La science quantique

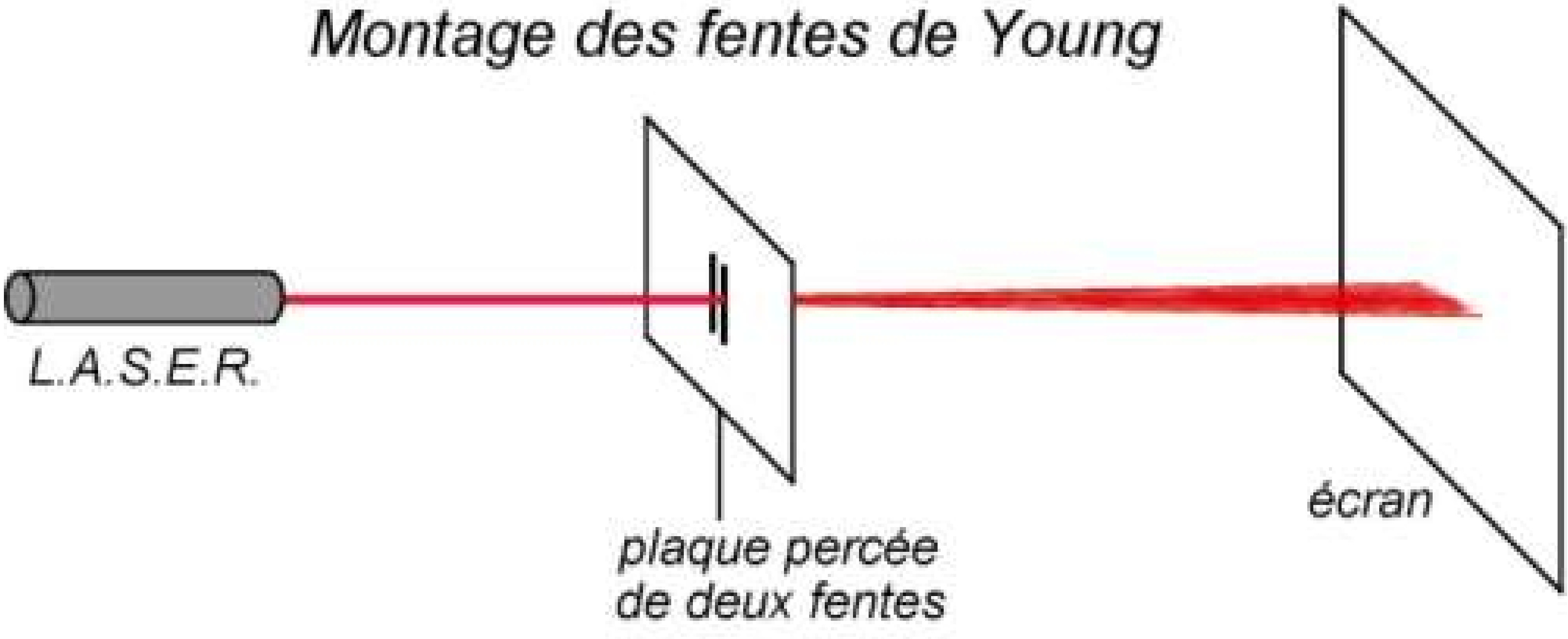
Une vision singulière

I) Le photon

P.A. Besse

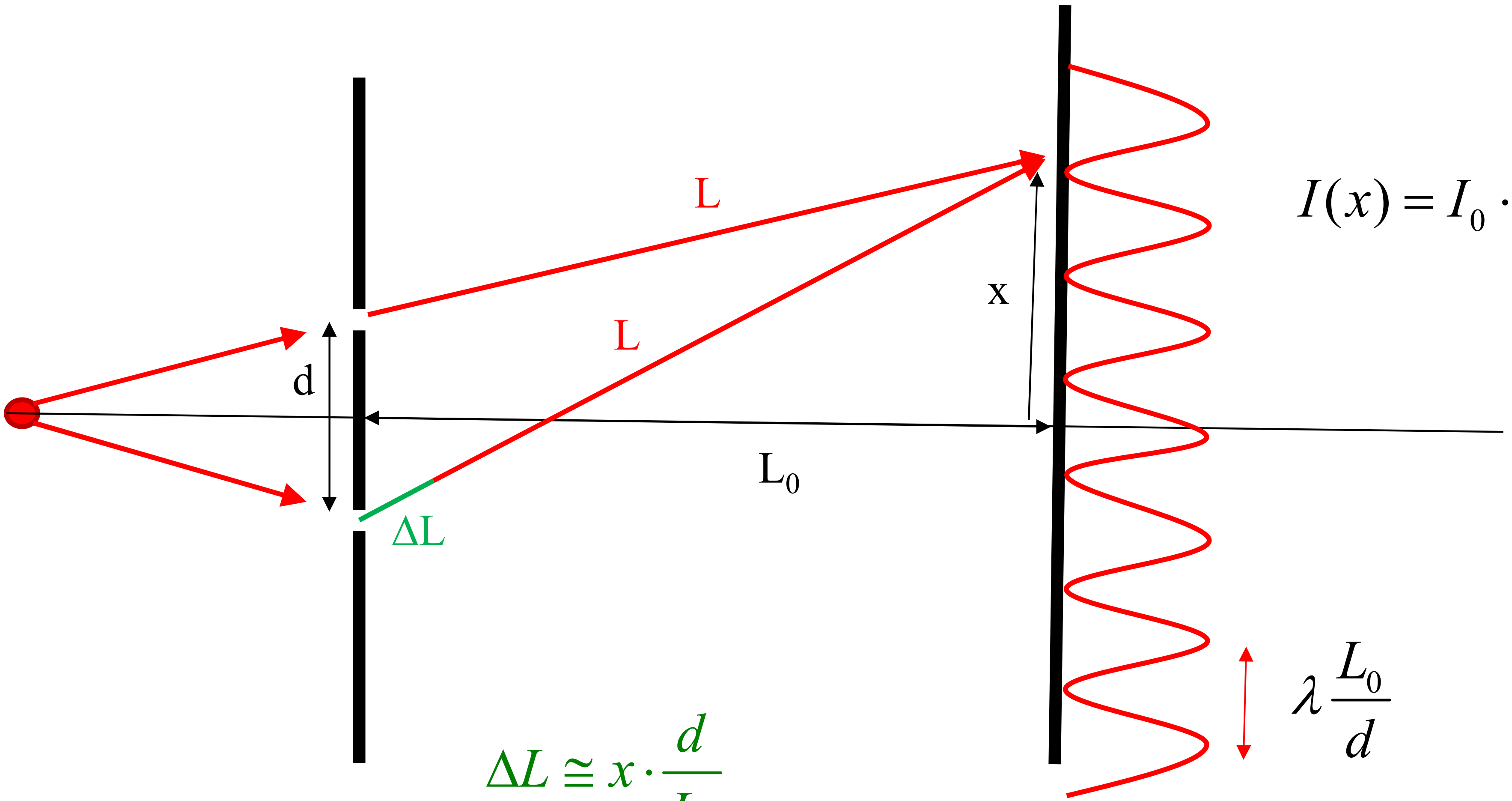
PAB

Interférences: «la lumière est une onde»



https://www.maxicours.com/se/cours/interferences-photon-par-photon-particule-par-particule/

Interférences: fentes de Young

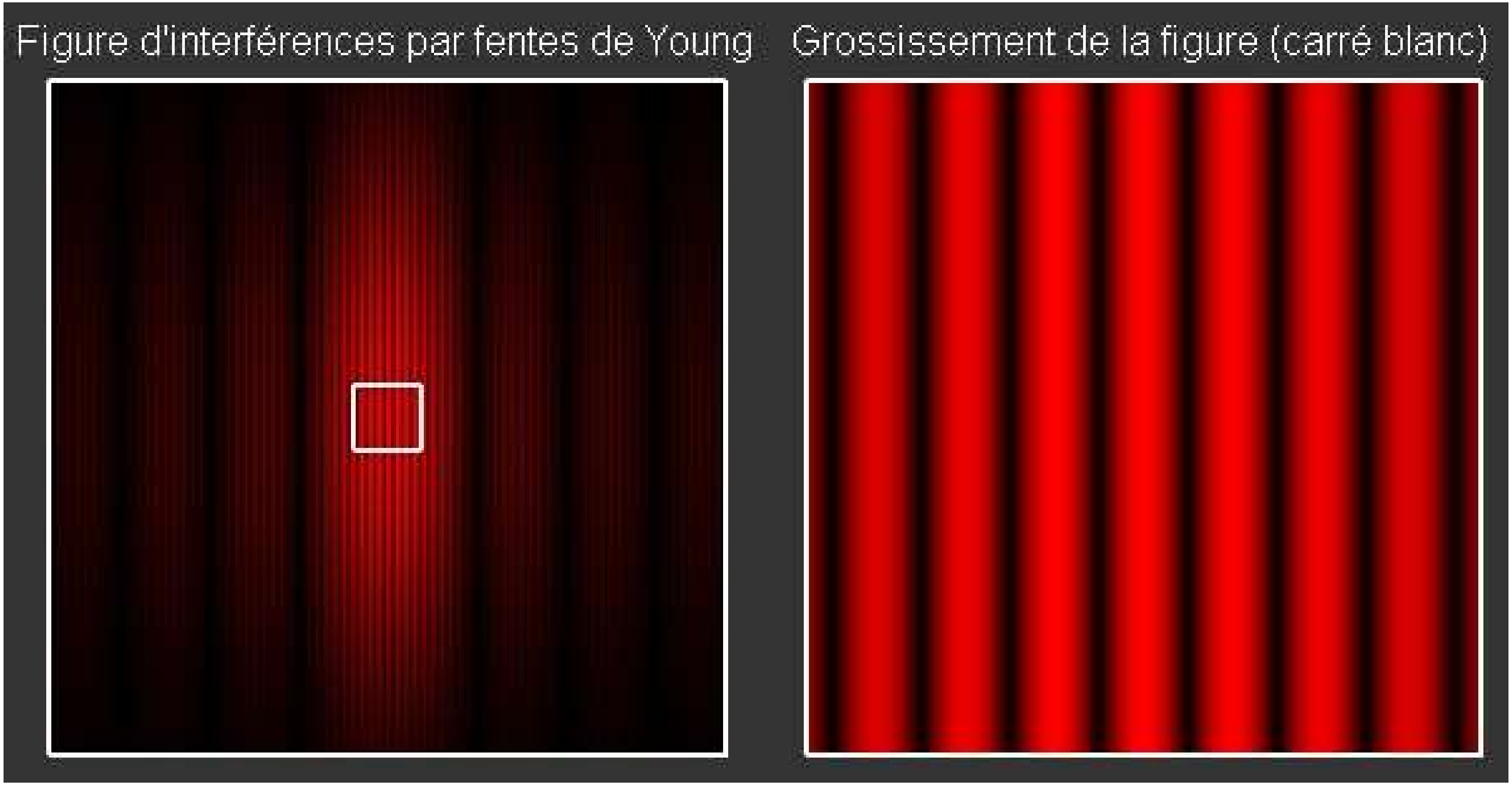


$$I(x) = I_0 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}\frac{d}{L_0}x\right)$$

$$\lambda\frac{L_0}{d}$$

$$\Delta L \cong x \cdot \frac{d}{L_0}$$

Interférences: «la lumière est une onde»



https://www.maxicours.com/se/cours/interferences-photon-par-photon-particule-par-particule/

https://www.youtube.com/watch?v=tc6V9B7YjtU

Equations de Maxwell

$$div(\vec{D}) = \rho$$

$$div(\vec{B}) = 0$$

$$rot(\vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}$$

$$rot(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial}{\partial t}\vec{D}$$

$$rot\left[rot(\vec{V})\right] = grad\left[div(\vec{V})\right] - \nabla^2 \vec{V}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{H} = \vec{B}/\mu_0 - \vec{M}$$

Dans le vide

$\rho = 0$ $\quad$ $\vec{P} = 0$

$\vec{j} = 0$ $\quad$ $\vec{M} = 0$

$$\Longrightarrow$$

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{E} - \nabla^2 \vec{E} = 0$$

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{B} - \nabla^2 \vec{B} = 0$$

Solutions ondulatoires

$$\frac{\partial^2}{\partial (ct)^2}\vec{E} - \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\vec{E} = 0 \quad \Longrightarrow$$

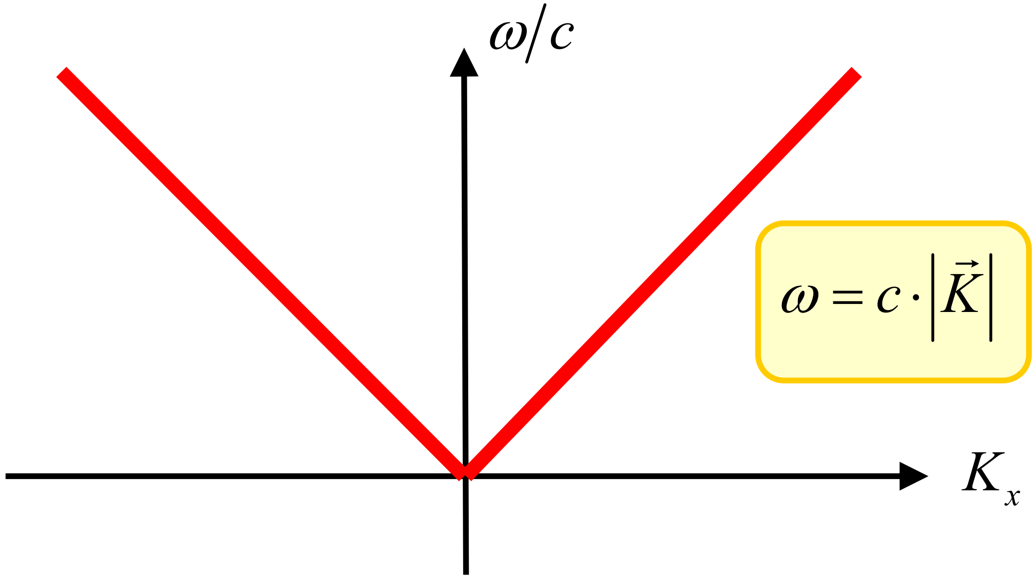
$$\vec{E}(\vec{x},t) = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\vec{K}\vec{x}-\omega t)}$$

$$\omega = c \cdot \sqrt{K_x^2 + K_y^2 + K_z^2}$$

Vitesse de phase: $\left|v_{ph}\right| = \omega \big/ \left|\vec{K}\right|$

Vitesse de groupe: $\left|v_G\right| = \dfrac{\partial \omega}{\partial \left|\vec{K}\right|}$

$$\left|v_{ph}\right| = \left|v_G\right| \equiv c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$



$$\omega = c \cdot \left|\vec{K}\right|$$

PAB

Résumé des ondes

Fonctions d'onde:

$$\vec{E}(\vec{x},t) = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\vec{K}\vec{x}-\omega t)}$$

$$\vec{B}(\vec{x},t) = \vec{B}_0 \cdot e^{i(\vec{K}\vec{x}-\omega t)}$$

Relation de dispersion:

$$\omega = c \cdot \left|\vec{K}\right| \quad \Rightarrow \quad \lambda \cdot \upsilon = c$$

Equations d'onde:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{E} - \nabla^2 \vec{E} = 0$$

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{B} - \nabla^2 \vec{B} = 0$$

Paramètres d'une onde:

$$\begin{pmatrix} \omega \\ \vec{K} \end{pmatrix}$$

Fréquence de l'onde

Vecteur d'onde

«quadri-vecteur»

«La lumière est une onde»

MAIS (vers 1900):

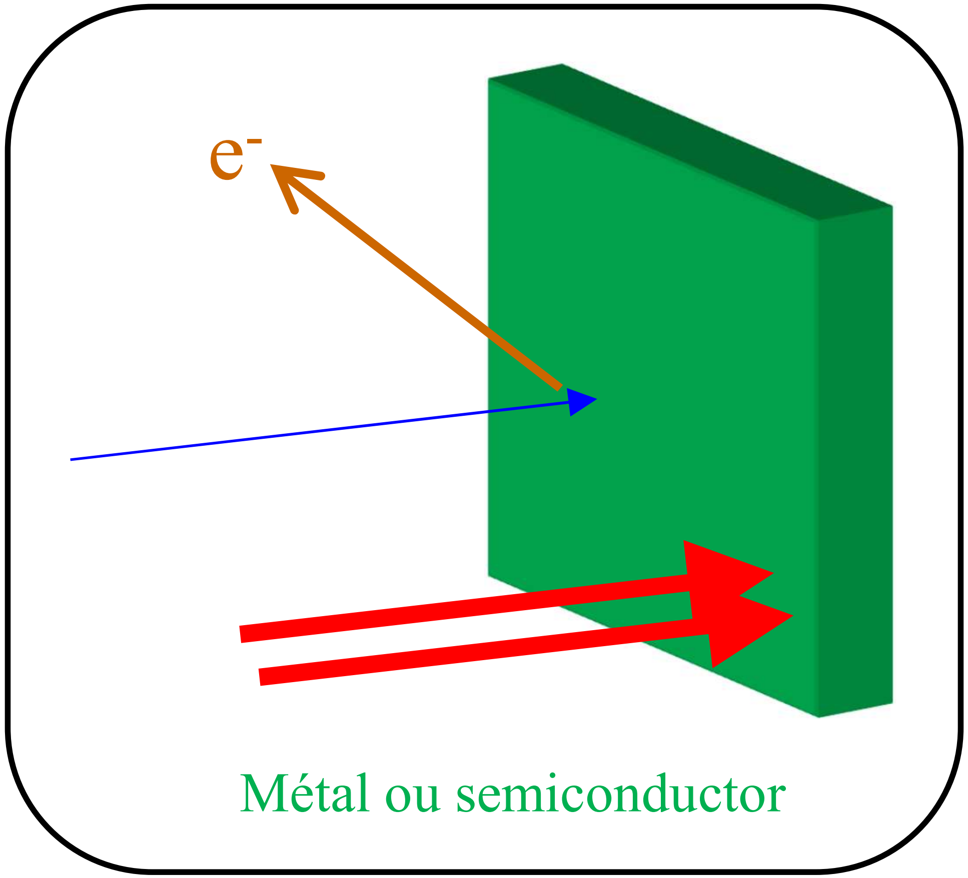
- corps noir …

- effet photoélectrique

$1^{\text{ère}}$ expérience troublante: effet photoélectrique

Apparition d'un courant électrique que si la longueur d'onde est inférieure à une certaine valeur

Expérience:
Von Lenard: Nobel Prize 1905
Explication:
A. Einstein: Nobel Prize 1921

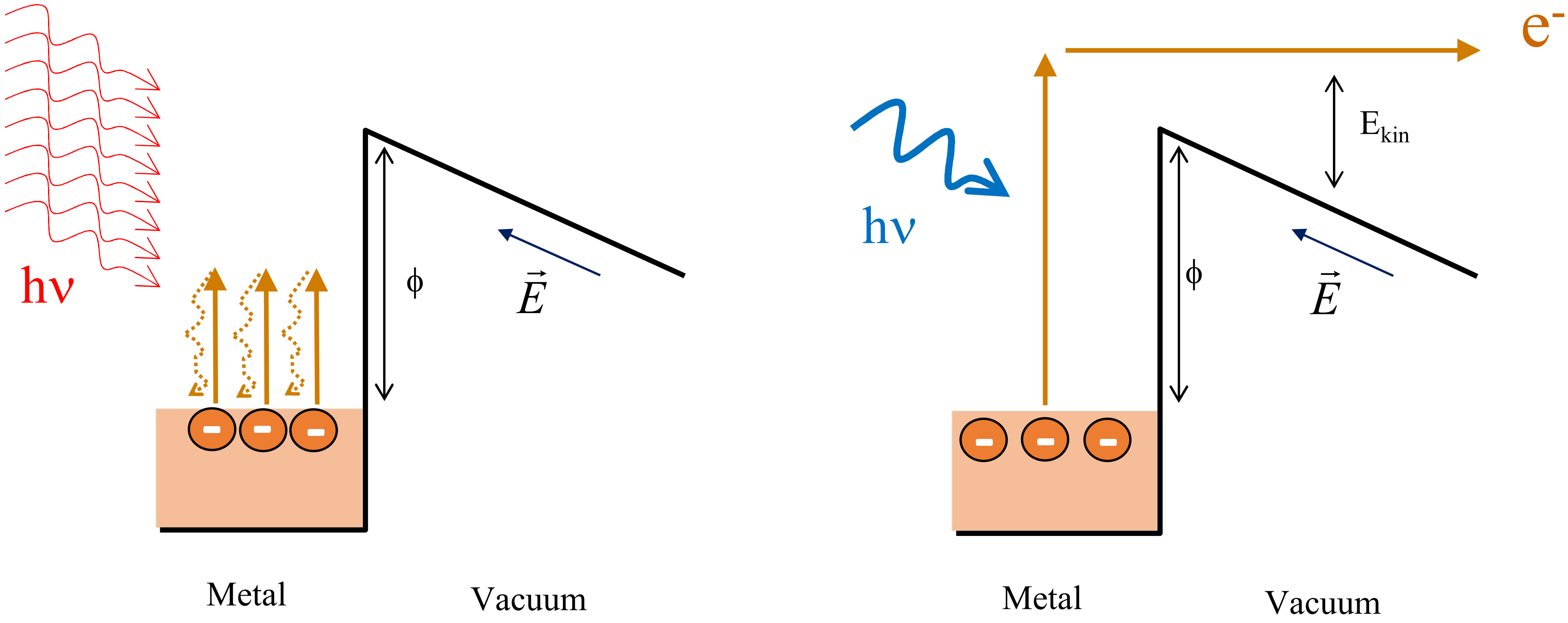


Sous vide

PAB

Effet photoélectrique: explication

la lumière est un flux de particules !



Relation de Planck:

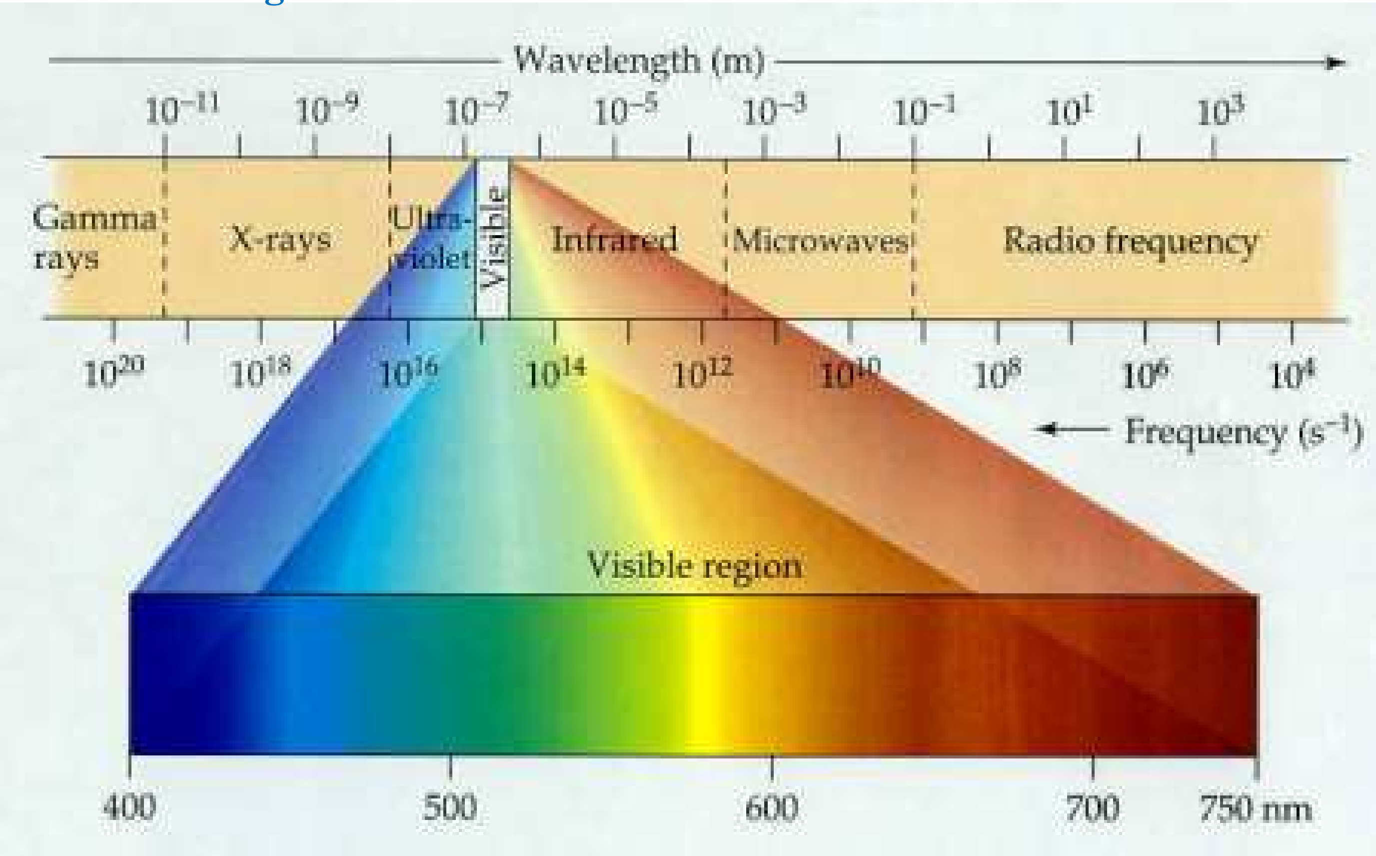
(explication du corps noir)

$$\boxed{E = \hbar \cdot \omega}$$

Rappel: spectre de la lumière

Petite longueur d'onde
Grande énergie

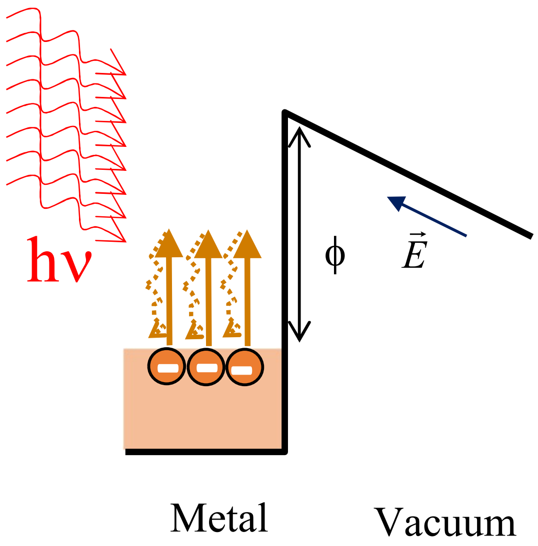
Grande longueur d'onde
Faible énergie

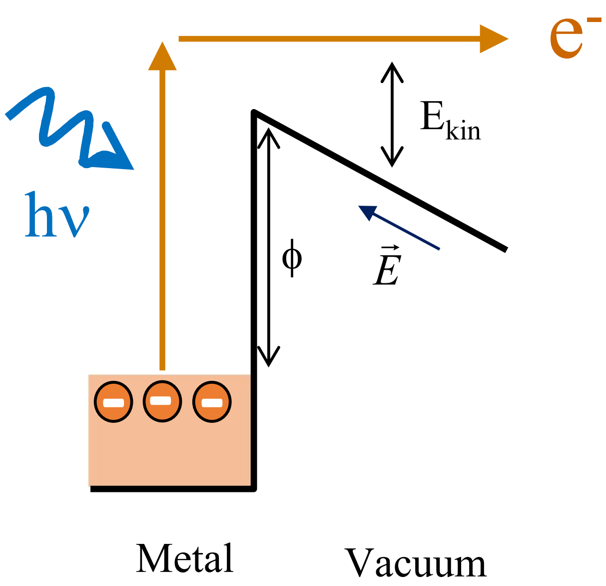


$$E_\gamma = \hbar \cdot \omega = \hbar \cdot c \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$$

PAB

Se chauffer - Bronzer





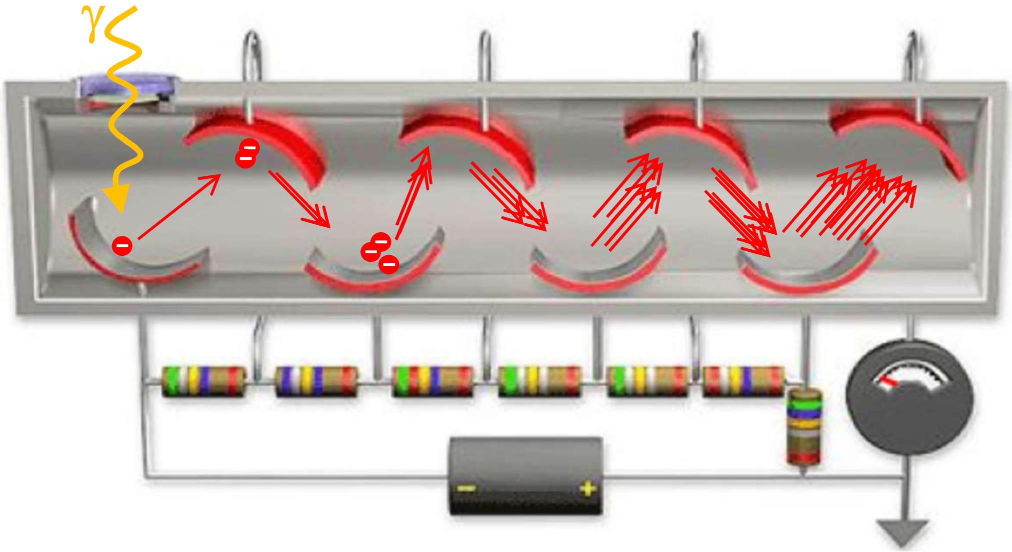
$$E = \hbar \cdot \omega$$

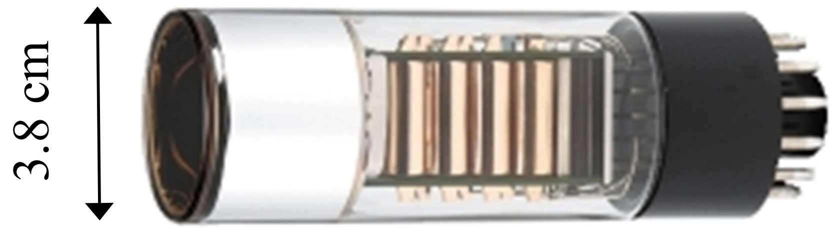
Chauffage par IR

Bronzage dû aux UV

Relation de Planck: application

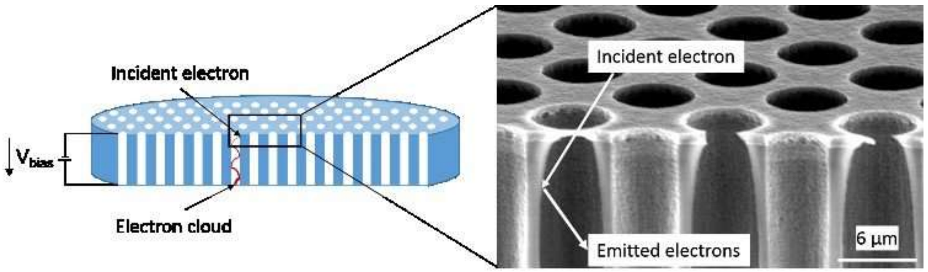
Photo-Multiplier Tube (PMT)

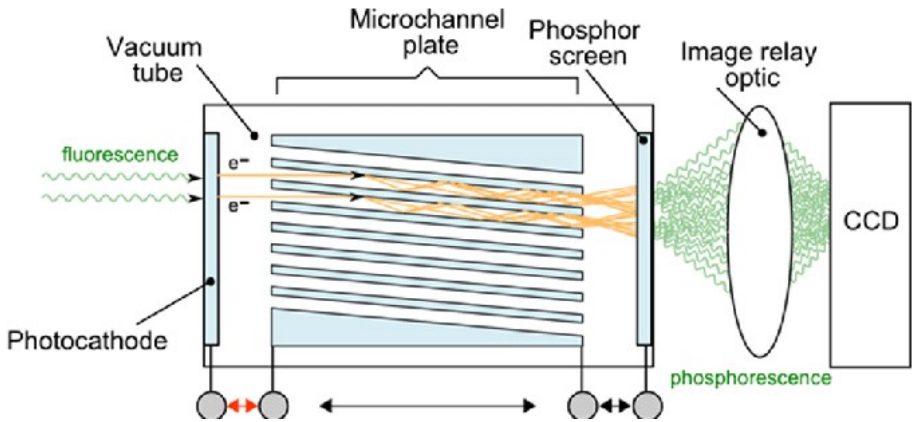




Hamamatsu R580

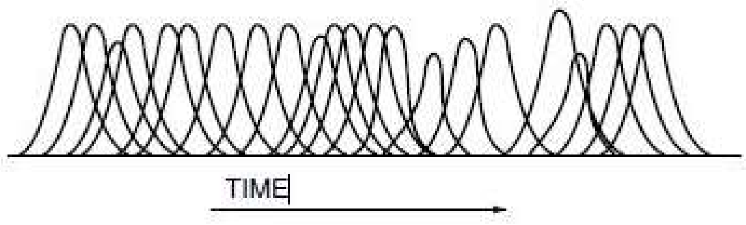
1Mpix PMT camera (Micro Channel Plate)

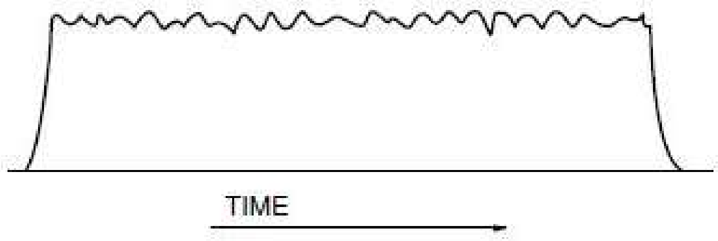




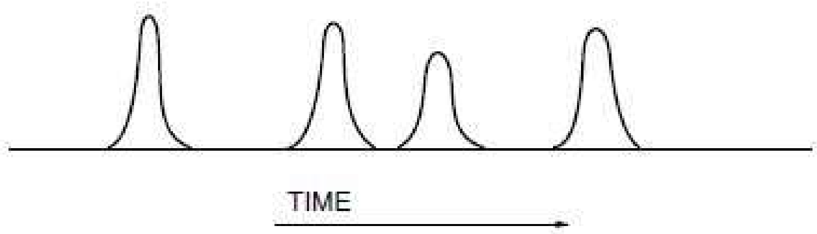
PMT: Pulse Trains and Ouput Signal

Signal with medium illumination





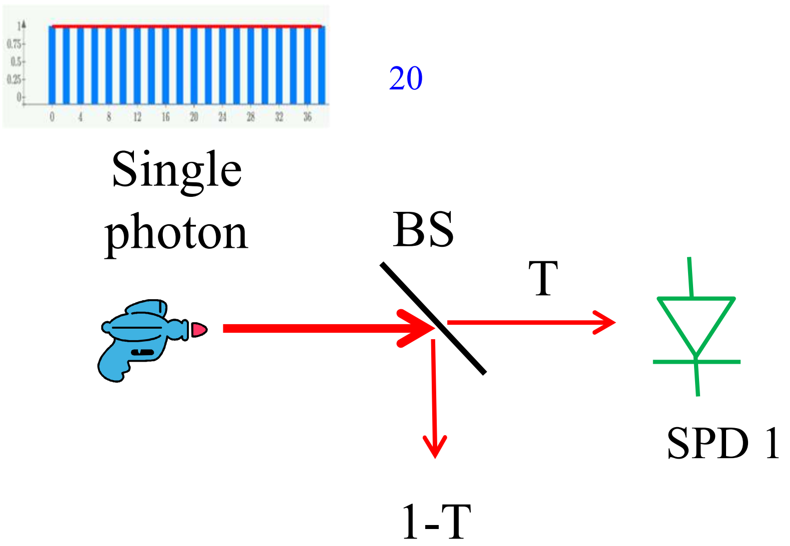
Signal with very weak illumination



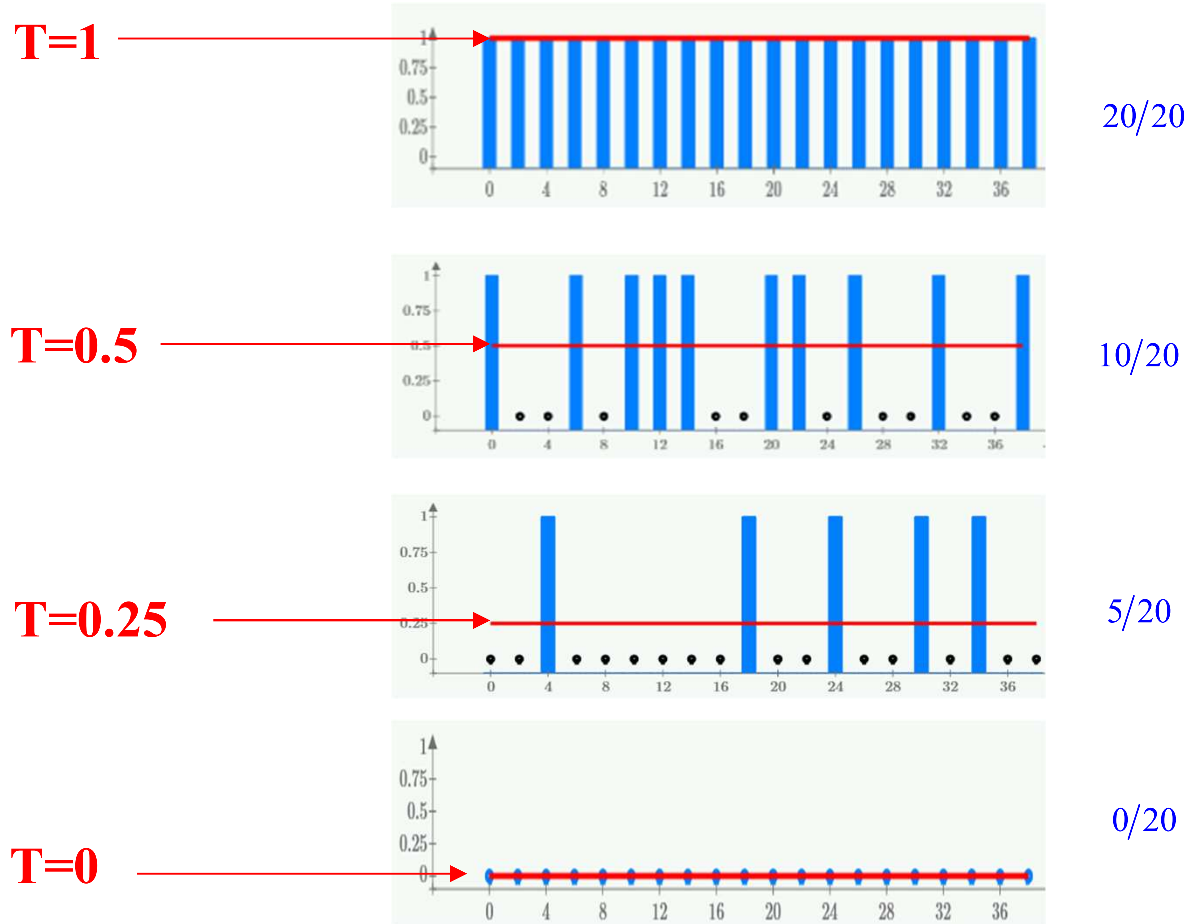
Hamamatsu Catalog: Photomultiplier tubes and related products

Beam splitter en transmission
Mesures singulières et moyenne

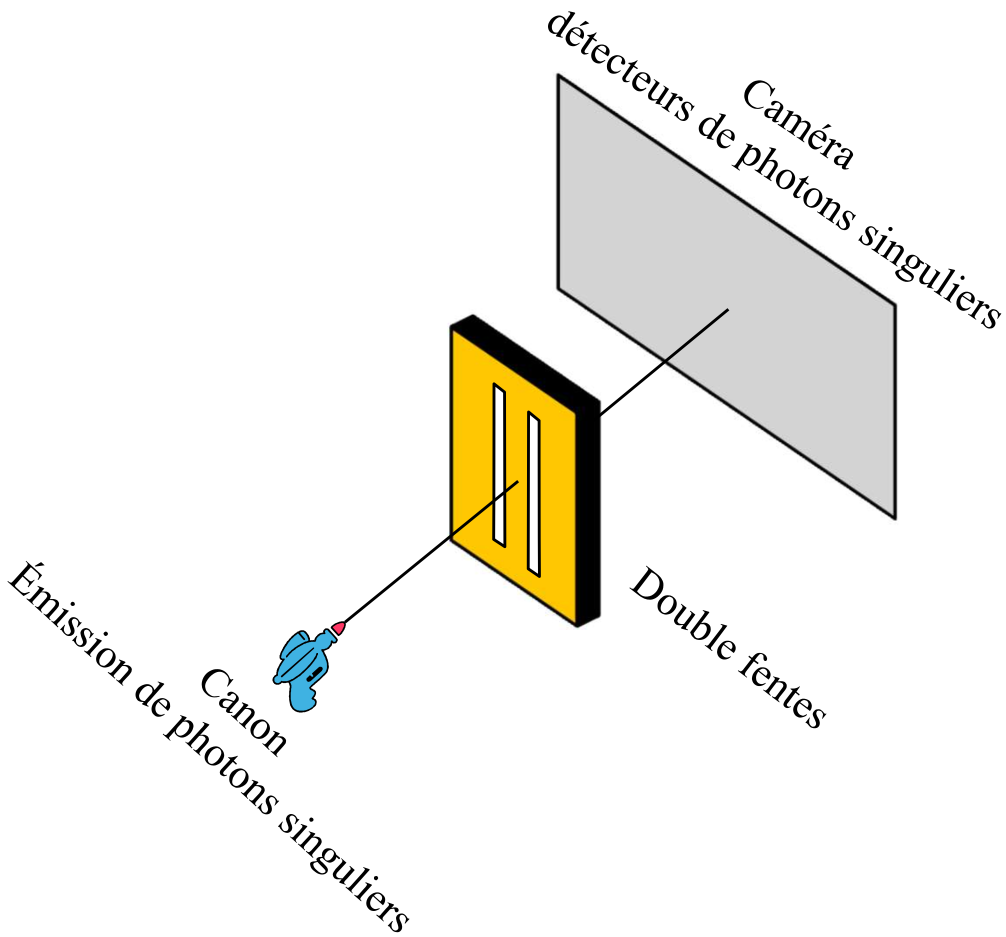
!! Chaque mesure fait collapser l'onde !! ⇨ La moyenne résulte d'un grand nombre de collapses

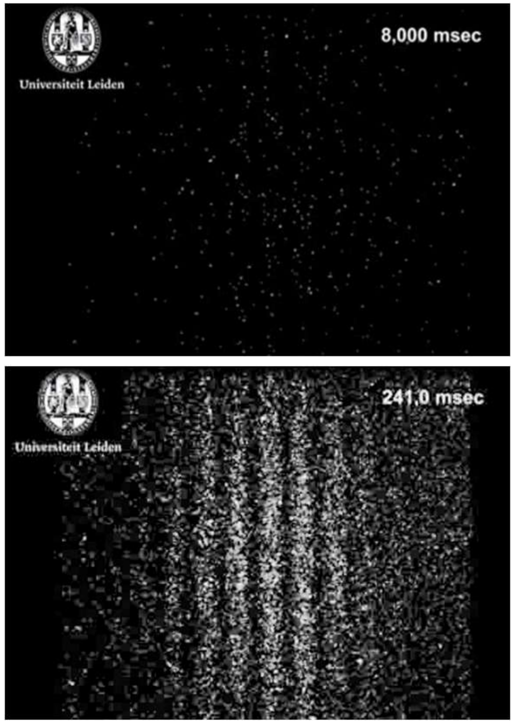


Moyenne: **Mesures singulières:**



2ème expérience troublante: fentes de Young quantiques





D. Dykstra, Leiden University, 2008

http://www.youtube.com/watch?v=MbLzh1Y9POQ

Constatations et problèmes physique

- **Un seul détecteur réagit à la fois**
- **Les lignes d’interférences se retrouvent dans l’histogramme**

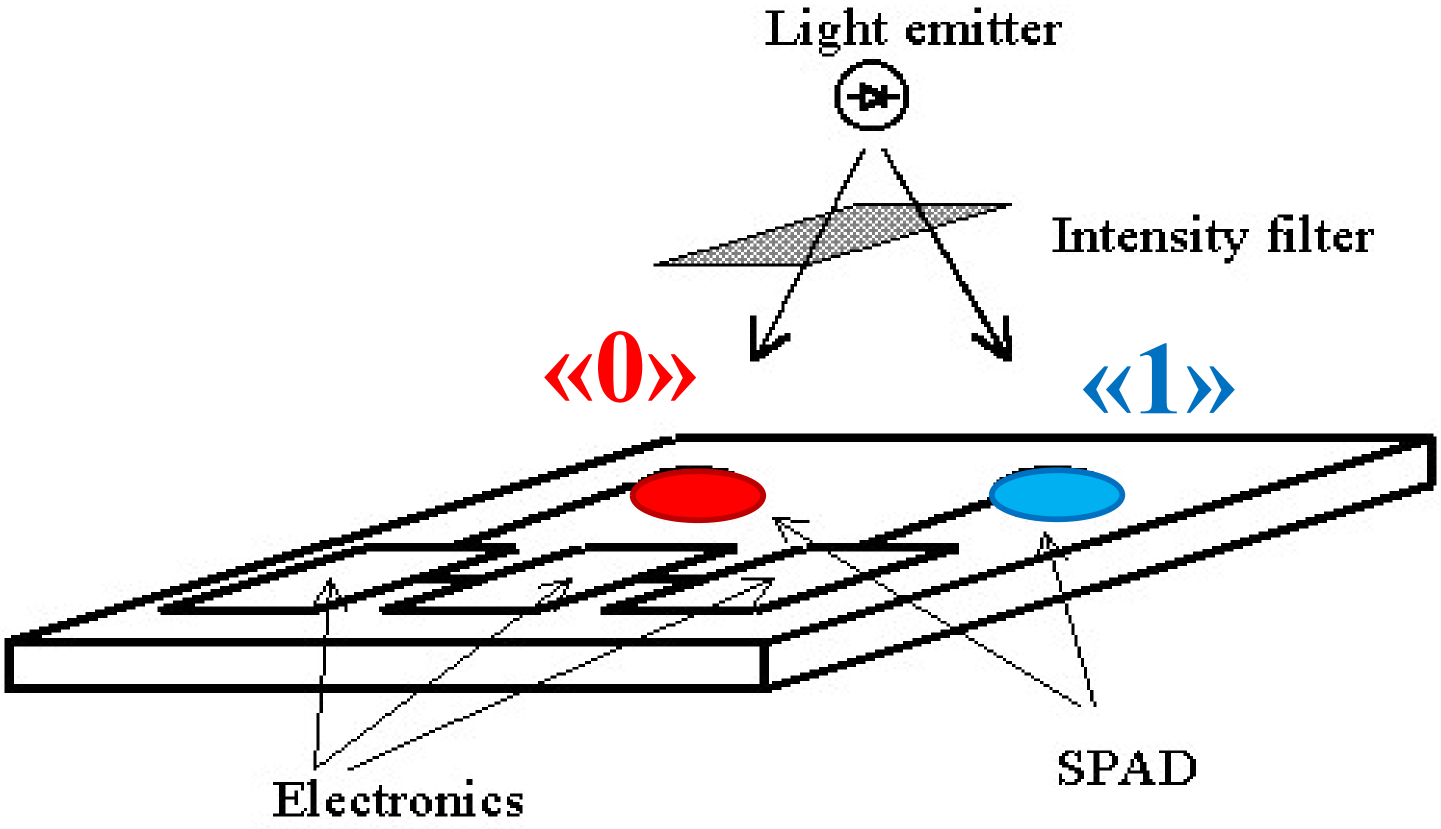
Vision «particule»

Problème: **Comment une seule particule (locale) peut-elle connaitre la présence des deux fentes ?**

Vision «ondulatoire»:

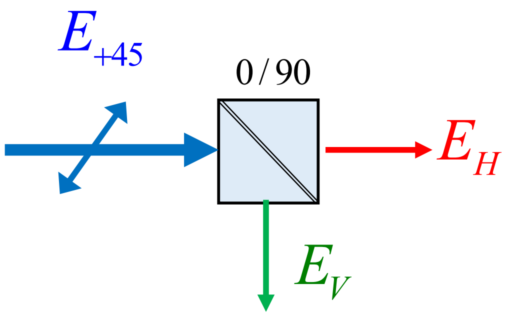
Problème: **Comment expliquer la projection de l’onde (globale) sur un seul détecteur (local) ? «Collapse de l’onde»**

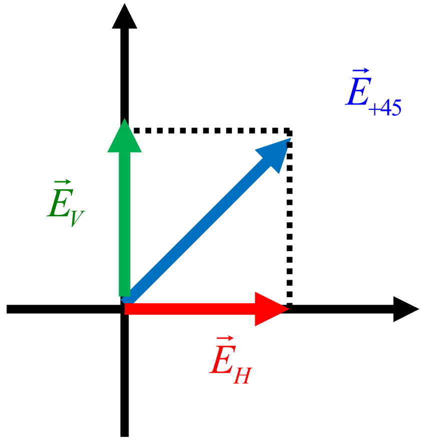
3ème expérience: Quantum Random Number Generator



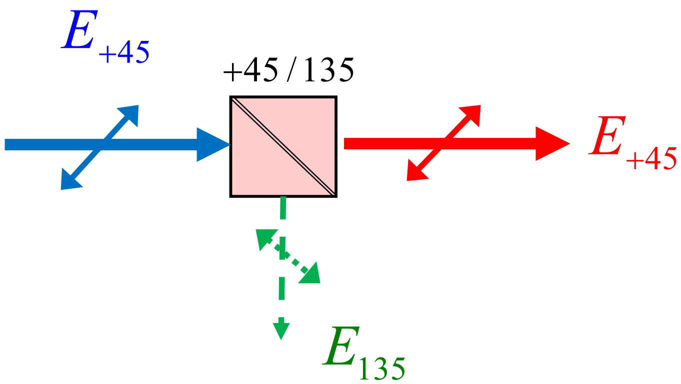
CTI project with IdQuantique SA, Genève.

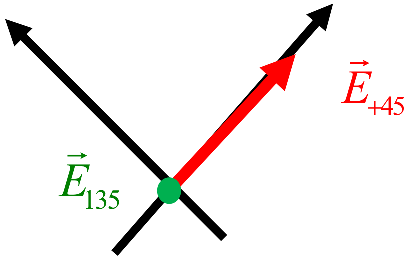
$4^{\text{ème}}$ expérience:
Polarisation: vision classique





$$\vec{E}_{+45} = \vec{E}_H + \vec{E}_V$$

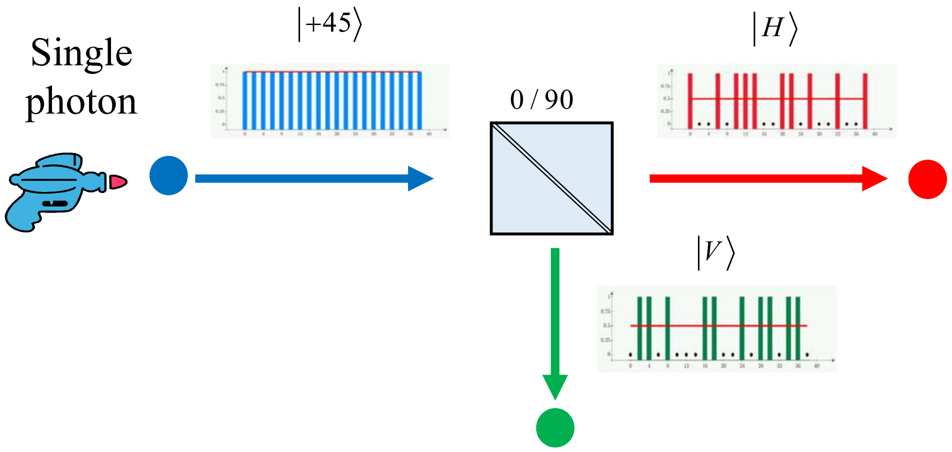




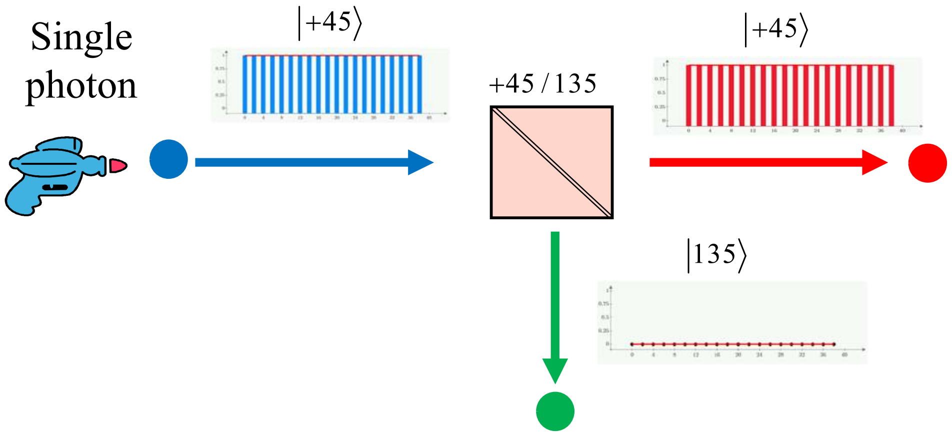
$$\vec{E}_{+45} = \vec{E}_{+45} + \vec{E}_{135}$$

Le champ électrique entrant se projette et se décompose et selon les axes de base de l appareil de mesure.

Polarisation: vision quantique: single photon



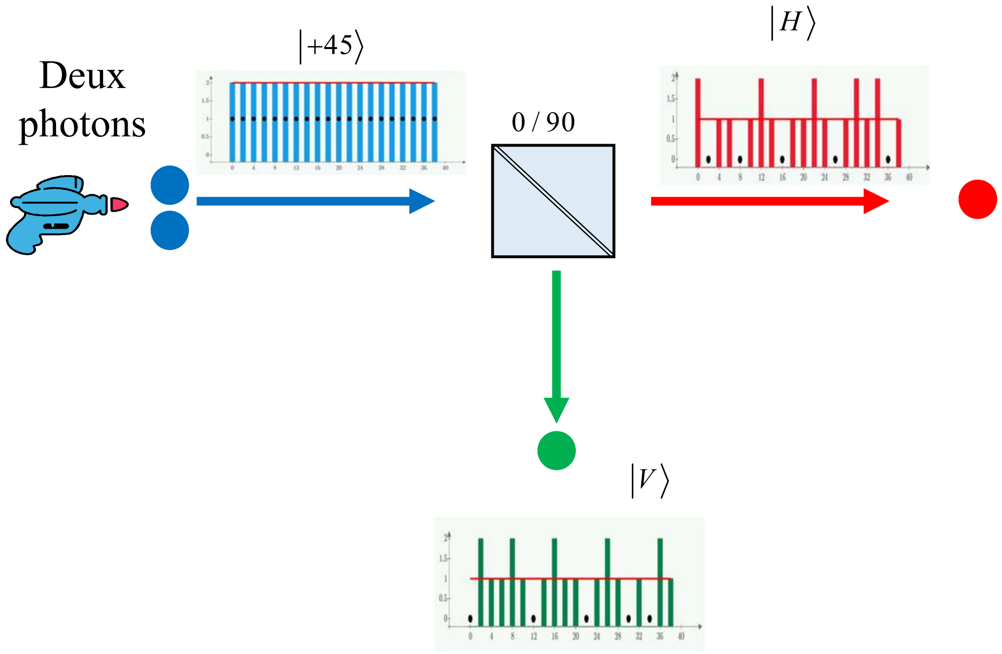
$$|+45\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |H\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |V\rangle$$



$$|+45\rangle = 1 \cdot |+45\rangle + 0 \cdot |135\rangle$$

Les photons entrants se répartissent et se transforment en photons de base de l appareil de mesure.

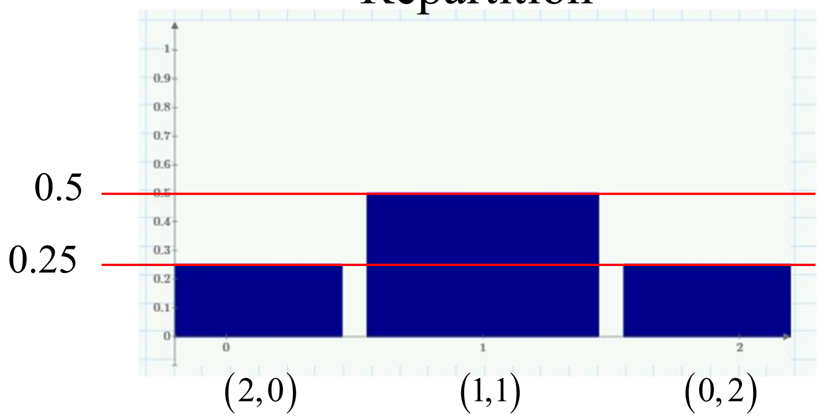
Polarisation: vision quantique:
deux photons identiques et simultanés



??? Quelle explication ???

→ Chapitre 10

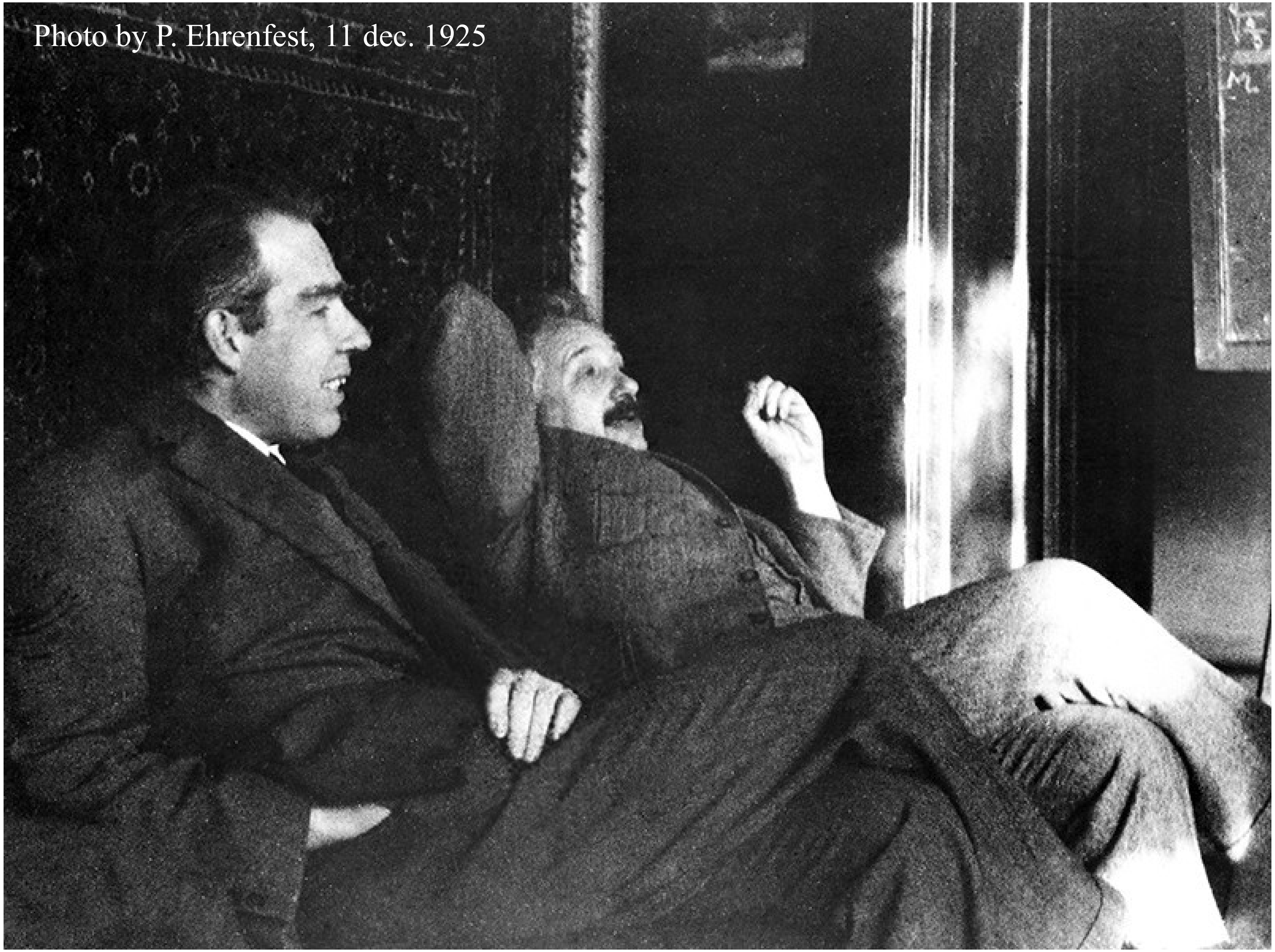
Répartition



Une dispute …

Uderzo: Cetautomatix / Ordralfabetix

… de physiciens … et de philosophes !



Deux visions

Vision déterministe (Einstein):
(théorie de l'onde pilote et du potentiel quantique, De Broglie, Bohm)

God does not throw dice

- Avant la mesure, la particule est déjà déterminée mais elle nous est encore inconnue.
- La mesure nous révèle certaines de ses caractéristiques déterminées à l'avance.

Vision «probabiliste» (Bohr):

Stop telling God what to do

- Avant la mesure le système physique n'est constitué que d'ondes de probabilités et la notion de particule n'a pas de sens.
- La mesure seule donne un sens à la notion de photon qui n'existe qu'une fois la mesure effectuée.

Modèle quantique

Avant la mesure la lumière est une onde de probabilité décrite par une fonction d'onde:

une superposition d'états (un «paquet d'ondes»).

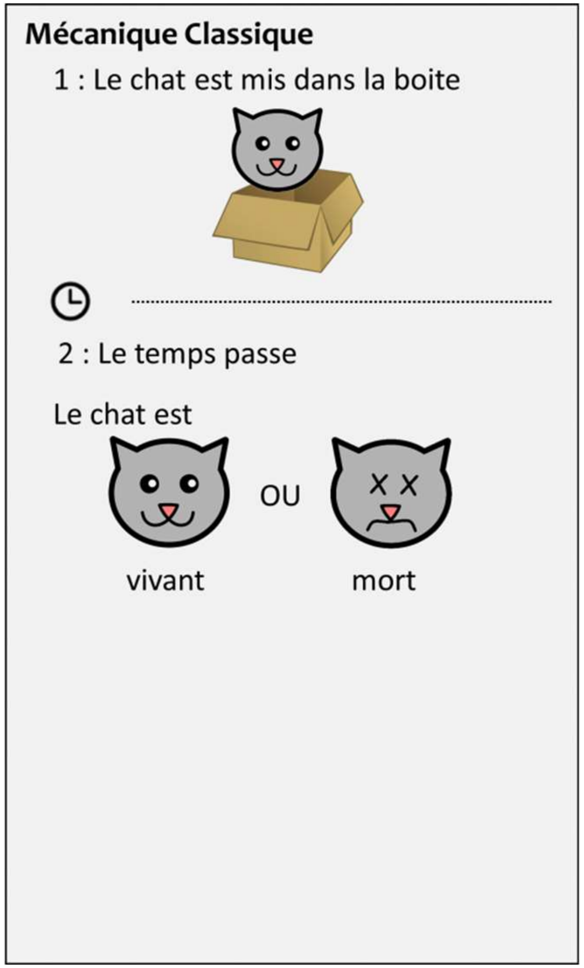
Son intensité (carré de sa norme) donne la probabilité de détecter un photon en un point de l'espace

Lorsqu'elle interagit avec la matière,

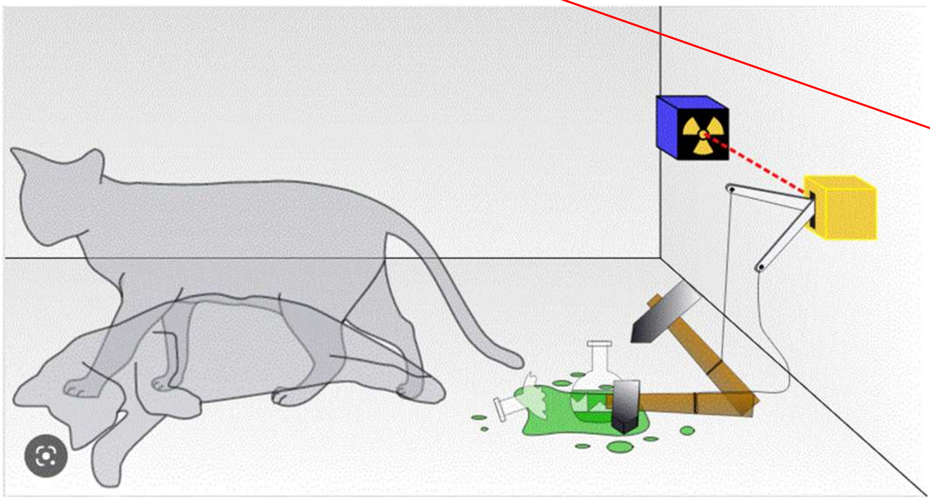
l'onde lumineuse «collapse» et

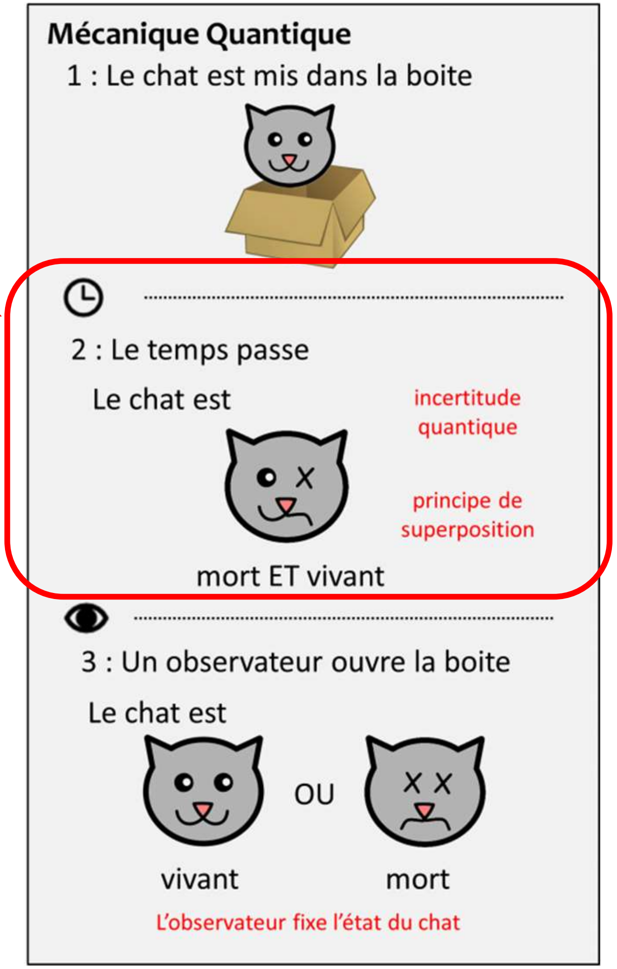
se projette sur un mode propre du détecteur («photon»).

Le chat de Schroedinger: une superposition quantique



Superposition quantique





Conclusion: la lumière est à la fois onde et particule

Paramètres d'une onde:

$$\begin{pmatrix} \omega \\ \vec{K} \end{pmatrix}$$

Fréquence de l'onde

Vecteur d'onde

«quadri-vecteur»

La lumière se propage comme une onde

Paramètres d'une particule:

$$\begin{pmatrix} E \\ \vec{P} \end{pmatrix}$$

Energie de la particule

Impulsion de la particule

«quadri-vecteur»

La lumière interagit comme une particule
(«le photon»)

Relation Onde $\leftarrow\rightarrow$ particule

Paramètres d'une onde:

$\begin{pmatrix} \omega \\ \vec{K} \end{pmatrix}$ Fréquence de l'onde / Vecteur d'onde

«quadri-vecteur»

Paramètres d'une particule:

$\begin{pmatrix} E \\ \vec{P} \end{pmatrix}$ Energie de la particule / Impulsion de la particule

«quadri-vecteur»

Nobel 1918

Relation de Planck

$$\begin{pmatrix} E \\ \\ \end{pmatrix} = \hbar \cdot \begin{pmatrix} \omega \\ \\ \end{pmatrix}$$

PAB

Relation Onde $\leftarrow\rightarrow$ particule

Paramètres d'une onde:

$\begin{pmatrix} \omega \\ \vec{K} \end{pmatrix}$ Fréquence de l'onde / Vecteur d'onde

«quadri-vecteur»

Paramètres d'une particule:

$\begin{pmatrix} E \\ \vec{P} \end{pmatrix}$ Energie de la particule / Impulsion de la particule

«quadri-vecteur»

Nobel 1918

Relation de Planck

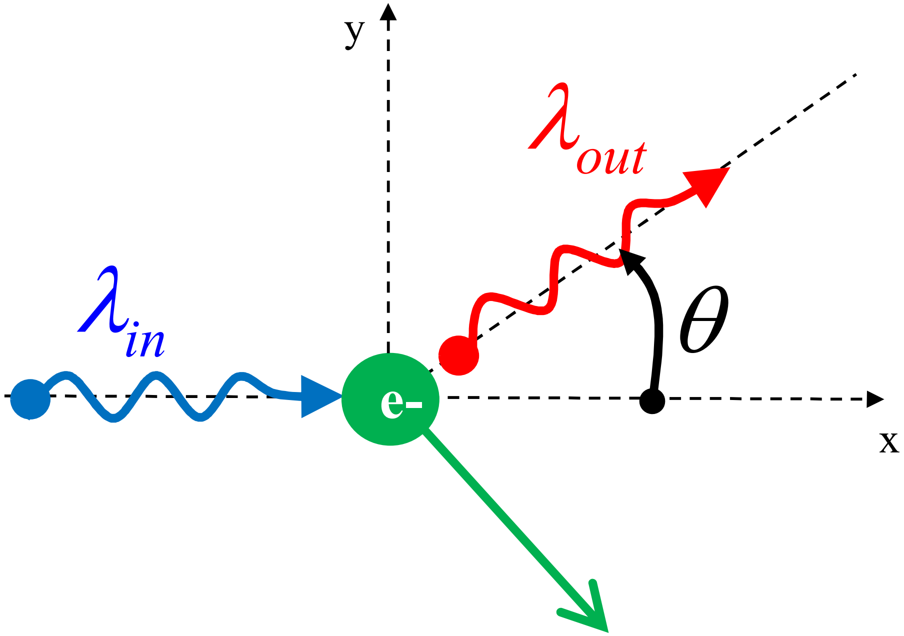
$$\begin{pmatrix} E \\ \vec{P} \end{pmatrix} = \hbar \cdot \begin{pmatrix} \omega \\ \vec{K} \end{pmatrix}$$

Relation de De Broglie

Nobel 1929

Applications de l'impulsion du photon

Effet Compton Choc photon - électron



a) Conservation de l'impulsion en x

$$P_{in} - P_{out}\cos(\theta) = \Delta P_x$$

b) Conservation de l'impulsion en y

$$P_{out}\sin(\theta) = \Delta P_y$$

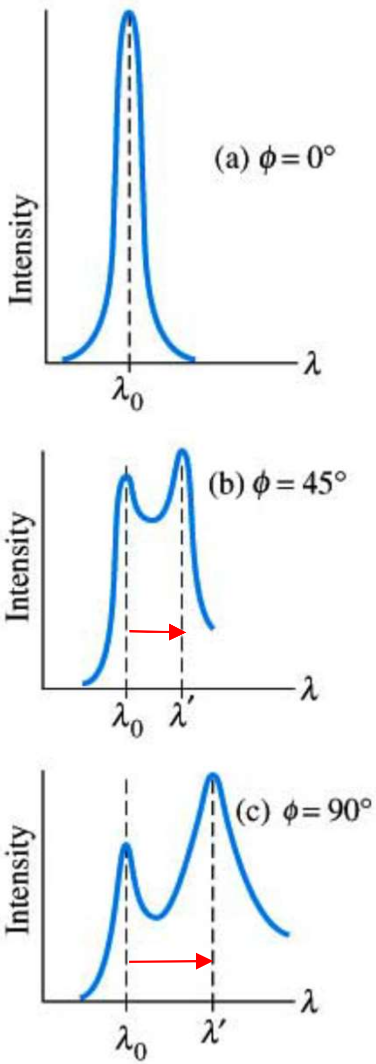
$$\boxed{\lambda_{out} - \lambda_{in} = \frac{h}{m_e \cdot c}\left(1 - \cos(\theta)\right)}$$

c) Conservation de l'énergie relativiste

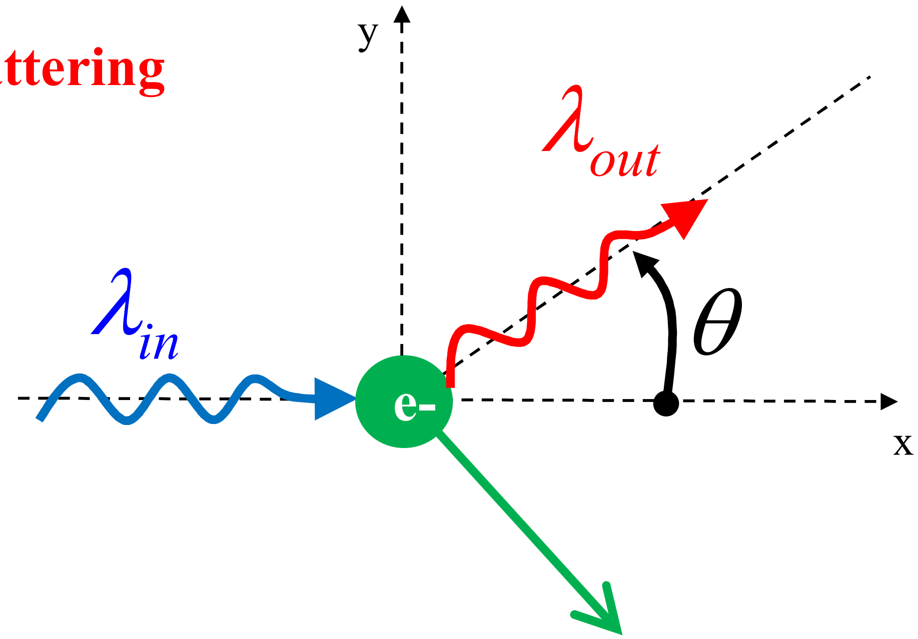
$$c \cdot P_{in} + m_e c^2 = c \cdot P_{out} + \sqrt{m_e^2 c^4 + c^2\left(\Delta P_x^2 + \Delta P_y^2\right)}$$

Arthur Compton, Nobel 1927

Effet Compton



L'énergie du photon diffusé dépend
de l'angle de scattering



$$\lambda_{out} - \lambda_{in} = \frac{h}{m_e \cdot c}\left(1 - \cos(\theta)\right)$$

Applications de l'impulsion du photon

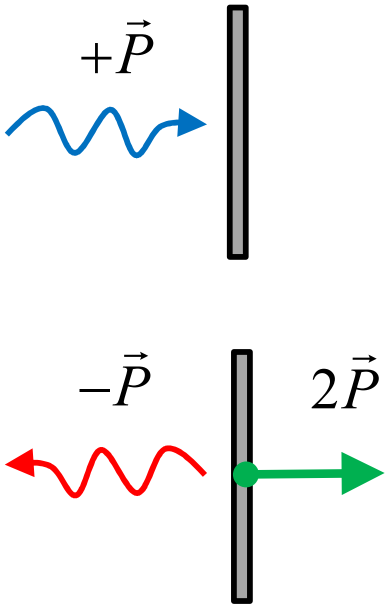
Voile solaire

- Photons
- Vent solaire

Question de réflexion

La voile a gagné en énergie !

D'où provient cette énergie



Compton

$$\lambda_{out} - \lambda_{in} = \frac{h}{m_e \cdot c}\left(1 - \cos(\theta)\right)$$

$$\Downarrow$$

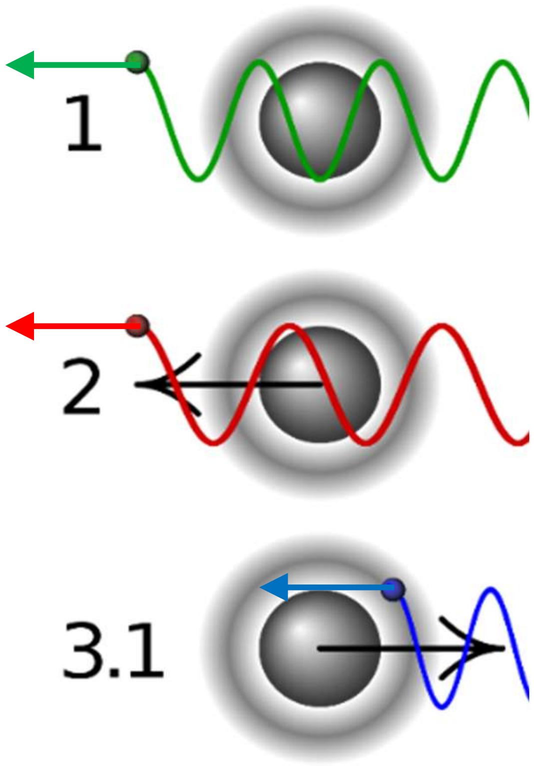
$$\lambda_{out} - \lambda_{in} = \frac{h}{M \cdot c} \cdot 2$$

Réflexion sur un miroir ?

Applications de l'impulsion du photon

Atome refroidi

Cohen-Tannoudji, Chu et Phillips. Nobel 1997



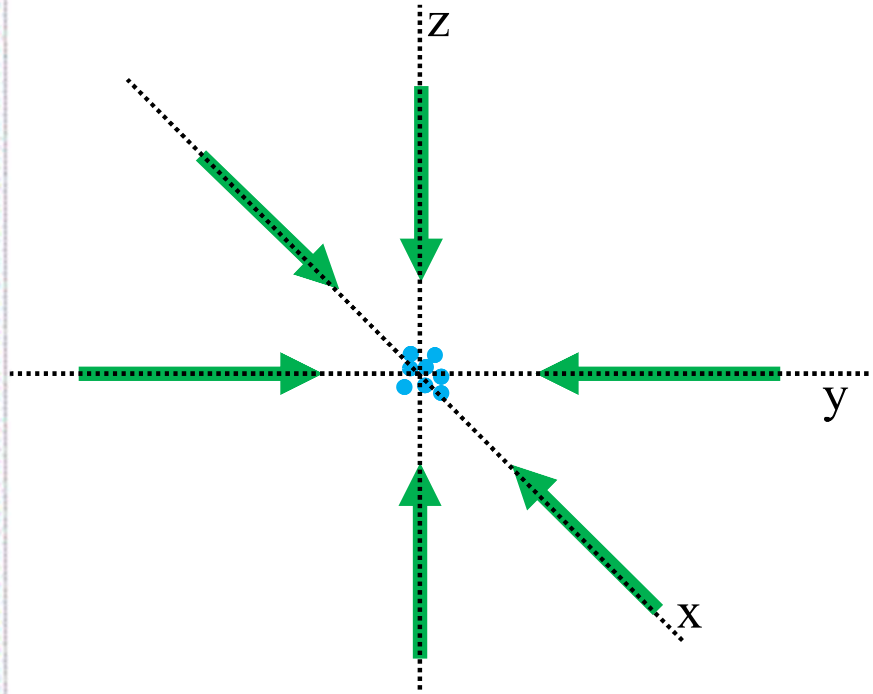
Principe du refroidissement Doppler d'un atome:

1 Atome immobile: le photon incident a une fréquence plus faible que celle de la transition électronique, pas d'absorption.

2 Atome allant dans le même sens que le photon incident: la fréquence de ce dernier apparaît encore plus décalée vers le rouge, pas d'absorption du photon.

3.1 Atome allant dans le sens opposé à celui du photon incident: ce dernier a une fréquence *décalée vers le bleu*, plus proche de la fréquence de résonance, l'absorption du photon devient possible.

Atom trapping en 3D

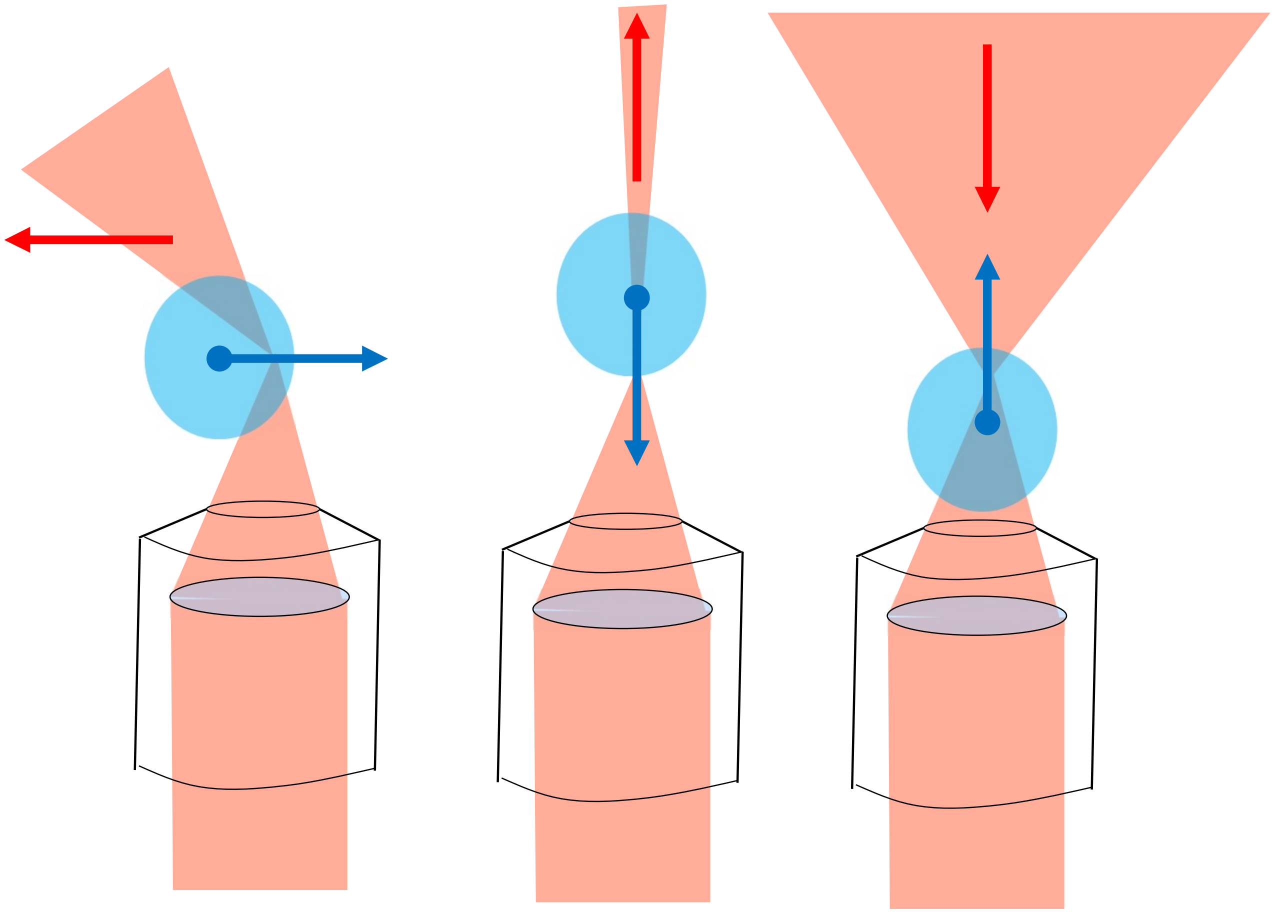


⇨ Horloge atomique

https://fr.wikipedia.org/wiki/Refroidissement_Doppler

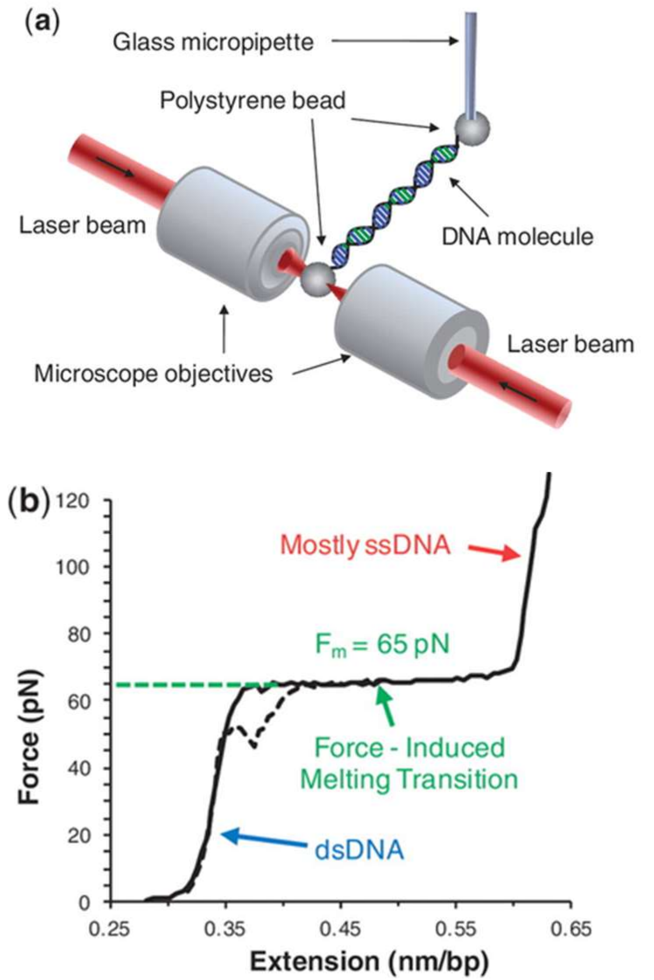
Optical tweezer: principe et application

Principe: conservation de l'impulsion



La bille diélectrique est repoussée vers le point focal

Recherche sur l'ADN



Nucleic Acids Research, 2012, Vol. 40, No. 11 4925–4932

Résumé pour les photons

Amplitude:

$$\mu(\vec{x},t)$$

$$\mu = \begin{array}{l} E_x, E_y, E_z \\ D_x, D_y, D_z \\ B_x, B_y, B_z \\ H_x, H_y, H_z \\ \varphi, A_x, A_y, A_z \end{array}$$

Relation de dispersion:

$$E^2 = c^2 \cdot \left(P_x^2 + P_y^2 + P_z^2\right)$$

Equation d'onde de Maxwell:

$$\frac{\partial^2}{\partial(ct)^2}\mu = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\mu$$

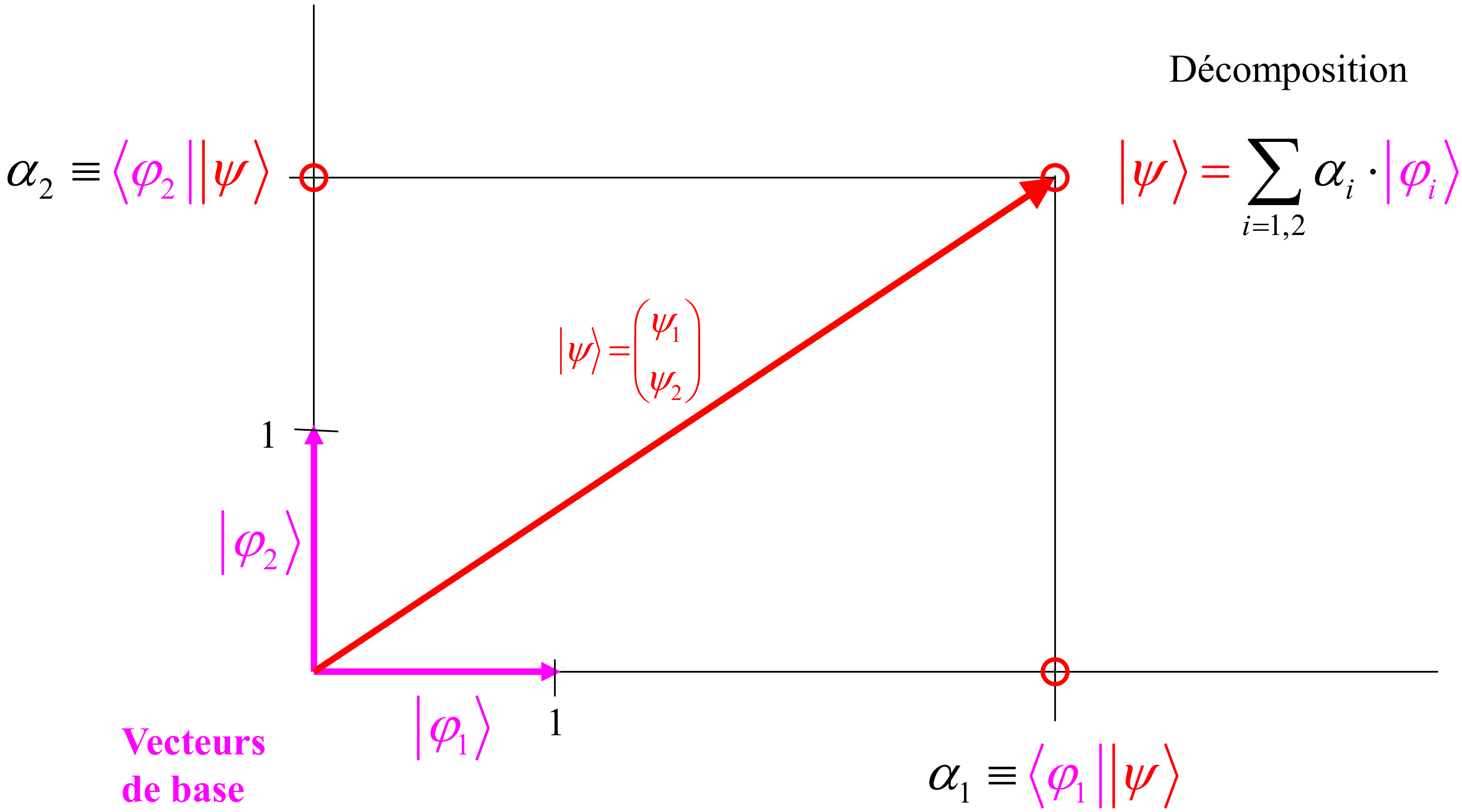
Paramètres onde-particule:

$$\begin{pmatrix} E \\ \vec{P} \end{pmatrix} = \hbar \cdot \begin{pmatrix} \omega \\ \vec{K} \end{pmatrix}$$

Superpositions et

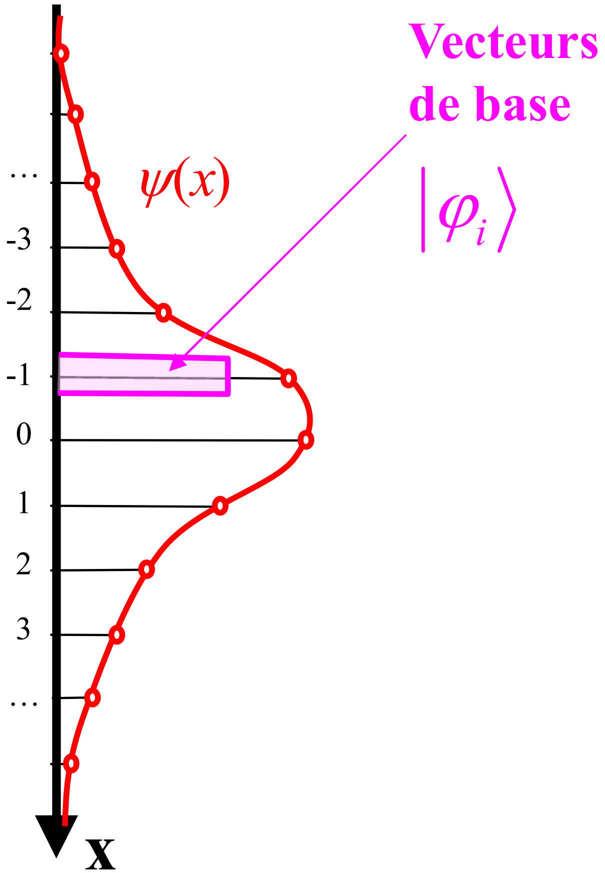
Transformée de Fourier

Algèbre linéaire et décomposition



Décomposition et produit scalaire

$$|\psi(x)\rangle = \begin{pmatrix} \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ \psi_{-3} \\ \psi_{-2} \\ \psi_{-1} \\ \psi_0 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \cdots \\ \cdots \end{pmatrix}$$



i= -n ,..+n

Conjugué complexe

Produit scalaire:

$$\alpha_i \equiv \langle \varphi_i || \psi \rangle = \int \varphi_i^*(x) \cdot \psi(x) \cdot dx$$

Décomposition

$$|\psi\rangle = \sum_{i=-n}^{+n} \alpha_i \cdot |\varphi_i\rangle$$

Propagation d'un signal optique «paquet d'ondes gaussiennes»

et

incertitudes «minimales»

Principe général de calcul de propagation

1) Déterminer les modes globaux normés du système et leurs fréquences ω_n (énergies E_n)

2) Projeter le mode d'entrée (au temps t=0) sur ces modes globaux (produit scalaire entre le mode d'entrée et chaque mode global)

3) Propager chaque mode global dans le temps t>0 avec sa fréquence propre ω_n

4) Additionner (laisser interférer) tous les modes propres après leur propagation.

PAB

Signal dans le vide:
Modes globaux = modes de Fourier

Modes de Fourier: $\left|\varphi_n\right\rangle \cong e^{iK_n x}$

Transformée de Fourier

Coefficients de Fourier: $\boxed{\alpha_{K_n} \equiv \left\langle \varphi_n \middle|\middle| \psi \right\rangle \cong \int e^{-iK_n x} \cdot \psi(x) \cdot dx}$

$\Rightarrow$ $$\left|\psi\right\rangle = \sum_n \alpha_{K_n} \cdot \left|\varphi_n\right\rangle$$

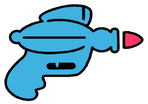
Transformée de Fourier inverse

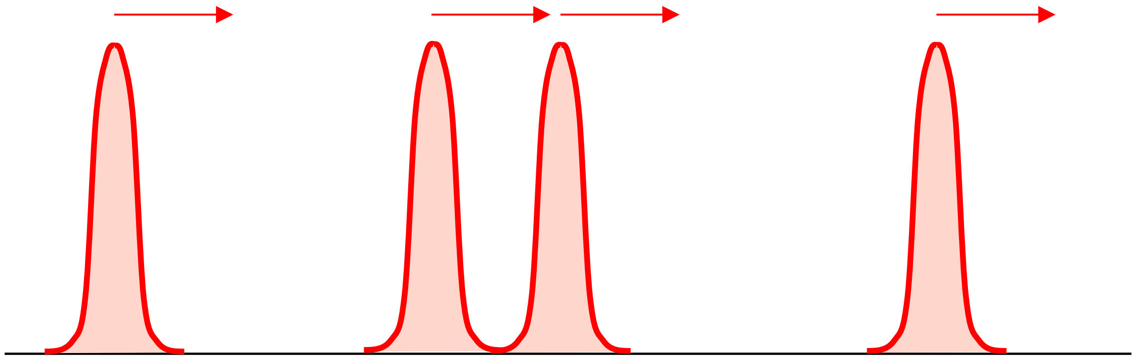
$$\boxed{\left|\psi\right\rangle \cong \int_K \alpha_K \cdot e^{iKx} \cdot dK}$$

PAB

Paquet d’ondes : «bit optique» dans le vide

Single photon





λ_0

Porteuse

$$\lambda = 600\ nm \cdots (\text{rouge}) \quad \Rightarrow \nu \cong 500\ THz$$

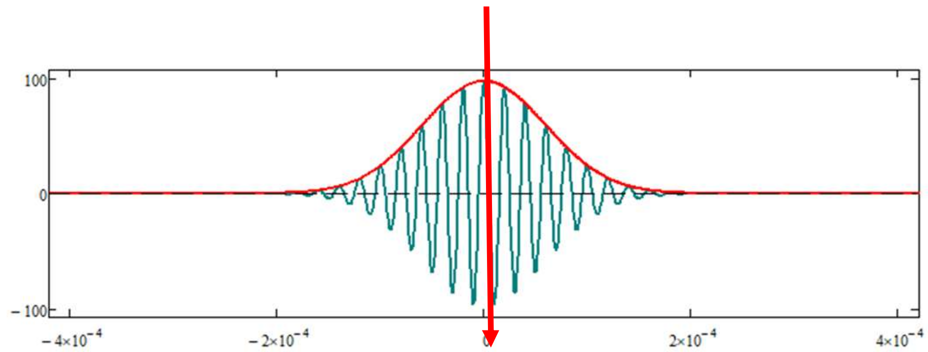
Bit optique

Amplitude en t=0

Enveloppe

$$u_0(x,0) = \left(\frac{1}{\pi \cdot \sigma^2}\right)^{1/4} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{iK_0 x}$$

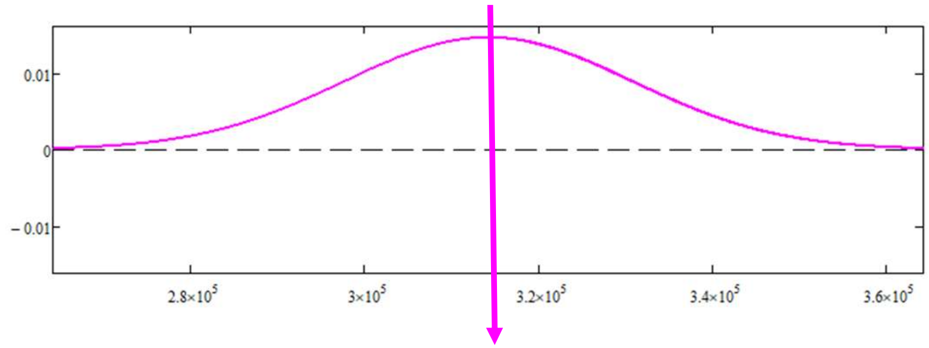
Porteuse



x=0

1-2)Transformée de Fourier en t=0

$$\alpha(K,0) = \left(4\pi\sigma^2\right)^{1/4} \cdot e^{-\frac{\sigma^2 (K-K_0)^2}{2}}$$



$K=K_0$

Variance en x: $\sigma_x^2 = \sigma^2$

Variance en K: $\sigma_K^2 = 1/\sigma^2$

Propagation du bit optique

3) Propagation dans l'espace de Fourier

$$\alpha(K,t) = \left(4\pi\sigma^2\right)^{1/4} \cdot e^{-\frac{\sigma^2 (K-K_0)^2}{2}} \cdot e^{-i\omega t} \quad avec \quad \omega = K \cdot c$$

Propagation

4) Retour dans l'espace x par transformée de Fourier inverse:

Vitesse de groupe = c

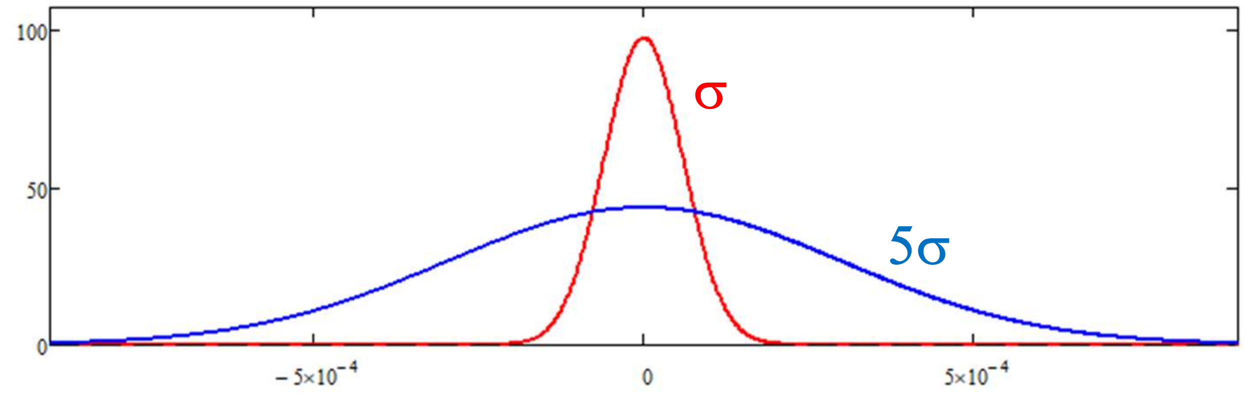
Vitesse de phase = c

$$u(x,t) = \left(\frac{1}{\pi \cdot \sigma^2}\right)^{1/4} \cdot e^{-\frac{(x-ct)^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{iK_0 (x-ct)}$$

Influence de l’enveloppe

Variance en x:

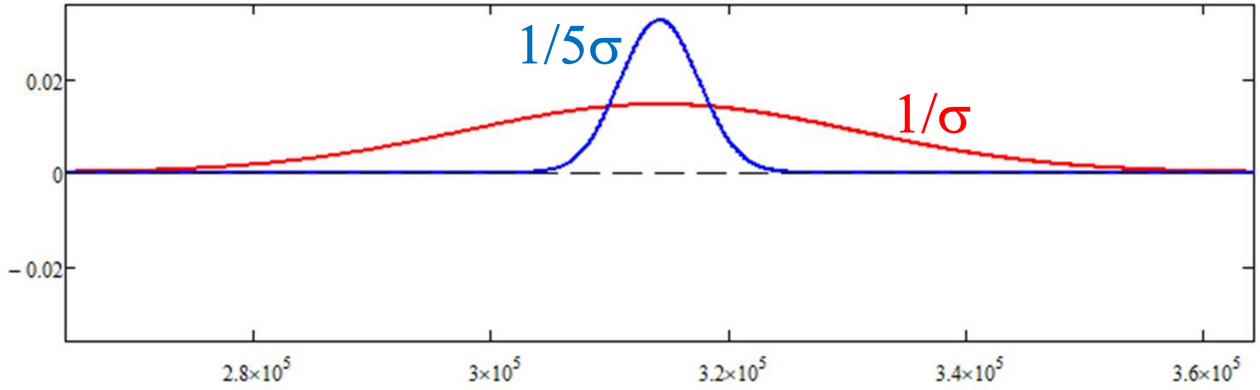
$$\sigma_x^2 = \sigma^2$$



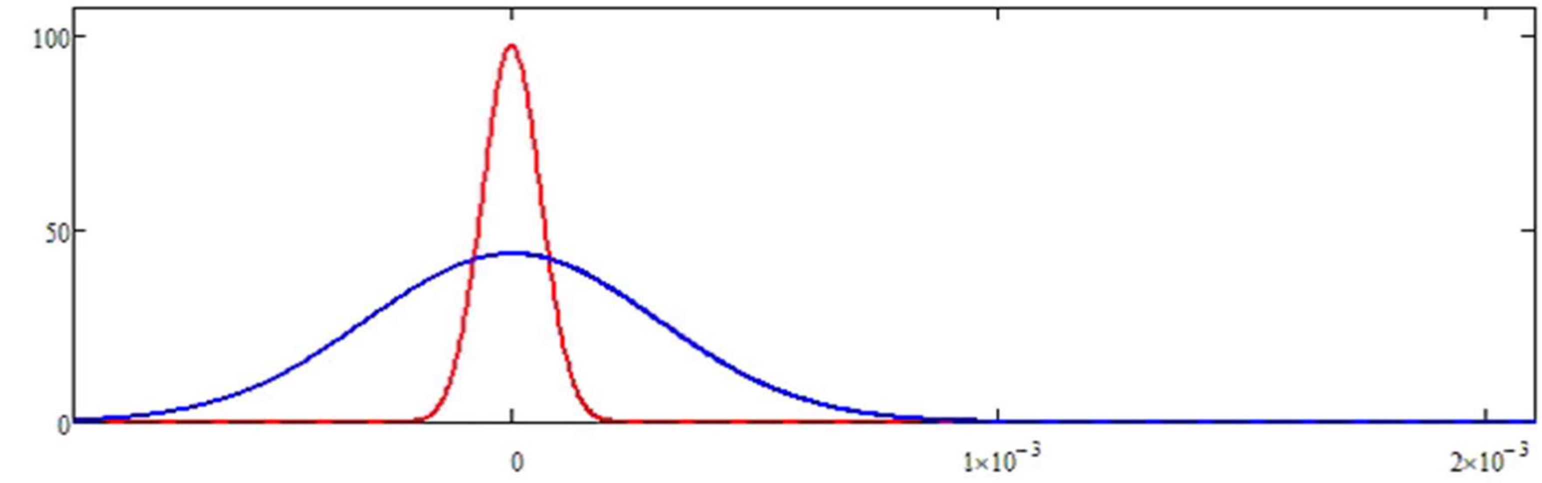
$$\Rightarrow \boxed{\sigma_x \cdot \sigma_K = 1}$$

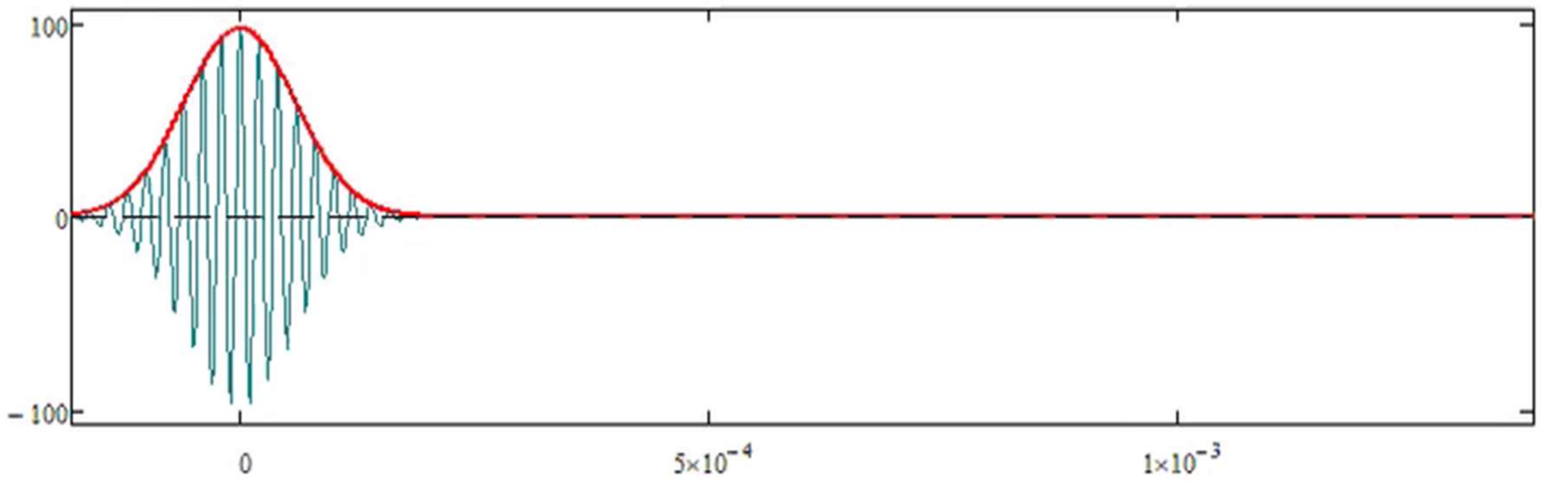
Variance en K:

$$\sigma_K^2 = 1/\sigma^2$$



Propagation du bit optique





Rappel de math: Moyenne, variance et écart type

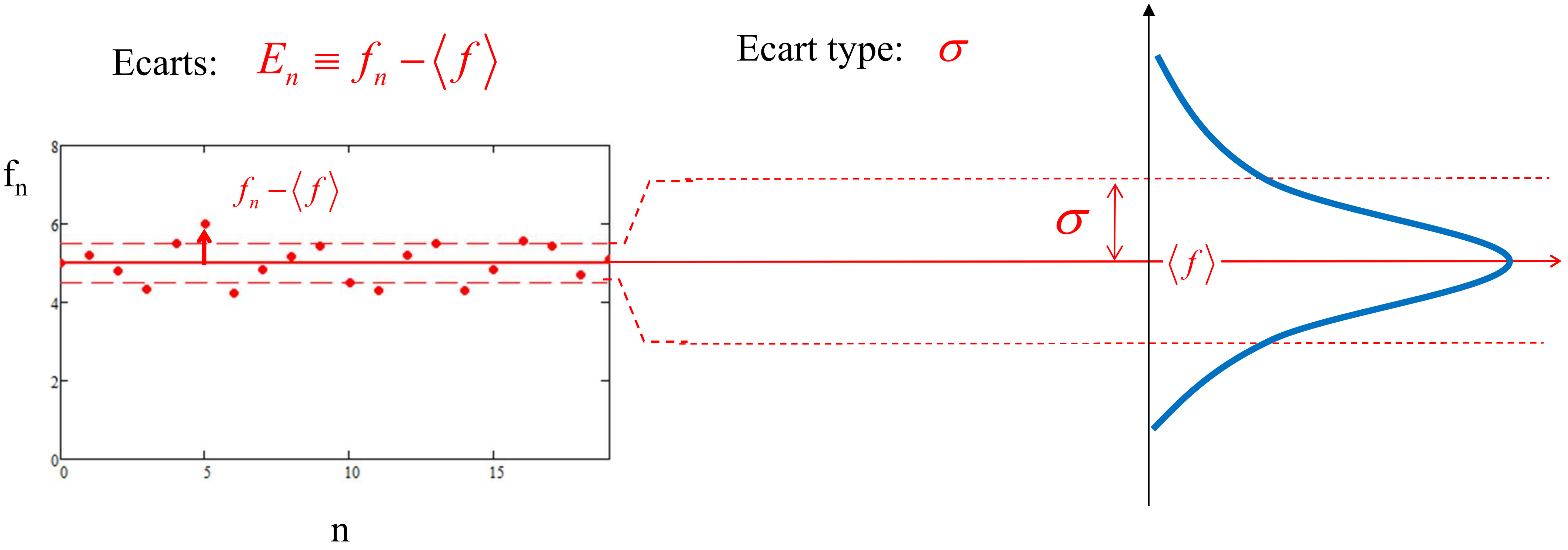
$$\langle f \rangle \equiv \frac{1}{N}\sum_n f_n$$

Variance: $$\sigma^2 \equiv \langle E_n^2 \rangle = \frac{1}{N}\cdot\sum_n \left(f_n - \langle f \rangle\right)^2$$

$$= \left\langle \left(f_n - \langle f \rangle\right)^2 \right\rangle = \langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2$$

Ecarts: $E_n \equiv f_n - \langle f \rangle$

Ecart type: σ



Valeurs moyennes et incertitudes

Moyenne:

$$\langle x \rangle \equiv \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} u^*(x) \cdot x \cdot u(x) \cdot dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} u^*(x) \cdot u(x) \cdot dx}$$

$$\langle K \rangle \equiv \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}^*(K) \cdot K \cdot \tilde{u}(K) \cdot dK}{\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}^*(K) \cdot \tilde{u}(K) \cdot dK}$$

Second moment:

$$\langle x^2 \rangle \equiv \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} u^*(x) \cdot x^2 \cdot u(x) \cdot dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} u^*(x) \cdot u(x) \cdot dx}$$

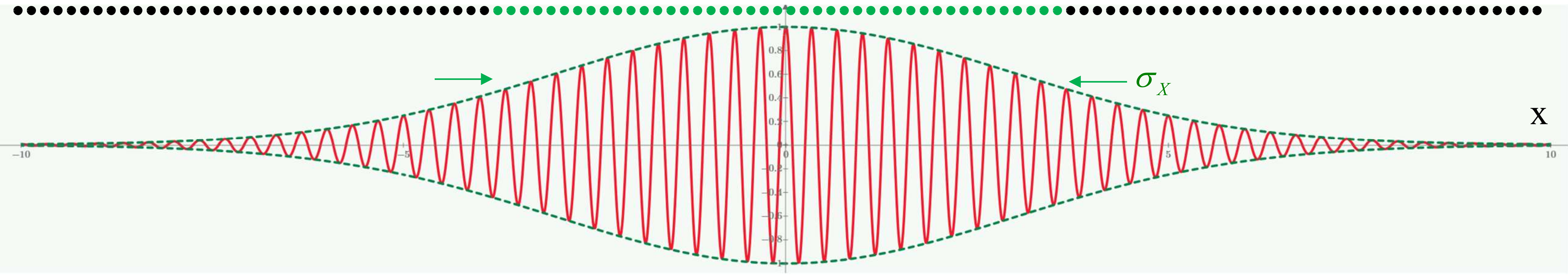
$$\langle K^2 \rangle \equiv \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}^*(K) \cdot K^2 \cdot \tilde{u}(K) \cdot dK}{\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}^*(K) \cdot \tilde{u}(K) \cdot dK}$$

Variance:

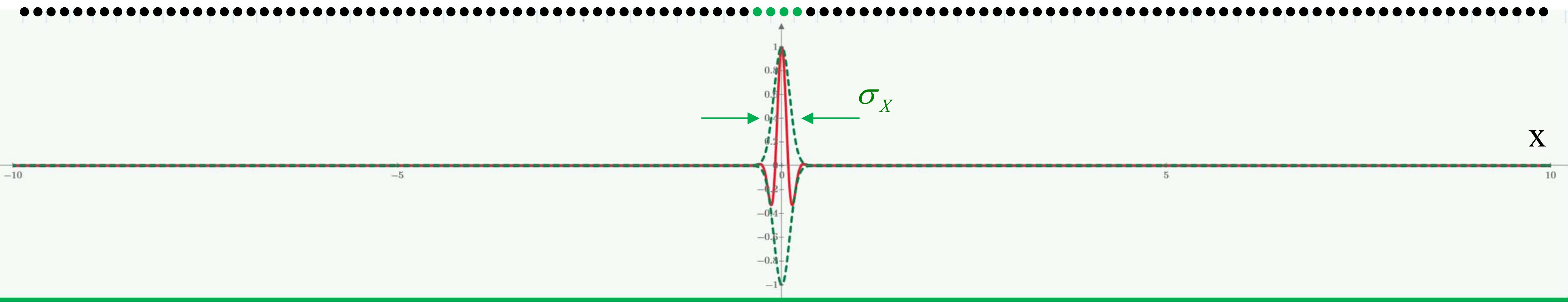
$$\Delta x^2 \equiv \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$$

$$\Delta K^2 \equiv \langle K^2 \rangle - \langle K \rangle^2$$

Incertitudes de Fourier: explication heuristique

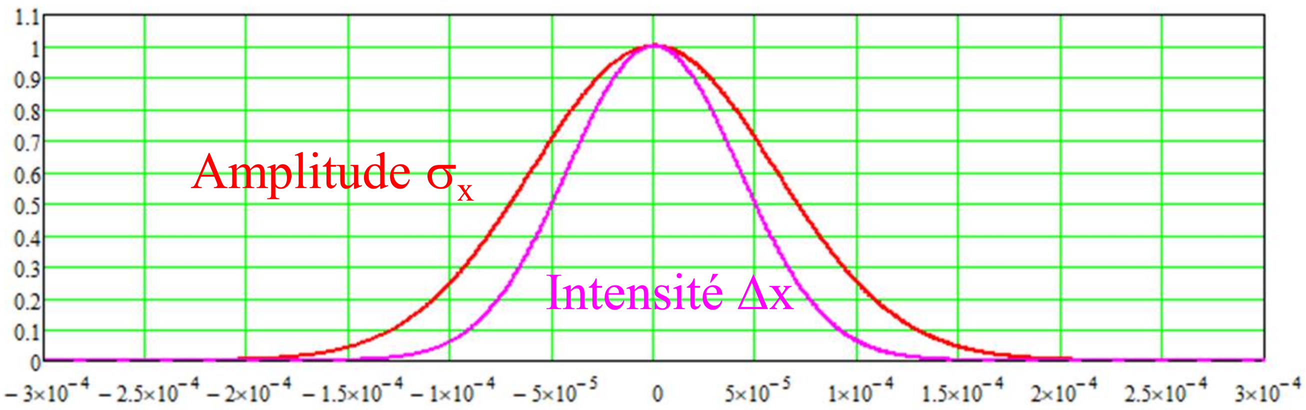


$$\sigma_x \cdot \sigma_K = 1$$



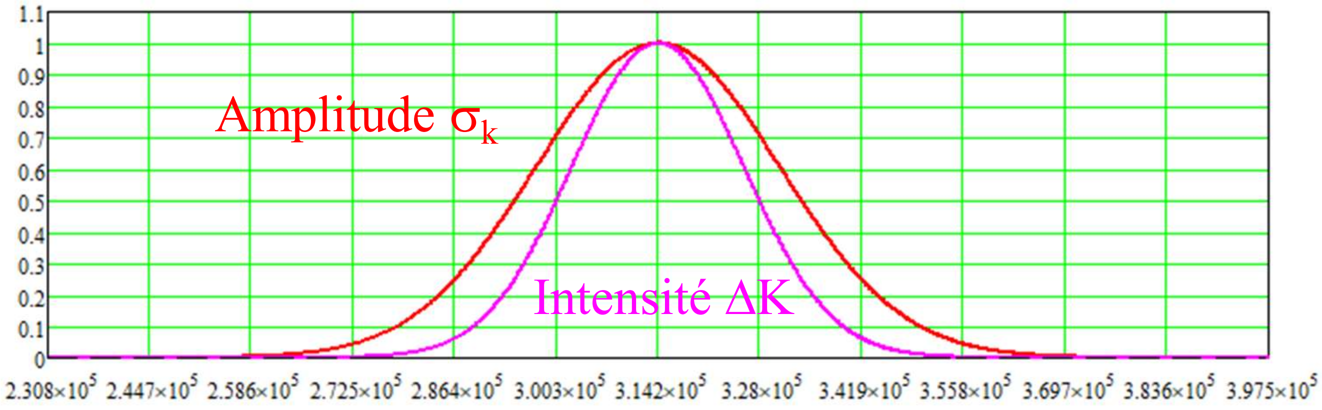
Incertitudes en amplitude ou en intensité

Espace X



$$\sigma_x \cdot \sigma_K = 1$$

Espace K



$$\Delta x \cdot \Delta K = \frac{1}{2}$$

Relation d'incertitudes **sur les intensités** !!:

$$\boxed{\Delta x \cdot \Delta K = \frac{1}{2}}$$

Fonctions Gaussiennes

Incertitudes de Fourier «minimales»

Fourier

$$\Delta x \cdot \Delta K = \frac{1}{2}$$

$$\Delta t \cdot \Delta \omega = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow$$

Heisenberg

$$\boxed{\Delta x \cdot \Delta p = \frac{\hbar}{2} \qquad \Delta t \cdot \Delta E = \frac{\hbar}{2}}$$

Fonctions Gaussiennes

Relation d'incertitudes **sur les intensités** !!

Fourier

$$\Delta x \cdot \Delta K \geq \frac{1}{2}$$

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq \frac{1}{2}$$

$$\Longrightarrow$$

Heisenberg

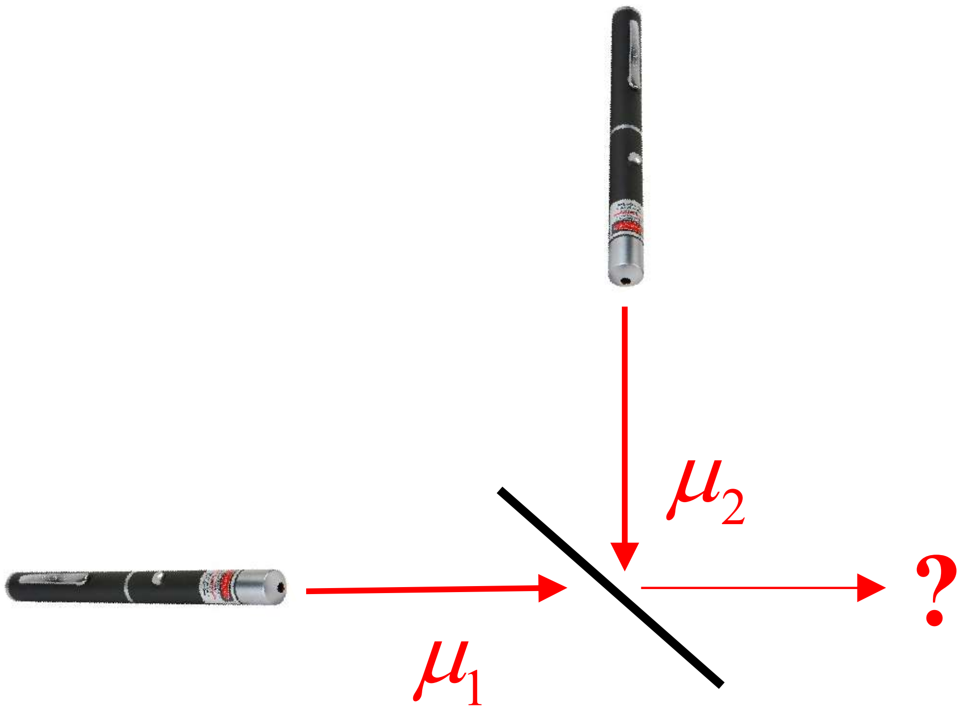
$$\boxed{\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \qquad \Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}}$$

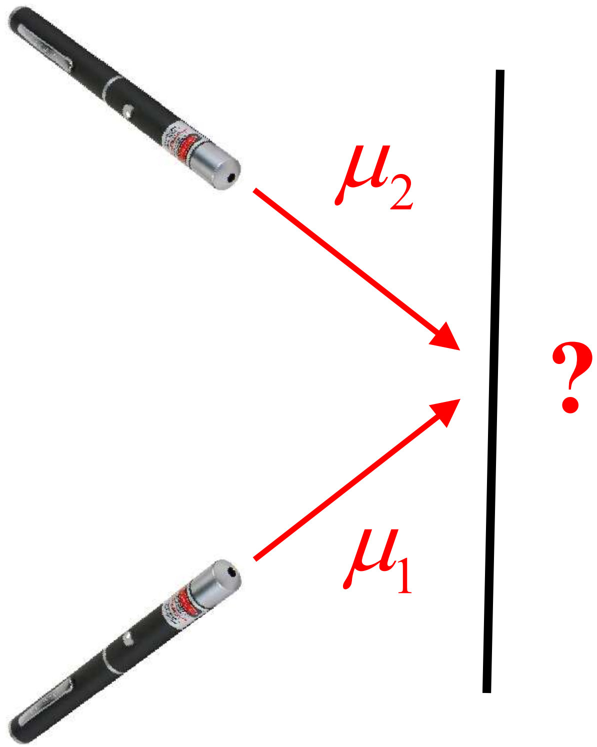
Cohérence

ou

incohérence des ondes

Mélange de deux ondes lumineuses





Superposition de faisceaux lumineux

Amplitudes:

$$\mu_{tot} = \mu_1 + \mu_2$$

Cohérents

Intensité:

Interférences

$$I_{tot} = |\mu_{tot}|^2 = |\mu_1 + \mu_2|^2 = |\mu_1|^2 + |\mu_2|^2 + 2|\mu_1||\mu_2|\cos(\Delta\varphi)$$

Incohérents

Intensité:

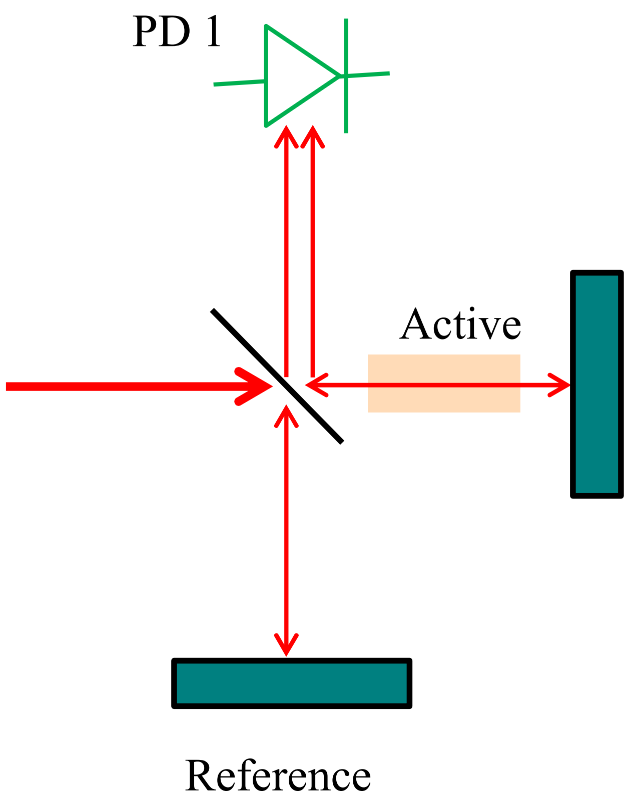
Sans interférences

$$I_{tot} = |\mu_{tot}|^2 = |\mu_1 + \mu_2|^2 = |\mu_1|^2 + |\mu_2|^2 = I_1 + I_2$$

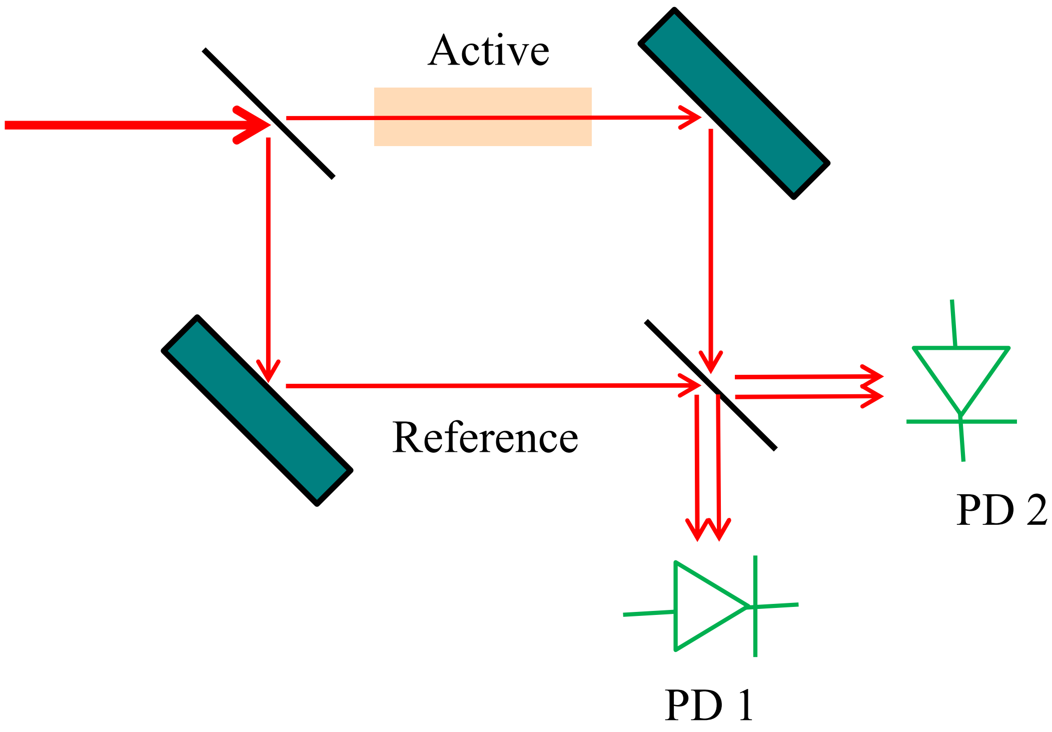
Interferometers

Very long coherence length

Michelson

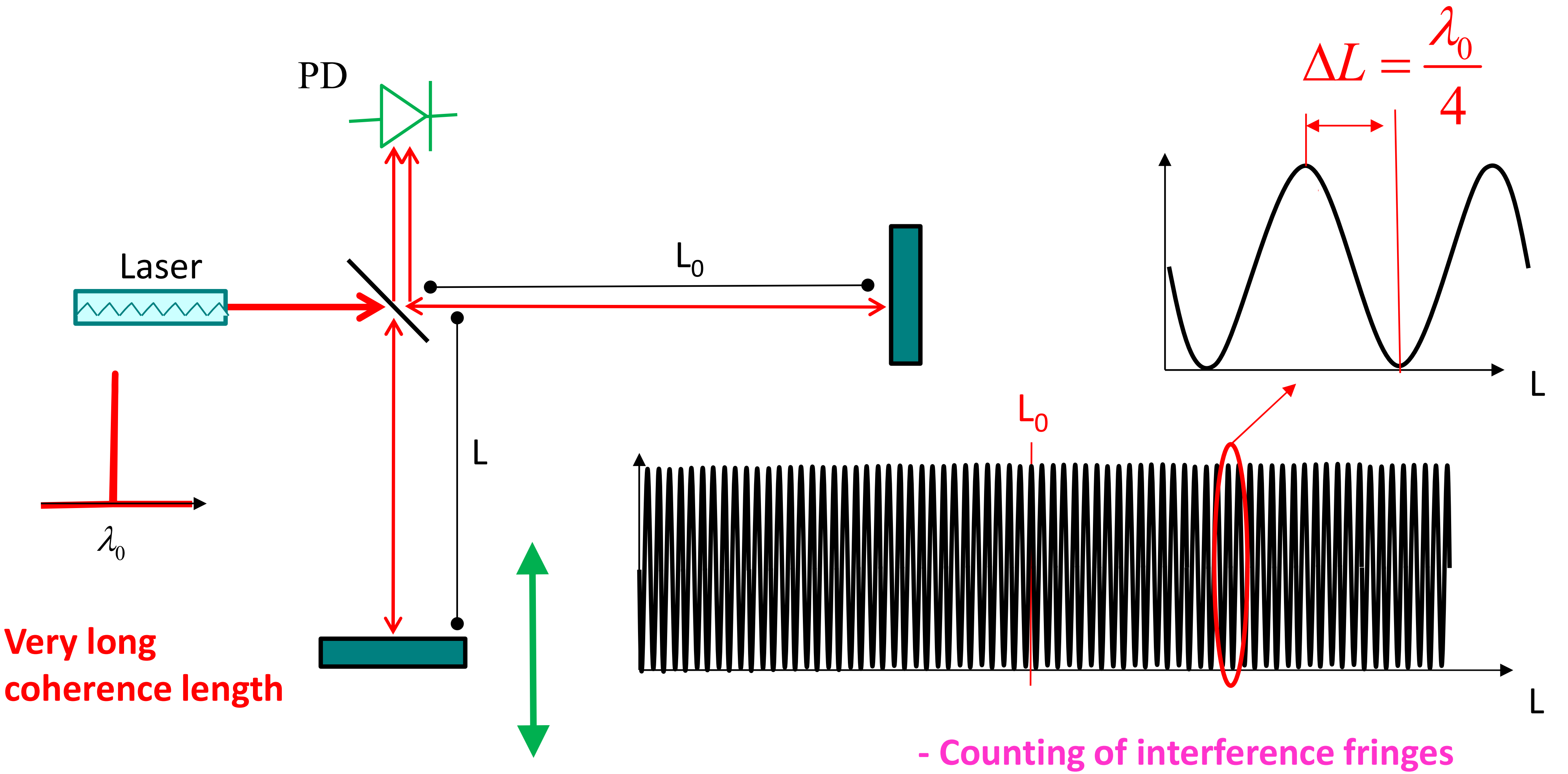


Mach-Zehnder



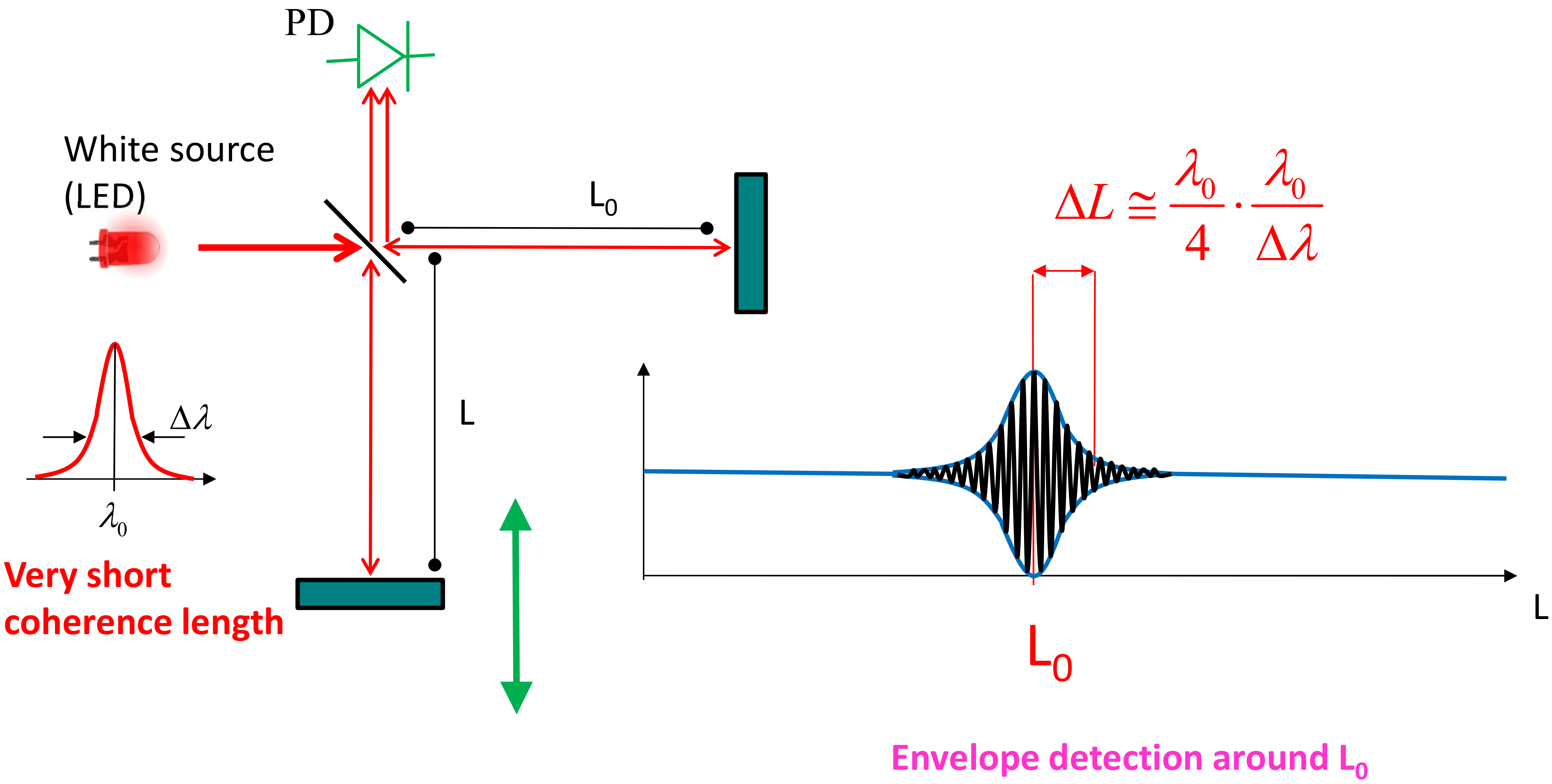
"Homodyne"

Michelson interferometer



- Counting of interference fringes
- High resolution in a single fringe

Optical Coherence Tomography (OCT)



Temps et longueur de cohérence

Temps de cohérence:

Temps nécessaire pour «perdre» la relation de phase entre les deux ondes lumineuses qui interfèrent

$$\tau_c = \frac{1}{\Delta \nu} = \frac{\lambda^2}{c \cdot \Delta \lambda}$$

Longueur de cohérence:

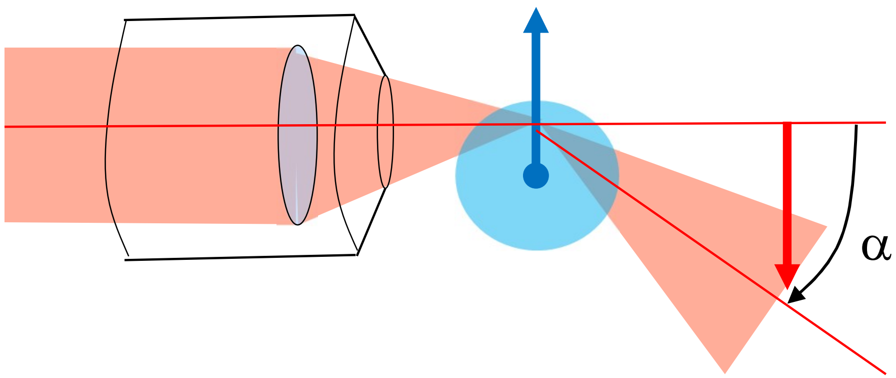
Distance parcourue par la lumière durant le temps de cohérence

$$L_c = c \cdot \tau_c = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

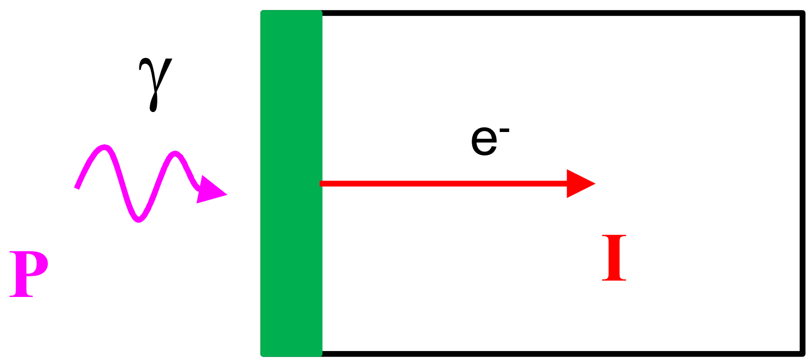
Exercice 1.1: optical tweezer

Estimez l'intensité optique minimale permettant de soulever la bille.

Diamètre	D=2.5um
Densité	$\rho=10^3$ Kg/m^3
Angle de déflection	$\alpha=10^o$



Exercice 1.2: PMT et photo-émission



On envoie P=1 mW de lumière sur une plaque de métal (fonction d'extraction ϕ_m=1.35 eV). Seulement 25% des photons sont convertis en électrons si leur énergie est suffisante.

Calculez le courant I récolté en fonction de la longueur d'onde de la lumière.

PAB

Exercice 1.3: Beam splitter: Single photon

https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/SinglePhotonLab/SinglePhotonLab.html

Avec une émission d'un seul photon à la fois, quelle est la probabilité :
- de déclencher SPD3
- de déclencher à la fois SPD1 et SPD2
- de déclencher SPD1 uniquement
- de déclencher SPD2 uniquement

PAB

Exercice 1.4: Mach Zehnder interferometer: Single photon

https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/SinglePhotonLab/SinglePhotonLab.html

Avec un interféromètre totalement symétrique et l'émission d'un seul photon à la fois, quelle est la probabilité:

- de déclencher à la fois SPD1 et SPD2
- de déclencher SPD1 uniquement
- de déclencher SPD2 uniquement