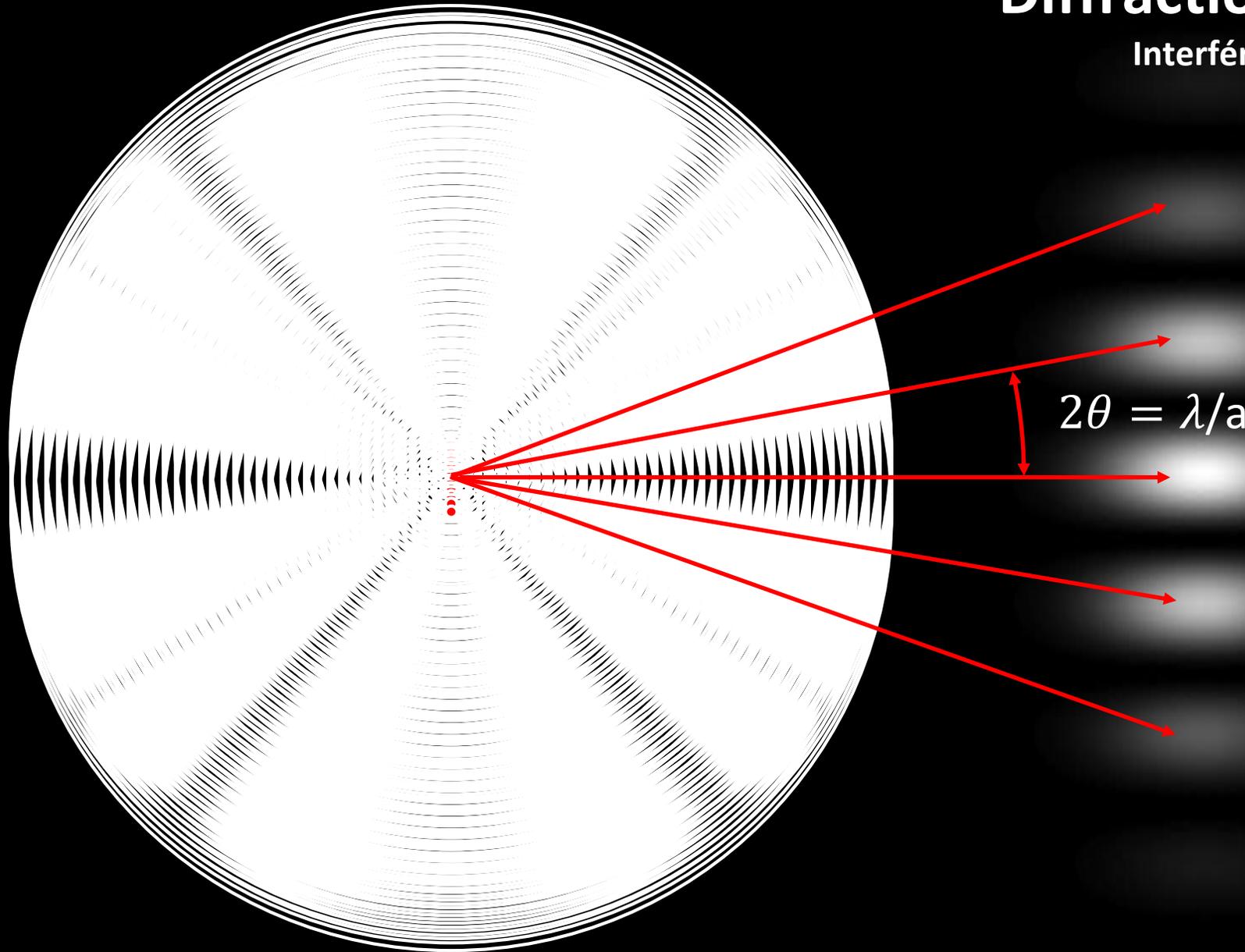
Permet de **calibrer**  
les longueurs d'ondes  
(RX = LaB<sub>6</sub>)

Pour observer  
des franges  
 $\lambda$  doit être **plus petit**  
que  $a$

Sinon : diffusion

# Diffraction : principe

Interférence (1803)



Principe de la  
**goniométrie X**

Permet de **calibrer**  
les longueurs d'ondes  
(RX = LaB<sub>6</sub>)

Pour observer  
des franges  
 $\lambda$  doit être **plus petit**  
que  $a$

Sinon : diffusion

**Optique ondulatoire**  
**Fresnel 1822**

# Conclusions

**Points communs à tous les rayonnements :**

- **Propagation en ligne droite**
  - **Réflexion**
- **Réfraction ( $n(\omega)$ ) et double réfraction (anisotropie)**
  - **Diffraction (interférométrie)**
  - **Absorption (spectrométrie)**

**Merci !**

