

Dualité Onde Corpuscule

Philippe Ribière

Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

Dualité Onde Corpuscule

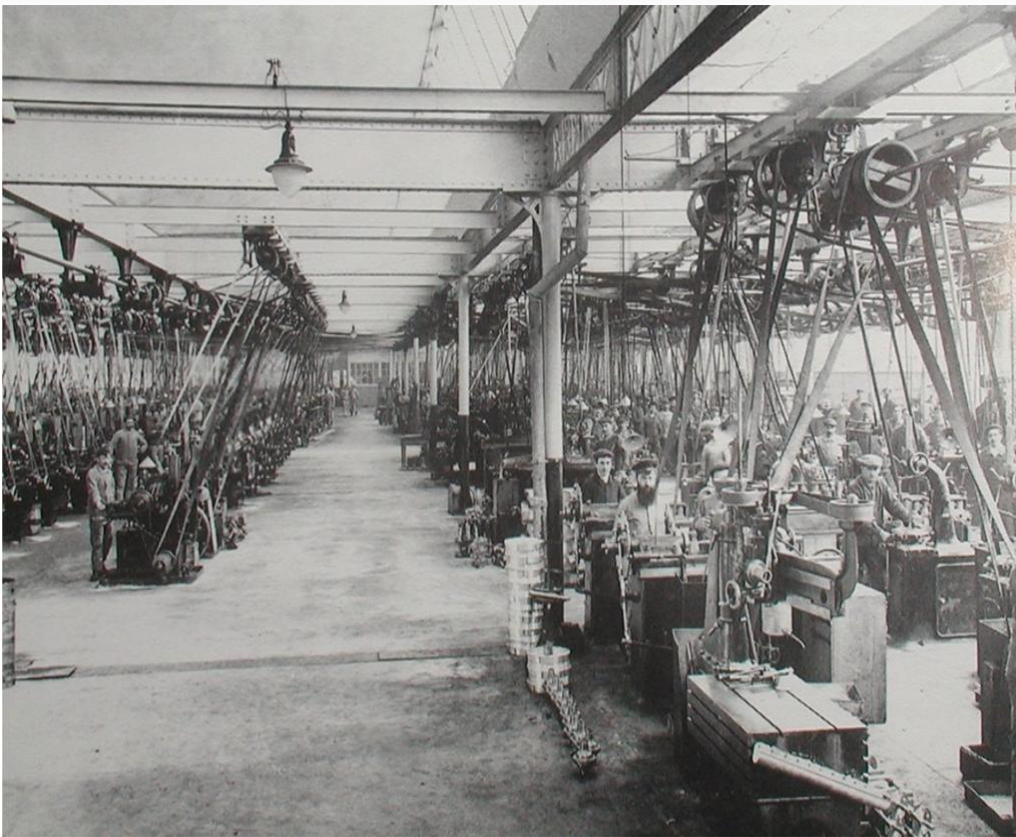
1. Au début du XXème siècle



Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

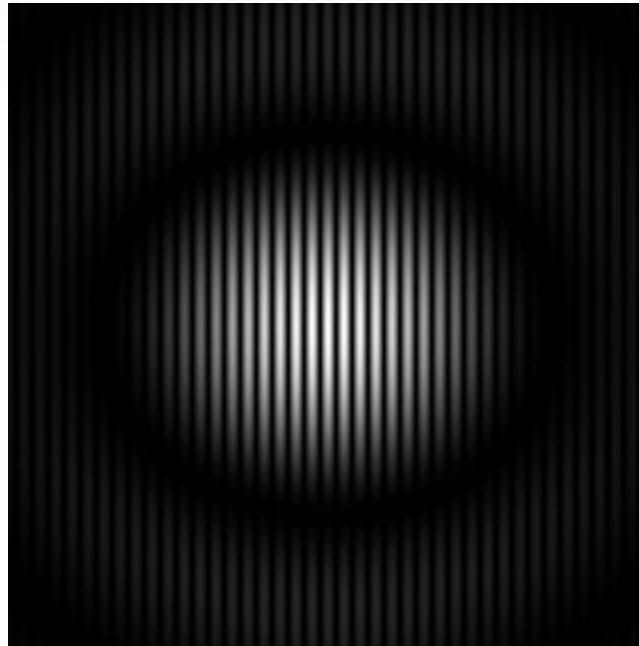
La mécanique (classique) est connue



Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

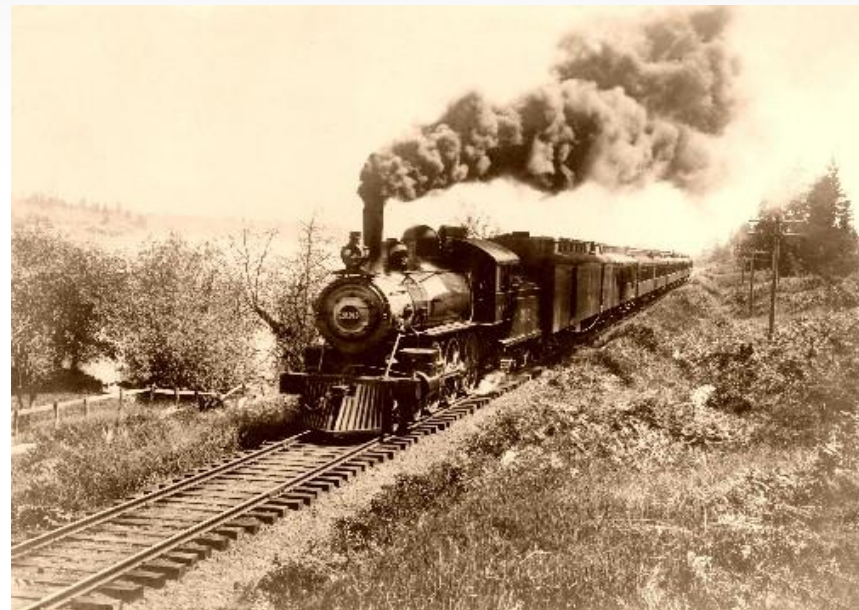
Théorie "complète" de la lumière



Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

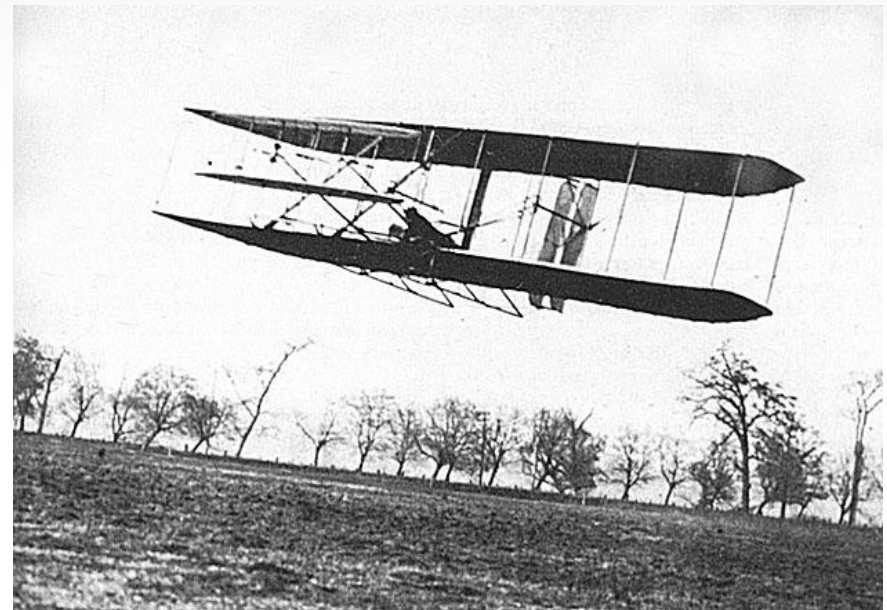
La révolution industrielle est en marche



Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

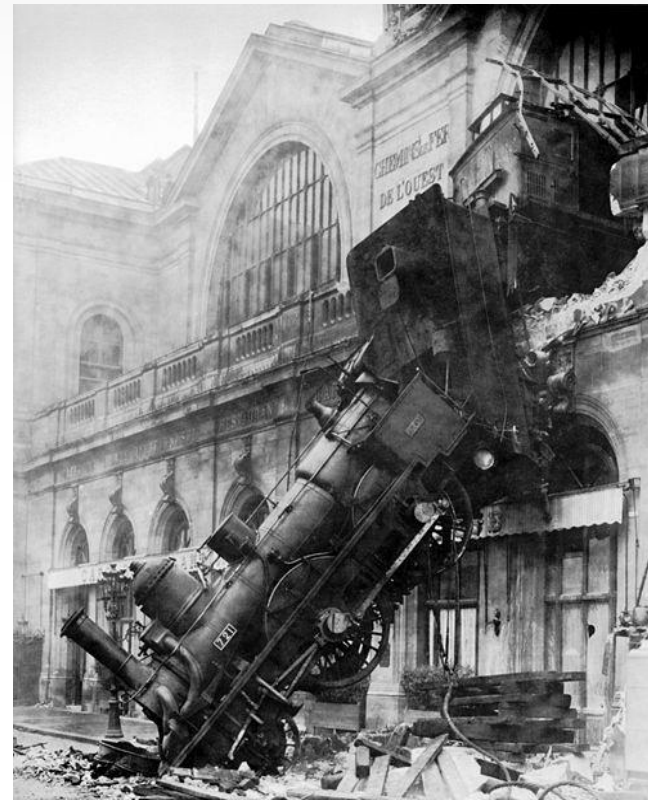
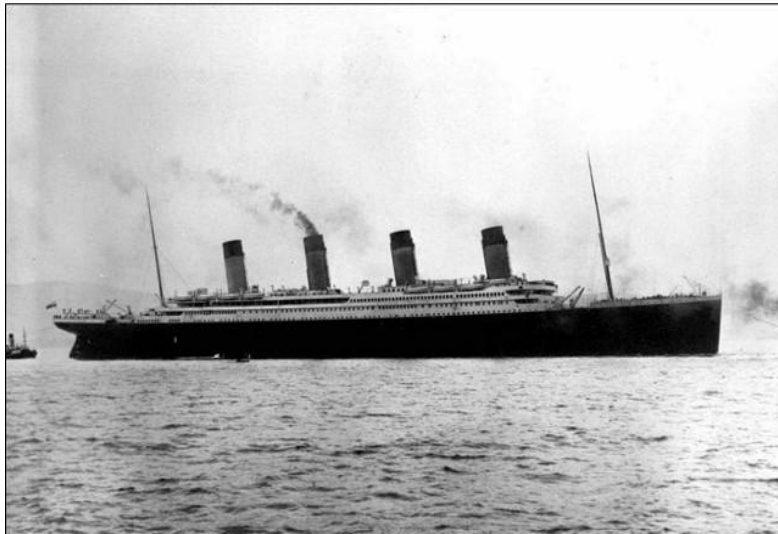
La révolution industrielle est en marche



Dualité Onde Corpuscule

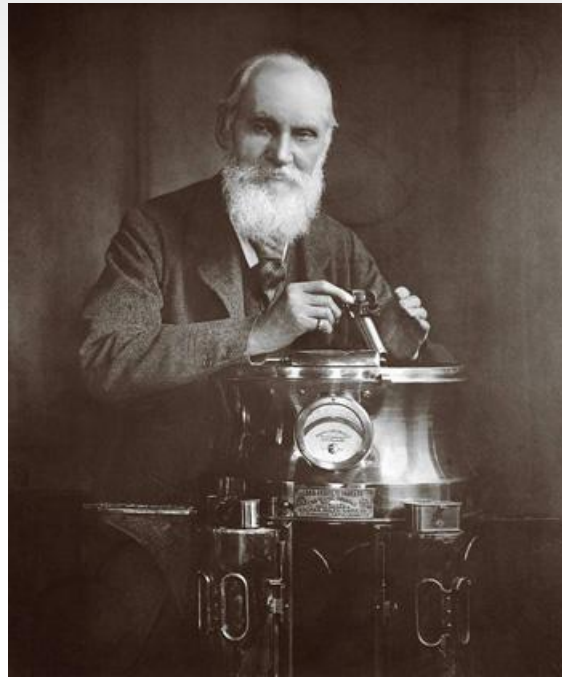
1. Au début du XXème siècle

La révolution industrielle est en marche



Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle



"A part une petite difficulté dans le rayonnement,
la Physique est terminée."

Lord Kelvin

Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

"Dernières difficultés" de la physique

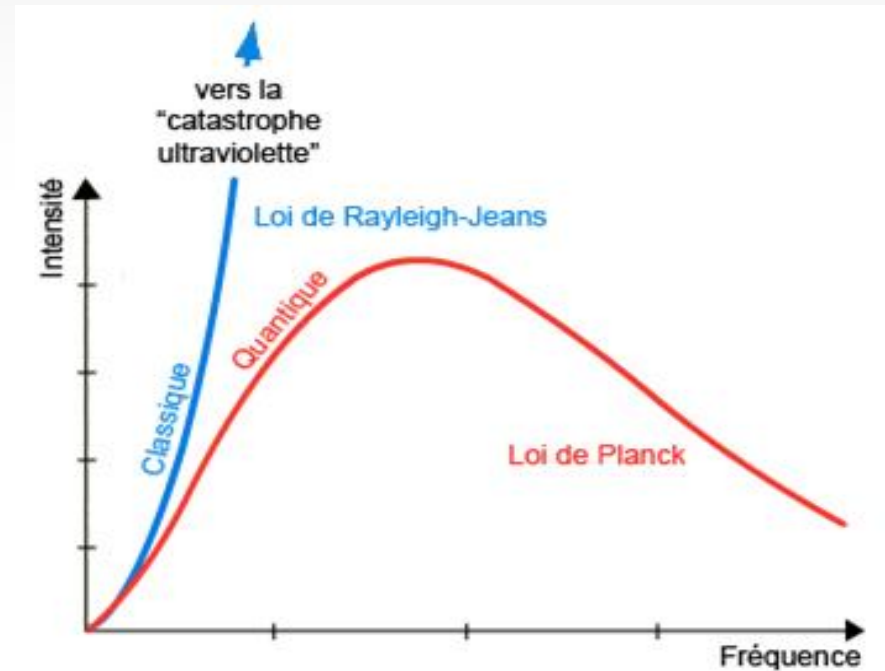


Le spectre du "corps noir"

Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

"Dernières difficultés" de la physique

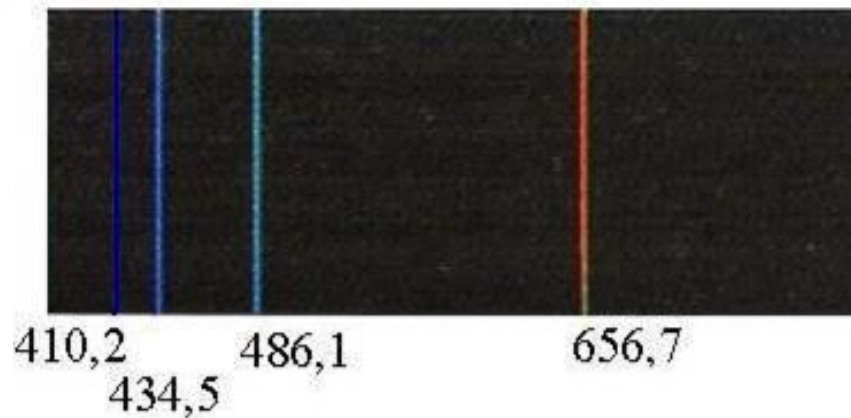


Le spectre du "corps noir"

Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

"Dernières difficultés" de la physique

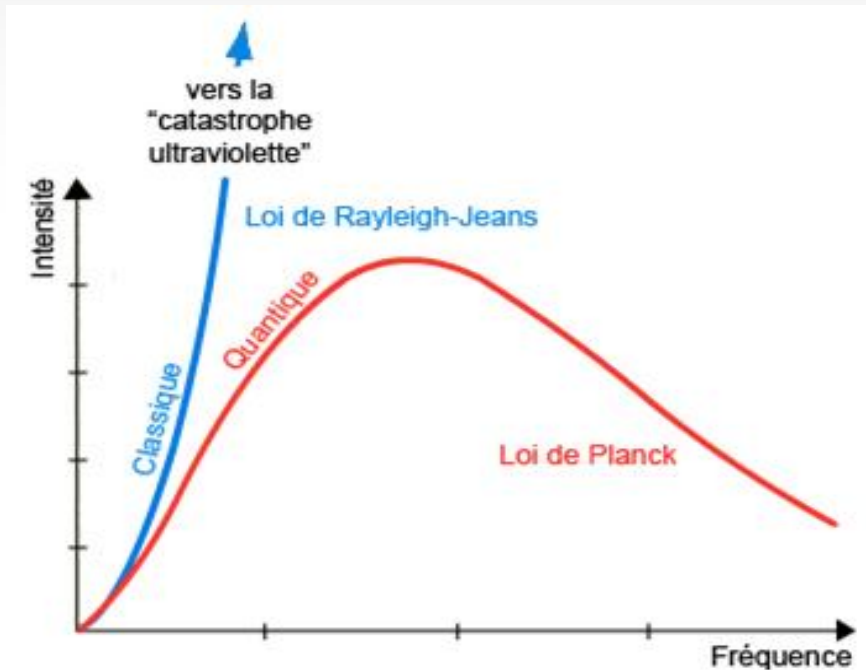


Le spectre discret de l'hydrogène

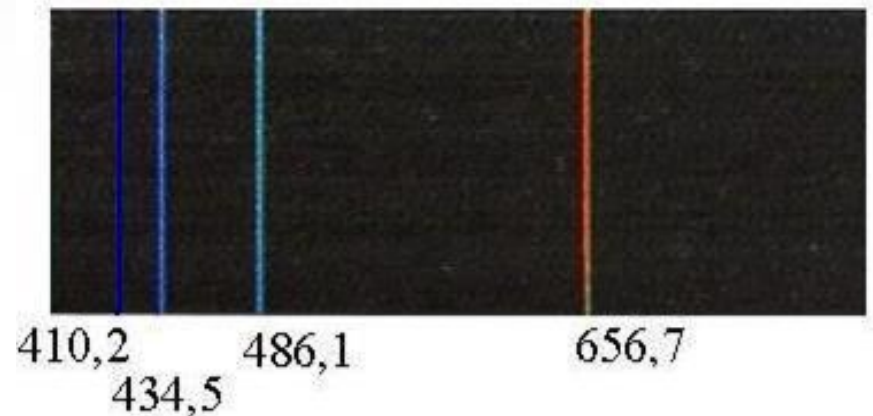
Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

"Dernières difficultés" de la physique



Le spectre du "corps noir"



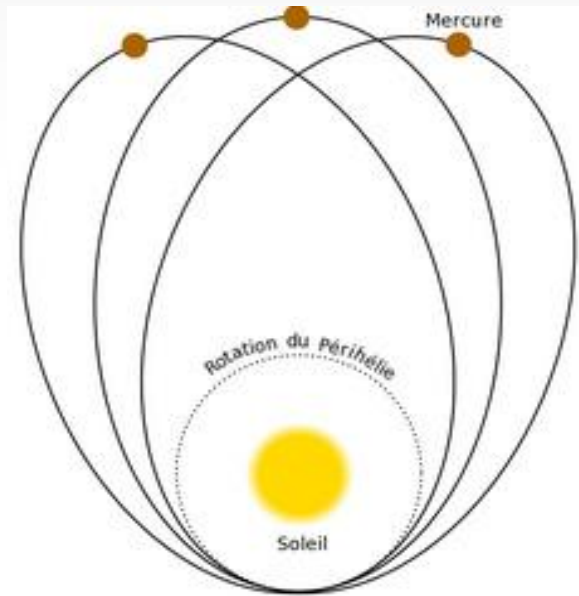
Le spectre de l'hydrogène

Naissance de la mécanique quantique

Dualité Onde Corpuscule

1. Au début du XXème siècle

“Dernières difficultés” de la physique



Naissance de la mécanique relativiste

Dualité Onde Corpuscule

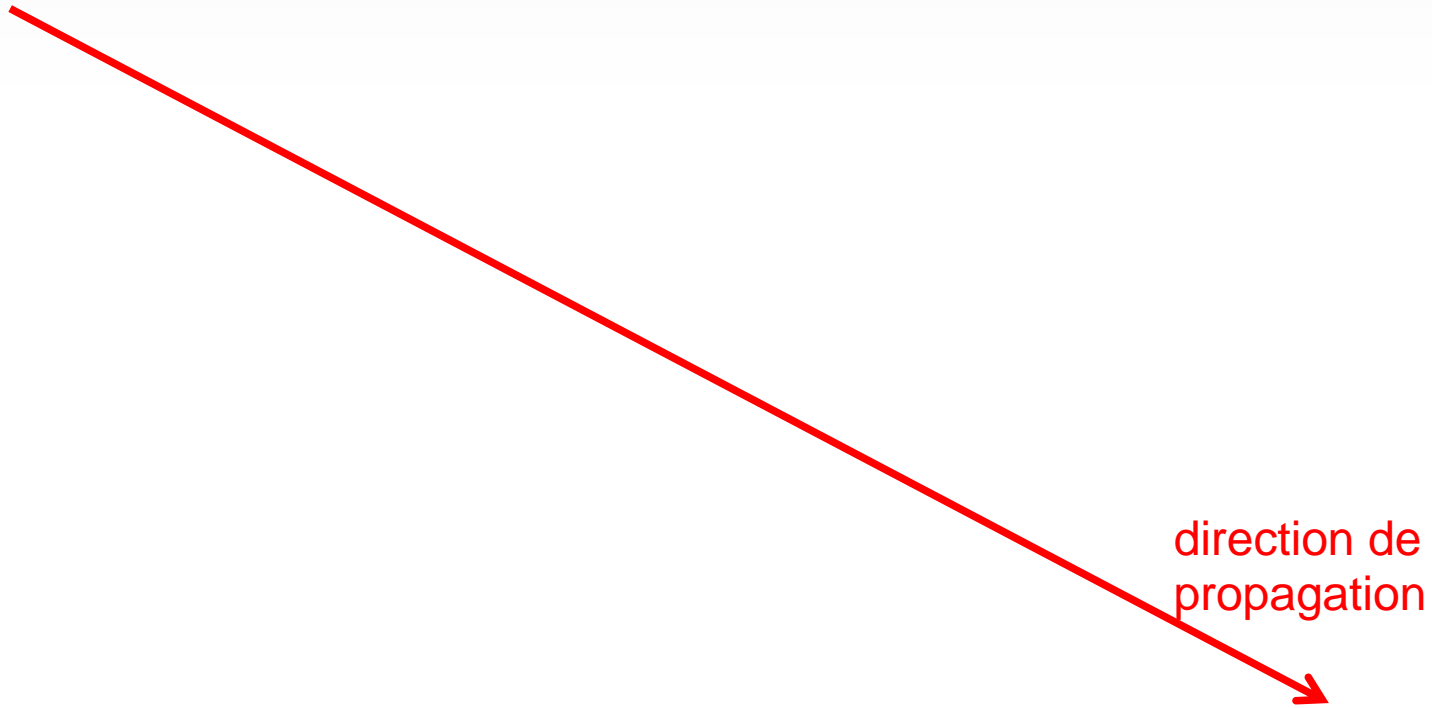
2. L'expérience avec la polarisation

2.1. L'expérience "classique" de Malus

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

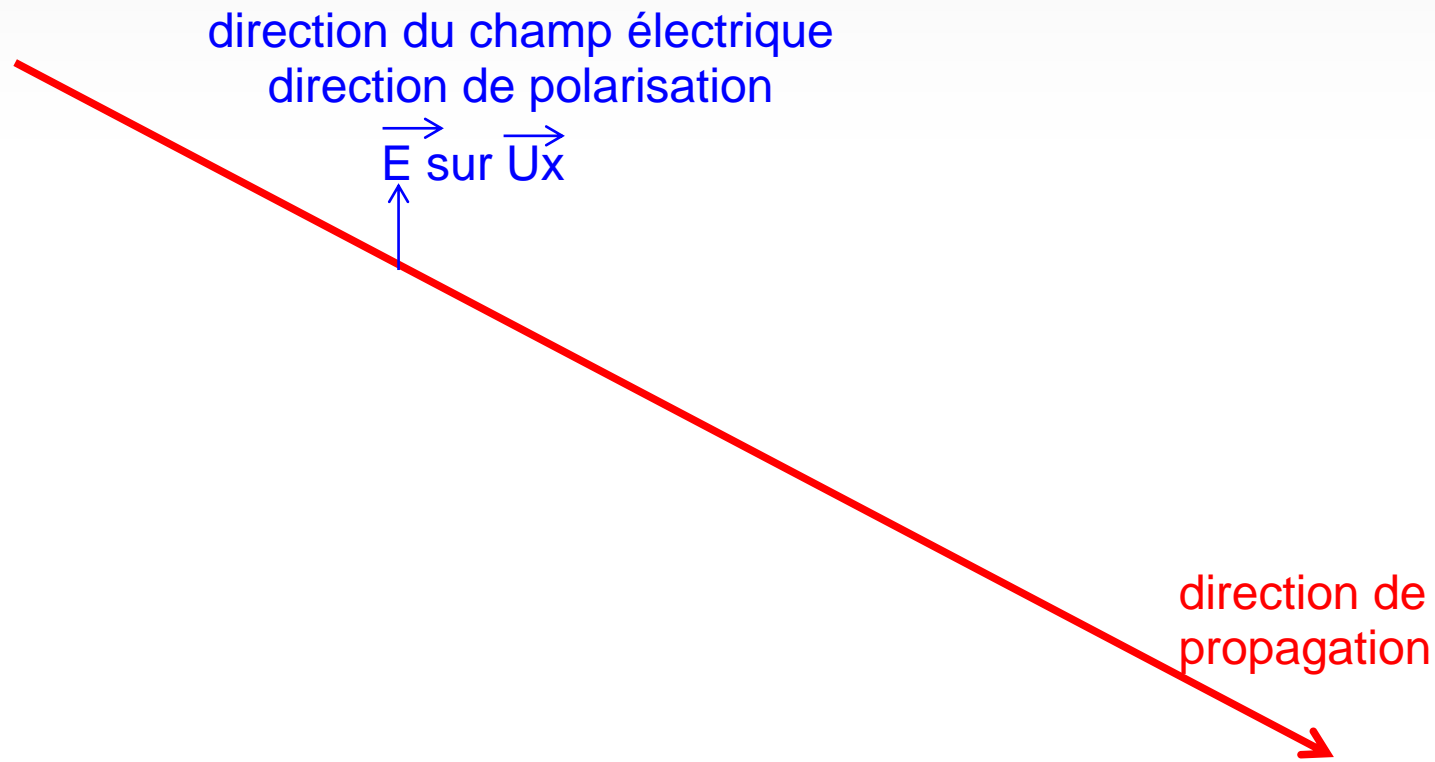
2.1. L'expérience "classique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

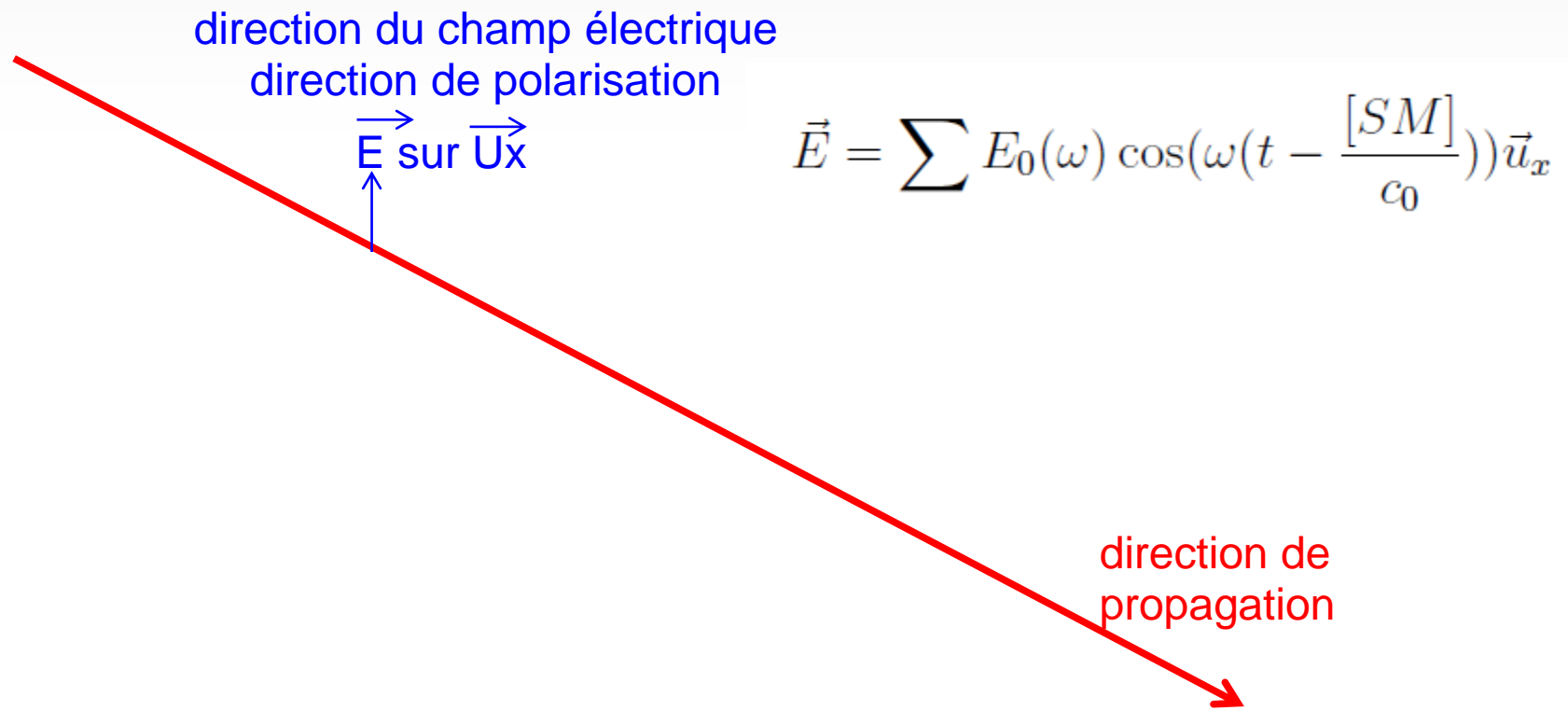
2.1. L'expérience "classique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

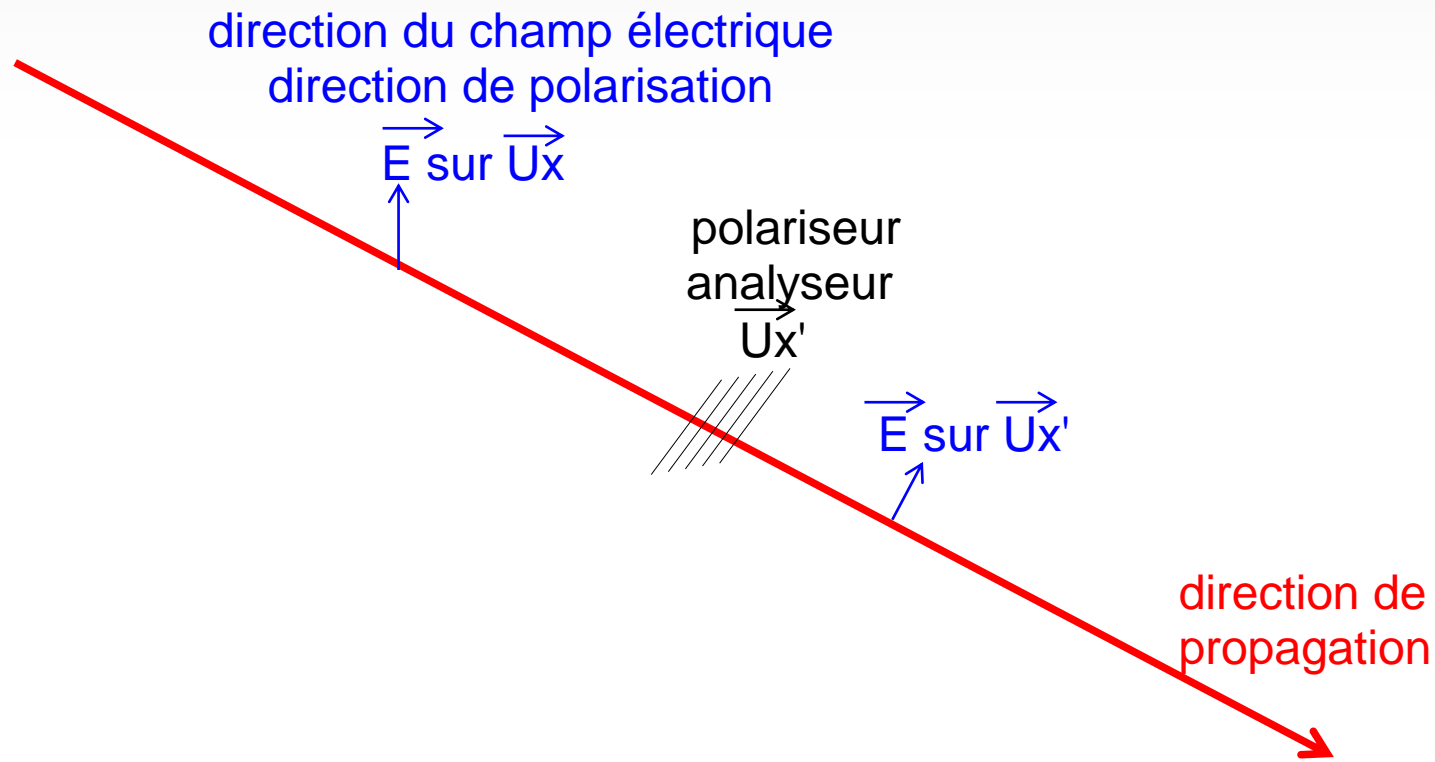
2.1. L'expérience "classique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

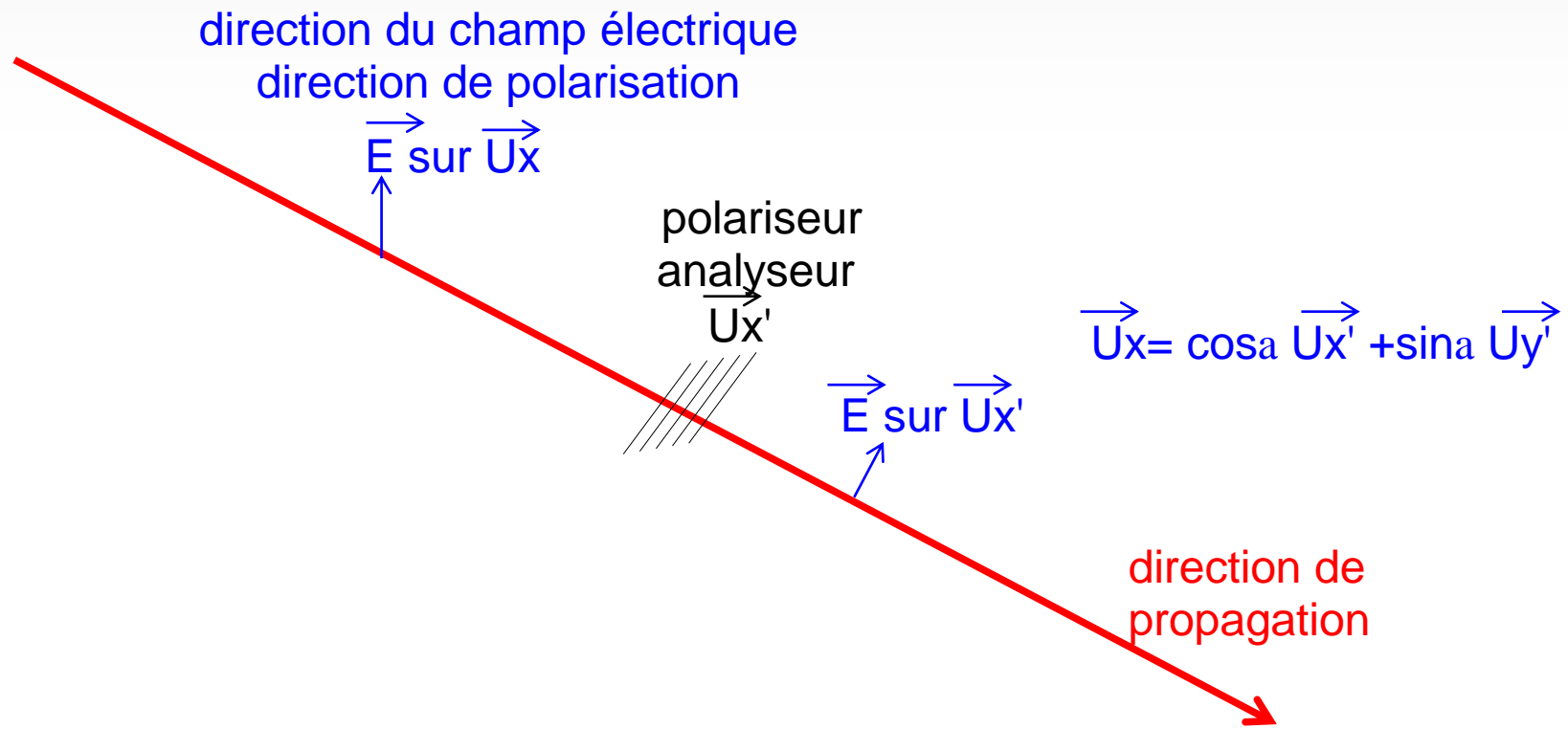
2.1. L'expérience "classique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

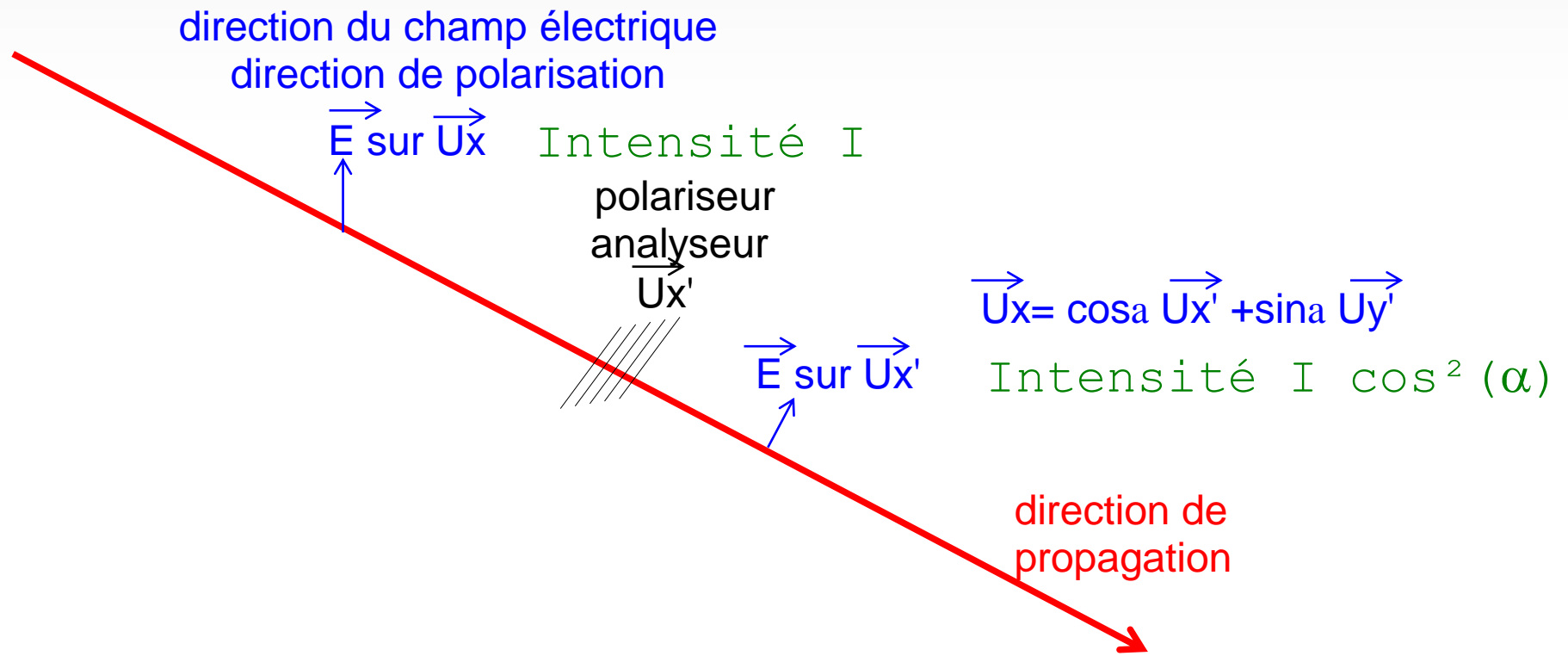
2.1. L'expérience "classique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

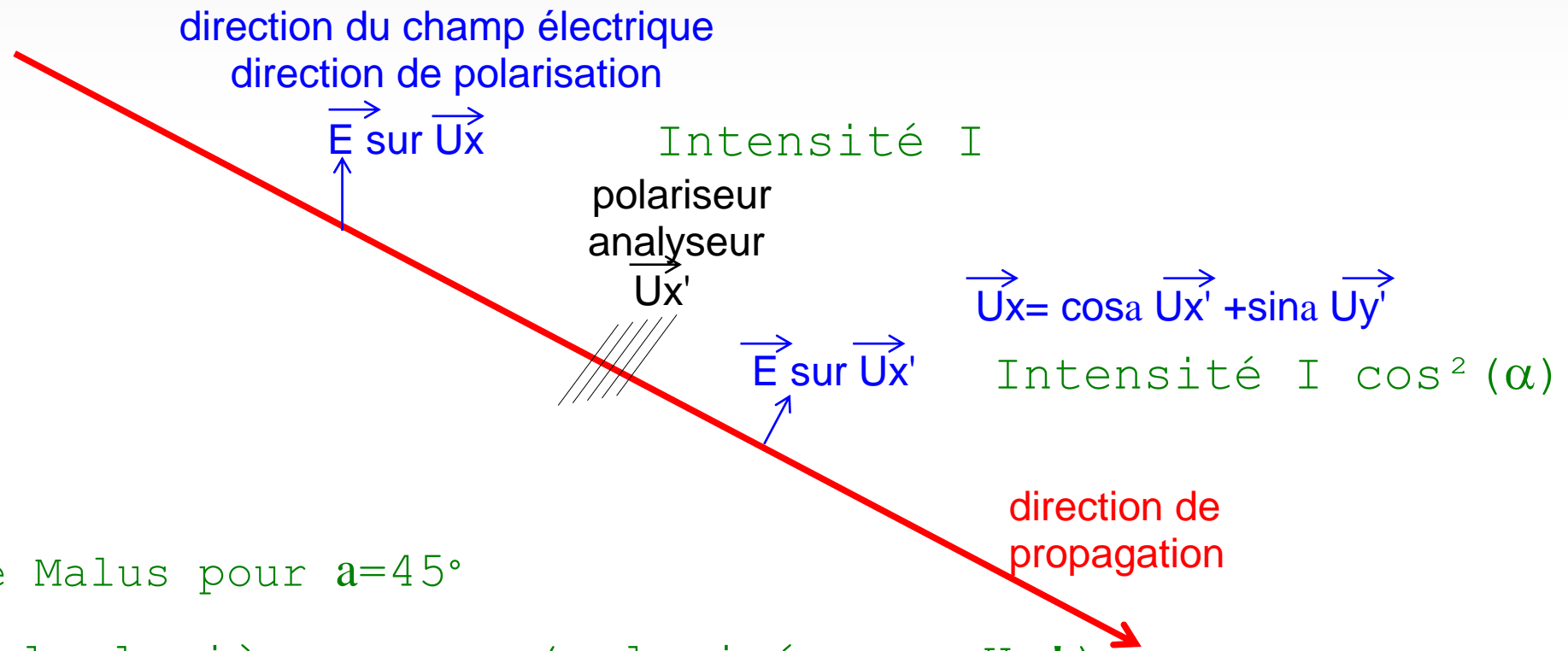
2.1. L'expérience "classique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.1. L'expérience "classique" de Malus



Loi de Malus pour $\alpha=45^\circ$

50% de la lumière passe (polarisée sur $U_{x'}$)

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.1. L'expérience "classique" de Malus



Voir la vidéo : "Effet d'un polarisateur"

Dualité Onde Corpuscule

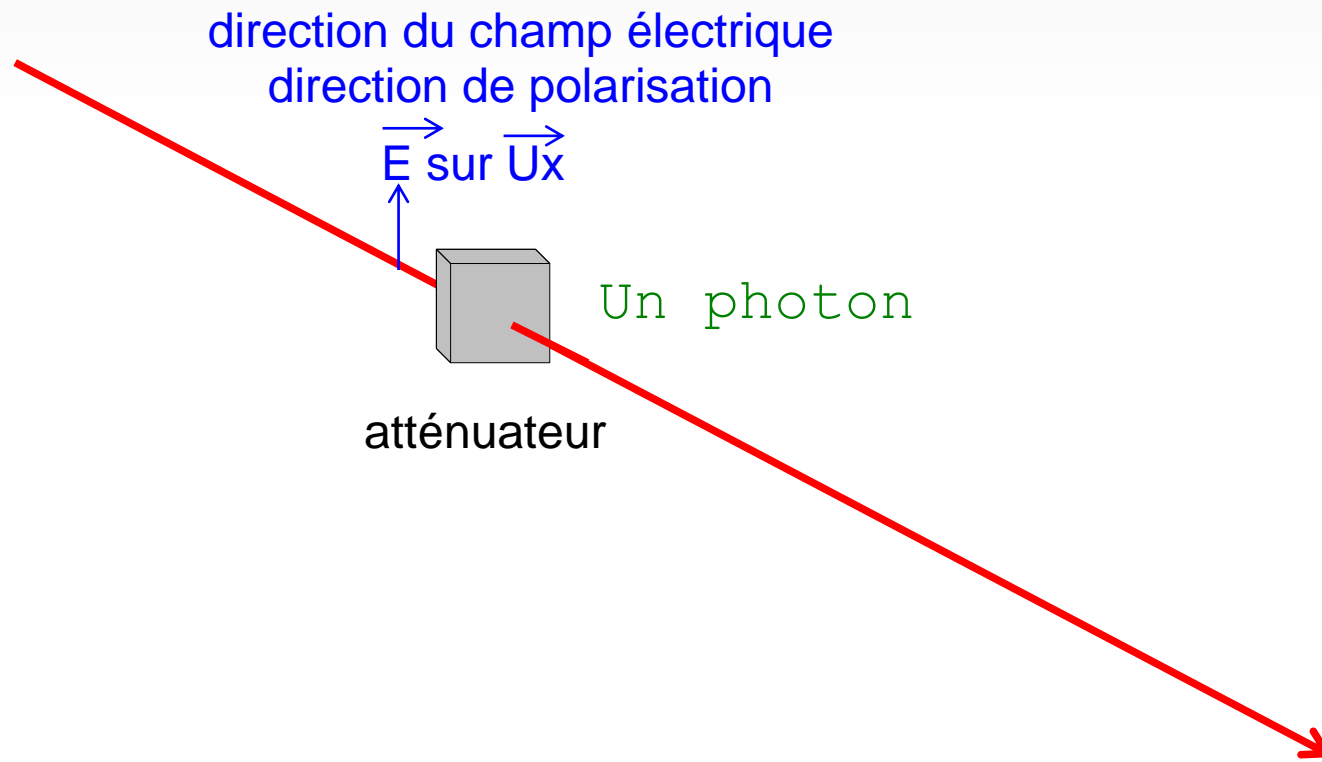
2. L'expérience avec la polarisation

2.2. L'expérience "quantique" de Malus

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.2. L'expérience "quantique" de Malus



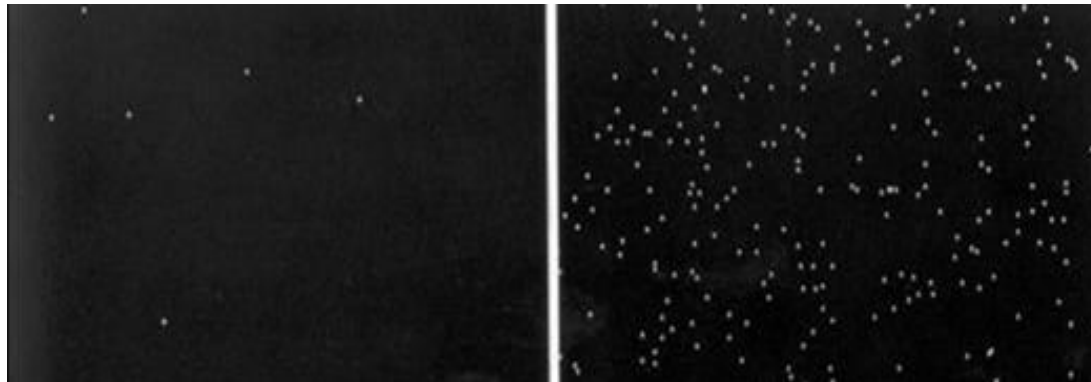
Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.2. L'expérience "quantique" de Malus

Durée 1s

Durée 100s

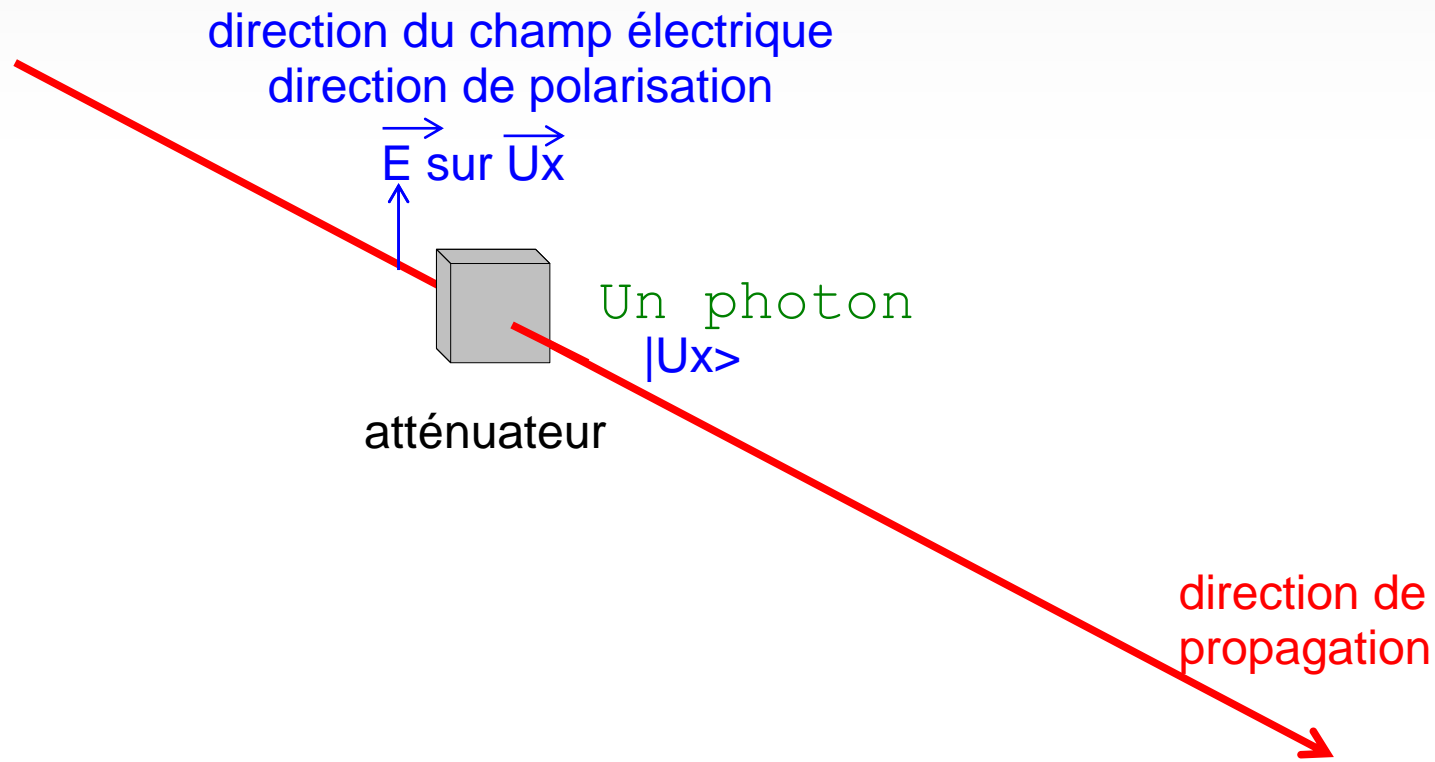


Les quanta de lumière: les photons
Interprétation corpusculaire.

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

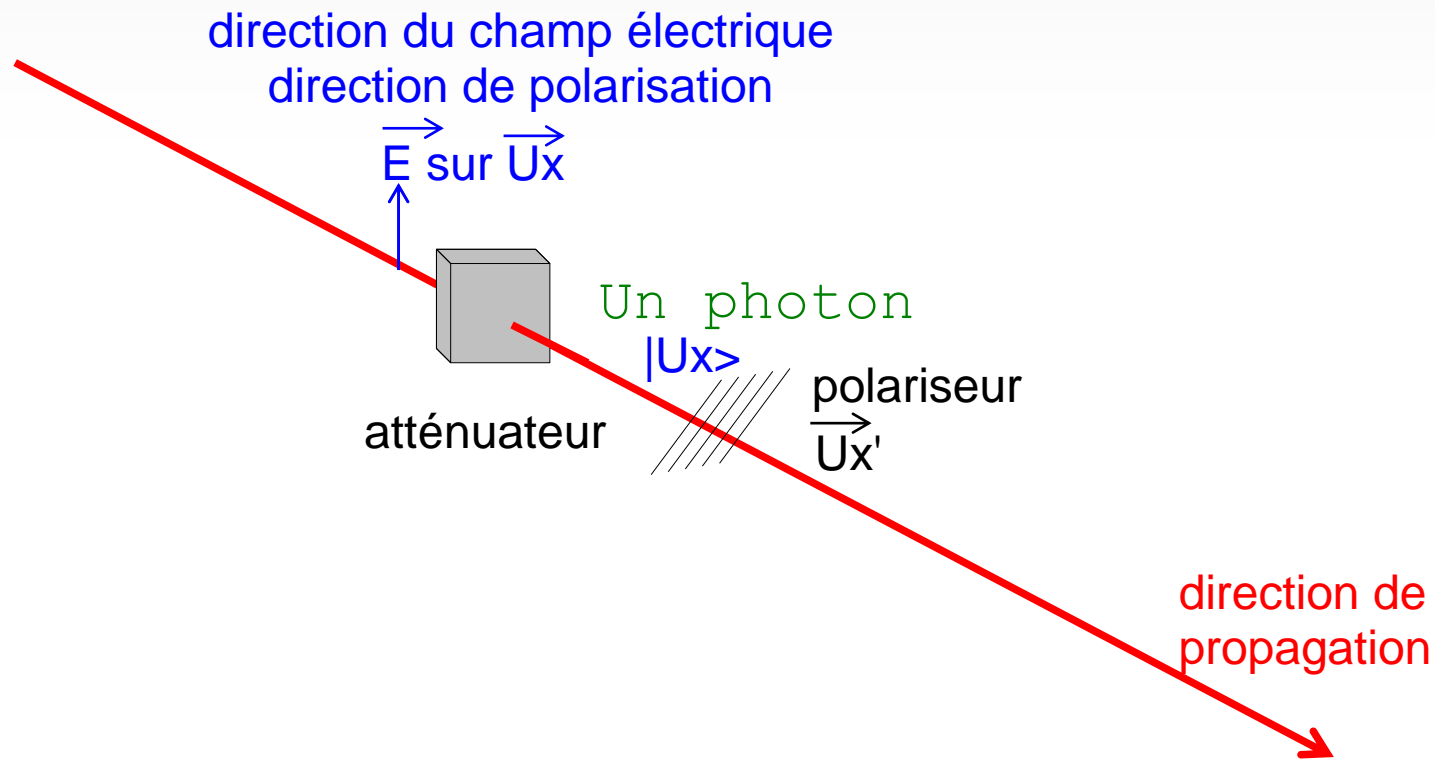
2.2. L'expérience "quantique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

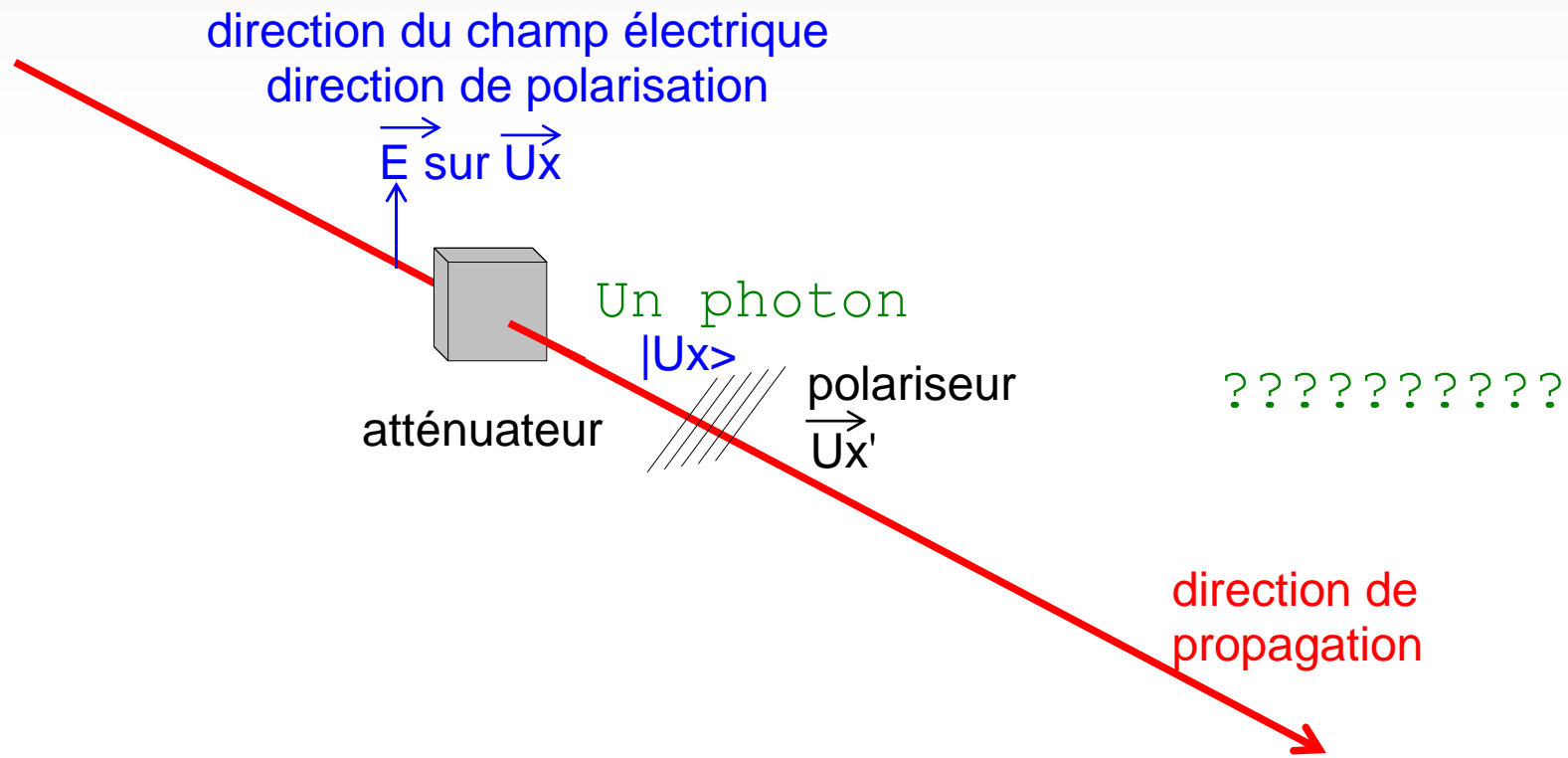
2.2. L'expérience "quantique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

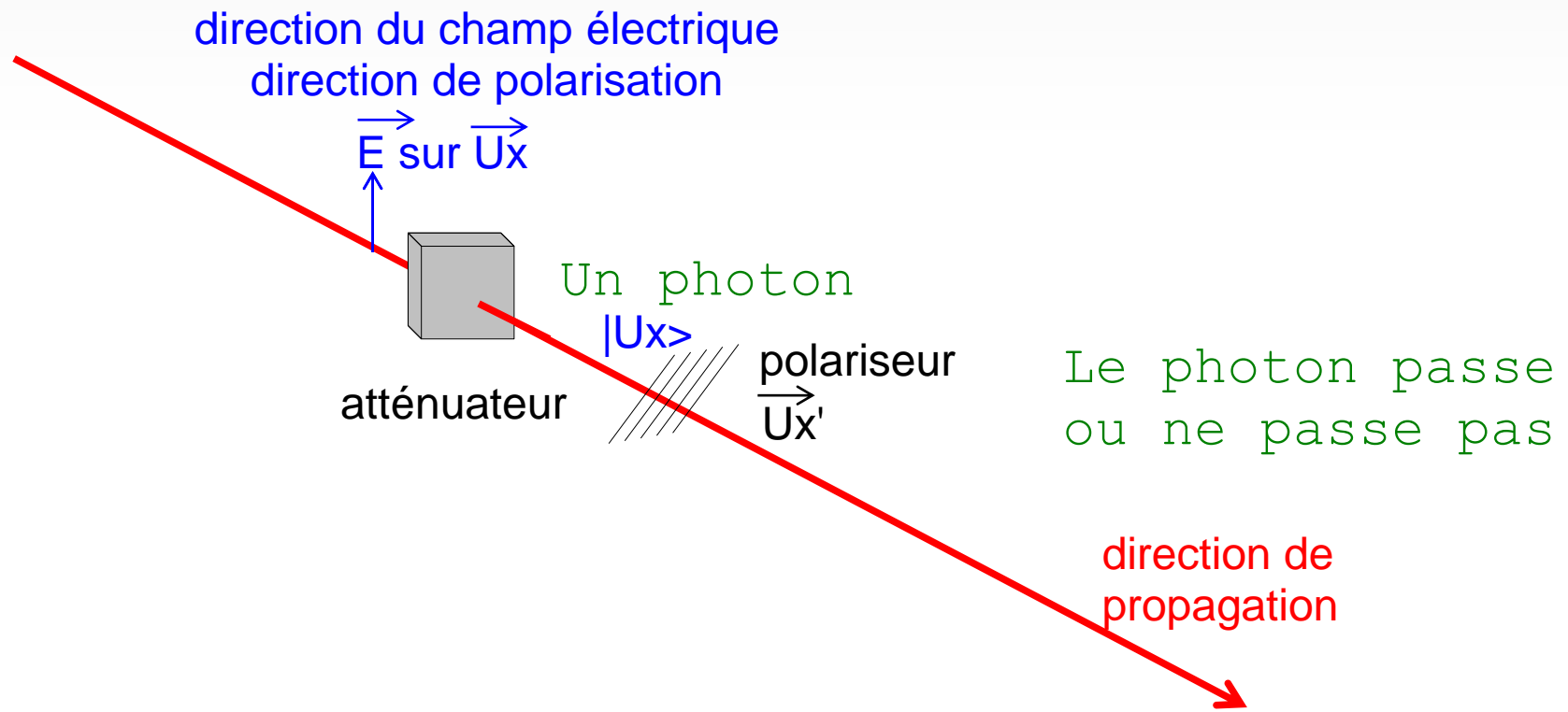
2.2. L'expérience "quantique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

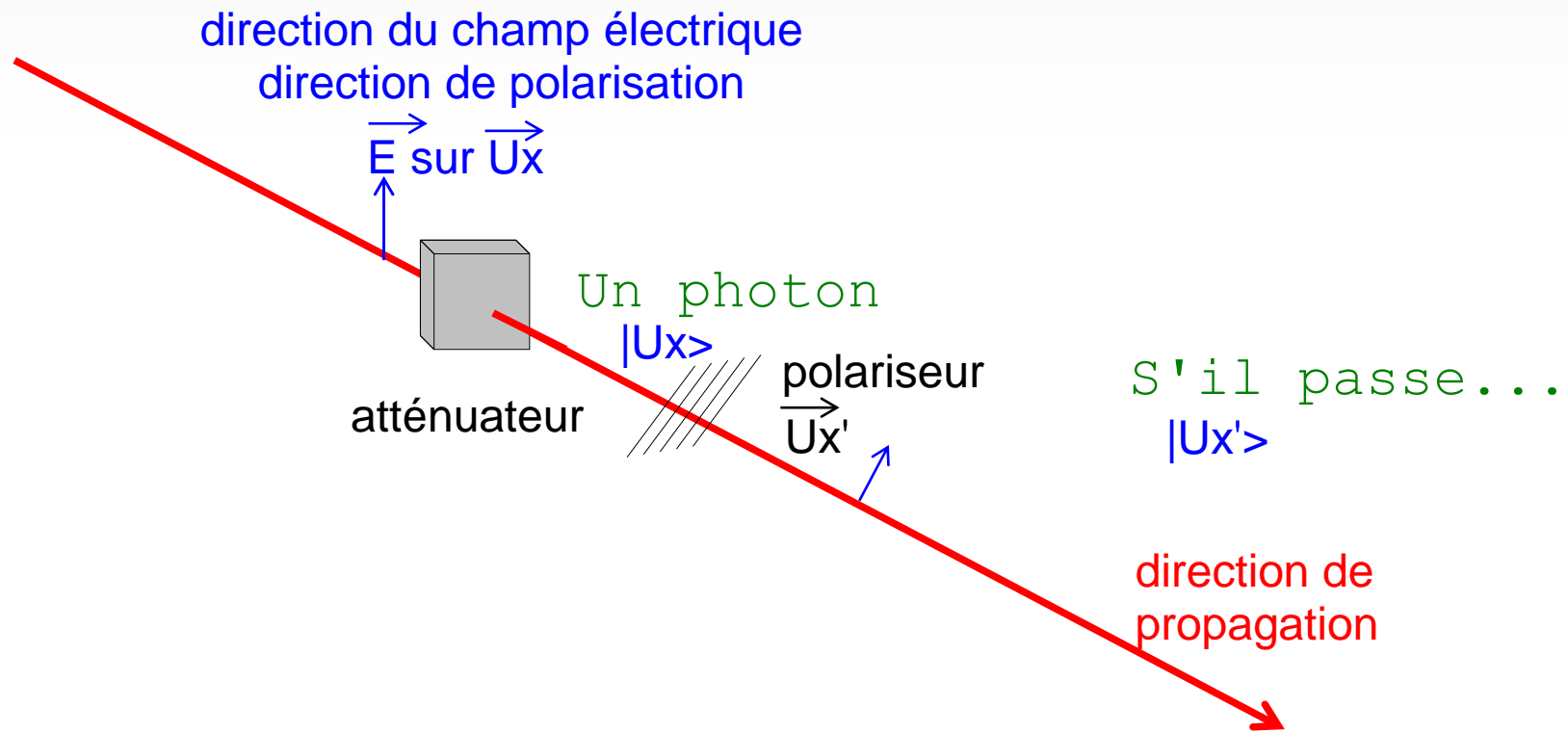
2.2. L'expérience "quantique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

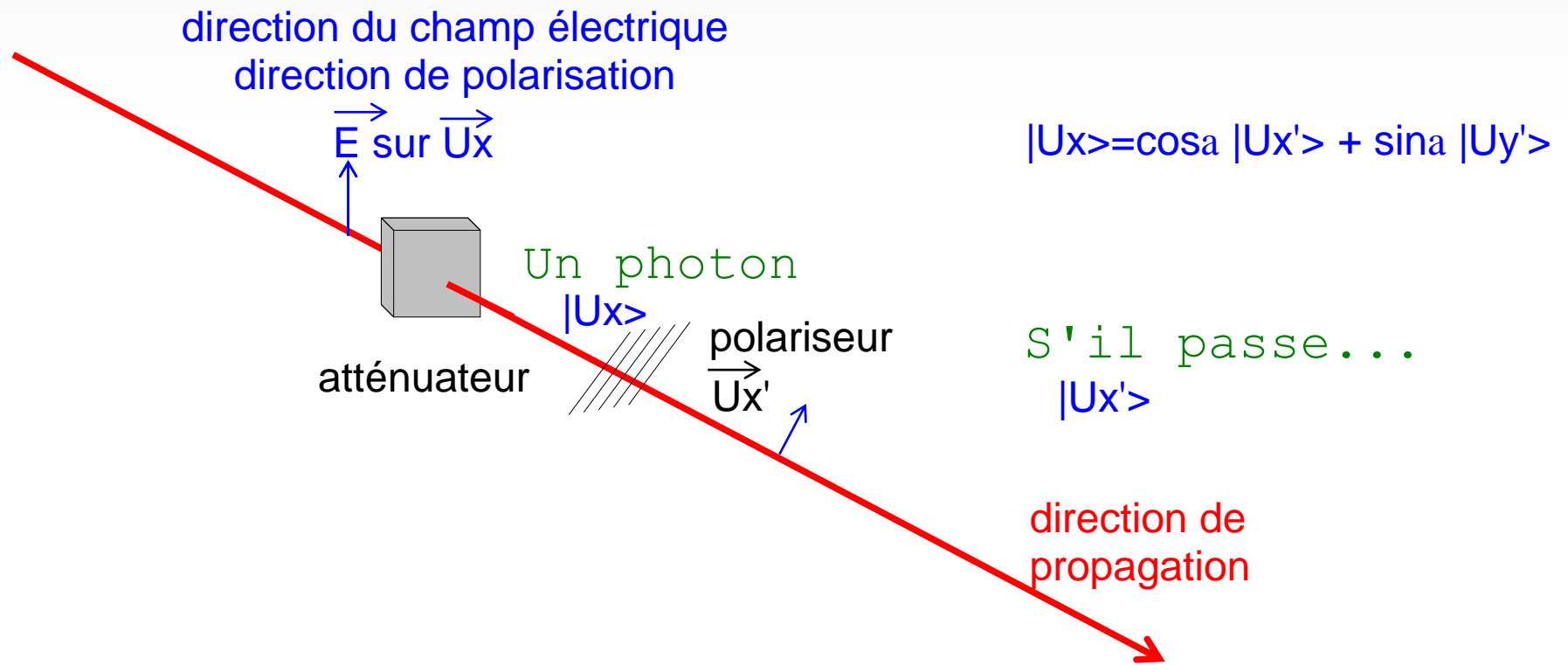
2.2. L'expérience "quantique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

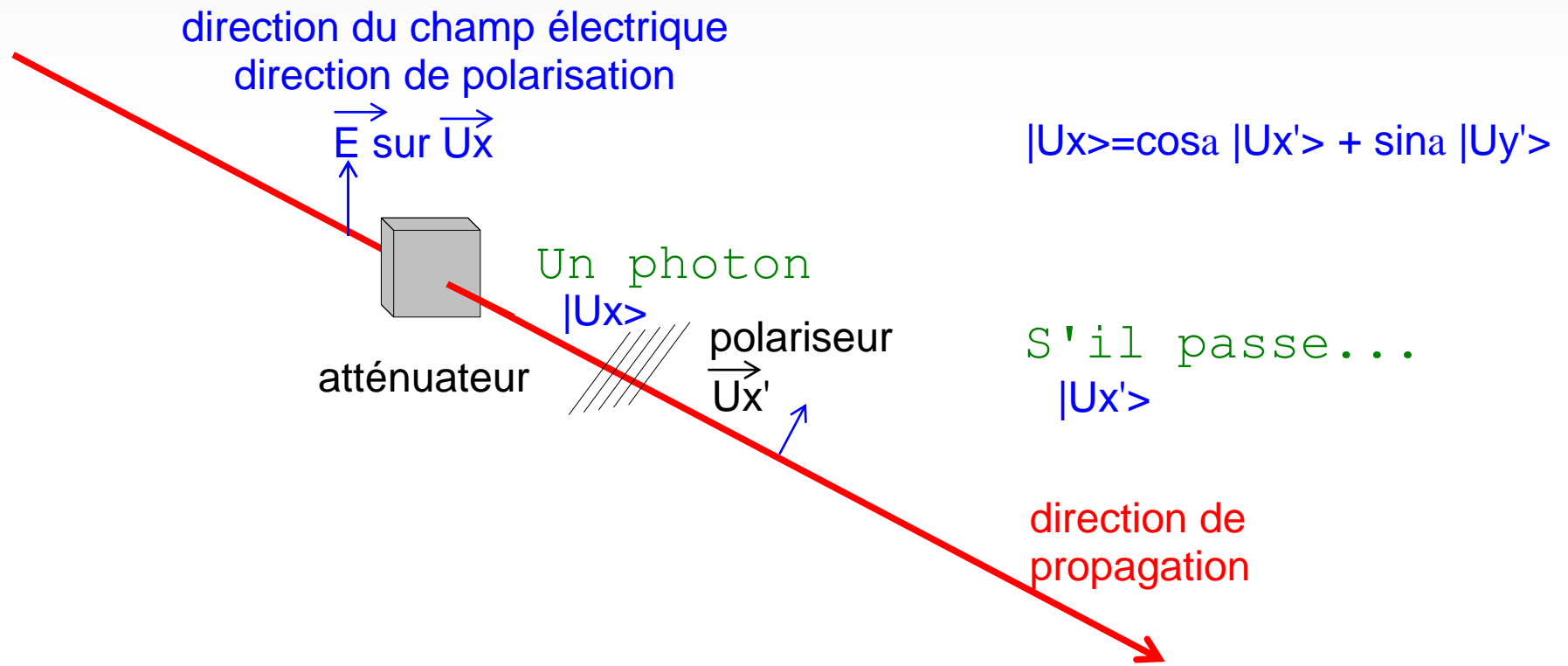
2.2. L'expérience "quantique" de Malus



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.2. L'expérience "quantique" de Malus



la probabilité de passer est de $\cos^2 a$
 $a=45^\circ$, $\cos^2 a=50\%$

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.3. Conclusions quantiques

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.3. Conclusions quantiques

1. L'état du système quantique est défini par une fonction d'onde (vecteur) appelée "ket"

$|U_x\rangle, |U_x'\rangle$

2. Une quantité mesurable est décrite par une matrice appelée "observable"

$P_{x'}$ projecteur sur la direction de polarisation

$P_{x'} |U_x'\rangle = 1 \cdot |U_x'\rangle$ et $P_{x'} |U_y'\rangle = 0$

$$P_{x'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.3. Conclusions quantiques

3. La mesure d'une grandeur physique ne donne que les valeurs propres de l'observable

les valeurs propres de P_x sont 0 et 1

4. Lors d'une mesure, la probabilité de trouver la valeur propre est le carré du produit scalaire du ket et du vecteur propre

$$\langle U_x' | U_x \rangle^2 = \cos^2 a$$

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.3. Conclusions quantiques

5. Après la mesure, l'état du système devient le vecteur propre associé à la mesure.

Si le photon est passé, son état est alors $|Ux'\rangle$
(réduction du paquet d'onde)

6. L'évolution de l'état propre est décrite par l'équation de Schrödinger

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.3. Conclusions quantiques

**L'onde permet de calculer la probabilité qu'une
corpuscule se manifeste**

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.3. Conclusions quantiques

**L'onde permet de calculer la probabilité qu'une
corpuscule se manifeste**

Onde

Corpuscule

Lien

ω

E

$E = \hbar \omega$

$\vec{\kappa}$

\vec{p}

$\vec{p} = \hbar \vec{\kappa}$

$\omega = \kappa c$ ou $E = pc$

Dualité Onde Corpuscule

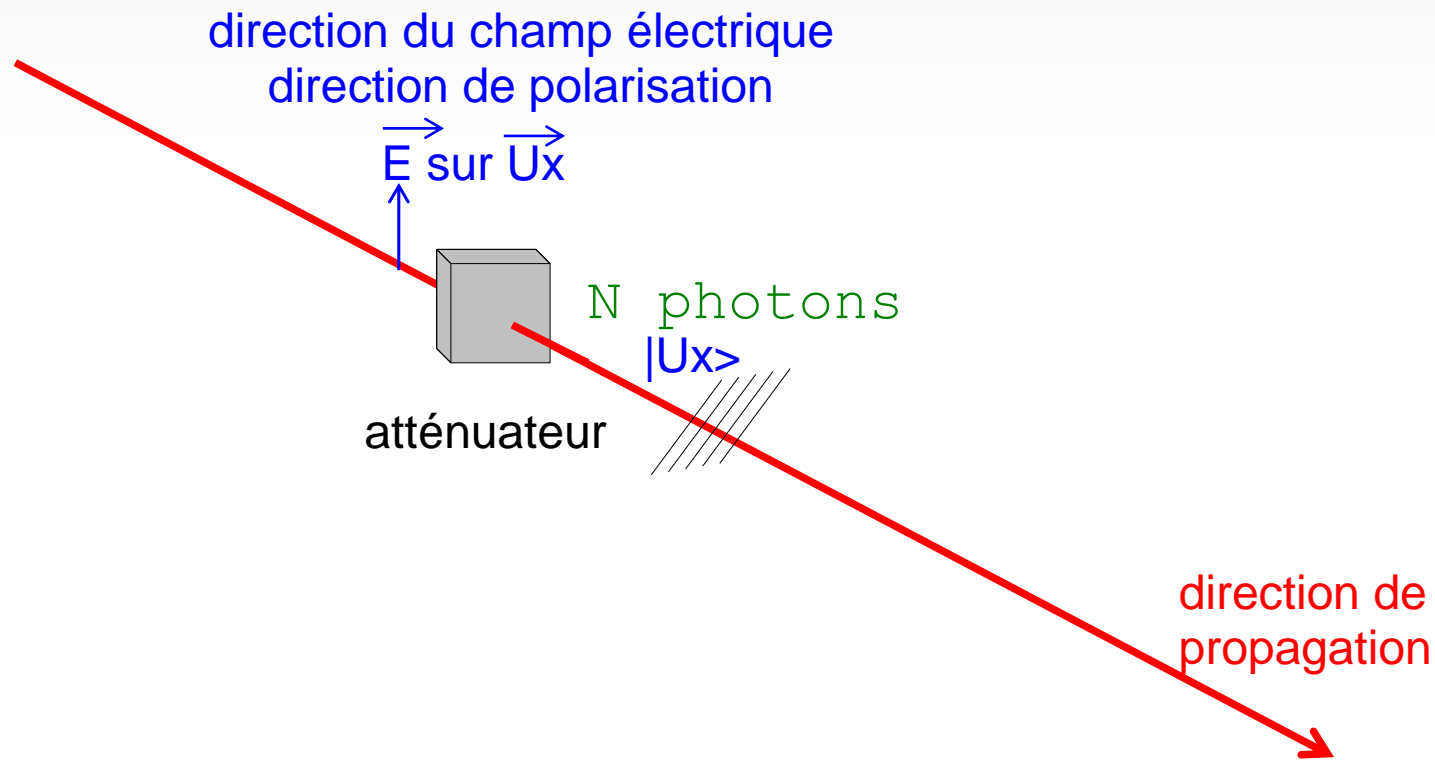
2. L'expérience avec la polarisation

2.4. Retour sur l'interprétation "classique"

Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

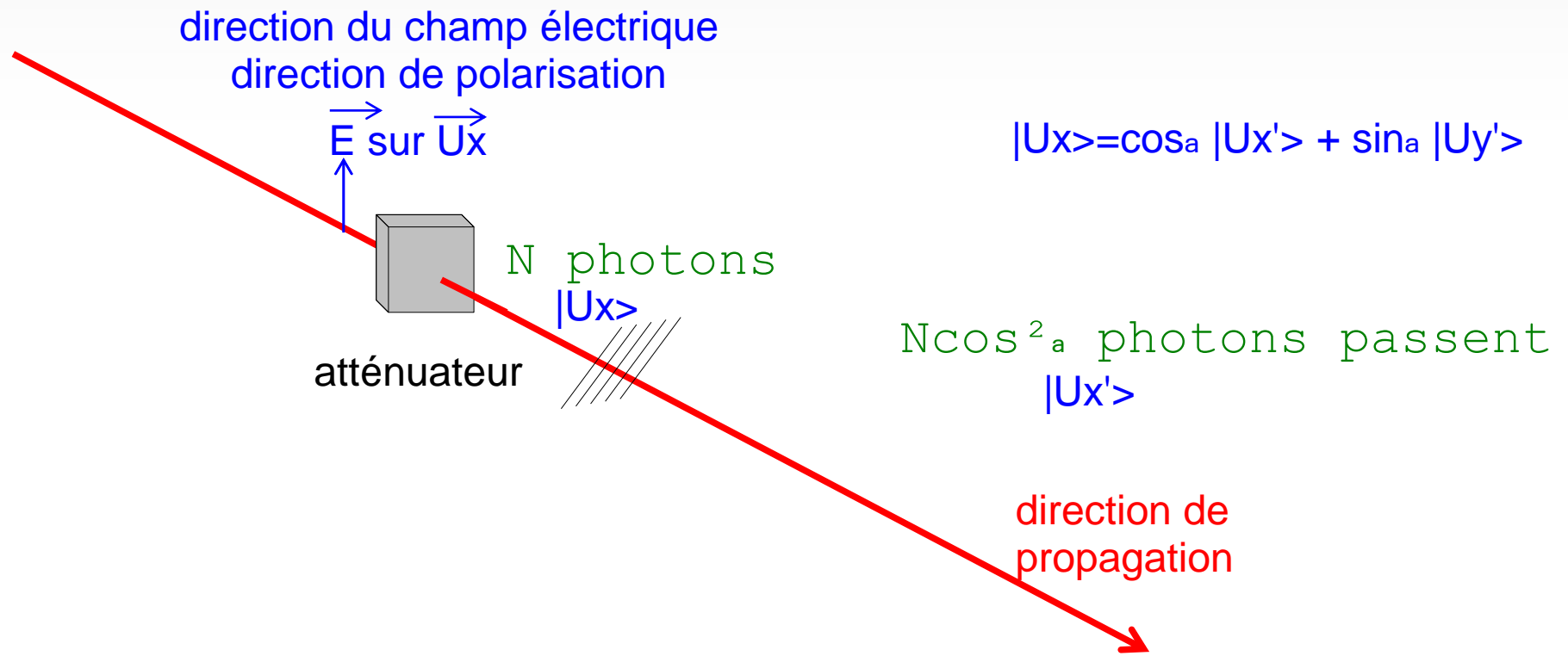
2.4. Retour sur l'interprétation "classique"



Dualité Onde Corpuscule

2. L'expérience avec la polarisation

2.4. Retour sur l'interprétation "classique"



la probabilité de passer est de \cos^2_a
 $a=45^\circ$, $\cos^2_a=50\%$

Dualité Onde Corpuscule

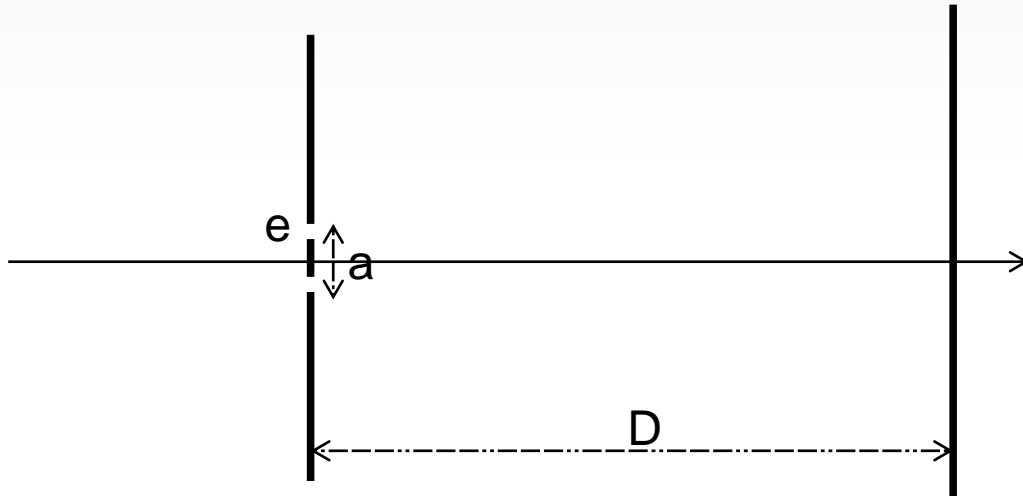
3. L'expérience des fentes d'Young

3.1. L'expérience

Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

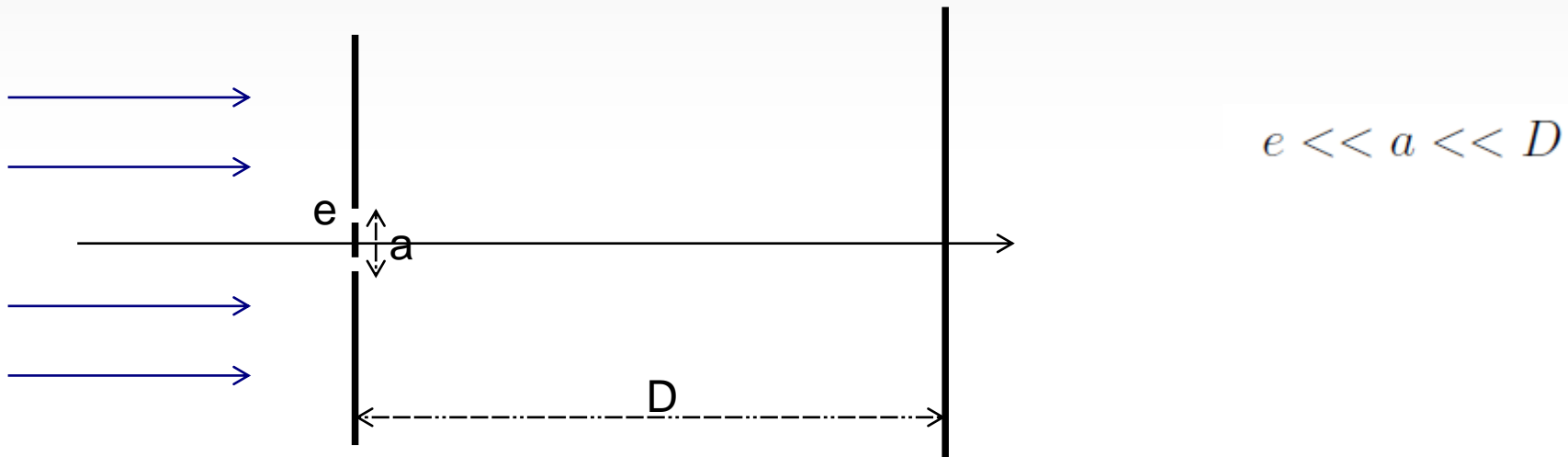
3.1. L'expérience



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.1. L'expérience



Dualité Onde Corpuscule

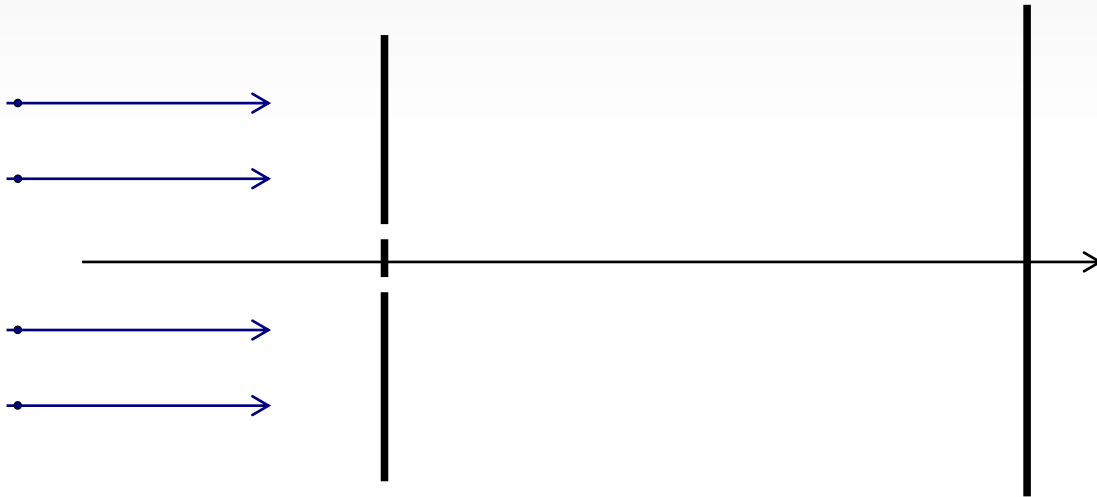
3. L'expérience des fentes d'Young

3.2. Résultats de la théorie "corpusculaire"

Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

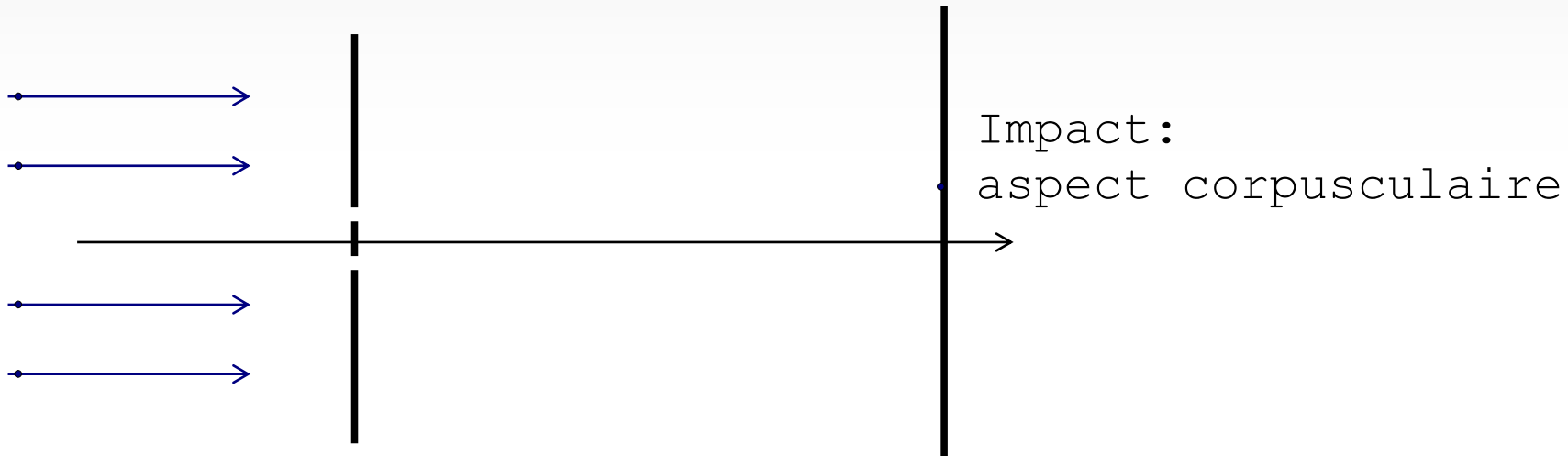
3.2. Résultats de la théorie "corpusculaire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

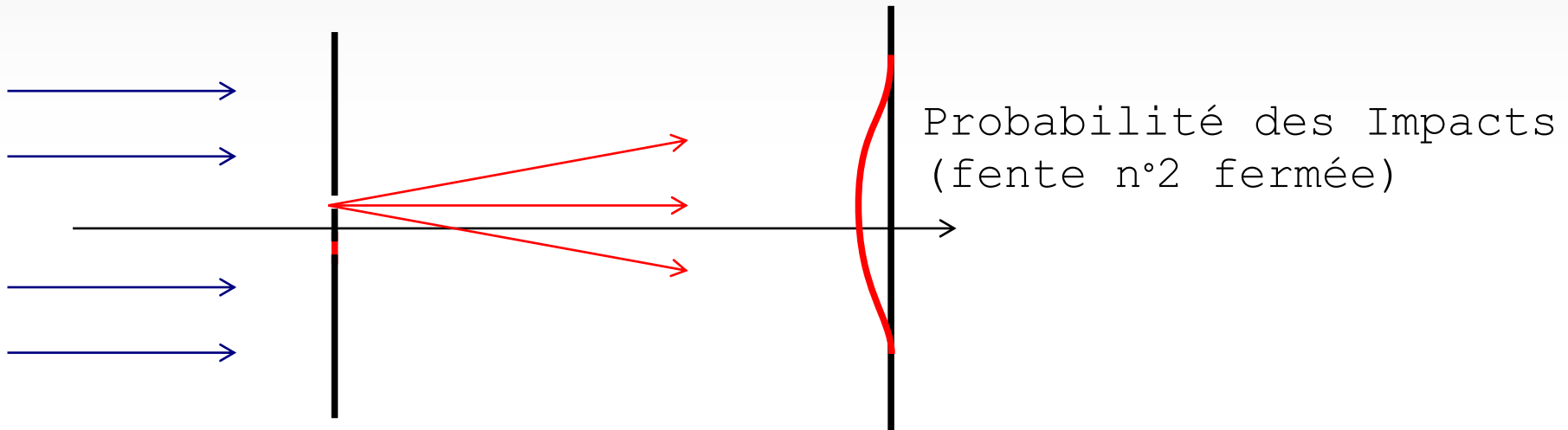
3.2. Résultats de la théorie "corpusculaire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

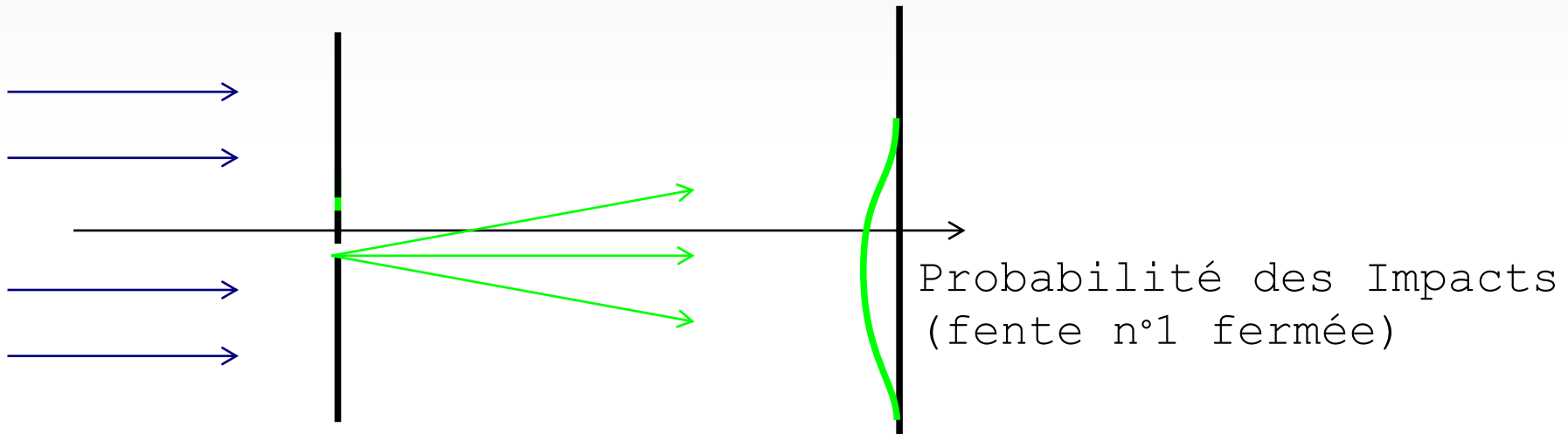
3.2. Résultats de la théorie "corpusculaire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

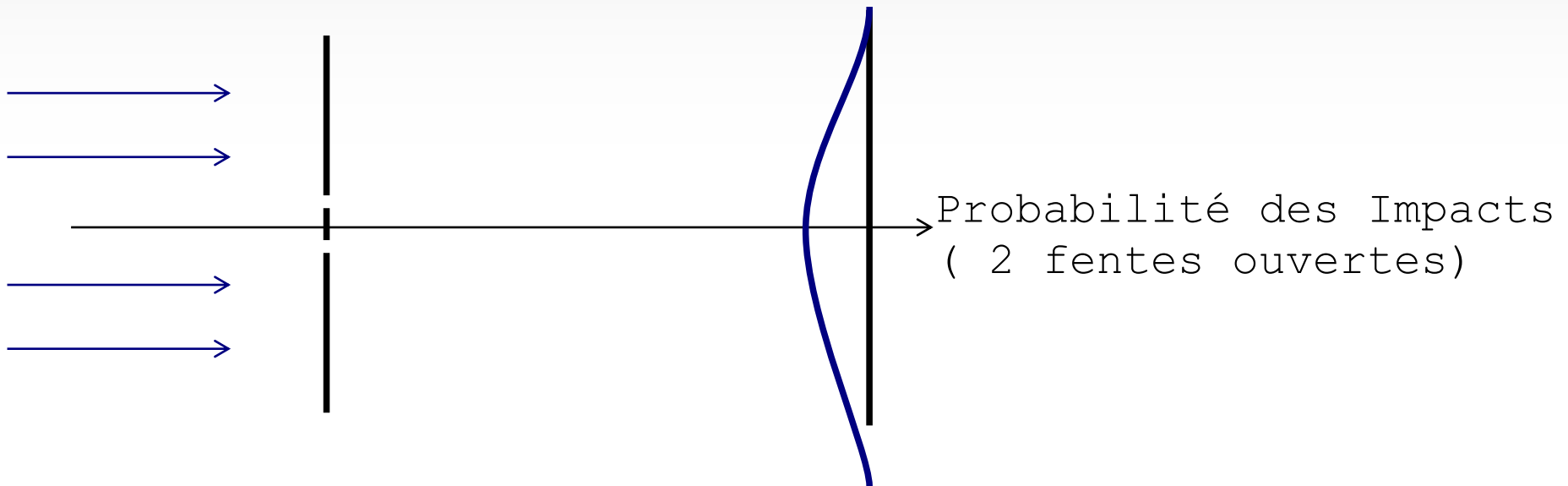
3.2. Résultats de la théorie "corpusculaire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

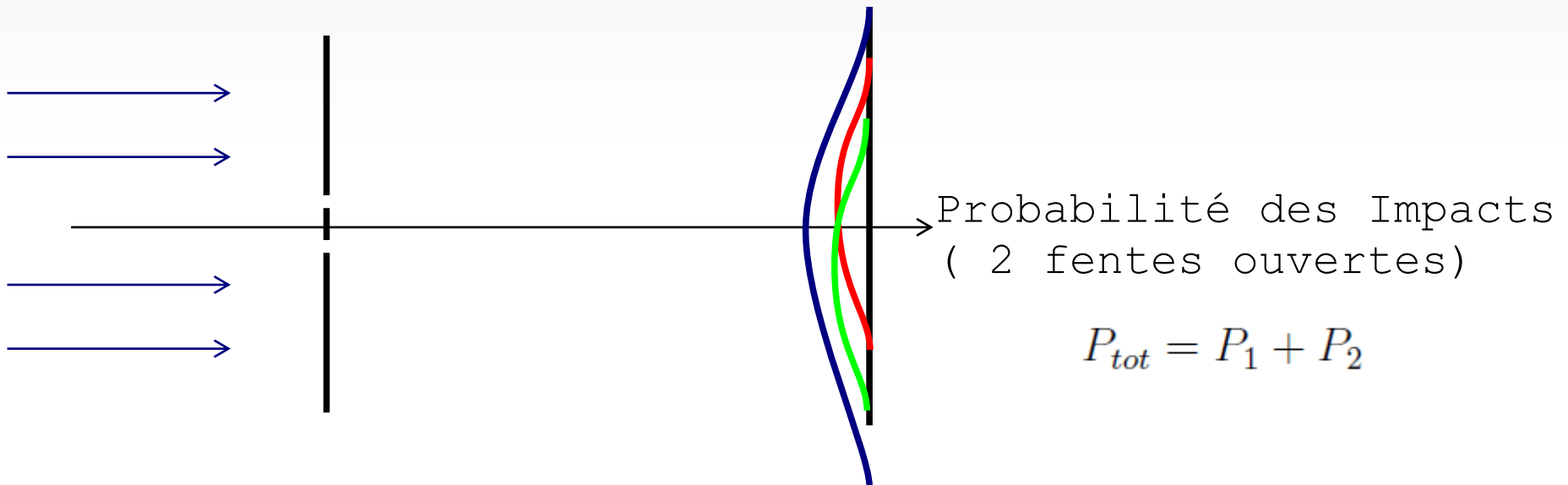
3.2. Résultats de la théorie "corpusculaire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.2. Résultats de la théorie "corpusculaire"



Dualité Onde Corpuscule

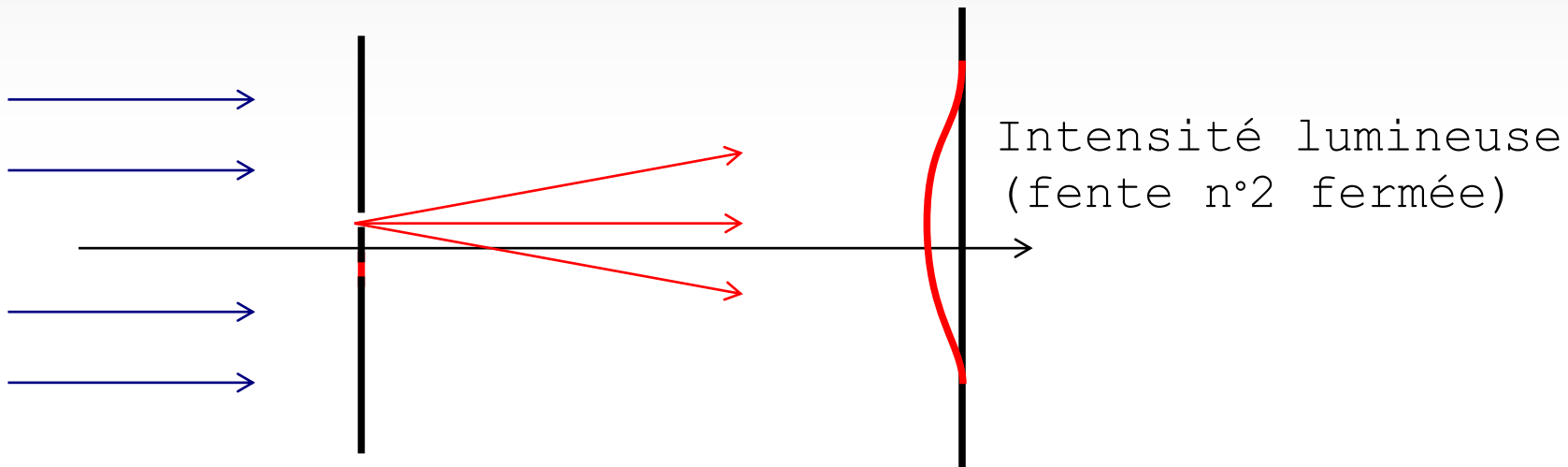
3. L'expérience des fentes d'Young

3.3. Résultats de la théorie "ondulatoire"

Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

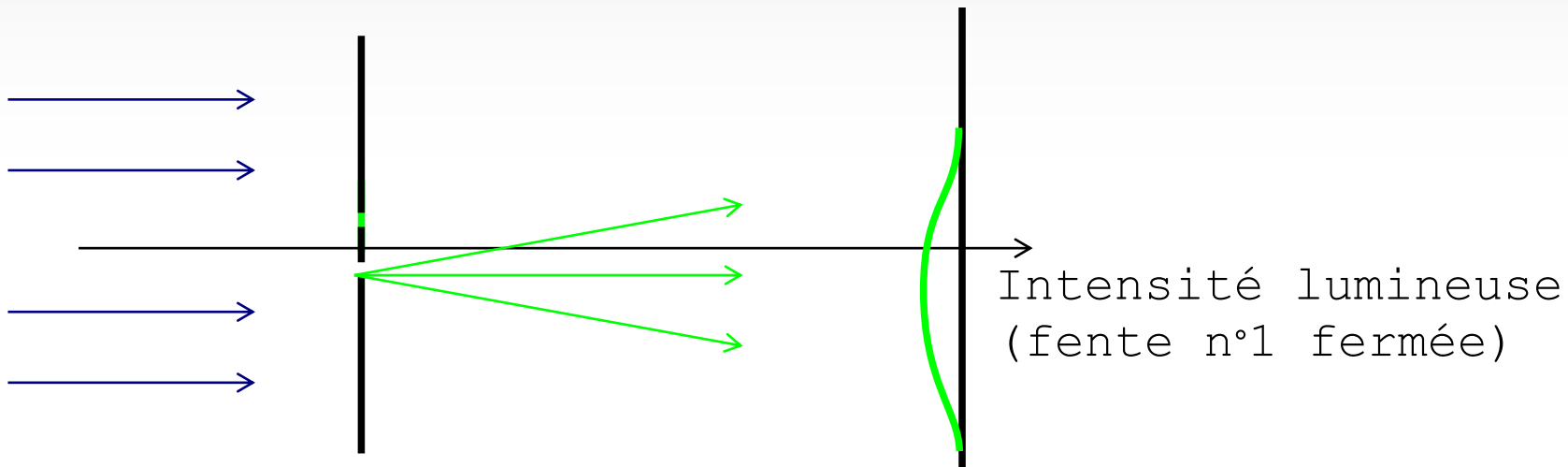
3.3. Résultats de la théorie "ondulatoire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

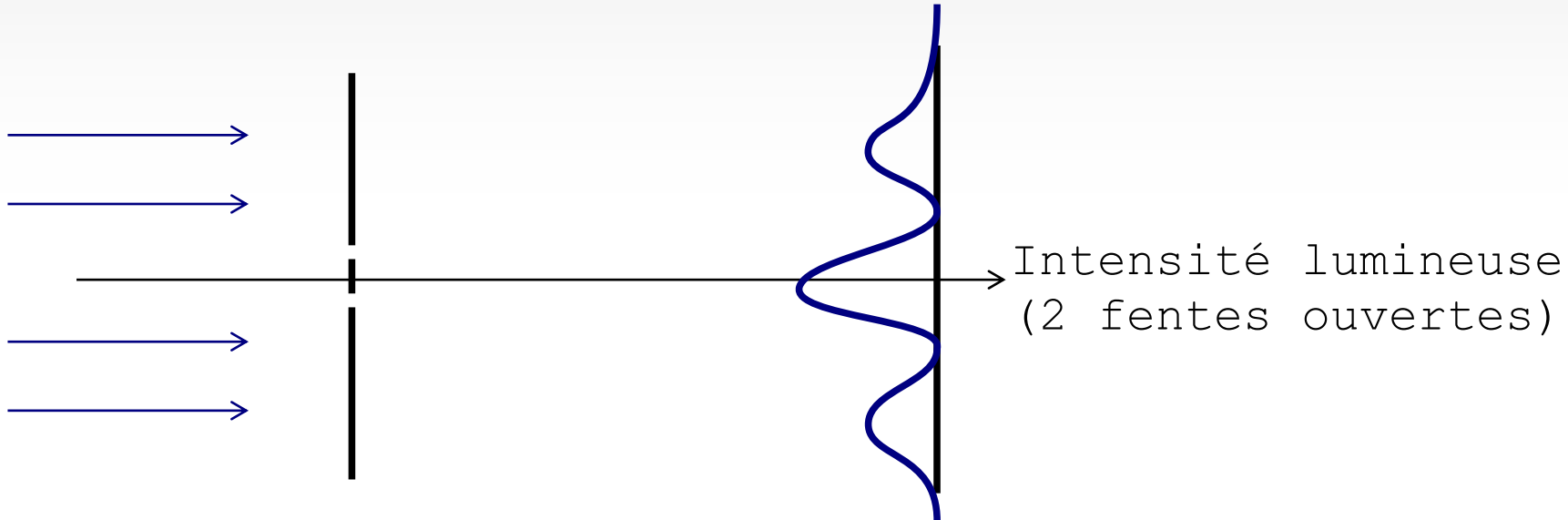
3.3. Résultats de la théorie "ondulatoire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

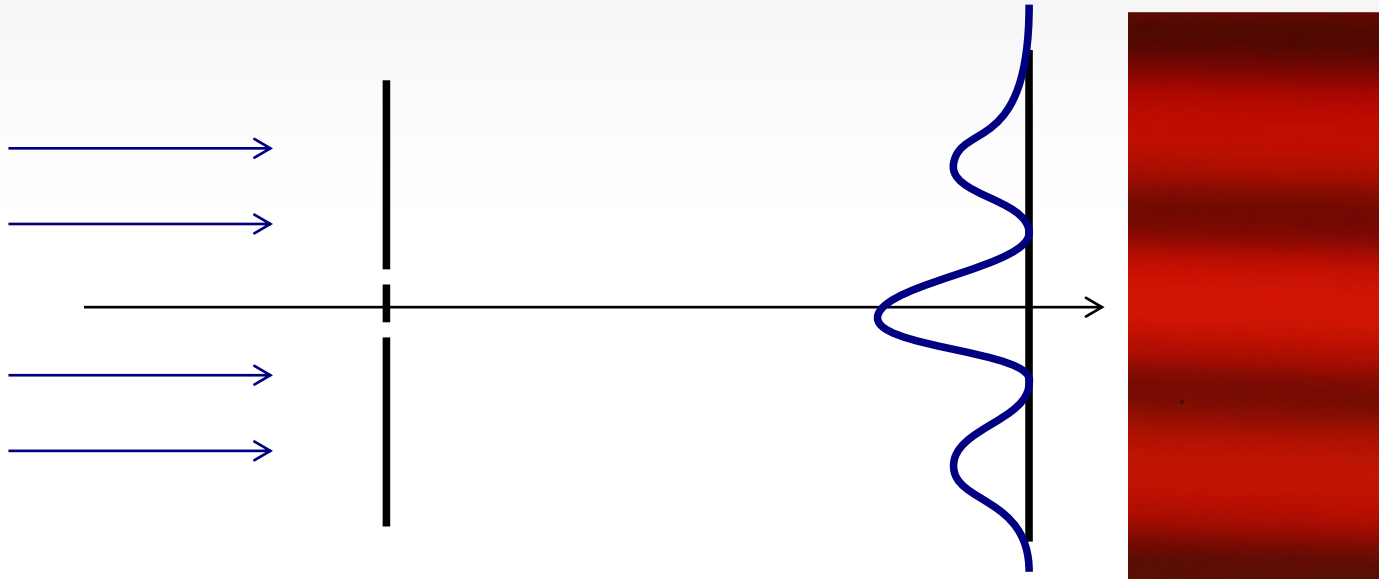
3.3. Résultats de la théorie "ondulatoire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

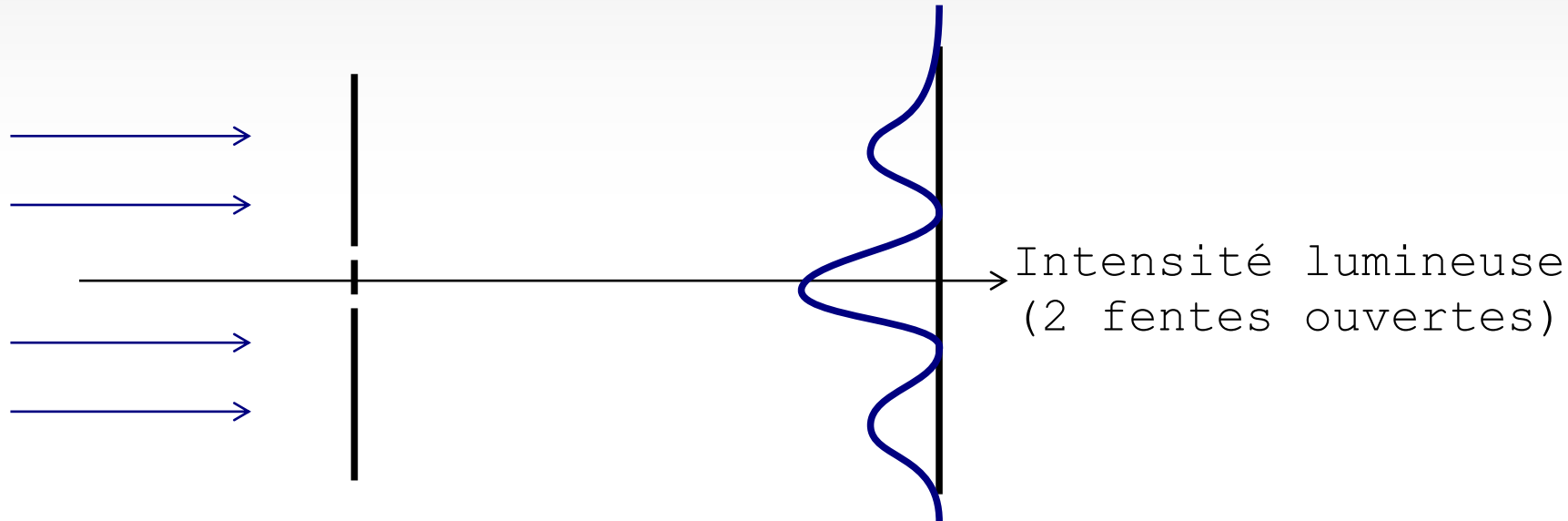
3.3. Résultats de la théorie "ondulatoire"



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.3. Résultats de la théorie "ondulatoire"



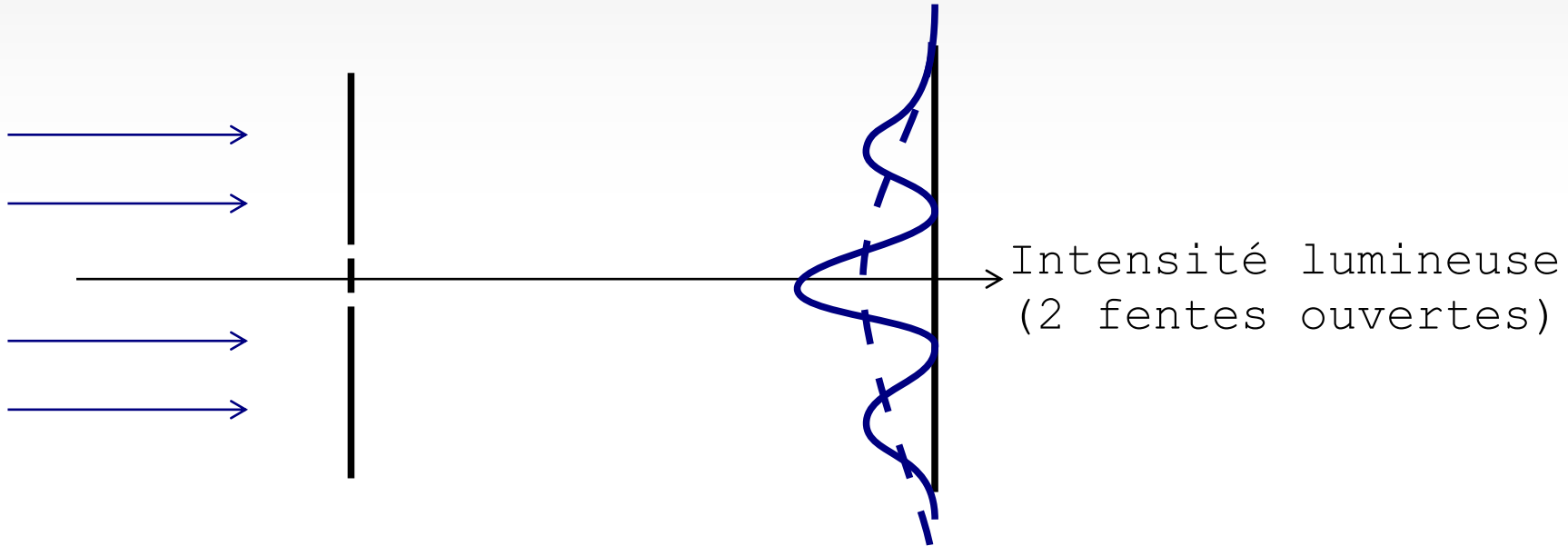
$$\vec{E}_{tot} = \sum E_0(\omega) \left(\cos\left(\omega\left(t - \frac{[SM]_1}{c_0}\right)\right) + \cos\left(\omega\left(t - \frac{[SM]_2}{c_0}\right)\right) \right) \vec{u}_x$$

$$I_{tot} = 2 \cdot \langle E_{tot}^2 \rangle_T = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos\left(\frac{([SM]_2 - [SM]_1)}{c_0}\right)$$

Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.3. Résultats de la théorie "ondulatoire"



Dualité Onde Corpuscule

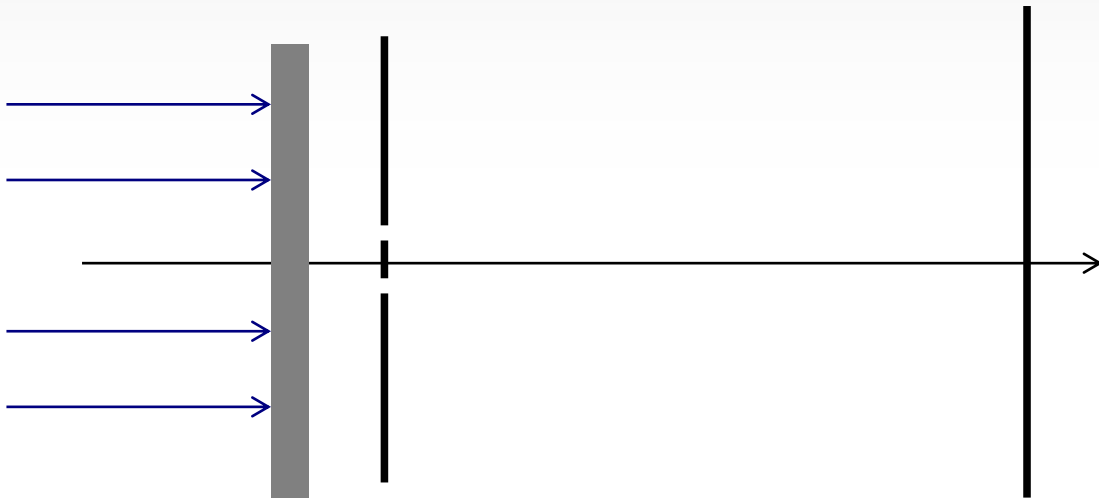
3. L'expérience des fentes d'Young

3.4. Résultats expérimentaux avec un photon.

Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.4. Résultats expérimentaux avec un photon.



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

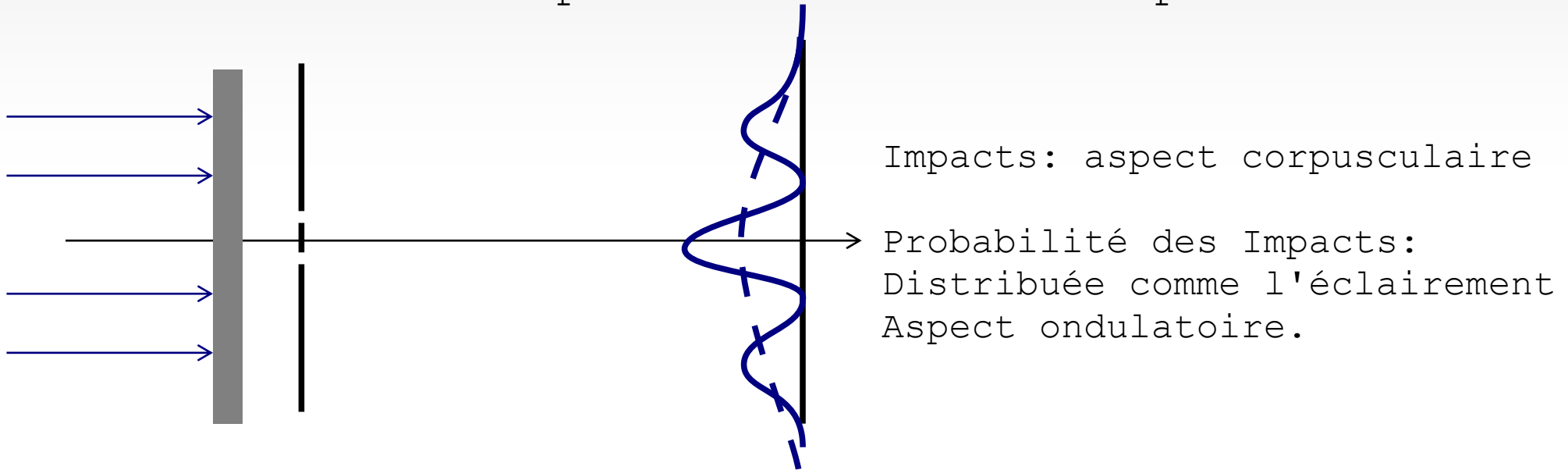
3.4. Résultats expérimentaux avec un photon.



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.4. Résultats expérimentaux avec un photon.



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.5. Généralisation

Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.5. Généralisation

**L'onde permet de calculer la probabilité qu'une
corpuscule se manifeste**

De Broglie



Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.5. Généralisation

L'onde permet de calculer la probabilité qu'une corpuscule se manifeste

Onde

Corpuscule

Lien

ω

E

$E = \hbar \omega$

$\vec{\kappa}$

\vec{p}

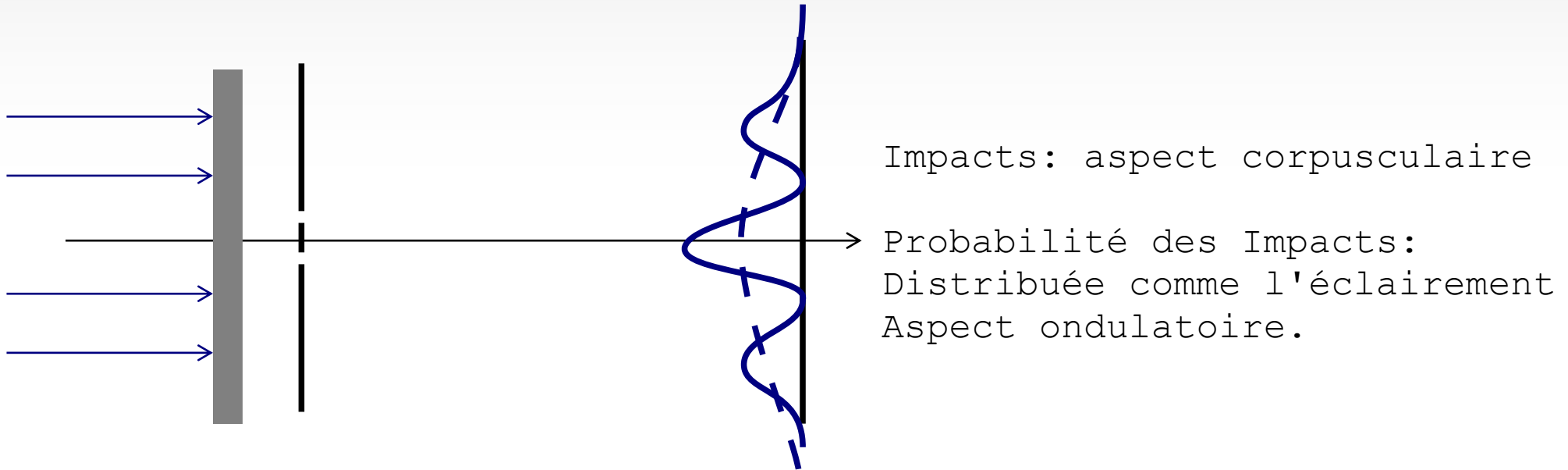
$\vec{p} = \hbar \vec{\kappa}$

$E = p^2 / (2m)$

Dualité Onde Corpuscule

3. L'expérience des fentes d'Young

3.5. Généralisation



De Broglie: généralisation de la dualité onde corpuscule

Interférences avec des électrons

Interférences avec des atomes ultra froids

Interférences avec des C₆₀

Interférences avec des phtalocyanines (1298 uma)

Dualité Onde Corpuscule

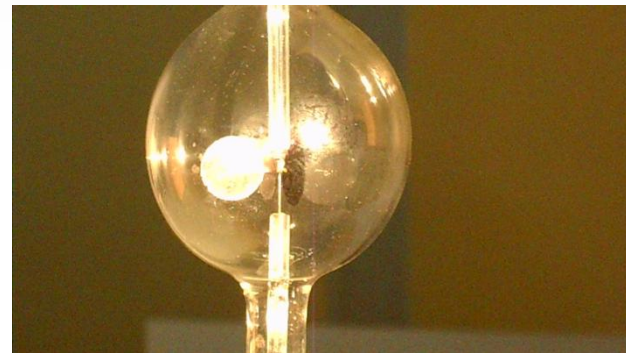
4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.1. L'expérience.

Dualité Onde Corpuscule

4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.1. L'expérience.



Voir la vidéo :
"Le radiomètre de Crook
dans le vide"

Dualité Onde Corpuscule

4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.2. L'interprétation onde/corpuscule.

Dualité Onde Corpuscule

4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.2. L'interprétation onde/corpuscule.



Dualité Onde Corpuscule

4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.2. L'interprétation onde/corpuscule.



Radiomètre à vide

Tourne grâce à la pression de radiation

Dualité Onde Corpuscule

4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.2. L'interprétation onde/corpuscule.



Radiomètre à vide

Tourne grâce à la pression de radiation

Interprétation ondulatoire et
Interprétation corpusculaire

Dualité Onde Corpuscule

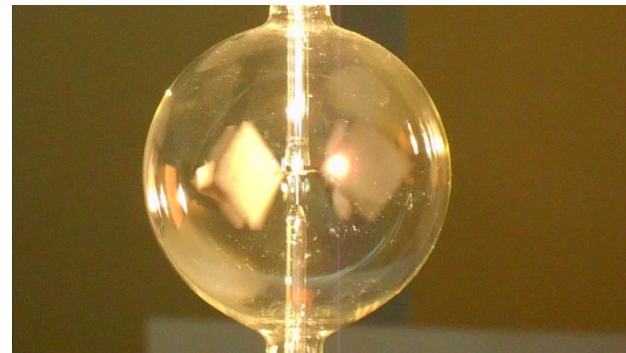
4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.3. Le piège...

Dualité Onde Corpuscule

4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.3. Le piège...



Voir la vidéo :
"Le piège"

Dualité Onde Corpuscule

4. L'expérience du Radiomètre de Crookes

4.3. Le piège...



Radiomètre à air

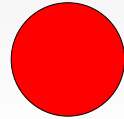
Tourne par effets thermiques

Dualité Onde Corpuscule

5. Le "paradoxe" E.P.R.

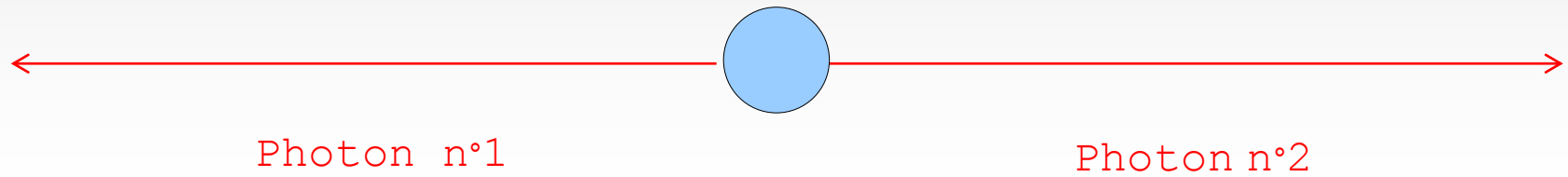
Dualité Onde Corpuscule

5. Le "paradoxe" E.P.R.



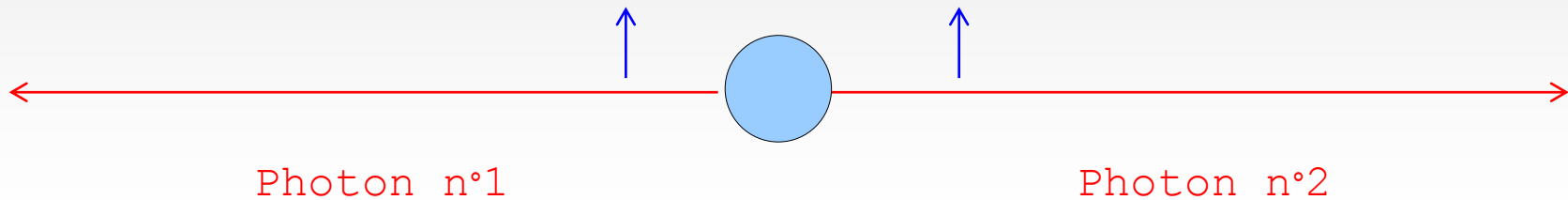
Dualité Onde Corpuscule

5. Le "paradoxe" E.P.R.



Dualité Onde Corpuscule

5. Le "paradoxe" E.P.R.

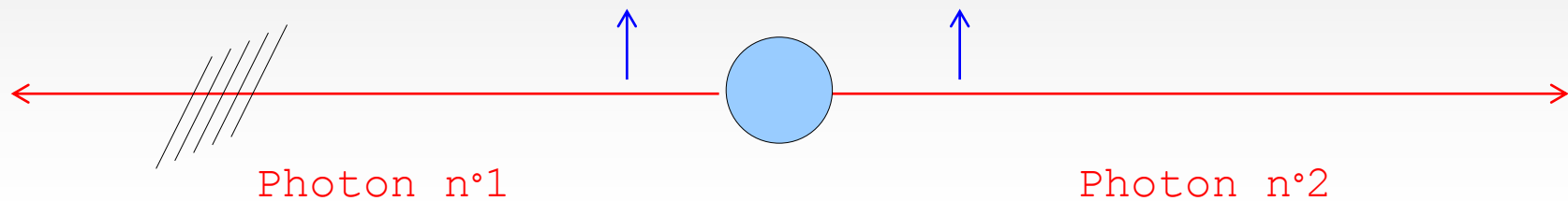


Deux photons corrélés

Les deux photons sont décrits par une et une seule fonction d'onde
Avant la mesure $|U_x\rangle$

Dualité Onde Corpuscule

5. Le "paradoxe" E.P.R.



polariseur

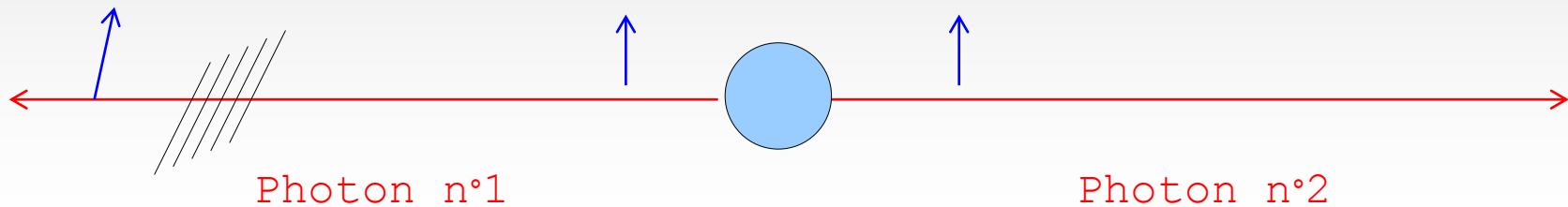
$$|Ux\rangle = \cos\alpha |Ux'\rangle + \sin\alpha |Uy'\rangle$$

Deux photons corrélés

Les deux photons sont décrits par une et une seule fonction d'onde
Avant la mesure $|Ux\rangle$

Dualité Onde Corpuscule

5. Le "paradoxe" E.P.R.



polariseur

$$|Ux\rangle = \cos\alpha |Ux'\rangle + \sin\alpha |Uy'\rangle$$

Deux photons corrélés

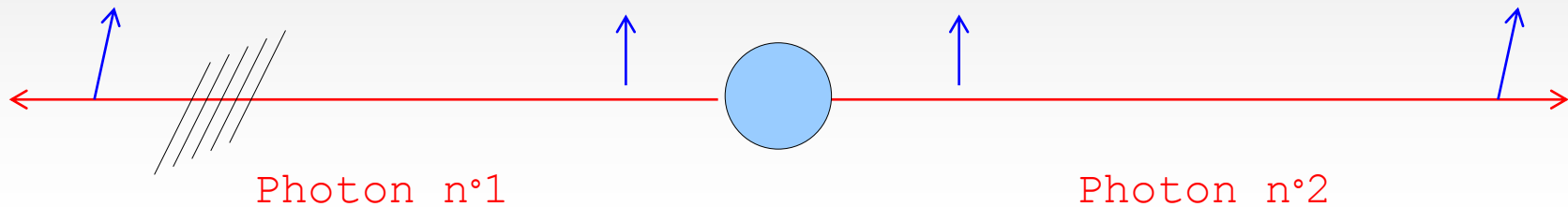
Les deux photons sont décrits par une et une seule fonction d'onde

Avant la mesure $|Ux\rangle$

Après la mesure $|Ux'\rangle$ (pour les deux photons)

Dualité Onde Corpuscule

5. Le "paradoxe" E.P.R.



polariseur

$$|Ux\rangle = \cos\alpha |Ux'\rangle + \sin\alpha |Uy'\rangle$$

Deux photons corrélés

Les deux photons sont décrits par une et une seule fonction d'onde

Avant la mesure $|Ux\rangle$

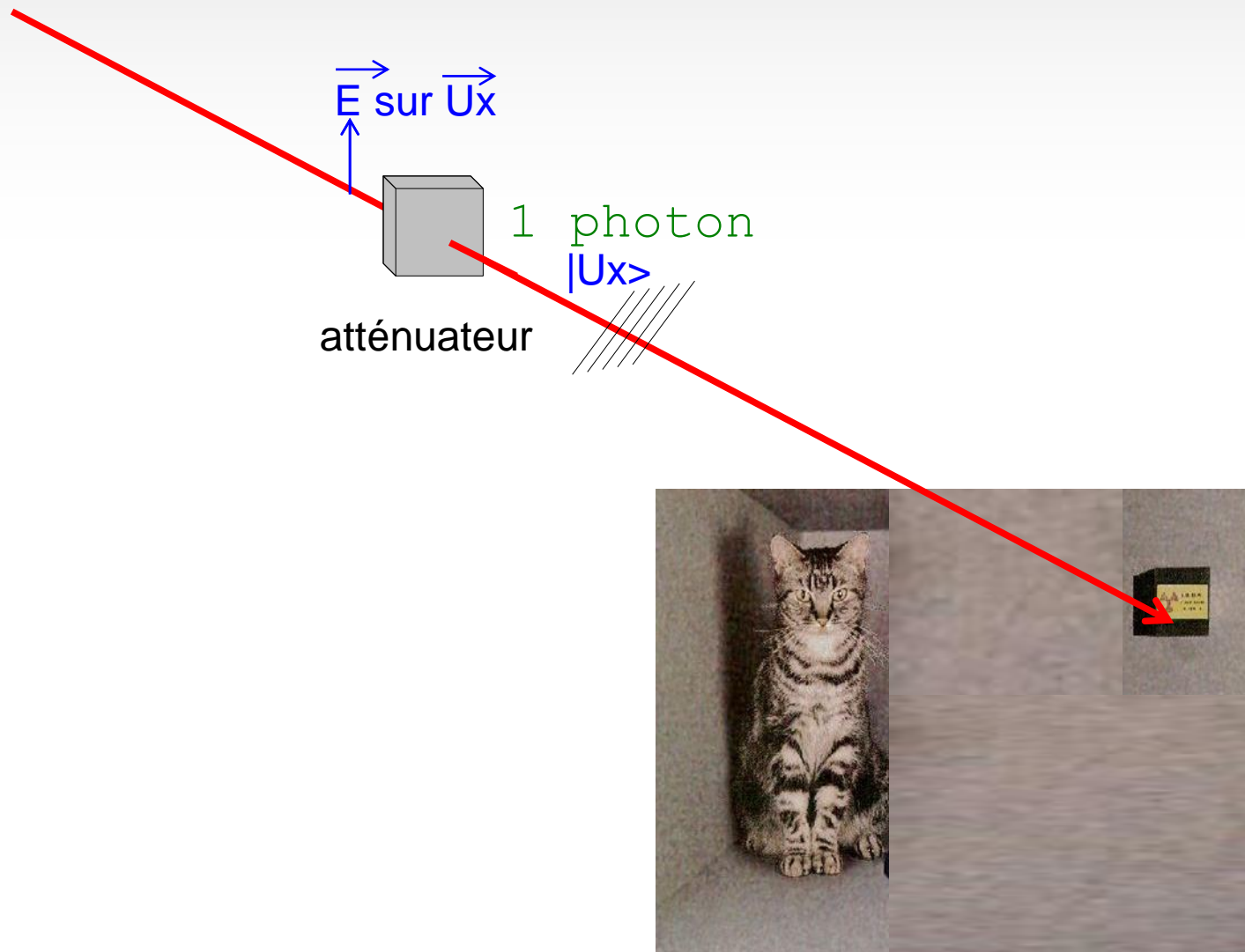
Après la mesure $|Ux'\rangle$ (pour les deux photons)

Dualité Onde Corpuscule

6. Le "paradoxe" du chat de Schrödinger

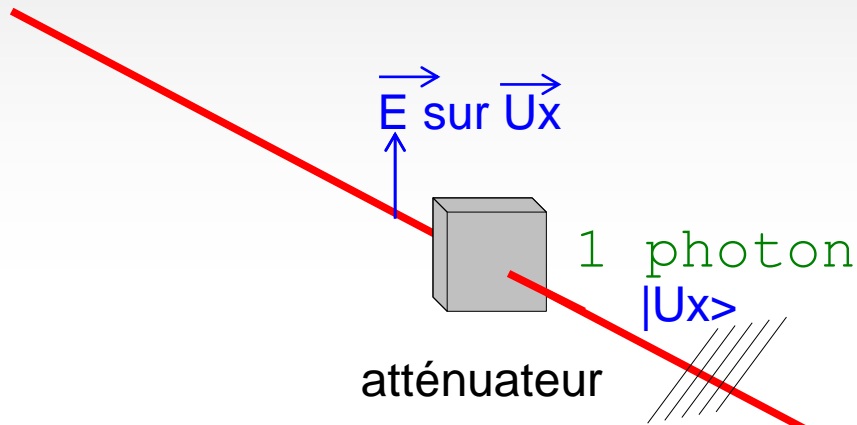
Dualité Onde Corpuscule

6. Le "paradoxe" du chat de Schrödinger

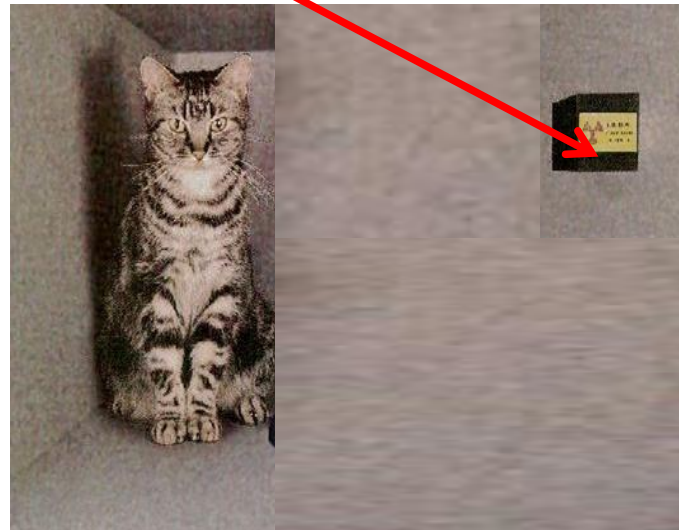


Dualité Onde Corpuscule

6. Le "paradoxe" du chat de Schrödinger

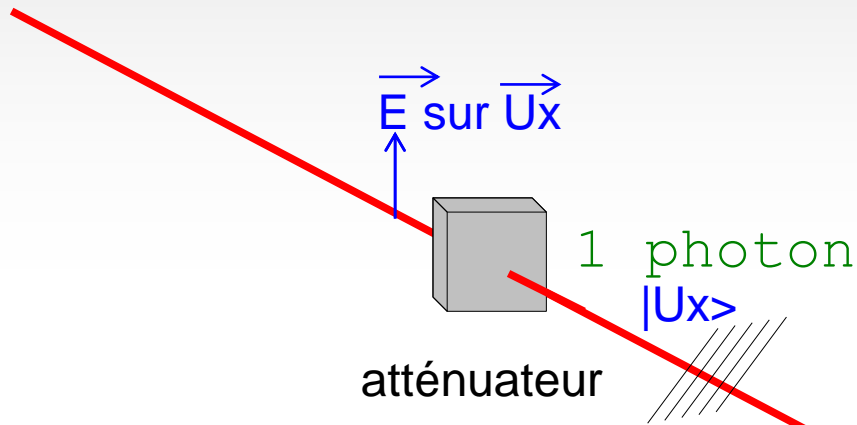


$$|U_x\rangle = \cos a |U_x'\rangle + \sin a |U_y'\rangle$$

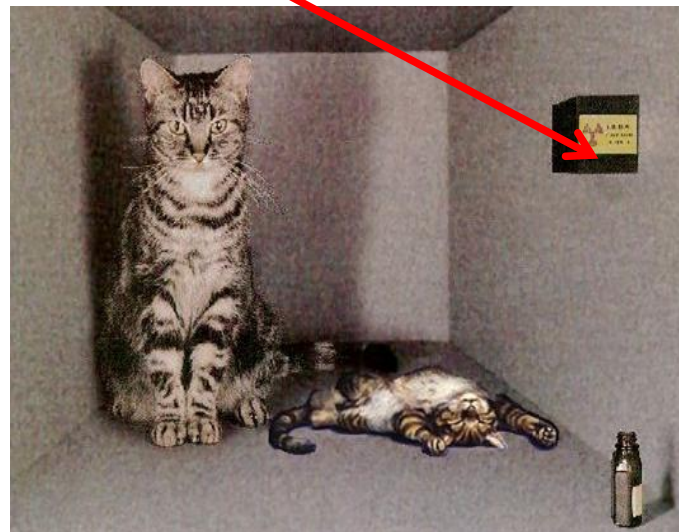


Dualité Onde Corpuscule

6. Le "paradoxe" du chat de Schrödinger

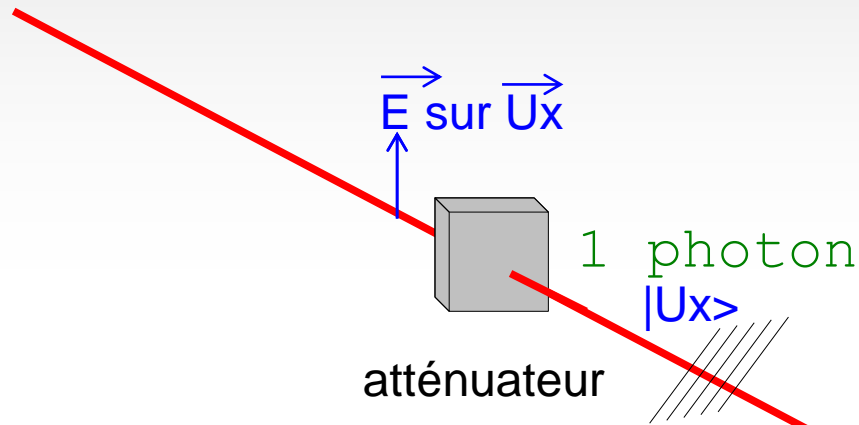


$$|Ux\rangle = \cos a |Ux'\rangle + \sin a |Uy'\rangle$$

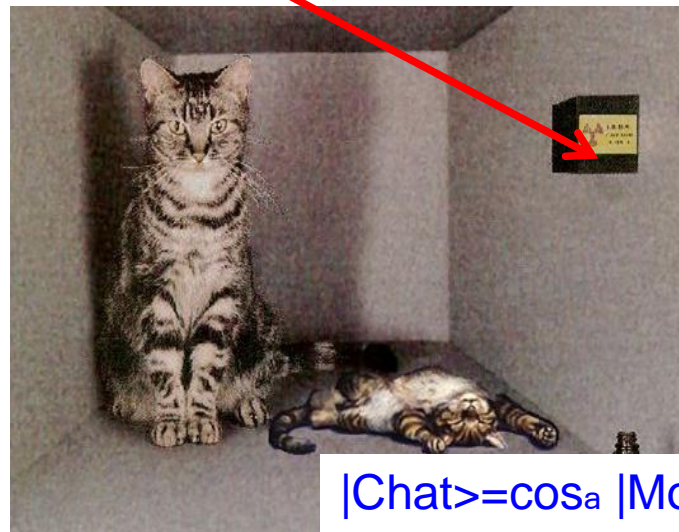


Dualité Onde Corpuscule

6. Le "paradoxe" du chat de Schrödinger



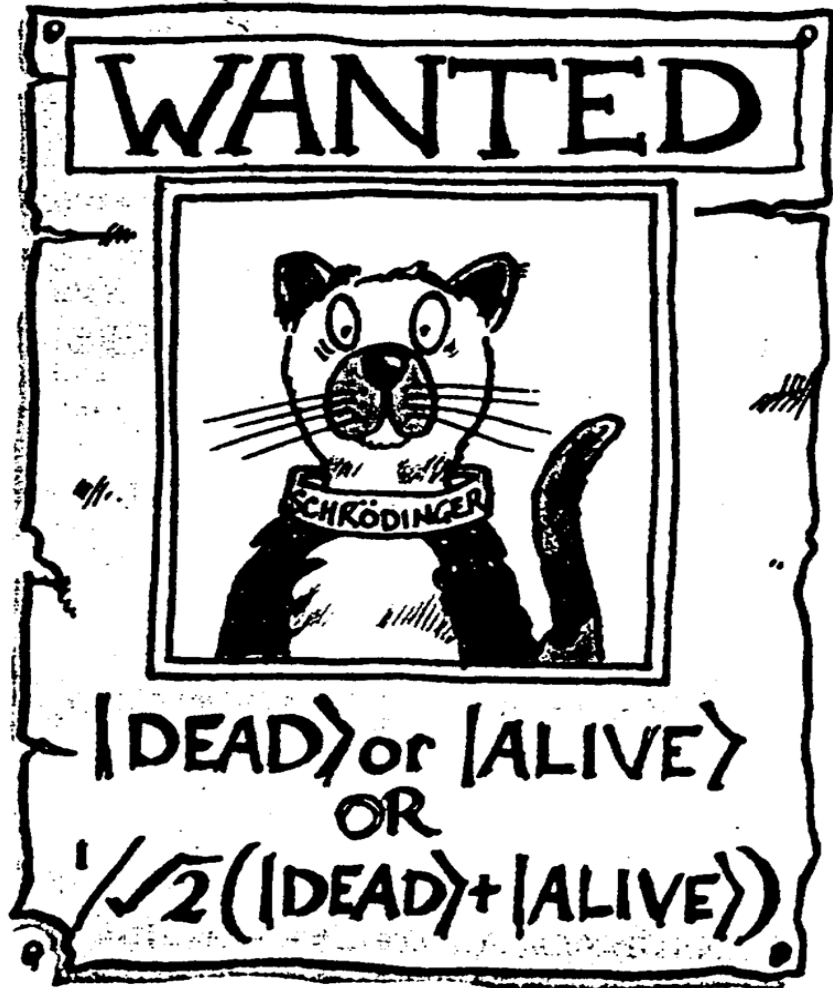
$$|U_x\rangle = \cos a |U_x'\rangle + \sin a |U_y'\rangle$$



$$|\text{Chat}\rangle = \cos a |\text{Mort}\rangle + \sin a |\text{Vivant}\rangle$$

Dualité Onde Corpuscule

6. Le "paradoxe" du chat de Schrödinger



Problème de décohérence quantique

Problème de la place de l'observateur en mécanique quantique