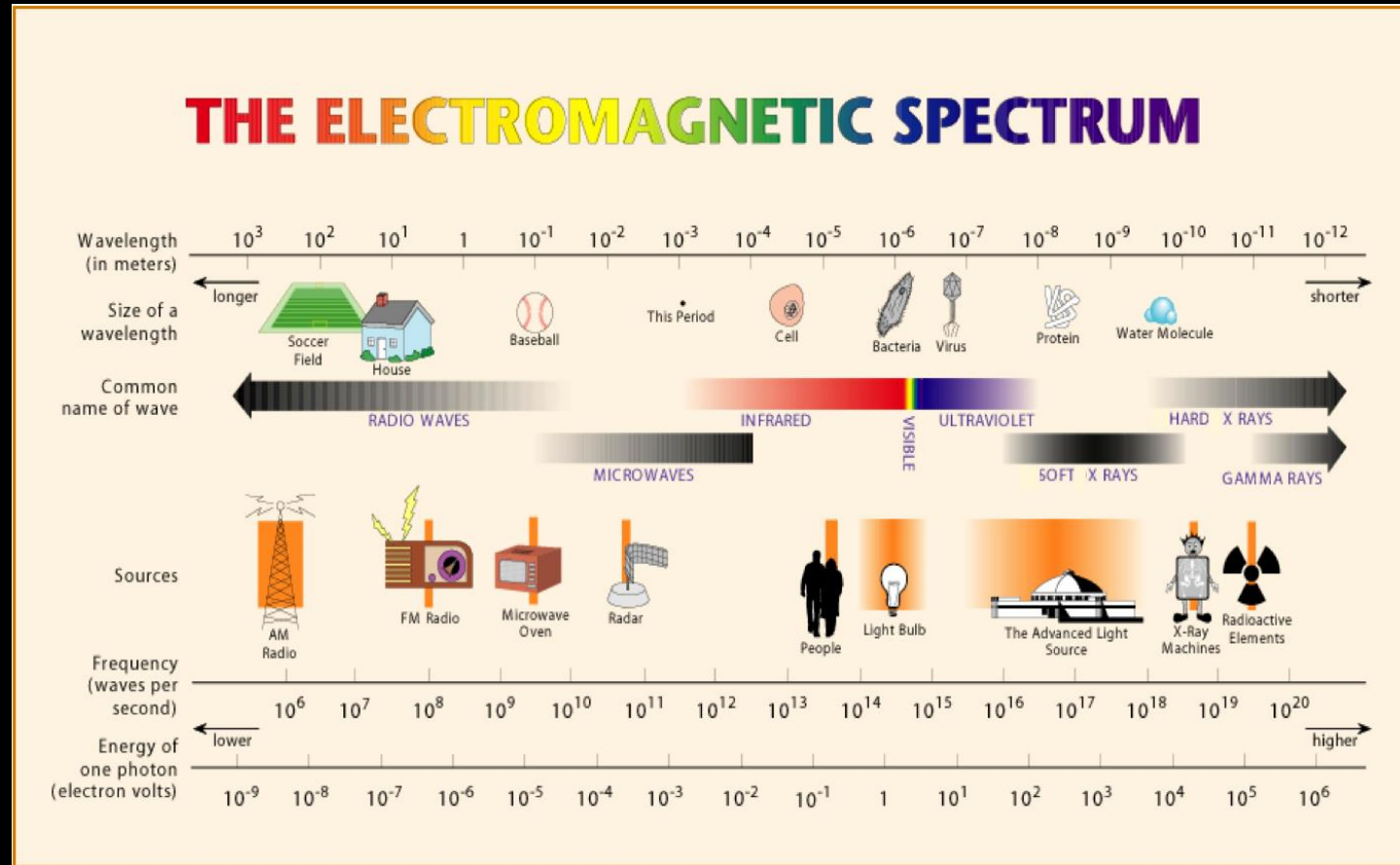


La lumière et ses propriétés



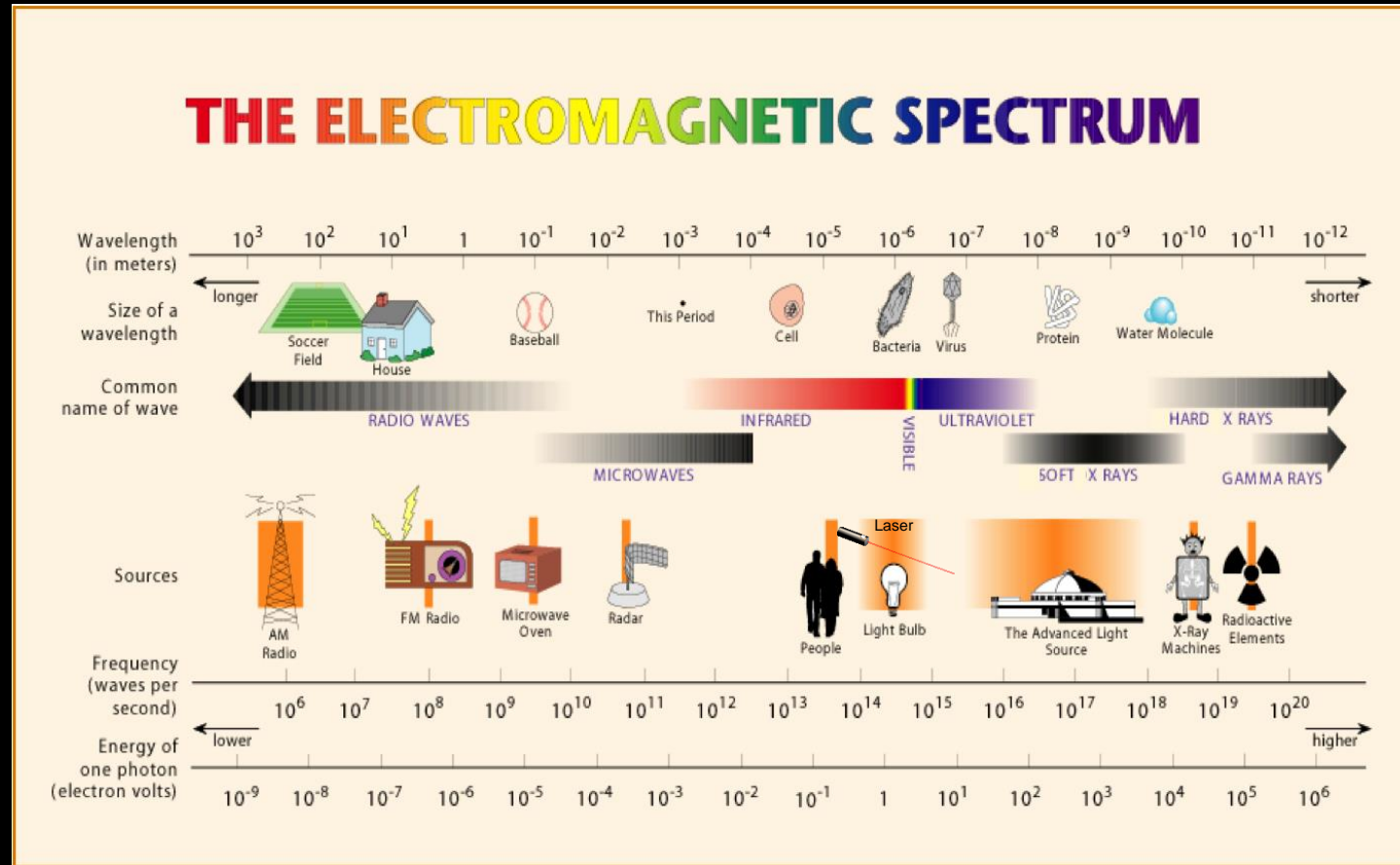
de l'infra-rouge aux rayons X.

Sylvain Ravy

Laboratoire de physique des solides

CNRS, Université Paris-Saclay

La lumière et ses propriétés



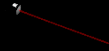
de l'infra-rouge aux rayons X.

Sylvain Ravy

Laboratoire de physique des solides

CNRS, Université Paris-Saclay

La lumière et ses propriétés



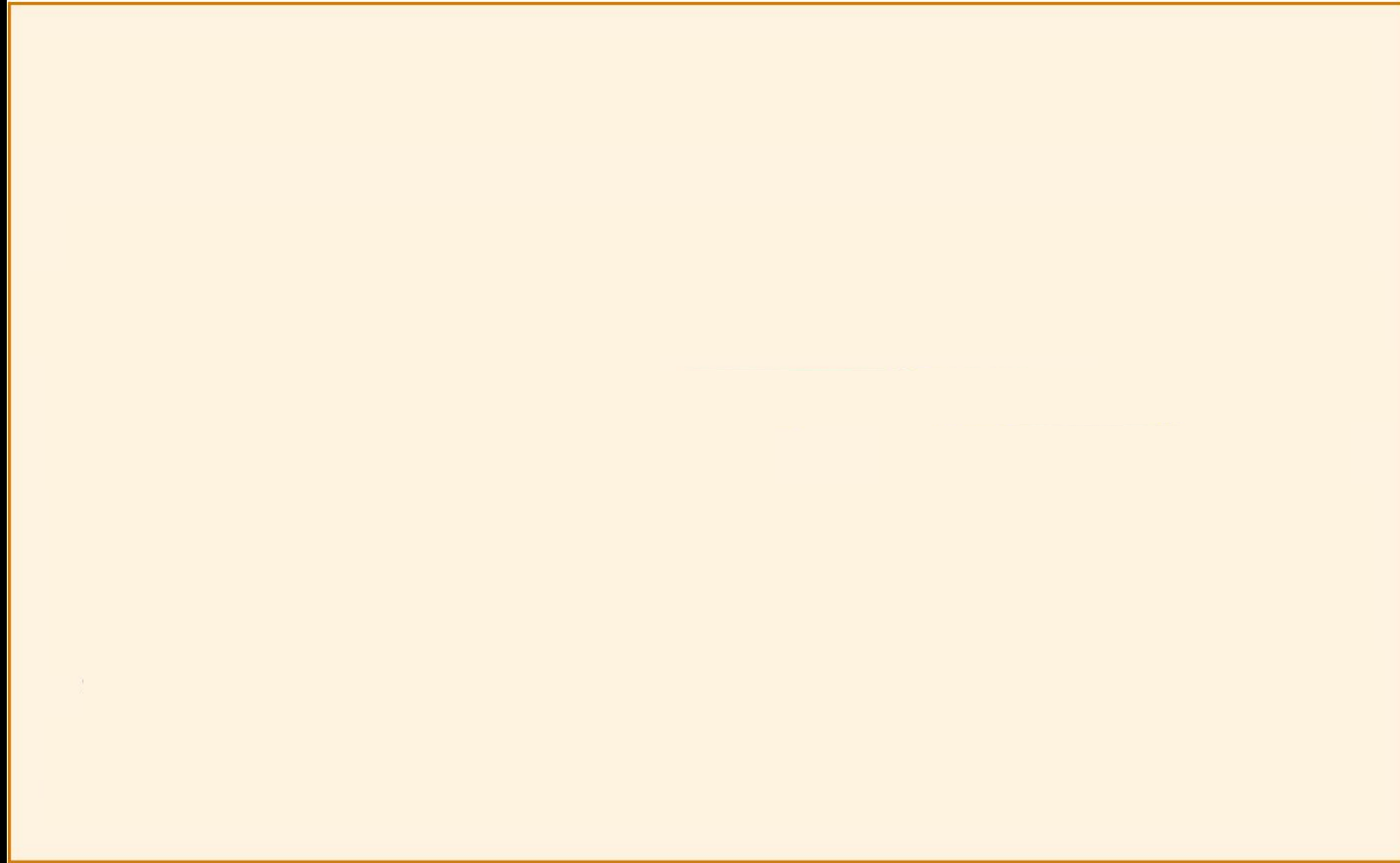
de **l'infra-rouge** aux rayons X.

Sylvain Ravy

Laboratoire de physique des solides
CNRS, Université Paris-Saclay

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e

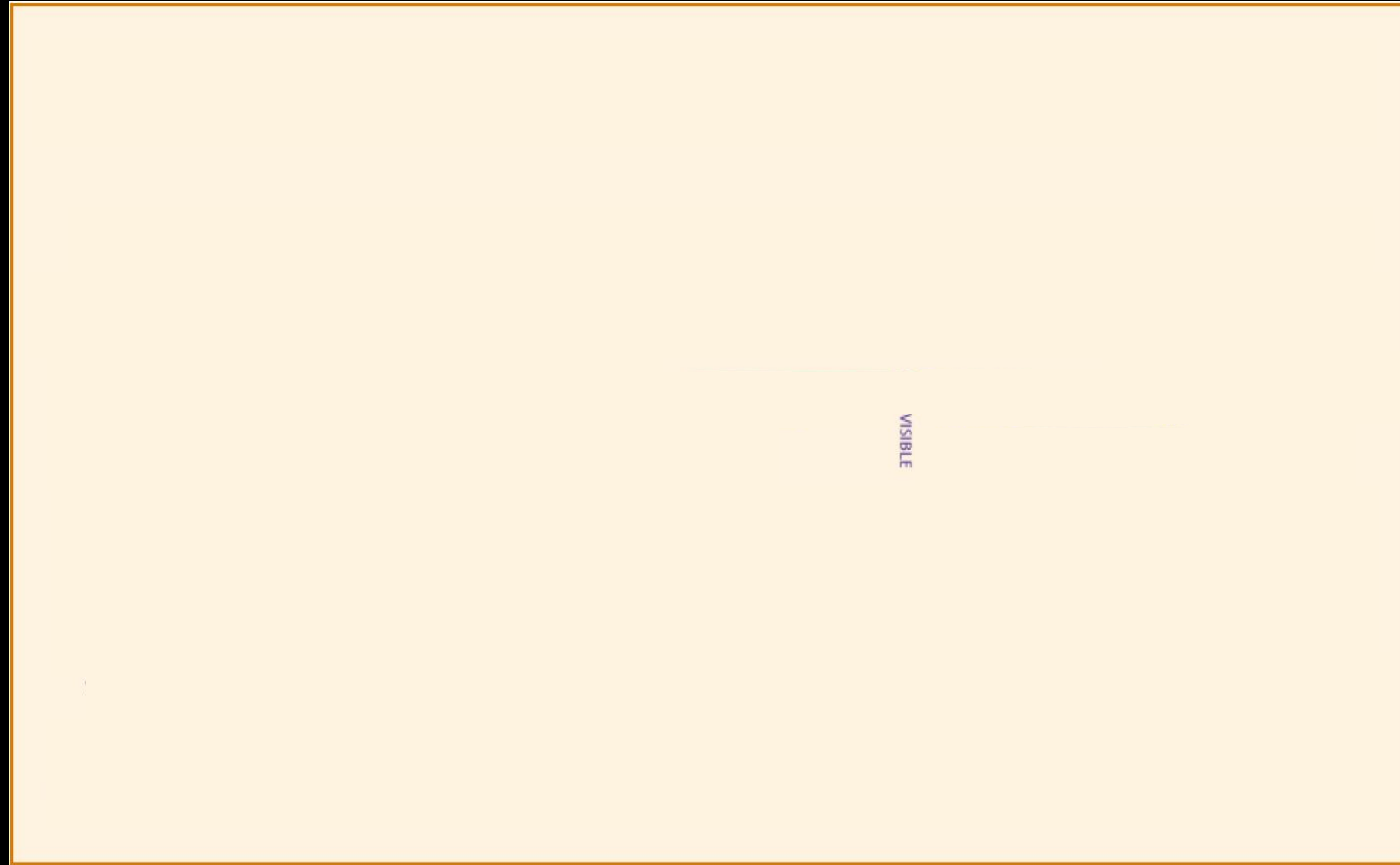


Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610



Le spectre électromagnétique

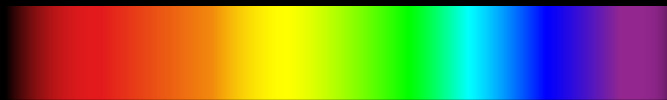
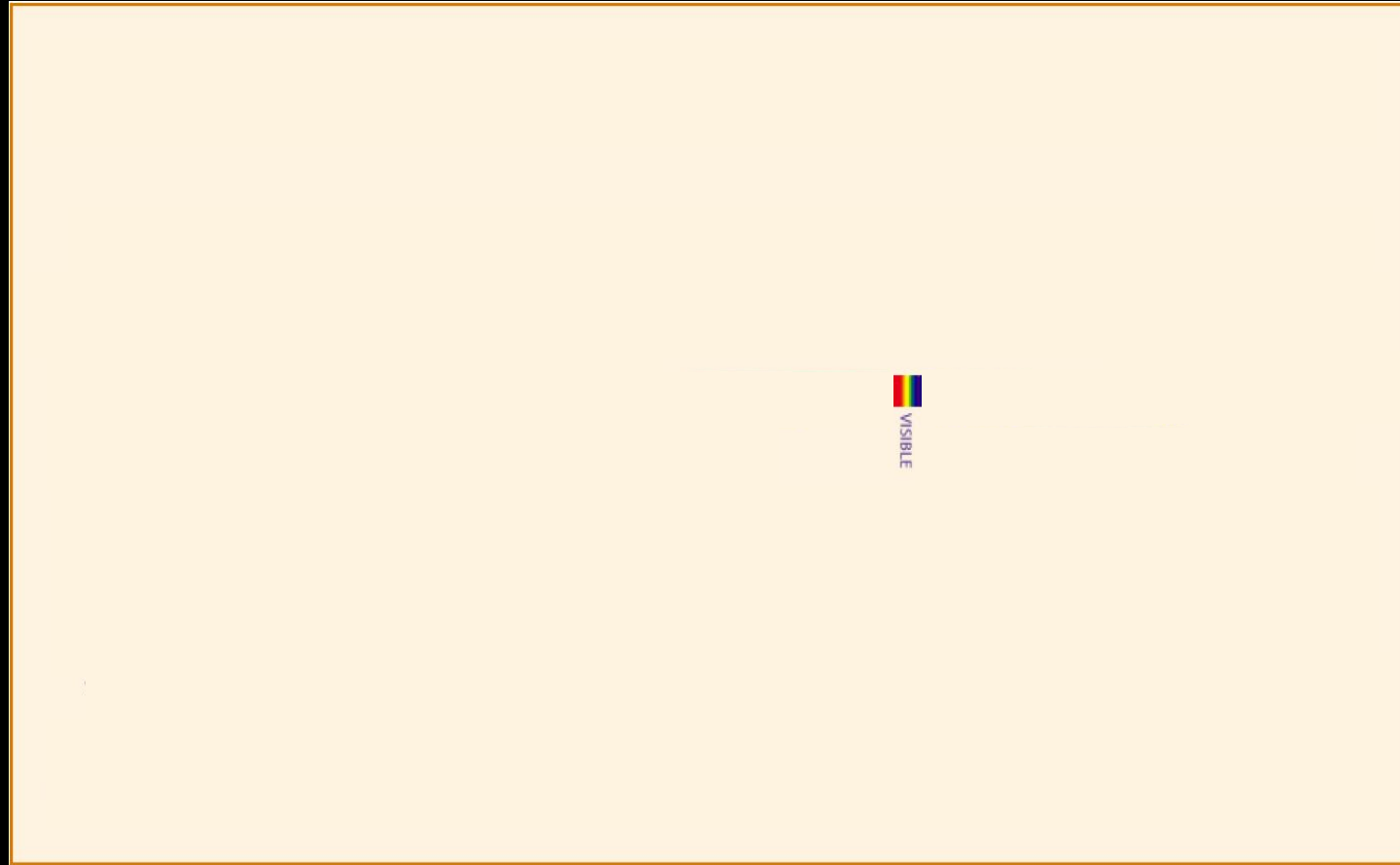
Avant le XVII^e



Kepler 1610



Newton 1666



Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



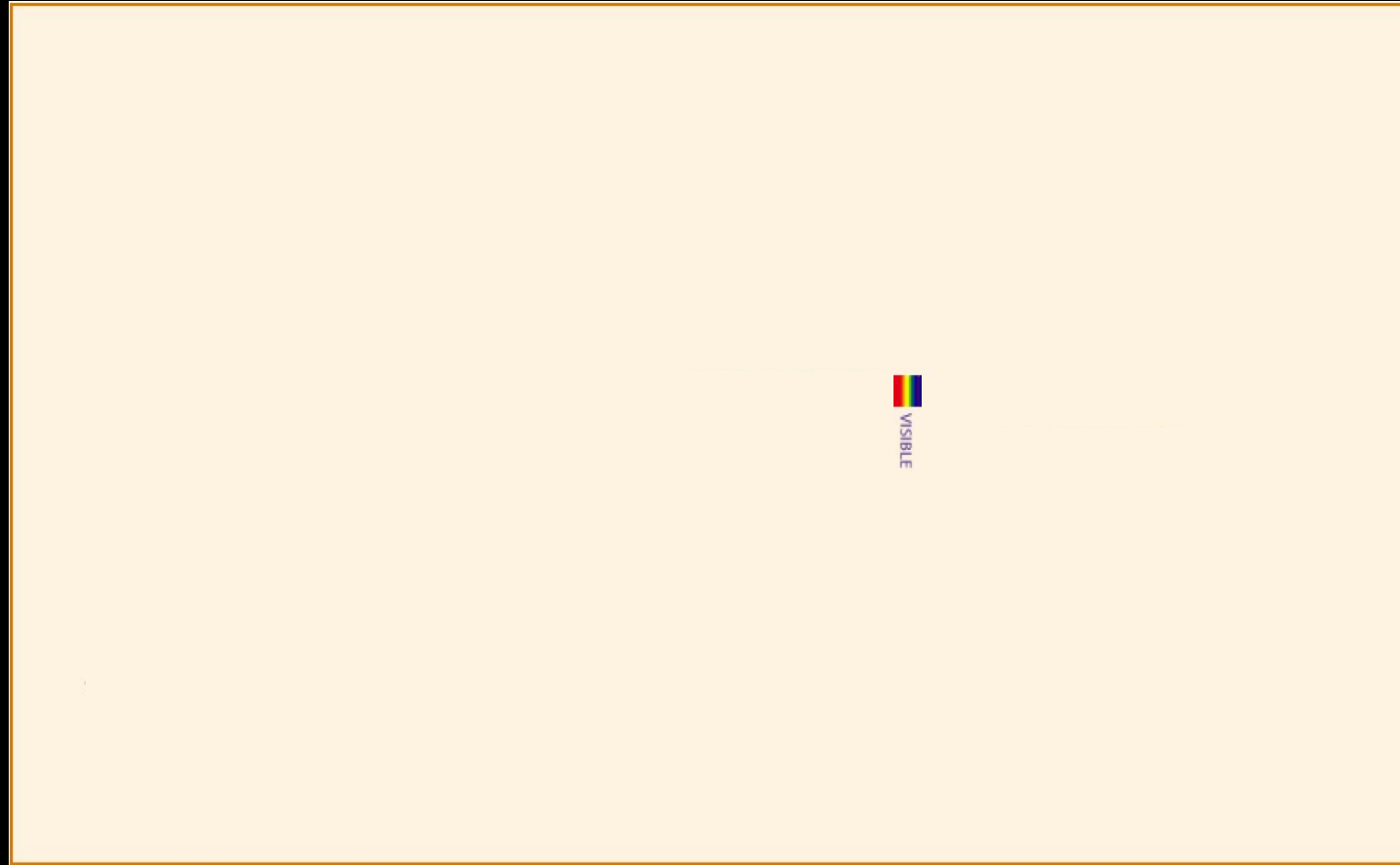
Kepler 1610



Huygens 1678



Newton 1666



Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

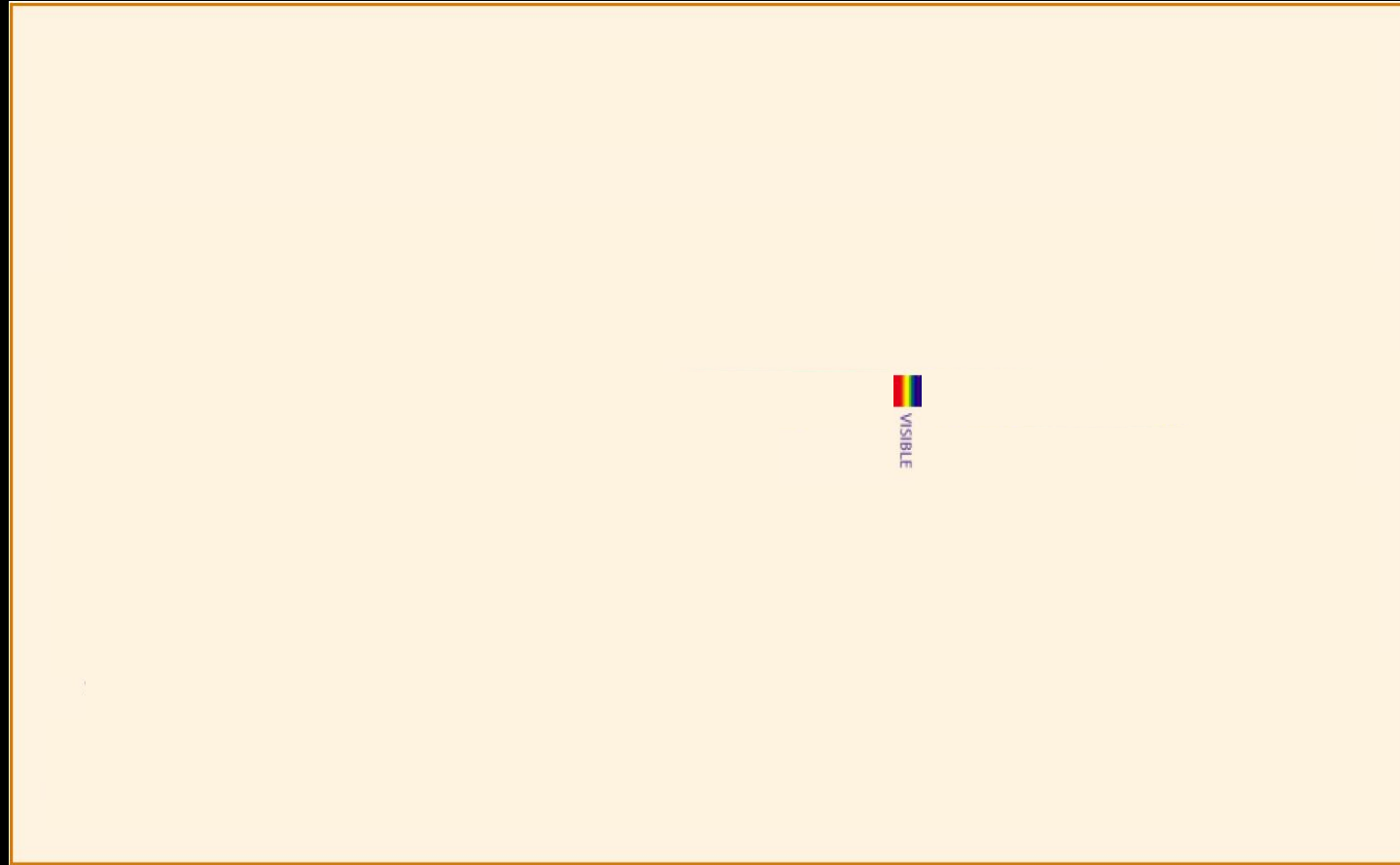


Huygens 1678



Newton 1666

XVIII^e



Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

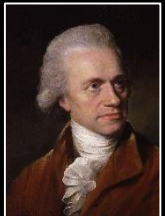


Huygens 1678

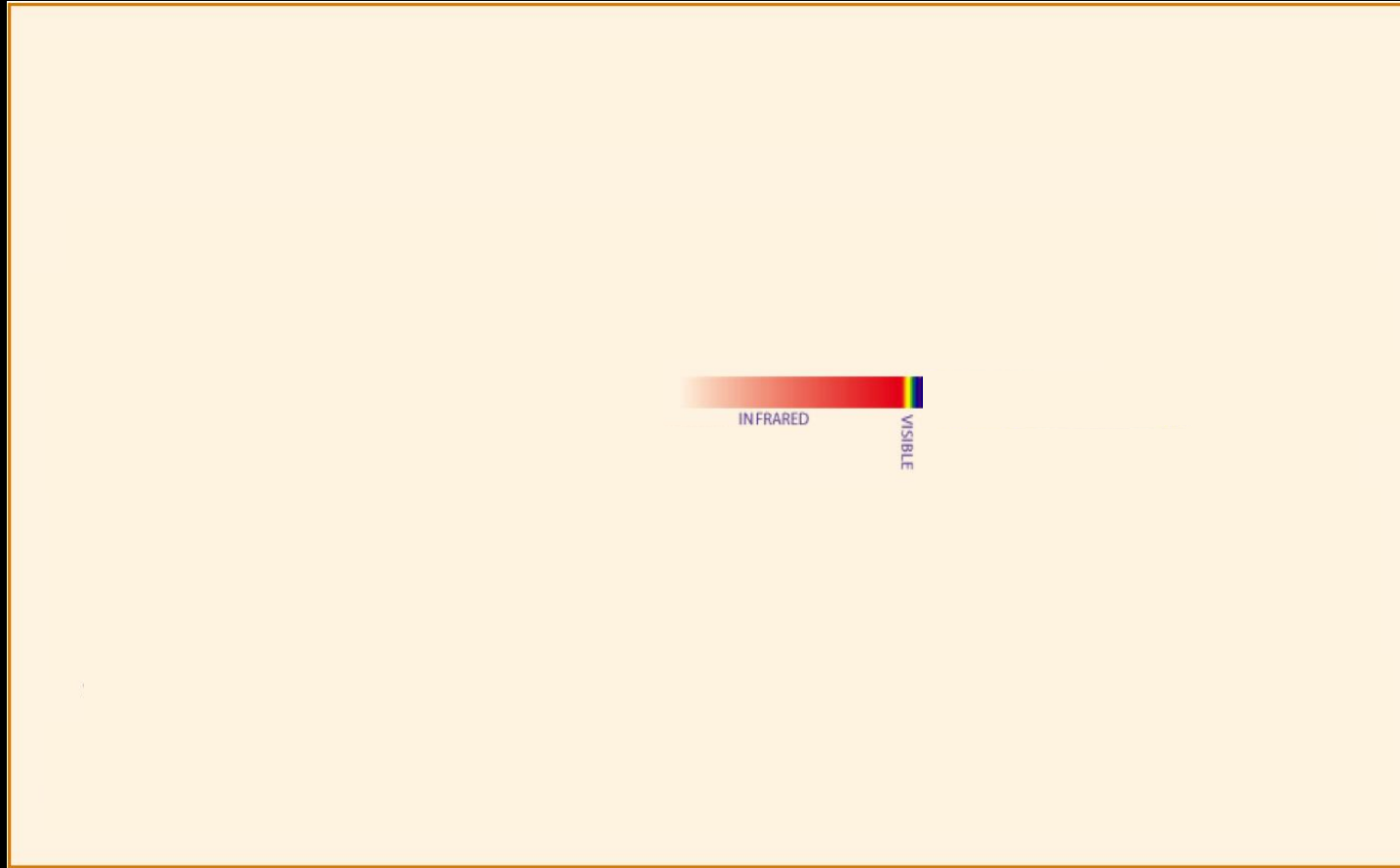


Newton 1666

XVIII^e



Herschel 1800
IR



Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

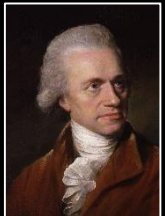


Huygens 1678



Newton 1666

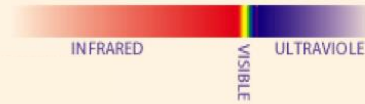
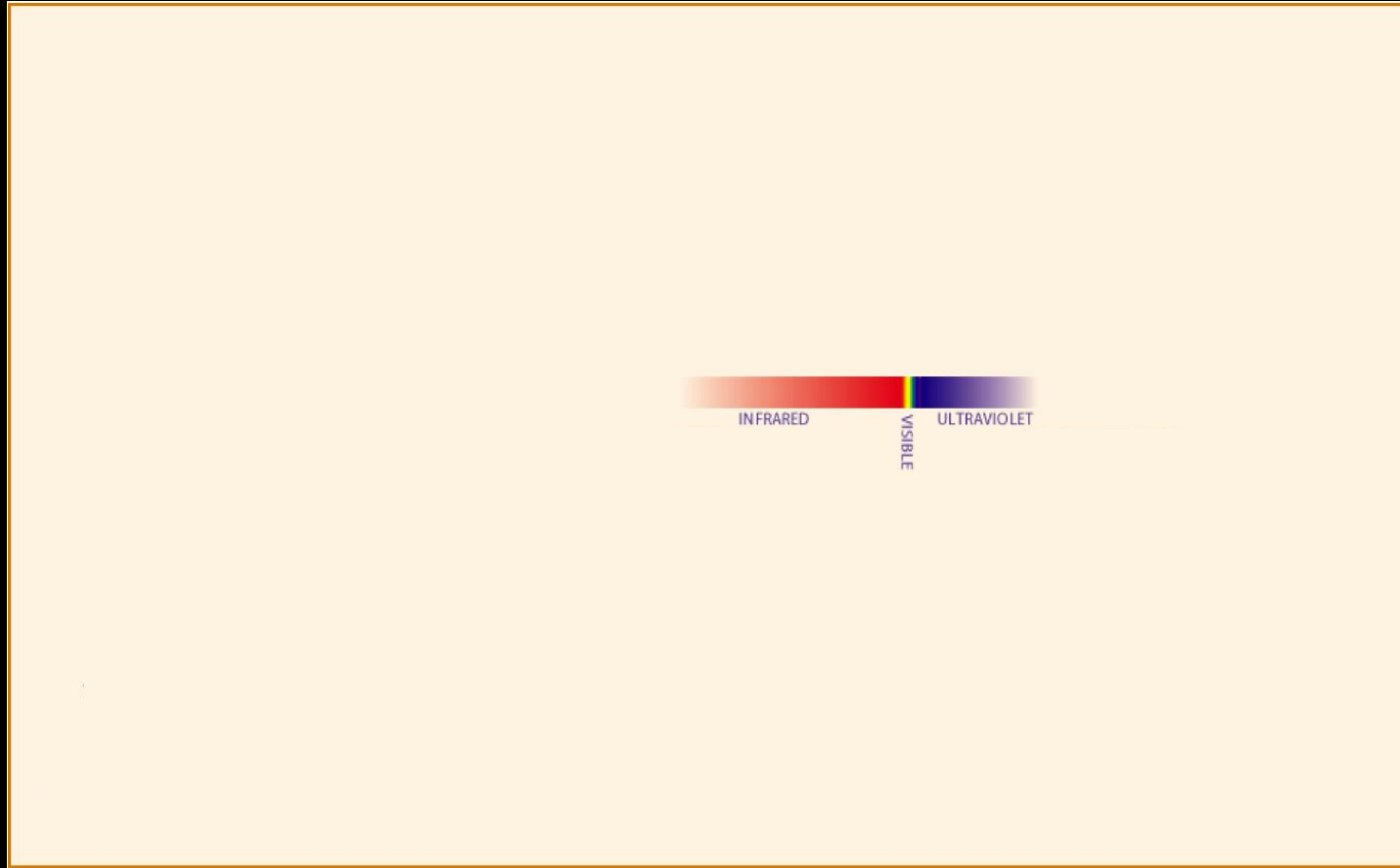
XVIII^e



Herschel 1800
IR



Ritter 1801
UV



Rayons
thermiques



AgCl

Rayons
chimiques

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

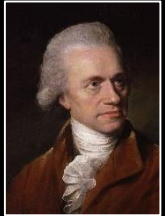


Huygens 1678



Newton 1666

XVIII^e



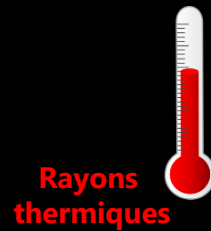
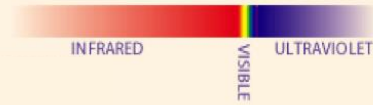
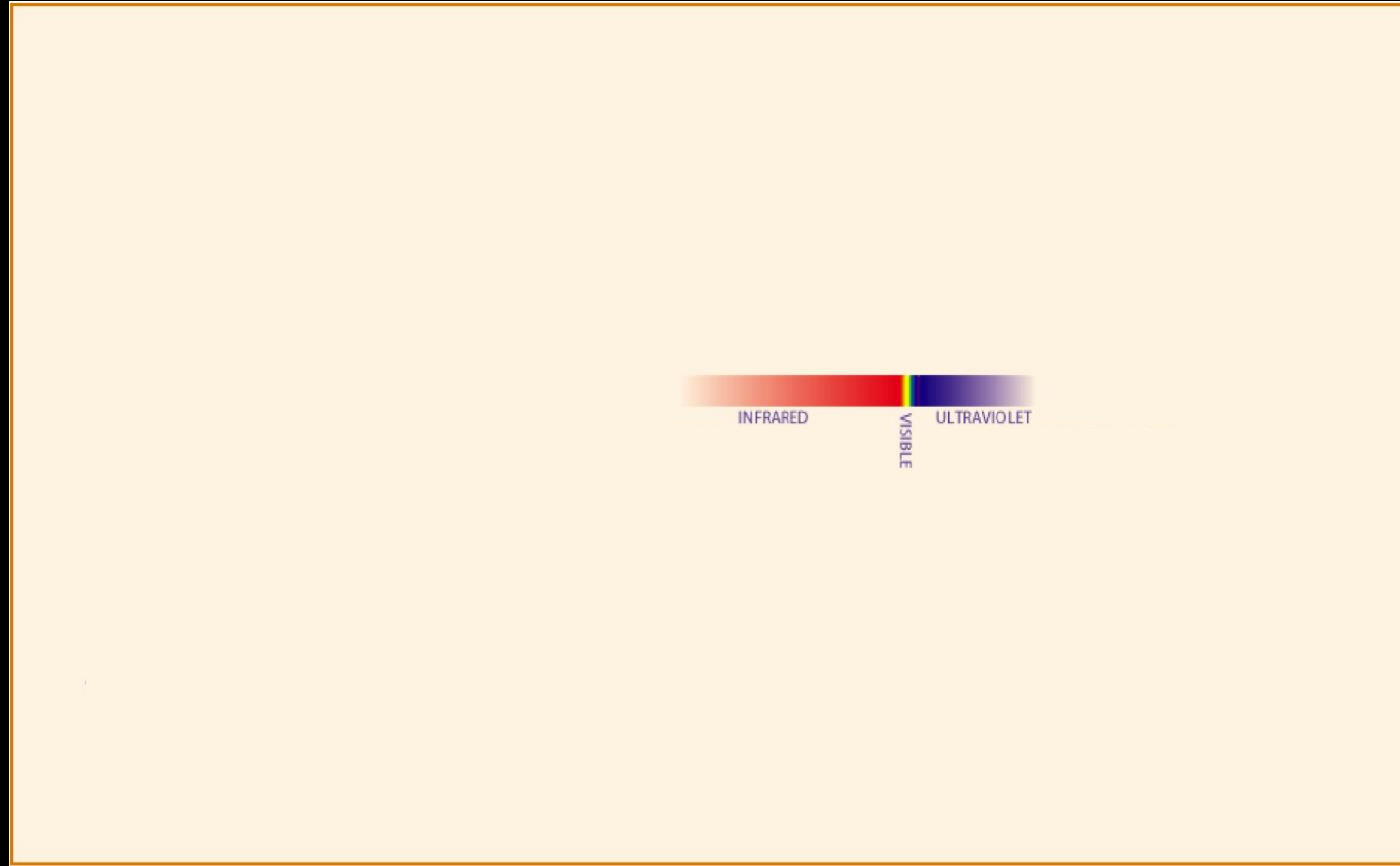
Herschel 1800
IR



Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



Rayons
thermiques



Rayons
chimiques

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

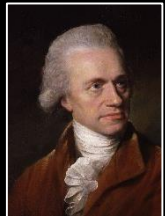


Huygens 1678



Newton 1666

XVIII^e



Herschel 1800
IR



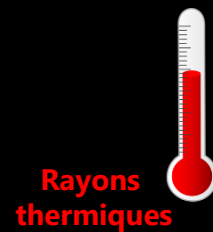
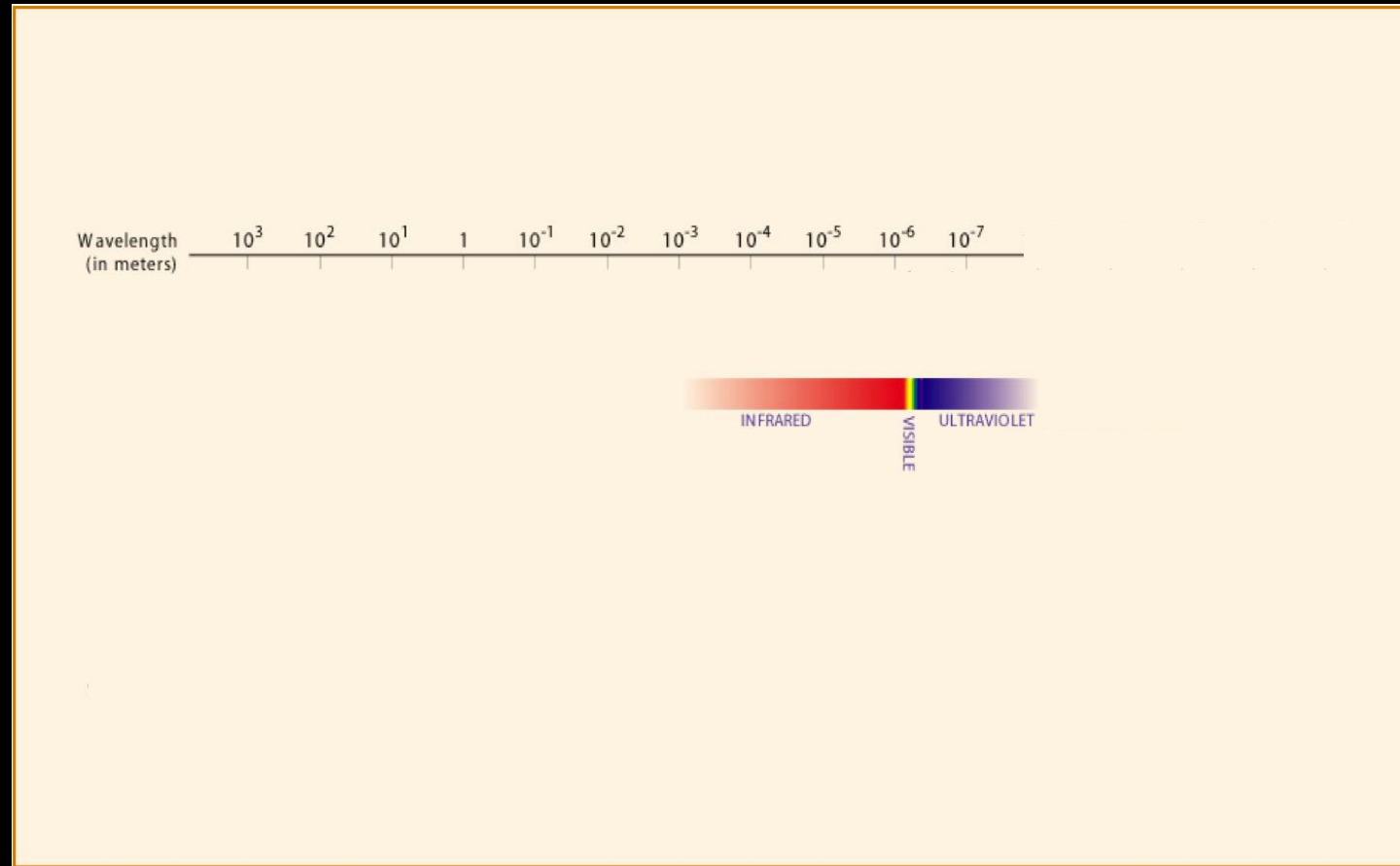
Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Rayons
chimiques

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

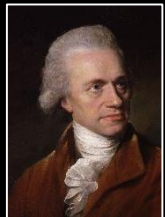


Huygens 1678



Newton 1666

XVIII^e



Herschel 1800
IR



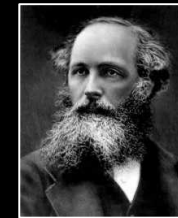
Ritter 1801
UV



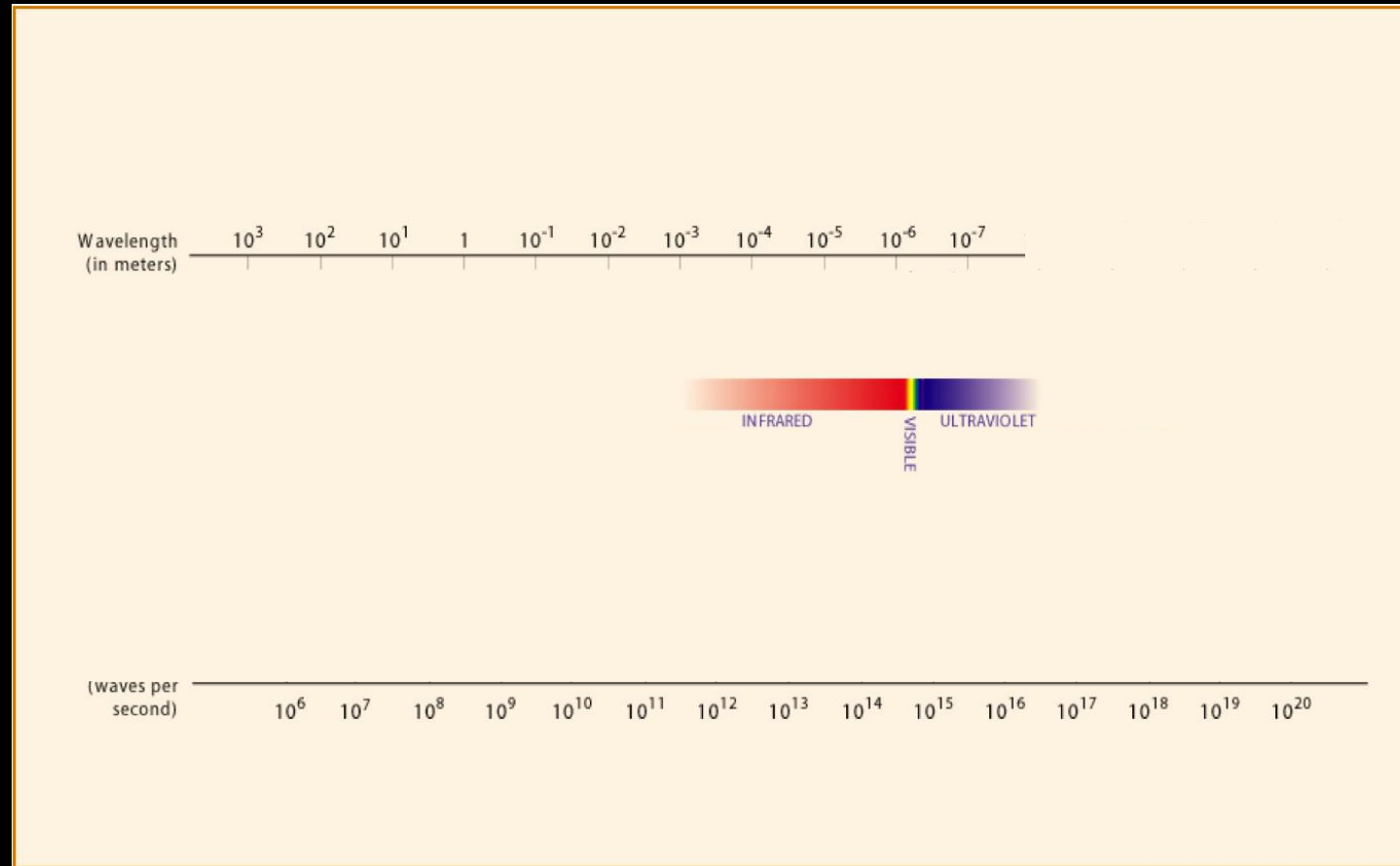
Young 1801
Ondes



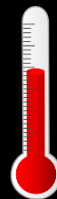
Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Maxwell 1861
Ondes EM



Rayons
thermiques



AgCl

Rayons
chimiques

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

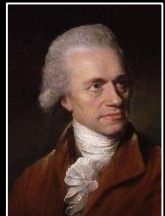


Huygens 1678



Newton 1666

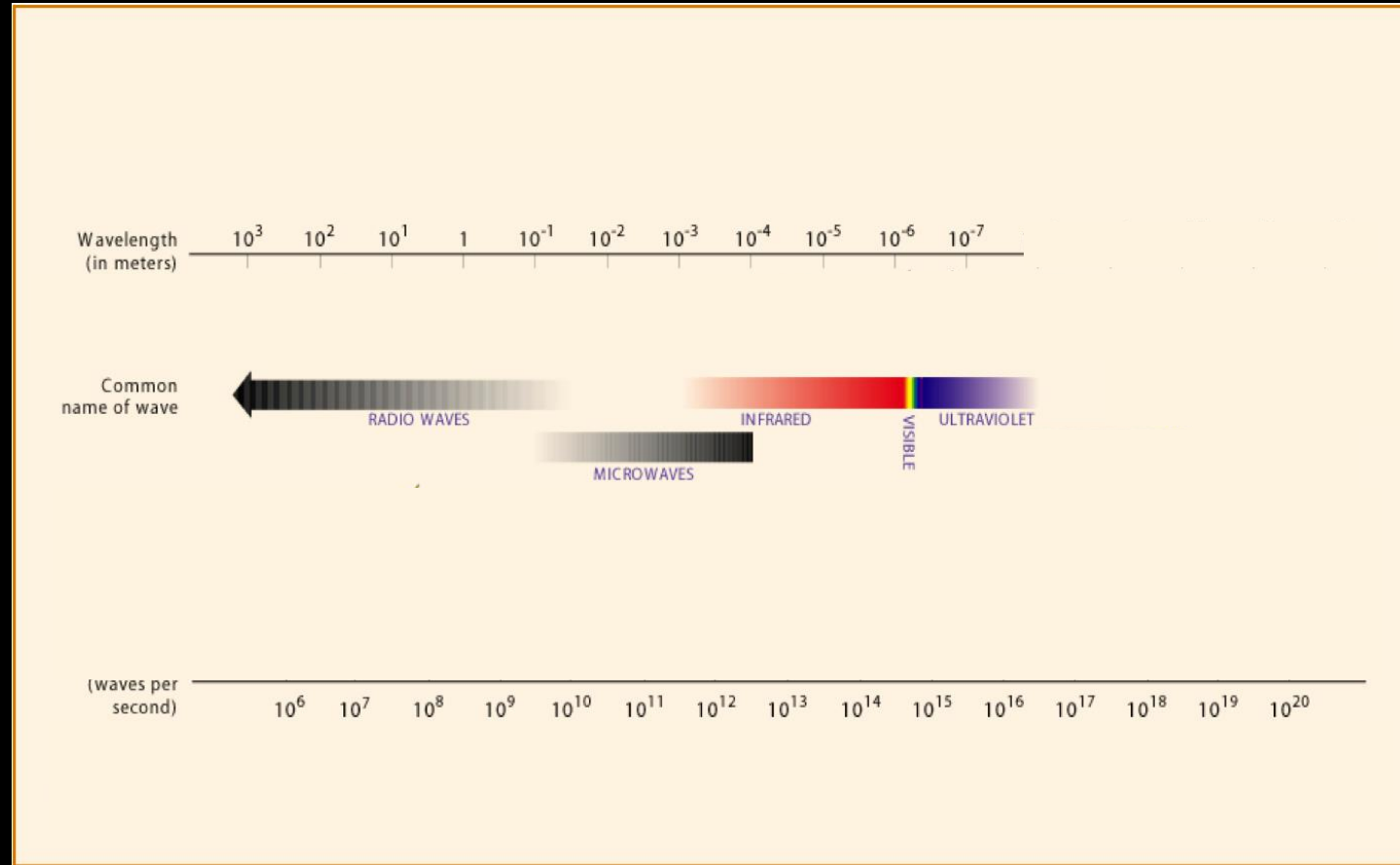
XVIII^e



Herschel 1800
IR



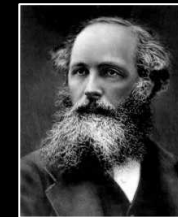
Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



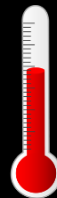
Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Maxwell 1861
Ondes EM



Hertz 1887
Radio ; PE



Rayons
thermiques



Rayons
chimiques

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

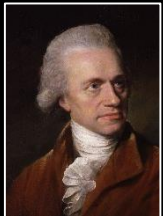


Huygens 1678



Newton 1666

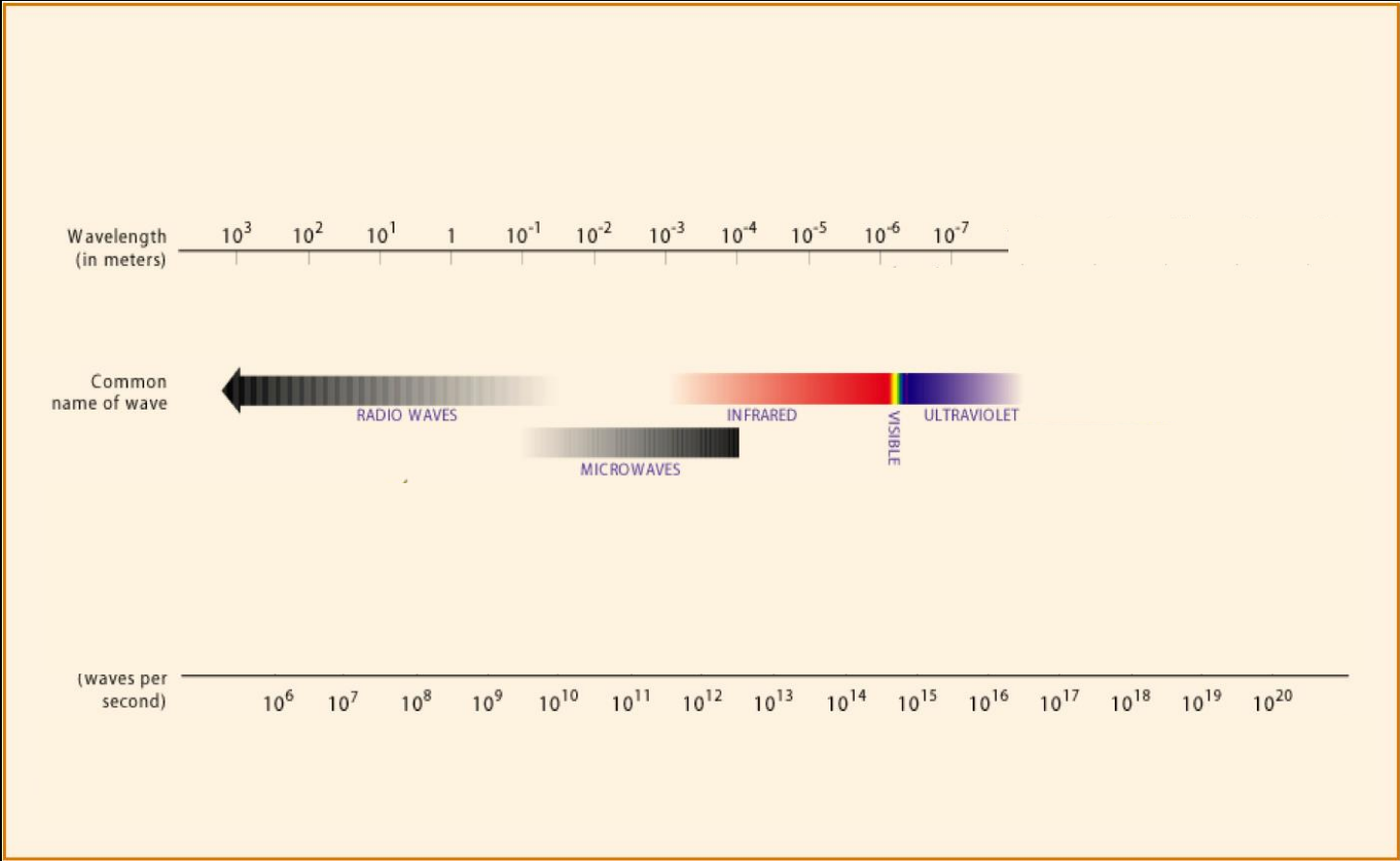
XVIII^e



Herschel 1800
IR



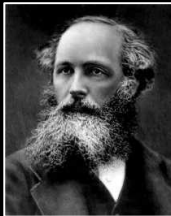
Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Maxwell 1861
Ondes EM



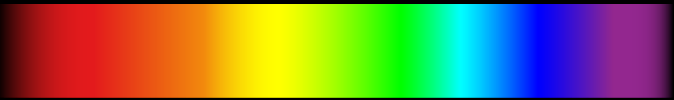
Hertz 1887
Radio ; PE



Röntgen 1895
RX



Rayons
thermiques



Rayons
chimiques

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

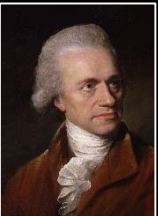


Huygens 1678



Newton 1666

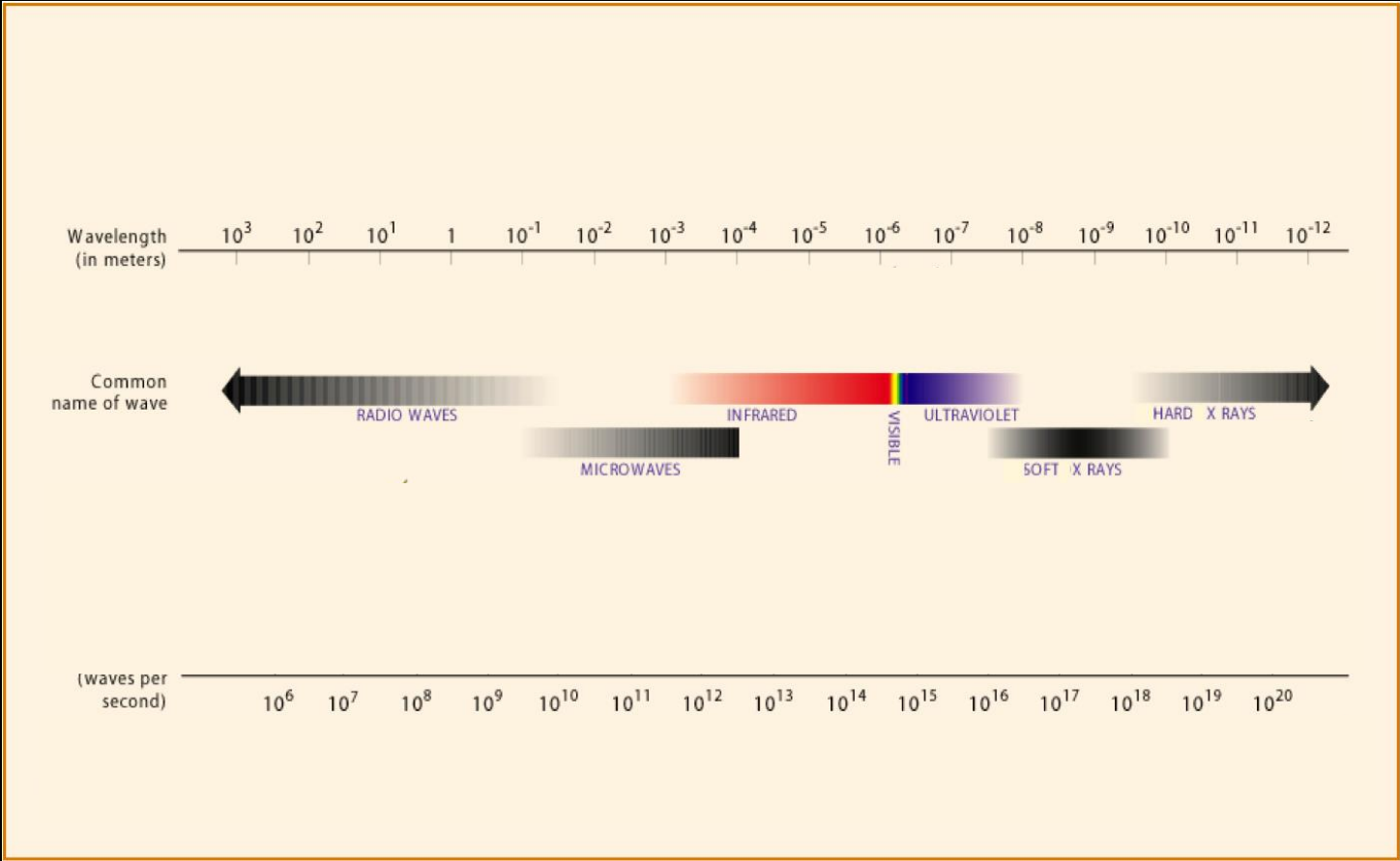
XVIII^e



Herschel 1800
IR



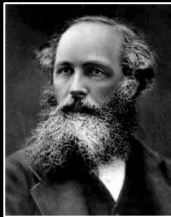
Ritter 1801
UV



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^e



Kepler 1610

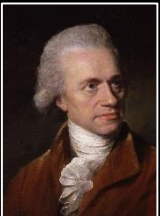


Huygens 1678



Newton 1666

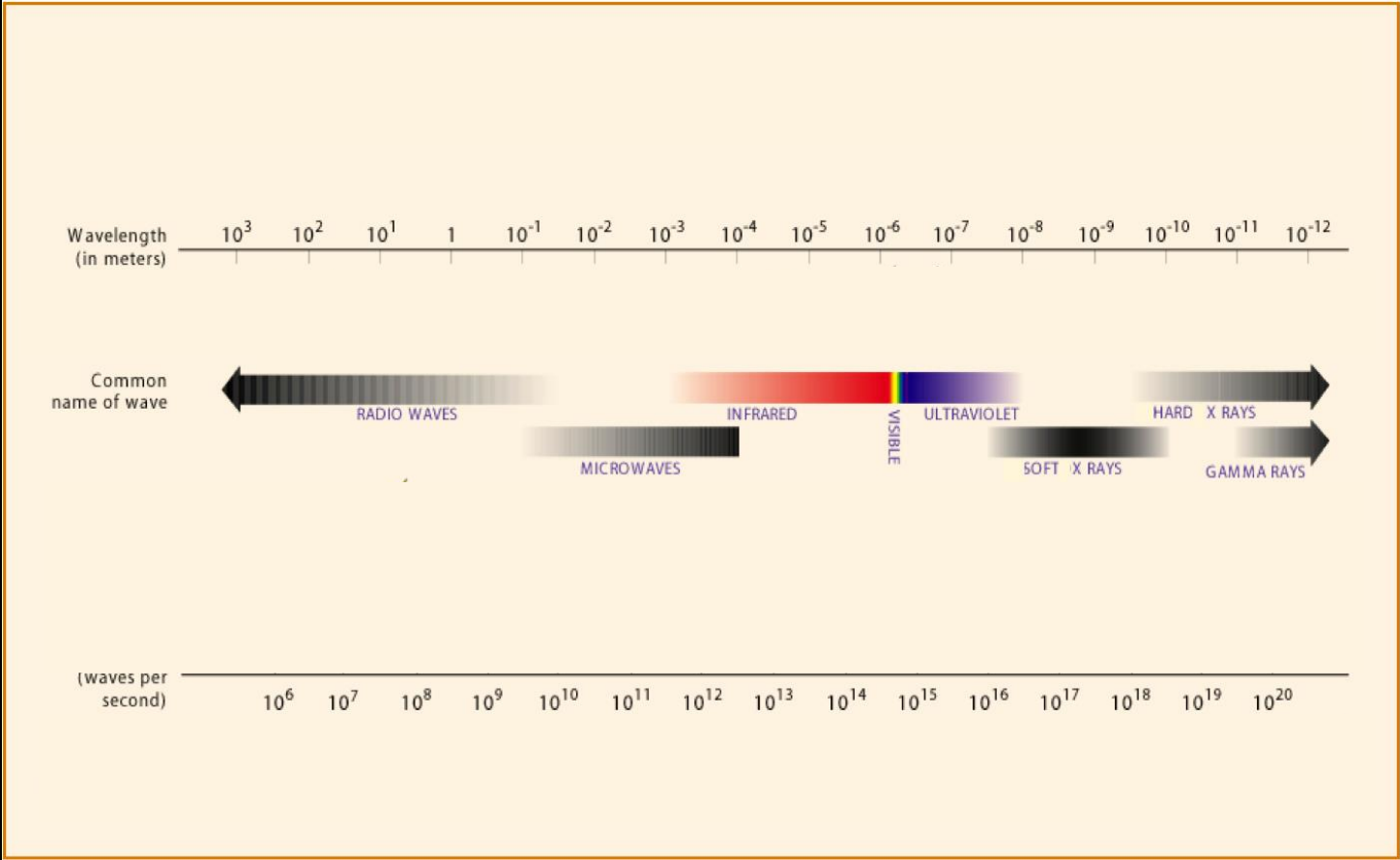
XVIII^e



Herschel 1800
IR



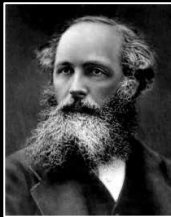
Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Maxwell 1861
Ondes EM



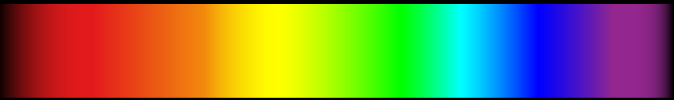
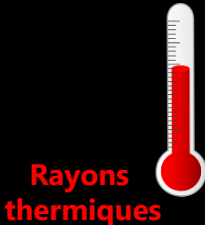
Hertz 1887
Radio ; PE



Röntgen 1895
RX



Laue 1912
Diffraction



Rayons chimiques

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

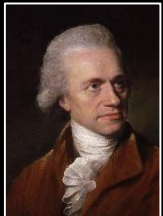


Huygens 1678



Newton 1666

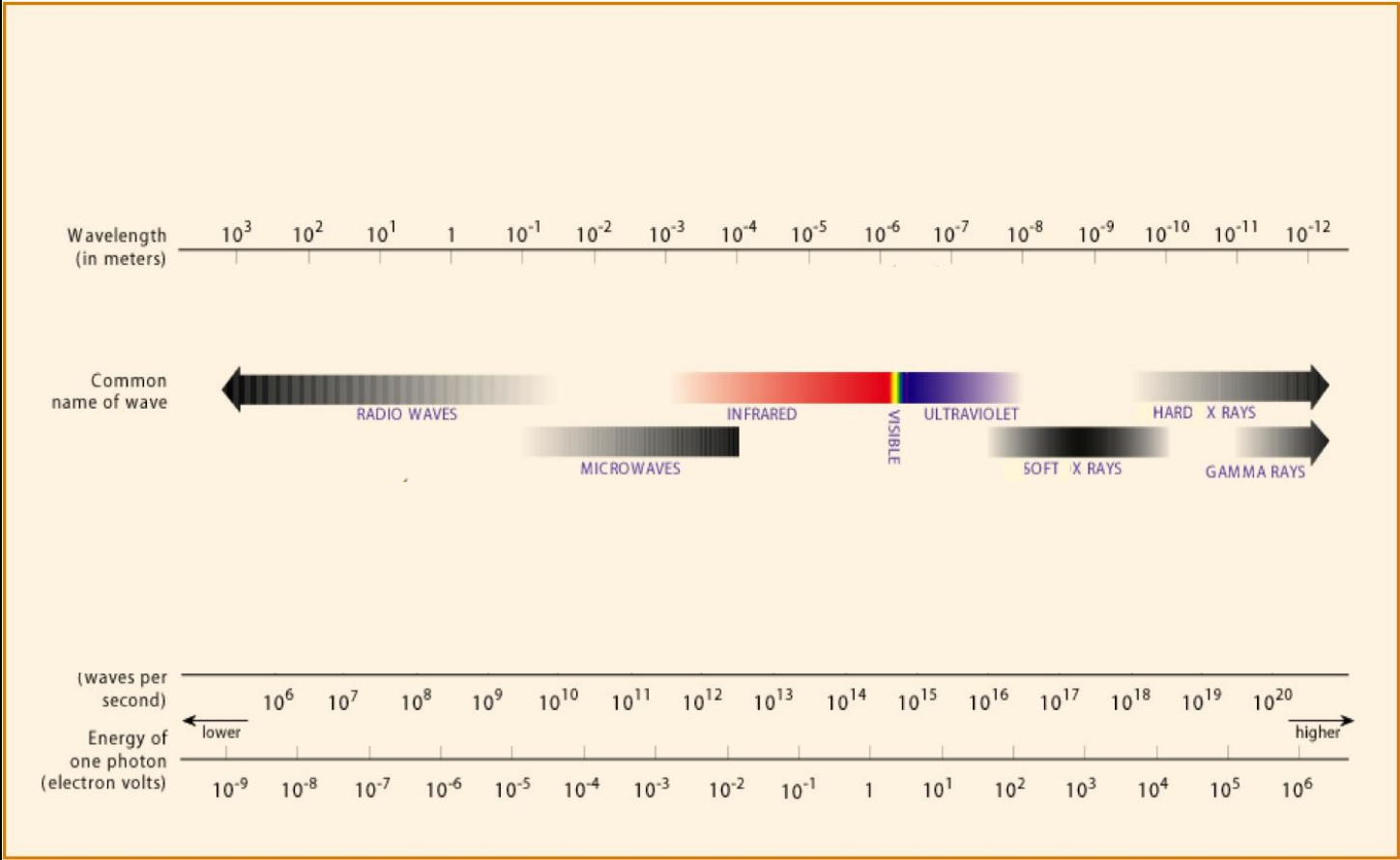
XVIII^e



Herschel 1800
IR



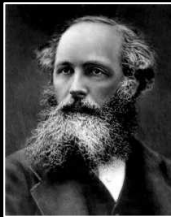
Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Maxwell 1861
Ondes EM



Hertz 1887
Radio ; PE



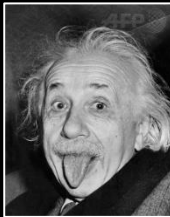
Röntgen 1895
RX



Laue 1912
Diffraction



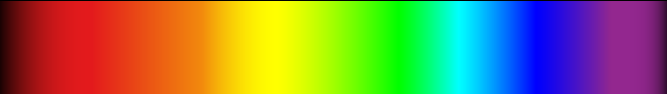
Planck 1900



Einstein 1905



Rayons
thermiques



Rayons
chimiques

$E = h\nu$

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

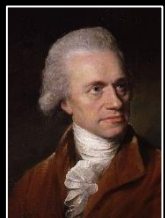


Huygens 1678



Newton 1666

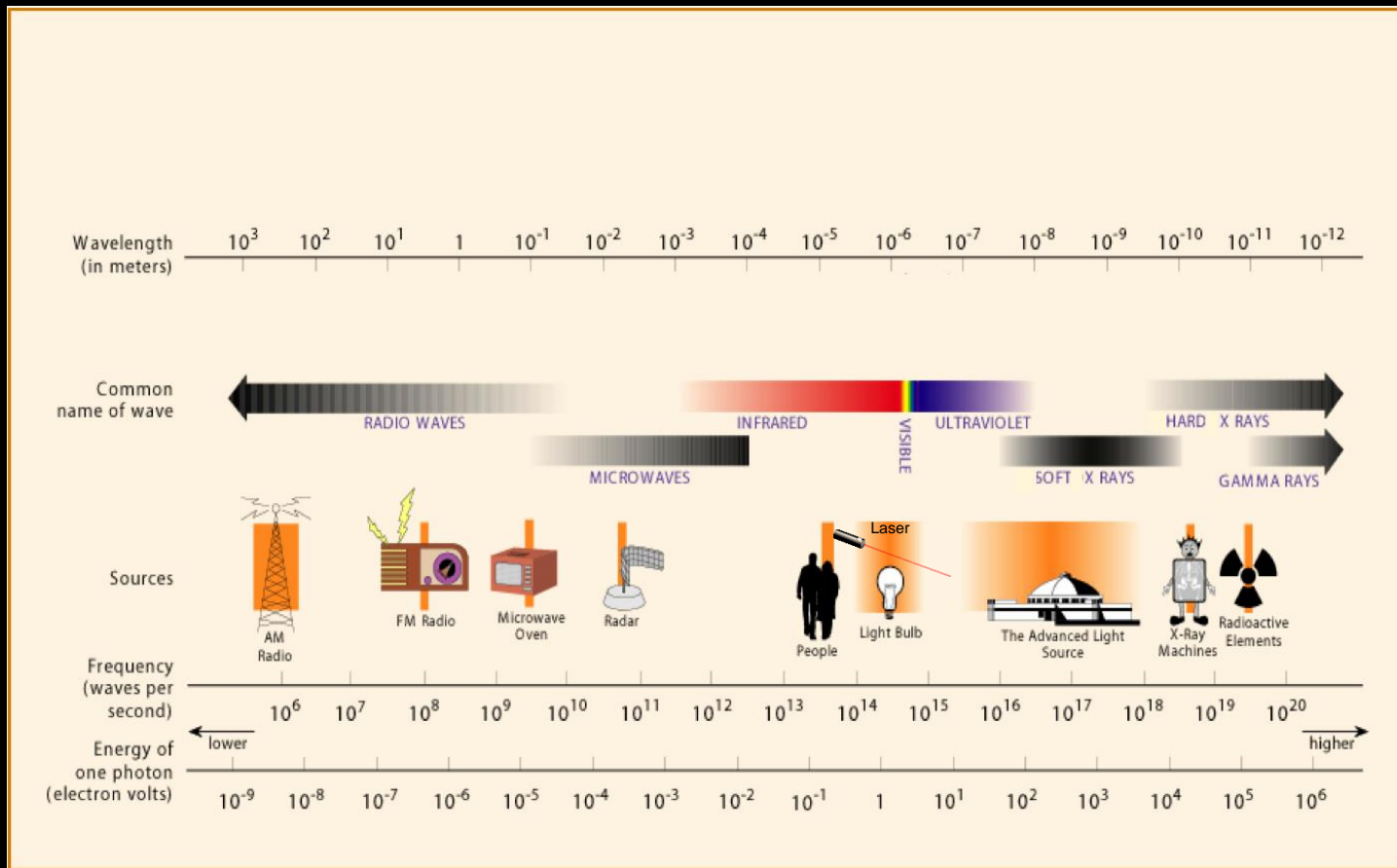
XVIII^e



Herschel 1800
IR



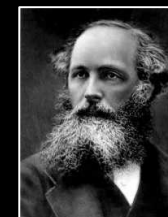
Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Maxwell 1861
Ondes EM



Hertz 1887
Radio ; PE



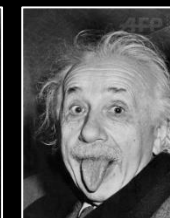
Röntgen 1895
RX



Laue 1912
Diffraction

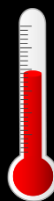


Planck 1900



Einstein 1905

Rayons
thermiques



Rayons
chimiques

$$E = h\nu$$

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

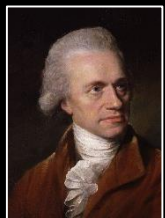


Huygens 1678



Newton 1666

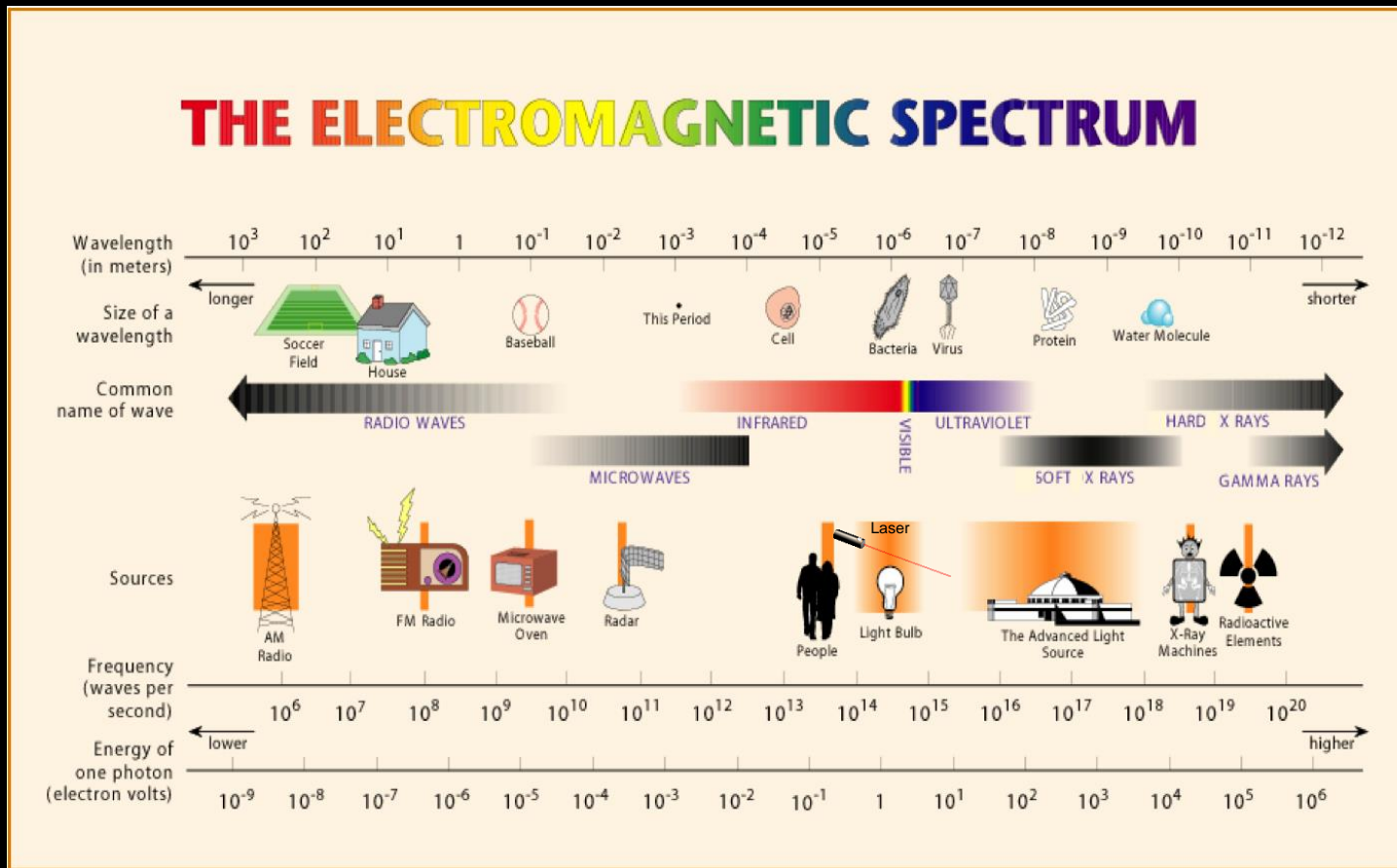
XVIII^e



Herschel 1800
IR



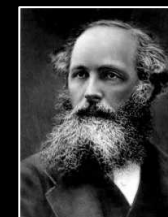
Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Maxwell 1861
Ondes EM



Hertz 1887
Radio ; PE



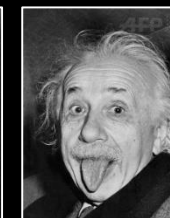
Röntgen 1895
RX



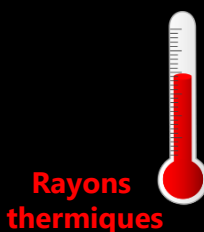
Laue 1912
Diffraction



Planck 1900



Einstein 1905



Rayons chimiques

$$E = h\nu$$

Le spectre électromagnétique

Avant le XVII^e



Kepler 1610

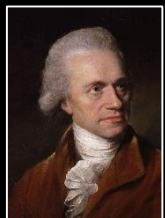


Huygens 1678



Newton 1666

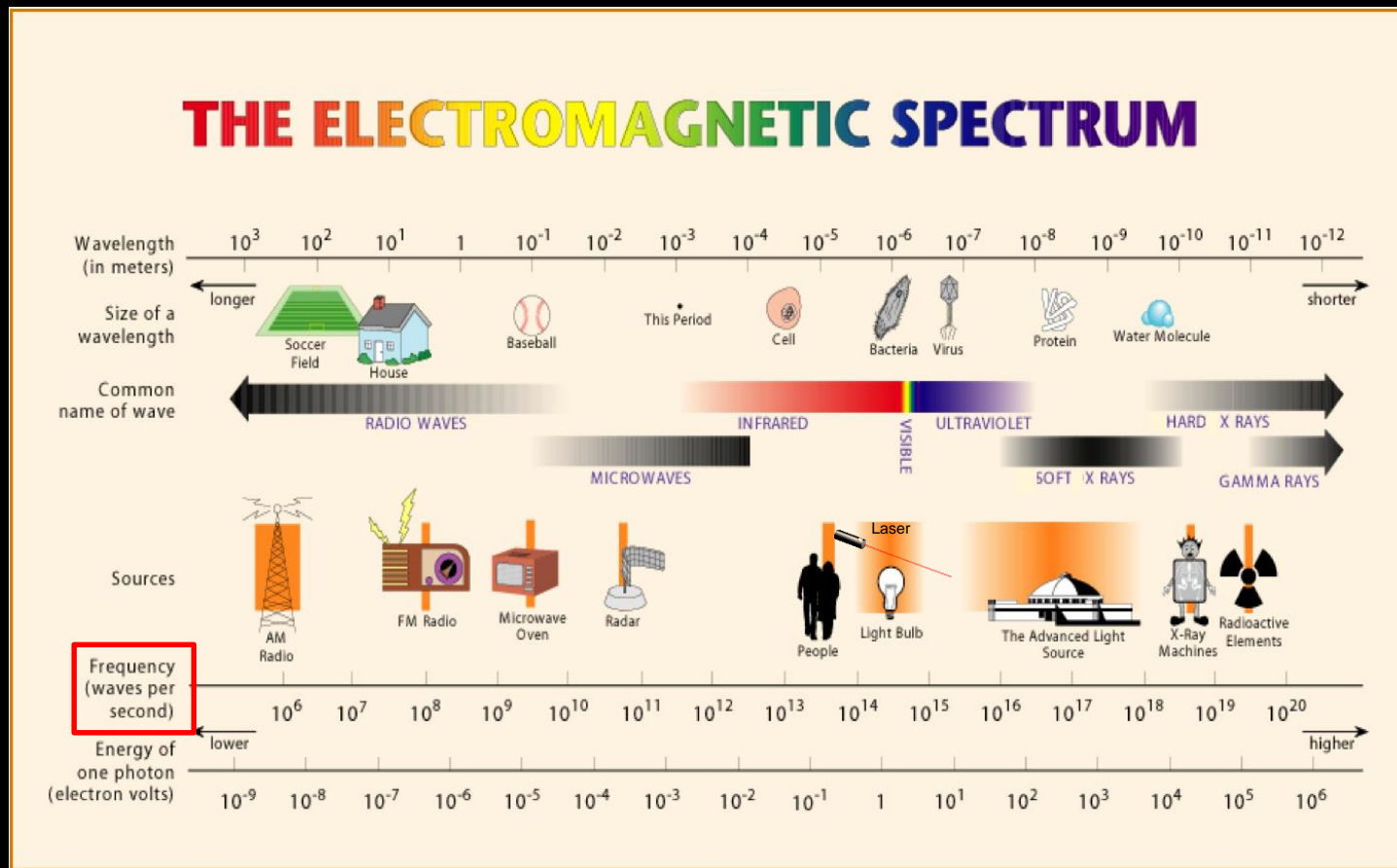
XVIII^e



Herschel 1800
IR



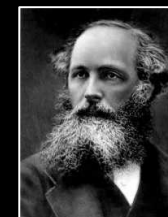
Ritter 1801
UV



Young 1801
Ondes



Fresnel 1815
Opt. Ondul.



Maxwell 1861
Ondes EM



Hertz 1887
Radio ; PE



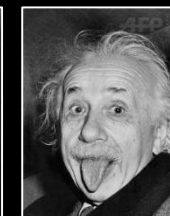
Röntgen 1895
RX



Laue 1912
Diffraction



Planck 1900



Einstein 1905

Rayons
thermiques



AgCl

Rayons
chimiques

$$E = h\nu$$

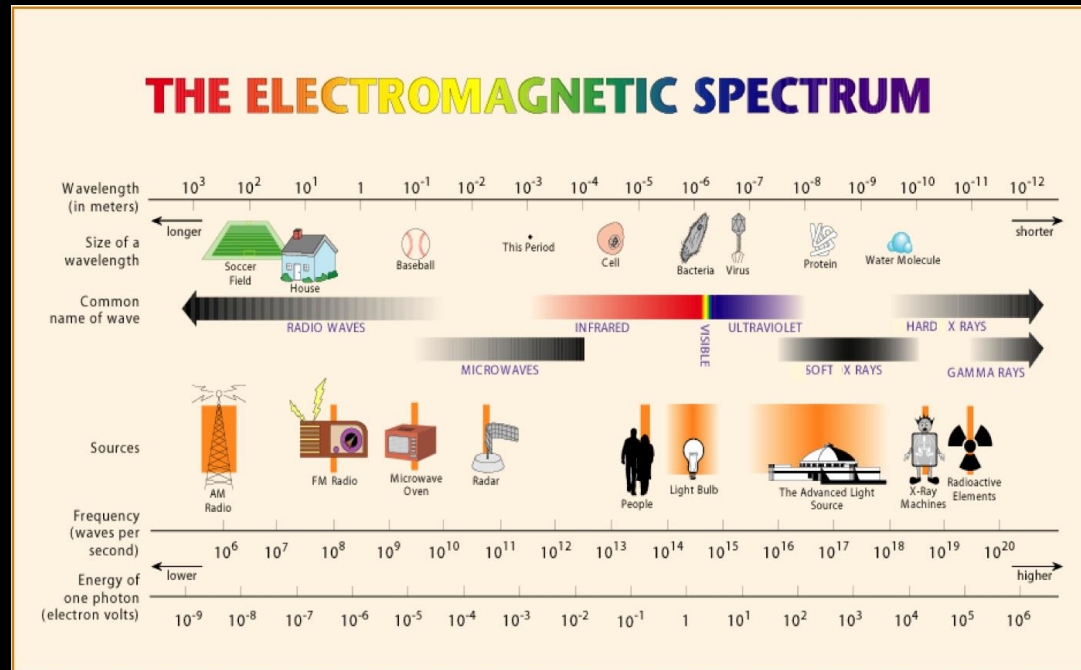
Une onde et un corpuscule



1773-1829

1788-1827

~ 1800



Les ondes sont caractérisées par leur :

Fréquence ν (Hz), longueur d'onde λ ds le vide

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

Doivent être utilisées pour la diffusion ou diffraction

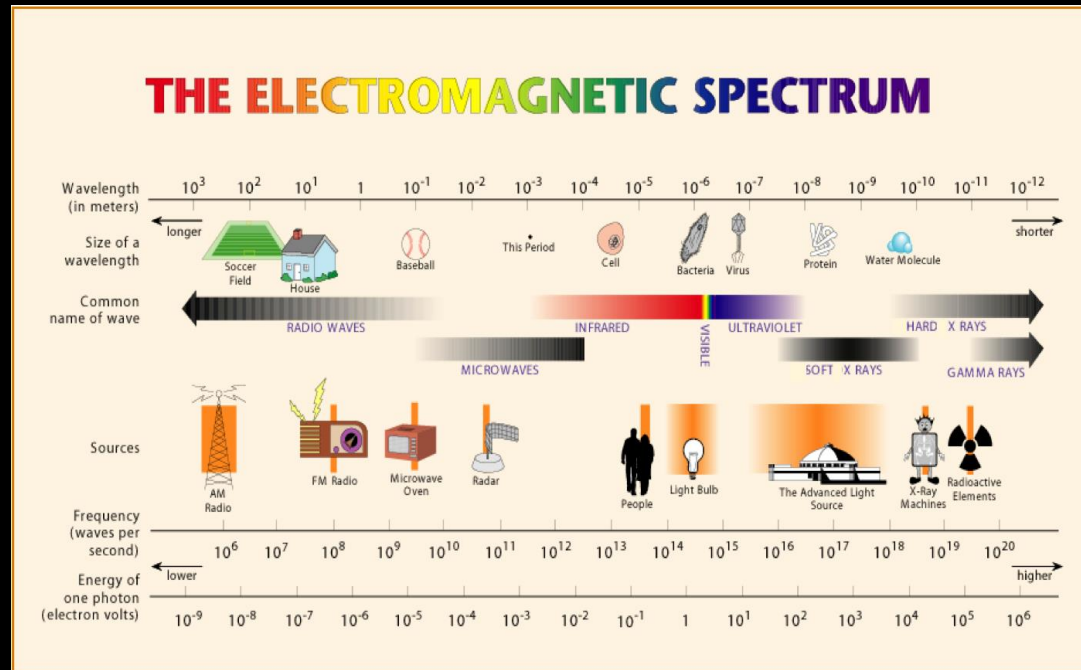
Une onde et un corpuscule



1773-1829

1788-1827

~ 1800



Les ondes sont caractérisées par leur :



Frequence ν (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

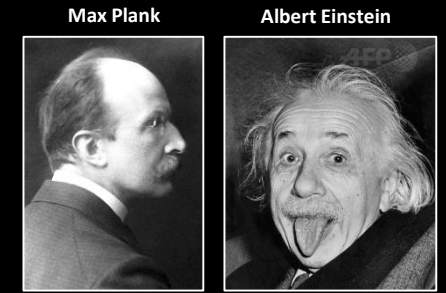
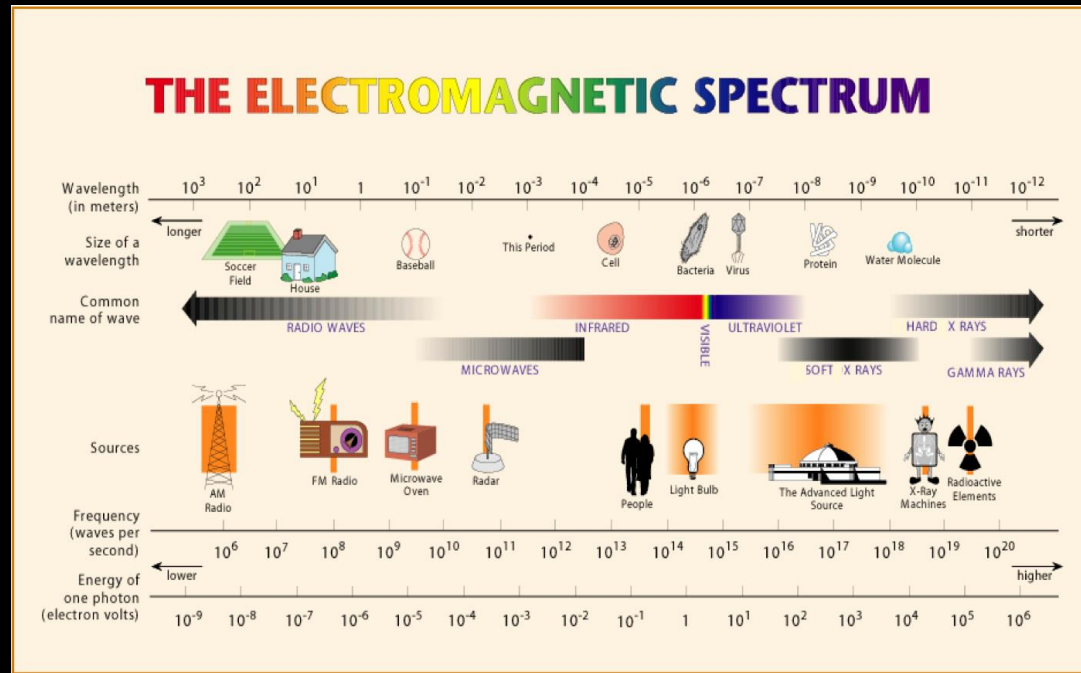
Une onde et un corpuscule



1773-1829

1788-1827

~ 1800

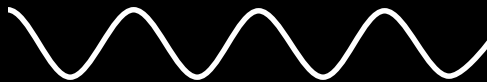


1858-1947

1879-1955

~ 1900

Les ondes sont caractérisées par leur :



Frequence ν (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

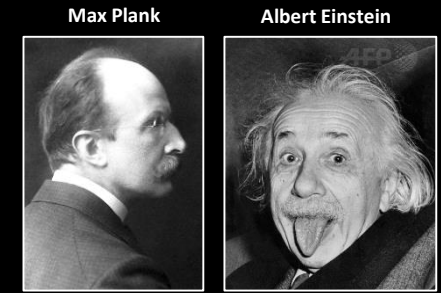
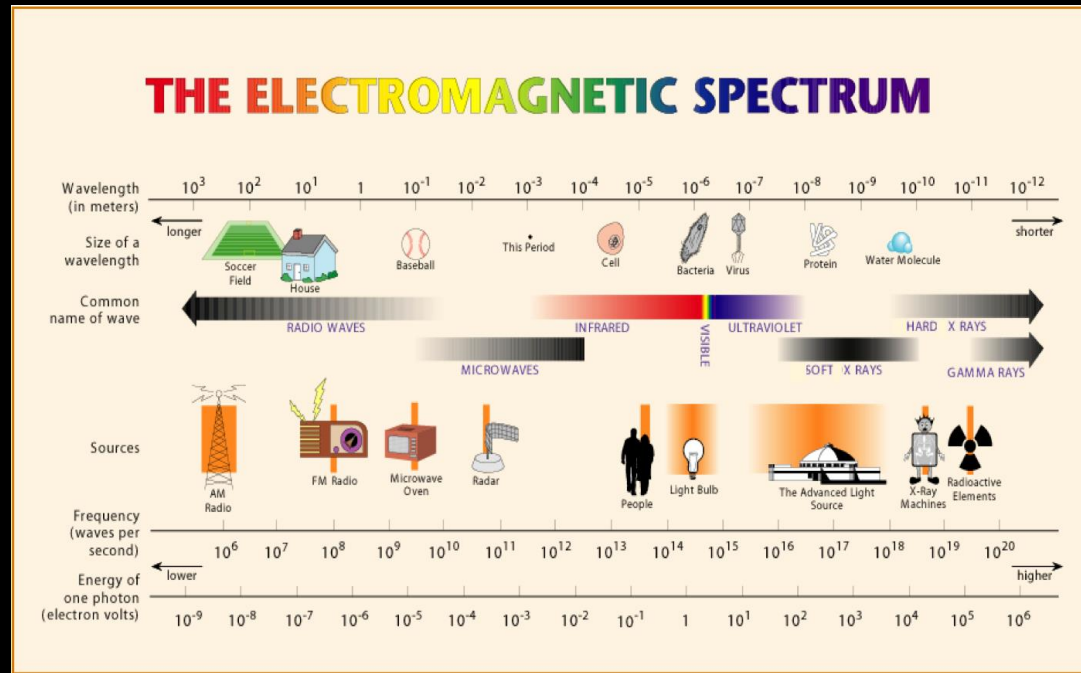
Une onde et un corpuscule



1773-1829

1788-1827

~ 1800

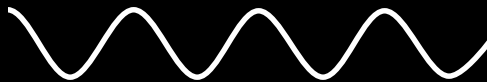


1858-1947

1879-1955

~ 1900

Les ondes sont caractérisées par leur :



Fréquence ν (Hz), longueur d'onde λ ds le vide

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

Doivent être utilisées pour la diffusion ou diffraction

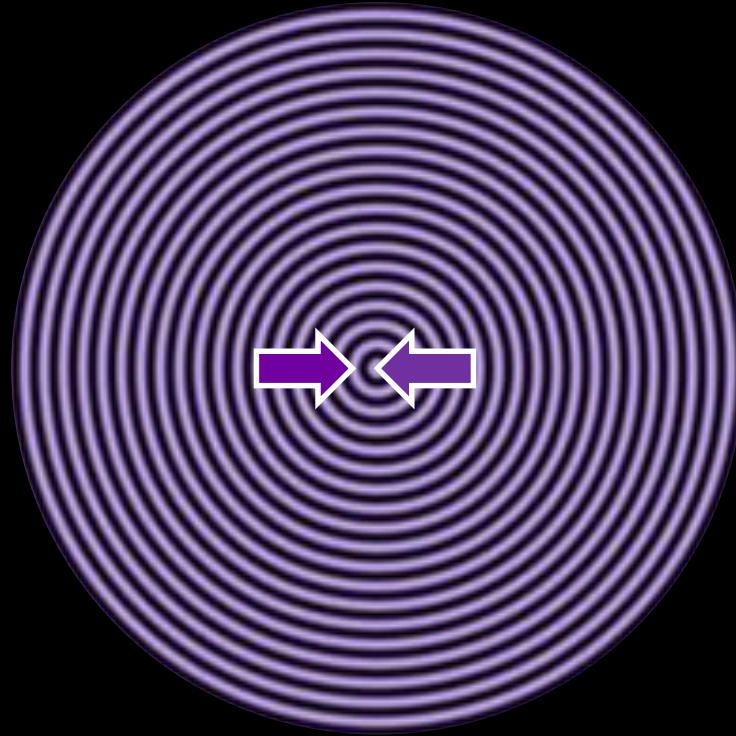
Complémentarité

Photons sont caractérisés par :



Energie
 $E = h\nu$ (eV)

Doivent être utilisés pour les phénomènes d'absorption

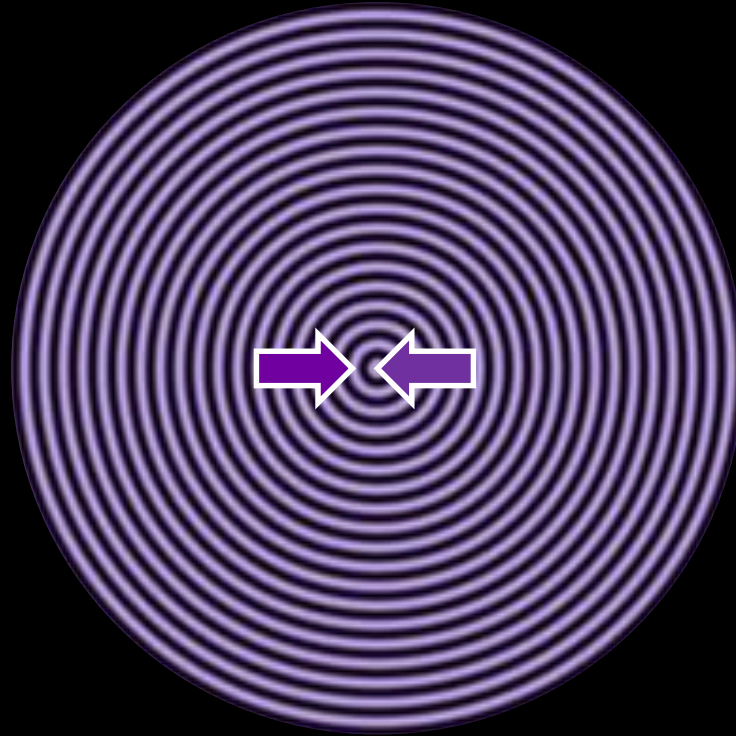


Longueur d'onde

Infra-rouge L : 350 μm ; M : 40 μm ; P : 2,5 μm ; Visible : 700 nm à 400 nm ; UV : 100-400 nm ; XUV : 10 nm ; RX : 0,1-1 nm

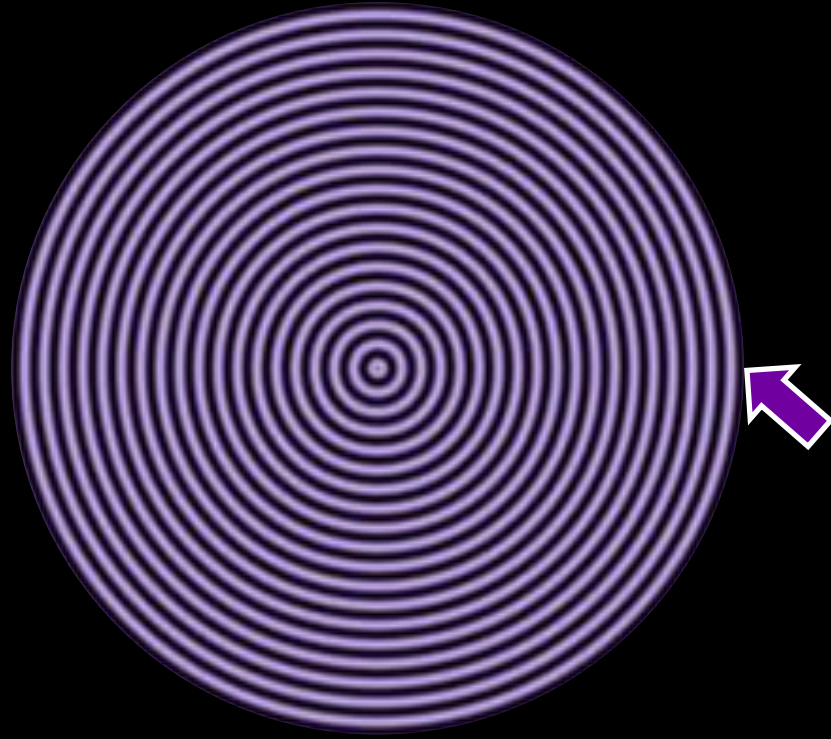
Vecteur d'onde :

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



Longueur d'onde

Infra-rouge L : 350 μm ; M : 40 μm ; P : 2,5 μm ; Visible : 700 nm à 400 nm ; UV : 100-400 nm ; XUV : 10 nm ; RX : 0,1-1 nm

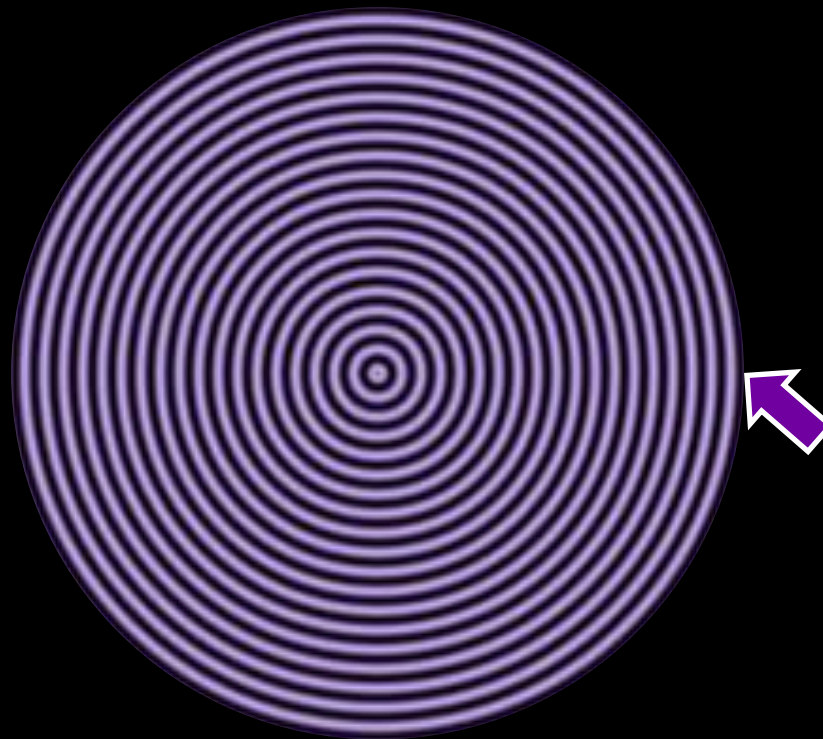


Fréquence ν

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

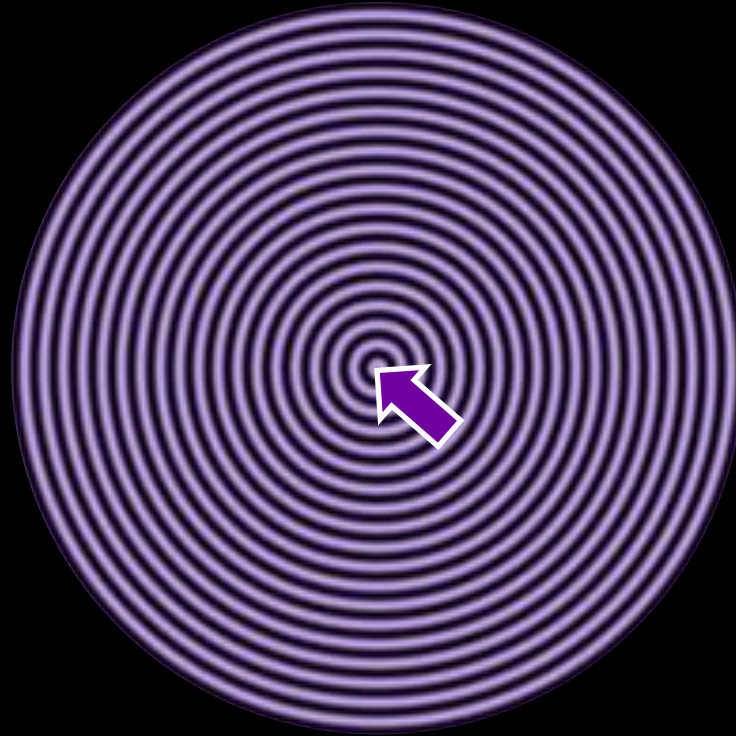
Pulsation :

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



Fréquence ν

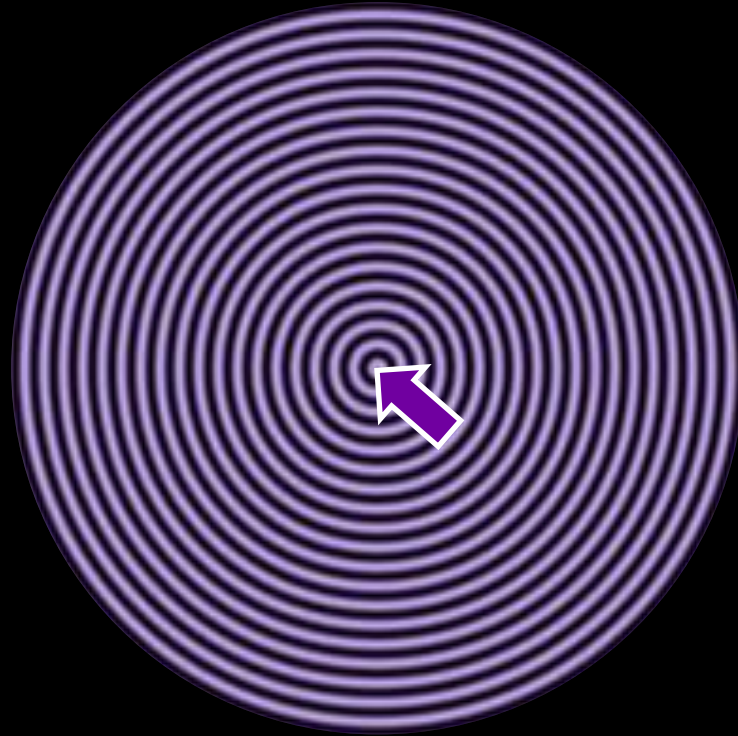
Infra-rouge L : 800 GHz ; M : 120 THz ; P : 430 THz ; Visible : 400 à 750 THz ; UV : 750-3000 THz ; XUV : 10^{16} Hz ; RX : 10^{18} Hz



Vitesse (de phase)

Lumière : $c = 299\,792\,458$ m/s

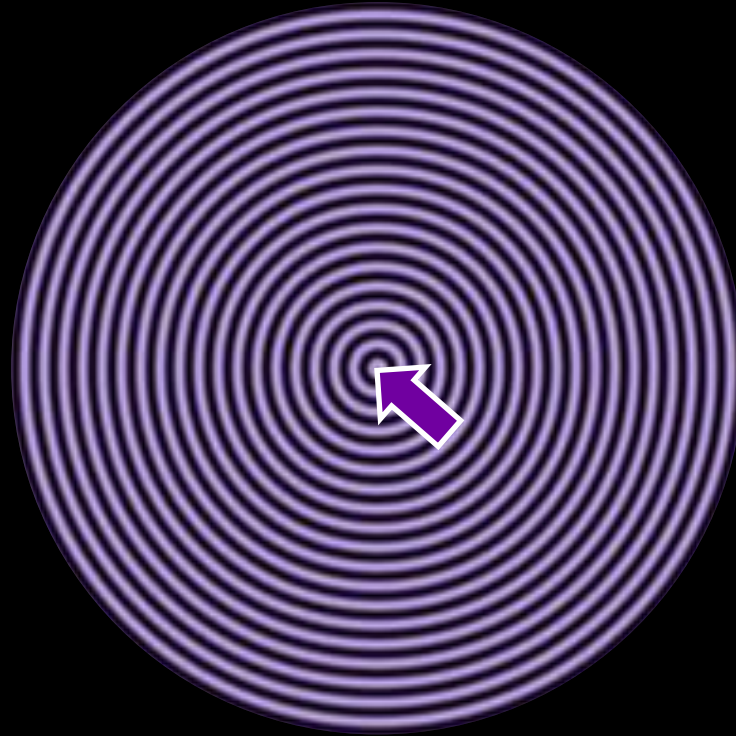
$$\omega = kv_{ph}$$



Vitesse (de phase)

Lumière : $c = 299\,792\,458$ m/s

$$\omega = kv_{ph}$$



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

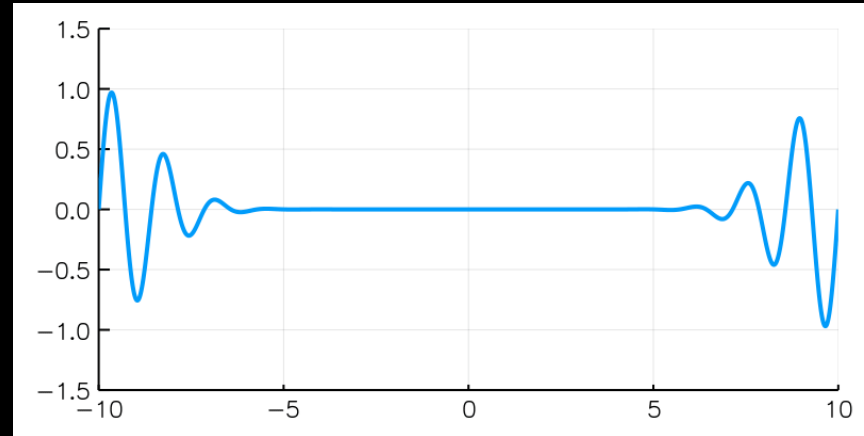
Vitesse (de phase)

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)

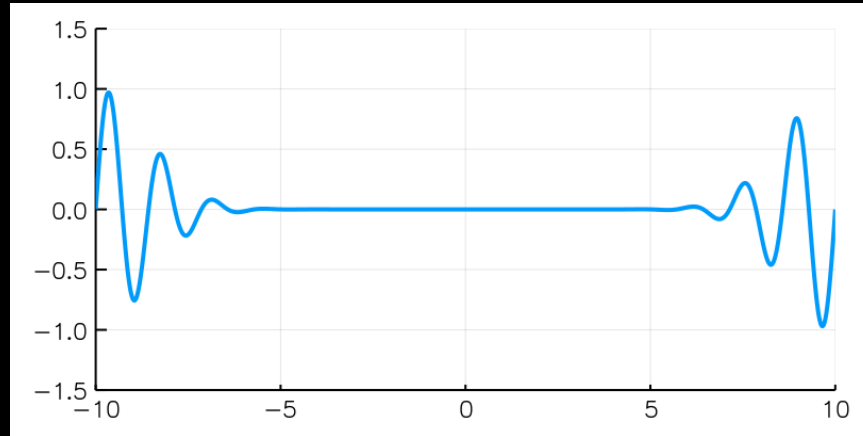


$$E = E_0 \cos(\omega t - kz)$$

Vitesse de phase – vitesse de groupe

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

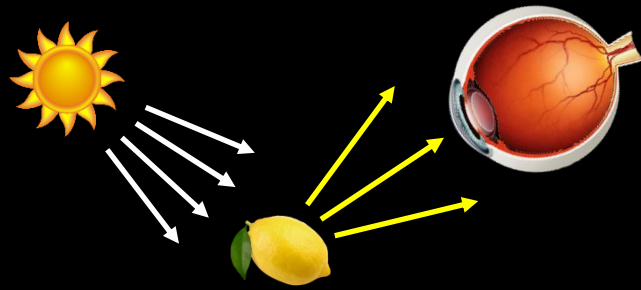
G. Stokes (1876) Lord Rayleigh (1877)



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

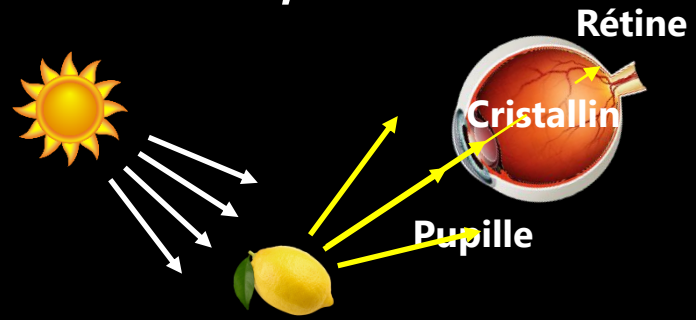
$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

Diffusion, Réflexion



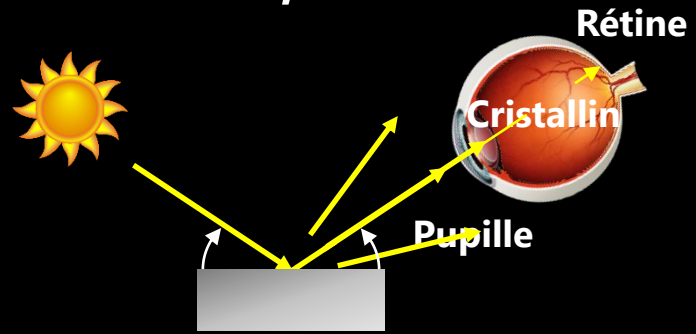
Kepler (1610)

Diffusion, Réflexion



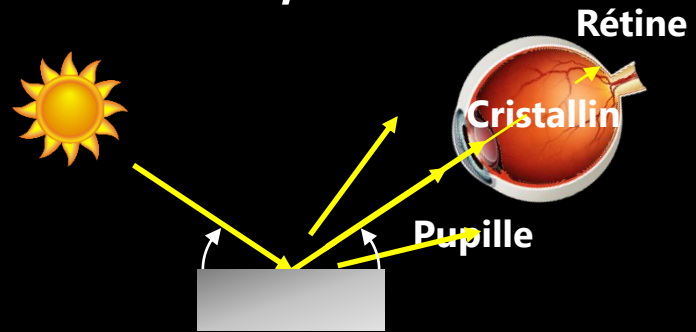
Kepler (1610)

Diffusion, Réflexion



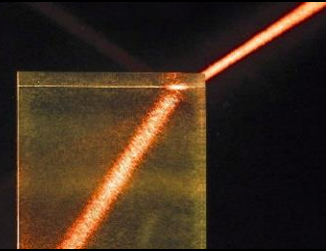
Kepler (1610)

Diffusion, Réflexion

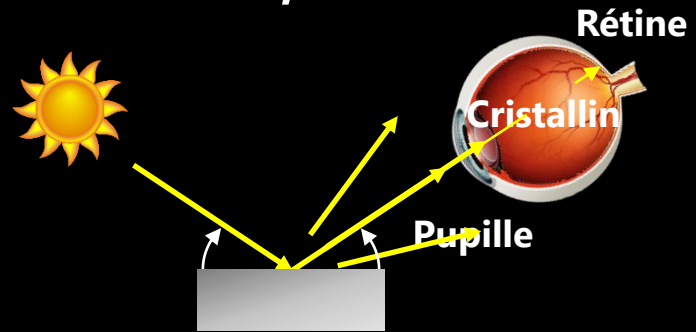


Kepler (1610)

Réfraction

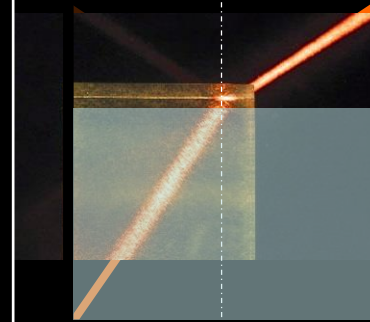


Diffusion, Réflexion

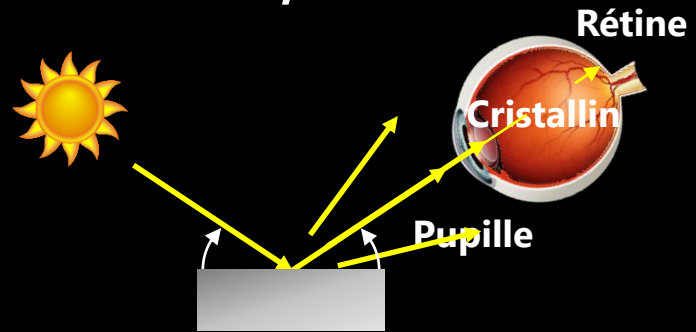


Kepler (1610)

Réfraction

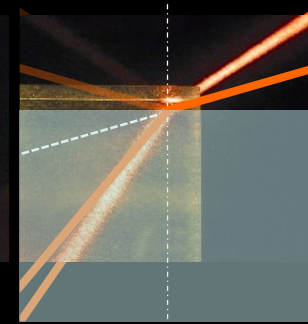


Diffusion, Réflexion

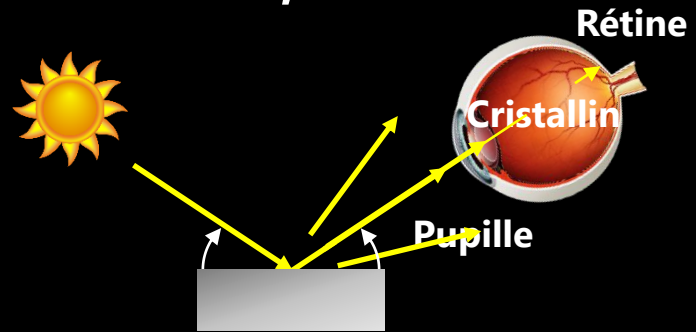


Kepler (1610)

Réfraction

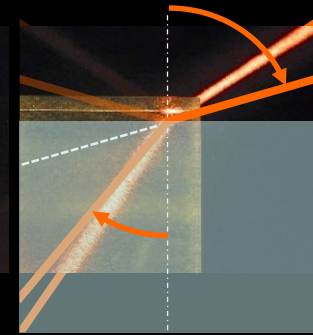


Diffusion, Réflexion



Kepler (1610)

Réfraction

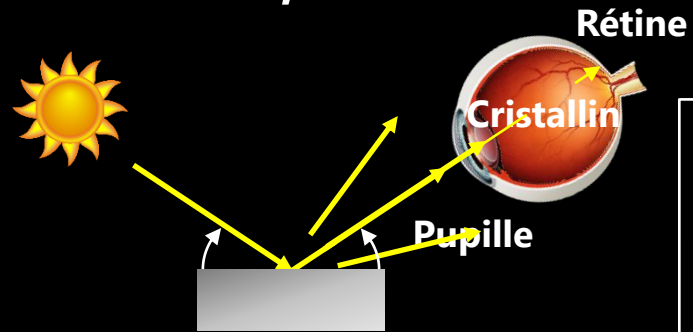


Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

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

Diffusion, Réflexion



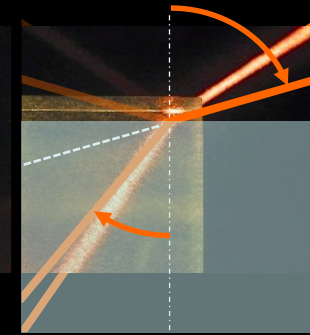
Kepler (1610)

Dispersion



Newton (1666)

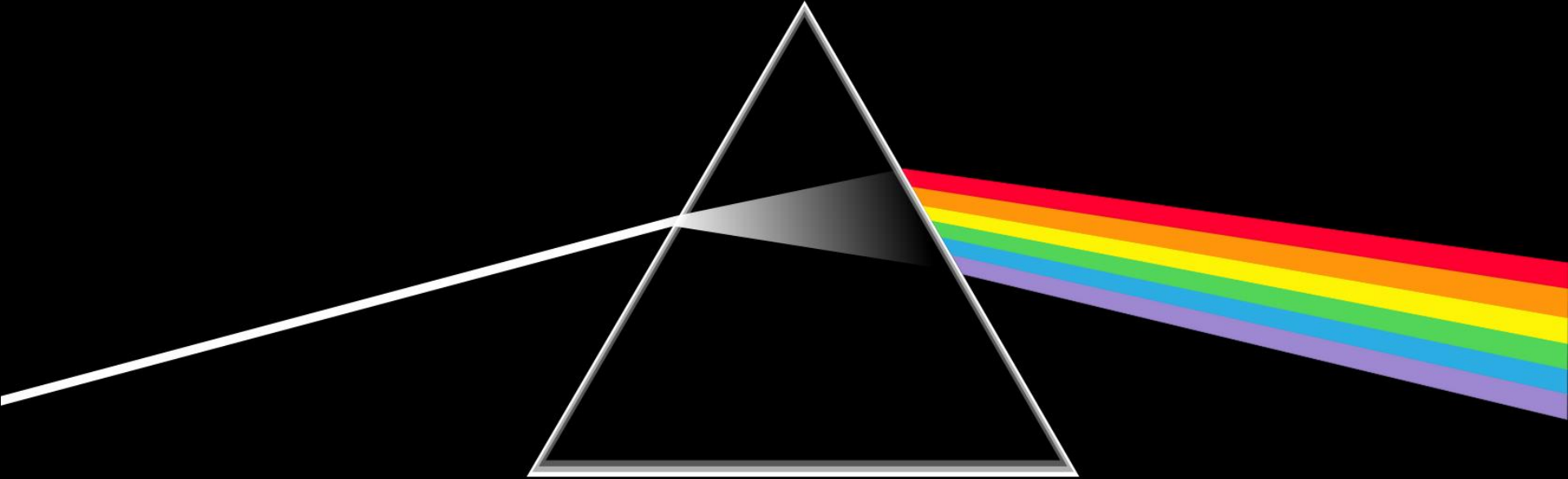
Réfraction

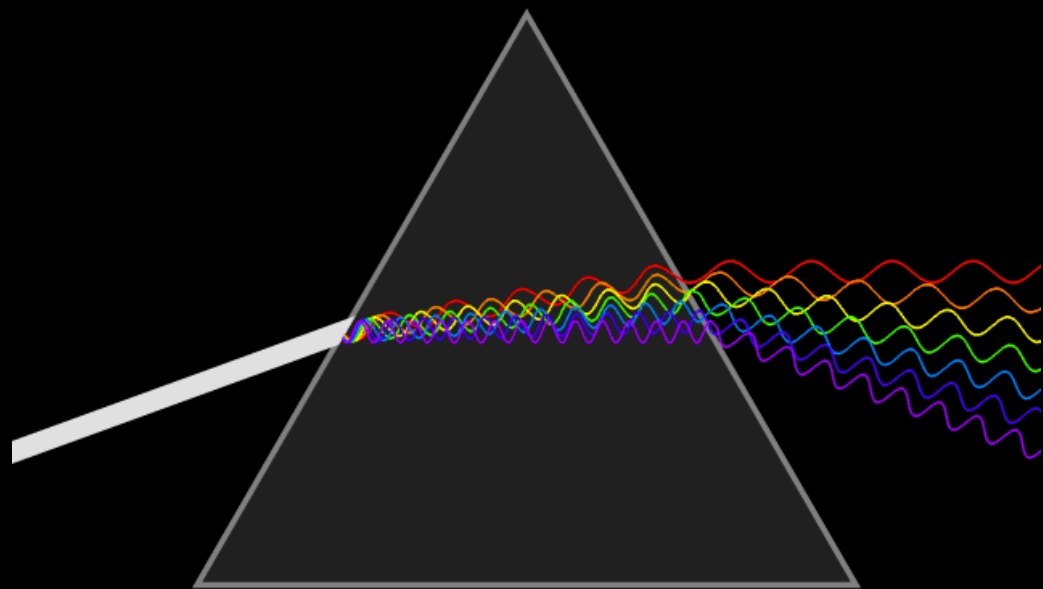


Loi de Descartes (1637)

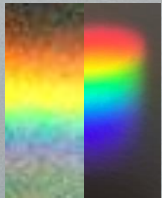
Loi de Snell (1621)

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





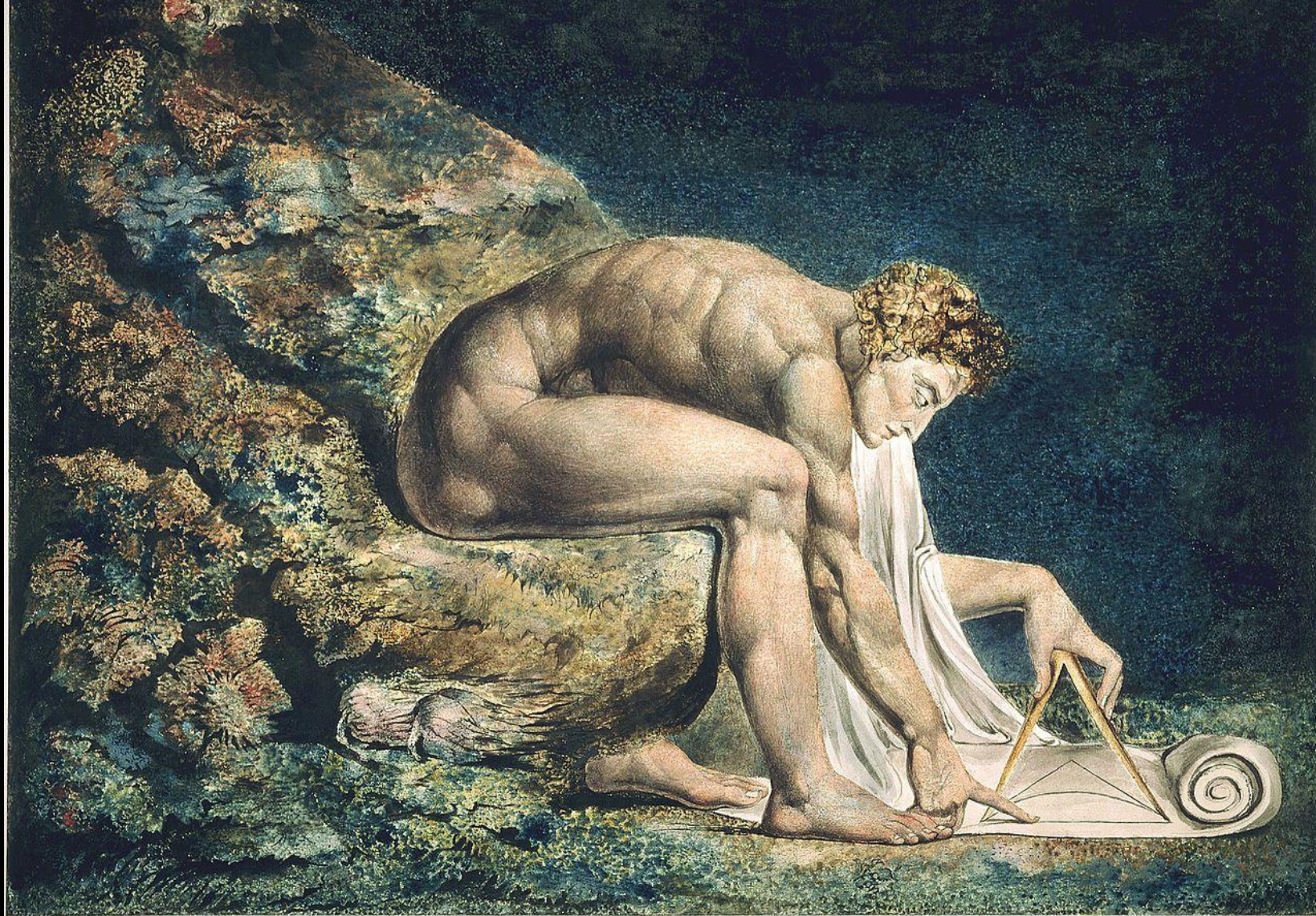




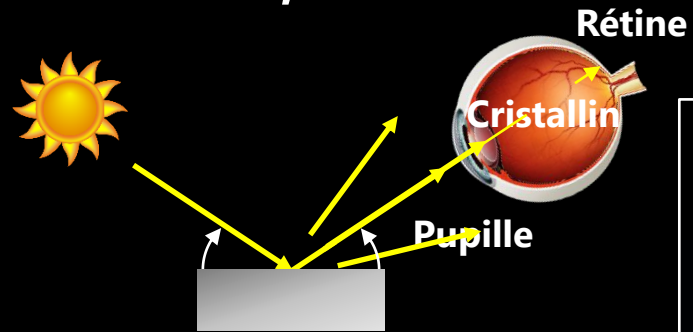
Newton (1795-1805)

William Blake (1757-1827)

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



Diffusion, Réflexion



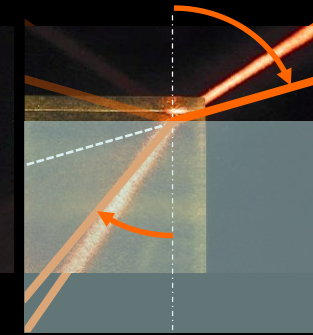
Kepler (1610)

Dispersion



Newton (1666)

Réfraction

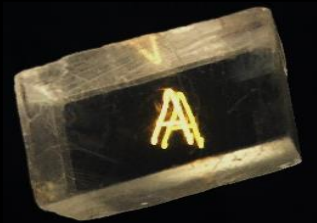


Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

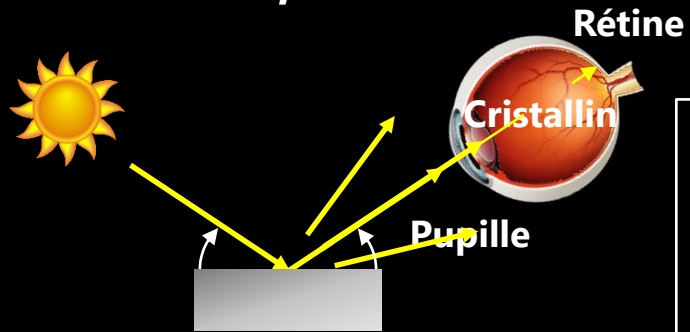
$$\sin \theta = n \sin \theta_r$$

Biréfringence



Bartholin (1669)

Diffusion, Réflexion



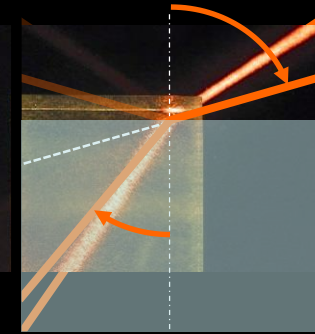
Kepler (1610)

Dispersion



Newton (1666)

Réfraction

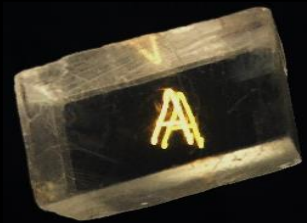


Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

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

Biréfringence



Bartholin (1669)

Vitesse

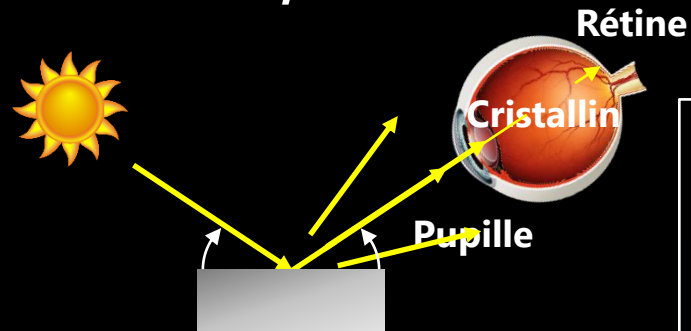
299 792 458 m/s

Son : 340 m/s



Römer (1676)

Diffusion, Réflexion



Kepler (1610)

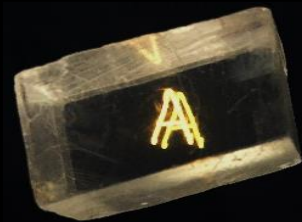
Dispersion



Newton (1666)



Biréfringence



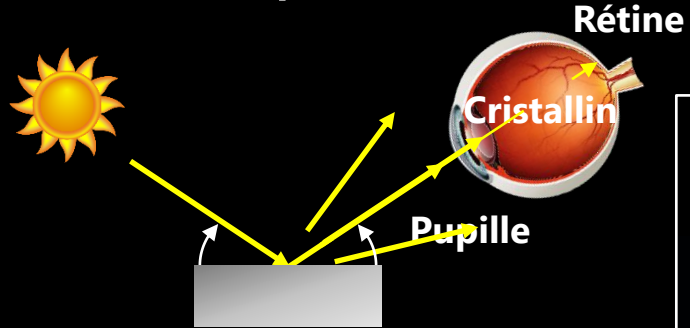
Bartholin (1669)

1967 : **Seconde** définie fréquence transition hyperfine du ^{133}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



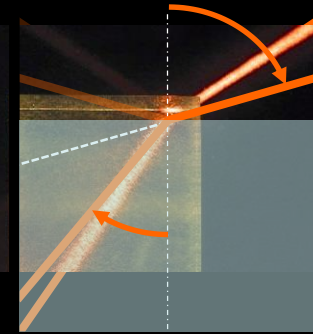
Kepler (1610)

Dispersion



Newton (1666)

Réfraction



Loi de Descartes (1637)

Loi de Snell (1621)

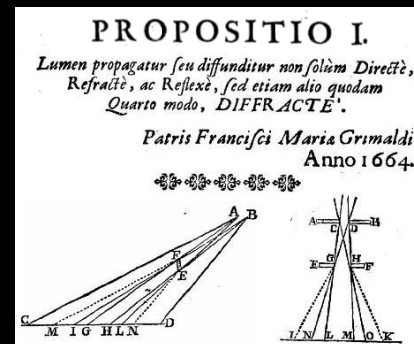
$$\sin \theta = n \sin \theta_r$$

Biréfringence



Bartholin (1669)

Diffraction



Grimaldi (1664)

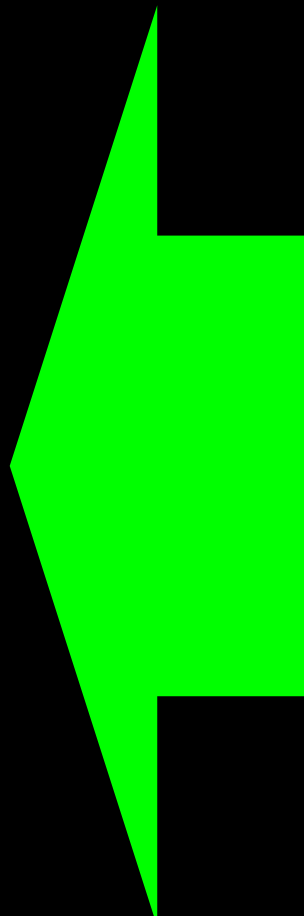
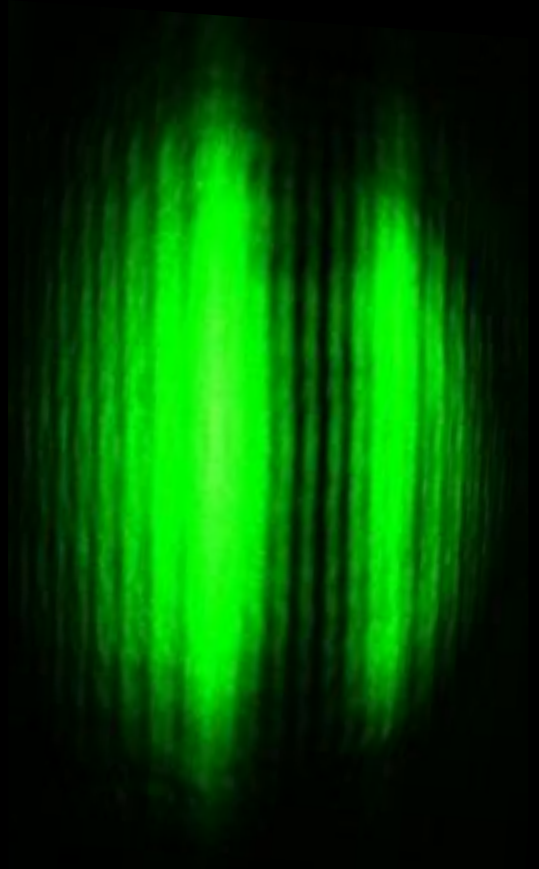
Vitesse

299 792 458 m/s

Son : 340 m/s



Römer (1676)



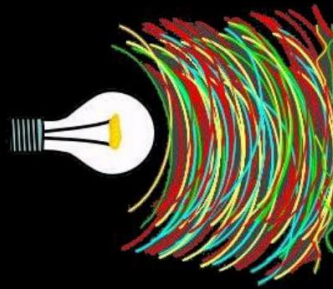
Il manque...

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^{té} de mvt)

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

1658 : Découvre le pendule isochrone

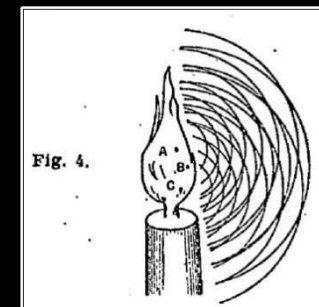
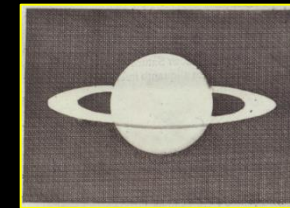
1666-1681 : à 37 ans, il rejoint **l'Académie des sciences**

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^{té} de mvt)

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

1658 : Découvre le pendule isochrone

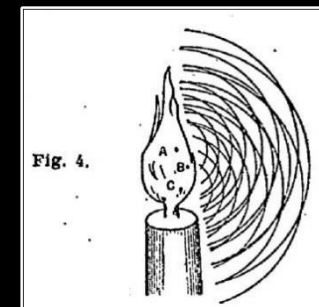
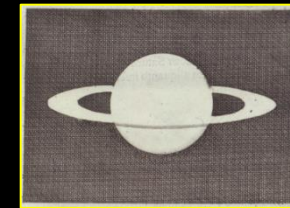
1666-1681 : à 37 ans, il rejoint **l'Académie des sciences**

1673 : Avec Denis Papin : moteur à explosion

1678 : Traité de la lumière

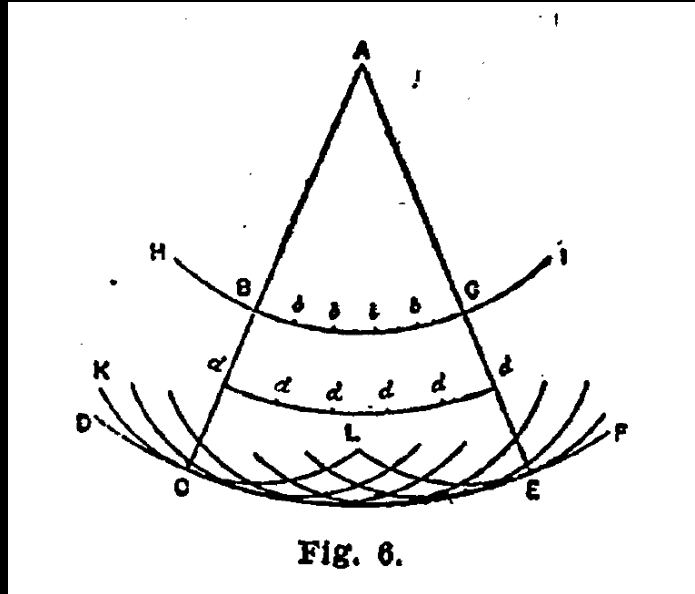
Dans lequel il explore le concept d'onde lumineuse.

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



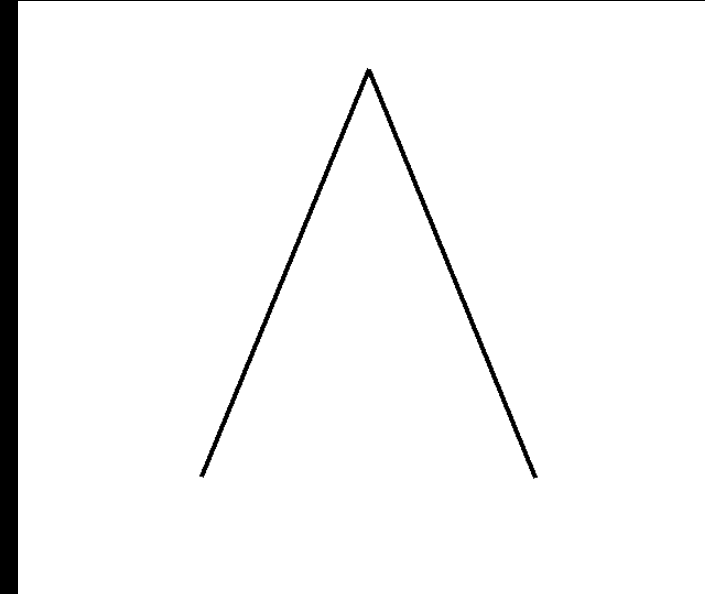
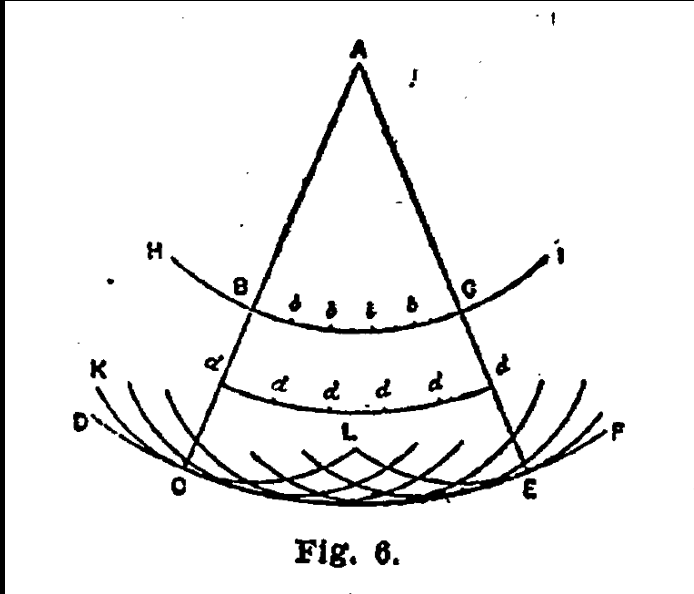
Le principe d'Huygens et l'æther

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



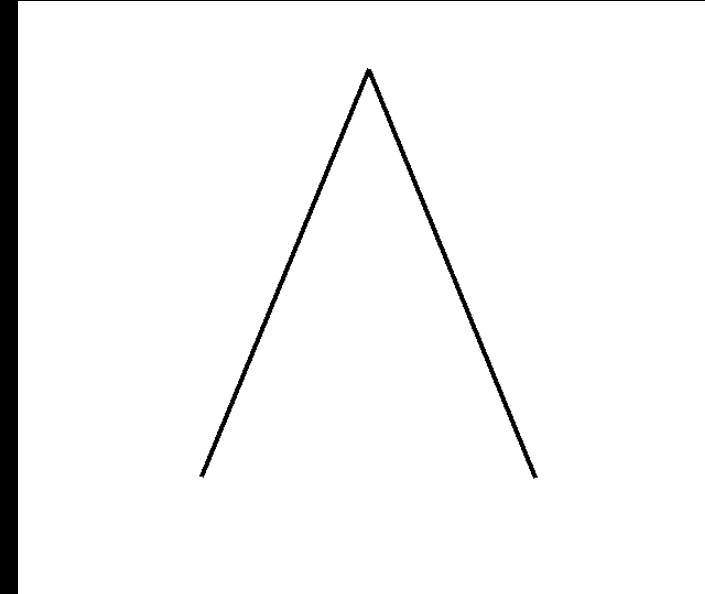
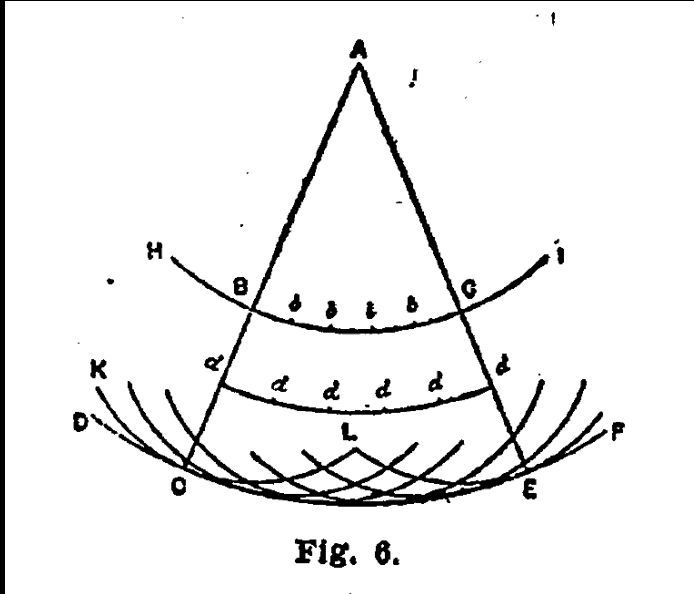
Le principe d'Huygens et l'æther

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

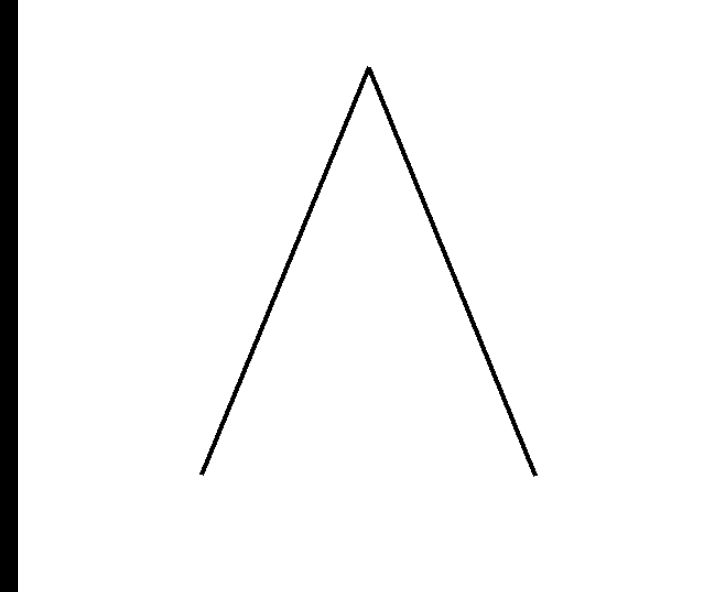
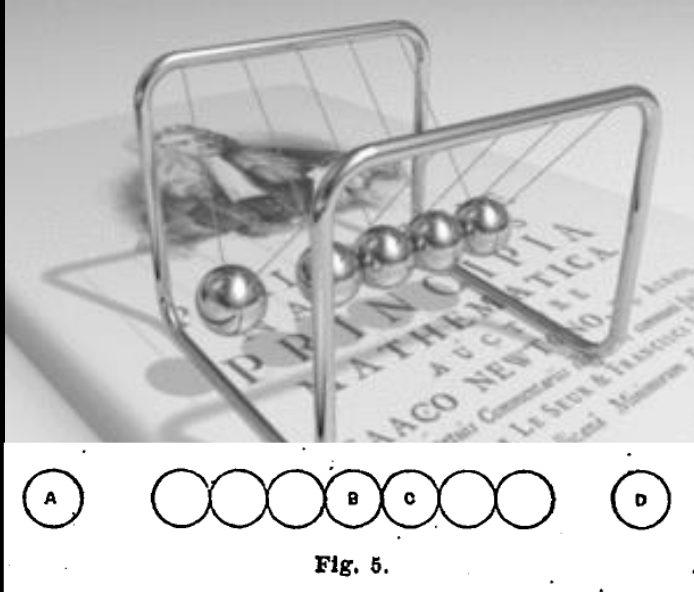


Les vagues se propagent sur l'eau,
Le son se propage dans l'air,
La lumière se propage sur...

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

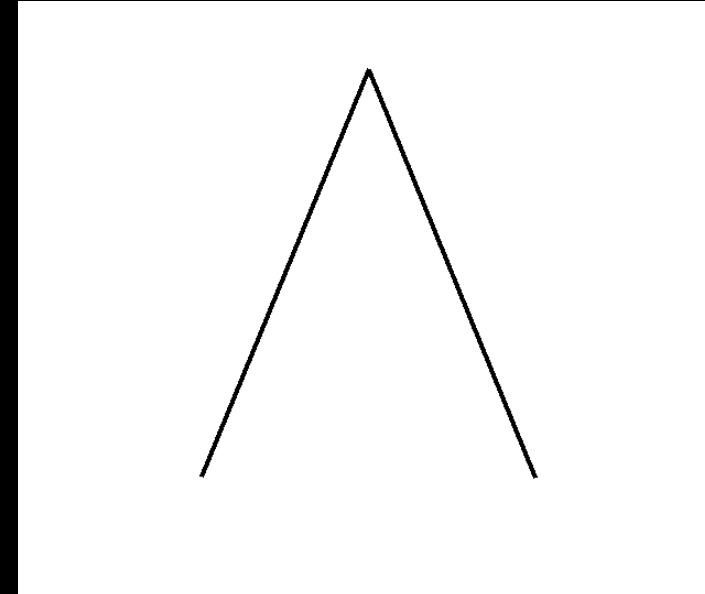
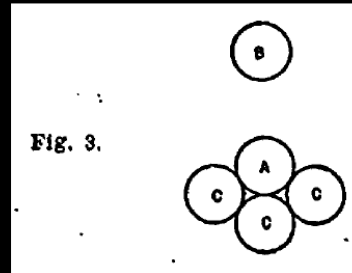
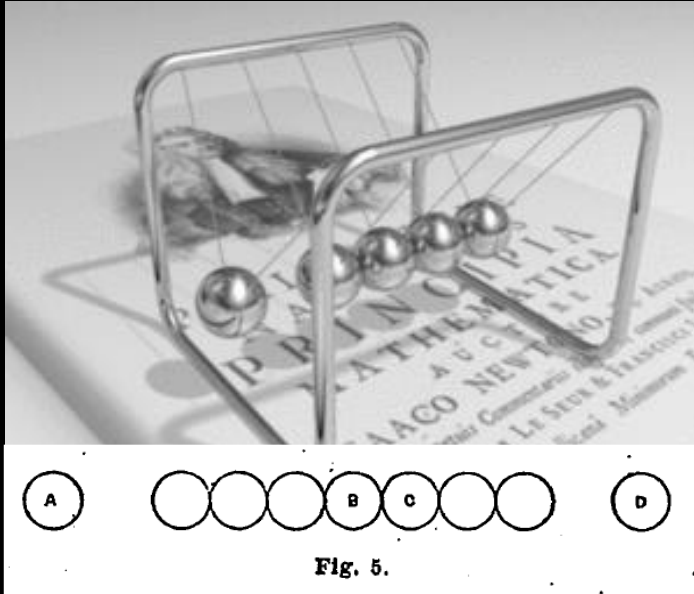


Les vagues se propagent sur l'eau,
Le son se propage dans l'air,
La lumière se propage sur...

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

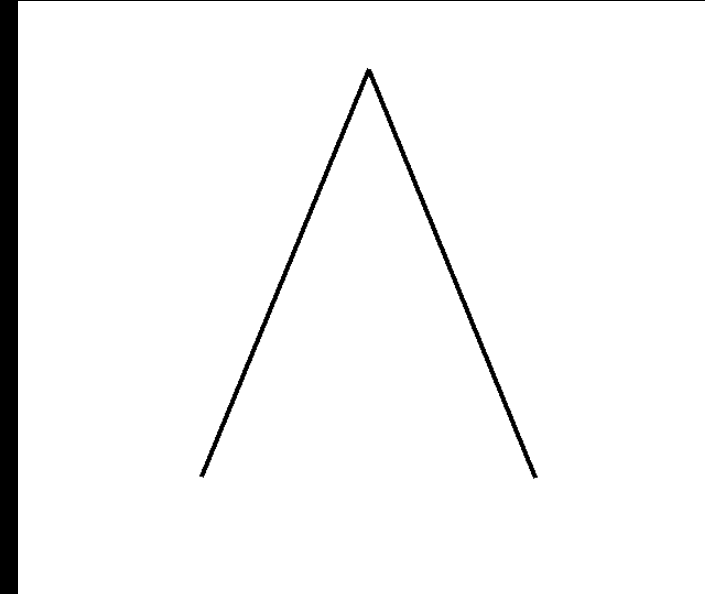
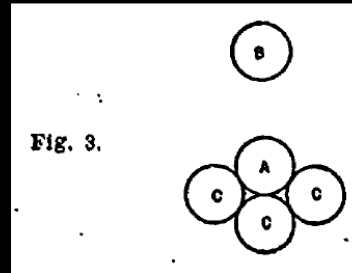
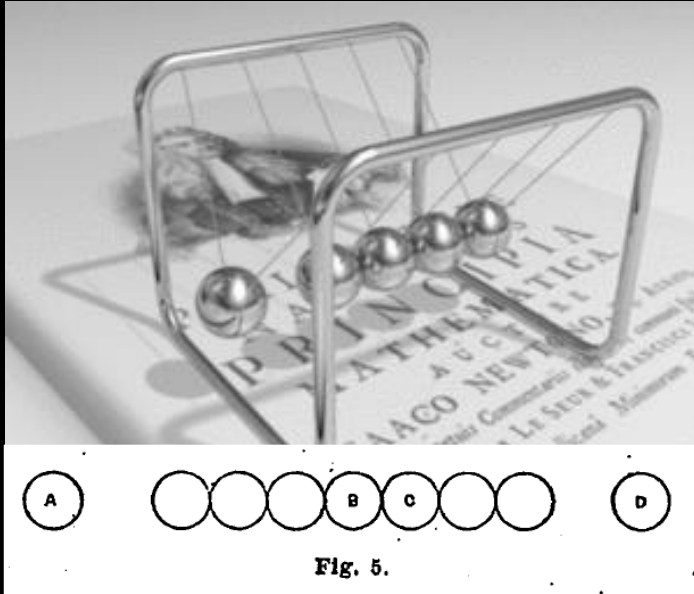


Les vagues se propagent sur l'eau,
Le son se propage dans l'air,
La lumière se propage sur...

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

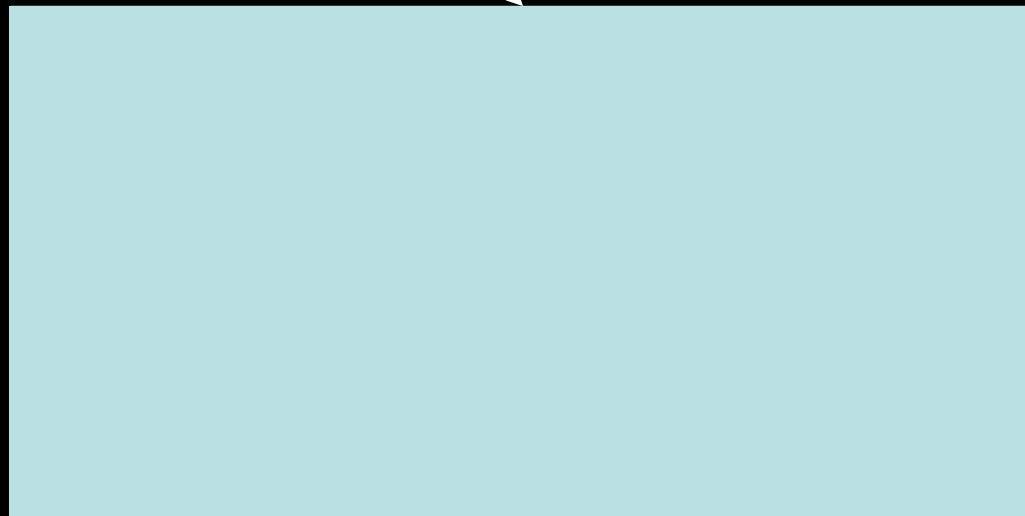
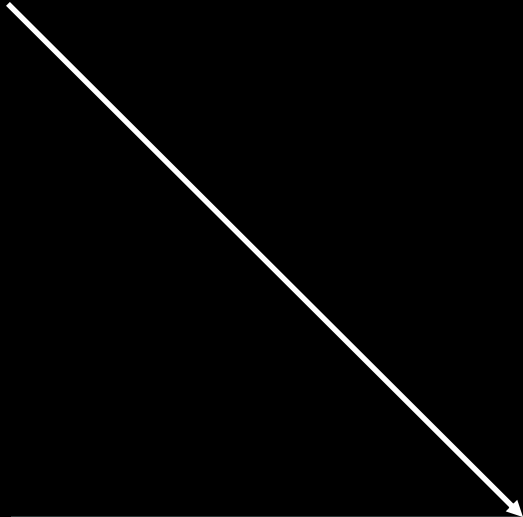


Les vagues se propagent sur l'eau,
Le son se propage dans l'air,
La lumière se propage sur...

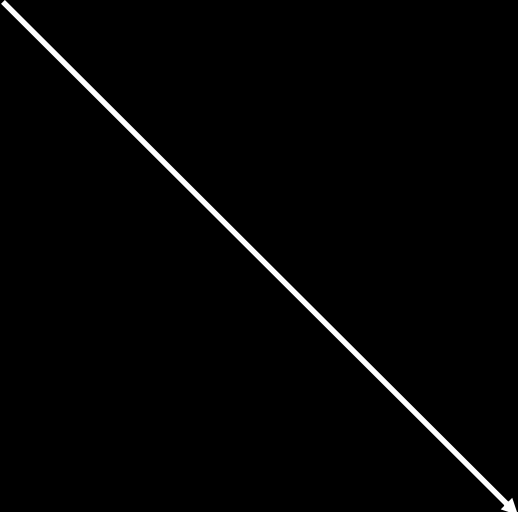
la matière éthérée, l'éther lumineux ou l'æther

Huygens applique son principe à un changement de milieu

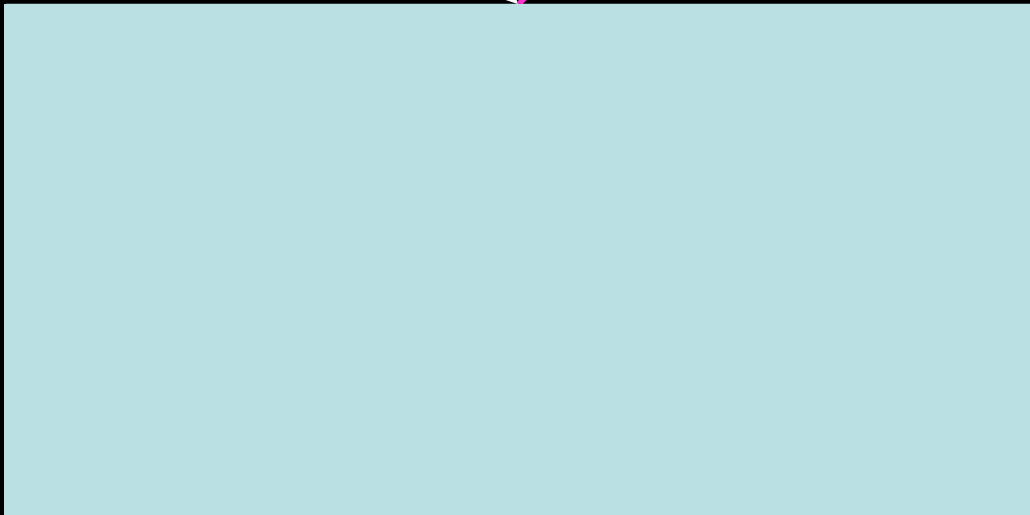
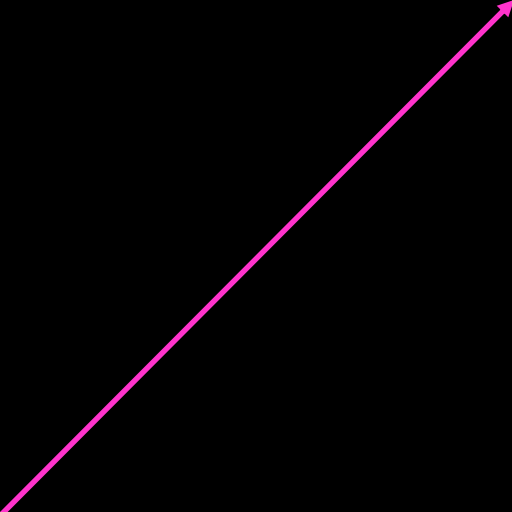
Onde incidente



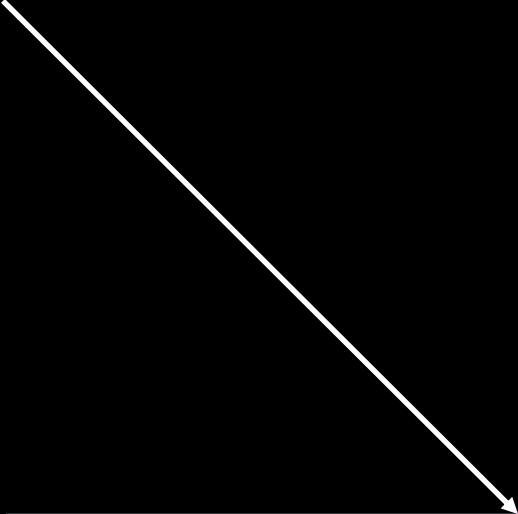
Onde incidente



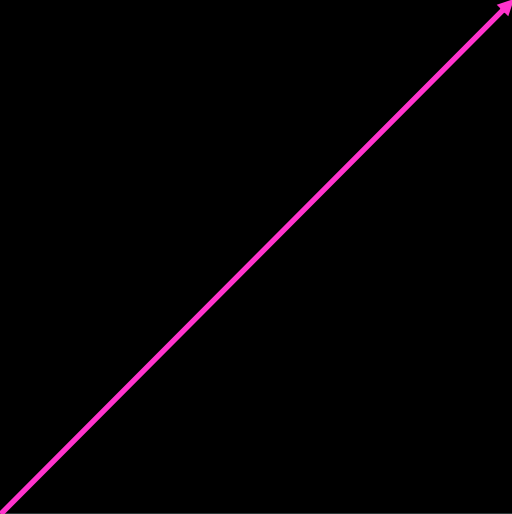
Onde réfléchie



Onde incidente

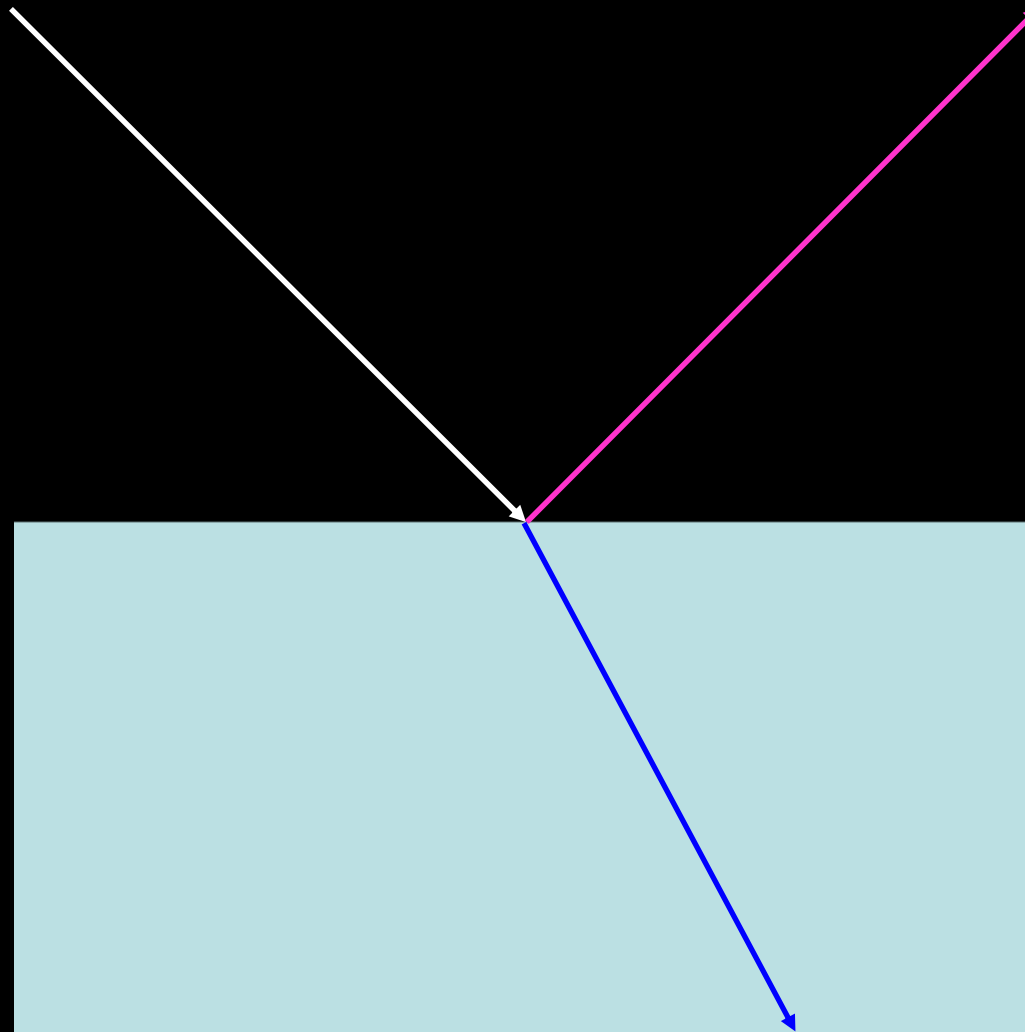


Onde réfléchie



Onde incidente

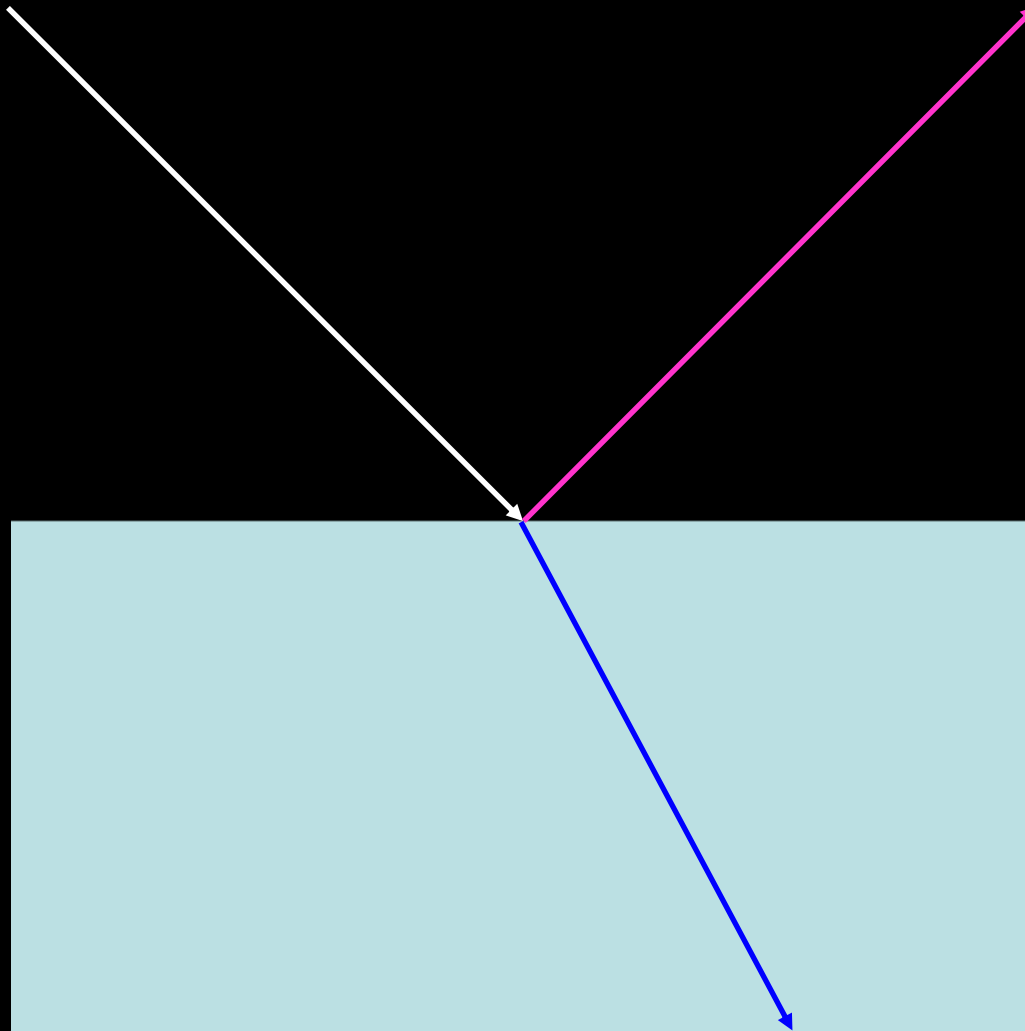
Onde réfléchie



Onde réfractée : changement de vitesse = changement de direction

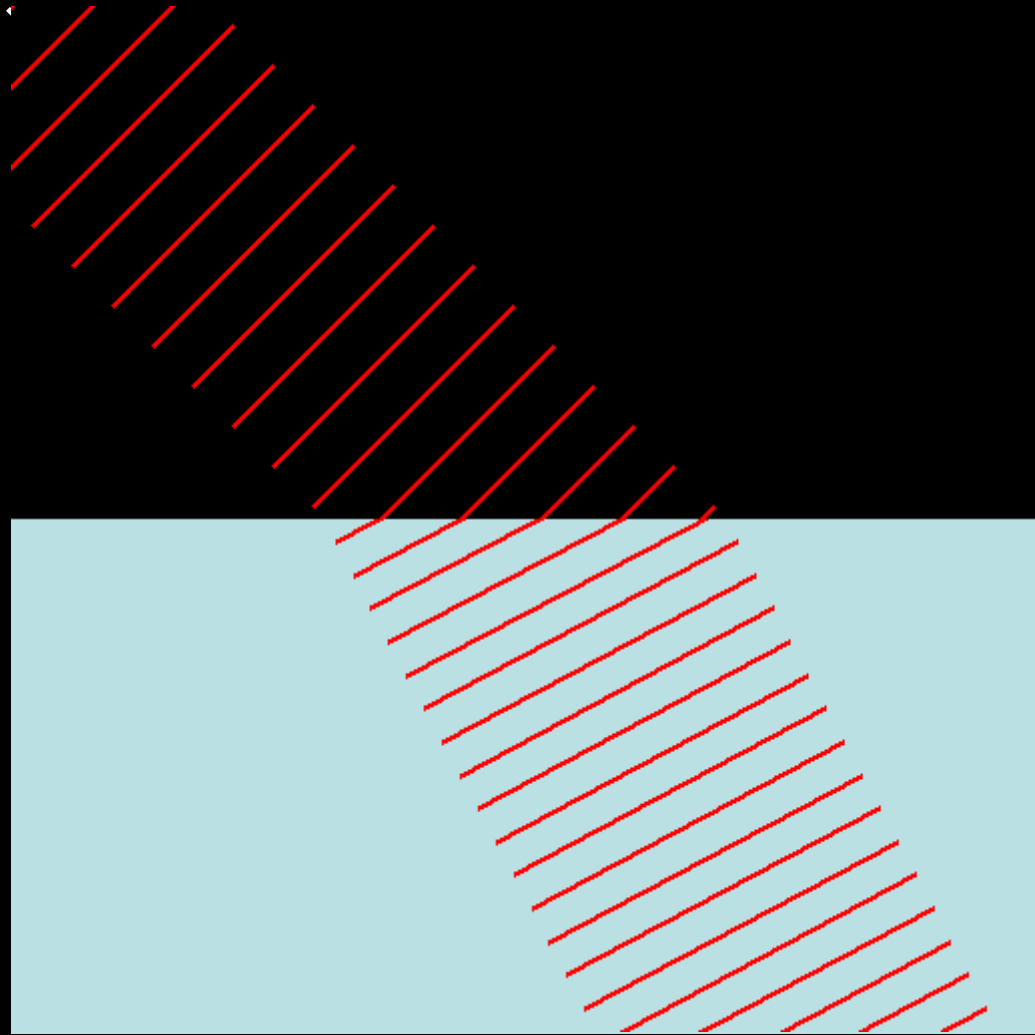
Onde incidente

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

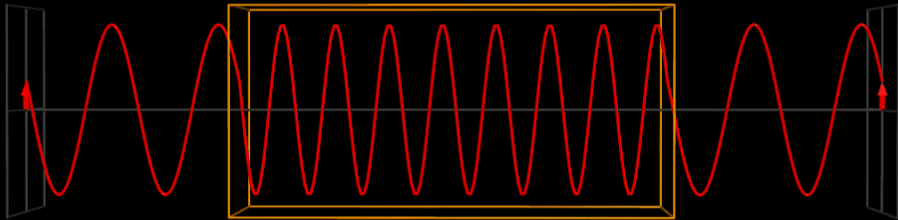
$$v_{ph} = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{k}$$

Indice de réfraction

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

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

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

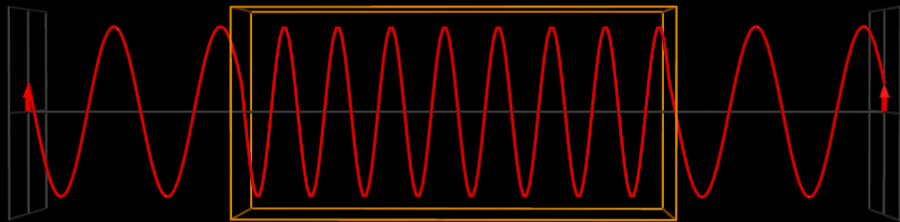


Indice de réfraction

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

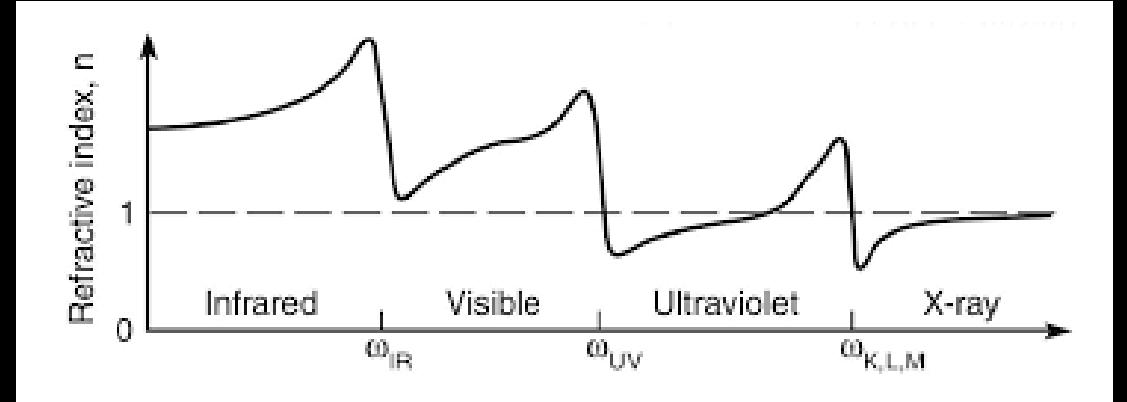
La pulsation ω ne varie pas, c'est donc la longueur d'onde qui change

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

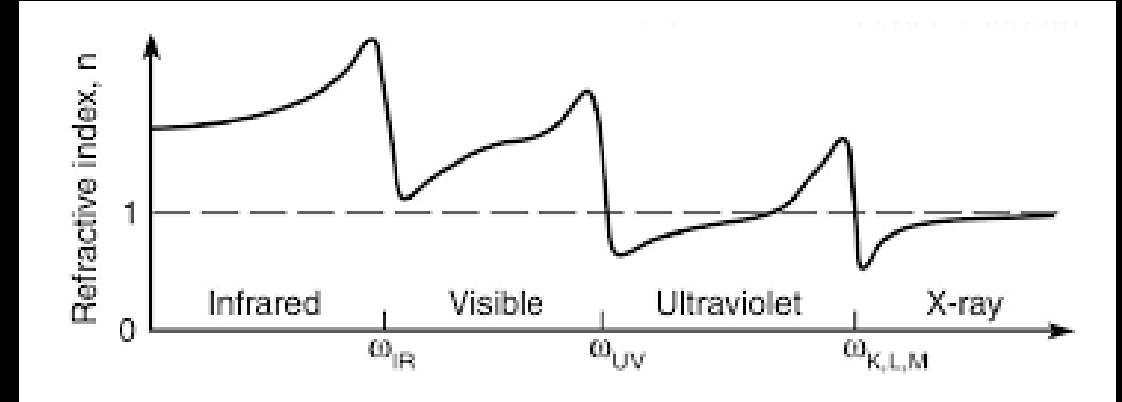
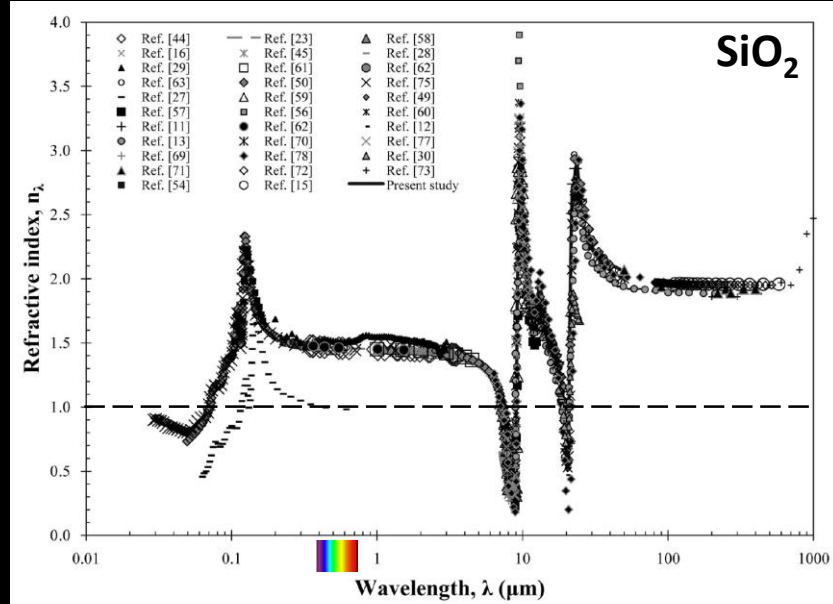


Dispersion
 $n(\omega)$

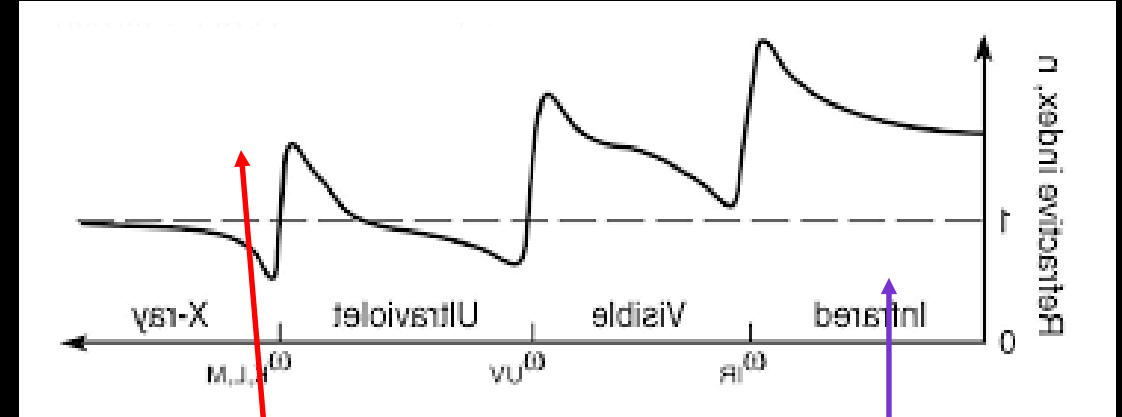
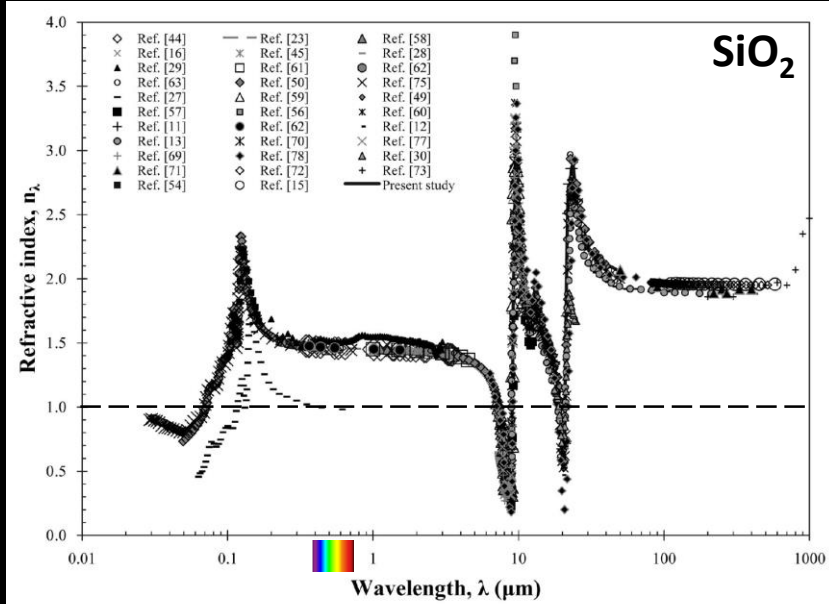
Dispersion



Dispersion



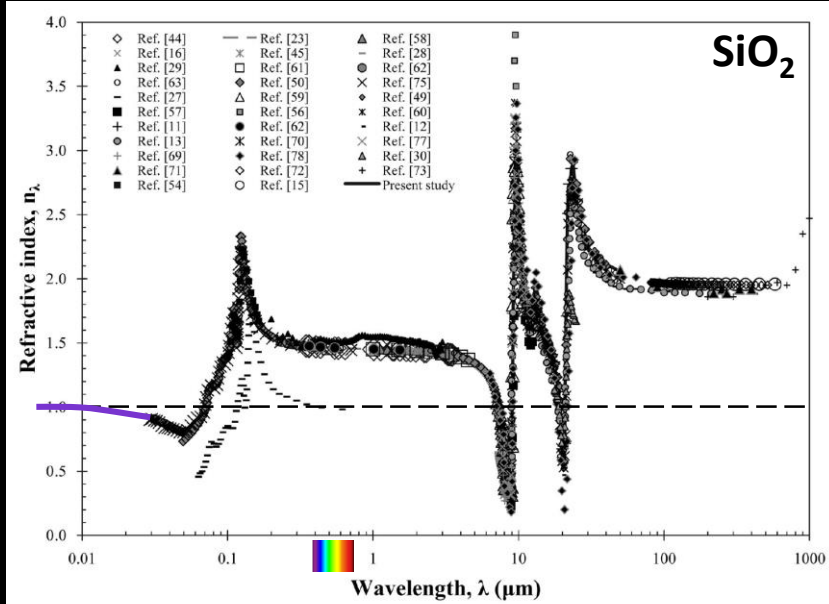
Dispersion



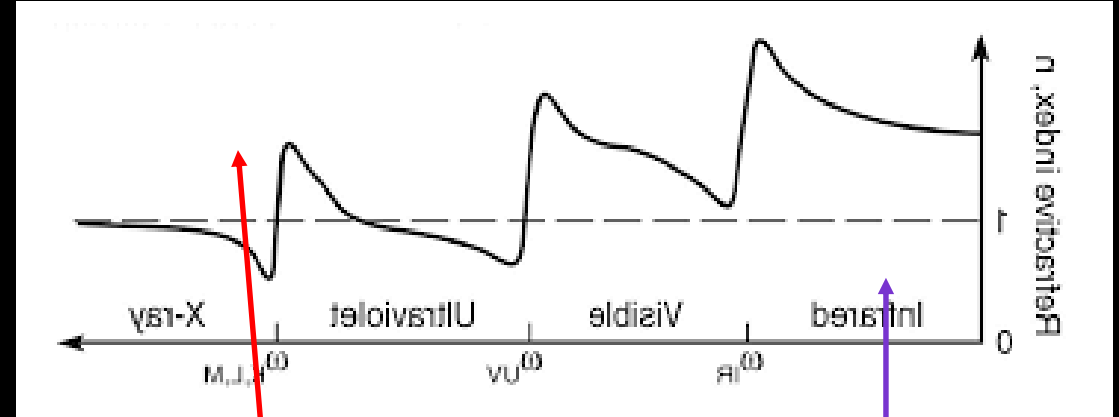
Forts indices dans l'IR

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

Dispersion



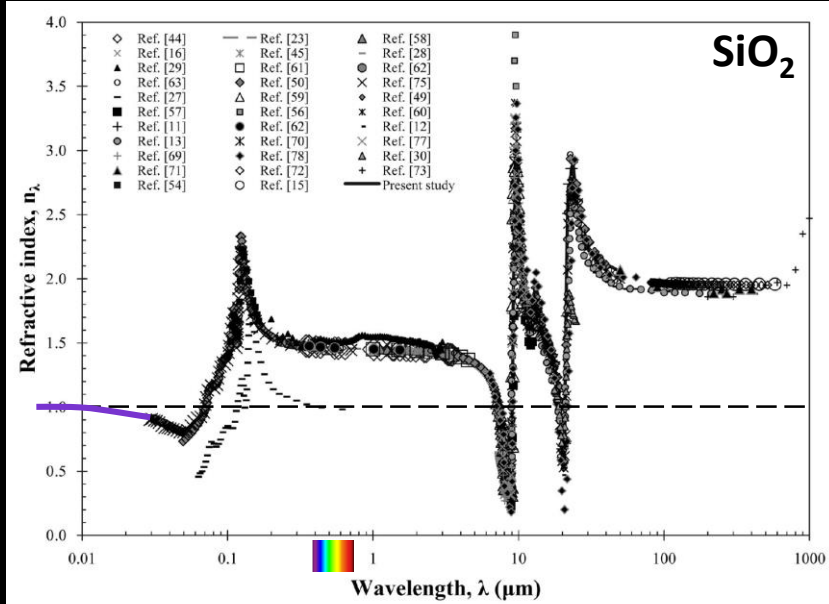
$n = 1 - \delta$
 $\delta \sim 10^{-5}$



Forts indices dans l'IR

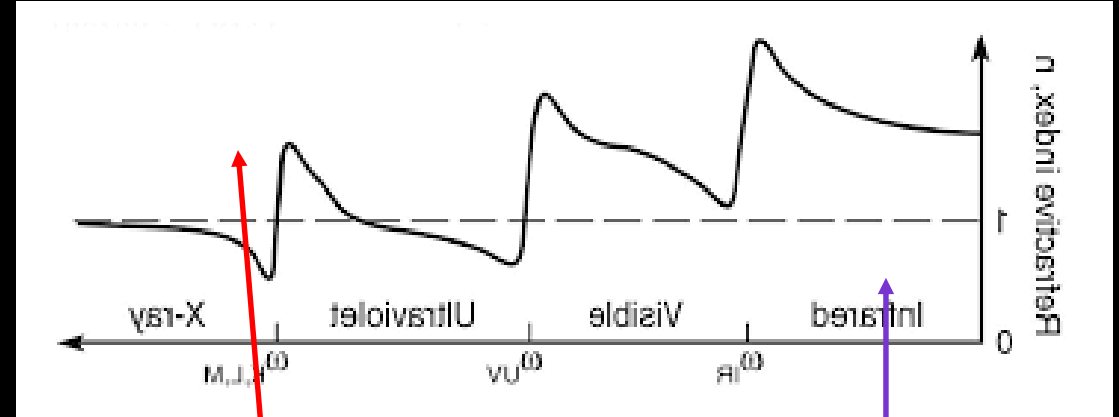
Faibles indices dans l'UV et RX
 $n < 1$!

Dispersion



$$n = 1 - \delta$$

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



Forts indices dans l'IR

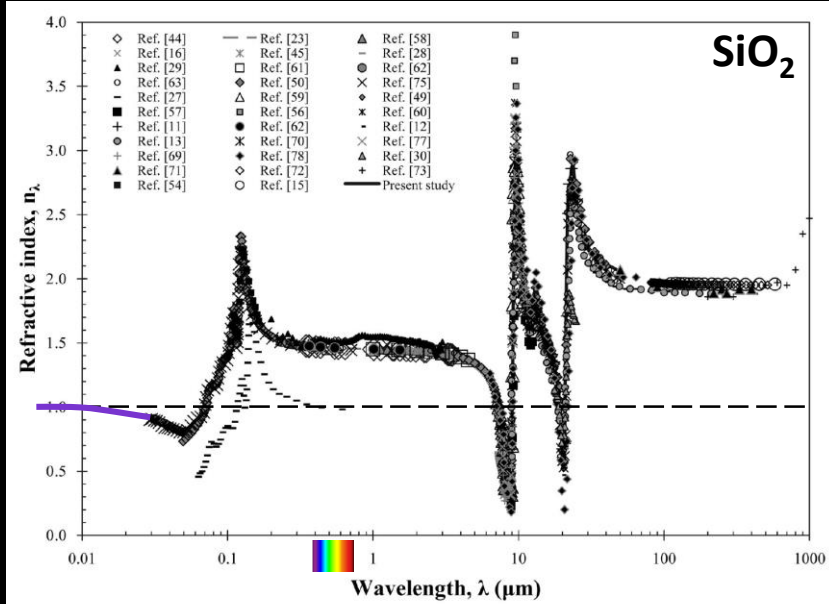
Faibles indices dans l'UV et RX
 $n < 1$!

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

Densité volumique de moments dipolaires

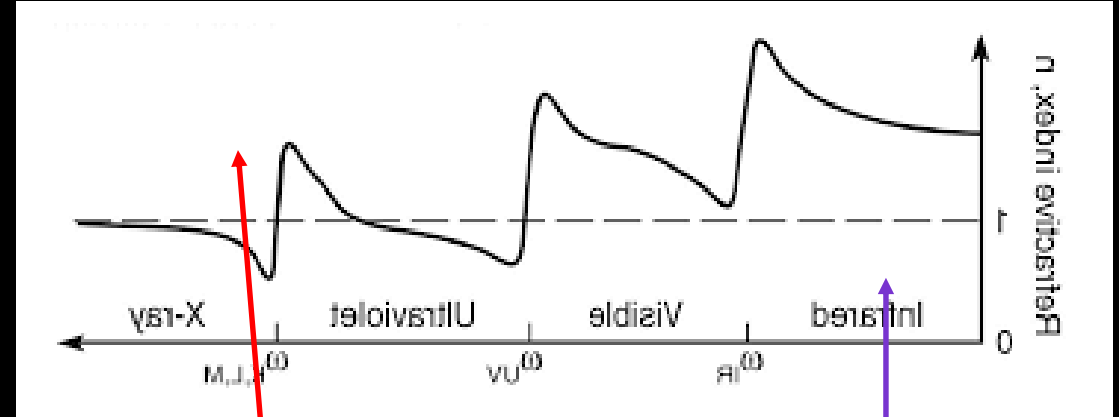
$$n^2 = 1 + \chi(\omega)$$

Dispersion



$$n = 1 - \delta$$

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



Forts indices dans l'IR

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

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

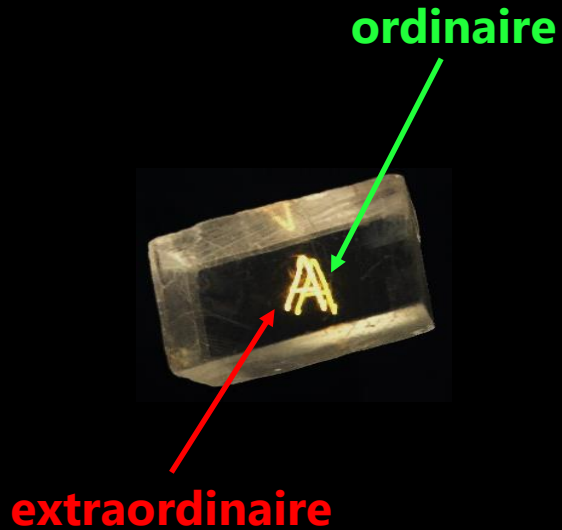
Densité volumique de moments dipolaires

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

Anisotropie...

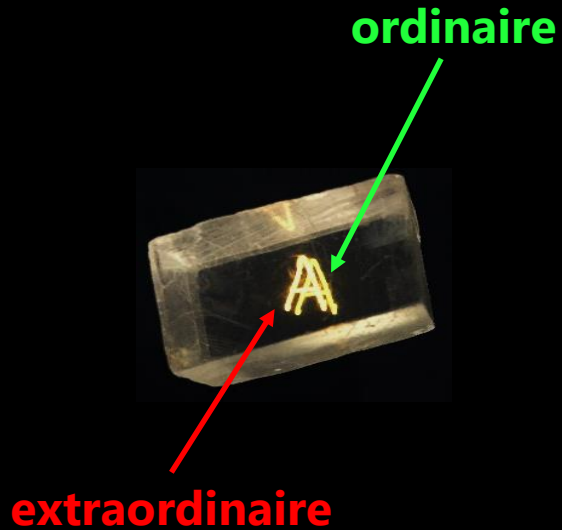
Huygens et la biréfringence (1678)

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

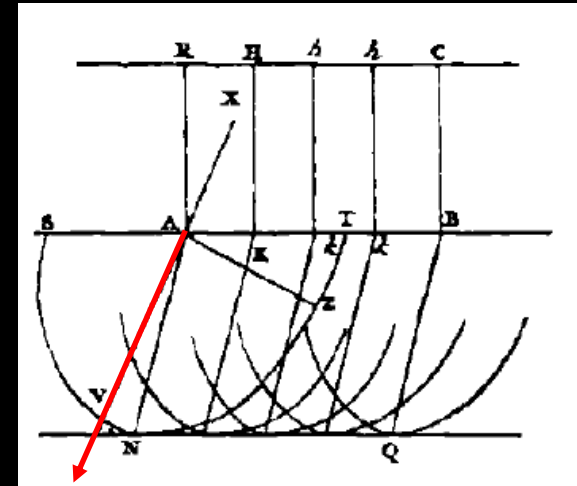


Huygens et la biréfringence (1678)

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

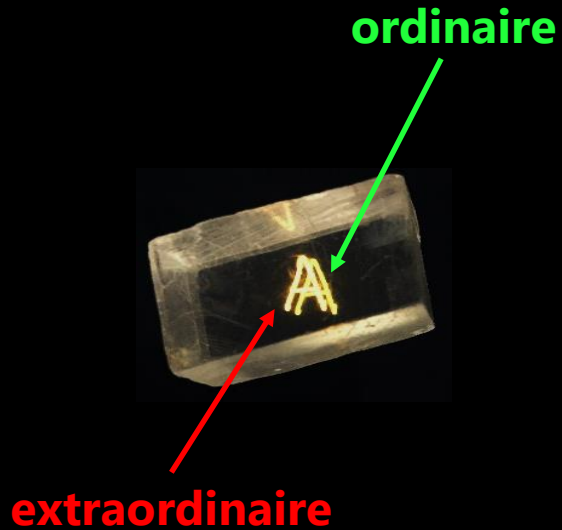


Vitesse de la lumière
anisotrope



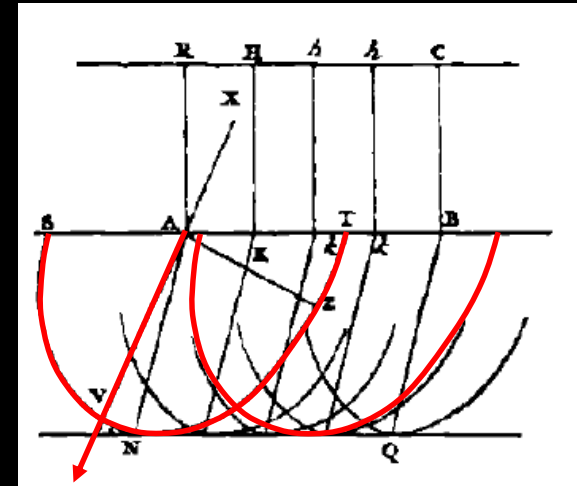
Huygens et la biréfringence (1678)

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



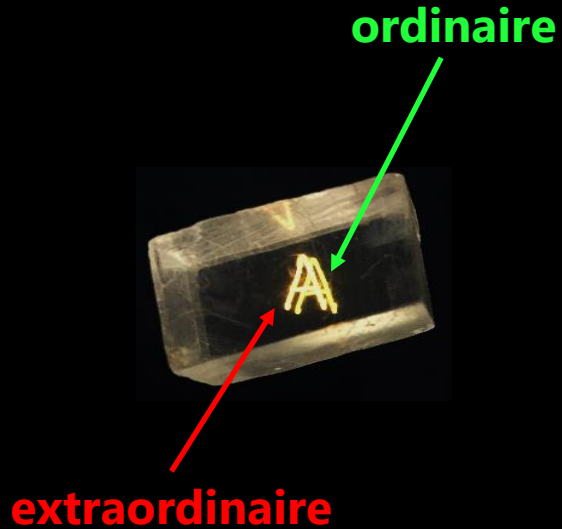
Vitesse de la lumière
anisotrope

Les fronts d'onde :
Ellipses



Huygens et la biréfringence (1678)

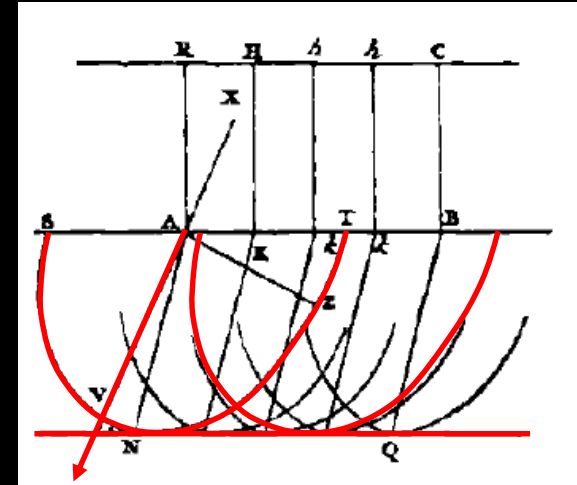
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



Vitesse de la lumière
anisotrope

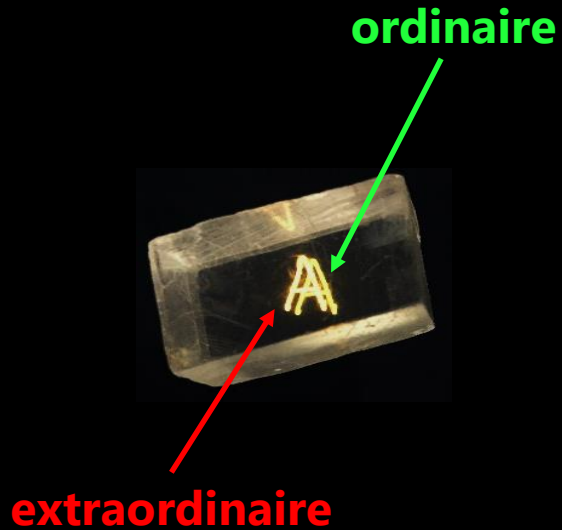
Les fronts d'onde :
Ellipses

Le rayon **dévie**



Huygens et la biréfringence (1678)

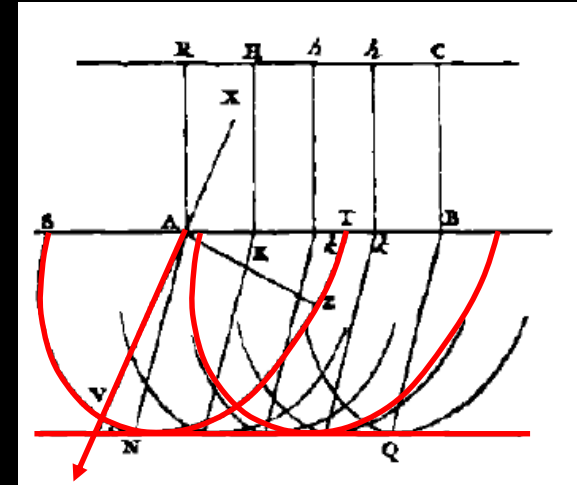
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



Vitesse de la lumière
anisotrope

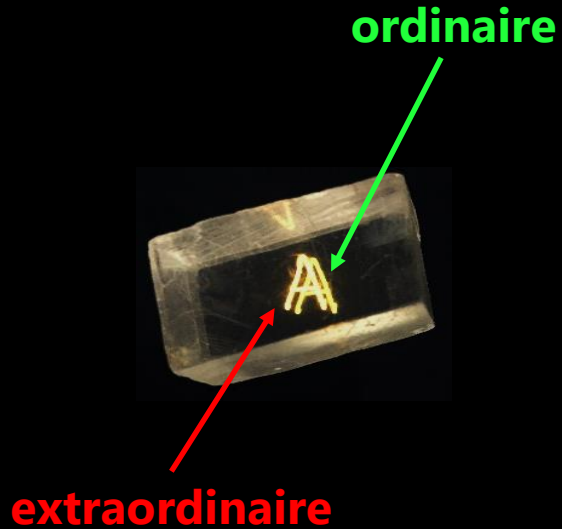
Les fronts d'onde :
Ellipses

Le rayon **dévie**



Huygens et la biréfringence (1678)

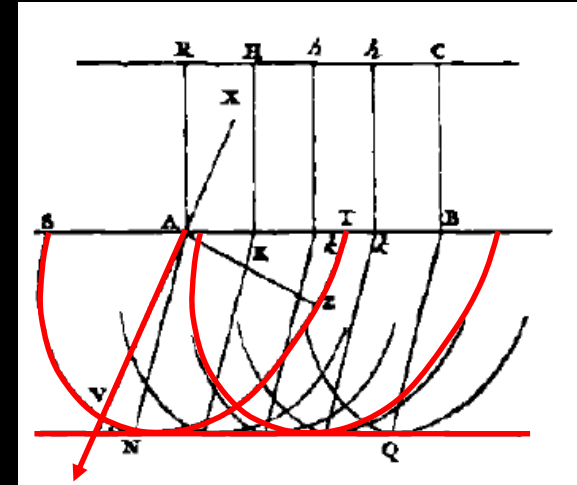
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



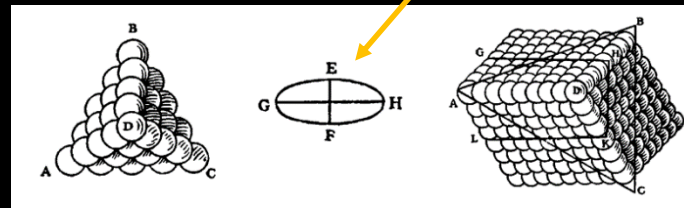
Vitesse de la lumière
anisotrope

Les fronts d'onde :
Ellipses

Le rayon **dévie**



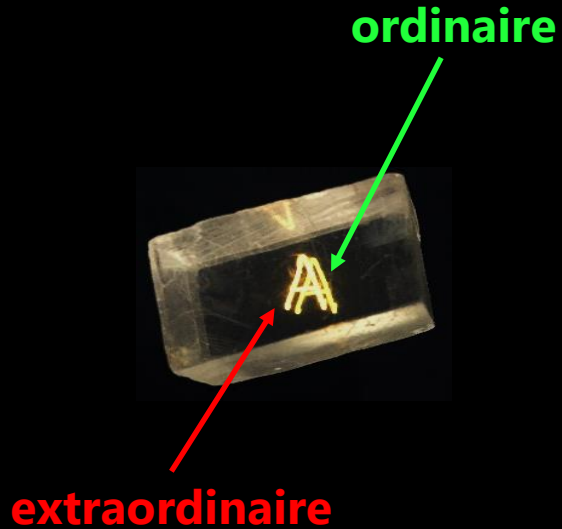
Huygens postule que le cristal est fait de
particules **allongées**



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

Huygens et la biréfringence (1678)

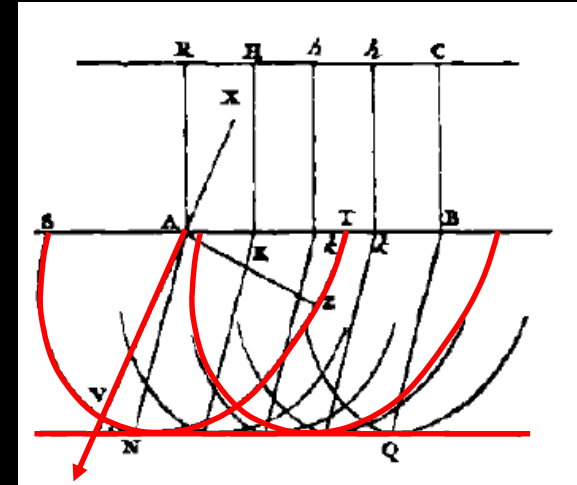
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



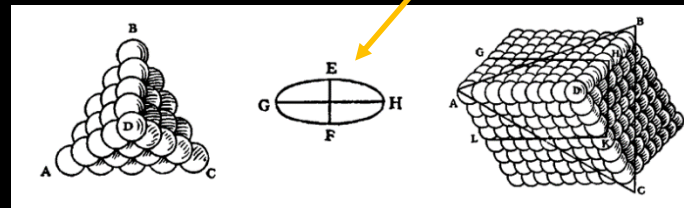
Vitesse de la lumière
anisotrope

Les fronts d'onde :
Ellipses

Le rayon **dévie**



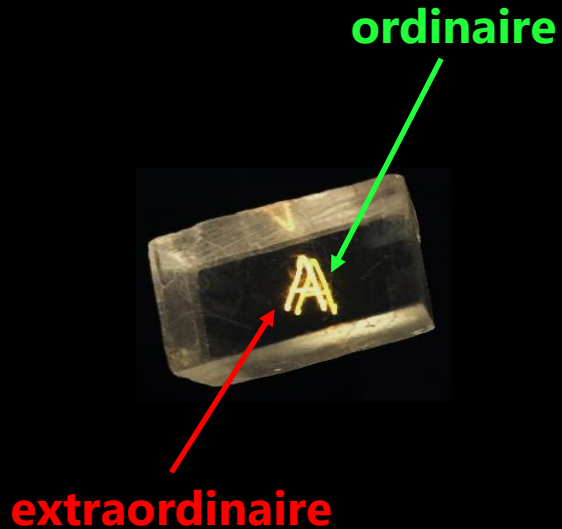
Huygens postule que le cristal est fait de
particules **allongées**



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

Huygens et la biréfringence (1678)

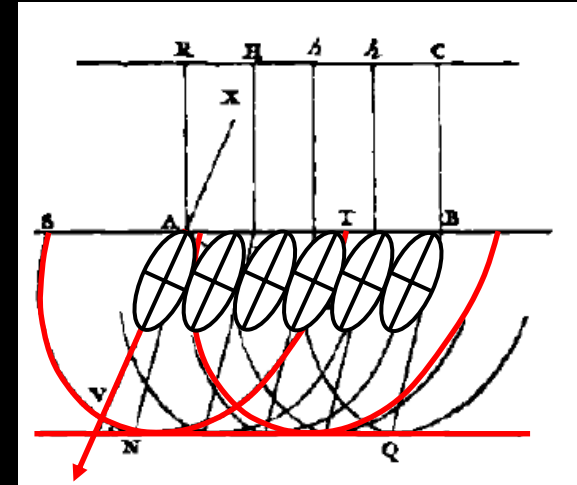
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



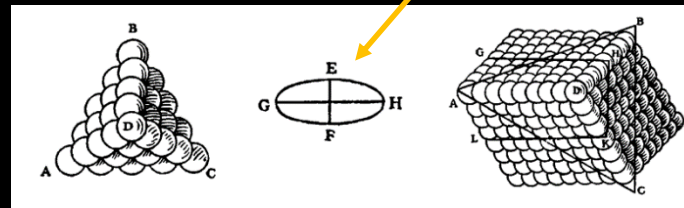
Vitesse de la lumière
anisotrope

Les fronts d'onde :
Ellipses

Le rayon **dévie**



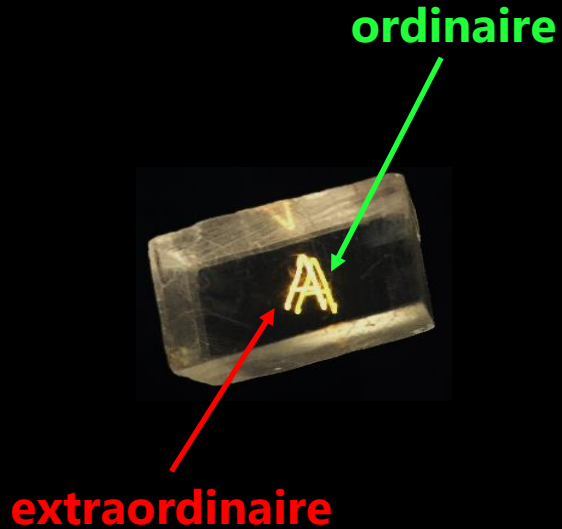
Huygens postule que le cristal est fait de
particules **allongées**



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

Huygens et la biréfringence (1678)

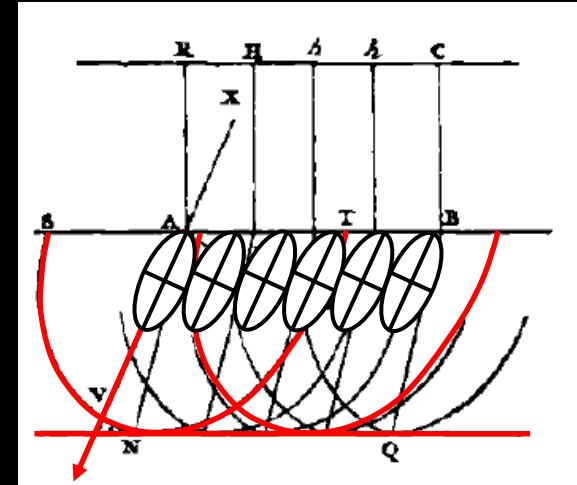
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



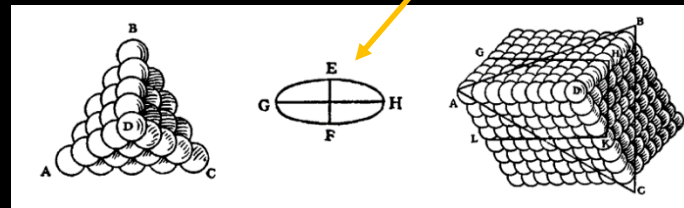
Vitesse de la lumière
anisotrope

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 !

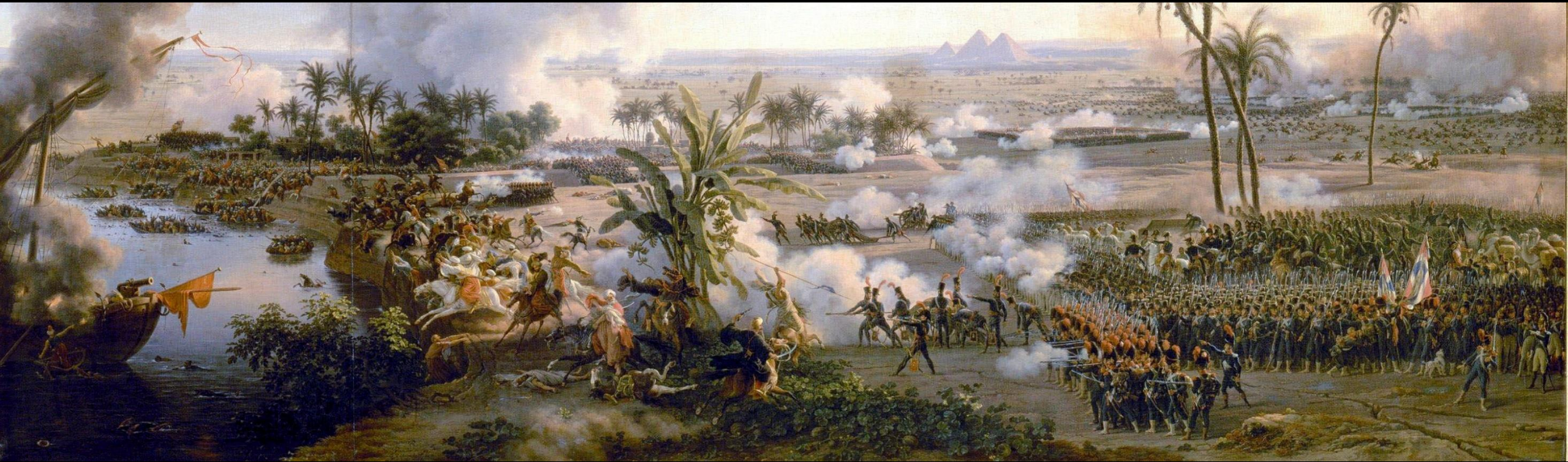
La polarisation de la lumière

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



La polarisation de la lumière

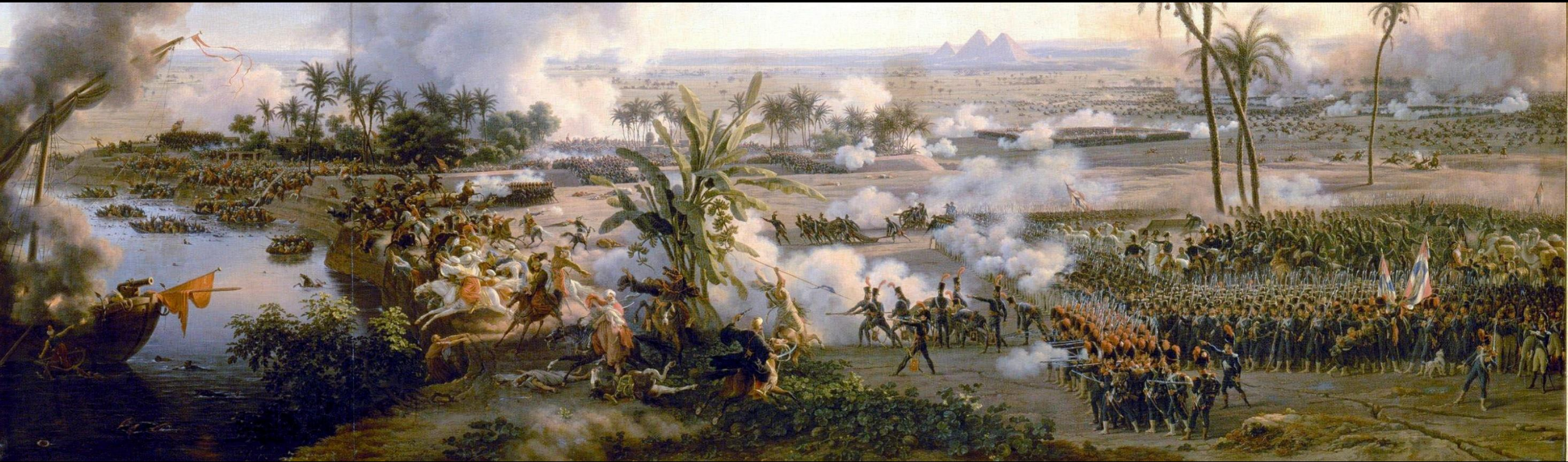
Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel 1815



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

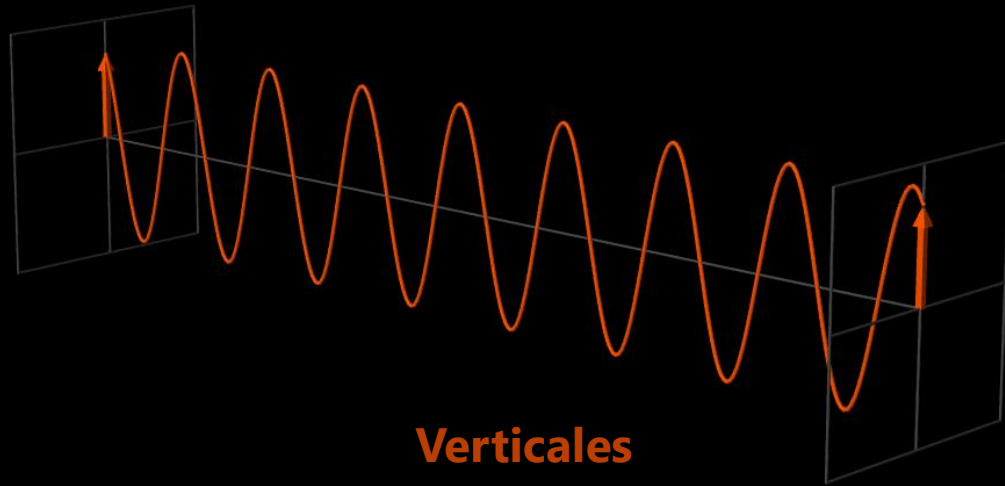
Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

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

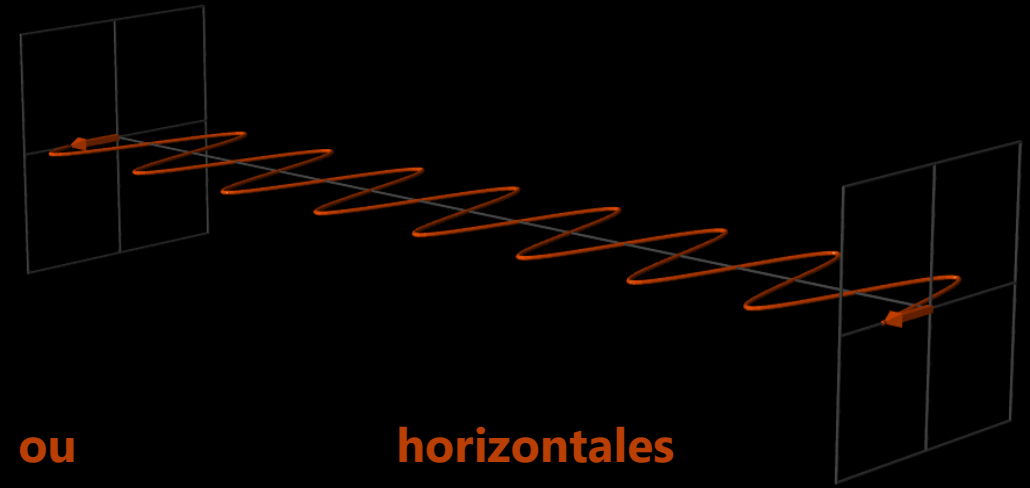
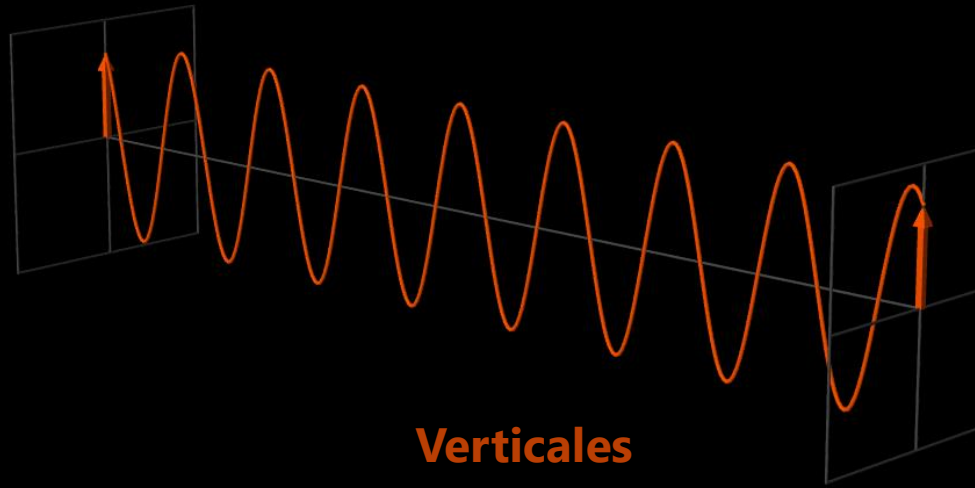
La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



La polarisation de la lumière

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

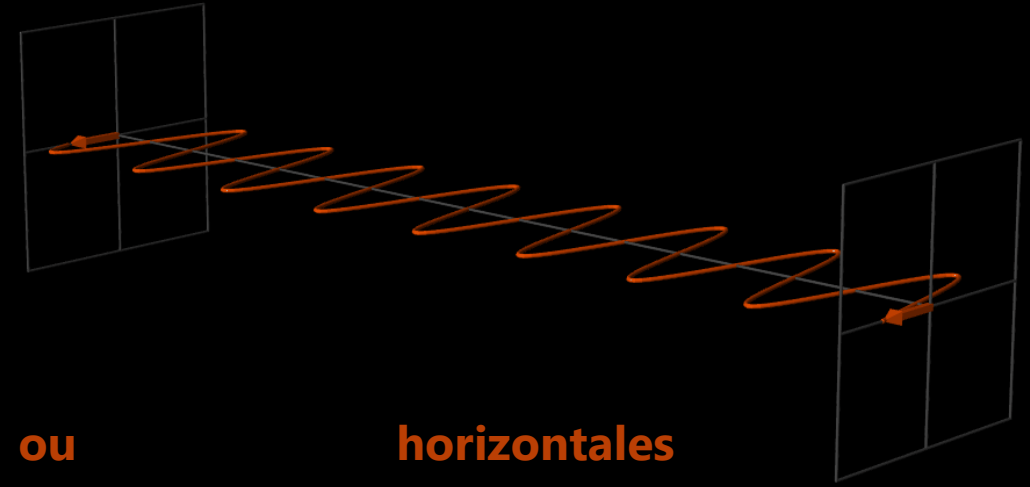
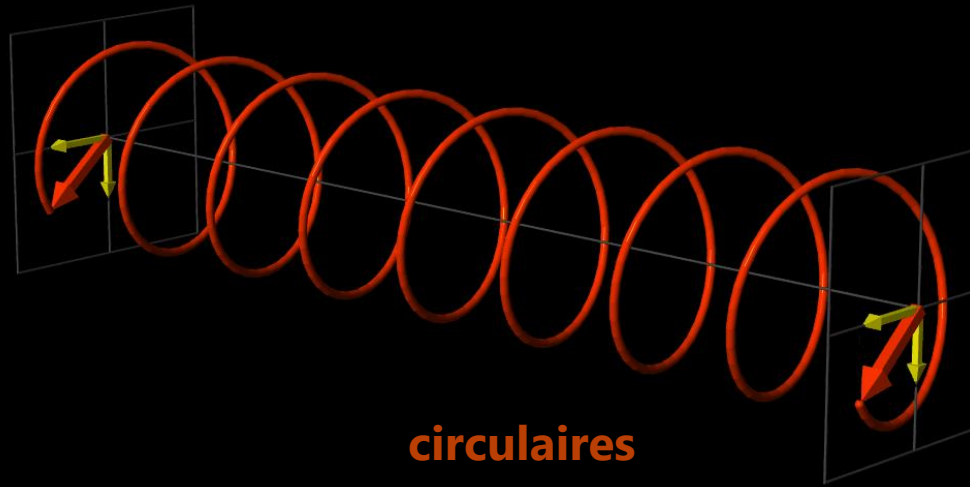
La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



La polarisation de la lumière

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

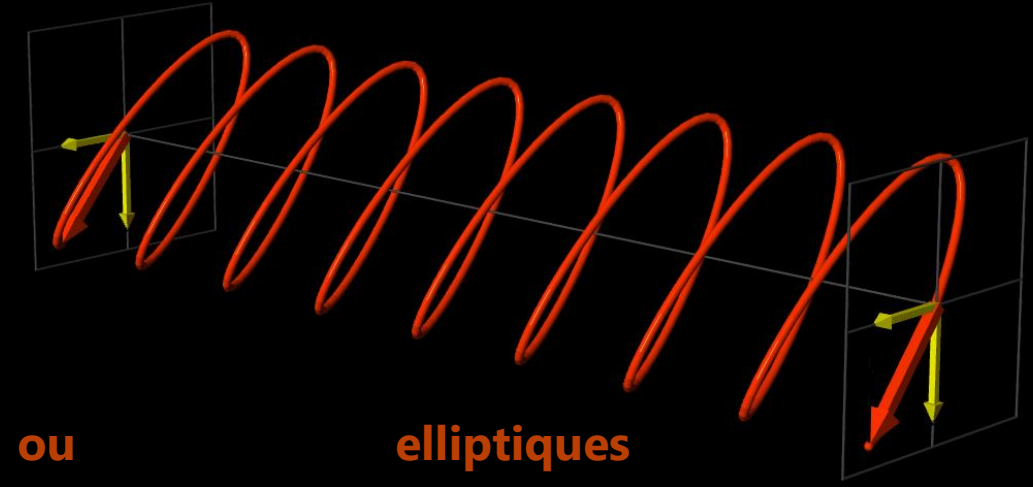
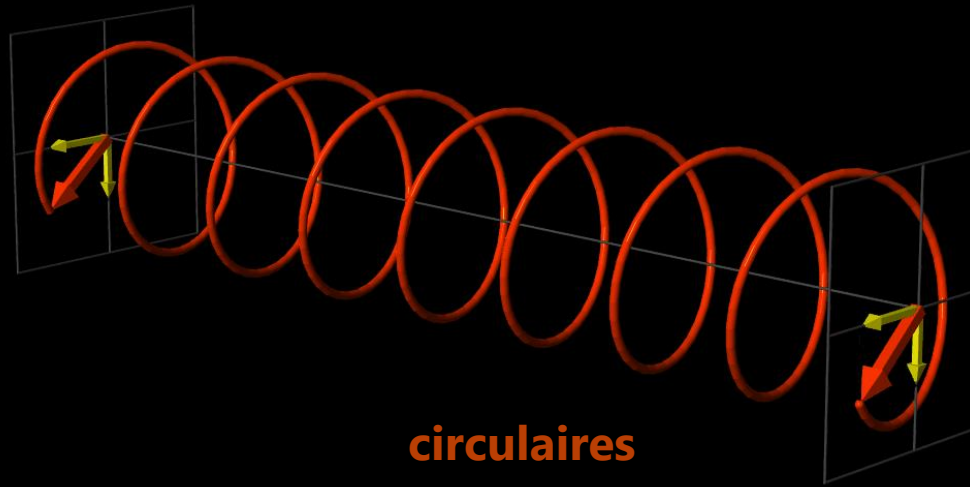
La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



La polarisation de la lumière

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

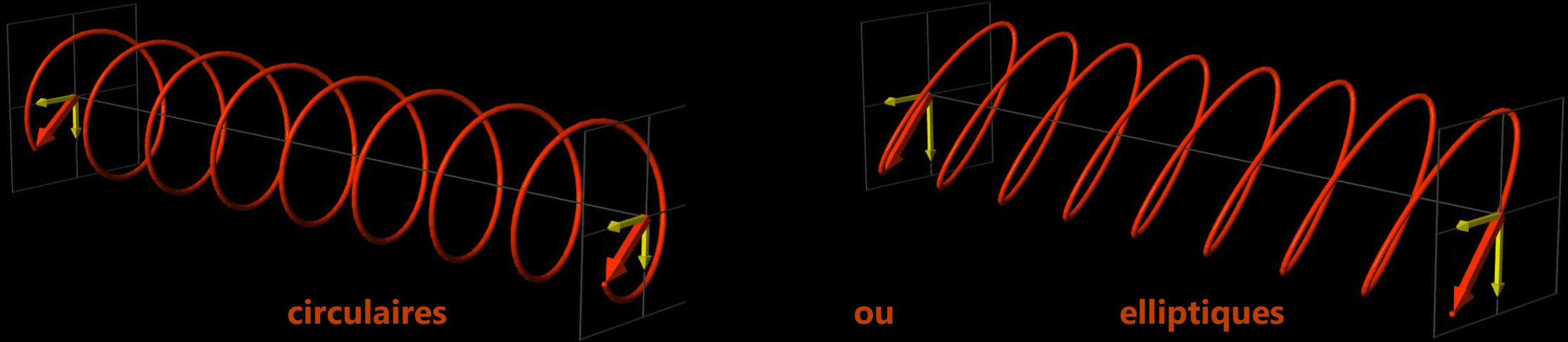
La lumière est une onde, dont les vibrations peuvent être :



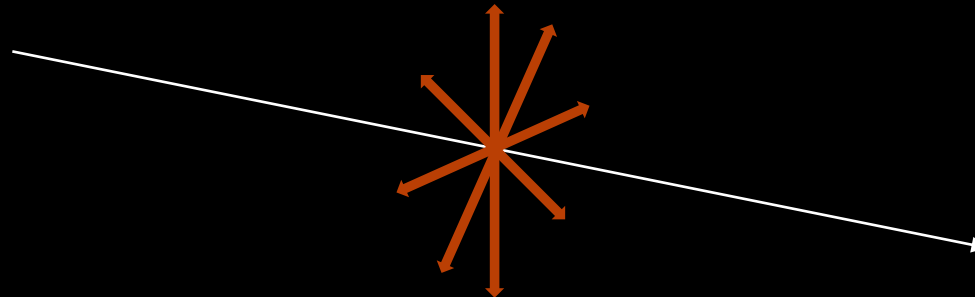
La polarisation de la lumière

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

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



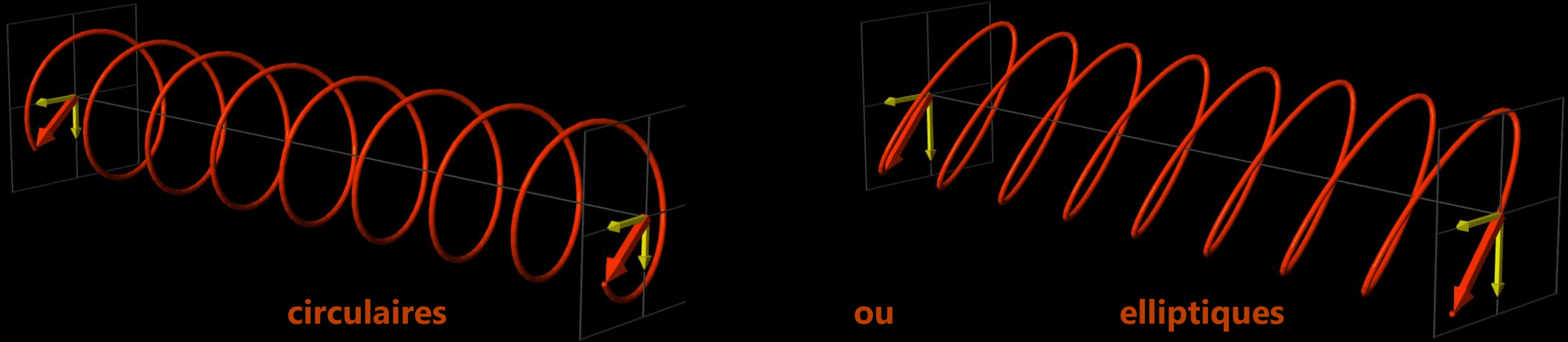
En fait, la lumière naturelle n'est pas (trop) polarisée



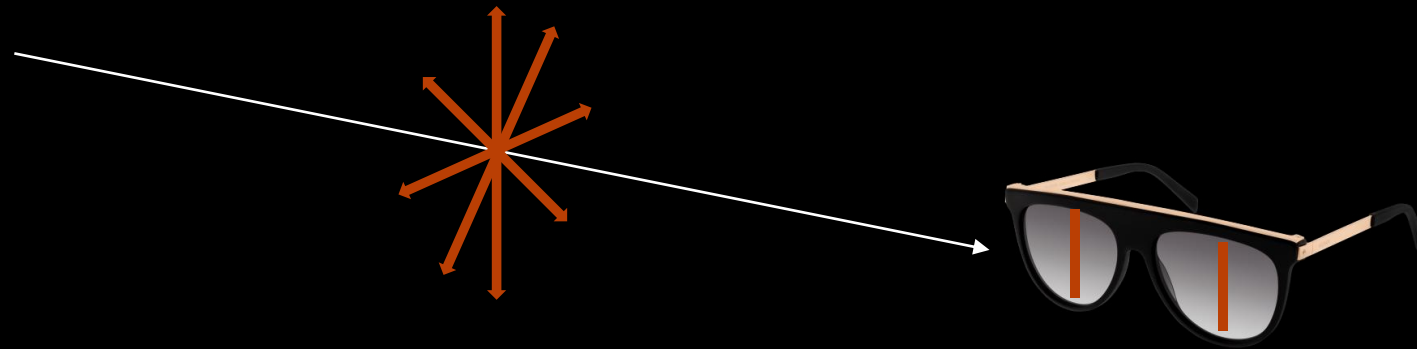
La polarisation de la lumière

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

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



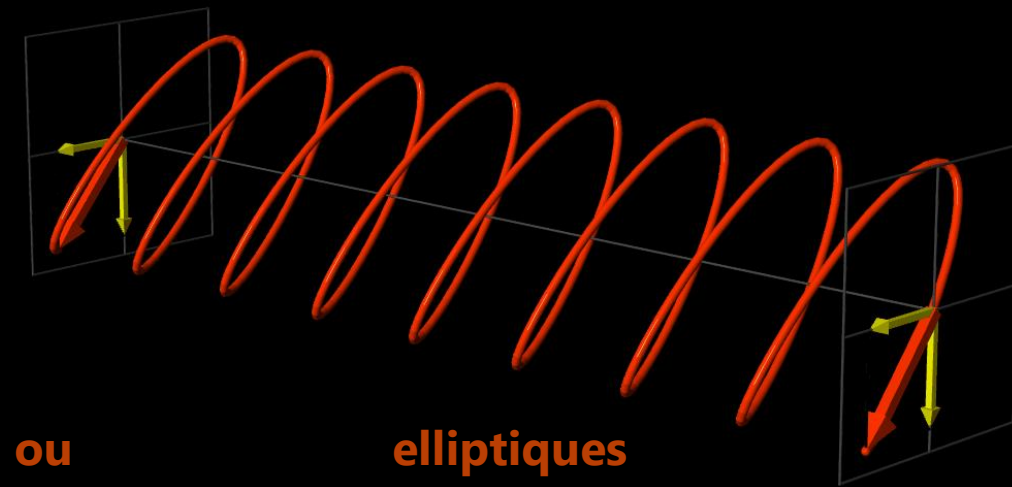
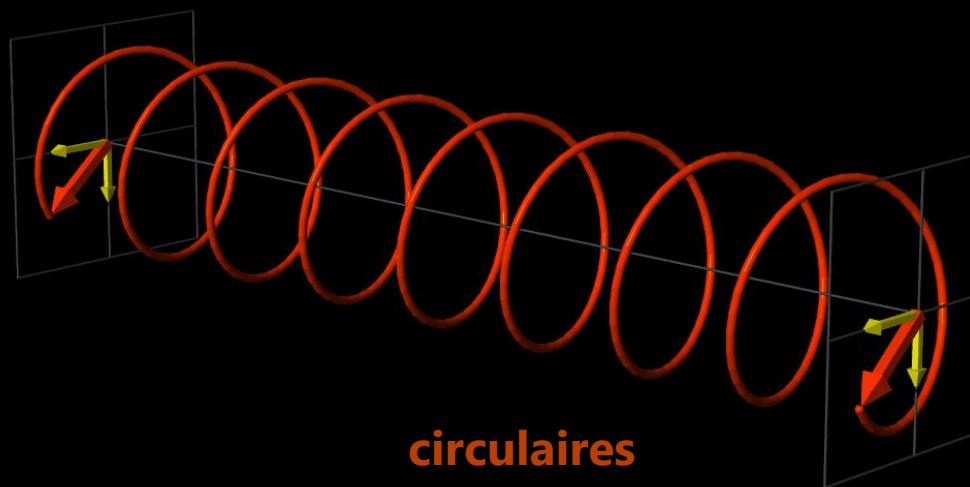
En fait, la lumière naturelle n'est pas (trop) polarisée



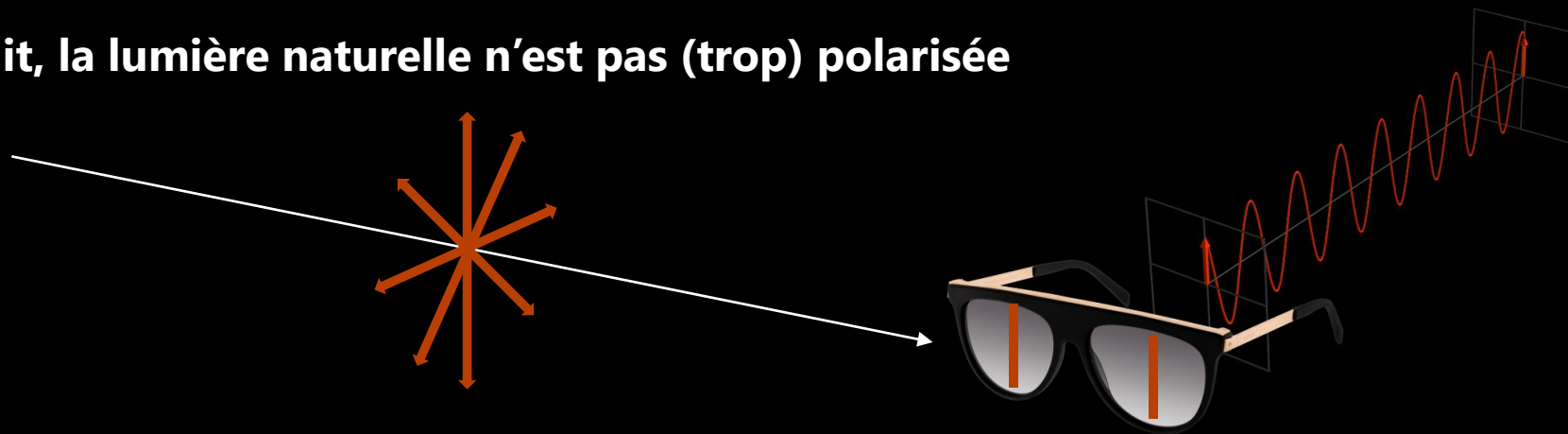
La polarisation de la lumière

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

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



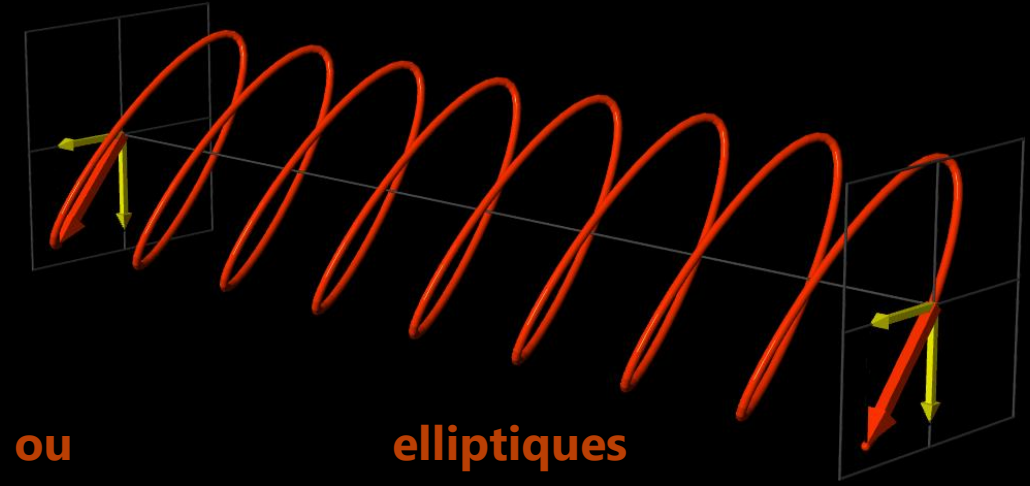
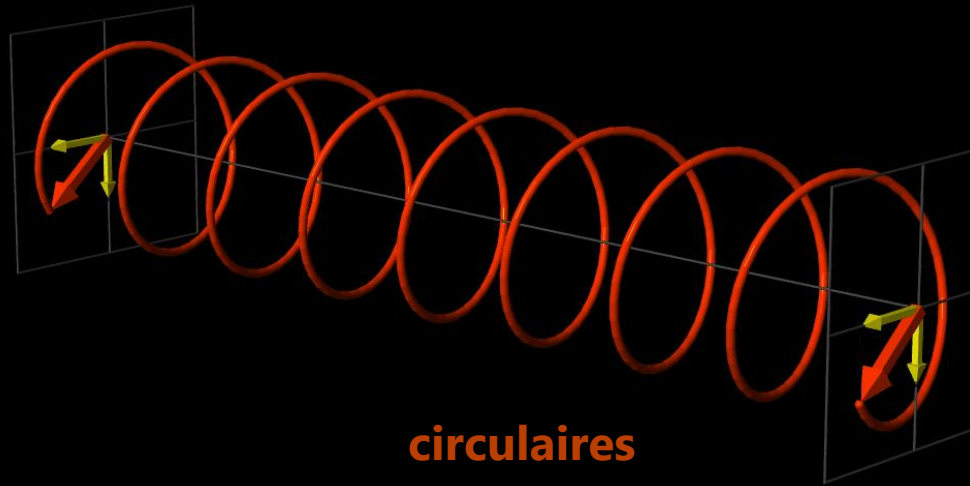
En fait, la lumière naturelle n'est pas (trop) polarisée



La polarisation de la lumière

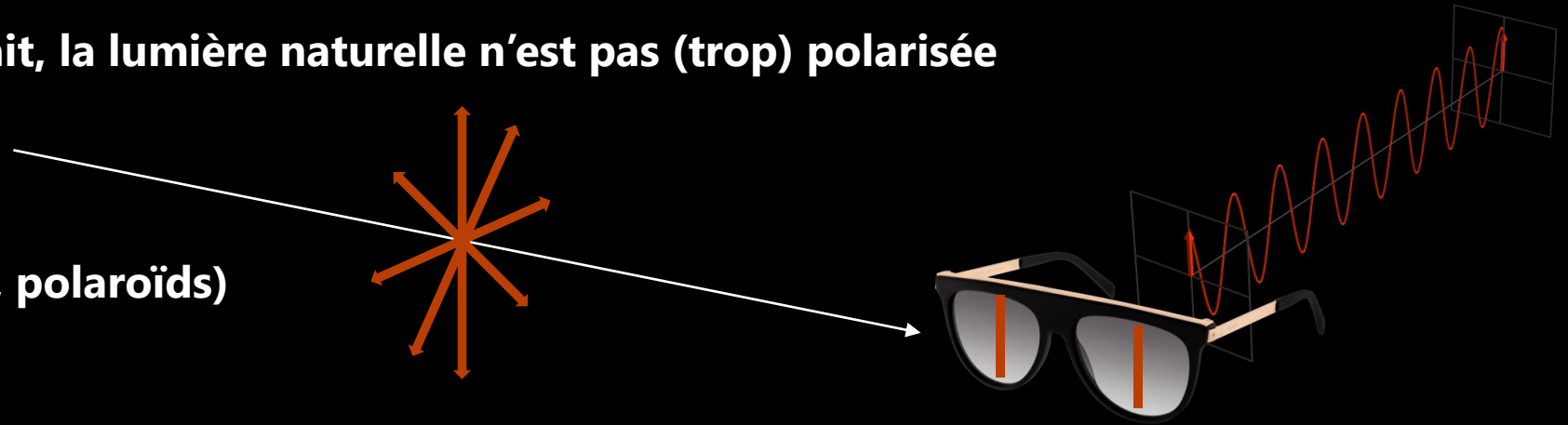
Découverte par **Étienne-Louis Malus** en 1809, comprise par Fresnel >1815

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



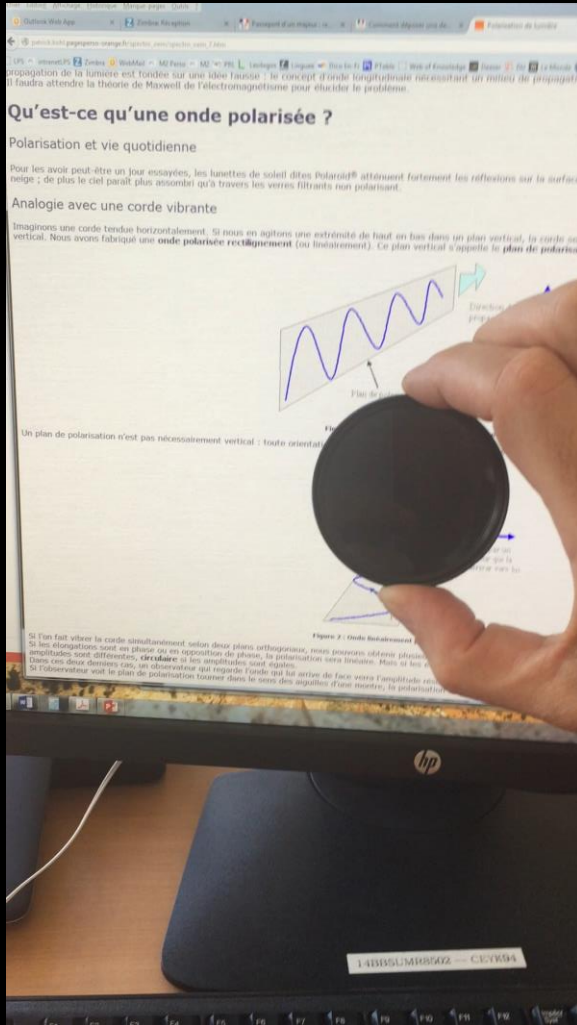
En fait, la lumière naturelle n'est pas (trop) polarisée

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



Huygens et la biréfringence (1678)

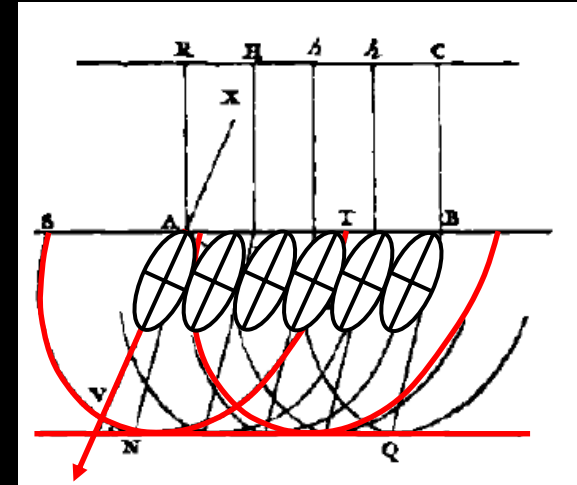
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



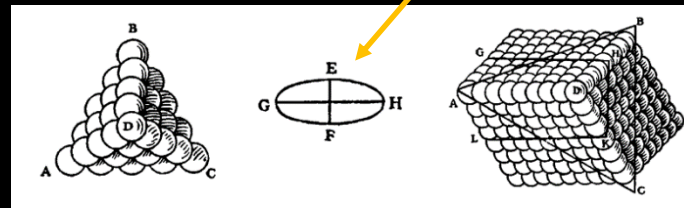
Vitesse de la lumière
anisotrope

Les fronts d'onde :
Ellipses

Le rayon **dévie**



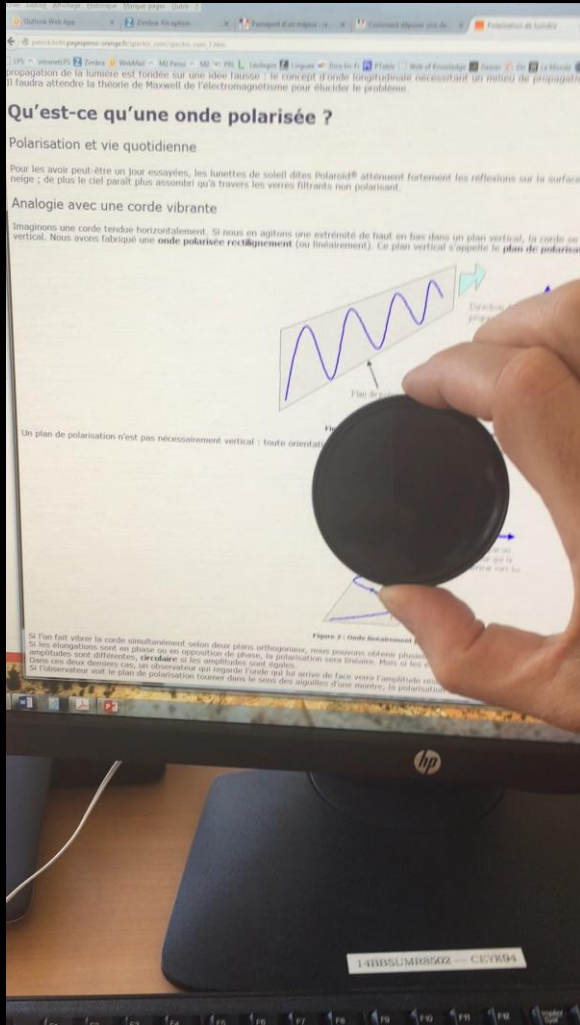
Huygens postule que le cristal est fait de
particules **allongées**



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

Huygens et la biréfringence (1678)

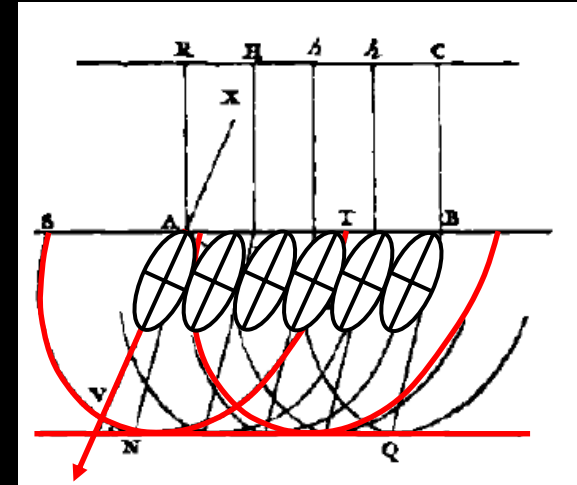
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



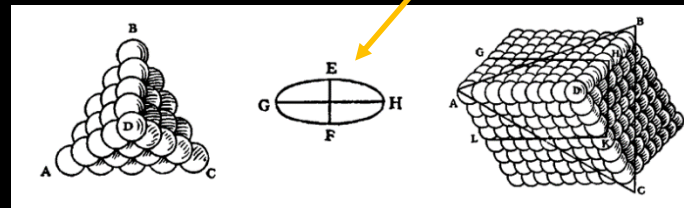
Vitesse de la lumière
anisotrope

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

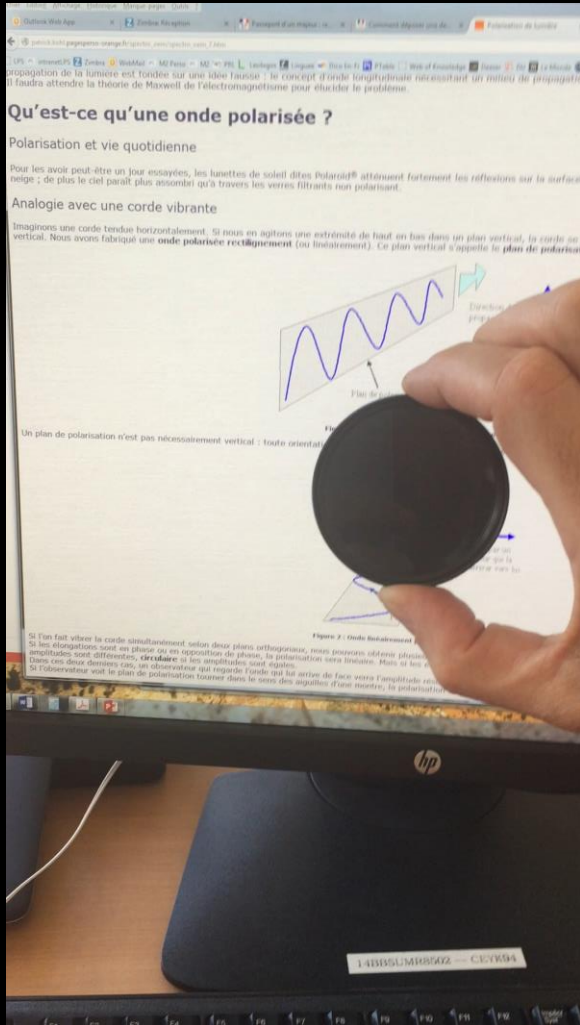
Double réfraction
des RX aux IR

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)

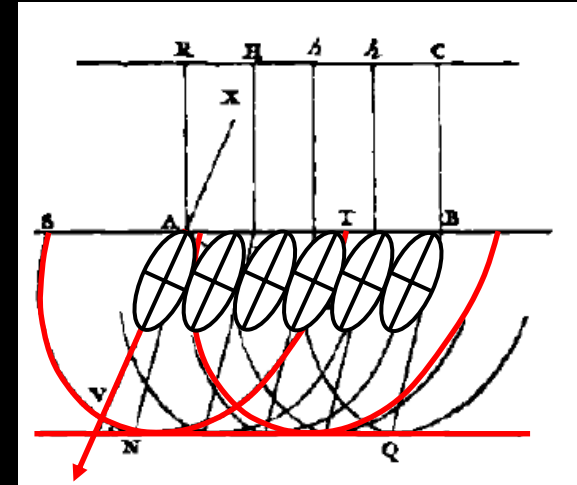
Comment expliquer les réfractions **ordinaires** et **extraordinaires** ?



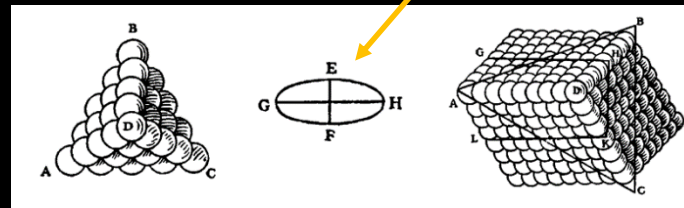
Vitesse de la lumière
anisotrope

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

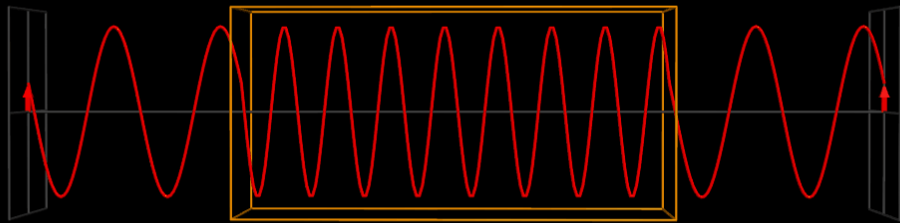
Avec presque 100 ans d'avance Huygens postule
la **structure atomique de la matière** !

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

Indice de réfraction complexe

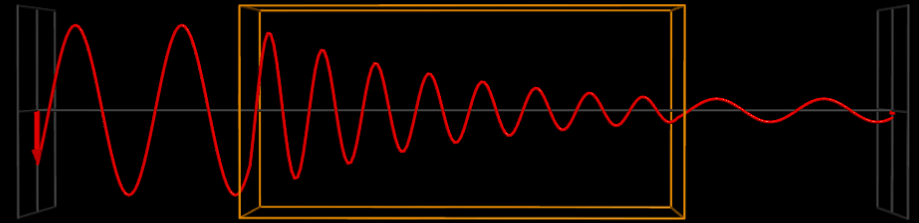
$$v_{ph} = \frac{c}{\mathbf{n}} = \frac{\lambda}{\nu}$$

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



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**.

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

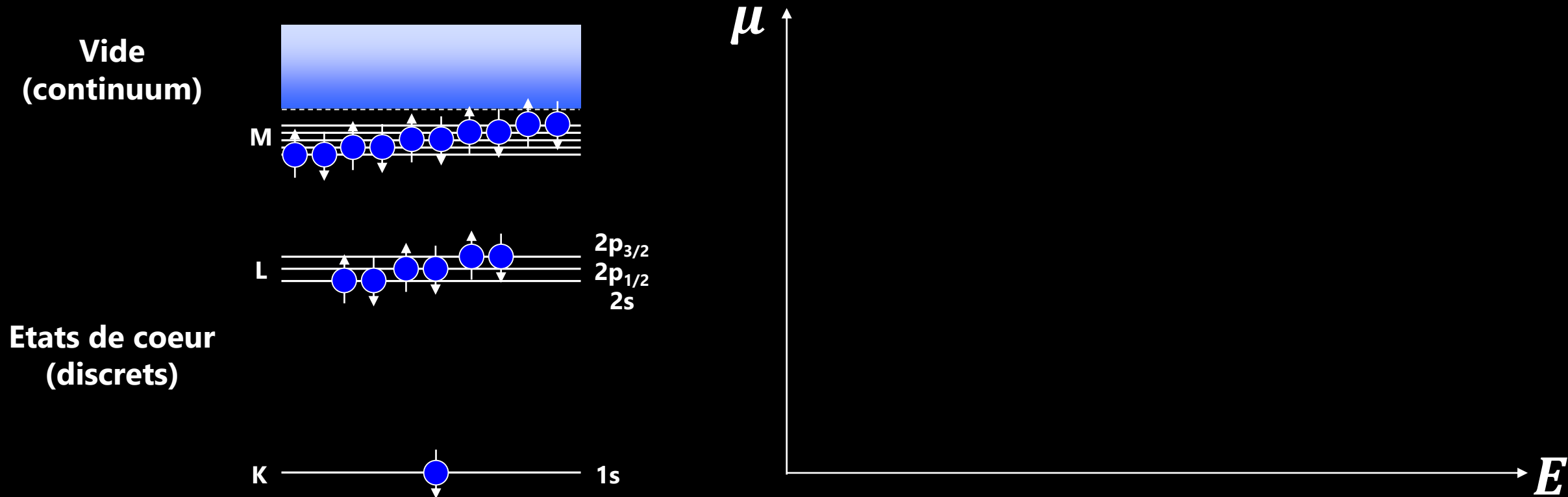
$$\kappa(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \mathcal{P} \int_0^{\infty} \frac{n(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

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

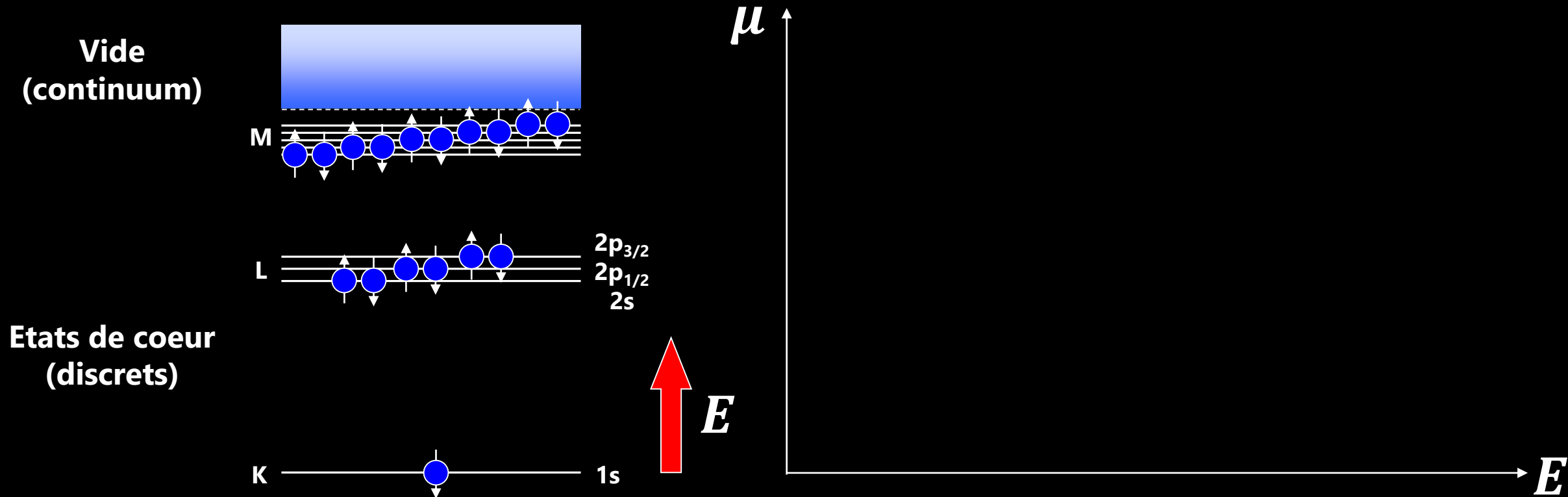
Réponses **non-linéaires** :

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

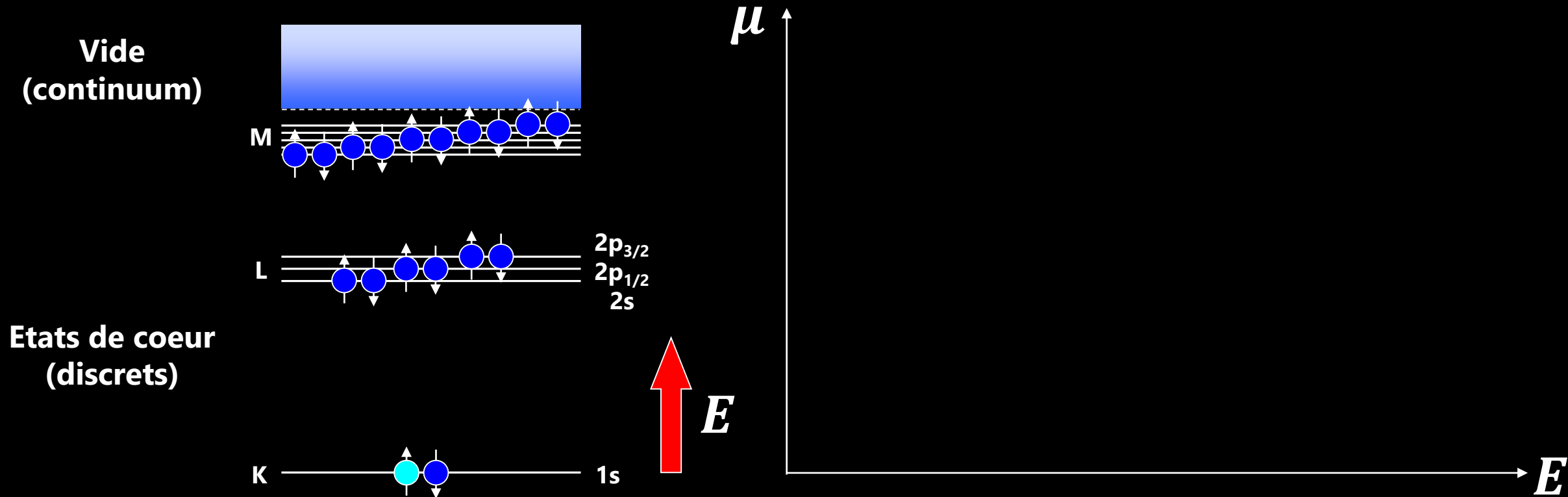
Absorption phase solide : augmentation forte de μ



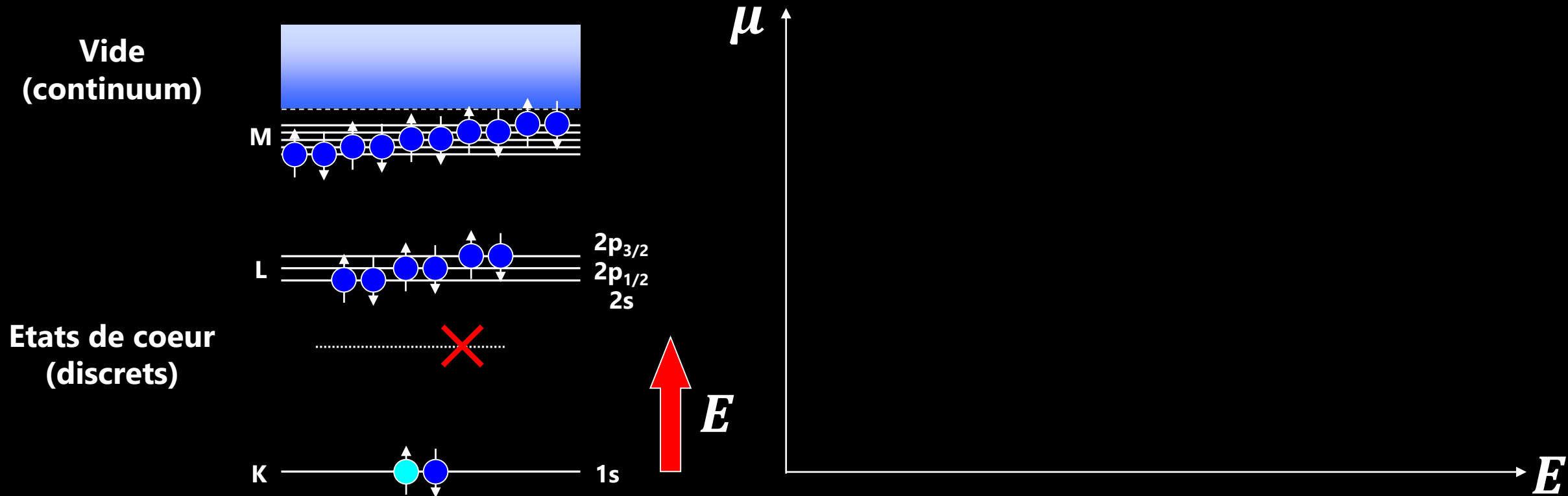
Absorption phase solide : augmentation forte de μ



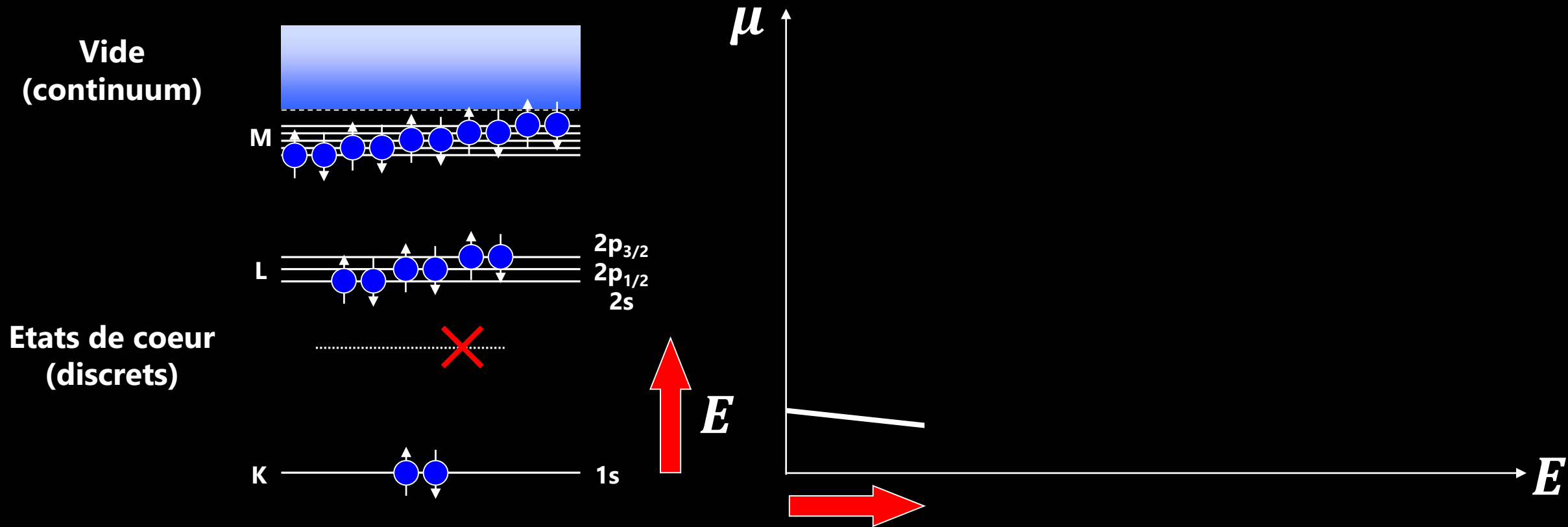
Absorption phase solide : augmentation forte de μ



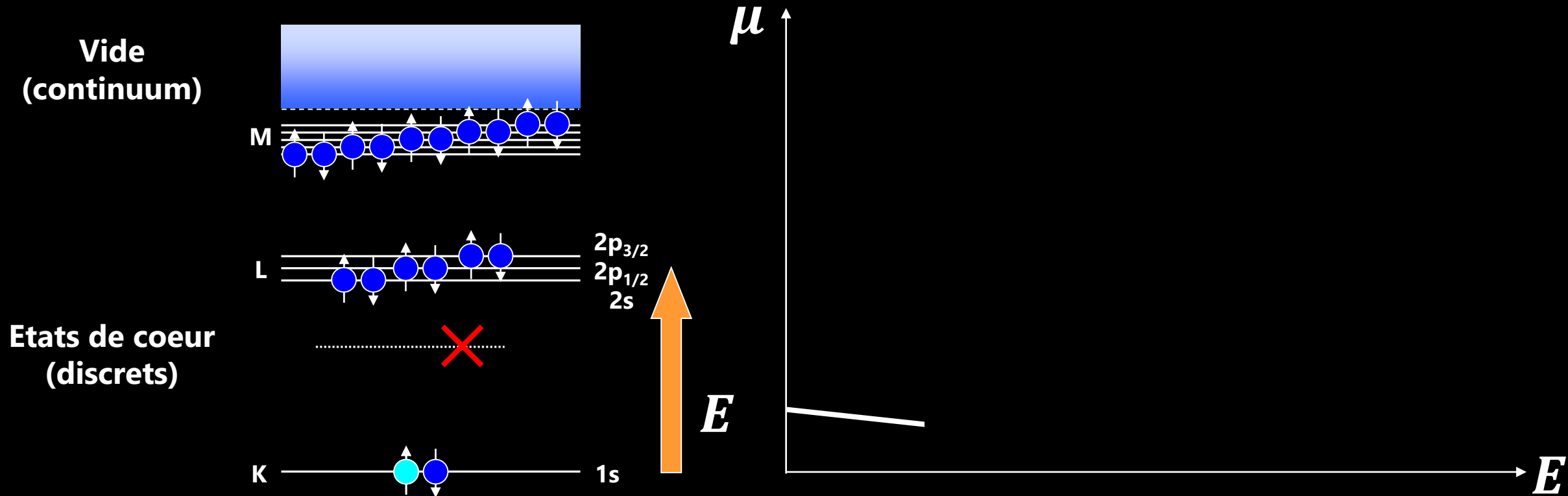
Absorption phase solide : augmentation forte de μ



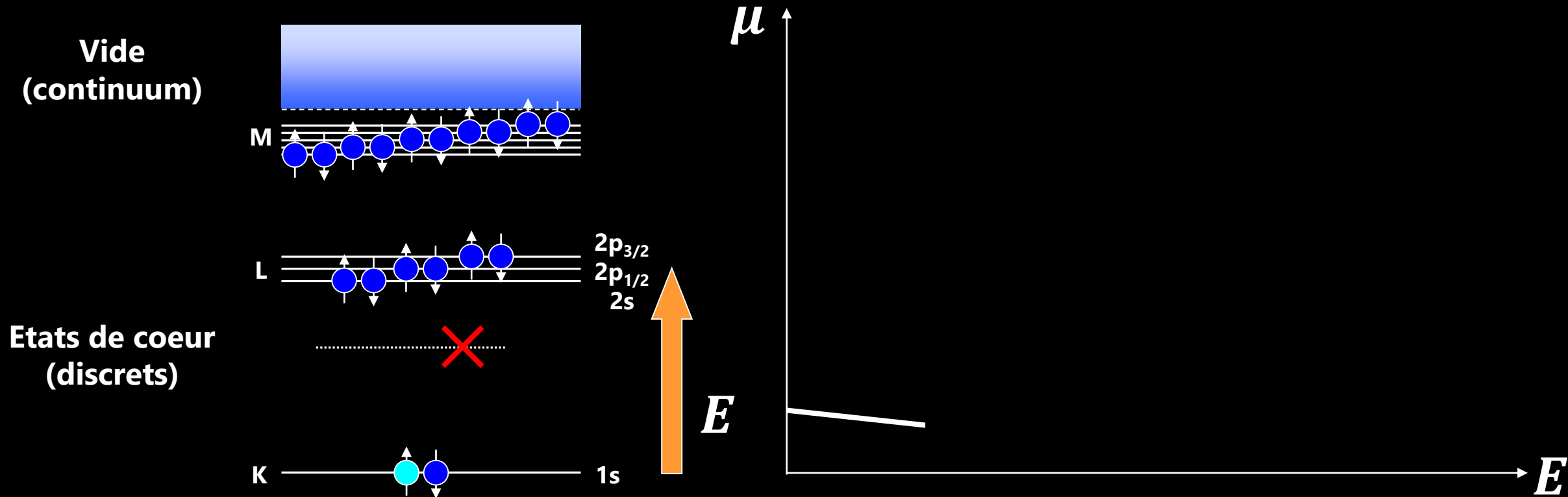
Absorption phase solide : augmentation forte de μ



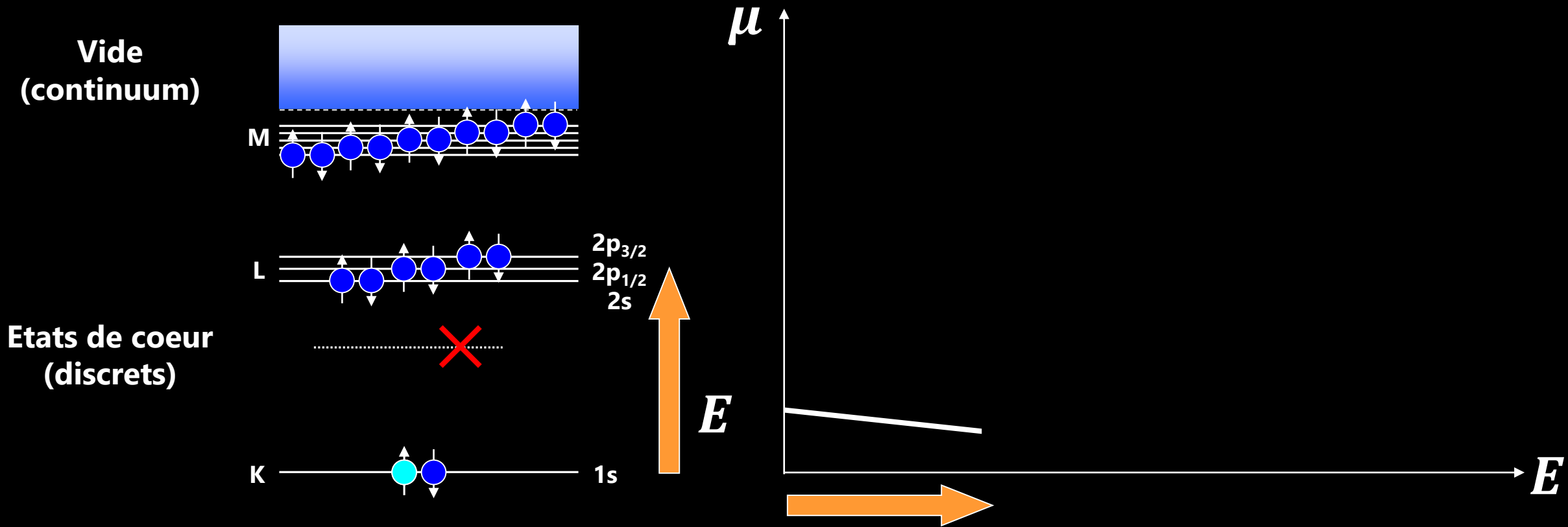
Absorption phase solide : augmentation forte de μ



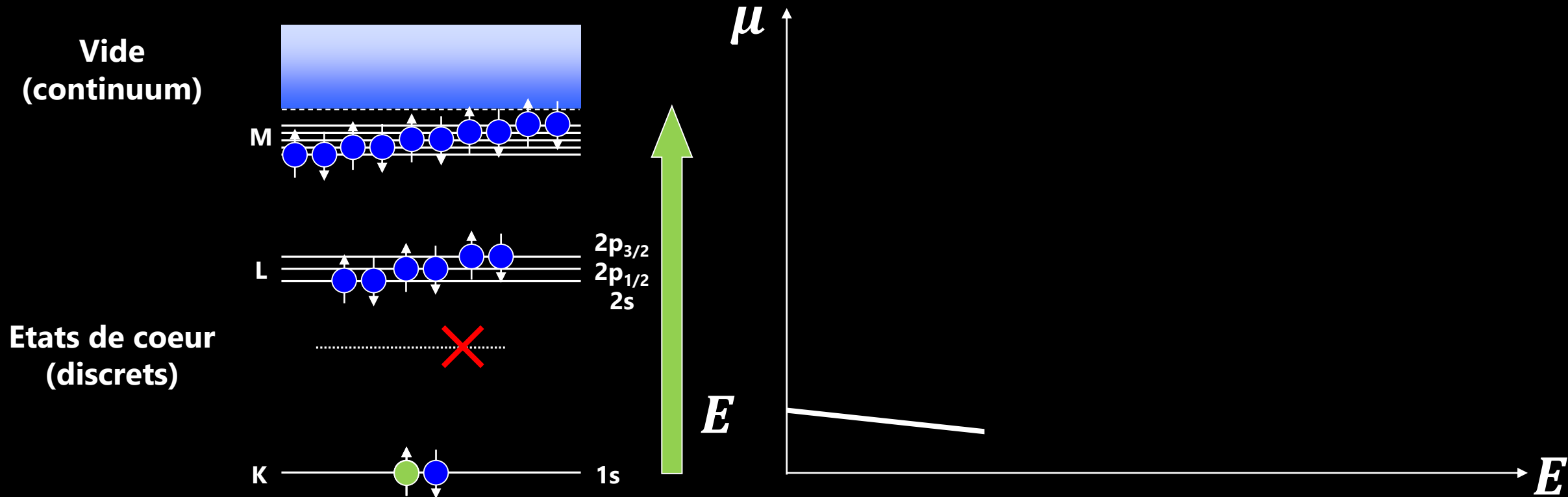
Absorption phase solide : augmentation forte de μ



Absorption phase solide : augmentation forte de μ

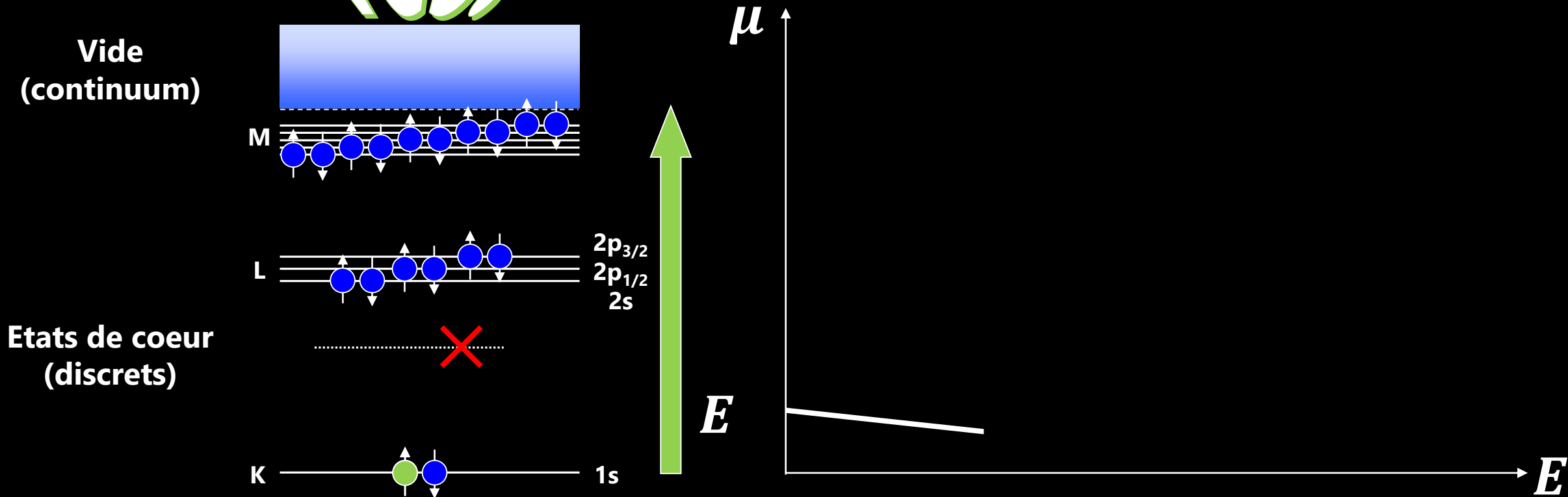


Absorption phase solide : augmentation forte de μ



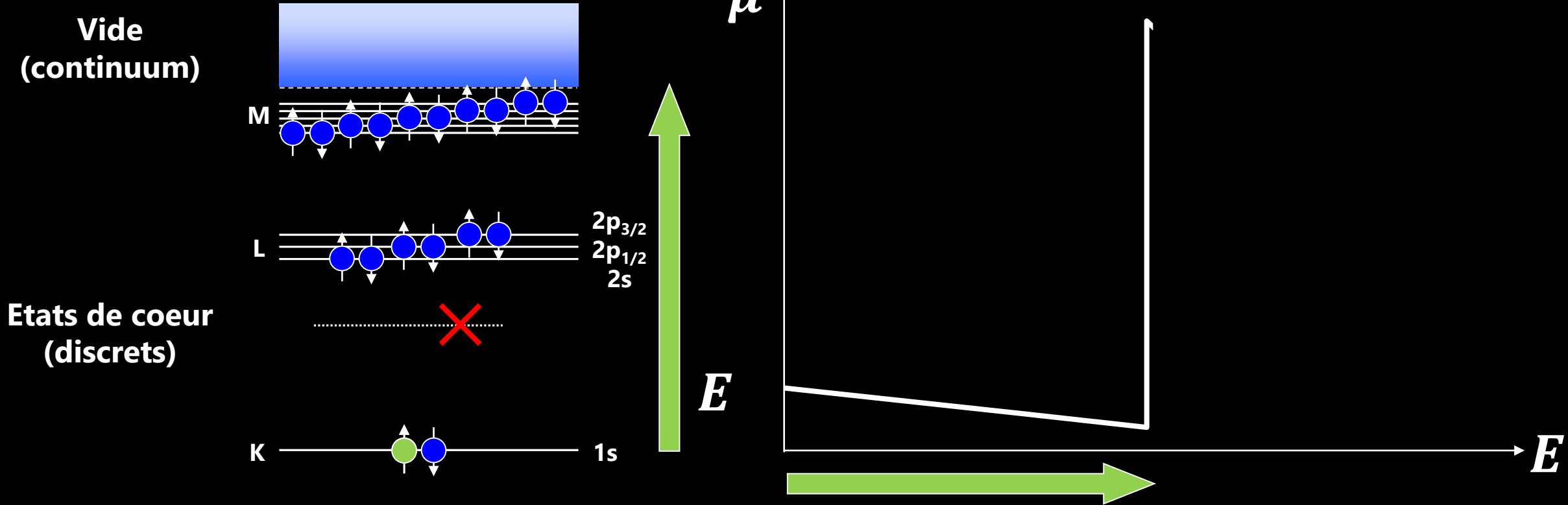
Absorption phase solide : augmentation forte de μ

Yes!

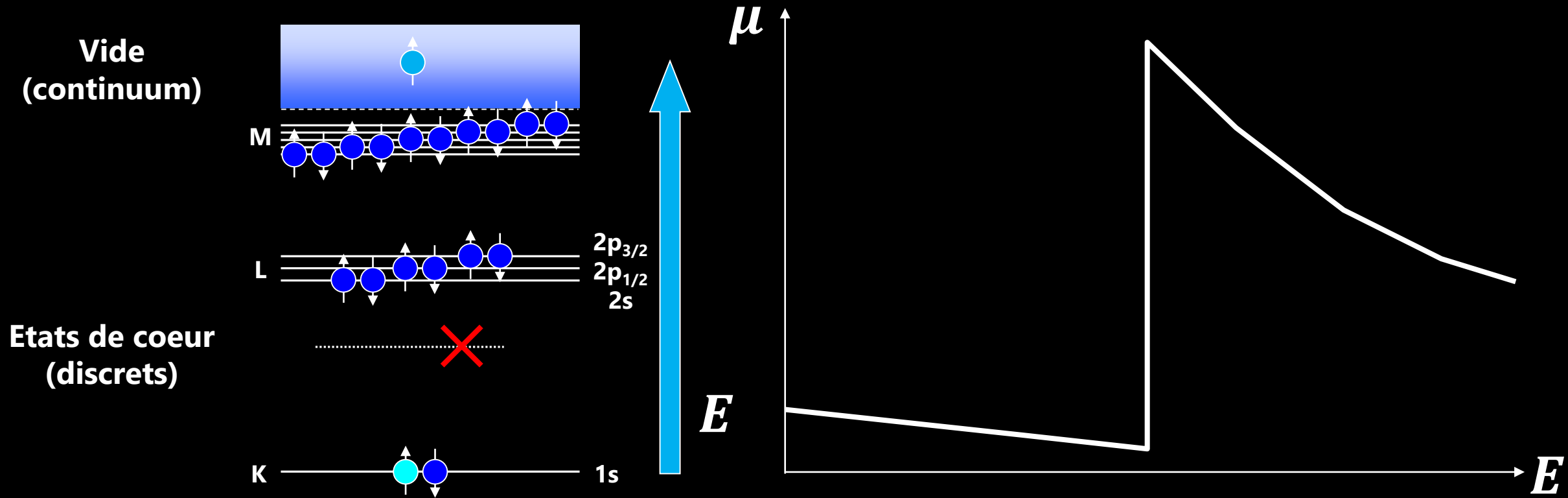


Absorption phase solide : augmentation forte de μ

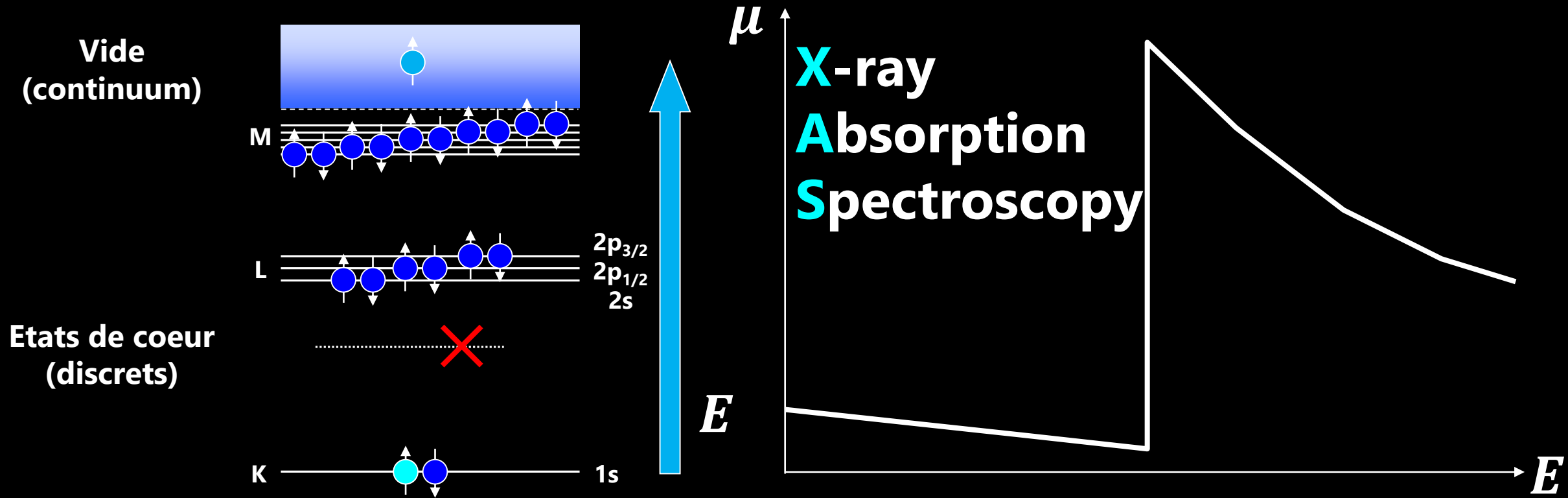
Yes!



Absorption phase solide : augmentation forte de μ



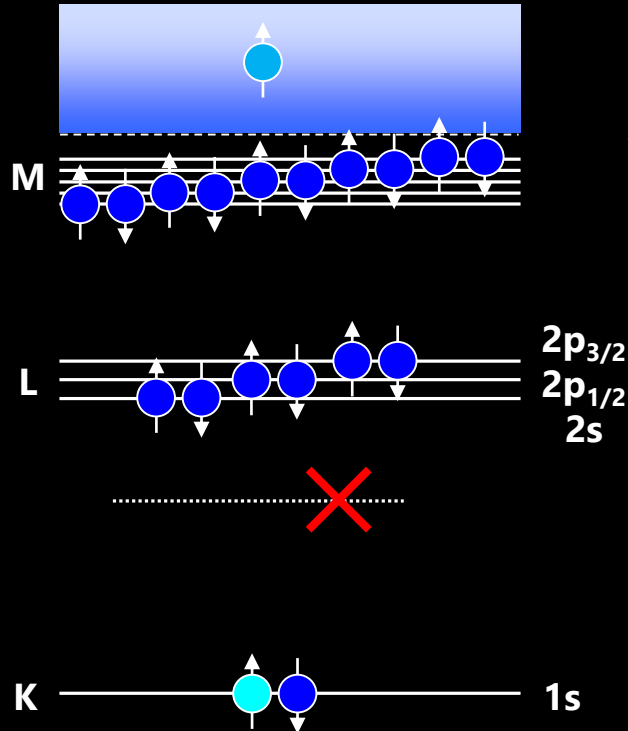
Absorption phase solide : augmentation forte de μ



Absorption phase solide : augmentation forte de μ

Photo-électron

Vide
(continuum)



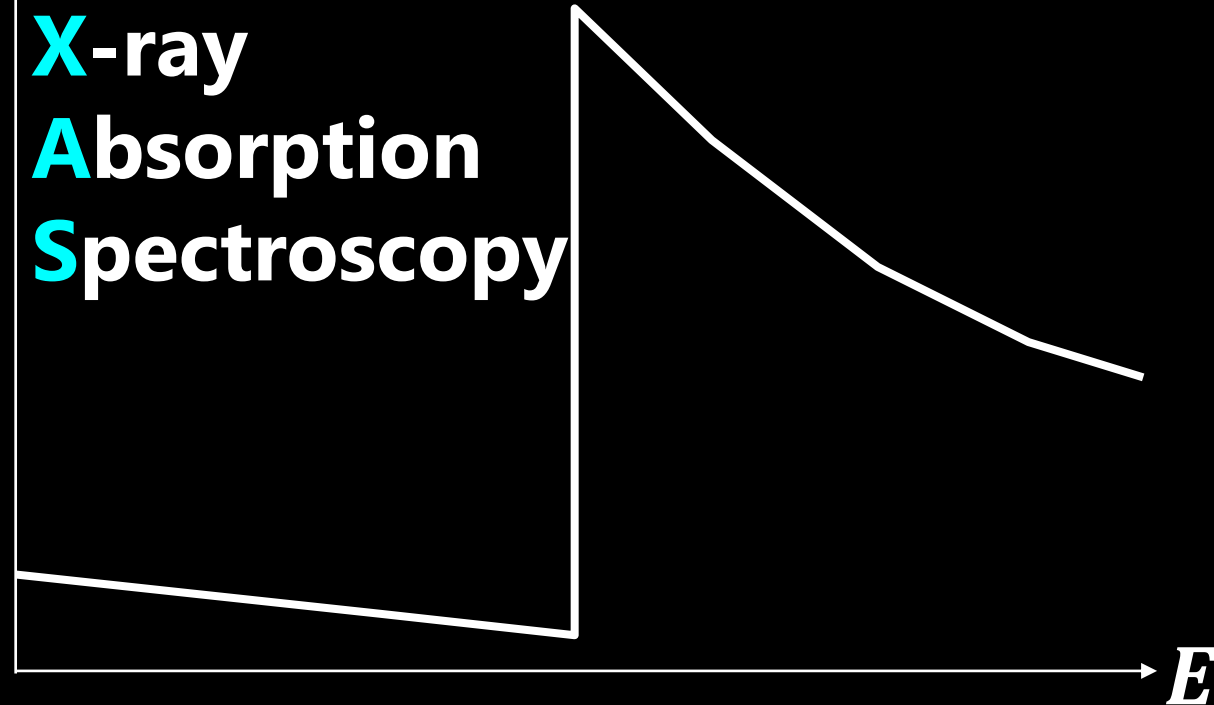
Etats de coeur
(discrets)



E

μ

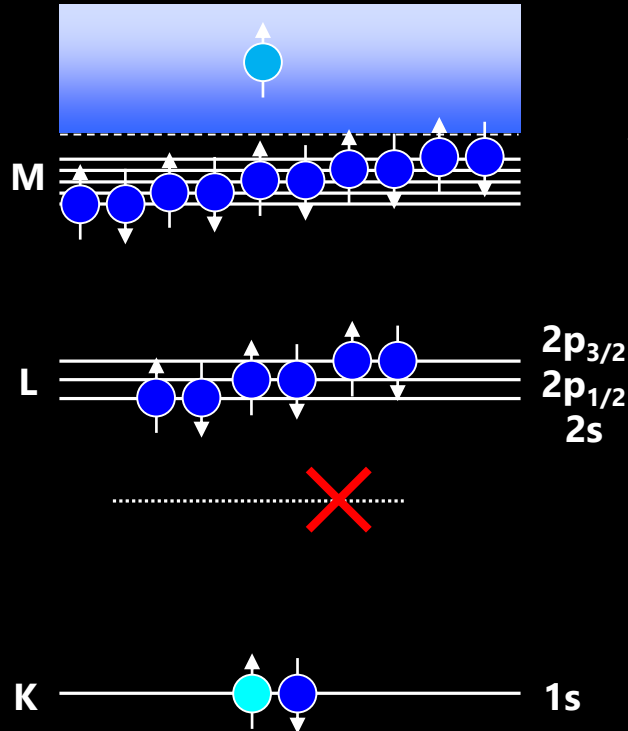
X-ray
Absorption
Spectroscopy



Absorption phase solide : augmentation forte de μ

Photo-électron

Vide
(continuum)



Etats de coeur
(discrets)

μ

X-ray
Absorption
Spectroscopy

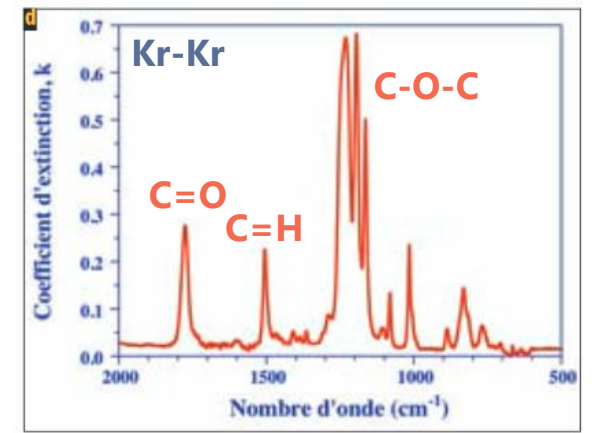
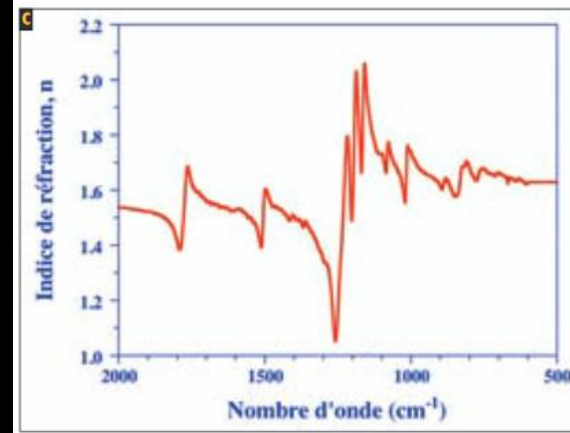
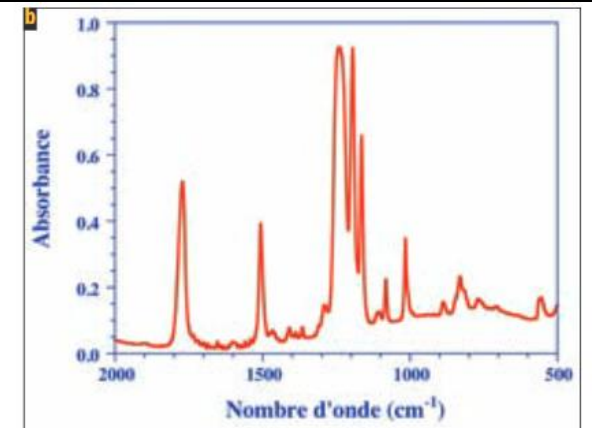
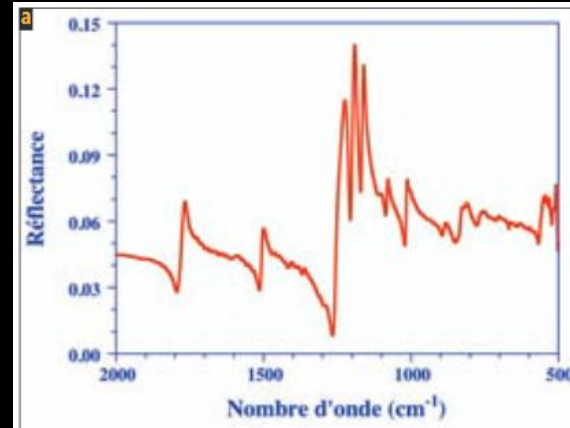
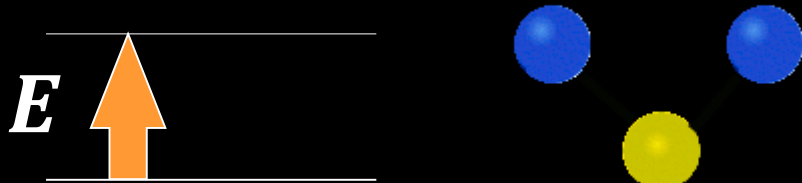
E

E

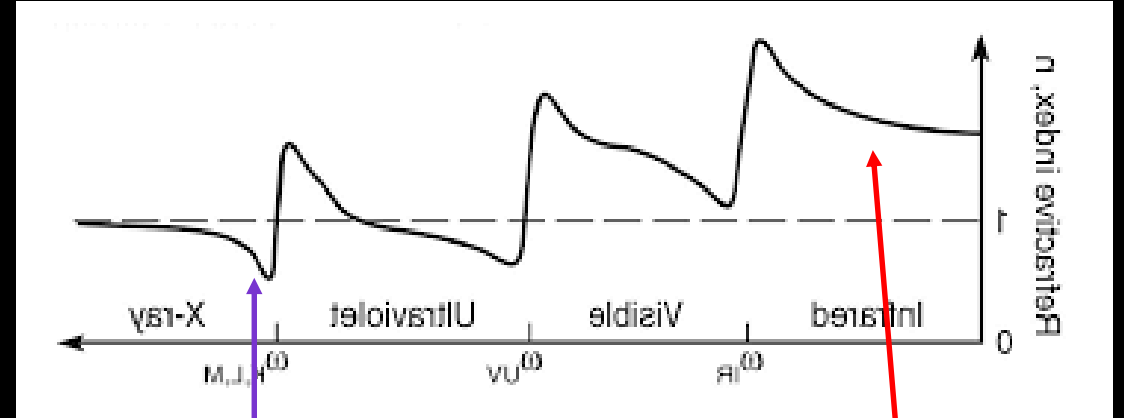
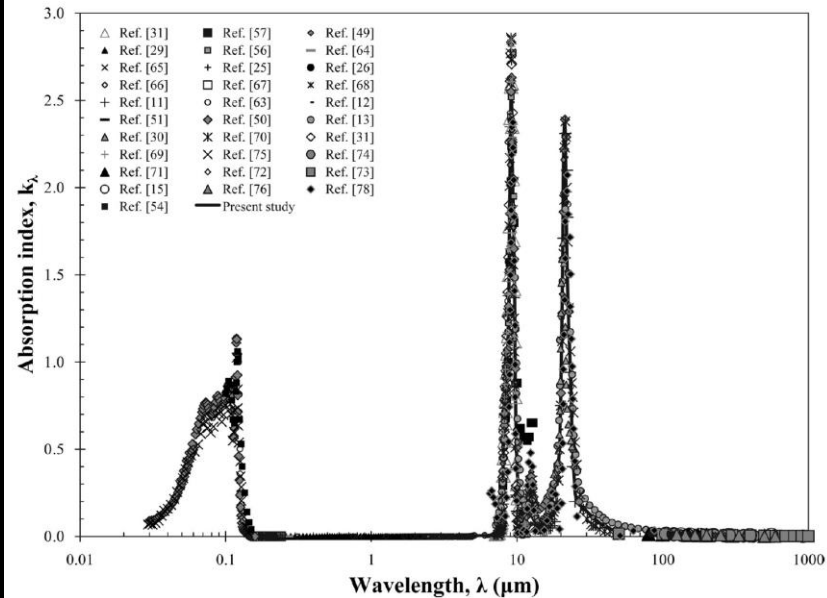
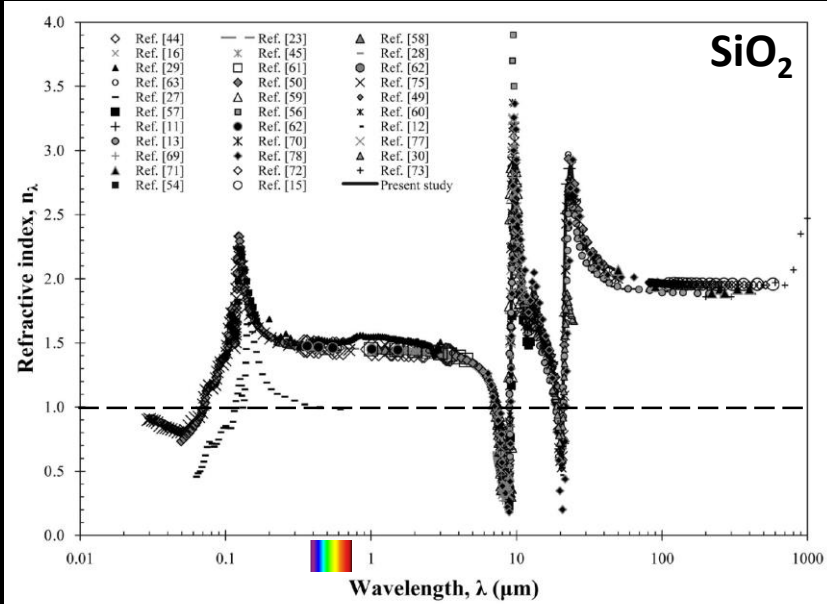
Element specific
K-edge, L-edge, etc.

Absorption infrarouge

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



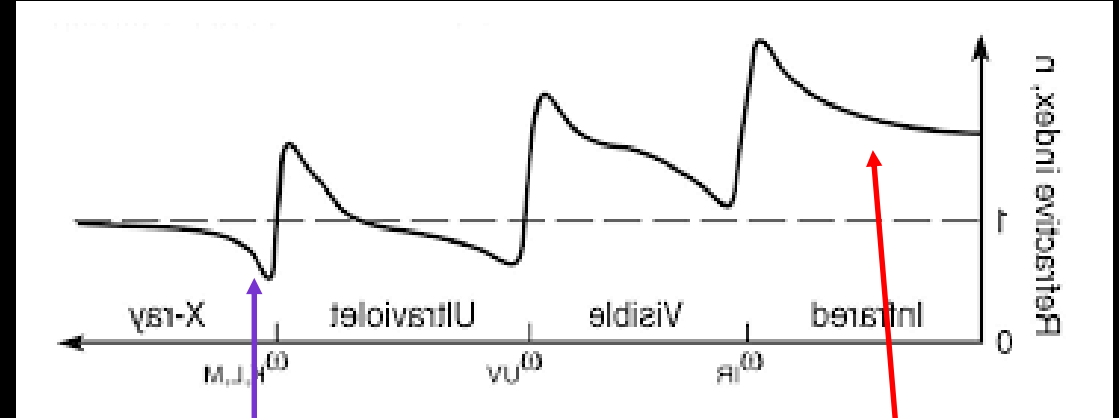
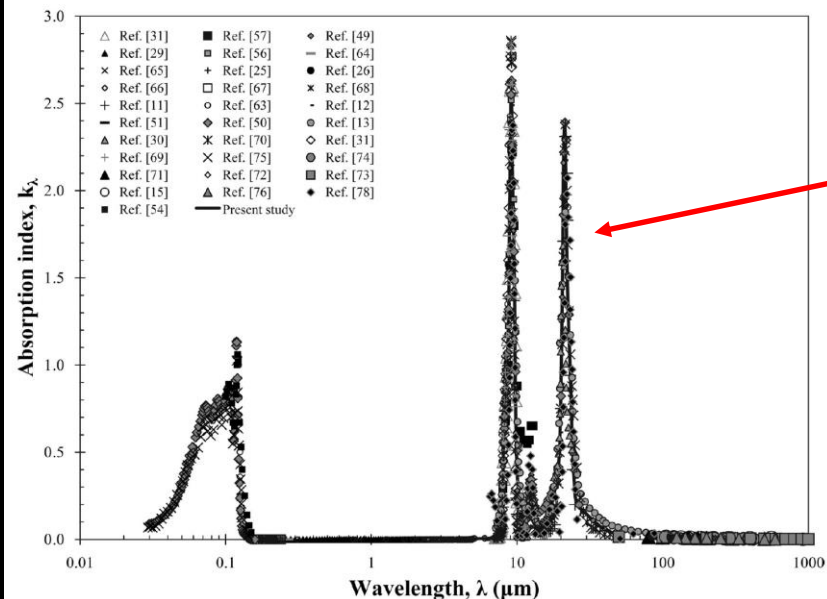
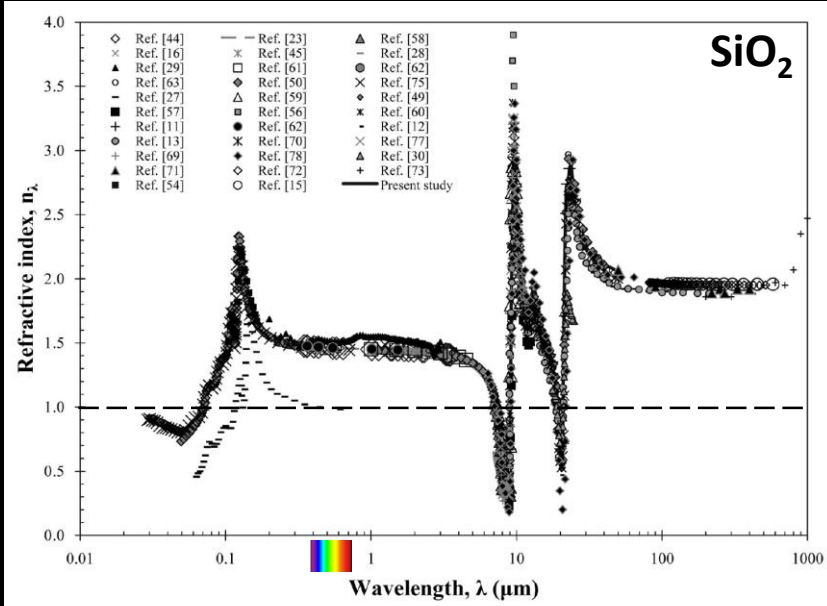
Dispersion-absorption



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

Forts indices dans l'IR

Dispersion-absorption



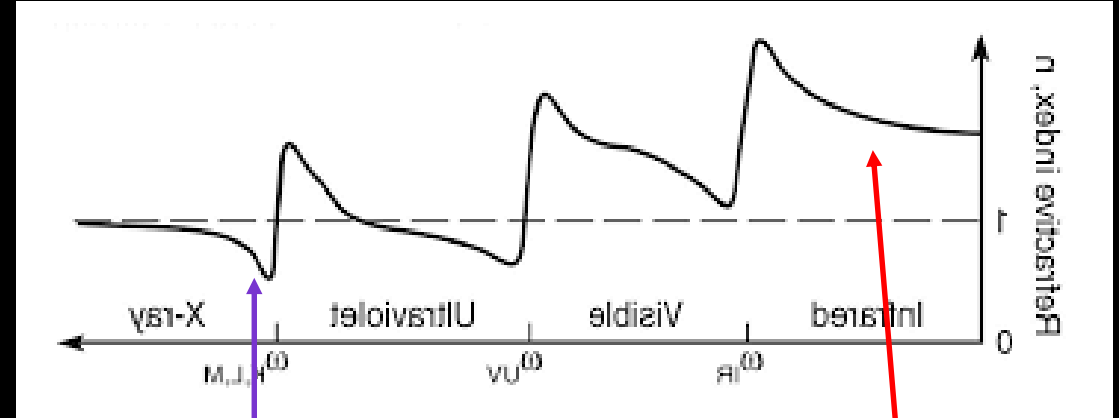
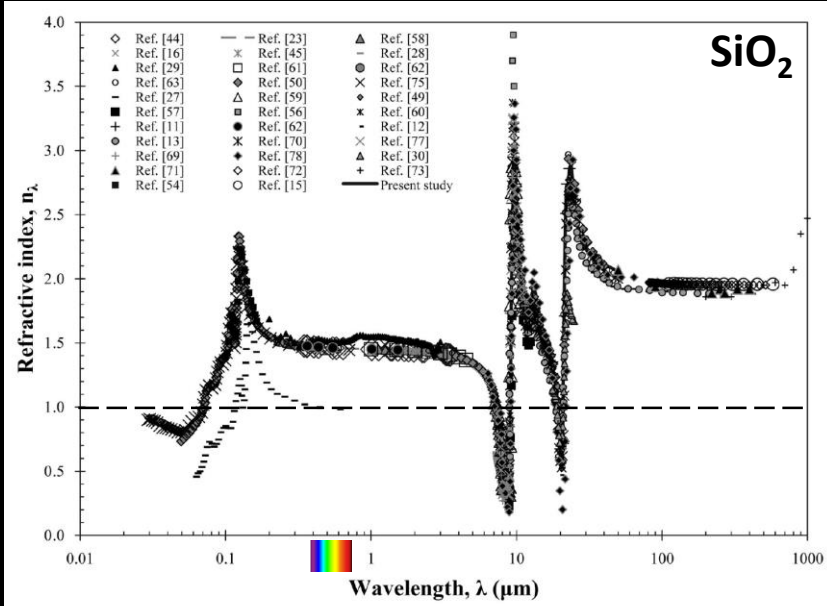
Faibles indices dans l'UV et RX
 $n < 1$!

Forts indices dans l'IR

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

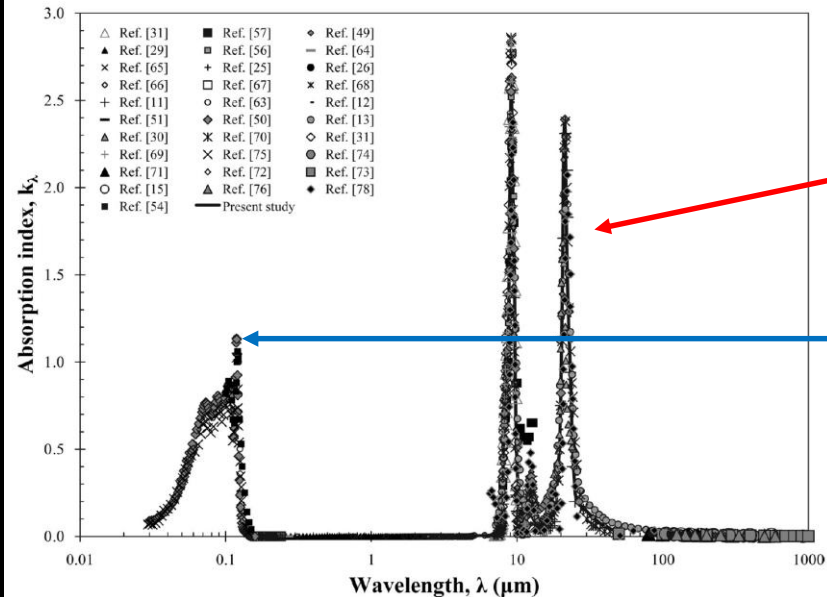


Dispersion-absorption



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

Forts indices dans l'IR

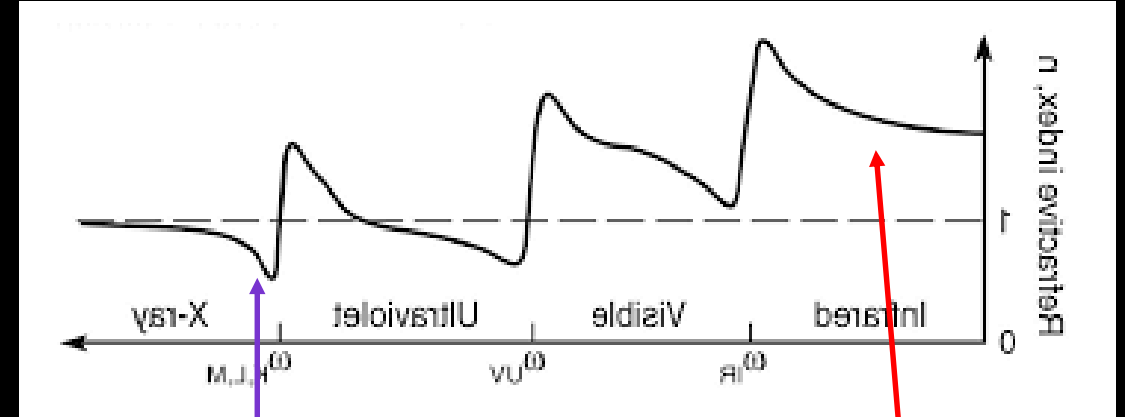
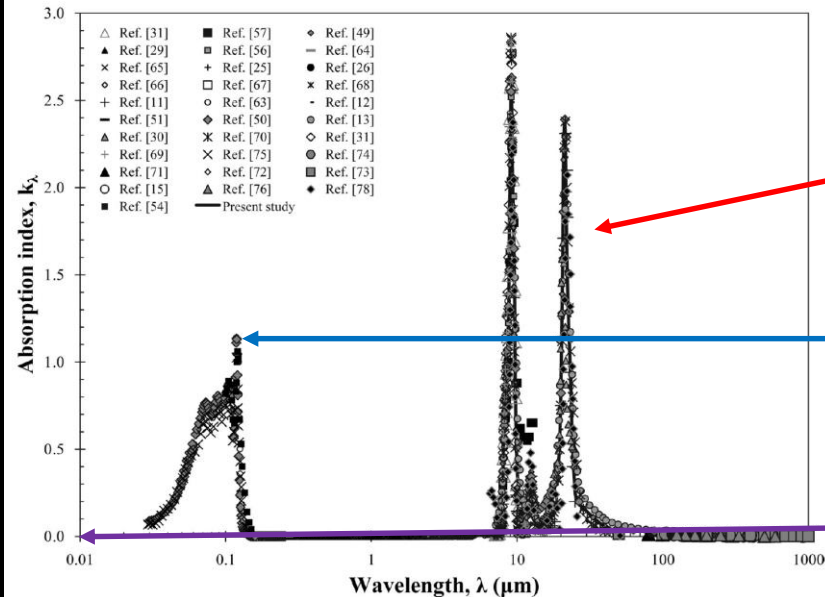
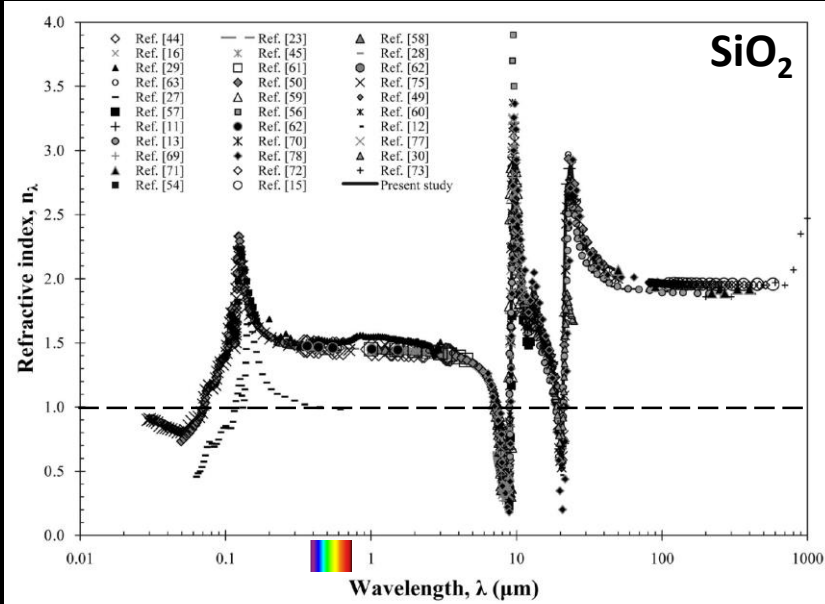


Diverses résonances des vibrations des ponts Si-O-Si :



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 :

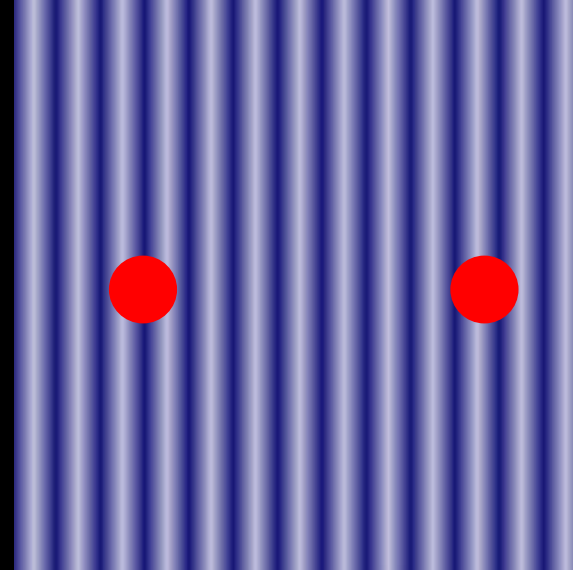
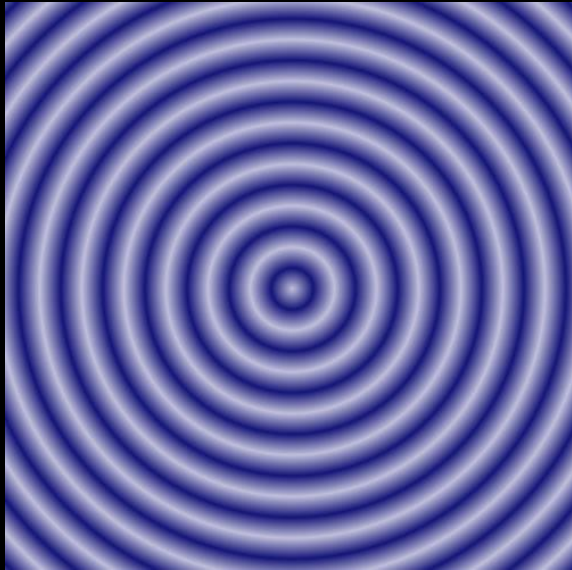


Absorption électrons de liaison Si-O + défauts

Absorption électrons des couches profondes de Si et O

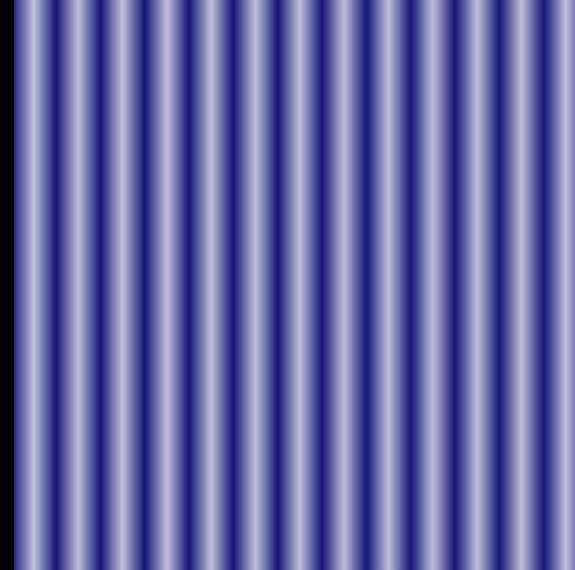
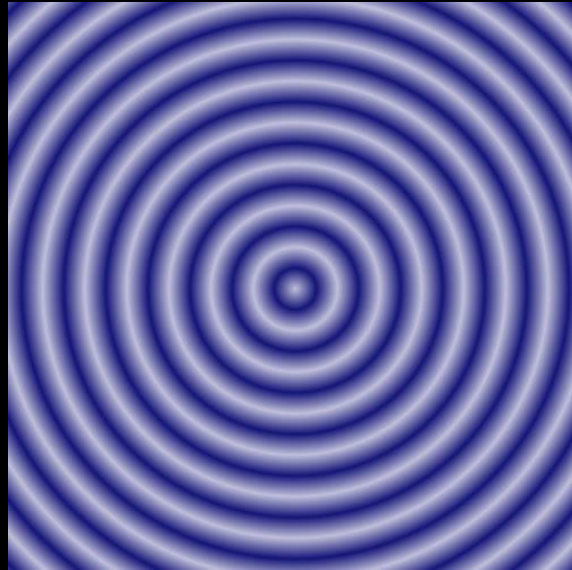
Qu'est-ce que la cohérence?

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



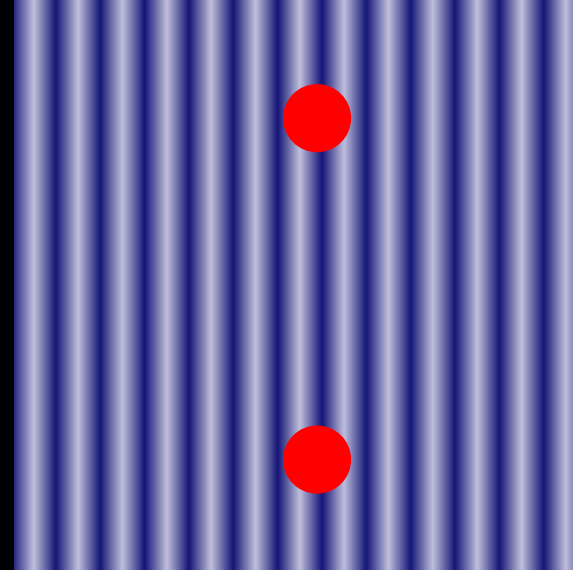
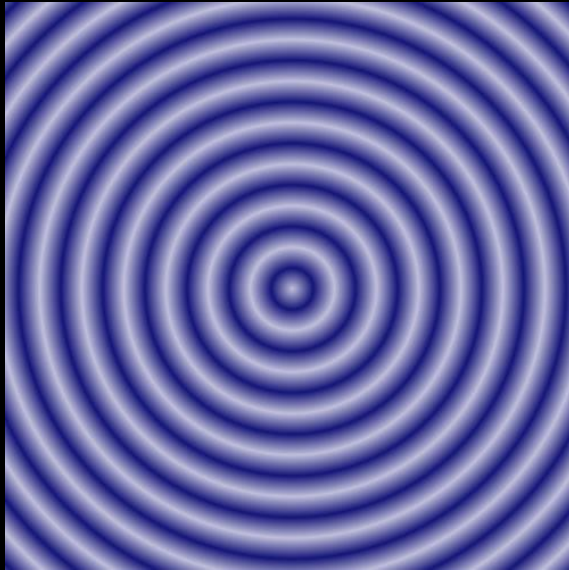
Qu'est-ce que la cohérence?

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



Qu'est-ce que la cohérence?

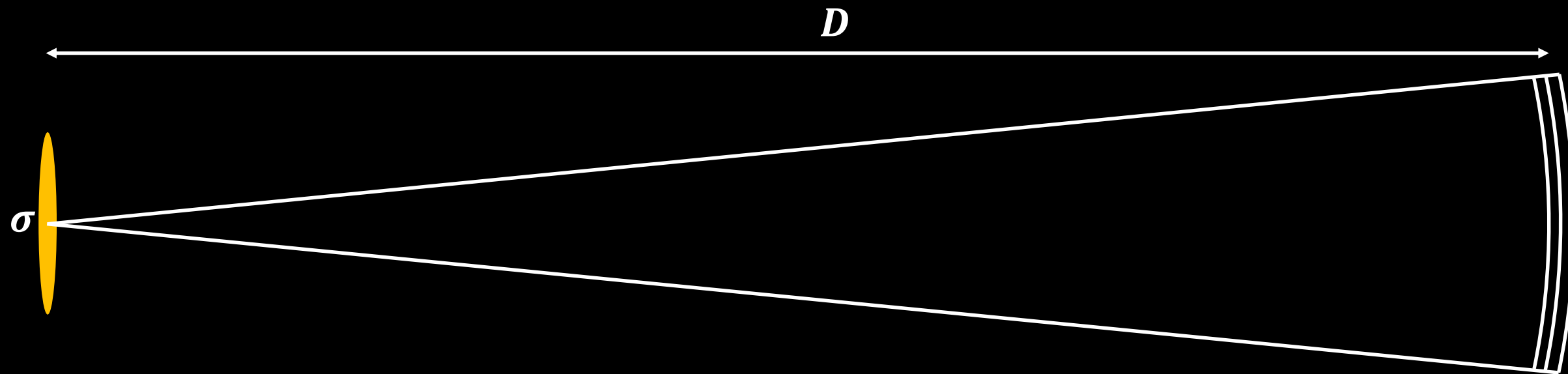
Une onde est cohérente si elle est **parfaitement** plane ou sphérique ou...



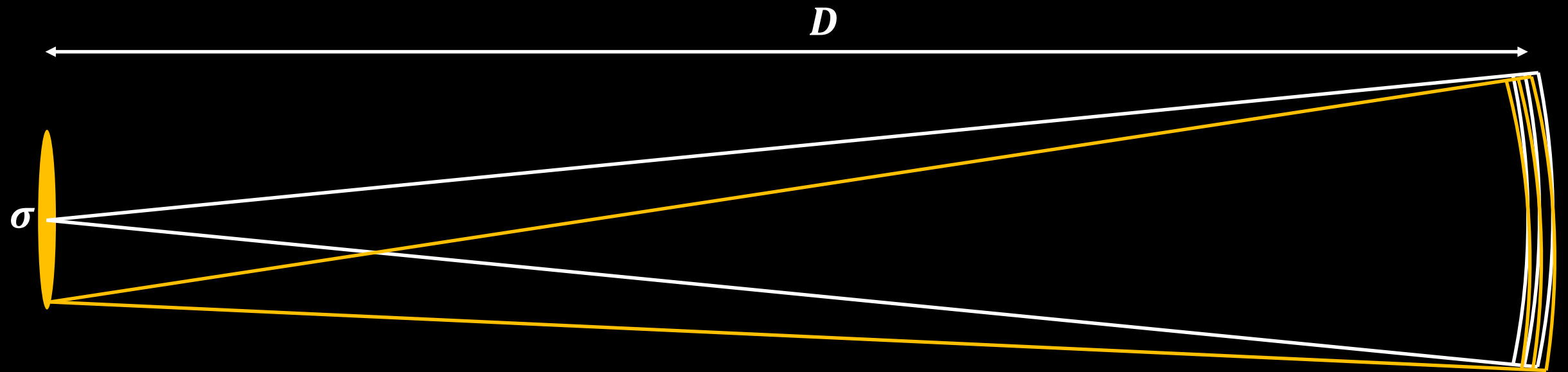
Corrélation du champ entre deux points :

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

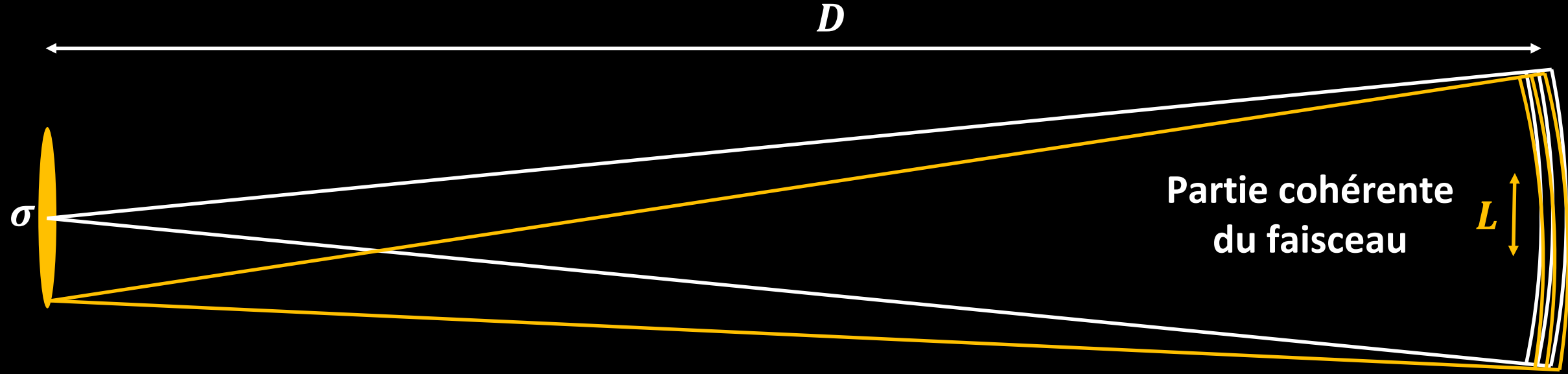
Brillance et Cohérence



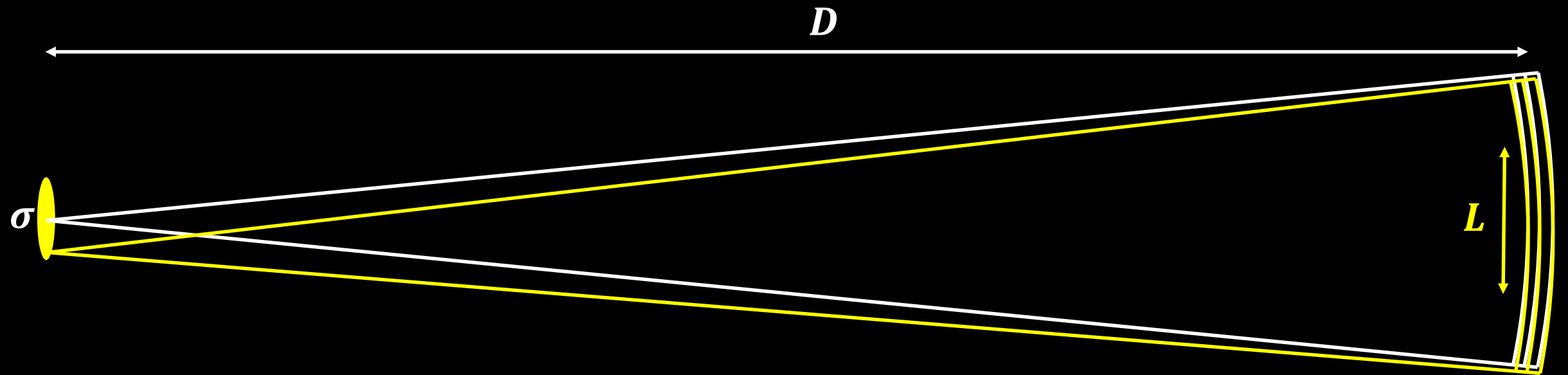
Brillance et Cohérence



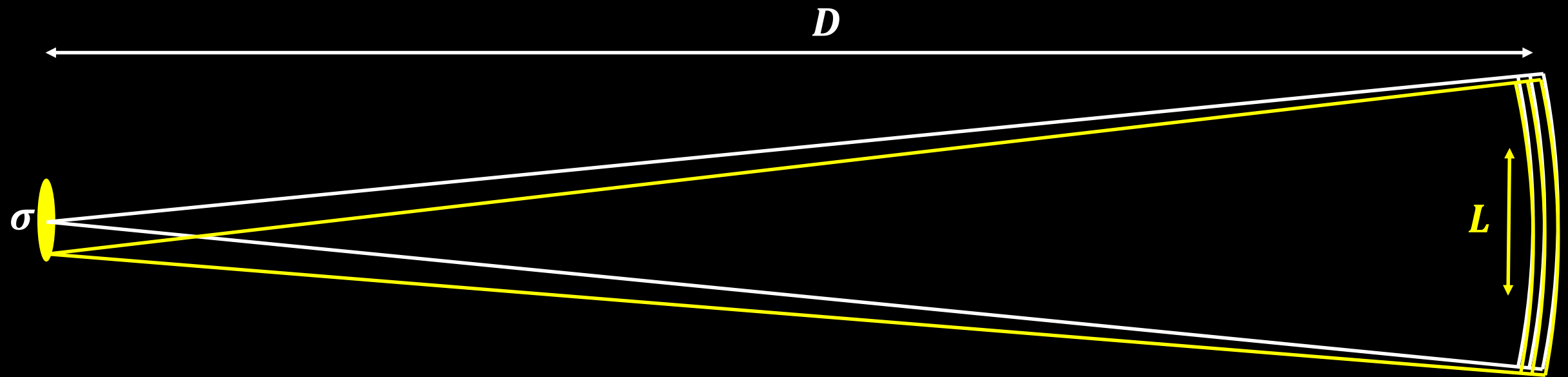
Brillance et Cohérence



Brillance et Cohérence

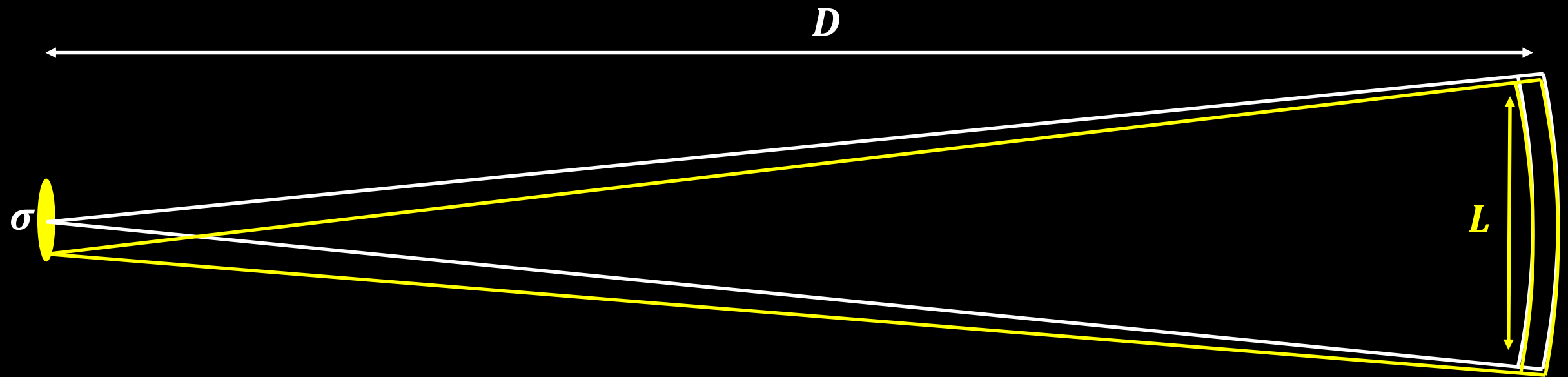


Brillance et Cohérence



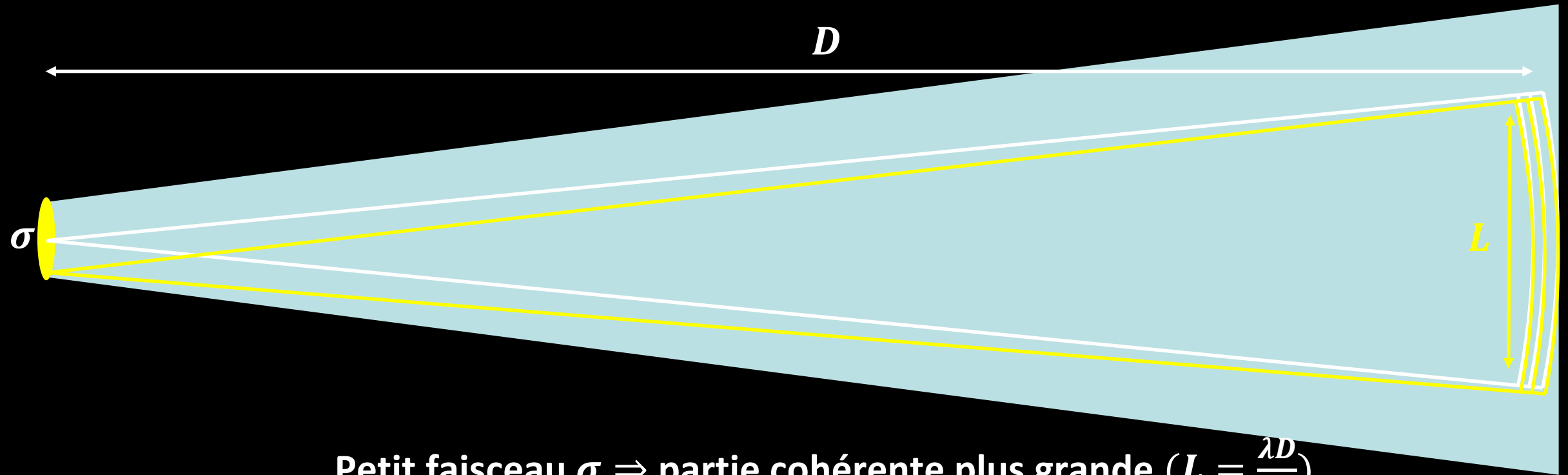
Petit faisceau $\sigma \Rightarrow$ partie cohérente plus grande ($L = \frac{\lambda D}{\sigma}$)

Brillance et Cohérence



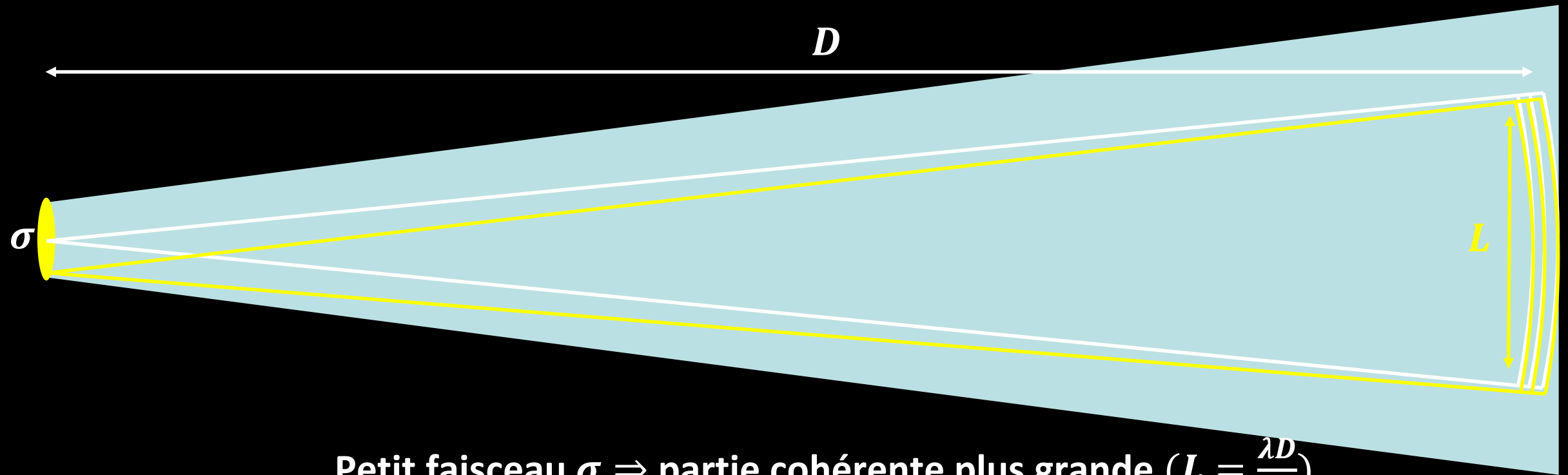
Petit faisceau $\sigma \Rightarrow$ partie cohérente plus grande ($L = \frac{\lambda D}{\sigma}$)

Brillance et Cohérence



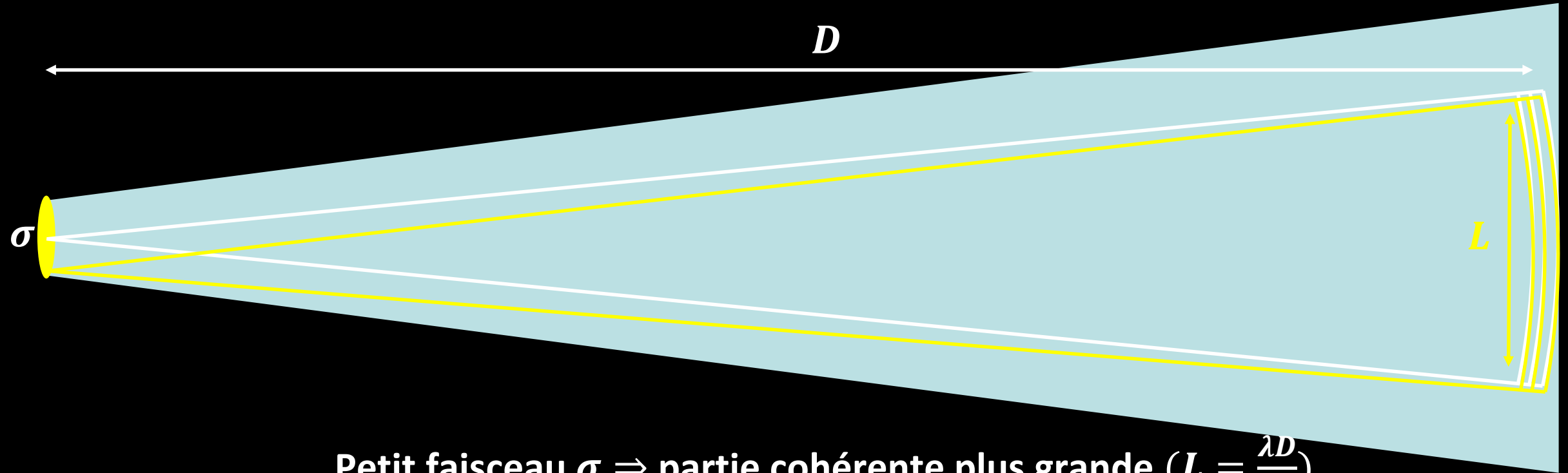
Petit faisceau $\sigma \Rightarrow$ partie cohérente plus grande ($L = \frac{\lambda D}{\sigma}$)

Brillance et Cohérence



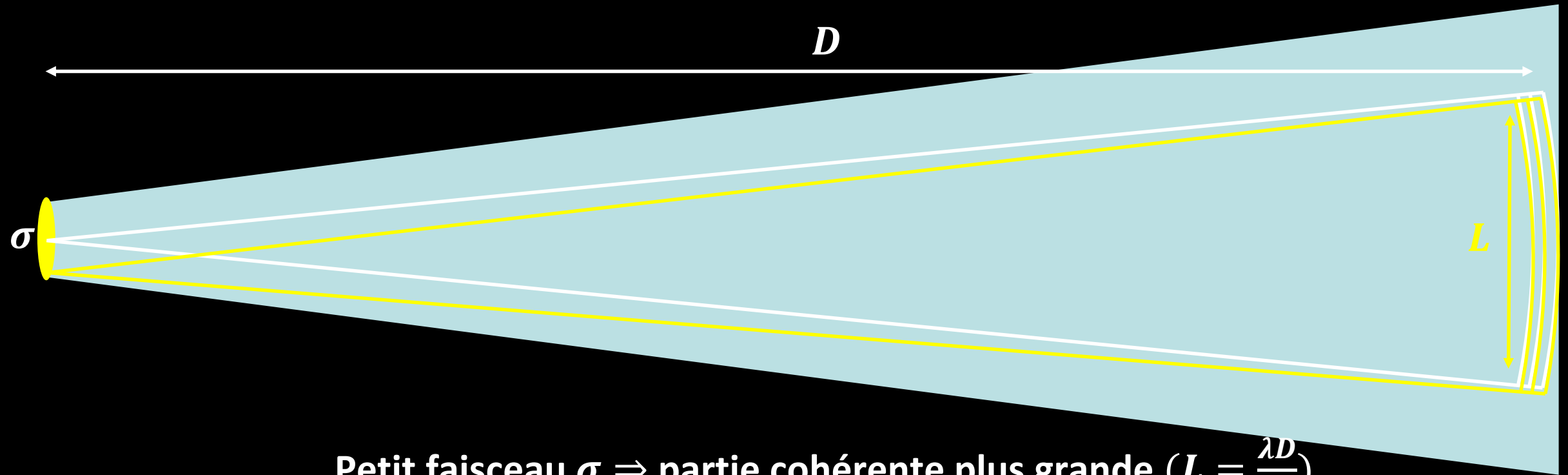
Petit faisceau $\sigma \Rightarrow$ partie cohérente plus grande ($L = \frac{\lambda D}{\sigma}$)
Petite divergence $\sigma' \Rightarrow$ plus de flux dans la partie cohérente

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 $\sigma\sigma' = \frac{\lambda}{4\pi}$

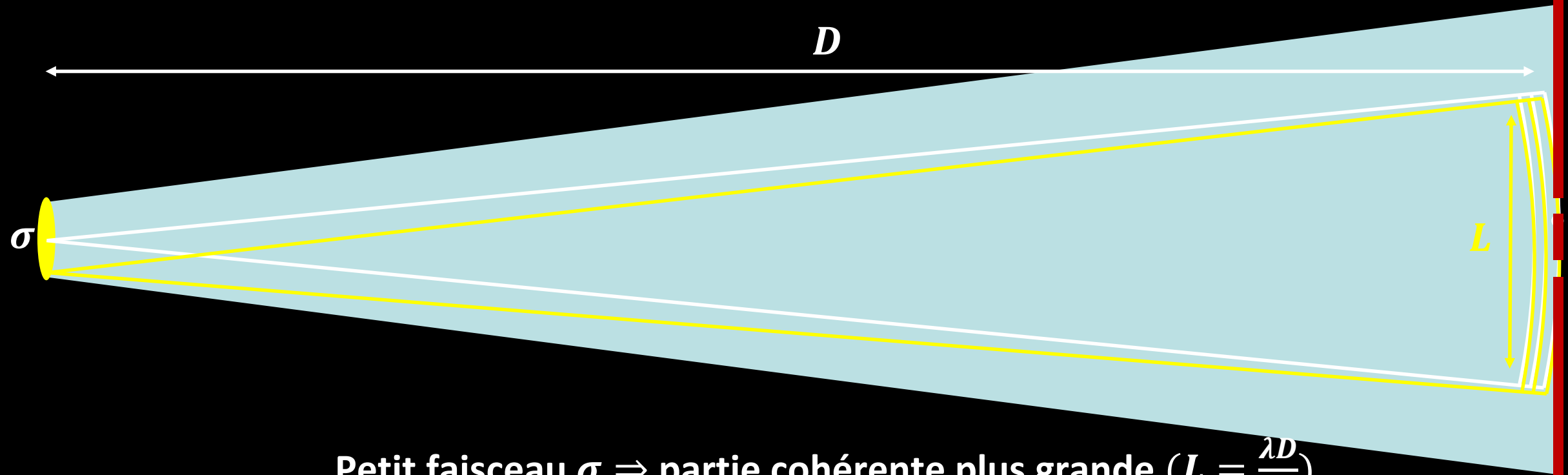
Brillance et Cohérence



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



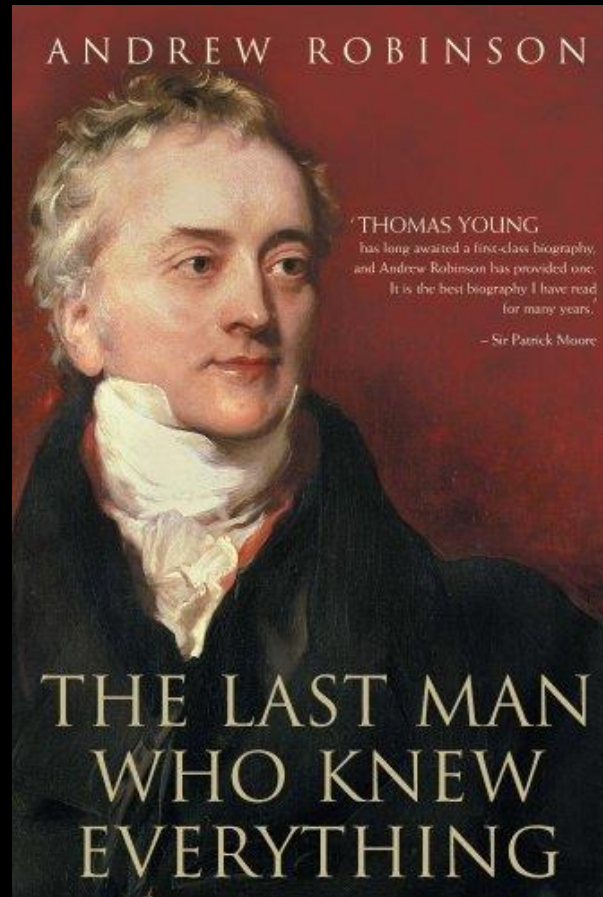
Petit faisceau $\sigma \Rightarrow$ partie cohérente plus grande ($L = \frac{\lambda D}{\sigma}$)
Petite divergence $\sigma' \Rightarrow$ plus de flux dans la partie cohérente
Limite de diffraction $\sigma\sigma' = \frac{\lambda}{4\pi}$

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

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

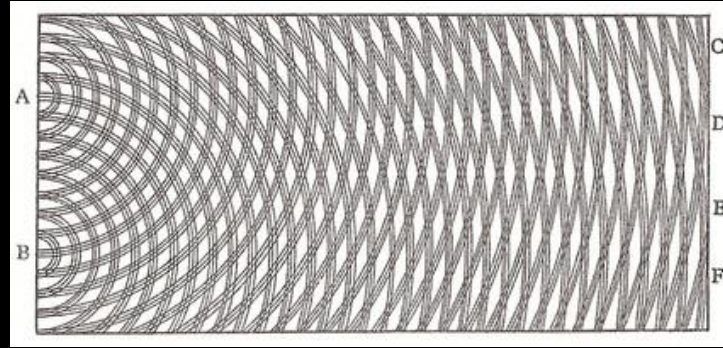
1801 : Thomas Young découvre les interférences

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)



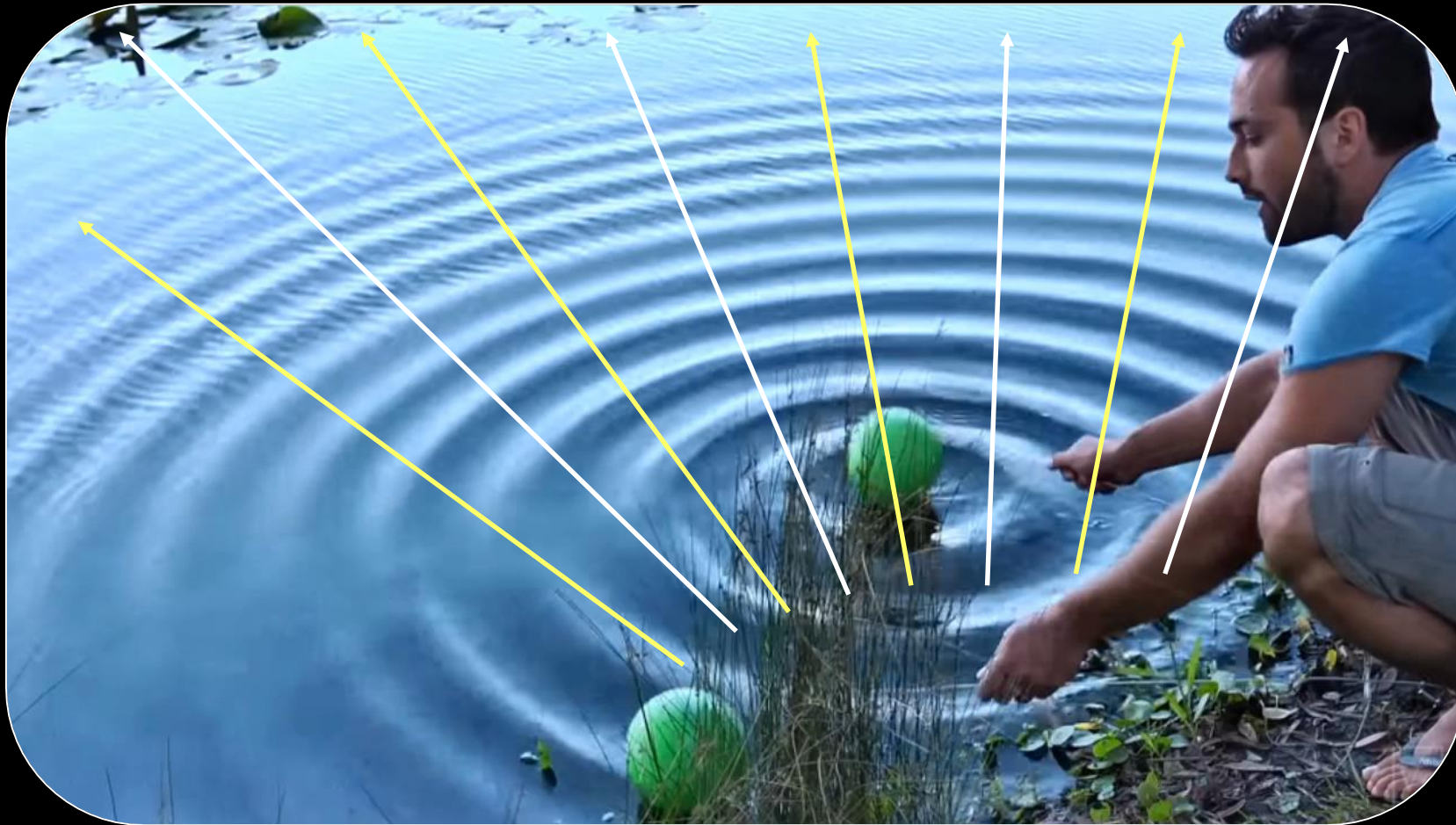
1801 : Thomas Young découvre les interférences

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

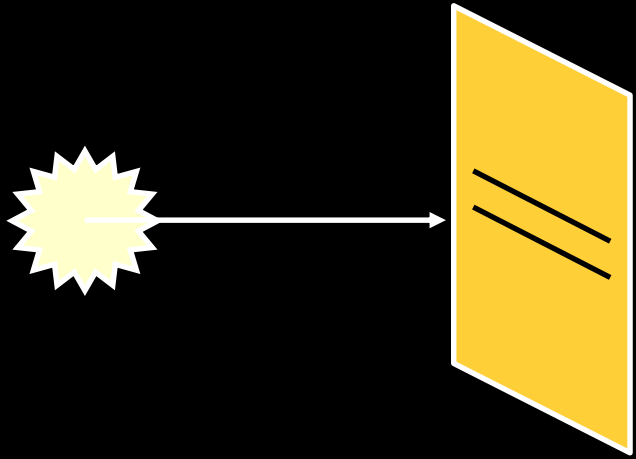


1801 : Thomas Young découvre les interférences

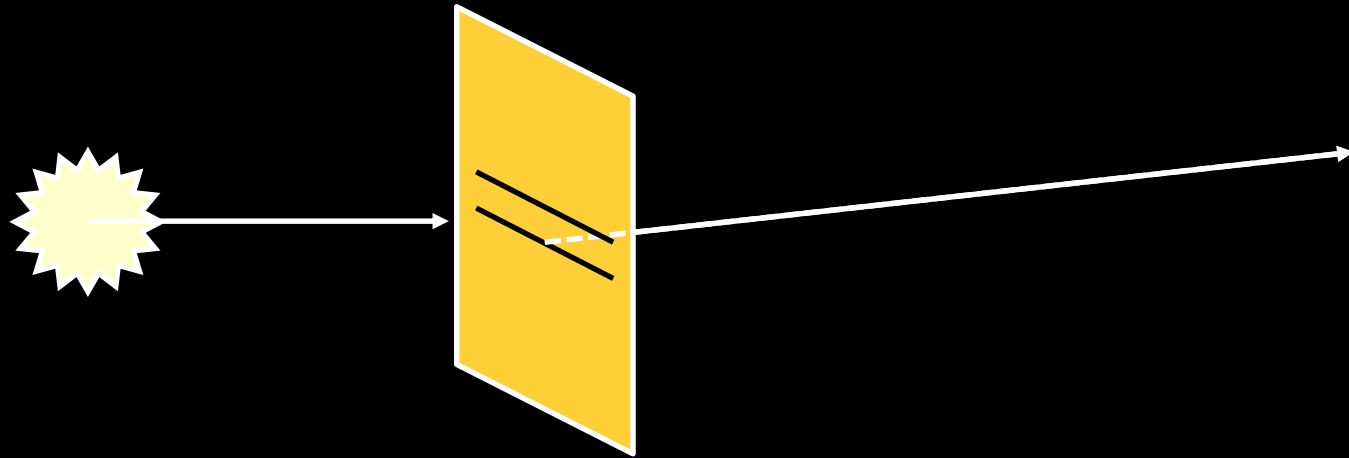
En 1802, il démontre les effets d'interférence grâce à sa
Cuve à ondes (ripple tank)



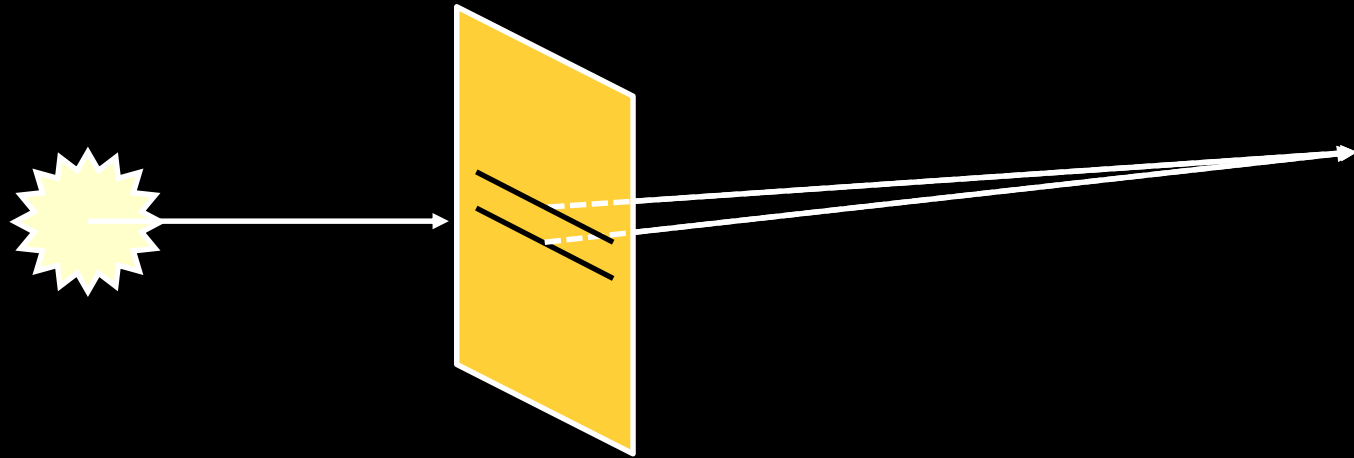
L'expérience des trous d'Young



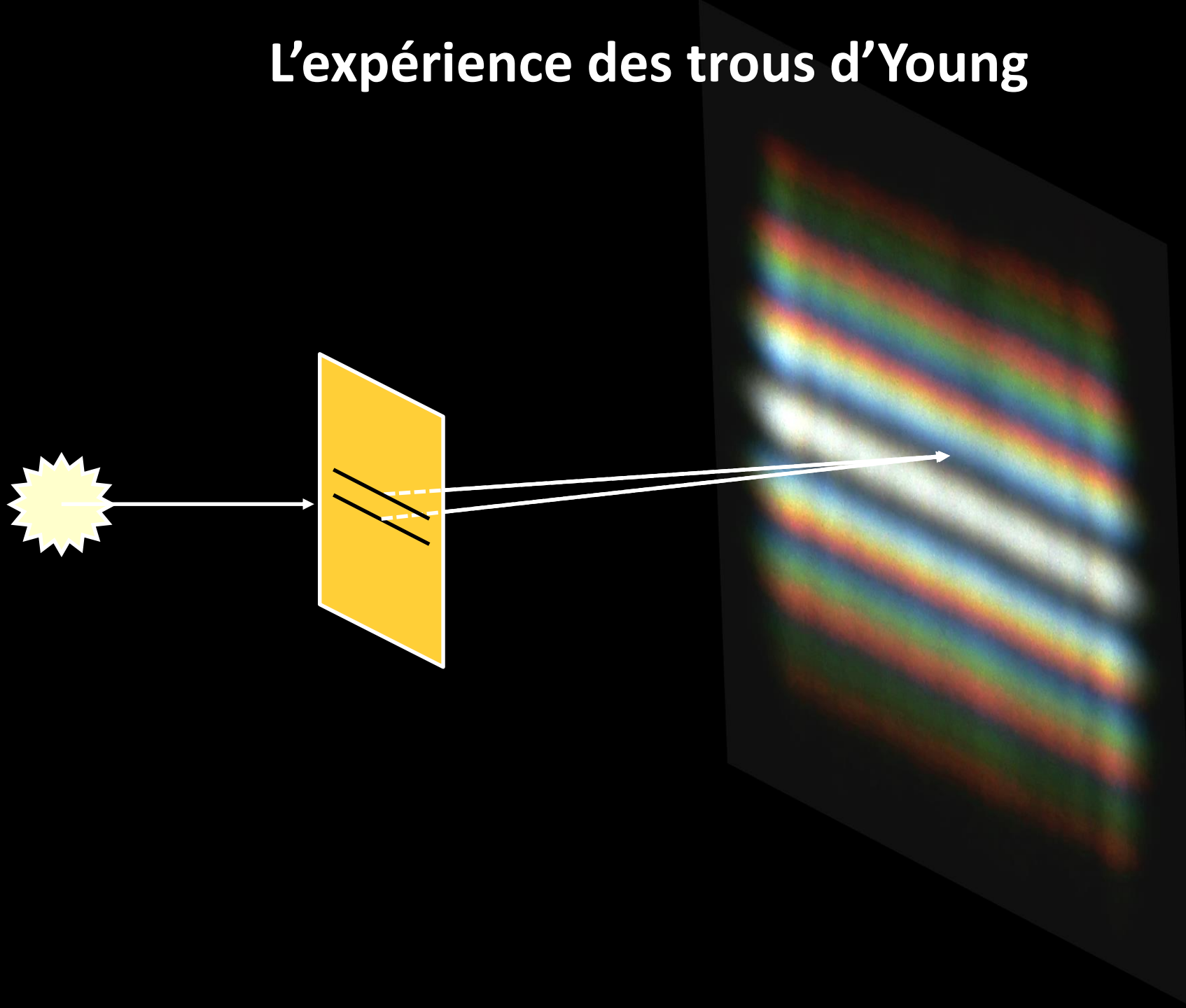
L'expérience des trous d'Young



L'expérience des trous d'Young

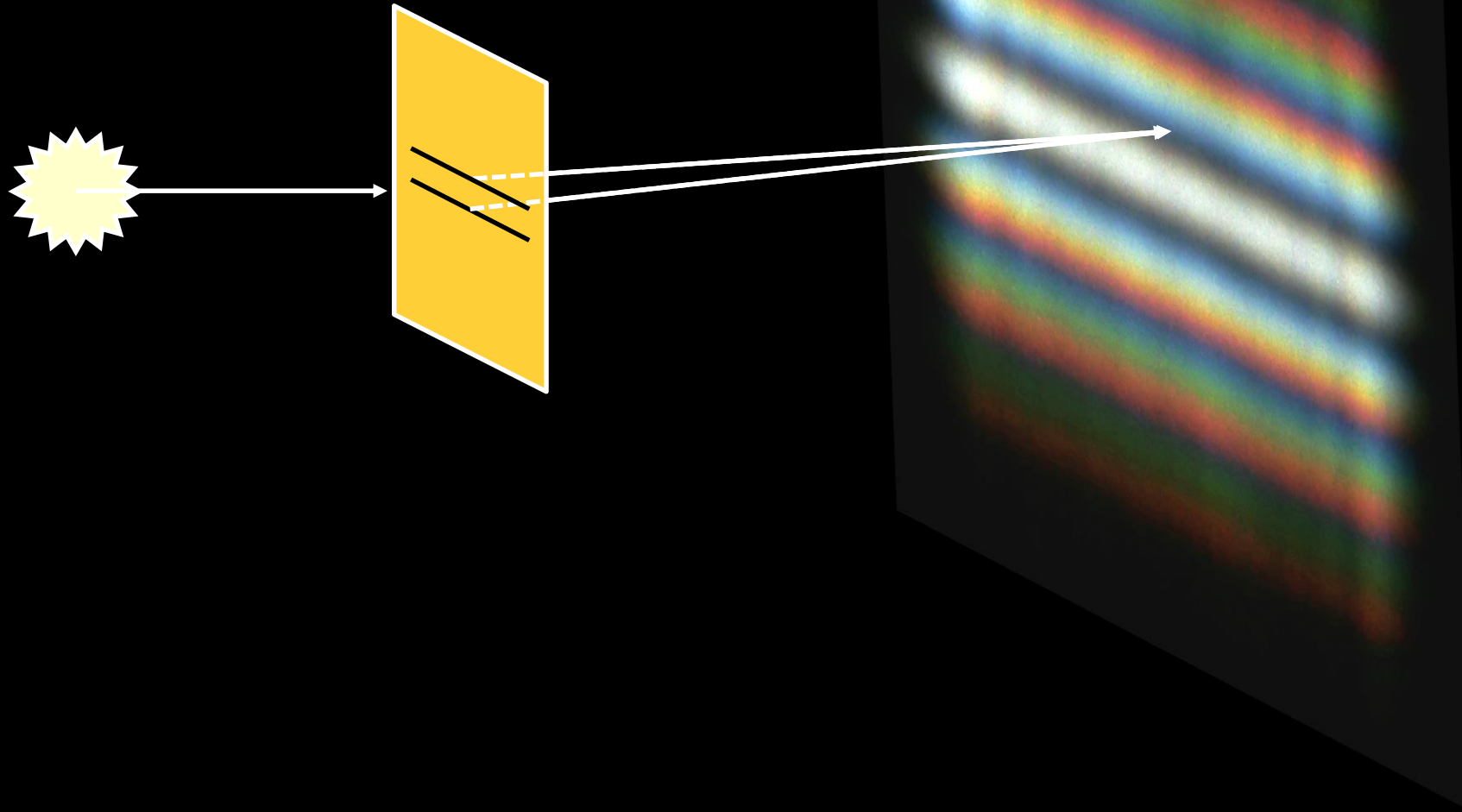


L'expérience des trous d'Young



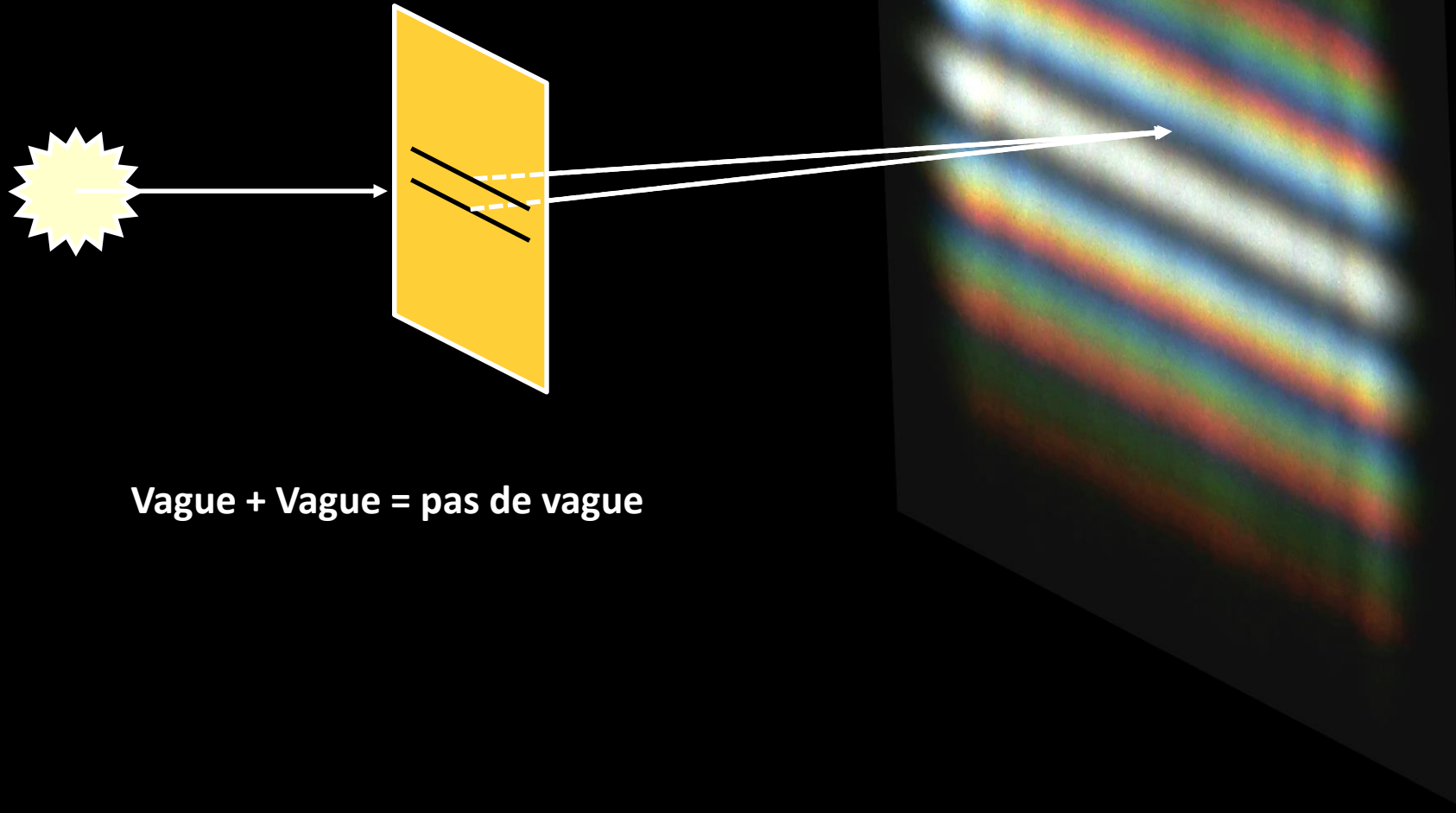
L'expérience des trous d'Young

Lumière + lumière = pas de lumière



L'expérience des trous d'Young

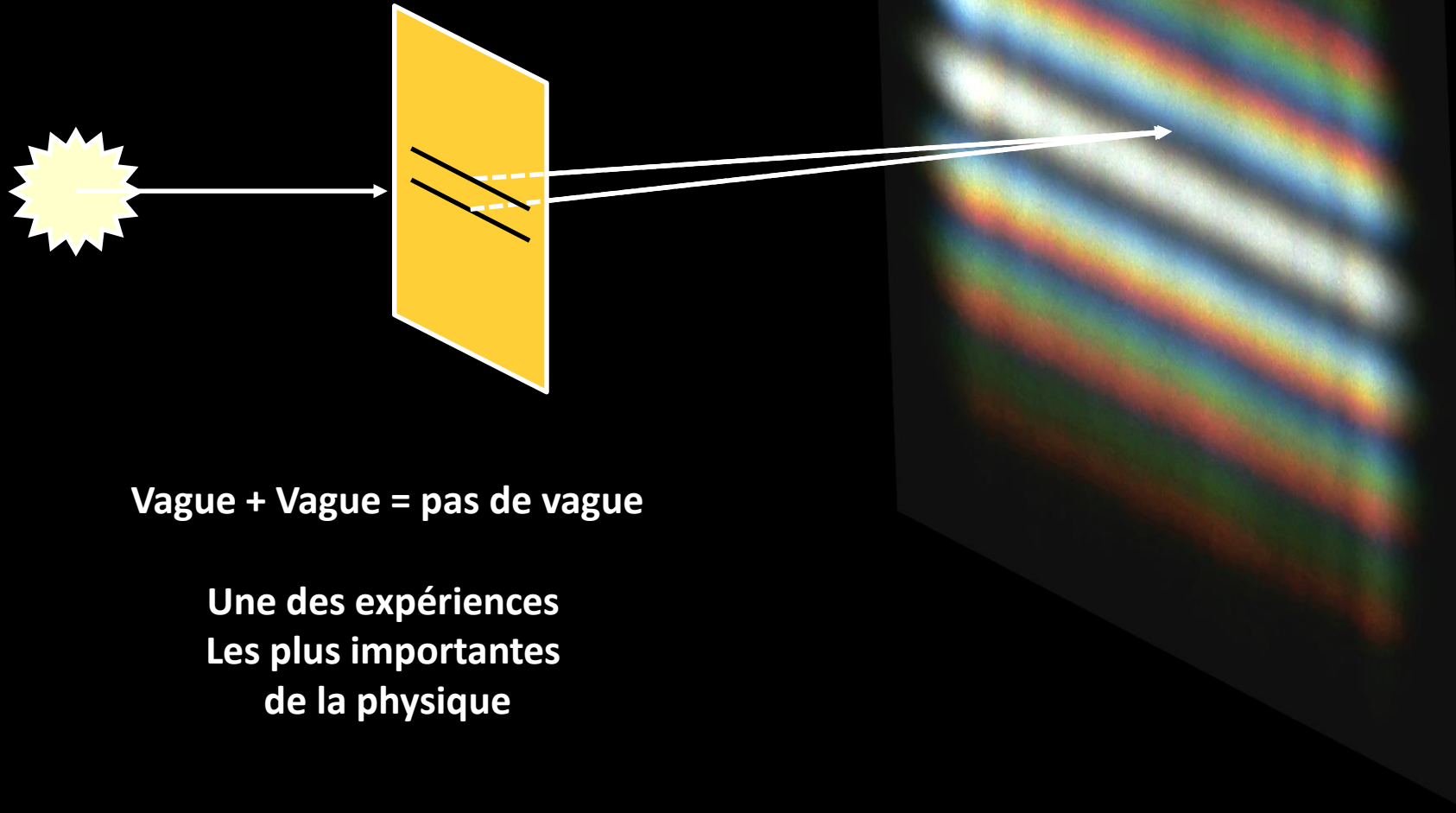
Lumière + lumière = pas de lumière



Vague + Vague = pas de vague

L'expérience des trous d'Young

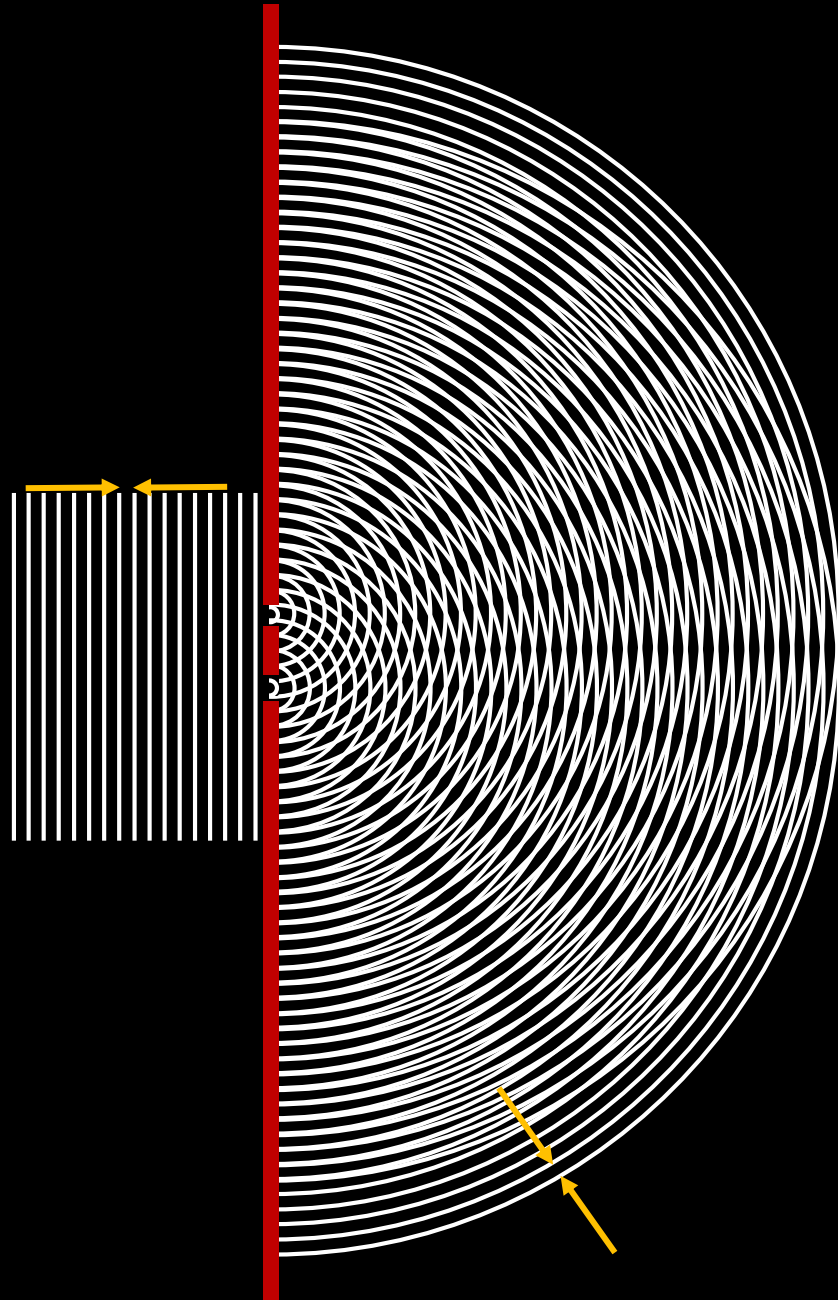
Lumière + lumière = pas de lumière



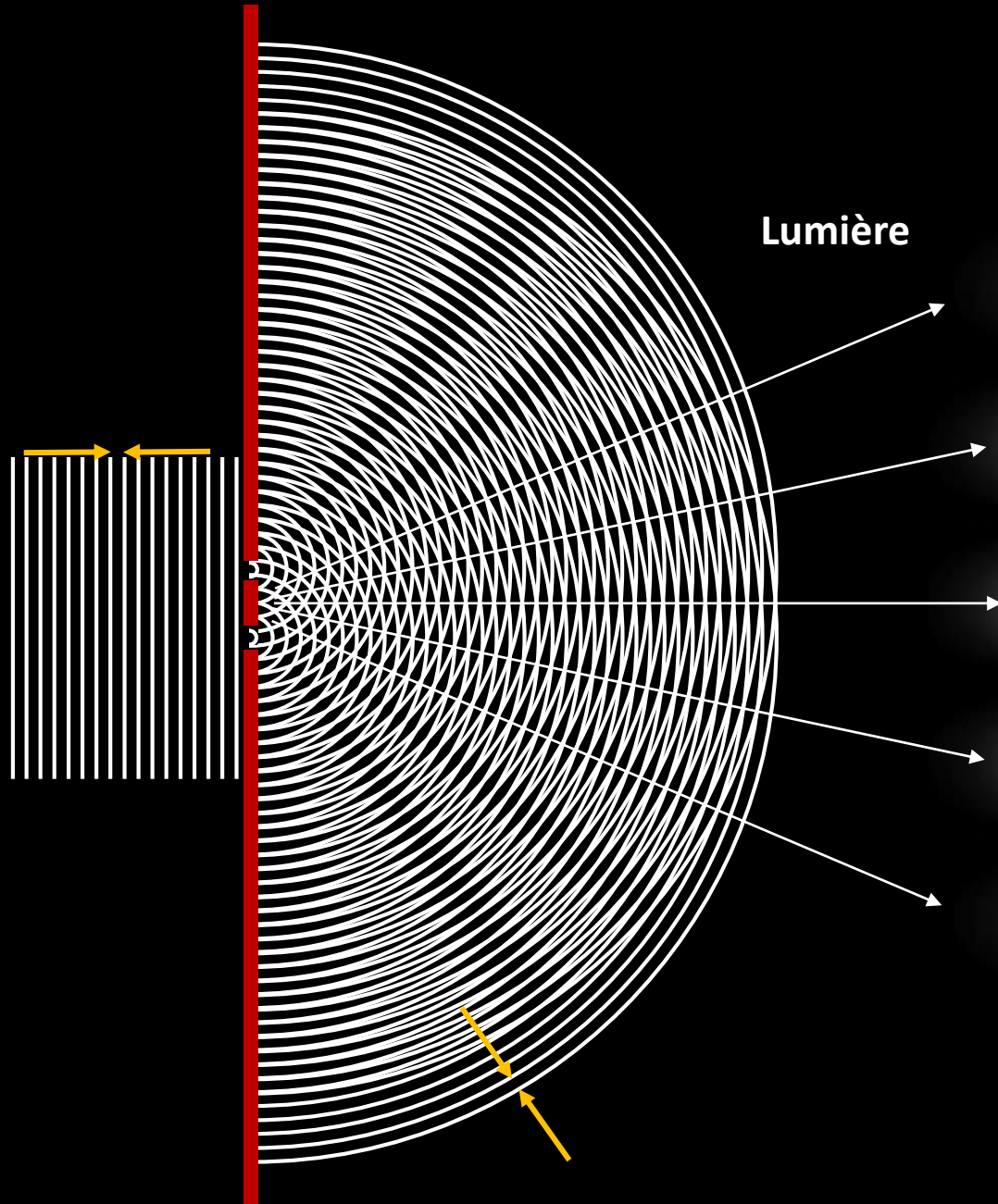
Vague + Vague = pas de vague

Une des expériences
Les plus importantes
de la physique

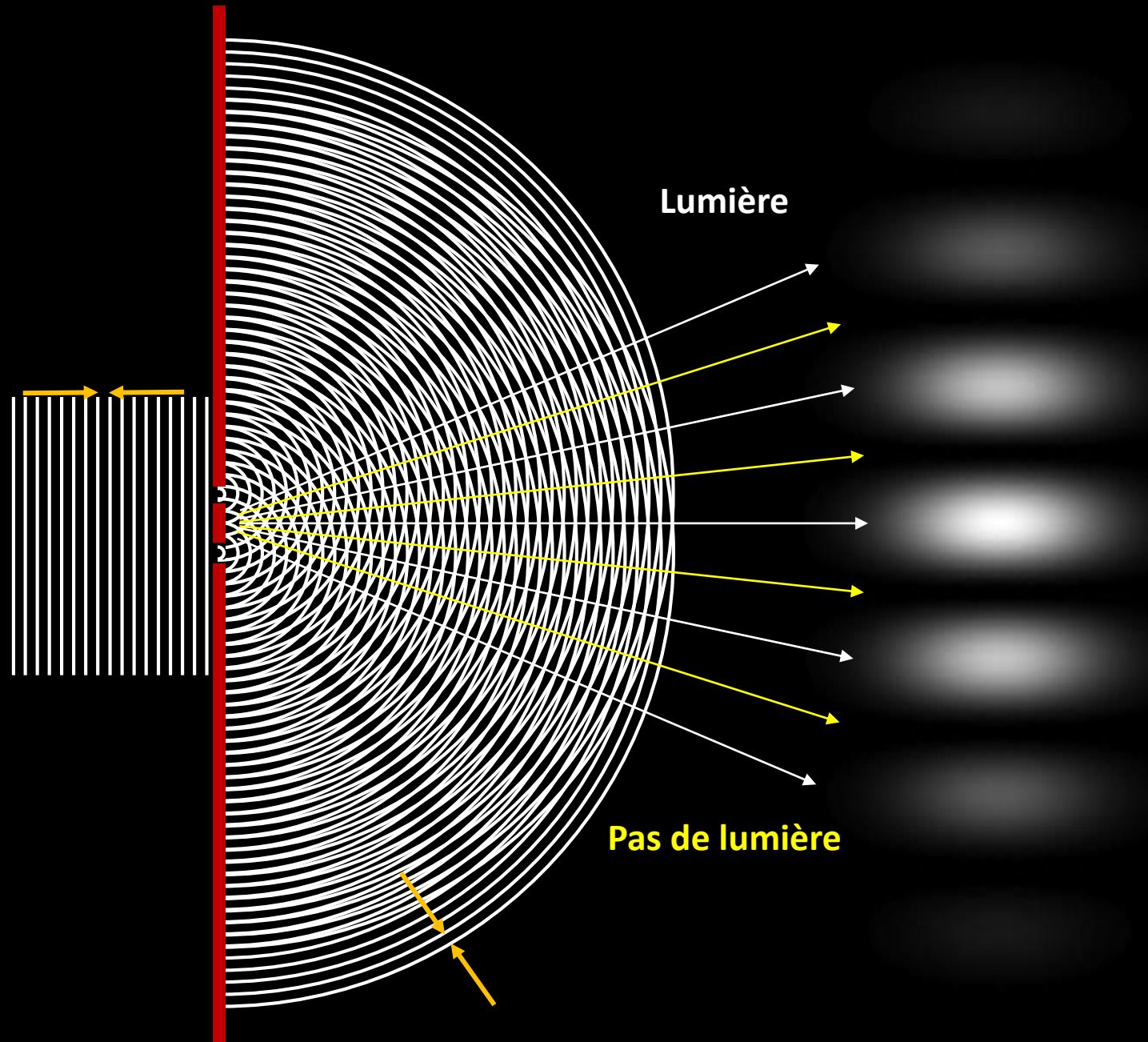
Principe d'interférence (1803)



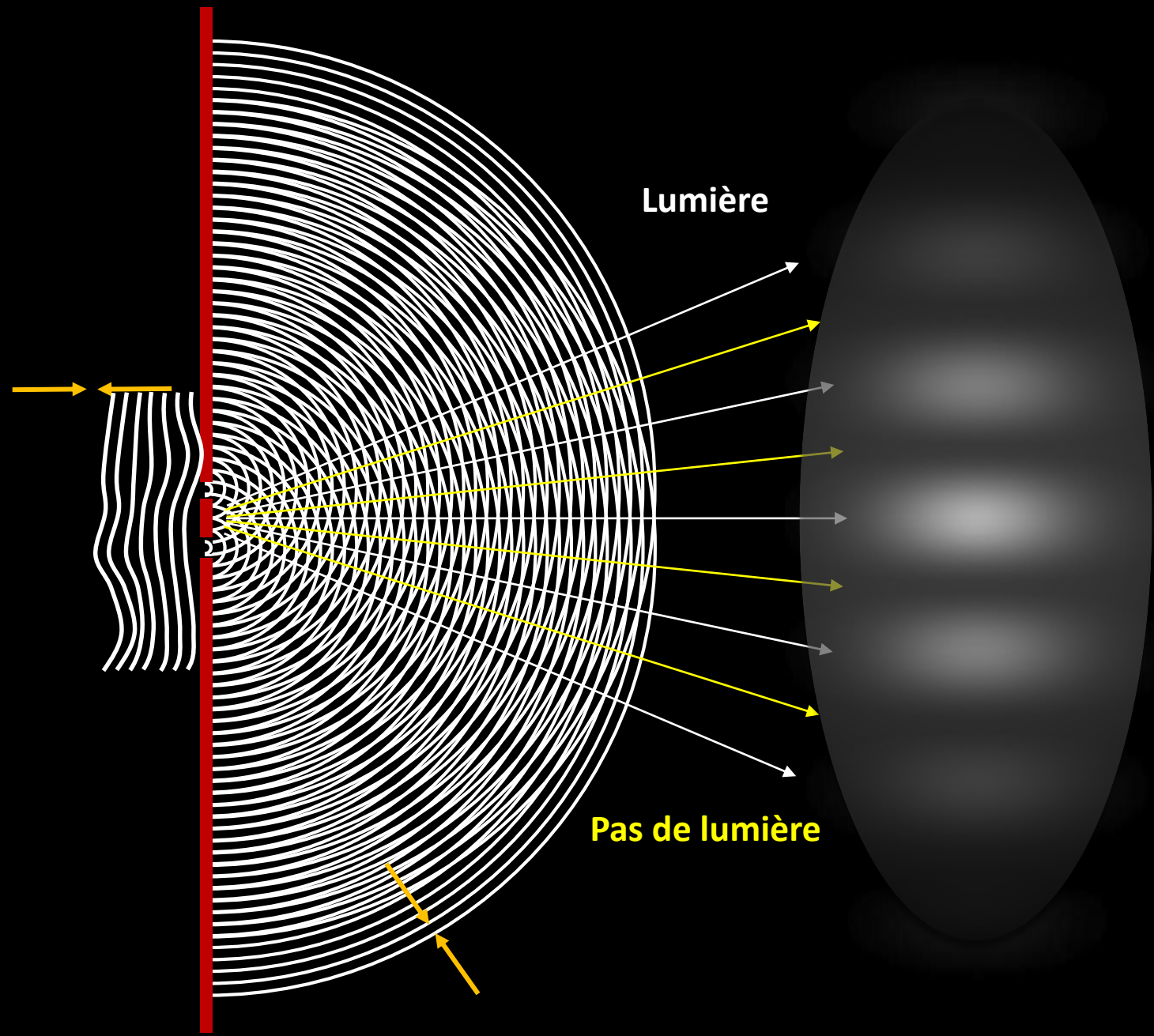
Principe d'interférence (1803)



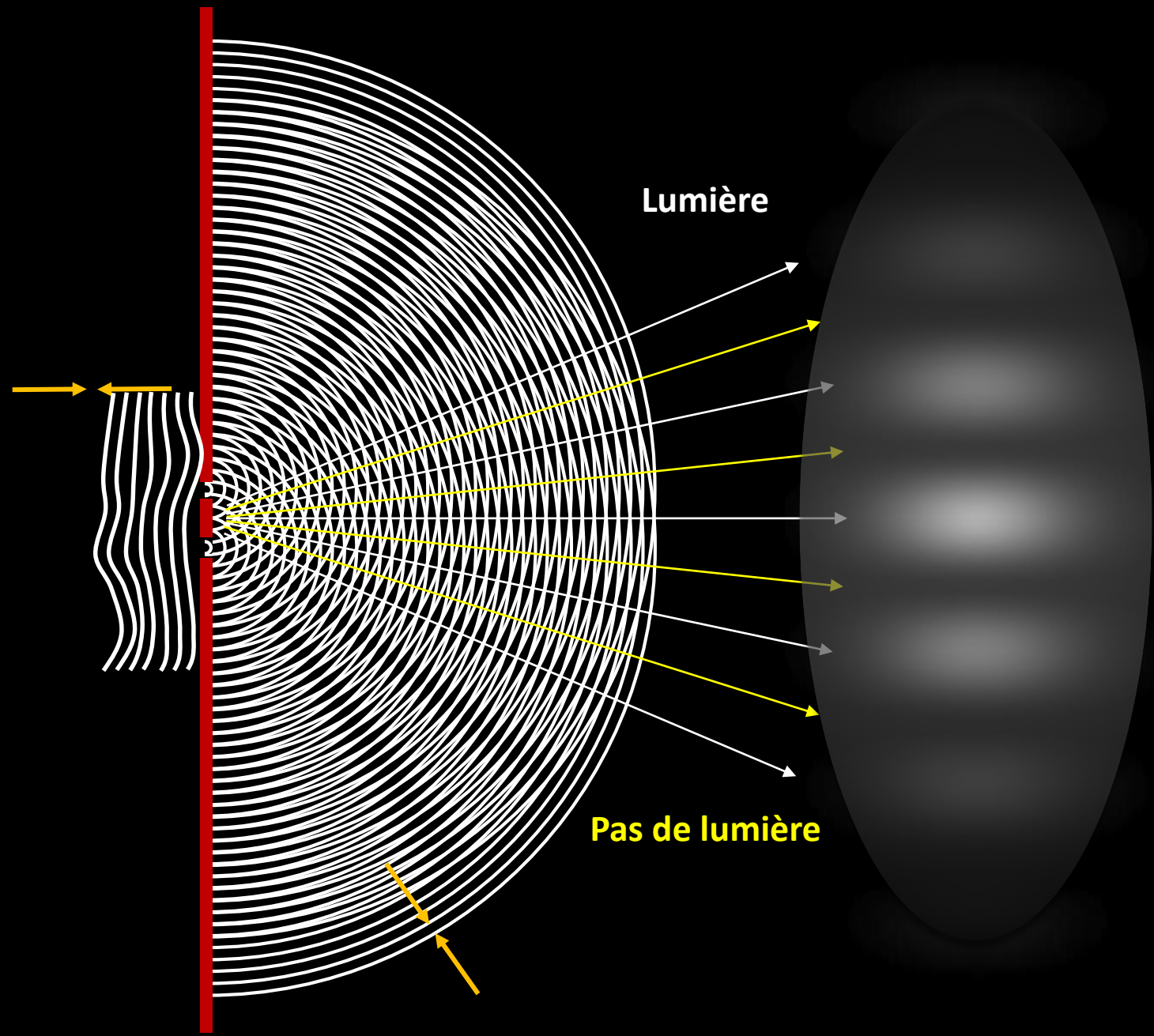
Principe d'interférence (1803)



Principe d'interférence (1803)



Principe d'interférence (1803)

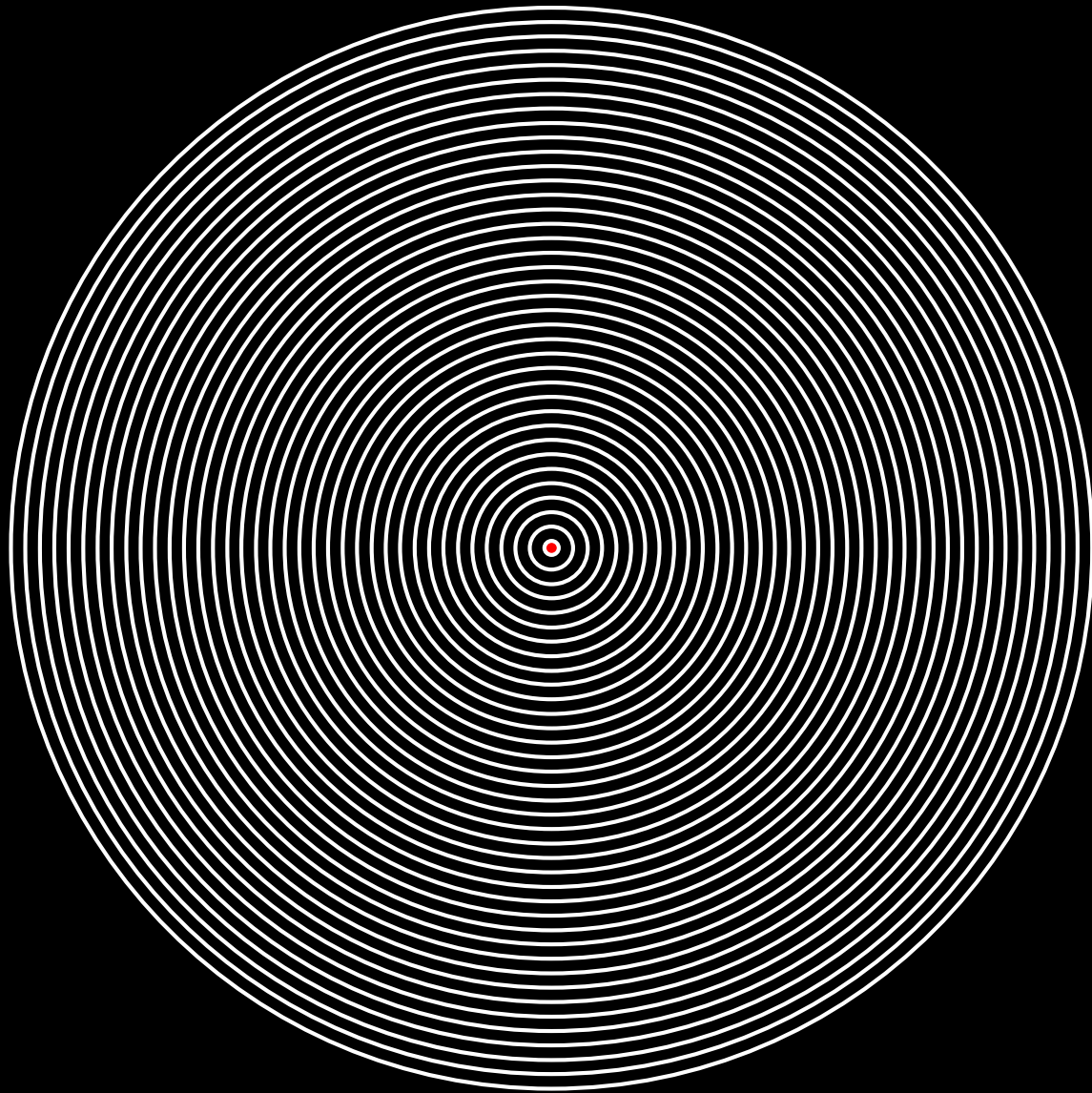


**Contraste de frange
(Visibilité)
cohérence de l'onde
Taille de la source**

Interférométrie

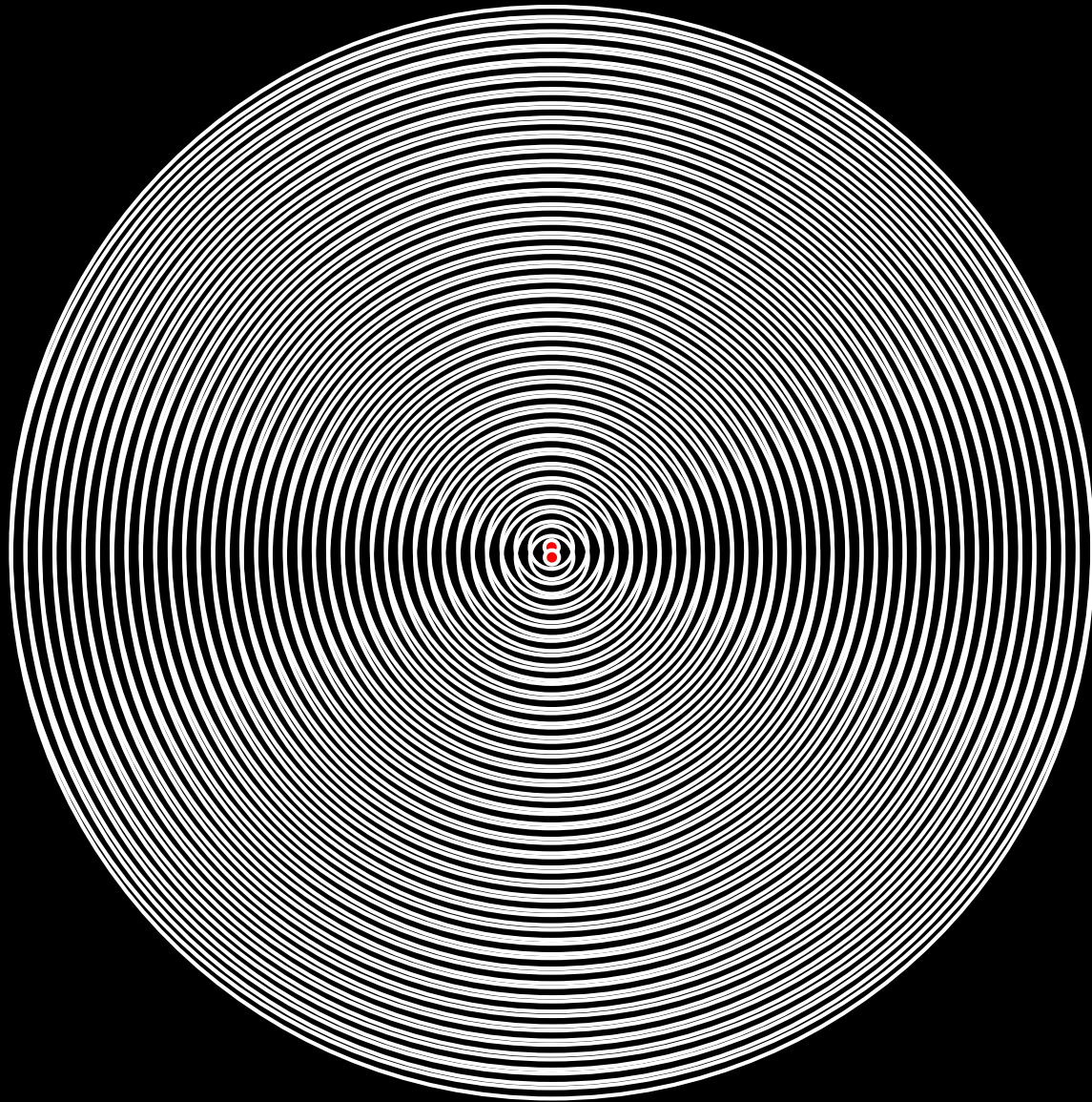
Diffraction : principe

Interférence (1803)



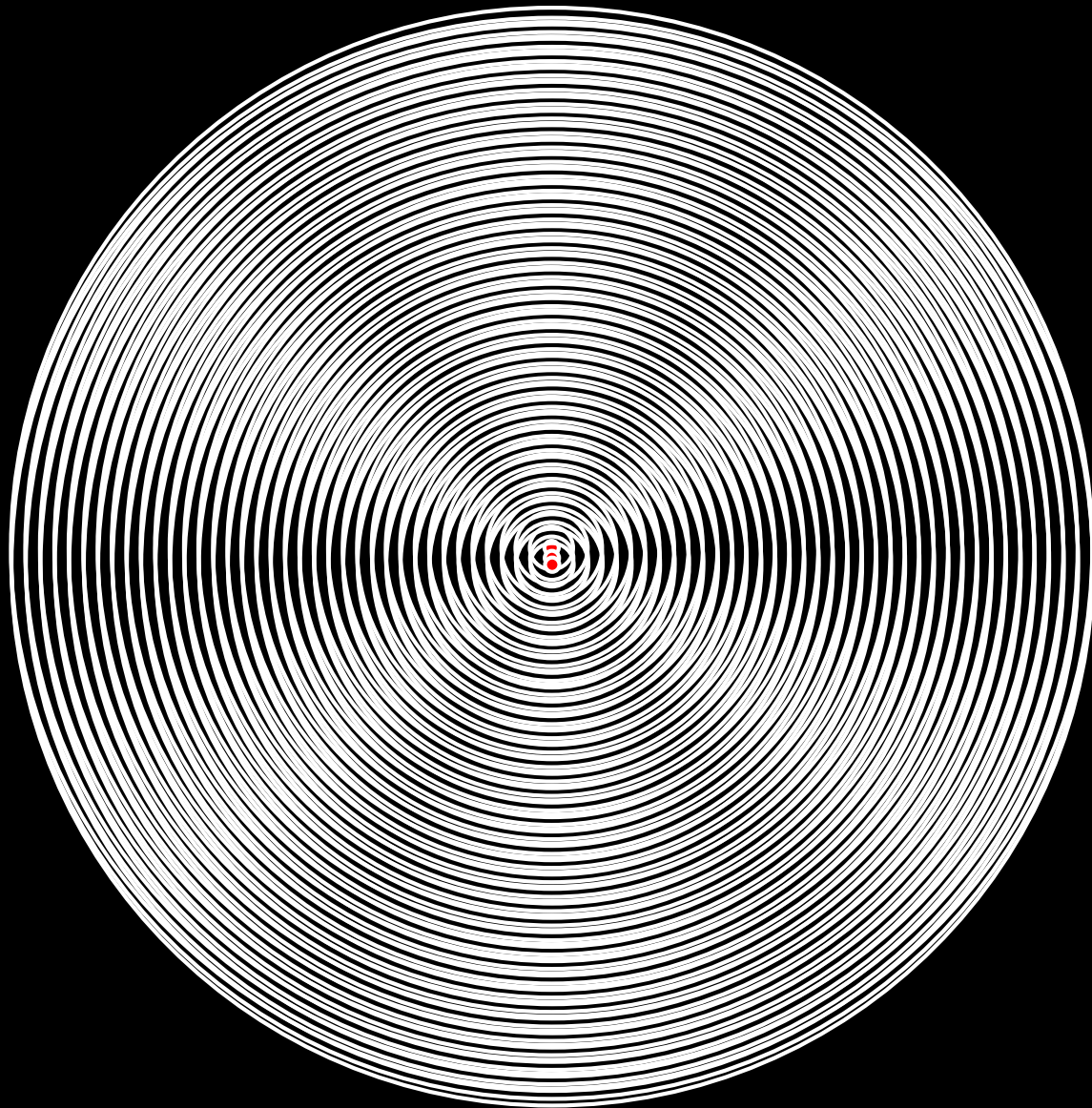
Diffraction : principe

Interférence (1803)



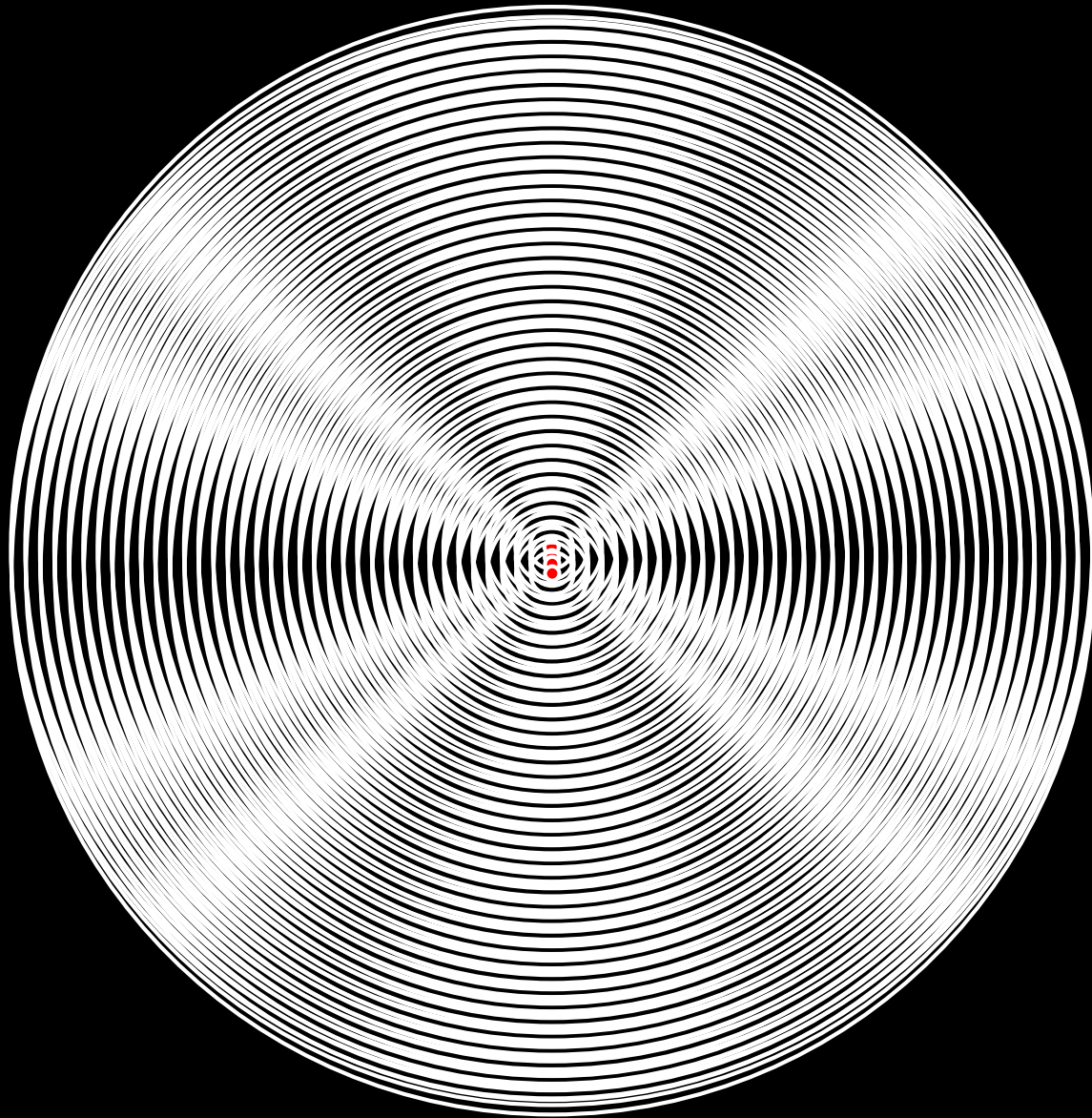
Diffraction : principe

Interférence (1803)



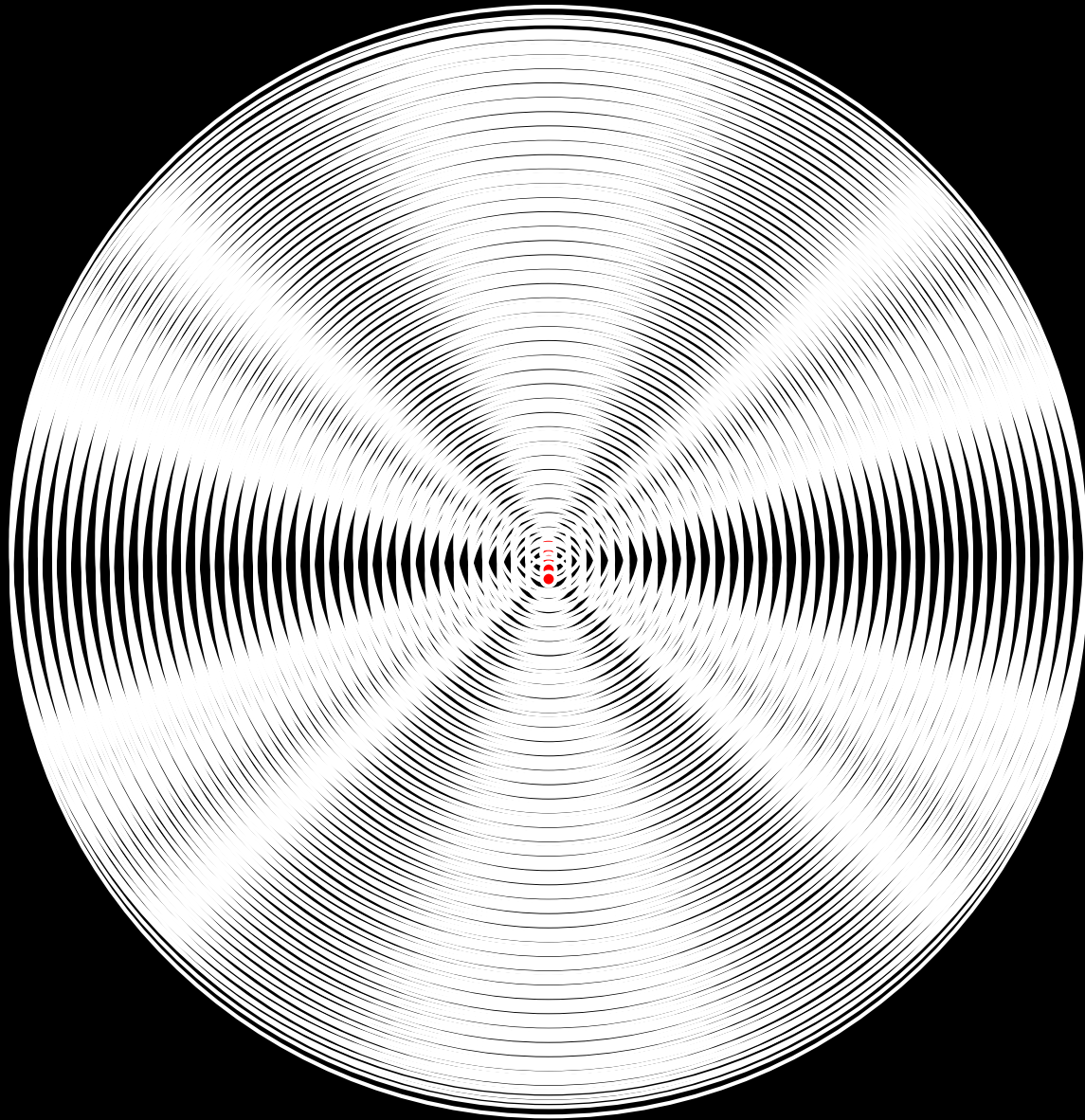
Diffraction : principe

Interférence (1803)



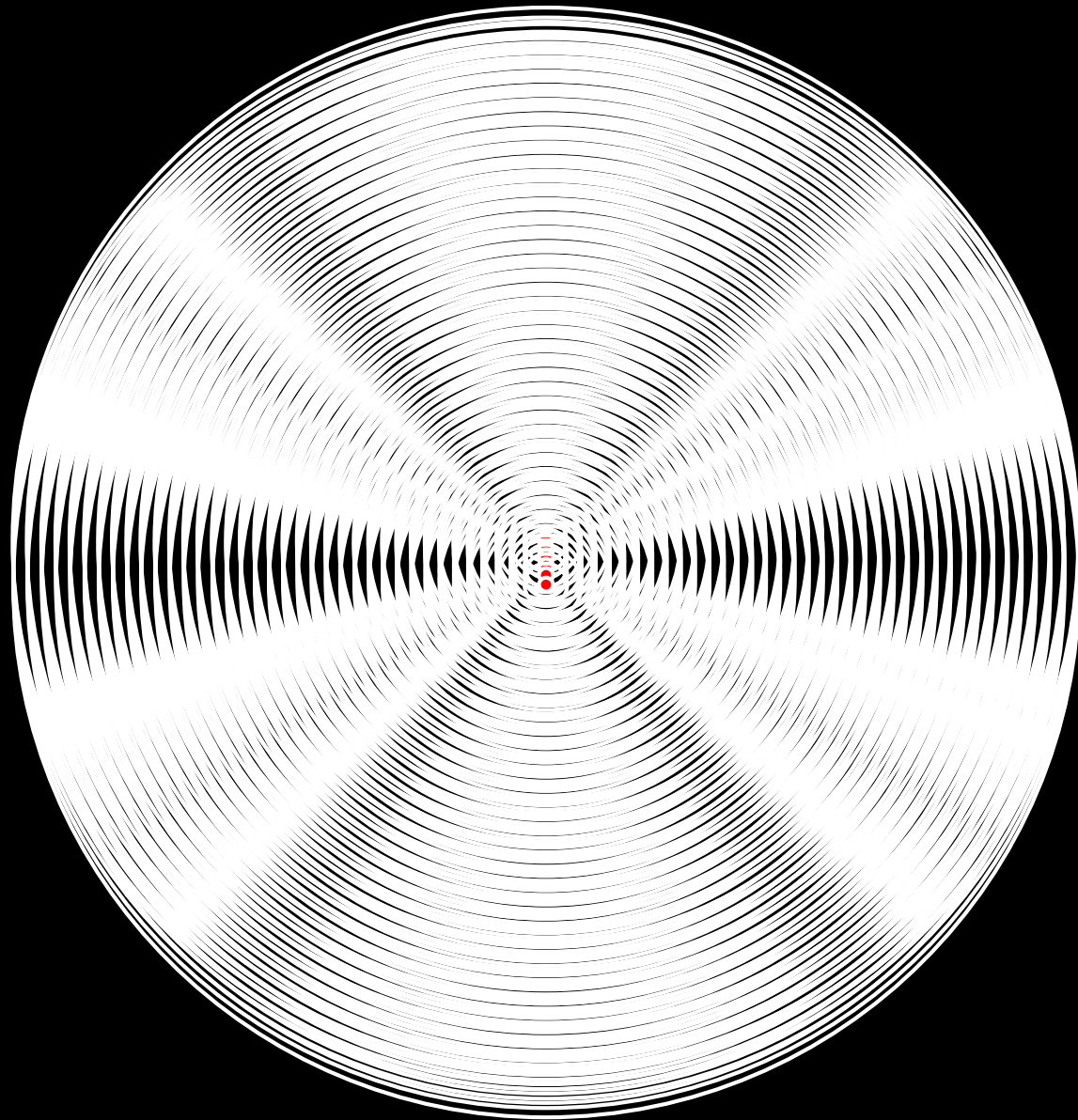
Diffraction : principe

Interférence (1803)



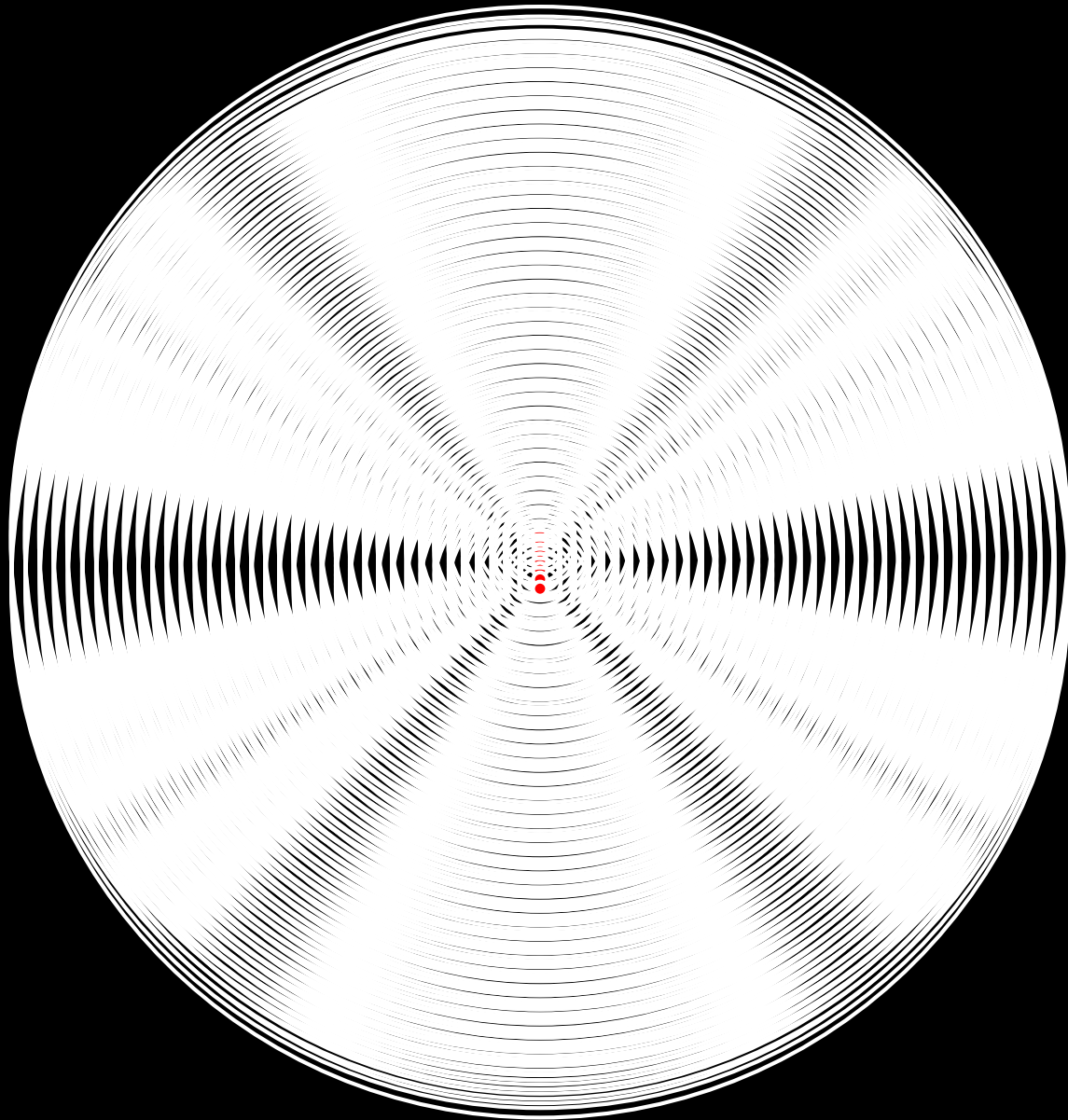
Diffraction : principe

Interférence (1803)



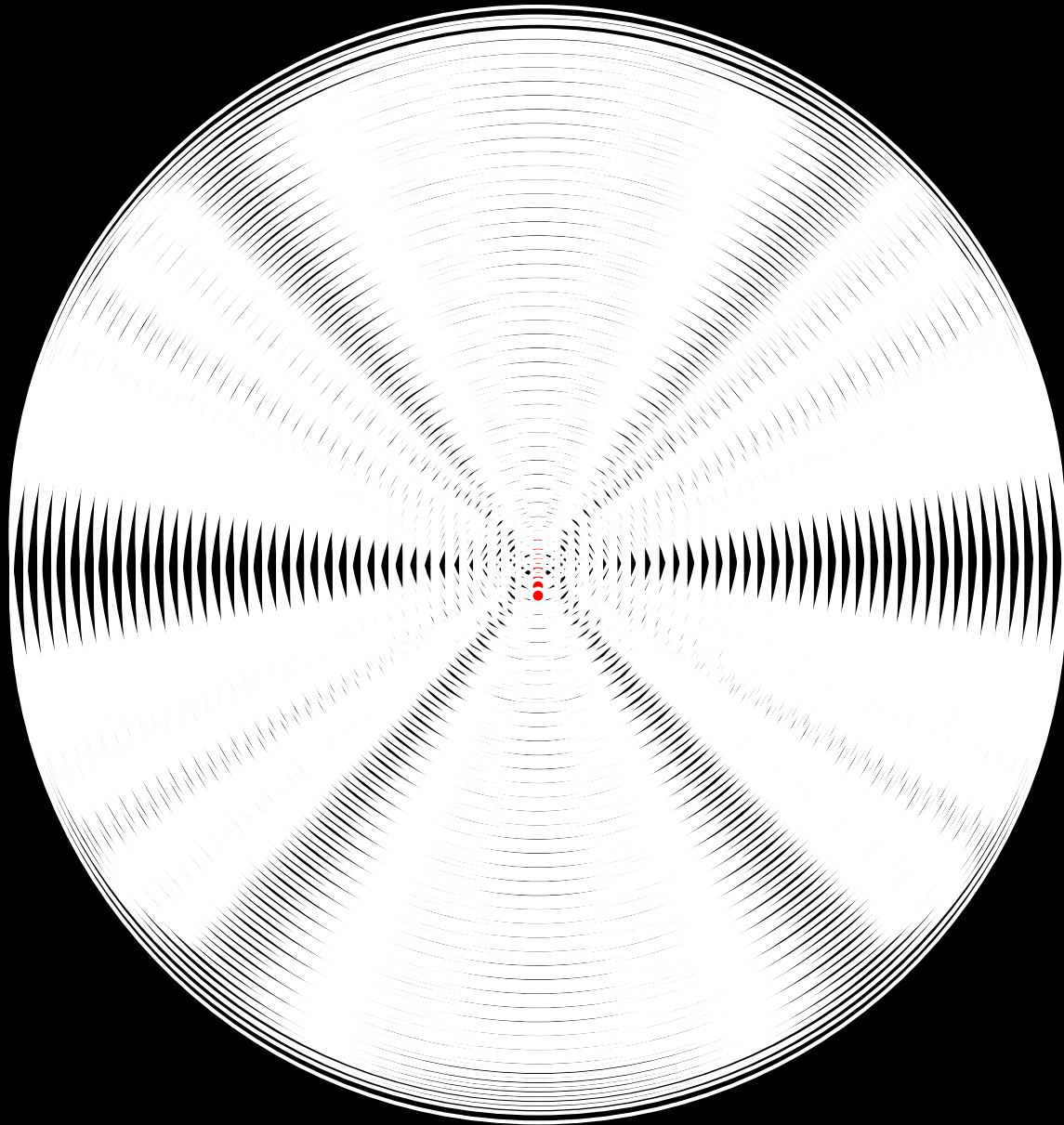
Diffraction : principe

Interférence (1803)



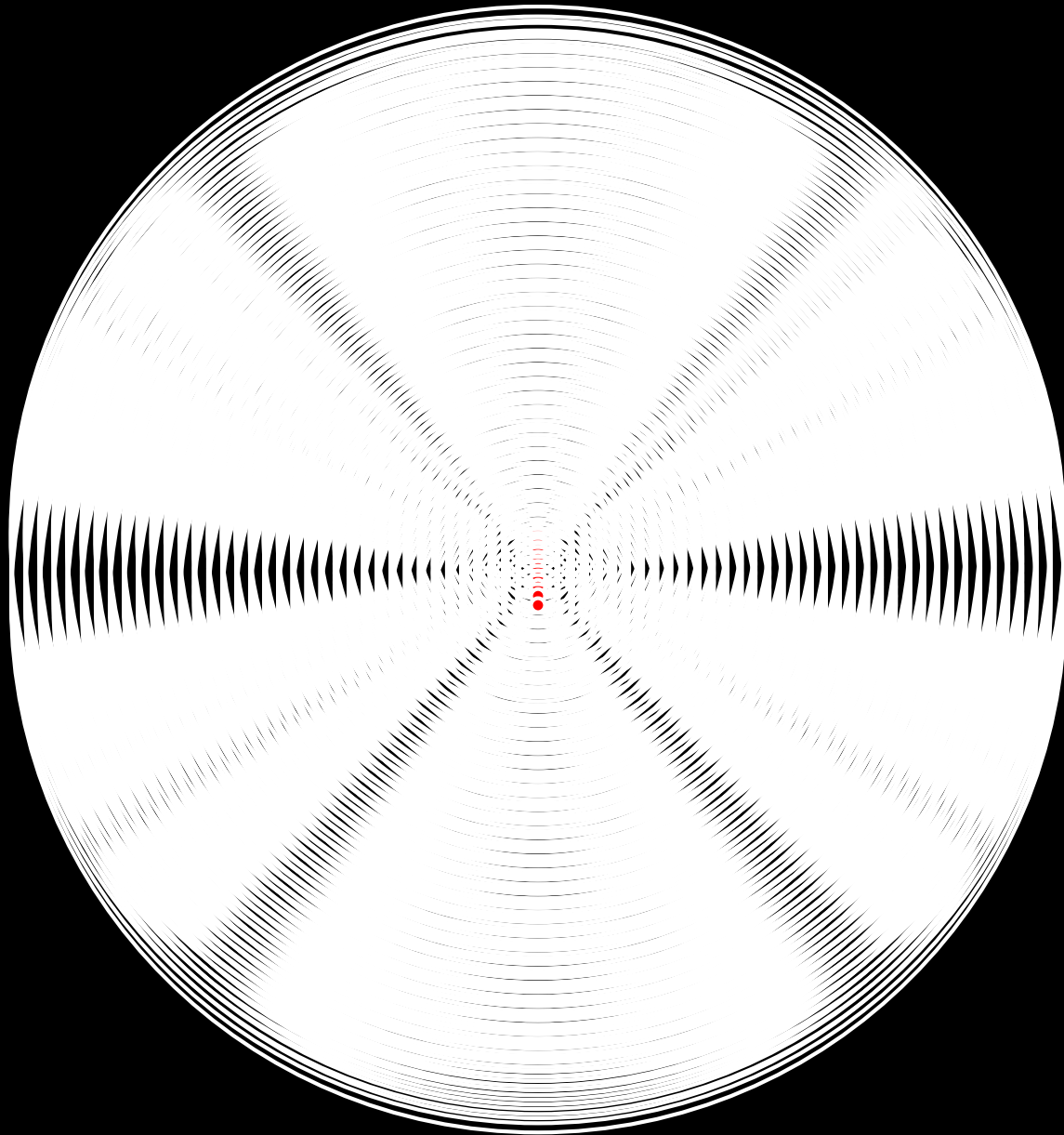
Diffraction : principe

Interférence (1803)



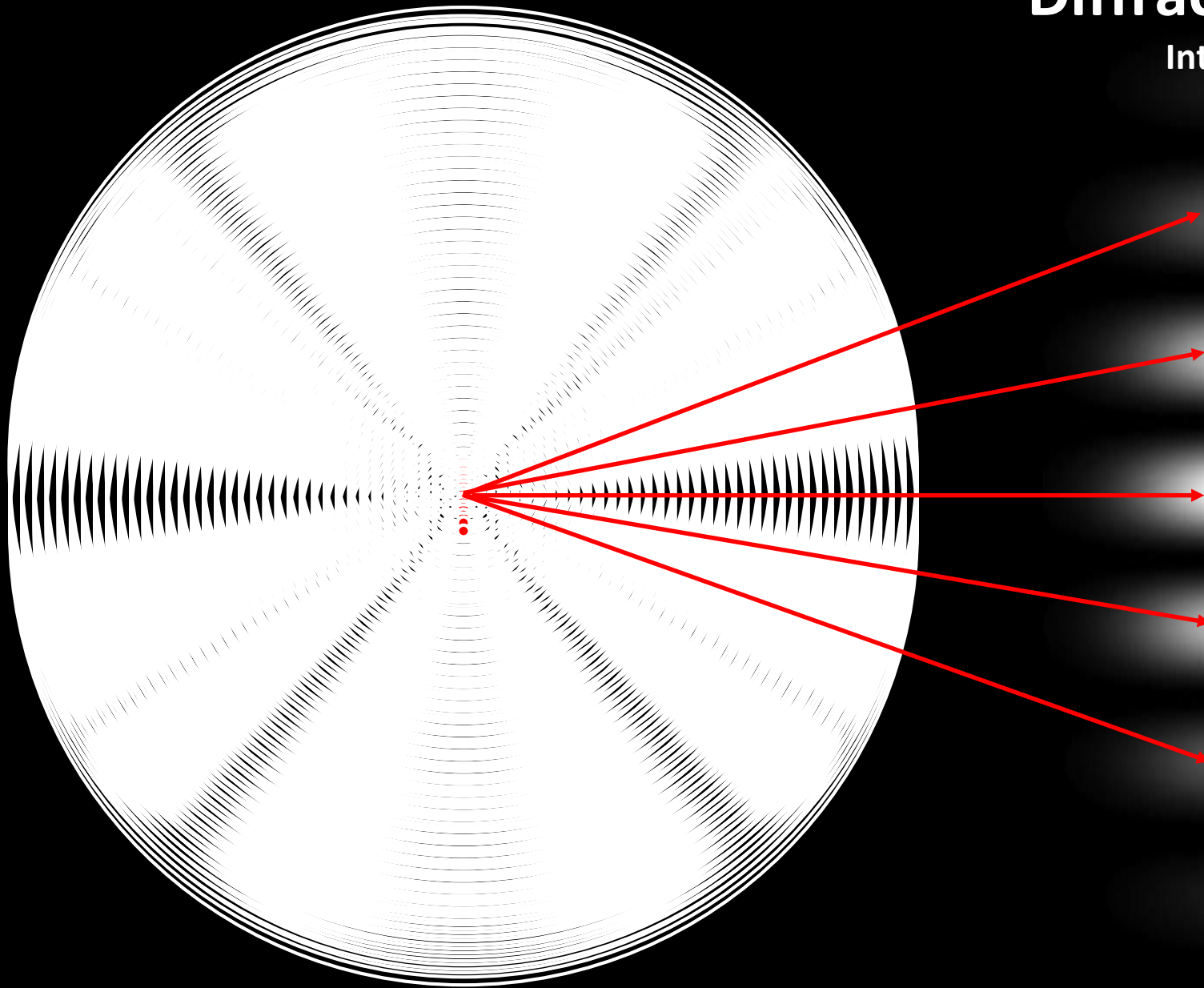
Diffraction : principe

Interférence (1803)



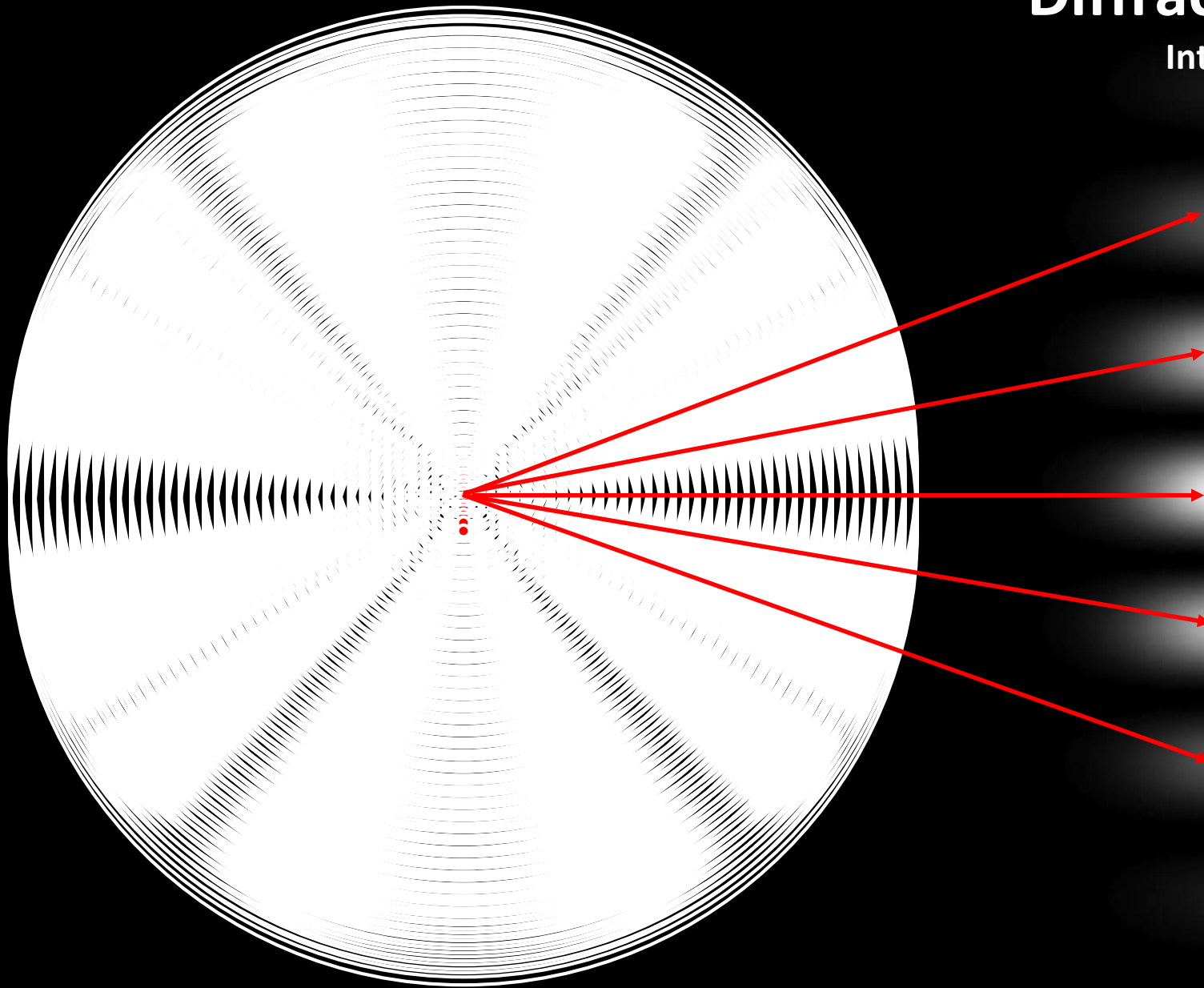
Diffraction : principe

Interférence (1803)



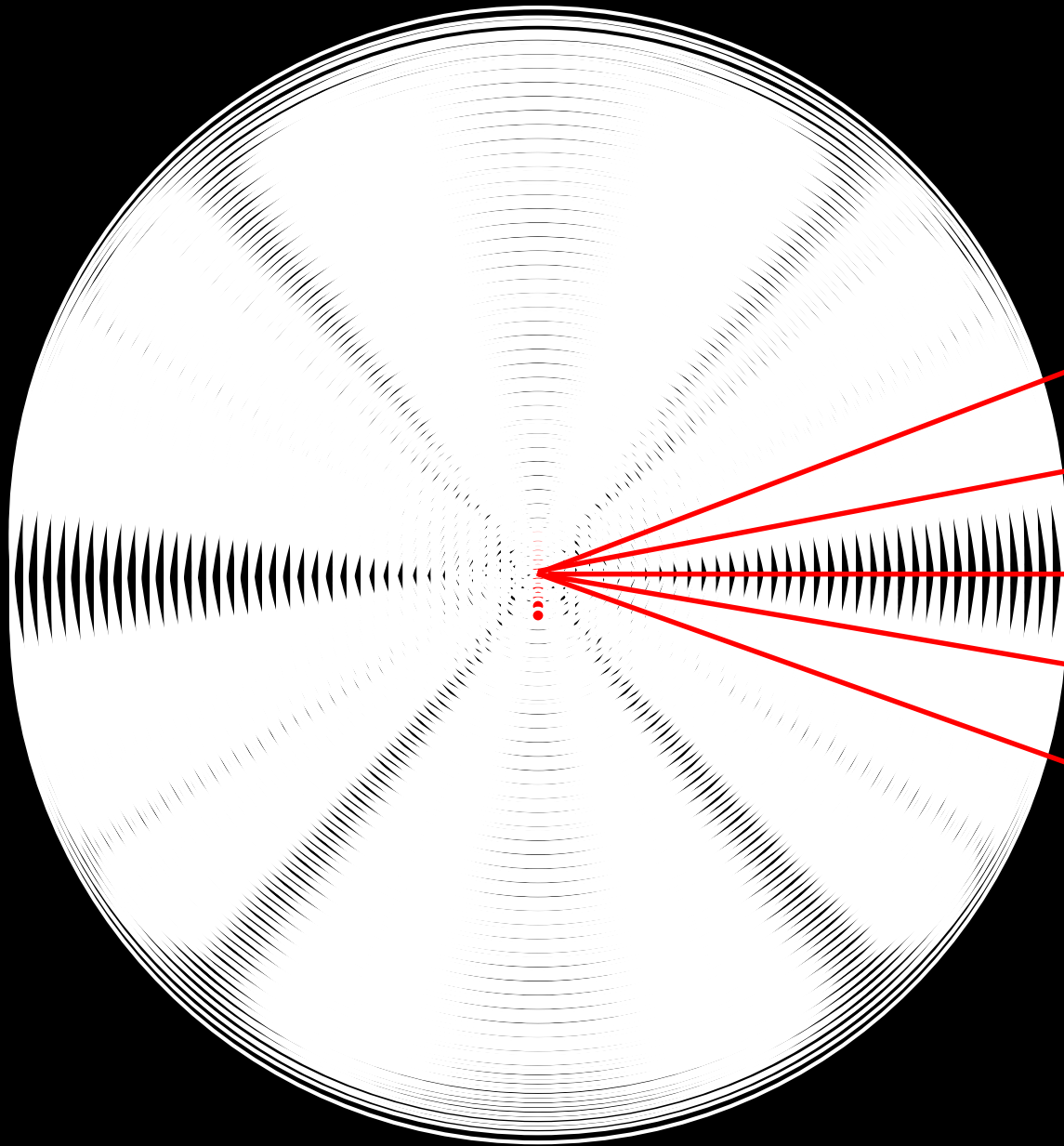
Diffraction : principe

Interférence (1803)



Diffraction : principe

Interférence (1803)

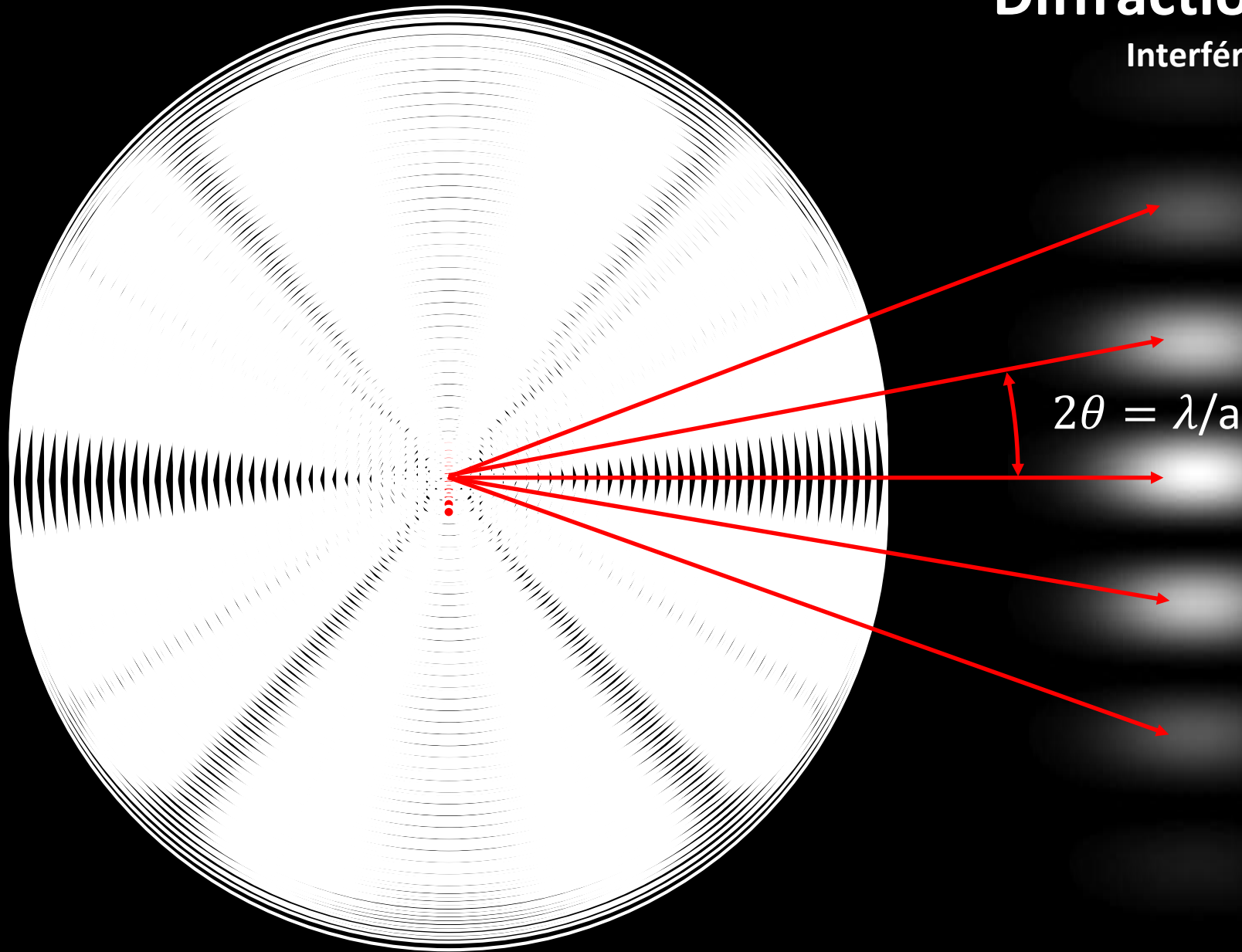


Pour observer
des franges
 λ doit être **plus petit**
que a

Sinon : diffusion

Diffraction : principe

Interférence (1803)

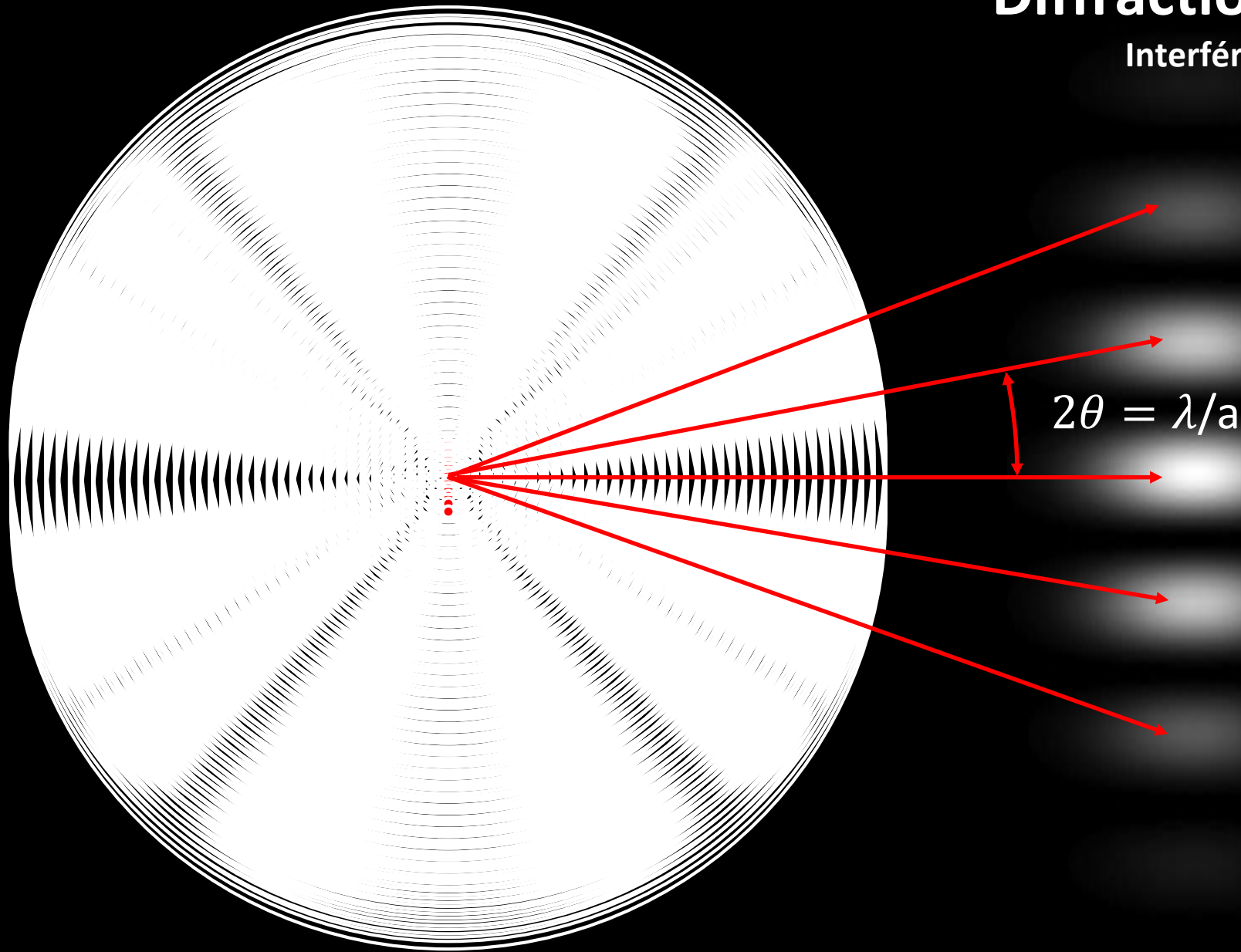


Pour observer
des franges
 λ doit être **plus petit**
que a

Sinon : diffusion

Diffraction : principe

Interférence (1803)



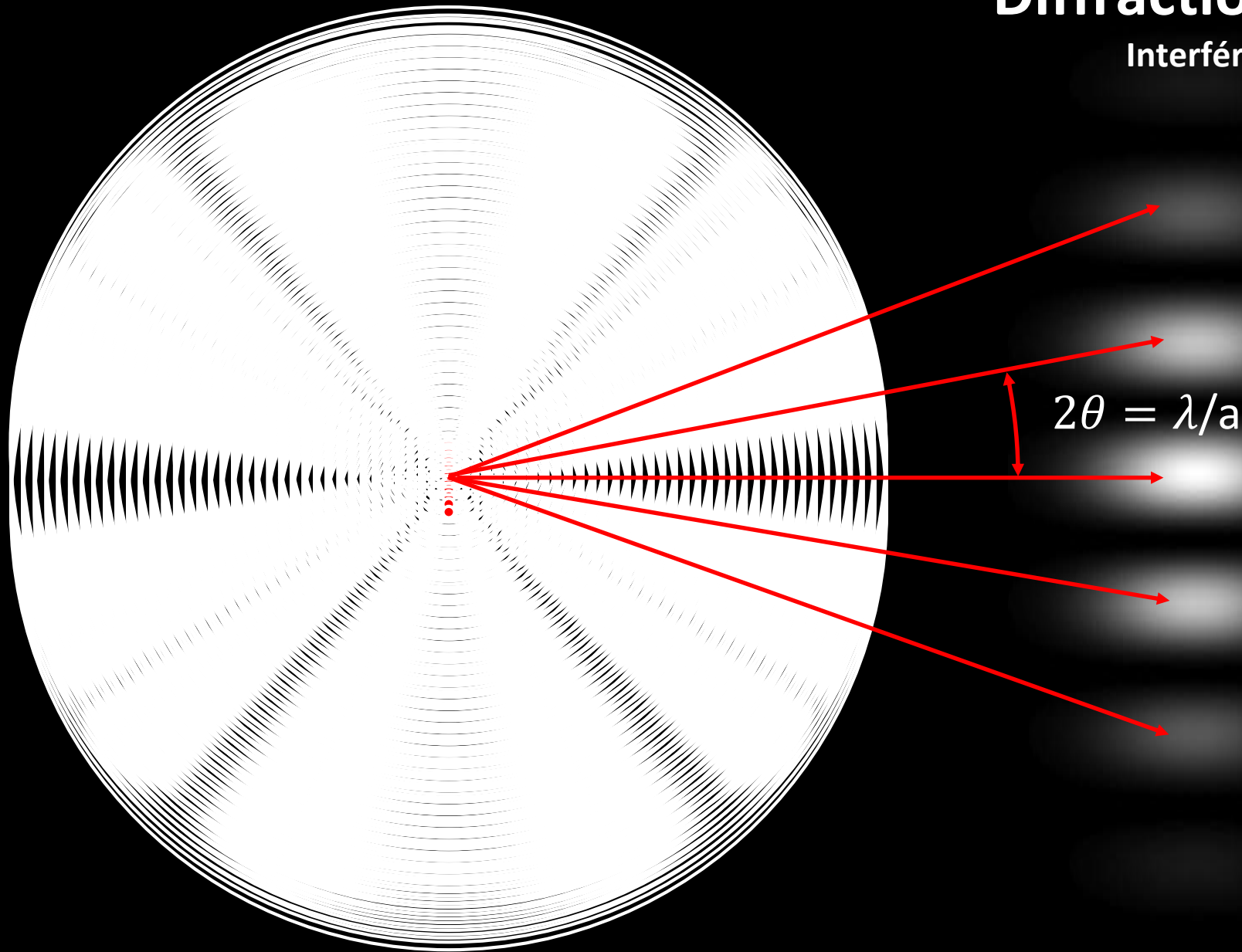
Principe de la
goniométrie X

Pour observer
des franges
 λ doit être **plus petit**
que a

Sinon : diffusion

Diffraction : principe

Interférence (1803)



Principe de la
goniométrie X

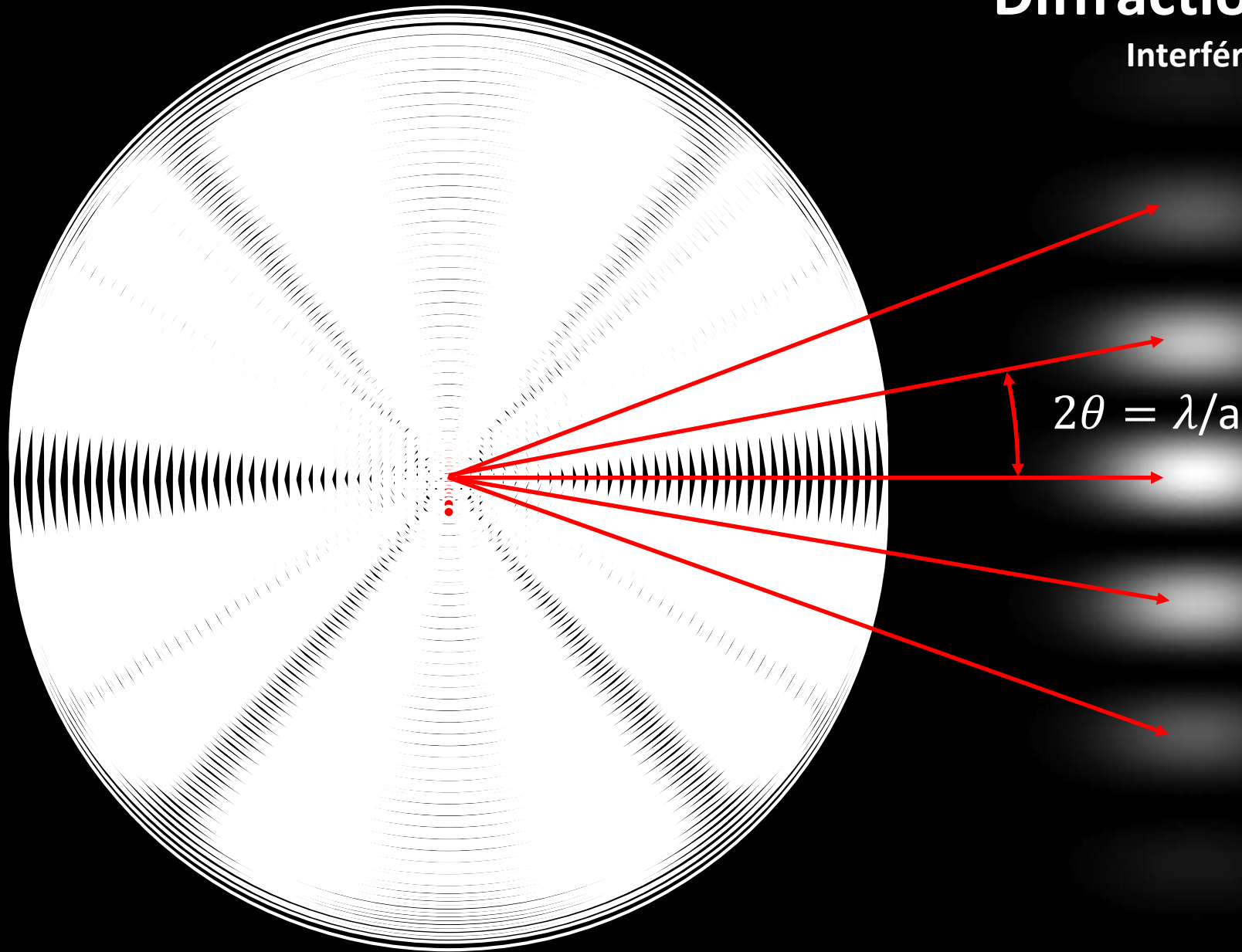
Permet de **calibrer**
les longueurs d'ondes
(RX = LaB₆)

Pour observer
des franges
 λ 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 = LaB₆)

Pour observer
des franges
 λ 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 !

