

Introduction à l'*intrication* quantique (*entanglement*)



NOBELPRISET I FYSIK 2022
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Photo: Royal Society

Alain Aspect

Université Paris-Saclay &
École Polytechnique, France

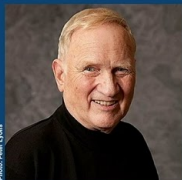


Photo: Peter Lyons

John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
USA

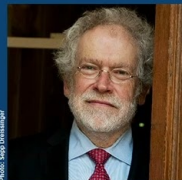


Photo: Siegfried Dauschinger

Anton Zeilinger

University of Vienna,
Austria

"för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformationsvetenskap"

"for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

#nobelprize

THE
NOBEL
PRIZE

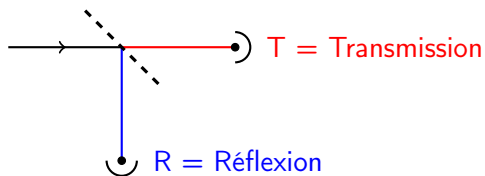
Physique Quantique

- ▶ Théorie développée au début du XX^e siècle pour décrire le **comportement des constituants élémentaires** (mais aussi de certains systèmes macroscopiques : supraconducteurs, lasers, condensats de Bose-Einstein...)
- ▶ Les **applications sont omniprésentes** : transistors (toute l'informatique), lasers (DVD, ophtalmologie, supermarché...)
- ▶ Les prédictions n'ont jamais été mises en défaut et la précision atteinte est phénoménale : $g_e = -2,002\,319\,304\,361\,82 \ (\pm 52)$
- ▶ L'**interprétation** des équations pose toujours problème : remise en cause profonde de notre vision du monde.
- ▶ *Aujourd'hui* : introduction aux mystères quantiques (choix)
 - **Dualité** onde-corpuscule
 - **Intrication** quantique
 - Le problème de la **mesure** : le chat de Schrödinger

Miroir semi-réfléchissant

Les quantons

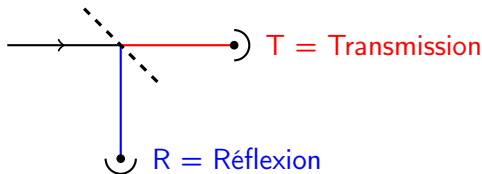
Lors d'une mesure, photons, électrons, protons... sont **indivisibles**.
On ne détecte jamais de demi-photon : c'est un ou zéro.



Miroir semi-réfléchissant

Les quantons

Lors d'une mesure, photons, électrons, protons... sont **indivisibles**.
On ne détecte jamais de demi-photon : c'est un ou zéro.



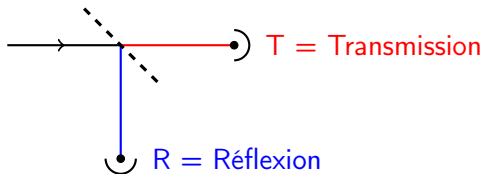
Propriété très importante

Les lois quantiques fixent les **probabilités**, mais ne permettent pas de prévoir le résultat d'une mesure unique (indéterminisme).

Miroir semi-réfléchissant

Les quantons

Lors d'une mesure, photons, électrons, protons... sont **indivisibles**.
On ne détecte jamais de demi-photon : c'est un ou zéro.

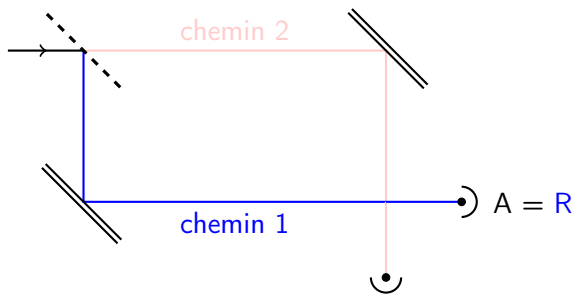


Propriété très importante

Les lois quantiques fixent les **probabilités**, mais ne permettent pas de prévoir le résultat d'une mesure unique (indéterminisme).

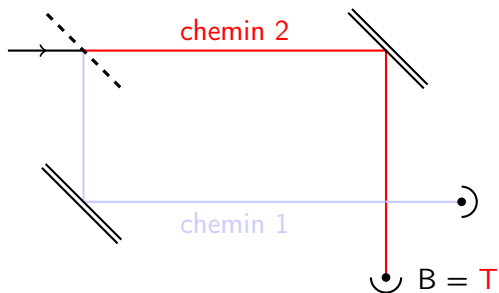
Le résultat (T ou R) n'a **pas de cause** : c'est une révolution en science !
Pour Einstein la théorie est **incomplète** : « Dieu ne joue pas aux dés »

Expérience où les deux chemins sont discernables



Photon détecté en A \Rightarrow chemin 1 $P_A = 50\%$

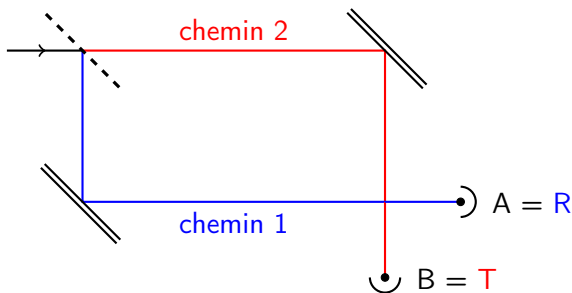
Expérience où les deux chemins sont discernables



Photon détecté en A \Rightarrow **chemin 1** $P_A = 50\%$

Photon détecté en B \Rightarrow **chemin 2** $P_B = 50\%$

Expérience où les deux chemins sont discernables



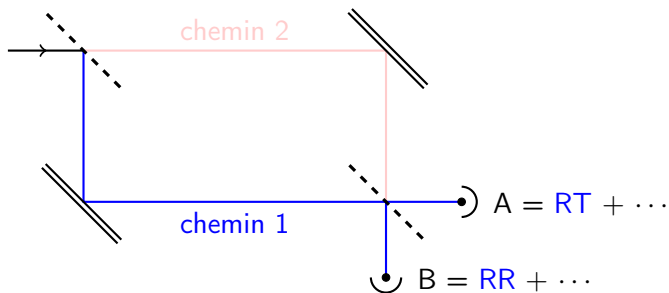
Photon détecté en A \Rightarrow chemin 1 $P_A = 50\%$

Photon détecté en B \Rightarrow chemin 2 $P_B = 50\%$

La détection permet de déterminer le chemin emprunté :
les deux chemins sont **discernables** (pas de surprise)

Expérience où les deux chemins sont **indiscernables**

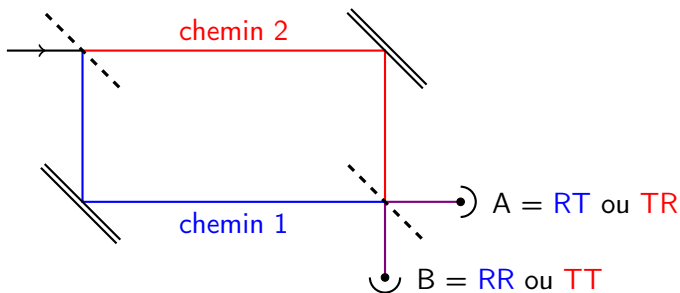
Ajoutons un miroir semi-réfléchissant



On s'attend à trouver $P_A = 25\% + \dots$

Expérience où les deux chemins sont **indiscernables**

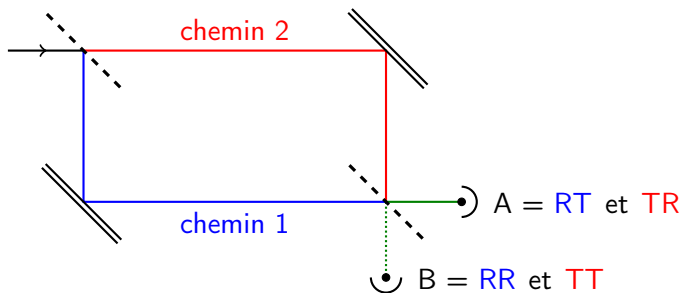
Ajoutons un miroir semi-réfléchissant



On s'attend à trouver $P_A = 25\% + 25\% = 50\%$ et $P_B = 50\%$

Expérience où les deux chemins sont **indiscernables**

Ajoutons un miroir semi-réfléchissant



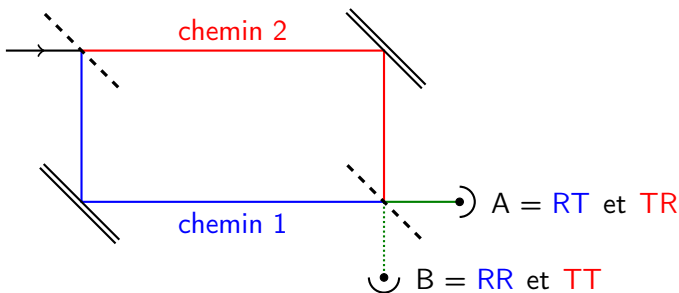
On s'attend à trouver $P_A = 25\% + 25\% = 50\%$ et $P_B = 50\%$

L'expérience donne $P_A = 100\%$ et $P_B = 0\%$

dans cette expérience « hasard + hasard = certitude » !

Expérience où les deux chemins sont **indiscernables**

Dans cette expérience, la question "Quel chemin a emprunté le photon ?" n'a pas de sens !



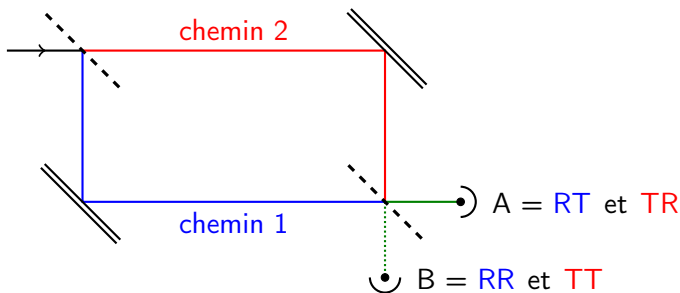
Photon détecté en A \Rightarrow **chemin 1** et **chemin 2**

La détection ne permet pas de déterminer le chemin emprunté : dans cette expérience, les deux chemins sont **indiscernables**.

C'est l'**indiscernabilité** des deux chemins qui permet d'obtenir des « **interférences quantiques** » entre ces chemins.

Expérience où les deux chemins sont **indiscernables**

Dans cette expérience, la question "Quel chemin a emprunté le photon ?" n'a pas de sens !



Photon détecté en A \Rightarrow **chemin 1** et / ou **chemin 2**

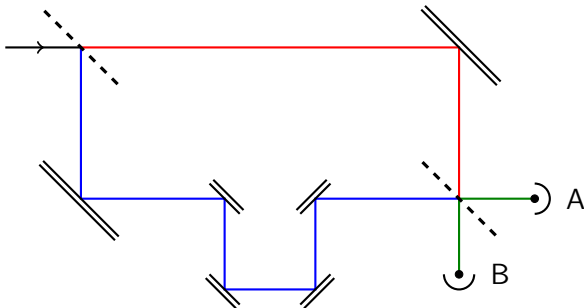
Le choix de mettre – ou pas – la seconde lame peut se faire **après** le passage à travers la première lame !

Si on met la seconde lame, le photon sera nécessairement détecté en A.

Si on ne la met pas, le photon peut être détecté en A **ou** en B.

Modification des probabilités de détection

En modifiant **un seul** chemin, on modifie le comportement de **toutes** les particules !



ℓ_1 = longueur du chemin 1

ℓ_2 = longueur du chemin 2

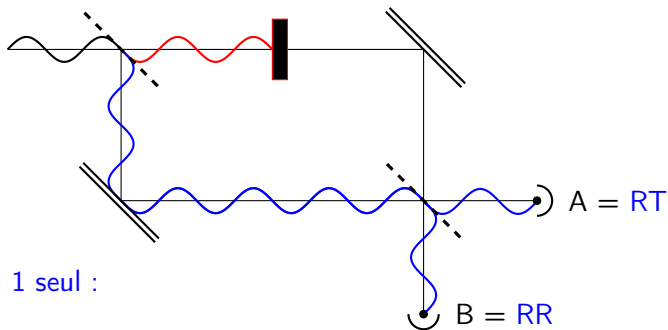
$$P_A = \cos^2 \left(\pi \frac{\ell_1 - \ell_2}{\lambda} \right) \quad \text{et} \quad P_B = \sin^2 \left(\pi \frac{\ell_1 - \ell_2}{\lambda} \right)$$

λ = propriété du quanton (longueur d'onde)

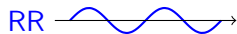
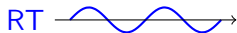
$$\ell_1 - \ell_2 = \lambda/2 \quad \implies \quad P_A = 0 \quad \text{et} \quad P_B = 1 = 100\%$$

Description ondulatoire

Principe de superposition



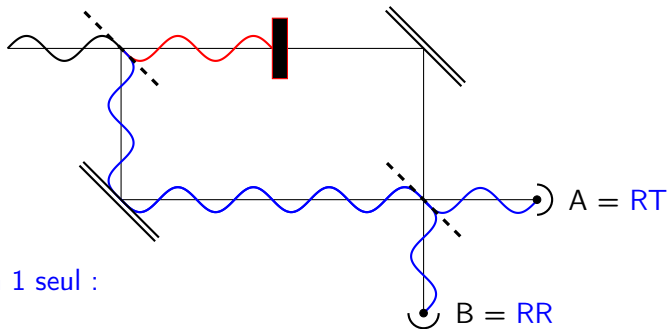
chemin 1 seul :



Description ondulatoire

Une probabilité est toujours positive.

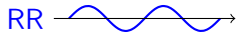
Principe de superposition



chemin 1 seul :



La probabilité est égale à l'amplitude de l'onde au carré



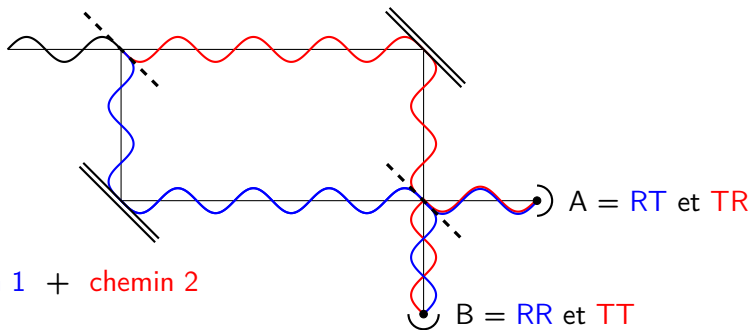
$$P_A = |RT|^2 = |RR|^2 = P_B$$

Description ondulatoire

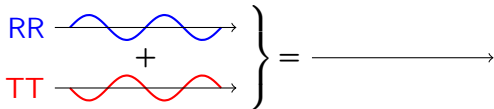
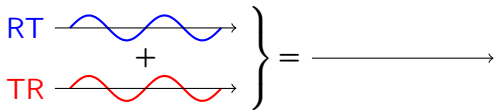
Principe de superposition

Une probabilité est toujours positive.

Mais une vibration peut être négative.



chemin 1 + chemin 2



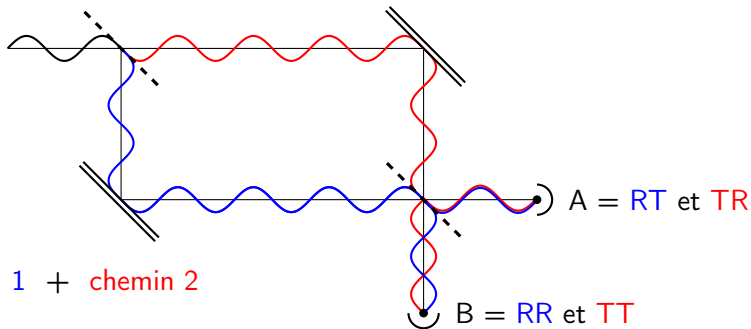
Description ondulatoire

Principe de superposition

Une probabilité est toujours positive.

Mais une vibration peut être négative.

La somme de deux ondes peut être nulle.



chemin 1 + chemin 2

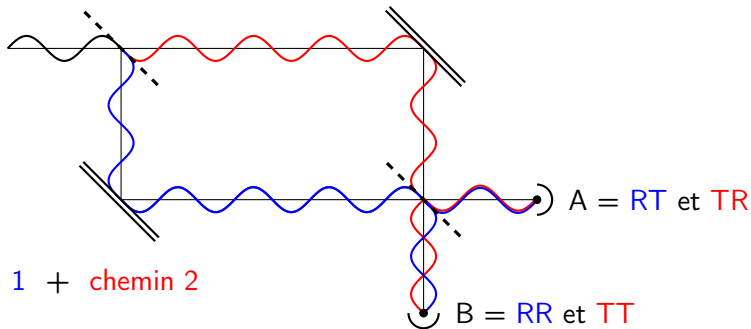
$$\left. \begin{array}{l} \text{RT} \\ \text{TR} \end{array} \right\} + = \text{interférence constructive}$$
$$P_A = |\text{RT} + \text{TR}|^2 = 1$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{RR} \\ \text{TT} \end{array} \right\} + = \text{interférence destructive}$$
$$P_B = |\text{RR} + \text{TT}|^2 = 0$$

Description ondulatoire

Principe de superposition

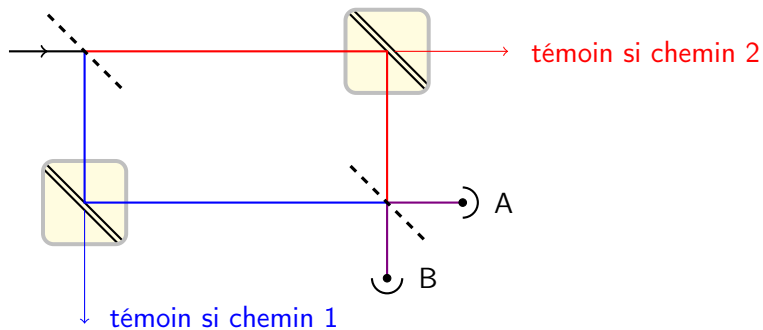
Un quanton possède à la fois des propriétés **corpusculaires** (détection) et des propriétés **ondulatoires** (propagation)



chemin 1 + chemin 2

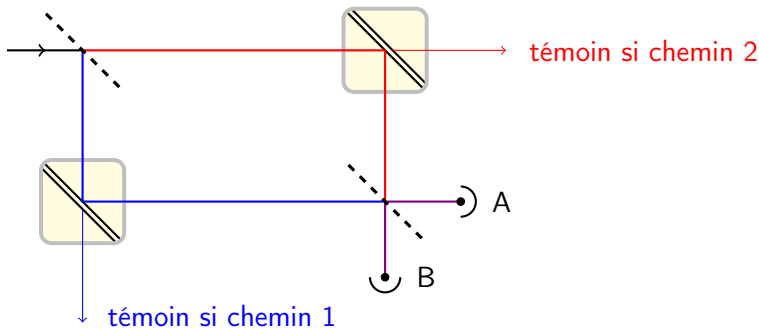
RT		+		}		interférence constructive
TR						$P_A = RT + TR ^2 = 1$
RR		+		}		interférence destructive
TT						$P_B = RR + TT ^2 = 0$

Et si on « regarde » quel chemin emprunte le photon ?



On génère un « photon témoin » qui porte l’empreinte du chemin utilisé par le « photon principal », mais...

Et si on « regarde » quel chemin emprunte le photon ?



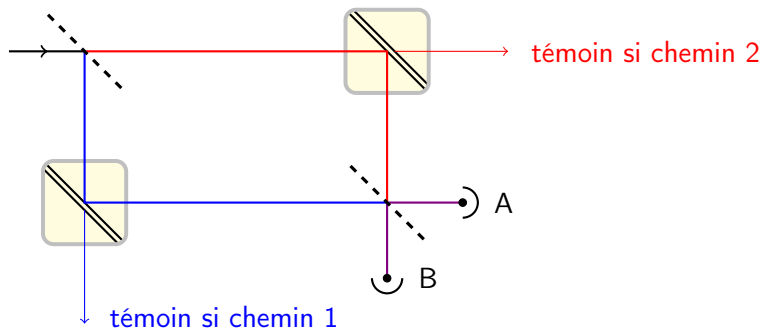
On génère un « photon témoin » qui porte l’empreinte du chemin utilisé par le « photon principal », mais...

$P_A = P_B = 50\%$: les interférences quantiques disparaissent !

Les deux chemins **ne sont plus indiscernables** :

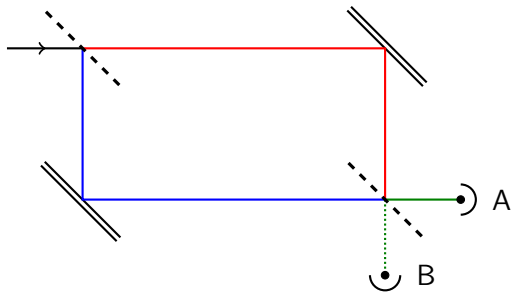
on *peut* détecter le photon témoin (au moins en principe)

Et si on « regarde » quel chemin emprunte le photon ?



Si on "observe" le chemin avec un photon témoin alors le photon principal se comporte comme un corpuscule.

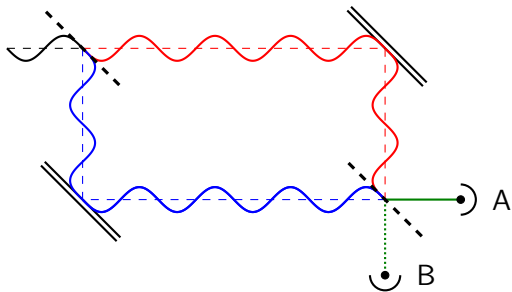
Dualité onde corpuscule ?



Si on “observe” le chemin avec un photon témoin alors le photon principal se comporte comme un corpuscule.

Si on n’observe pas le chemin, alors il y a des interférences qui s’expliquent en décrivant le photon comme une onde.

Dualité onde corpuscule ?

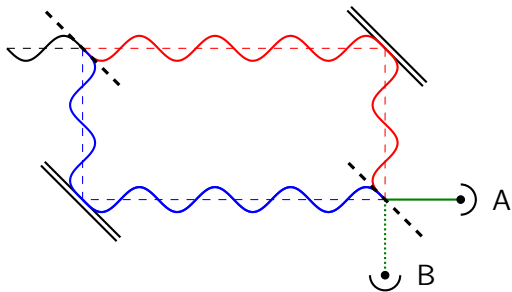


Si on “observe” le chemin avec un photon témoin alors le photon principal se comporte comme un corpuscule.

Si on n’observe pas le chemin, alors il y a des interférences qui s’expliquent en décrivant le photon comme une onde.

On parle souvent de “dualité onde-corpuscule” pour un objet quantique.

Dualité onde corpuscule ?

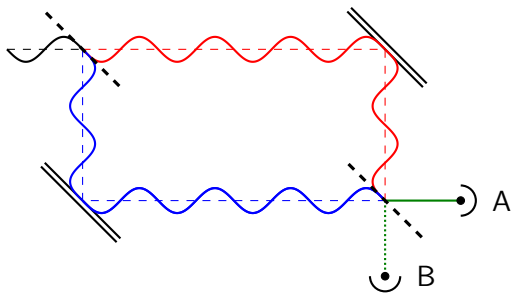


Si on “observe” le chemin avec un photon témoin alors le photon principal se comporte comme un corpuscule.

Si on n’observe pas le chemin, alors il y a des interférences qui s’expliquent en décrivant le photon comme une onde.

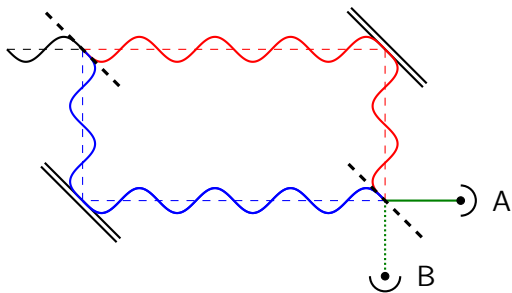
Il existe des expériences où c’est plus subtil que ça . . .

Comment éviter les raisonnements incohérents ?



Message important : contrairement à la physique classique, on ne peut **pas utiliser une expérience qu'on aurait pu réaliser** pour en déduire quelque chose à propos de l'expérience qui a effectivement été réalisée.

Comment éviter les raisonnements incohérents ?

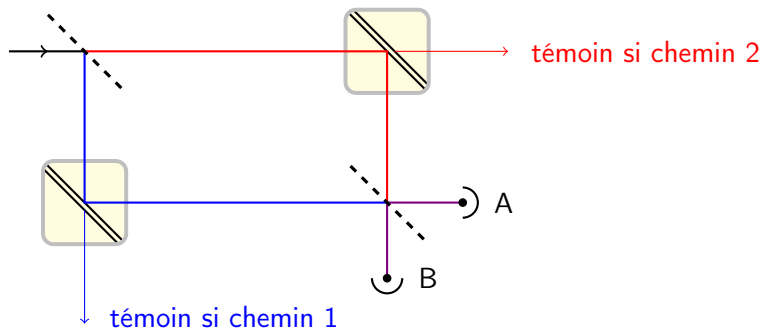


Message important : contrairement à la physique classique, on ne peut **pas utiliser une expérience qu'on aurait pu réaliser** pour en déduire quelque chose à propos de l'expérience qui a effectivement été réalisée.

S'il existe plusieurs chemins **indiscernables** possibles, alors il ne faut **pas** raisonner sur le chemin "emprunté" par la particule.

Unperformed experiments have no results ! (Asher Peres)

Encore plus fort : la gomme quantique !

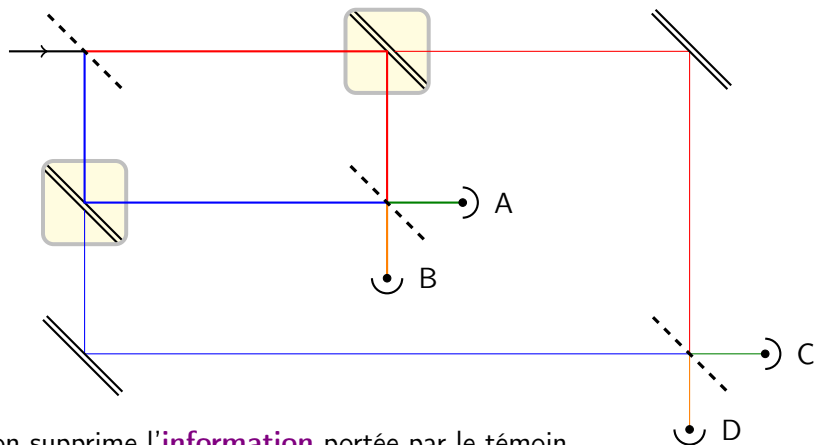


Si on supprime l'**information** portée par le témoin

Quelles conséquences ?

Comment faire ?

Encore plus fort : la gomme quantique !

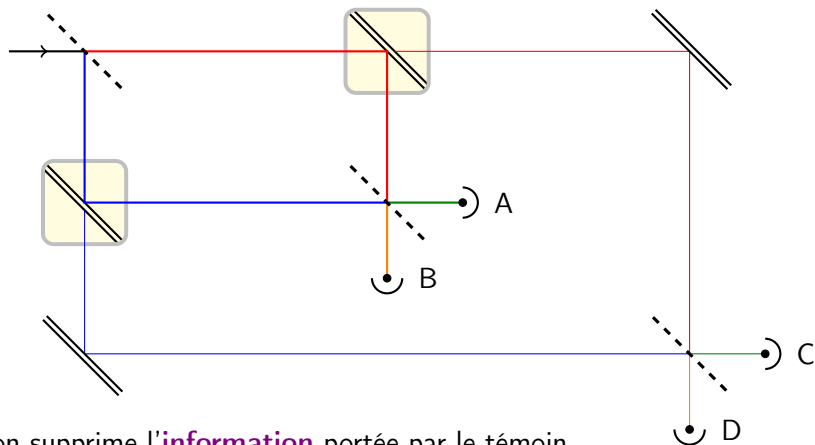


Si on supprime l'**information** portée par le témoin
les deux chemins redeviennent **indiscernables**,
on *peut* retrouver des interférences quantiques !

$$P_{A \text{ si } C} = 100\%$$

$$P_{A \text{ si } D} = 0$$

Encore plus fort : la gomme quantique !



Si on supprime l'**information** portée par le témoin
les deux chemins redeviennent **indiscernables**,
on *peut* retrouver des interférences quantiques !

$$P_{A \text{ si } C} = 100\%$$

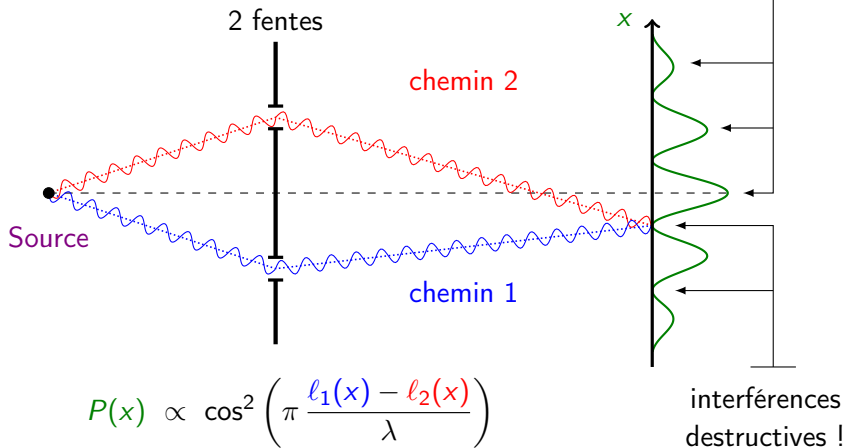
$$P_{A \text{ si } D} = 0$$

Ces corrélations ne peuvent pas s'expliquer avec des ondes ou des corpuscules.

Expérience des fentes de Young

C'est la même chose !

en 1807



chemins **indiscernables** \Rightarrow interférences à 1 quanton
en certains points « lumière + lumière = obscurité »

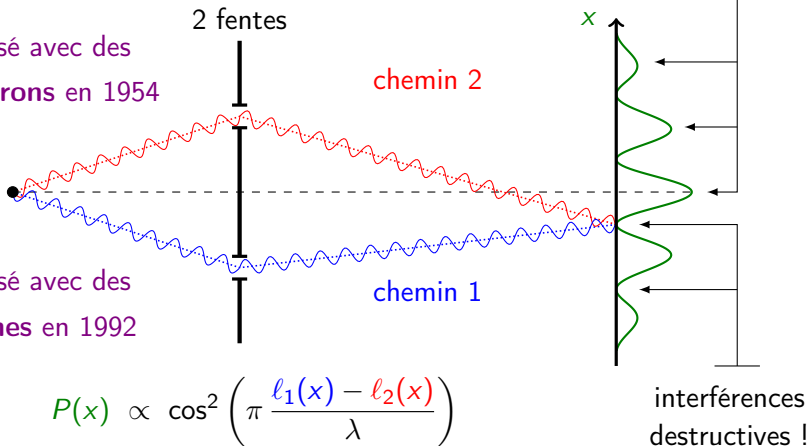
Expérience des fentes de Young

C'est la même chose !

en 1807

Réalisé avec des
électrons en 1954

Réalisé avec des
atomes en 1992



$$P(x) \propto \cos^2 \left(\pi \frac{l_1(x) - l_2(x)}{\lambda} \right)$$

chemins **indiscernables** \Rightarrow interférences à 1 quanton
en certains points « lumière + lumière = obscurité »

Expérience des fentes de Young

C'est la même chose !

en 1807



Réalisé avec des
fullerènes en 2003 !

2 fentes

chemin 2

chemin 1

interférences constructives

détecteur = écran

x

interférences
destructives !

$$P(x) \propto \cos^2 \left(\pi \frac{l_1(x) - l_2(x)}{\lambda} \right)$$

chemins **indiscernables** \Rightarrow interférences à 1 quanton
en certains points « lumière + lumière = obscurité »

L'expérience réalisée avec des photons **uniques** en 2005 !

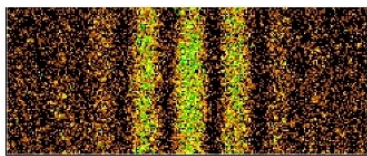
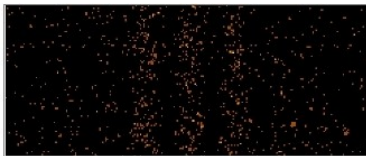
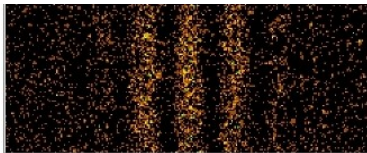
Durée :

10 s

100 s

500 s

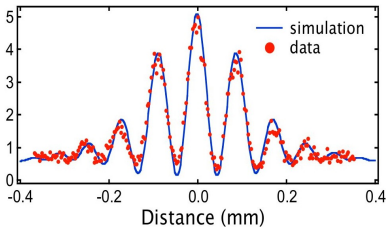
2000 s



Single-photon wavefront-splitting interference
An illustration of the light quantum in action

V. Jacques, E. Wu, T. Toury, F. Treussart,
A. Aspect, P. Grangier et J.-F. Roch

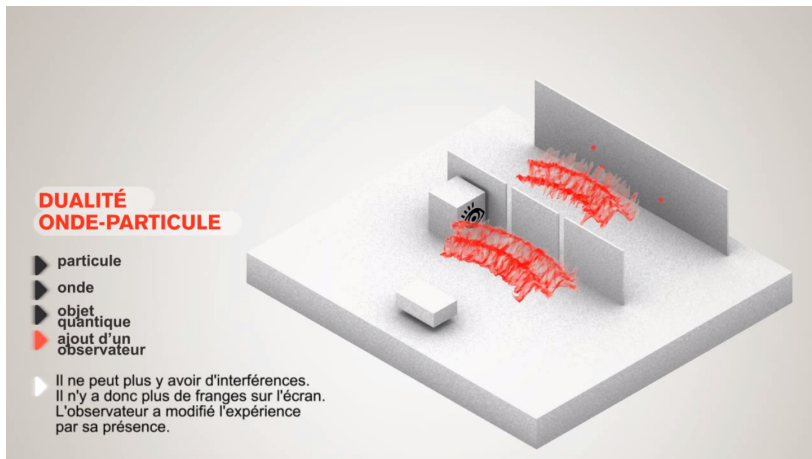
EPJD, Vol. **35**, p. 561 (2005)



Regarder la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=PaTgZrc5iYk>

Thèse à consulter : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00281163>

Tout est quantique !



Regarder la vidéo sur la « dualité » onde - corpuscule

<http://www.toutestquantique.fr>

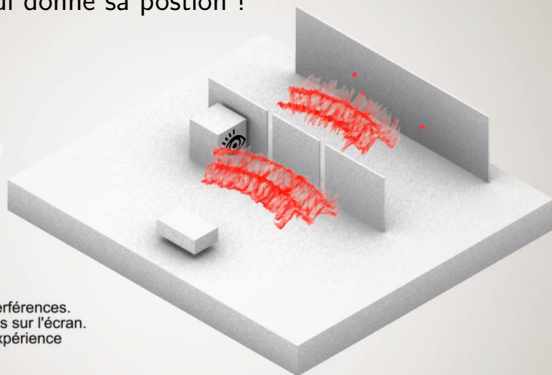
Tout est quantique !

C'est la "mesure" qui supprime les superpositions quantiques : regarder l'objet lui donne sa position !

DUALITÉ ONDE-PARTICULE

- ▶ particule
- ▶ onde
- ▶ objet quantique
- ▶ ajout d'un observateur

- ▶ Il ne peut plus y avoir d'interférences. Il n'y a donc plus de franges sur l'écran. L'observateur a modifié l'expérience par sa présence.

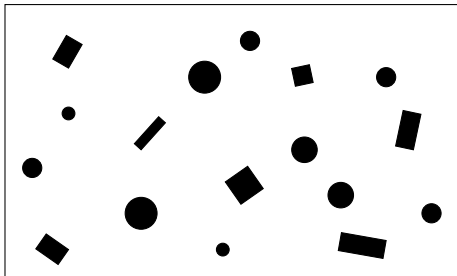


Regarder la vidéo sur la « dualité » onde - corpuscule

<http://www.toutestquantique.fr>

Dualité onde - corpuscule ?

Ou plutôt **unité** cachée ?



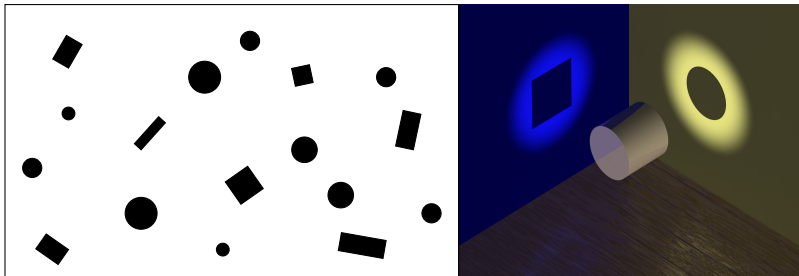
- ▶ les photons **ne sont pas** des petites billes : ils peuvent interférer
- ▶ les photons **ne sont pas** des ondes classiques : ils produisent des impacts ponctuels
- ▶ les atomes **ne sont pas** des petites billes : ils peuvent interférer
- ▶ les atomes **ne sont pas** des ondes classiques : ils produisent des impacts ponctuels

Les scientifiques de ce monde « simplifié » ont découvert les « objets » fondamentaux : les cercles et les rectangles.

Ces deux objets ne pourraient-ils pas être en fait un **objet unique** ?

Dualité onde - corpuscule ?

Ou plutôt **unité** cachée ?



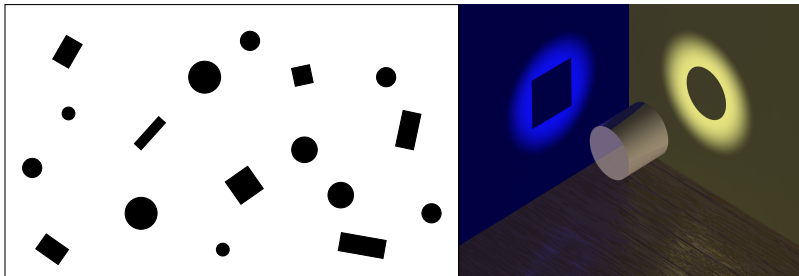
Les cylindres : ni cercles – ni rectangles

Les quantons : **ni** ondes – **ni** corpuscules

Difficulté : un quanton « vit » dans un espace de **dimension infinie** (!)
il est décrit par un **vecteur d'état** noté $|\Psi\rangle$ et appelé *fonction d'onde*

Dualité onde - corpuscule ?

Ou plutôt **unité** cachée ?



Les cylindres : ni cercles – ni rectangles

Les quantons : **ni** ondes – **ni** corpuscules

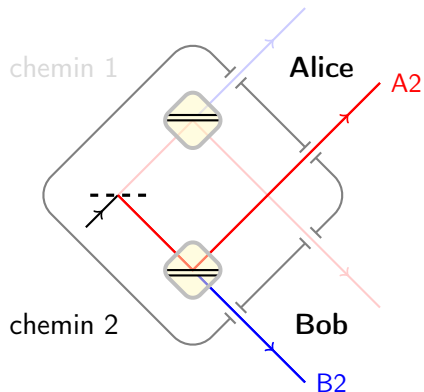
Difficulté : un quanton « vit » dans un espace de **dimension infinie** (!)
il est décrit par un **vecteur d'état** noté $|\Psi\rangle$ et appelé *fonction d'onde*

Passage à 2 particules : deuxième révolution quantique !

L'argument EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 1935

Pour le photon principal (rouge) on a $P_2 = 1/2$

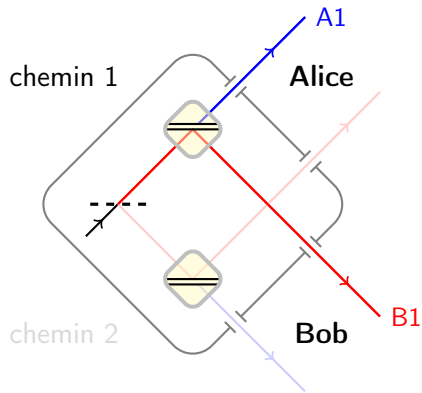
Pour le photon témoin (en bleu) on a $P_2 = 1/2$



L'argument EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 1935

Pour le photon principal (rouge) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

Pour le photon témoin (en bleu) on a $P_2 = 1/2 = P_1$



L'argument EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 1935

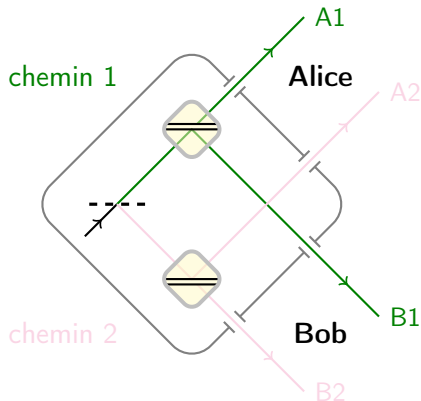
Pour le photon principal (rouge) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

Pour le photon témoin (en bleu) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

mais

les deux photons sont « **intriqués** » :

si Alice trouve 1, Bob trouve 1

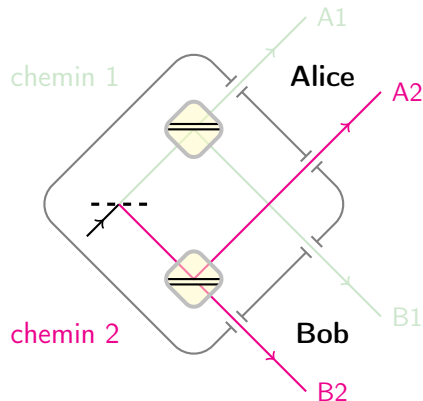


L'argument EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 1935

Pour le photon principal (rouge) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

Pour le photon témoin (en bleu) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

mais



les deux photons sont « **intriqués** » :

si Alice trouve 1, Bob trouve 1

si Alice trouve 2, Bob trouve 2

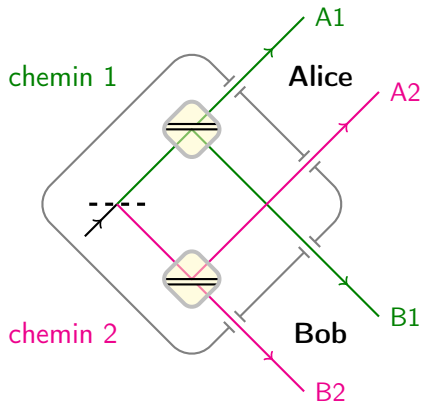
les détections sont totalement **corrélées**

L'argument EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 1935

Pour le photon principal (rouge) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

Pour le photon témoin (en bleu) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

mais



les deux photons sont « **intriqués** » :

si Alice trouve 1, Bob trouve 1

si Alice trouve 2, Bob trouve 2

les détections sont totalement **corrélées**

d'après la physique quantique
c'est la **mesure** qui détermine

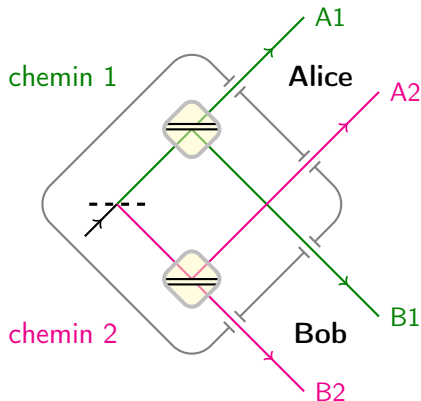
le chemin emprunté par les photons

L'argument EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 1935

Pour le photon principal (rouge) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

Pour le photon témoin (en bleu) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

mais



les deux photons sont « **intriqués** » :

si Alice trouve 1, Bob trouve 1

si Alice trouve 2, Bob trouve 2

les détections sont totalement **corrélées**

d'après la physique quantique
c'est la **mesure** qui détermine

le chemin emprunté par les photons

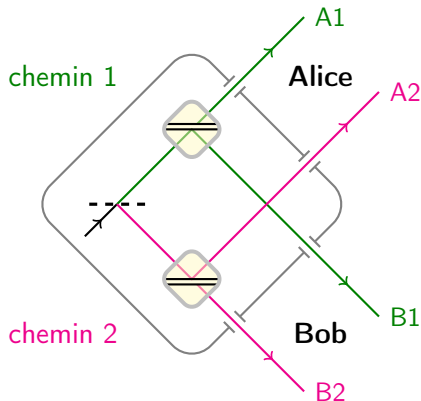
La mesure faite par Alice modifie aussi l'état du côté de Bob !!!

L'argument EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 1935

Pour le photon principal (rouge) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

Pour le photon témoin (en bleu) on a $P_2 = 1/2 = P_1$

mais



les deux photons sont « **intriqués** » :

si Alice trouve 1, Bob trouve 1

si Alice trouve 2, Bob trouve 2

les détections sont totalement **corrélées**

d'après la physique quantique
c'est la **mesure** qui détermine

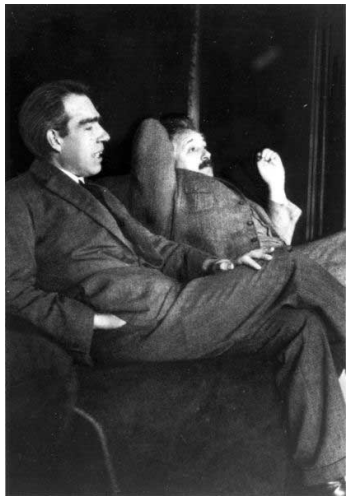
le chemin emprunté par les photons

La mesure faite par Alice modifie aussi l'état du côté de Bob !!!

Pour Einstein, le chemin emprunté **préexiste** à la mesure...

Existe-t-il des « théories à variables cachées locales » ?

Le débat entre Einstein et Bohr a duré jusqu'à leur mort (resp. 1955 et 1962)

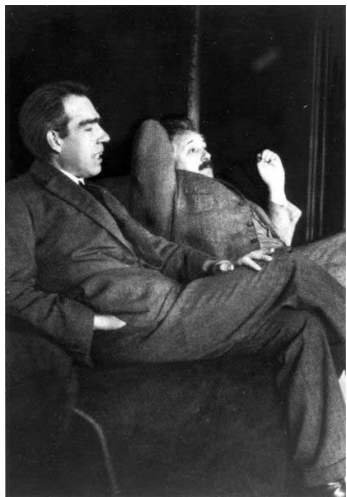


Il faut **choisir** l'une des deux assertions :

$$|\psi\rangle = |\text{chemin 1}\rangle + |\text{chemin 2}\rangle$$

Existe-t-il des « théories à variables cachées locales » ?

Le débat entre Einstein et Bohr a duré jusqu'à leur mort (resp. 1955 et 1962)



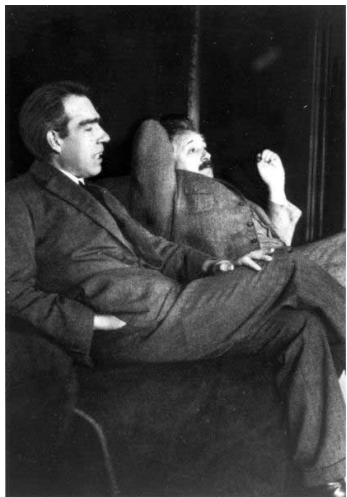
Il faut **choisir** l'une des deux assertions :

1. les états réels de deux objets séparés *ne sont pas indépendants* l'un de l'autre ;

$$|\psi\rangle = |\text{chemin 1}\rangle + |\text{chemin 2}\rangle$$

Existe-t-il des « théories à variables cachées locales » ?

Le débat entre Einstein et Bohr a duré jusqu'à leur mort (resp. 1955 et 1962)



Il faut **choisir** l'une des deux assertions :

1. les états réels de deux objets séparés *ne sont pas indépendants* l'un de l'autre ;
2. la description au moyen de la fonction d'onde $|\Psi\rangle$ est *incomplète*.

$$|\Psi\rangle = |\text{chemin 1}\rangle + |\text{chemin 2}\rangle$$

John Bell : l'homme qui met la philosophie en équation !

Les interprétations de Bohr et d'Einstein ne prévoient pas des résultats physiques différents : c'est uniquement un débat "philosophique" ...

John Bell : l'homme qui met la philosophie en équation !

Les interprétations de Bohr et d'Einstein ne prévoient pas des résultats physiques différents : c'est ~~uniquement~~ un débat "philosophique" ...
et scientifique



En 1964, John Bell découvre une situation théorique où les deux visions du monde ne donnent pas les mêmes résultats physiques !

John Bell : l'homme qui met la philosophie en équation !

Les interprétations de Bohr et d'Einstein ne prévoient pas des résultats physiques différents : c'est ~~uniquement~~ un débat "philosophique" ...

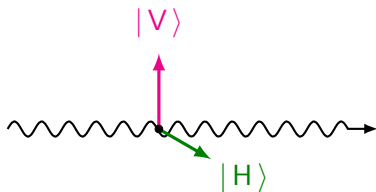


En 1964, John Bell découvre une situation théorique où les deux visions du monde ne donnent pas les mêmes résultats physiques !

En 1982, Alain Aspect réalise l'expérience qui permet de trancher le débat.

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

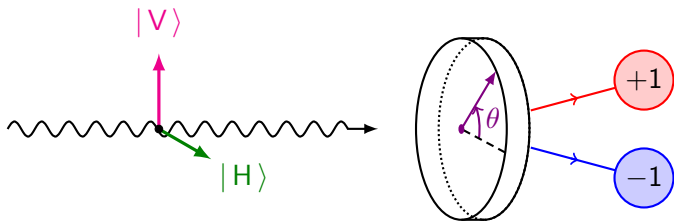
Considérons une polarisation **horizontale** $|H\rangle$ ou bien **verticale** $|V\rangle$



La polarisation désigne la **direction** du vecteur champ électrique oscillant associé à l'onde. Pour la lumière dans le vide, la direction de la **polarisation** est **orthogonale** à la direction de **propagation**.

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Considérons une polarisation **horizontale** $|H\rangle$ ou bien **verticale** $|V\rangle$

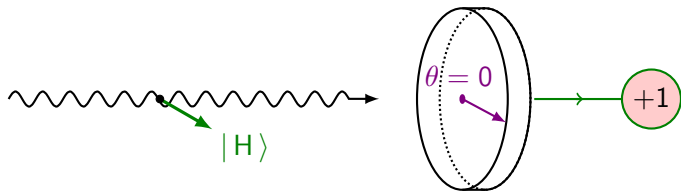


L'expérimentateur mesure la "polarisation" (± 1) en fonction de l'angle θ

Les probabilités de trouver $+1$ ou -1 dépendent de l'angle θ et de la polarisation incidente : ces probabilités sont données par une adaptation de la **loi de Malus** (en $\cos^2 \theta$) pour les photons.

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Considérons une polarisation **horizontale** $|H\rangle$

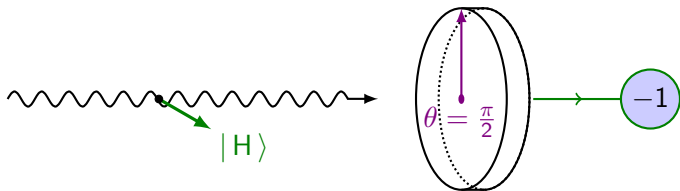


L'expérimentateur mesure la "polarisation" (± 1) en fonction de l'angle θ

- dans l'état $|H\rangle$ avec $\theta = 0$ la mesure donne toujours $+1$

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Considérons une polarisation **horizontale** $|H\rangle$

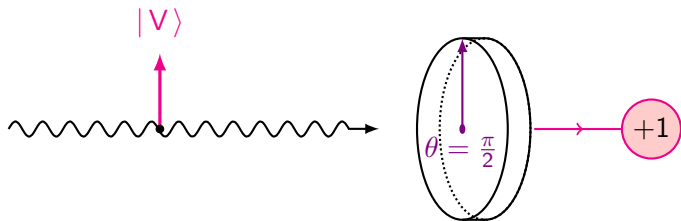


L'expérimentateur mesure la "polarisation" (± 1) en fonction de l'angle θ

- dans l'état $|H\rangle$ avec $\theta = 0$ la mesure donne toujours $+1$
- dans l'état $|H\rangle$ avec $\theta = \frac{\pi}{2}$ la mesure donne toujours -1

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Considérons une polarisation **verticale** $|V\rangle$

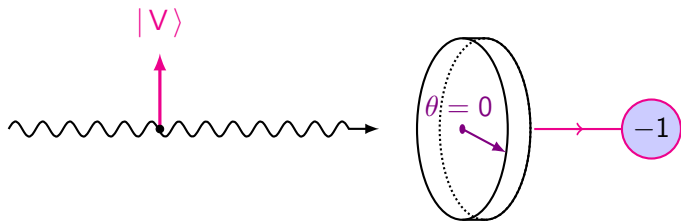


L'expérimentateur mesure la "polarisation" (± 1) en fonction de l'angle θ

- dans l'état $|H\rangle$ avec $\theta = 0$ la mesure donne toujours $+1$
- dans l'état $|H\rangle$ avec $\theta = \frac{\pi}{2}$ la mesure donne toujours -1
- dans l'état $|V\rangle$ avec $\theta = \frac{\pi}{2}$ la mesure donne toujours $+1$

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Considérons une polarisation **verticale** $|V\rangle$

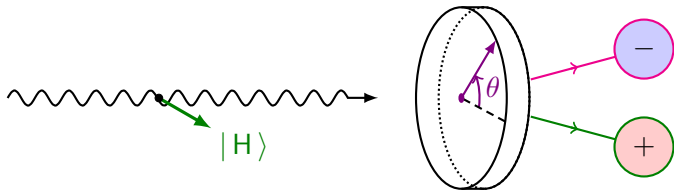


L'expérimentateur mesure la "polarisation" (± 1) en fonction de l'angle θ

- dans l'état $|H\rangle$ avec $\theta = 0$ la mesure donne toujours $+1$
- dans l'état $|H\rangle$ avec $\theta = \frac{\pi}{2}$ la mesure donne toujours -1
- dans l'état $|V\rangle$ avec $\theta = \frac{\pi}{2}$ la mesure donne toujours $+1$
- dans l'état $|V\rangle$ avec $\theta = 0$ la mesure donne toujours -1

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Considérons une polarisation **horizontale** $|H\rangle$

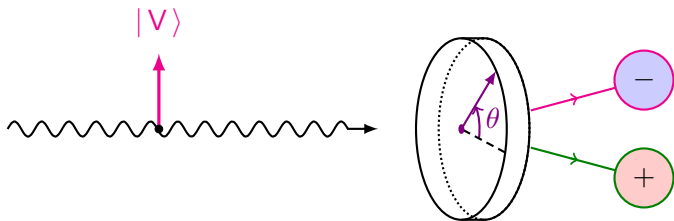


L'expérimentateur mesure la "polarisation" (± 1) en fonction de l'angle θ

- dans l'état $|H\rangle$ la mesure donne **+1** avec une probabilité $\cos^2 \theta$
- dans l'état $|H\rangle$ la mesure donne **-1** avec une probabilité $\sin^2 \theta$

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Considérons une polarisation **verticale** $|V\rangle$



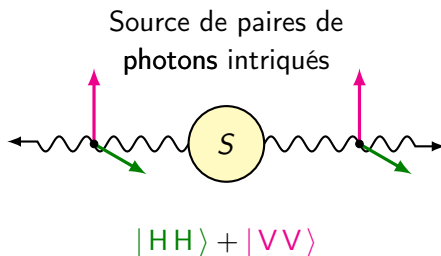
L'expérimentateur mesure la "polarisation" (± 1) en fonction de l'angle θ

- dans l'état $|H\rangle$ la mesure donne $+1$ avec une probabilité $\cos^2 \theta$
- dans l'état $|H\rangle$ la mesure donne -1 avec une probabilité $\sin^2 \theta$
- dans l'état $|V\rangle$ la mesure donne $+1$ avec une probabilité $\sin^2 \theta$
- dans l'état $|V\rangle$ la mesure donne -1 avec une probabilité $\cos^2 \theta$

Cette "loi de Malus" redonne bien les cas particuliers $\theta = 0$ et $\theta = \pi/2$

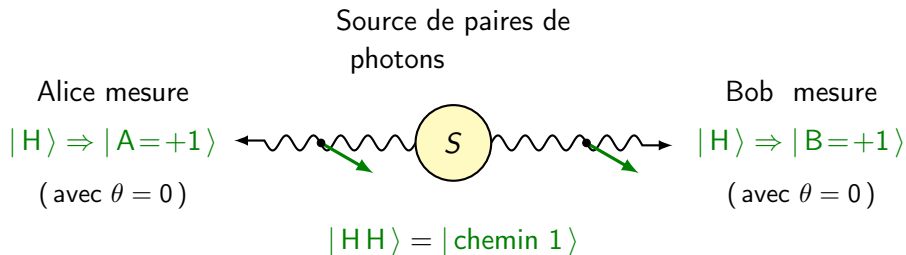
La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Les deux chemins **1** et **2** sont ici remplacés par les deux polarisations orthogonales **H** : **horizontale** et **V** : **verticale**



La polarisation donne un degré de liberté supplémentaire

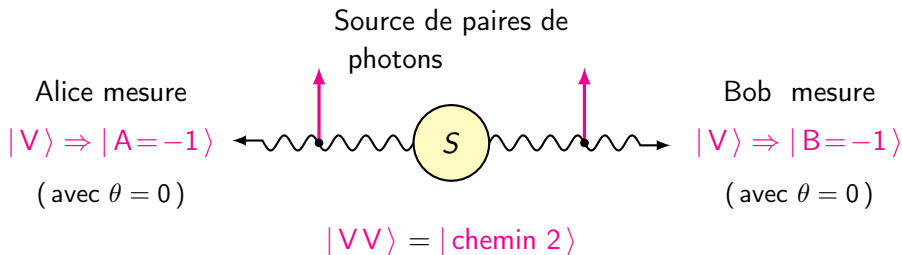
Les deux chemins 1 et 2 sont ici remplacés par les deux polarisations orthogonales **H** : horizontale et **V** : verticale



avec cet état, les résultats des mesures pour $\theta = 0$
sont prédéterminés (c'est aussi le cas pour $\theta = \pi/2$)

La polarisation donne un degré de liberté supplémentaire

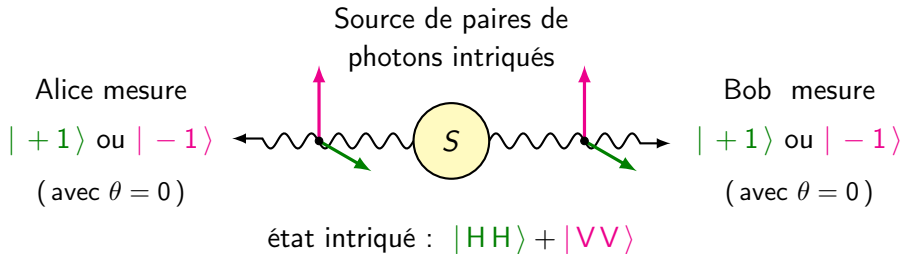
Les deux chemins 1 et 2 sont ici remplacés par les deux polarisations orthogonales **H** : horizontale et **V** : verticale



avec cet état, les résultats des mesures pour $\theta = 0$
sont prédéterminés (c'est aussi le cas pour $\theta = \pi/2$)

La polarisation donne un degré de liberté supplémentaire

Les deux chemins 1 et 2 sont ici remplacés par les deux polarisations orthogonales **H** : horizontale et **V** : verticale

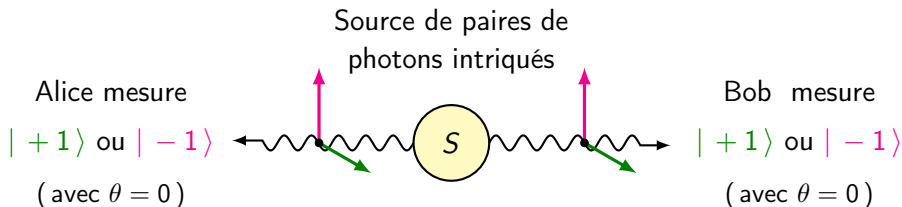


avec cet état, les résultats des mesures

ne sont pas prédéterminés

La polarisation donne un degré de liberté supplémentaire

Les deux chemins 1 et 2 sont ici remplacés par les deux polarisations orthogonales **H** : horizontale et **V** : verticale



état intriqué : $|HH\rangle + |VV\rangle$

équivalent de : $|\text{chemin 1}\rangle + |\text{chemin 2}\rangle$

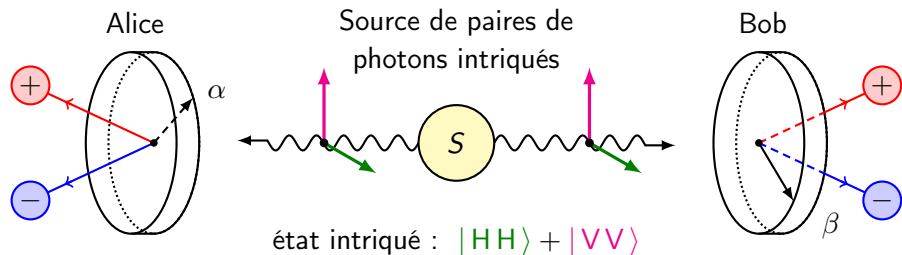
corrélations : $|A=+1; B=+1\rangle + |A=-1; B=-1\rangle$

la première mesure détermine la polarisation des 2 photons

Alice et Bob obtiennent toujours des résultats **identiques** !

La **polarisation** donne un degré de liberté supplémentaire

Alice et Bob peuvent mesurer la polarisation avec des angles **différents** :



Alice mesure la polarisation selon la direction α :

$$\begin{cases} P(\alpha \rightarrow +1) = 1/2 \\ P(\alpha \rightarrow -1) = 1/2 \end{cases}$$

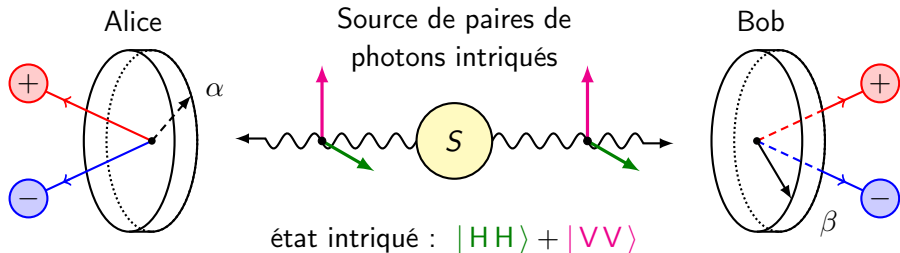
Bob mesure la polarisation selon la direction β :

$$\begin{cases} P(\beta \rightarrow +1) = 1/2 \\ P(\beta \rightarrow -1) = 1/2 \end{cases}$$

Les résultats des mesures **individuelles** sont totalement **aléatoires** $\forall (\alpha; \beta)$

Les résultats de mesure sont aléatoires mais **corrélés** !

La **mesure** réalisée par Alice **détermine** la polarisation (+1 ou -1) correspondant à l'angle α (avec $P_{\pm} = 1/2$). La probabilité que Bob trouve le même résultat est donnée par la loi de Malus : $\cos^2(\beta - \alpha)$



Alice mesure la polarisation selon la direction α :

$$\begin{cases} P(\alpha \rightarrow +1) = 1/2 \\ P(\alpha \rightarrow -1) = 1/2 \end{cases}$$

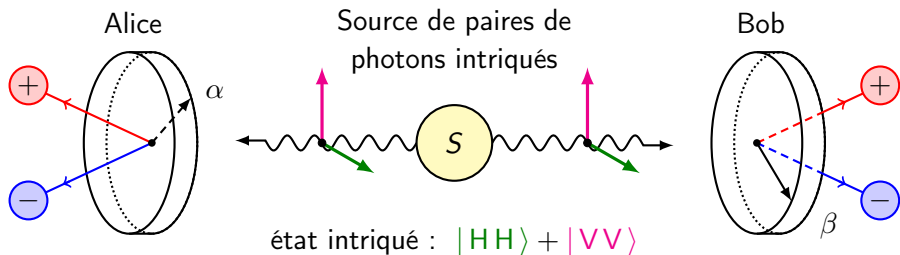
Bob mesure la polarisation selon la direction β :

$$\begin{cases} P(\beta \rightarrow +1) = 1/2 \\ P(\beta \rightarrow -1) = 1/2 \end{cases}$$

Les résultats des mesures **individuelles** sont totalement **aléatoires** $\forall (\alpha; \beta)$

Les résultats de mesure sont aléatoires mais **corrélés** !

La **mesure** réalisée par Alice **détermine** la polarisation (+1 ou -1) correspondant à l'angle α (avec $P_{\pm} = 1/2$). La probabilité que Bob trouve le même résultat est donnée par la loi de Malus : $\cos^2(\beta - \alpha)$



Pour des orientations α et β quelconques, la théorie quantique prédit :

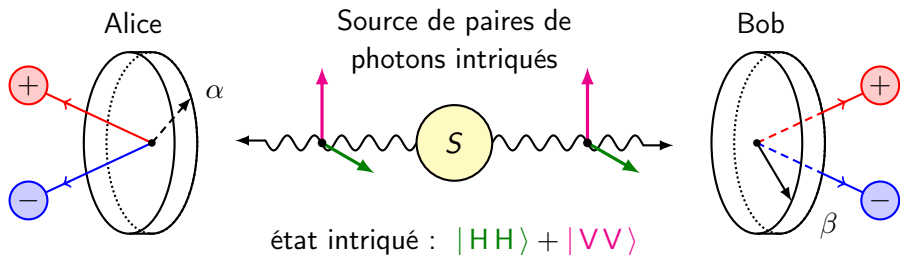
$$P(\alpha \rightarrow +1; \beta \rightarrow +1) = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha - \beta) = P(\alpha \rightarrow -1; \beta \rightarrow -1)$$

$$P(\alpha \rightarrow +1; \beta \rightarrow -1) = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta) = P(\alpha \rightarrow -1; \beta \rightarrow +1)$$

La somme des quatre probabilités est bien égale à l'unité ☺

Les résultats de mesure sont aléatoires mais **corrélés** !

La **mesure** réalisée par Alice **détermine** la polarisation (+1 ou -1) correspondant à l'angle α (avec $P_{\pm} = 1/2$). La probabilité que Bob trouve le même résultat est donnée par la loi de Malus : $\cos^2(\beta - \alpha)$



Pour des orientations α et β quelconques, la théorie quantique prédit :

$$P(\alpha \rightarrow +1; \beta \rightarrow +1) = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha - \beta) = P(\alpha \rightarrow -1; \beta \rightarrow -1)$$

$$P(\alpha \rightarrow +1; \beta \rightarrow -1) = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta) = P(\alpha \rightarrow -1; \beta \rightarrow +1)$$

Pour $\alpha - \beta = \pi/4$ on a $P(++) = P(+ -) = P(- +) = P(- -) = 1/4$

Retour sur le débat Bohr–Einstein

Pour $\alpha = \beta$, la théorie quantique prédit des résultats parfaitement **corrélés** : $P(++) = 1/2 = P(--)$ et $P(+ -) = 0 = P(- +)$
donc la probabilité que Bob mesure + si Alice a mesuré + est de 100 %

Retour sur le débat Bohr–Einstein

Pour $\alpha = \beta$, la théorie quantique prédit des résultats parfaitement **corrélés** : $P(++) = 1/2 = P(--)$ et $P(+ -) = 0 = P(- +)$ donc la probabilité que Bob mesure + si Alice a mesuré + est de 100 %

Interprétation de Bohr : Alice mesure la polarisation, elle trouve un résultat aléatoire, par exemple (-). La mesure d’Alice modifie instantanément à distance l’état du photon qui se dirige vers Bob : sa polarisation devient (-) ce qui “explique” la corrélation observée.

Retour sur le débat Bohr–Einstein

Pour $\alpha = \beta$, la théorie quantique prédit des résultats parfaitement **corrélés** : $P(++) = 1/2 = P(--)$ et $P(+ -) = 0 = P(- +)$ donc la probabilité que Bob mesure + si Alice a mesuré + est de 100 %

Interprétation de Bohr : Alice mesure la polarisation, elle trouve un résultat aléatoire, par exemple (-). La mesure d'Alice modifie instantanément à distance l'état du photon qui se dirige vers Bob : sa polarisation devient (-) ce qui "explique" la corrélation observée.

Critique d'Einstein : cela suppose l'existence d'une "*spooky action at a distance*" à laquelle le père de la relativité refuse de croire.

Retour sur le débat Bohr–Einstein

Pour $\alpha = \beta$, la théorie quantique prédit des résultats parfaitement **corrélés** : $P(++) = 1/2 = P(--)$ et $P(+ -) = 0 = P(- +)$ donc la probabilité que Bob mesure + si Alice a mesuré + est de 100 %

Interprétation de Bohr : Alice mesure la polarisation, elle trouve un résultat aléatoire, par exemple (–). La mesure d’Alice modifie instantanément à distance l’état du photon qui se dirige vers Bob : sa polarisation devient (–) ce qui “explique” la corrélation observée.

Critique d’Einstein : cela suppose l’existence d’une “*spooky action at a distance*” à laquelle le père de la relativité refuse de croire.

Interprétation d’Einstein : l’état (++) ou (--) de la paire de photons est déterminée au moment de l’émission et les mesures d’Alice et Bob ne font que révéler ces “variables cachées” préexistantes : il existe une *cause commune dans le passé* (les choses se compliquent pour $\alpha \neq \beta$).

Retour sur le débat Bohr–Einstein

Pour $\alpha = \beta$, la théorie quantique prédit des résultats parfaitement **corrélés** : $P(++) = 1/2 = P(--)$ et $P(+ -) = 0 = P(- +)$ donc la probabilité que Bob mesure + si Alice a mesuré + est de 100 %

Interprétation de Bohr : Alice mesure la polarisation, elle trouve un résultat aléatoire, par exemple (–). La mesure d’Alice modifie instantanément à distance l’état du photon qui se dirige vers Bob : sa polarisation devient (–) ce qui “explique” la corrélation observée.

Critique d’Einstein : cela suppose l’existence d’une “*spooky action at a distance*” à laquelle le père de la relativité refuse de croire.

Interprétation d’Einstein : l’état (++) ou (--) de la paire de photons est déterminée au moment de l’émission et les mesures d’Alice et Bob ne font que révéler ces “variables cachées” préexistantes : il existe une *cause commune dans le passé* (les choses se compliquent pour $\alpha \neq \beta$).

Critique de Bohr : il faudrait rajouter des *paramètres supplémentaires* et Niels Bohr est convaincu que la théorie perdrait alors sa cohérence.

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient **prédéterminés** pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

On peut faire l'analogie avec des paires de chaussettes :

pour chaque paire, on envoie une chaussette vers Alice et l'autre vers Bob qui observent des *corrélations*.

À chaque angle correspond une propriété des chaussettes :

0 = couleur (rouge / bleu)

$\pi/4$ = matière (coton / laine)

$\pi/8$ = taille (adulte / enfant)

Dispositif expérimental :



Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient **prédéterminés** pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

Alice ne peut mesurer qu'une seule propriété (*idem* pour Bob)

S'ils mesurent la même propriété, alors ils obtiennent le même résultat : on a ainsi des *corrélations parfaites*.

Mais ils peuvent faire des choix différents...

À chaque angle correspond une propriété des chaussettes :

$0 =$ couleur (rouge / bleu)

$\pi/4 =$ matière (coton / laine)

$\pi/8 =$ taille (adulte / enfant)

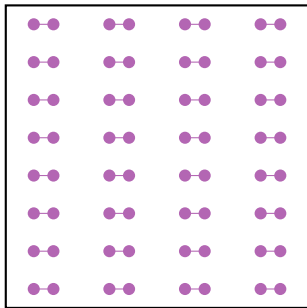
Dispositif expérimental :



Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient **prédéterminés** pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

Ensemble des **paires de photons** utilisées dans l'expérience :



0 = couleur (rouge / bleu)

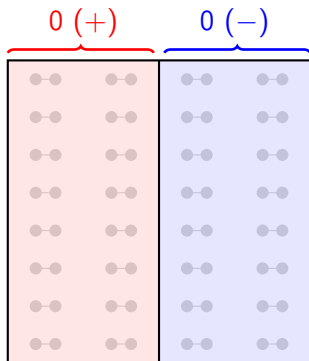
$\pi/4$ = matière (coton / laine)

$\pi/8$ = taille (adulte / enfant)



Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.



en rouge : les photons qui
sont (+) pour $\alpha = 0$
(chaussettes rouges)

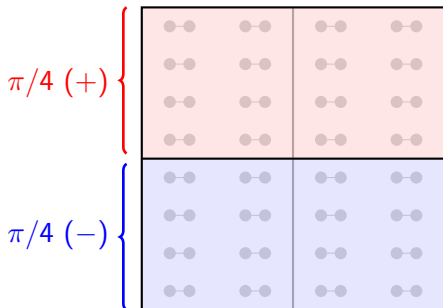
en bleu : les photons qui
sont (-) pour $\alpha = 0$
(chaussettes bleues)

Si c'est Bob qui fait la mesure avec $\beta = 0$, on aura la même répartition car on a supposé que les résultats ne sont pas déterminés par la *mesure* : ils sont prédéterminés au moment de l'*émission* de la paire de photons.

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

$0 (+)$ $0 (-)$



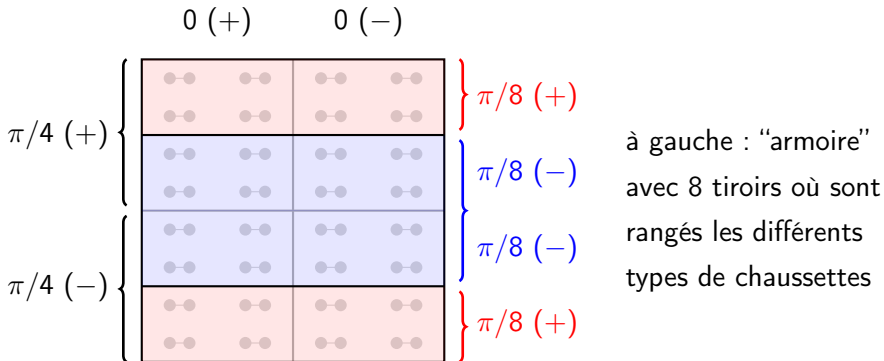
en rouge : les photons qui sont $(+)$ pour $\alpha = \pi/4$ (chaussettes en coton)

en bleu : les photons qui sont $(-)$ pour $\alpha = \pi/4$ (chaussettes en laine)

Si c'est Bob qui fait la mesure avec $\beta = \pi/4$, on aura la même répartition car on a supposé que les résultats ne sont pas déterminés par la *mesure* : ils sont prédéterminés au moment de l'*émission* de la paire de photons.

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

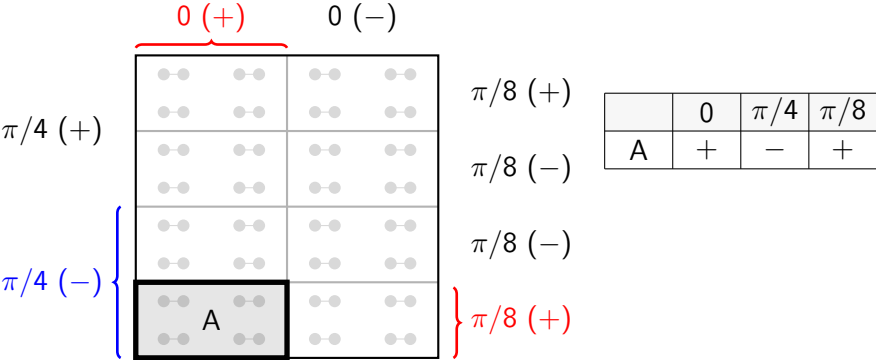


en rouge : les photons qui sont $(+)$ pour $\alpha = \pi/8$ (chaussettes adulte)

en bleu : les photons qui sont $(-)$ pour $\alpha = \pi/8$ (chaussettes enfant)

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

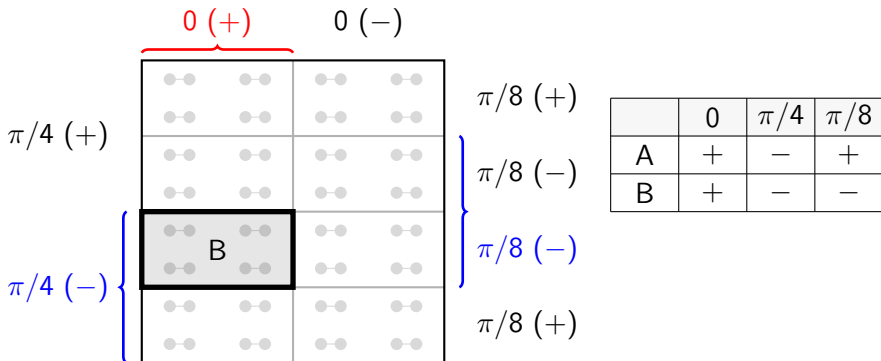


A = ensemble des photons qui sont $0 (+)$ et $\pi/4 (-)$ et $\pi/8 (+)$

A = tiroir avec les chaussettes qui sont **rouges** et **en laine** et **taille adulte**

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.











B = ensemble des photons qui sont $0 (+)$ et $\pi/4 (-)$ et $\pi/8 (-)$

B = tiroir avec les chaussettes qui sont **rouges** et **en laine** et **taille enfant**

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

$0 (+)$ $0 (-)$

$\pi/4 (+)$		
		
$\pi/4 (-)$		
		

$\pi/8 (+)$

$\pi/8 (-)$

$\pi/8 (-)$

$\pi/8 (+)$

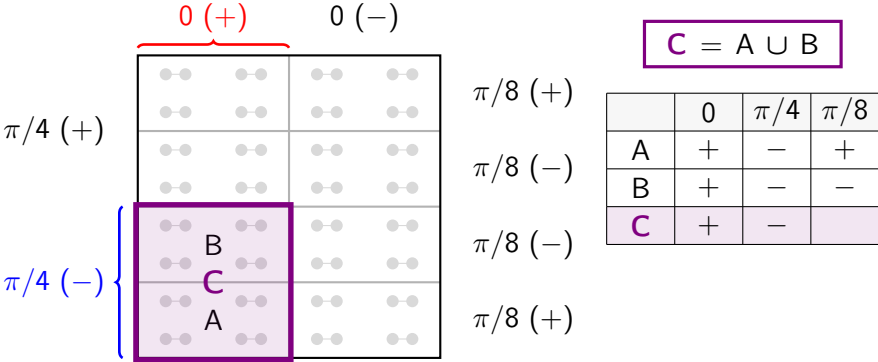
	0	$\pi/4$	$\pi/8$
A	$+$	$-$	$+$
B	$+$	$-$	$-$

Pour une paire donnée, Alice et Bob font chacun **une** mesure :
on ne peut connaître le résultat **que** pour 2 angles parmi les 3

Cette remarque est **cruciale** pour la version quantique !

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

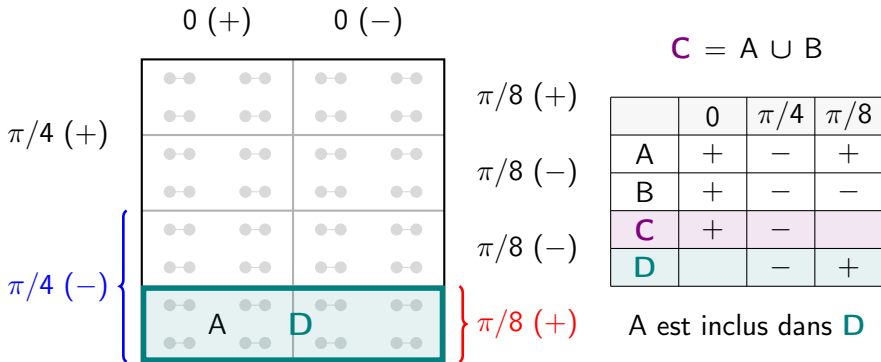


Pour une paire donnée, Alice et Bob font chacun **une** mesure : on ne peut connaître le résultat **que** pour 2 angles parmi les 3

C = ensemble des paires qui sont **rouges** et **en laine**

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

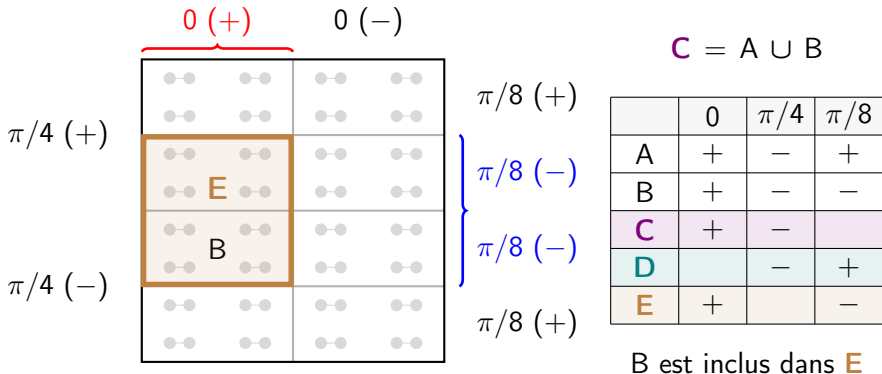


Pour une paire donnée, Alice et Bob font chacun **une** mesure : on ne peut connaître le résultat **que** pour 2 angles parmi les 3

D = ensemble des paires qui sont **en laine** et **adulte**

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.

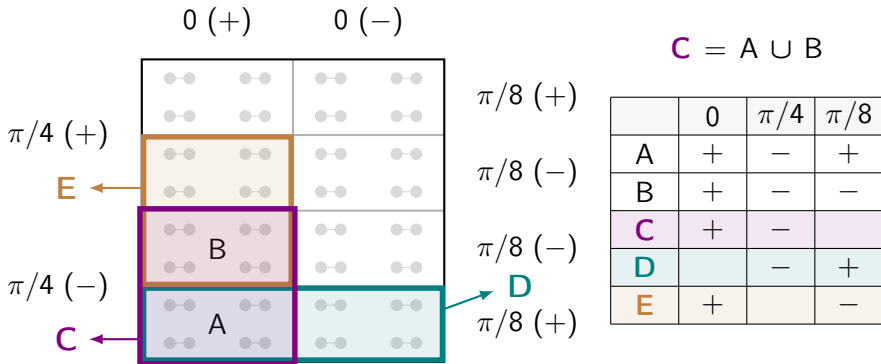


Pour une paire donnée, Alice et Bob font chacun **une** mesure : on ne peut connaître le résultat **que** pour 2 angles parmi les 3

E = ensemble des paires qui sont **rouges** et **enfant**

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

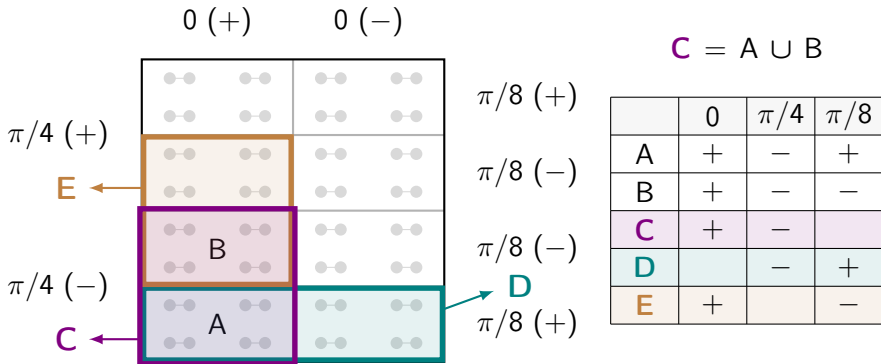
Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.



Parmi toutes les paires de l'ensemble **C** (en laine rouge), il y a celles qui sont taille adulte (elles sont dans A, donc dans **D**) et celles qui sont taille enfant (elles sont dans B, donc dans **E**)

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Supposons que, pour toutes les paires de photons, les résultats des mesures soient prédéterminés pour les angles 0 , $\pi/4$ et $\pi/8$.



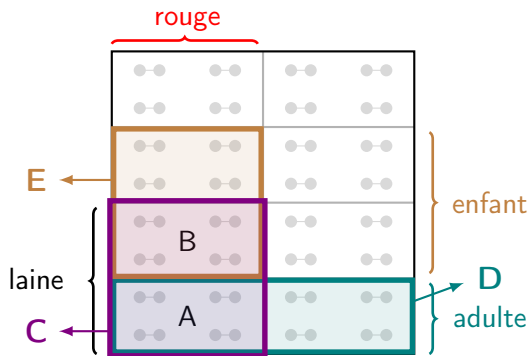
Parmi toutes les paires de l'ensemble **C** (en laine rouge), il y a celles qui sont taille adulte (elles sont dans A, donc dans **D**) et celles qui sont taille enfant (elles sont dans B, donc dans **E**)

donc **C** est inclus dans **D** \cup **E**

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Dans la vision d'Einstein $C = A \cup B$ est **inclus** dans $D \cup E$

\Rightarrow nombre de (laine rouge) \leq (laine adulte) + (rouge enfant)



$$C = A \cup B$$

	0	$\pi/4$	$\pi/8$
A	+	-	+
B	+	-	-
C	+	-	
D		-	+
E	+		-

Parmi toutes les paires de l'ensemble C (en laine rouge), il y a celles qui sont taille adulte (elles sont dans A, donc dans D) et celles qui sont taille enfant (elles sont dans B, donc dans E) donc (laine rouge) est **inclus** dans (laine adulte) \cup (rouge enfant)

Exemple d'inégalité imposée par la vision d'Einstein

Dans la vision d'Einstein $C = A \cup B$ est inclus dans $D \cup E$

\Rightarrow nombre de (laine rouge) \leq (laine adulte) + (rouge enfant)

$$C = A \cup B$$

On prend une paire au hasard :

si Alice observe la couleur ($\alpha = 0$)

et Bob observe la matière ($\beta = \pi/4$)

$P(\text{couleur} \rightarrow \text{rouge}; \text{matière} \rightarrow \text{laine}) =$

$P(\alpha = 0 \rightarrow +; \beta = \pi/4 \rightarrow -) = P(C)$

	0	$\pi/4$	$\pi/8$
A	+	-	+
B	+	-	-
C	+	-	
D		-	+
E	+		-

Dans la vision d'Einstein, les probabilités vérifient l'inégalité (de Bell) :

$$P(C) \leq P(D) + P(E)$$

Einstein *versus* théorie Quantique

La vision d'Einstein implique $P(\mathbf{C}) \leq P(\mathbf{D}) + P(\mathbf{E})$

La théorie Quantique prédit $P(\alpha \rightarrow +; \beta \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta)$

	0	$\pi/4$	$\pi/8$
C	+	-	
D		-	+
E	+		-

Einstein *versus* théorie Quantique

La vision d'Einstein implique $P(\mathbf{C}) \leq P(\mathbf{D}) + P(\mathbf{E})$

La théorie Quantique prédit $P(\alpha \rightarrow +; \beta \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta)$

	0	$\pi/4$	$\pi/8$
C	+	-	
D		-	+
E	+		-

$$P(\mathbf{C}) = P(0 \rightarrow +; \pi/4 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/4) = 25\%$$

$$P(\mathbf{D}) = P(\pi/8 \rightarrow +; \pi/4 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/8) = 7\%$$

$$P(\mathbf{E}) = P(0 \rightarrow +; \pi/8 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/8) = 7\%$$

Einstein *versus* théorie Quantique

La vision d'Einstein implique $P(\mathbf{C}) \leq P(\mathbf{D}) + P(\mathbf{E})$

La théorie Quantique prédit $25 > 7 + 7$

Contradiction !

Pourtant, parmi les chaussettes en laine rouges (C), il y a les tailles adulte (laine et adulte donc dans D) et les tailles enfant (rouges et enfant donc dans E) $C \subset (D \cup E)$

Ce raisonnement est incorrect en quantique !

	0	$\pi/4$	$\pi/8$
C	+	-	
D		-	+
E	+		-

$$P(\mathbf{C}) = P(0 \rightarrow + ; \pi/4 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/4) = 25\%$$

$$P(\mathbf{D}) = P(\pi/8 \rightarrow + ; \pi/4 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/8) = 7\%$$

$$P(\mathbf{E}) = P(0 \rightarrow + ; \pi/8 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/8) = 7\%$$

Einstein *versus* théorie Quantique

La vision d'Einstein implique $P(\mathbf{C}) \leq P(\mathbf{D}) + P(\mathbf{E})$

La théorie Quantique prédit $25 > 7 + 7$

Les résultats sont “générés” par l’acte de mesure. Or, on ne peut mesurer que pour deux angles, donc il n’y a **pas de sens** à définir $A(+, -, +)$ et $B(+, -, -)$

Unperformed experiments have no results !

	0	$\pi/4$	$\pi/8$
C	+	-	
D		-	+
E	+		-

$$P(\mathbf{C}) = P(0 \rightarrow + ; \pi/4 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/4) = 25\%$$

$$P(\mathbf{D}) = P(\pi/8 \rightarrow + ; \pi/4 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/8) = 7\%$$

$$P(\mathbf{E}) = P(0 \rightarrow + ; \pi/8 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/8) = 7\%$$

Einstein *versus* théorie Quantique

La vision d'Einstein implique $P(C) \leq P(D) + P(E)$

La théorie Quantique prédit $25 > 7 + 7$

Les résultats sont “générés” par l’acte de mesure. Or, on ne peut mesurer que pour deux angles, donc il n’y a **pas de sens** à définir $A(+, -, +)$ et $B(+, -, -)$

Unperformed experiments have no results !

Selon Einstein : on ne peut pas mesurer pour les 3 angles, *mais* on peut en parler.

	0	$\pi/4$	$\pi/8$
$C = A \cup B ?$			
C	+	-	
D		-	+
E	+		-

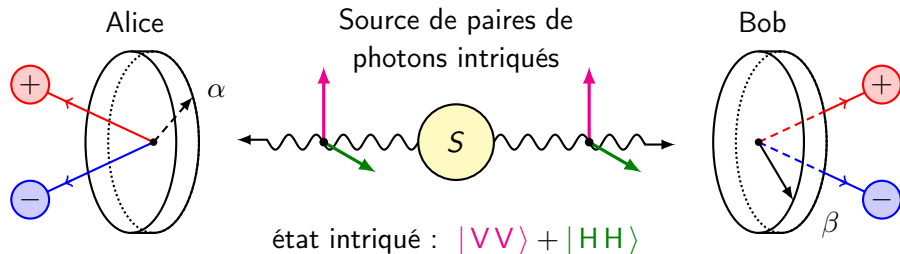
$$P(C) = P(0 \rightarrow + ; \pi/4 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/4) = 25\%$$

$$P(D) = P(\pi/8 \rightarrow + ; \pi/4 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/8) = 7\%$$

$$P(E) = P(0 \rightarrow + ; \pi/8 \rightarrow -) = \frac{1}{2} \sin^2(\pi/8) = 7\%$$

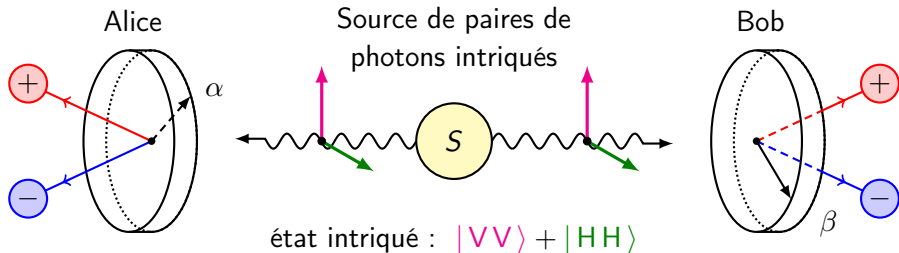
Retour sur le théorème de Bell et l'expérience d'Aspect

L'expérience d'Alain Aspect utilise quatre angles : elle teste une autre *inégalité de Bell* aussi imposée par **toutes** les théories "à la Einstein".

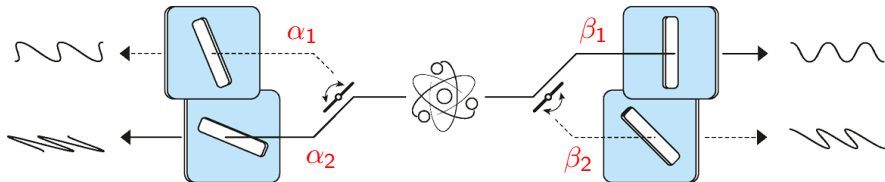


Retour sur le théorème de Bell et l'expérience d'Aspect

L'expérience d'Alain Aspect utilise quatre angles : elle teste une autre *inégalité de Bell* aussi imposée par **toutes** les théories "à la Einstein".



Alice utilise parfois α_1 et parfois α_2 . Bob utilise parfois β_1 et parfois β_2 .



Détermination de la fameuse quantité \mathcal{S}

Protocole expérimental

- ▶ Alice choisit un angle α pour son détecteur et Bob β pour le sien
- ▶ On génère de nombreuses paires de photons intriqués, pour la k^{e} paire :
 - Alice mesure la polarisation $A_k(\alpha) = +1$ ou $A_k(\alpha) = -1$
 - Bob mesure la polarisation $B_k(\beta) = +1$ ou $B_k(\beta) = -1$

Détermination de la fameuse quantité \mathcal{S}

Protocole expérimental

- ▶ Alice choisit un angle α pour son détecteur et Bob β pour le sien
- ▶ On génère de nombreuses paires de photons intriqués, pour la k^e paire :
Alice mesure la polarisation $A_k(\alpha) = +1$ ou $A_k(\alpha) = -1$
Bob mesure la polarisation $B_k(\beta) = +1$ ou $B_k(\beta) = -1$

- ▶ ils calculent la **fonction de corrélation** :
$$\mathcal{E} = \frac{\langle AB \rangle - \langle A \rangle \langle B \rangle}{\sqrt{\langle A^2 \rangle \langle B^2 \rangle}}$$

or $\forall (\alpha; \beta) \quad \langle A(\alpha) \rangle = \langle B(\beta) \rangle = 0$ et $\langle A^2 \rangle = \langle B^2 \rangle = 1$

donc
$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle A(\alpha) B(\beta) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k(\alpha) B_k(\beta)$$

Détermination de la fameuse quantité \mathcal{S}

Protocole expérimental

- ▶ Alice choisit un angle α pour son détecteur et Bob β pour le sien
- ▶ On génère de nombreuses paires de photons intriqués, pour la k^e paire :
Alice mesure la polarisation $A_k(\alpha) = +1$ ou $A_k(\alpha) = -1$
Bob mesure la polarisation $B_k(\beta) = +1$ ou $B_k(\beta) = -1$

- ▶ ils calculent la **fonction de corrélation** :
$$\mathcal{E} = \frac{\langle AB \rangle - \langle A \rangle \langle B \rangle}{\sqrt{\langle A^2 \rangle \langle B^2 \rangle}}$$

or $\forall (\alpha; \beta) \quad \langle A(\alpha) \rangle = \langle B(\beta) \rangle = 0$ et $\langle A^2 \rangle = \langle B^2 \rangle = 1$

donc
$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle A(\alpha) B(\beta) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k(\alpha) B_k(\beta)$$

- ▶ Pour chaque paire Alice choisit soit α_1 , soit α_2 ; Bob choisit β_1 ou β_2 .
Avec beaucoup de paires, ils calculent les 4 fonctions de corrélation et :

$$\mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) = \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2)$$

Inégalité de Bell

Théorème de John Bell (1964)

- (1) pour toute « théorie à variables cachées locale » $|\mathcal{S}| \leq 2$
- (2) cette inégalité peut-être violée avec la théorie quantique

Inégalité de Bell

Théorème de John Bell (1964)

- (1) pour toute « théorie à variables cachées locale » $|\mathcal{S}| \leq 2$
- (2) cette inégalité peut-être violée avec la théorie quantique

• Une **théorie à variables cachées** complète la fonction d'onde en ajoutant des **paramètres supplémentaires** (notés λ), les résultats de mesures dépendent de ces paramètres (déterminés au moment de l'émission)

$$A(\alpha, \lambda) = \pm 1 \text{ et } B(\beta, \lambda) = \pm 1 \quad \text{on a de plus}$$

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle A(\alpha) B(\beta) \rangle = \sum_{\lambda} p(\lambda) A(\alpha, \lambda) B(\beta, \lambda)$$

$$p(\lambda) = \text{loi de probabilité des « paramètres supplémentaires »}$$

Inégalité de Bell

Théorème de John Bell (1964)

- (1) pour toute « théorie à variables cachées locale » $|\mathcal{S}| \leq 2$
- (2) cette inégalité peut-être violée avec la théorie quantique

- Une **théorie à variables cachées** complète la fonction d'onde en ajoutant des **paramètres supplémentaires** (notés λ), les résultats de mesures dépendent de ces paramètres (déterminés au moment de l'émission)

$$A(\alpha, \lambda) = \pm 1 \text{ et } B(\beta, \lambda) = \pm 1 \quad \text{on a de plus}$$

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle A(\alpha) B(\beta) \rangle = \sum_{\lambda} p(\lambda) A(\alpha, \lambda) B(\beta, \lambda)$$

$$p(\lambda) = \text{loi de probabilité des « paramètres supplémentaires »}$$

- Dans une **théorie locale**, des objets séparés dans l'espace ne peuvent pas avoir une influence directe l'un sur l'autre

$$\text{Localité} \implies \begin{cases} \text{les } A(\alpha, \lambda) \text{ sont } \textbf{indépendants} \text{ de } \beta \\ \text{la loi } p(\lambda) \text{ est } \textbf{indépendante} \text{ de } \alpha \text{ et } \beta \end{cases}$$

Théorème de Bell

Démonstration du point (1)

La k^e paire de photons est caractérisée par λ_k , on note les résultats de mesure possibles (± 1) :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1^k = A(\alpha_1, \lambda_k) \quad \text{et} \quad A_2^k = A(\alpha_2, \lambda_k) \\ B_1^k = B(\beta_1, \lambda_k) \quad \text{et} \quad B_2^k = B(\beta_2, \lambda_k) \end{array} \right.$$

Pour **une** paire, on peut **mesurer** $A_1^k B_1^k$ ou $A_1^k B_2^k$ ou $A_2^k B_1^k$ ou $A_2^k B_2^k$

mais pas $R_k(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \lambda_k) = A_1^k B_1^k + A_1^k B_2^k - A_2^k B_1^k + A_2^k B_2^k$

Théorème de Bell

Démonstration du point (1)

La k^{e} paire de photons est caractérisée par λ_k , on note les résultats de mesure possibles (± 1) :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1^k = A(\alpha_1, \lambda_k) \quad \text{et} \quad A_2^k = A(\alpha_2, \lambda_k) \\ B_1^k = B(\beta_1, \lambda_k) \quad \text{et} \quad B_2^k = B(\beta_2, \lambda_k) \end{array} \right.$$

Pour **une** paire, on peut **mesurer** $A_1^k B_1^k$ ou $A_1^k B_2^k$ ou $A_2^k B_1^k$ ou $A_2^k B_2^k$

mais pas $R_k(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \lambda_k) = A_1^k B_1^k + A_1^k B_2^k - A_2^k B_1^k + A_2^k B_2^k$

En accumulant des données pour un grand nombre de paires, on peut mesurer les fonctions de corrélations $\mathcal{E} = \langle A \times B \rangle$ et donc **mesurer**

$$\mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) = \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2)$$

Théorème de Bell

Démonstration du point (1)

La k^e paire de photons est caractérisée par λ_k , on note les résultats de mesure possibles (± 1) :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1^k = A(\alpha_1, \lambda_k) \quad \text{et} \quad A_2^k = A(\alpha_2, \lambda_k) \\ B_1^k = B(\beta_1, \lambda_k) \quad \text{et} \quad B_2^k = B(\beta_2, \lambda_k) \end{array} \right.$$

Pour une paire, on peut **mesurer** $A_1^k B_1^k$ ou $A_1^k B_2^k$ ou $A_2^k B_1^k$ ou $A_2^k B_2^k$

mais pas $R_k(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \lambda_k) = A_1^k B_1^k + A_1^k B_2^k - A_2^k B_1^k + A_2^k B_2^k$

En accumulant des données pour un grand nombre de paires, on peut mesurer les fonctions de corrélations $\mathcal{E} = \langle A \times B \rangle$ et donc **mesurer**

$$\mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) = \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2)$$

Pour une théorie à variables cachées locale, la quantité $R_k(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \lambda_k)$ **existe** (même si on ne peut pas la **mesurer**), on peut donc aussi *calculer* \mathcal{S} :

$$\mathcal{S} = \langle R_k \rangle = \sum_k p(\lambda_k) R_k(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \lambda_k)$$

Théorème de Bell

Démonstration du point (1)

Pour la k^{e} paire, une factorisation évidente permet d'écrire :

$$R_k = A_1 B_1 + A_1 B_2 + A_2 B_2 - A_2 B_1 = A_1 (B_1 + B_2) + A_2 (B_2 - B_1)$$

Théorème de Bell

Démonstration du point (1)

Pour la k^{e} paire, une factorisation évidente permet d'écrire :

$$R_k = A_1 B_1 + A_1 B_2 + A_2 B_2 - A_2 B_1 = A_1 (B_1 + B_2) + A_2 (B_2 - B_1)$$

puisque les 4 nombres A_1, A_2, B_1, B_2 ne peuvent valoir que $+1$ ou -1

- soit $B_2 = +B_1$ ce qui donne $R_k = 2A_1 B_1 = \pm 2$
- soit $B_2 = -B_1$ ce qui donne $R_k = 2A_2 B_2 = \pm 2$

Théorème de Bell

Démonstration du point (1)

Pour la k^{e} paire, une factorisation évidente permet d'écrire :

$$R_k = A_1 B_1 + A_1 B_2 + A_2 B_2 - A_2 B_1 = A_1 (B_1 + B_2) + A_2 (B_2 - B_1)$$

puisque les 4 nombres A_1, A_2, B_1, B_2 ne peuvent valoir que $+1$ ou -1

- soit $B_2 = +B_1$ ce qui donne $R_k = 2 A_1 B_1 = \pm 2$
- soit $B_2 = -B_1$ ce qui donne $R_k = 2 A_2 B_2 = \pm 2$

$$\forall k \quad R_k = \pm 2 \quad \text{or} \quad S = \sum_k p(\lambda_k) R_k \quad \text{donc} \quad |S| \leq 2$$

Théorème de Bell

Démonstration du point (1)

Pour la k^{e} paire, une factorisation évidente permet d'écrire :

$$R_k = A_1 B_1 + A_1 B_2 + A_2 B_2 - A_2 B_1 = A_1 (B_1 + B_2) + A_2 (B_2 - B_1)$$

puisque les 4 nombres A_1, A_2, B_1, B_2 ne peuvent valoir que $+1$ ou -1

- soit $B_2 = +B_1$ ce qui donne $R_k = 2 A_1 B_1 = \pm 2$
- soit $B_2 = -B_1$ ce qui donne $R_k = 2 A_2 B_2 = \pm 2$

$$\forall k \quad R_k = \pm 2 \quad \text{or} \quad S = \sum_k p(\lambda_k) R_k \quad \text{donc} \quad |S| \leq 2$$

Ce résultat est valable **quelle que soit** la loi de probabilité $p(\lambda)$!

Théorème de Bell

Démonstration du point (1)

Pour la k^{e} paire, une factorisation évidente permet d'écrire :

$$R_k = A_1 B_1 + A_1 B_2 + A_2 B_2 - A_2 B_1 = A_1 (B_1 + B_2) + A_2 (B_2 - B_1)$$

puisque les 4 nombres A_1, A_2, B_1, B_2 ne peuvent valoir que $+1$ ou -1

- soit $B_2 = +B_1$ ce qui donne $R_k = 2 A_1 B_1 = \pm 2$
- soit $B_2 = -B_1$ ce qui donne $R_k = 2 A_2 B_2 = \pm 2$

$$\forall k \quad R_k = \pm 2 \quad \text{or} \quad S = \sum_k p(\lambda_k) R_k \quad \text{donc} \quad |S| \leq 2$$

Ce résultat est valable **quelle que soit** la loi de probabilité $p(\lambda)$!

Avec la théorie **quantique**, cette démonstration est incorrecte car c'est l'*acte de mesure* qui donne sa valeur au produit AB , la quantité R_k **n'existe pas** pour une paire donnée (seule S peut être mesurée).

Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

on note $P_{++} = P(\alpha \rightarrow +; \beta \rightarrow +)$

On a $A = \pm 1$ et $B = \pm 1$ il y a donc 4 issues possibles, d'où :

$$\mathcal{E} = \langle A B \rangle = (+1) P_{++} + (-1) P_{+-} + (-1) P_{-+} + (+1) P_{--}$$

$$\mathcal{E} = \langle A B \rangle = [P_{++} + P_{--}] - [P_{+-} + P_{-+}]$$

Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

on note $P_{++} = P(\alpha \rightarrow +; \beta \rightarrow +)$

On a $A = \pm 1$ et $B = \pm 1$ il y a donc 4 issues possibles, d'où :

$$\mathcal{E} = \langle A B \rangle = (+1) P_{++} + (-1) P_{+-} + (-1) P_{-+} + (+1) P_{--}$$

$$\mathcal{E} = \langle A B \rangle = [P_{++} + P_{--}] - [P_{+-} + P_{-+}]$$

or la **théorie**
quantique prévoit
$$\begin{cases} P_{++} = P_{--} = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha - \beta) \\ P_{+-} = P_{-+} = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta) \end{cases} \quad \text{d'où}$$

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle A(\alpha) B(\beta) \rangle = \cos^2(\alpha - \beta) - \sin^2(\alpha - \beta) = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

on note $P_{++} = P(\alpha \rightarrow +; \beta \rightarrow +)$

On a $A = \pm 1$ et $B = \pm 1$ il y a donc 4 issues possibles, d'où :

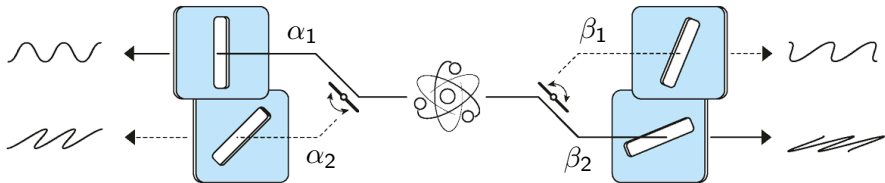
$$\mathcal{E} = \langle AB \rangle = (+1) P_{++} + (-1) P_{+-} + (-1) P_{-+} + (+1) P_{--}$$

$$\mathcal{E} = \langle AB \rangle = [P_{++} + P_{--}] - [P_{+-} + P_{-+}]$$

or la **théorie quantique** prévoit $\begin{cases} P_{++} = P_{--} = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha - \beta) \\ P_{+-} = P_{-+} = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta) \end{cases}$ d'où

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle A(\alpha) B(\beta) \rangle = \cos^2(\alpha - \beta) - \sin^2(\alpha - \beta) = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

il reste à choisir astucieusement les quatre orientations $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ et β_2



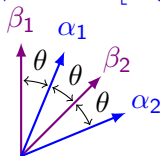
Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

Le formalisme quantique donne

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle \Psi | A(\alpha) B(\beta) | \Psi \rangle = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

on choisit la
configuration
ci-contre :



$$\mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) = \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1)$$

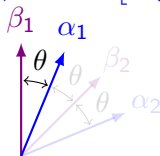
Théorème de Bell

Le formalisme quantique donne

Démonstration du point (2)

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle \Psi | A(\alpha) B(\beta) | \Psi \rangle = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

on choisit la
configuration
ci-contre :



$$\begin{aligned} \mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) &= \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) \\ \mathcal{S}(\theta) &= \cos(2\theta) + \end{aligned}$$

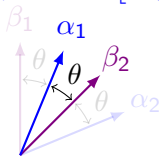
Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

Le formalisme quantique donne

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle \Psi | A(\alpha) B(\beta) | \Psi \rangle = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

on choisit la
configuration
ci-contre :



$$\begin{aligned} \mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) &= \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) \\ \mathcal{S}(\theta) &= \cos(2\theta) + \cos(2\theta) + \end{aligned}$$

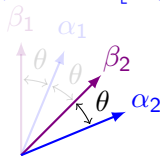
Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

Le formalisme quantique donne

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle \Psi | A(\alpha) B(\beta) | \Psi \rangle = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

on choisit la
configuration
ci-contre :



$$\begin{aligned} \mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) &= \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) \\ \mathcal{S}(\theta) &= \cos(2\theta) + \cos(2\theta) + \cos(2\theta) - \end{aligned}$$

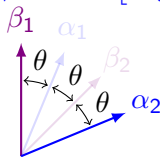
Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

Le formalisme quantique donne

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle \Psi | A(\alpha) B(\beta) | \Psi \rangle = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

on choisit la
configuration
ci-contre :



$$\begin{aligned} \mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) &= \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) \\ \mathcal{S}(\theta) &= \cos(2\theta) + \cos(2\theta) + \cos(2\theta) - \cos(2 \times 3\theta) \end{aligned}$$

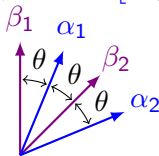
Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

Le formalisme quantique donne

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle \Psi | A(\alpha) B(\beta) | \Psi \rangle = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

on choisit la
configuration
ci-contre :



$$\begin{aligned} \mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) &= \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) \\ \mathcal{S}(\theta) &= \cos(2\theta) + \cos(2\theta) + \cos(2\theta) - \cos(2 \times 3\theta) \end{aligned}$$

on montre facilement que la valeur maximale est atteinte pour $\theta = \pi/8$

$$\mathcal{S}\left(\frac{\pi}{8}\right) = 3 \times \cos\left(2\frac{\pi}{8}\right) - \cos\left(2 \times 3\frac{\pi}{8}\right) = 2\sqrt{2} > 2$$

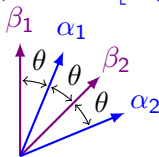
Théorème de Bell

Démonstration du point (2)

Le formalisme quantique donne

$$\mathcal{E}(\alpha, \beta) = \langle \Psi | A(\alpha) B(\beta) | \Psi \rangle = \cos [2(\alpha - \beta)]$$

on choisit la
configuration
ci-contre :



$$\begin{aligned} \mathcal{S}(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2) &= \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_1) + \mathcal{E}(\alpha_1, \beta_2) + \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_2) - \mathcal{E}(\alpha_2, \beta_1) \\ \mathcal{S}(\theta) &= \cos(2\theta) + \cos(2\theta) + \cos(2\theta) - \cos(2 \times 3\theta) \end{aligned}$$

on montre facilement que la valeur maximale est atteinte pour $\theta = \pi/8$

$$\mathcal{S}\left(\frac{\pi}{8}\right) = 3 \times \cos\left(2\frac{\pi}{8}\right) - \cos\left(2 \times 3\frac{\pi}{8}\right) = 2\sqrt{2} > 2$$

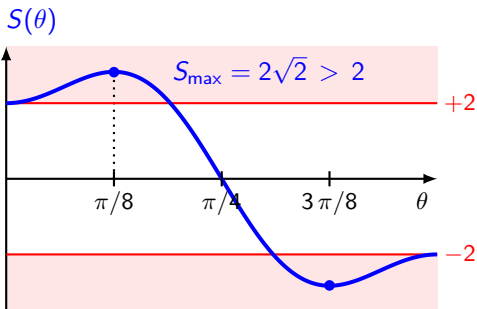
« Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment : A New Violation of Bell's Inequalities »

A. Aspect, P. Grangier, G. Roger P.R.L. 1982

Le verdict de l'expérience

Courbe bleue : prédiction de la théorie quantique (pour une manip idéale)

Région rouge : zone interdite pour les théories à variables cachées locales



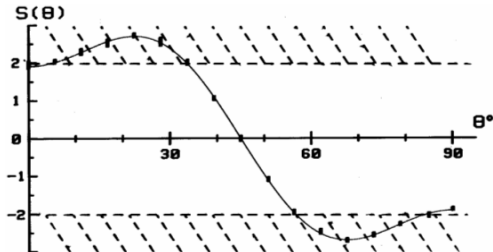
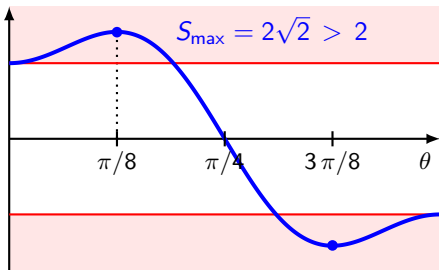
Le verdict de l'expérience

Courbe bleue : prédiction de la théorie quantique (pour une manip idéale)

Région rouge : zone interdite pour les théories à variables cachées locales

La courbe en trait plein prend en compte les imperfections de l'expérience

$S(\theta)$



Les barres d'incertitude correspondent à $\pm 2\sigma$

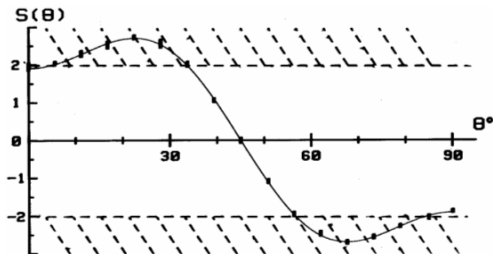
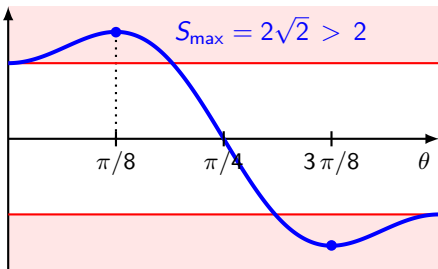
Le verdict de l'expérience

Courbe bleue : prédiction de la théorie quantique (pour une manip idéale)

Région rouge : zone interdite pour les théories à variables cachées locales

La courbe en trait plein prend en compte les imperfections de l'expérience

$S(\theta)$



Les barres d'incertitude correspondent à $\pm 2\sigma$

Prédiction de la Mécanique Quantique compte tenu des imperfections

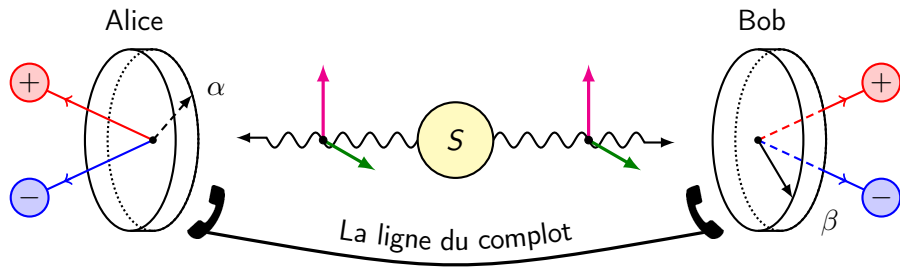
de l'expérience : $S_{MQ}(\pi/8) = 2,70 \pm 0,05$

Valeur mesurée : $S_{exp}(\pi/8) = 2,697 \pm 0,015$

$$|S_{exp} - 2| > 40\sigma$$

Condition de localité et causalité d'Einstein

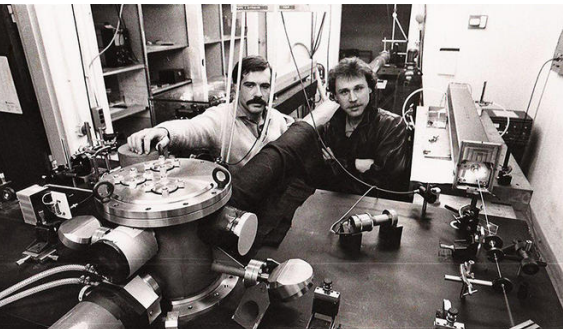
Échappatoire de la localité : on pourrait imaginer que les polariseurs s'envoient des "signaux" pour échanger sur leur orientation relative... et prendre en compte cette information dans les résultats de mesure !



Condition de localité et causalité d'Einstein

Échappatoire de la localité : on pourrait imaginer que les polariseurs s'envoient des "signaux" pour échanger sur leur orientation relative . . . et prendre en compte cette information dans les résultats de mesure !

La distance entre les polariseurs est $d = 13$ m. Le temps mis par la lumière pour aller de l'un à l'autre est donc $\tau = d/c = 43$ ns.

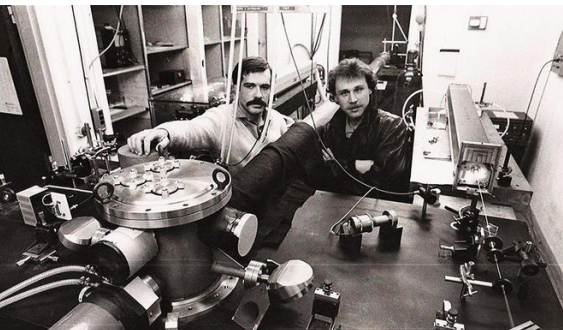


Condition de localité et causalité d'Einstein

Échappatoire de la localité : on pourrait imaginer que les polariseurs s'envoient des "signaux" pour échanger sur leur orientation relative . . . et prendre en compte cette information dans les résultats de mesure !

La distance entre les polariseurs est $d = 13$ m. Le temps mis par la lumière pour aller de l'un à l'autre est donc $\tau = d/c = 43$ ns.

Dans l'expérience d'Aspect, le choix d'orientation des polariseurs (α_1 ou α_2) et (β_1 ou β_2) est modifié environ toutes les **10 ns** (!) de façon à empêcher toute communication entre les deux polariseurs.

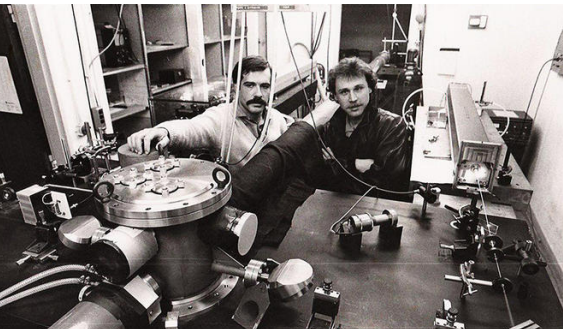


Condition de localité et causalité d'Einstein

Échappatoire de la localité : on pourrait imaginer que les polariseurs s'envoient des "signaux" pour échanger sur leur orientation relative . . . et prendre en compte cette information dans les résultats de mesure !

La distance entre les polariseurs est $d = 13$ m. Le temps mis par la lumière pour aller de l'un à l'autre est donc $\tau = d/c = 43$ ns.

Dans l'expérience d'Aspect, le choix d'orientation des polariseurs (α_1 ou α_2) et (β_1 ou β_2) est modifié environ toutes les **10 ns** (!) de façon à empêcher toute communication entre les deux polariseurs.



L'expérience montre que les états réels de deux objets séparés ne sont pas indépendants l'un de l'autre !

Non séparabilité

Non séparabilité ! *Maizalors* quoi ?

Choisissez votre remise en cause :

- ▶ Remise en cause de la notion d'**espace** : **non localité**

Non séparabilité ! *Maizalors* quoi ?

Choisissez votre remise en cause :

- ▶ Remise en cause de la notion d'**espace** : **non localité**
- ▶ Remise en cause de la notion de **temps** : le système remonte dans le passé pour passer l'information !

Non séparabilité ! *Maizalors* quoi ?

Choisissez votre remise en cause :

- ▶ Remise en cause de la notion d'**espace** : non localité
- ▶ Remise en cause de la notion de **temps** : le système remonte dans le passé pour passer l'information !
- ▶ Remise en cause de « l'**unicité** de l'Univers » : 1956 Hugh Everett



Non séparabilité ! *Maizalors* quoi ?

Choisissez votre remise en cause :

- ▶ Remise en cause de la notion d'**espace** : **non localité**
- ▶ Remise en cause de la notion de **temps** : le système remonte dans le passé pour passer l'information !
- ▶ Remise en cause de « l'**unicité** de l'Univers » : 1956 Hugh Everett
- ▶ Autre chose ? oui, mais ...

non séparable !



Non séparabilité ! *Maizalors* quoi ?

Choisissez votre remise en cause :

- ▶ Remise en cause de la notion d'**espace** : **non localité**
- ▶ Remise en cause de la notion de **temps** : le système remonte dans le passé pour passer l'information !
- ▶ Remise en cause de « l'**unicité** de l'Univers » : 1956 Hugh Everett
- ▶ Autre chose ? oui, mais ...
non séparable !



Conclusion :

Notre monde (quantique) est très étonnant : on ne peut pas attribuer *localement* des propriétés à des objets *intriqués* !



Non séparabilité ! *Maizalors* quoi ?

Choisissez votre remise en cause :

- ▶ Remise en cause de la notion d'**espace** : **non localité**
- ▶ Remise en cause de la notion de **temps** : le système remonte dans le passé pour passer l'information !
- ▶ Remise en cause de « l'**unicité** de l'Univers » : 1956 Hugh Everett
- ▶ Autre chose ? oui, mais ...
non séparable !



Conclusion :

Notre monde (quantique) est très étonnant : on ne peut pas attribuer *localement* des propriétés à des objets *intriqués* !

Le “mécanisme” à l'œuvre lors d'une mesure est un mystère. Et si on le découvre un jour, il sera *incroyable* !

Non séparabilité ! *Maizalors* quoi ?

Choisissez votre remise en cause :

- ▶ Remise en cause de la notion d'**espace** : **non localité**
- ▶ Remise en cause de la notion de **temps** : le système remonte dans le passé pour passer l'information !
- ▶ Remise en cause de « l'**unicité** de l'Univers » : 1956 Hugh Everett



Et il y a des applications !



Conclusion :

Notre monde (quantique) est très étonnant : on ne peut pas attribuer *localement* des propriétés à des objets *intriqués* !

Le “mécanisme” à l'œuvre lors d'une mesure est un mystère. Et si on le découvre un jour, il sera *incroyable* !

Non séparabilité ! *Maizalors* quoi ?

Choisissez votre remise en cause :

- ▶ Remise en cause de la notion d'**espace** : **non localité**
- ▶ Remise en cause de la notion de **temps** : le système remonte dans le passé pour passer l'information !
- ▶ Remise en cause de « l'**unicité** de l'Univers » : 1956 Hugh Everett



Et il y a des applications !



Merci 😊

Conclusion :

Notre monde (quantique) est très étonnant : on ne peut pas attribuer *localement* des propriétés à des objets *intriqués* !

Le “mécanisme” à l'œuvre lors d'une mesure est un mystère. Et si on le découvre un jour, il sera *incroyable* !

Déterminisme universel

Mécanique classique : forces + conditions initiales \Rightarrow trajectoire

Pierre-Simon de Laplace *Essai philosophique sur les probabilités*

« Nous devons envisager l'état présent de l'Univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'Univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, seraient présents à ses yeux. »

Les lois de la physique laissent-elles une place à la Liberté ?

Lorsqu'on fait de la mécanique depuis sa tendre enfance, cette vision du monde peut sembler *cohérente* et *naturelle*.

Problème : si « je » décide de faire un mouvement, alors « je » modifie les trajectoires de certains atomes ?

Les lois de la physique laissent-elles une place à la Liberté ?

Lorsqu'on fait de la mécanique depuis sa tendre enfance, cette vision du monde peut sembler *cohérente* et *naturelle*.

Problème : si « je » décide de faire un mouvement, alors « je » modifie les trajectoires de certains atomes ?

Déterminisme universel \Rightarrow **aucune liberté possible**

Les moindres petits détails de votre vie (DM de physique, les résultats aux concours, votre vie amoureuse . . .) seraient gravés dans le marbre des conditions initiales bien avant votre naissance. Vos goûts, vos efforts, vos choix, la responsabilité des hommes (dont celle d'Hitler) ne seraient que des *illusions* ?

Les lois de la physique laissent-elles une place à la Liberté ?

Lorsqu'on fait de la mécanique depuis sa tendre enfance, cette vision du monde peut sembler *cohérente* et *naturelle*.

Problème : si « je » décide de faire un mouvement, alors « je » modifie les trajectoires de certains atomes ?

Déterminisme universel \Rightarrow **aucune liberté possible**

Les moindres petits détails de votre vie (DM de physique, les résultats aux concours, votre vie amoureuse . . .) seraient gravés dans le marbre des conditions initiales bien avant votre naissance. Vos goûts, vos efforts, vos choix, la responsabilité des hommes (dont celle d'Hitler) ne seraient que des *illusions* ?

Le déterminisme universel n'est pas compatible avec « la mesure » en physique quantique.

⚠ L'*indéterminisme* n'implique pas nécessairement le *libre arbitre* . . .

Le chat de Schrödinger

Le problème de la mesure ou pourquoi n'observe-t-on pas de superpositions d'états ?



La théorie est LINÉAIRE





$|\psi_1\rangle =$ Atome encore excité \implies Marteau levé \implies Chat vivant

$|\psi_2\rangle =$ Atome désexcité \implies Marteau baissé \implies Chat mort



$|\psi_1\rangle = \text{Atome encore excité} \implies \text{Marteau levé} \implies \text{Chat vivant}$

$|\psi_2\rangle = \text{Atome désexcité} \implies \text{Marteau baissé} \implies \text{Chat mort}$

or la théorie est **linéaire** donc

$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle \implies \text{Chat vivant} + \text{mort}$



$|\psi_1\rangle = \text{Atome encore excité} \implies \text{Marteau levé} \implies \text{Chat vivant}$

$|\psi_2\rangle = \text{Atome désexcité} \implies \text{Marteau baissé} \implies \text{Chat mort}$

or la théorie est **linéaire** donc

$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle \implies \text{Chat vivant} + \text{mort}$

sauf si on « observe » : **réduction du paquet d'onde**



Dans *cette* réalisation *il est vivant !*

$|\psi_1\rangle =$ Atome encore excité \implies Marteau levé \implies Chat vivant

$|\psi_2\rangle =$ Atome désexcité \implies Marteau baissé \implies Chat mort

or la théorie est **linéaire** donc

$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle + \cancel{|\psi_2\rangle} \implies$ Chat **vivant** + ~~mort~~ **Mesure**

sauf si on « observe » : **réduction du paquet d'onde** (pourquoi, comment ?)

Où est le « paradoxe » ?

- ▶ L'atome radioactif obéit aux lois quantique. En particulier, il peut se trouver dans une superposition de plusieurs états « incompatibles ».

Où est le « paradoxe » ?

- ▶ L'atome radioactif obéit aux lois quantique. En particulier, il peut se trouver dans une superposition de plusieurs états « incompatibles ».
- ▶ Considérons le marteautron et le chat comme de vulgaires tas d'atomes : chaque atome obéit aux lois quantiques.

Où est le « paradoxe » ?

- ▶ L'atome radioactif obéit aux lois quantique. En particulier, il peut se trouver dans une superposition de plusieurs états « incompatibles ».
- ▶ Considérons le marteautron et le chat comme de vulgaires tas d'atomes : chaque atome obéit aux lois quantiques.
- ▶ On sait décrire le comportement quantique d'un système constitué de plusieurs atomes. On peut donc décrire de manière quantique le système $\{ \textit{atome} + \textit{marteautron} + \textit{chat} \}$: on a un état de **superposition pour le système entier** (la théorie est **linéaire**).

Où est le « paradoxe » ?

- ▶ L'atome radioactif obéit aux lois quantique. En particulier, il peut se trouver dans une superposition de plusieurs états « incompatibles ».
- ▶ Considérons le marteautron et le chat comme de vulgaires tas d'atomes : chaque atome obéit aux lois quantiques.
- ▶ On sait décrire le comportement quantique d'un système constitué de plusieurs atomes. On peut donc décrire de manière quantique le système $\{ \textit{atome} + \textit{marteautron} + \textit{chat} \}$: on a un état de **superposition pour le système entier** (la théorie est **linéaire**). **OK ?**

Où est le « paradoxe » ?

- ▶ L'atome radioactif obéit aux lois quantique. En particulier, il peut se trouver dans une superposition de plusieurs états « incompatibles ».
- ▶ Considérons le marteautron et le chat comme de vulgaires tas d'atomes : chaque atome obéit aux lois quantiques.
- ▶ On sait décrire le comportement quantique d'un système constitué de plusieurs atomes. On peut donc décrire de manière quantique le système $\{ \textit{atome} + \textit{marteautron} + \textit{chat} \}$: on a un état de **superposition pour le système entier** (la théorie est **linéaire**).
- ▶ Si on considère l'observateur comme un vulgaire tas d'atomes, on peut l'inclure dans le système qui se trouve tout entier dans un état de superposition : **il n'y a plus de mesure !**

Où est le « paradoxe » ?

- ▶ L'atome radioactif obéit aux lois quantique. En particulier, il peut se trouver dans une superposition de plusieurs états « incompatibles ».
- ▶ Considérons le marteautron et le chat comme de vulgaires tas d'atomes : chaque atome obéit aux lois quantiques.
- ▶ On sait décrire le comportement quantique d'un système constitué de plusieurs atomes. On peut donc décrire de manière quantique le système $\{ \textit{atome} + \textit{marteautron} + \textit{chat} \}$: on a un état de **superposition pour le système entier** (la théorie est **linéaire**).
- ▶ Si on considère l'observateur comme un vulgaire tas d'atomes, on peut l'inclure dans le système qui se trouve tout entier dans un état de superposition : **il n'y a plus de mesure !**
- ▶ Pourtant, il nous semble que lorsqu'on "observe" le chat, il est « vraiment vivant » *ou bien* il est « vraiment mort ».

Où est le « paradoxe » ?

- ▶ L'atome radioactif obéit aux lois quantique. En particulier, il peut se trouver dans une superposition de plusieurs états « incompatibles ».
- ▶ Considérons le marteautron et le chat comme de vulgaires tas d'atomes : chaque atome obéit aux lois quantiques.
- ▶ On sait décrire le comportement quantique d'un système constitué de plusieurs atomes. On peut donc décrire de manière quantique le système { *atome + marteautron + chat* } : on a un état de **superposition pour le système entier** (la théorie est **linéaire**).
- ▶ Si on considère l'observateur comme un vulgaire tas d'atomes, on peut l'inclure dans le système qui se trouve tout entier dans un état de superposition : **il n'y a plus de mesure !**
- ▶ Pourtant, il nous semble que lorsqu'on "observe" le chat, il est « vraiment vivant » *ou bien* il est « vraiment mort ».
- ▶ **Qu'est ce qu'une mesure ?** Où se trouve la "frontière" ?

Le chat de Schrödinger

Comment une superposition linéaire est-elle cassée lors du processus de mesure ?

La physique quantique décrit le chat dans l'état « vivant + mort » !



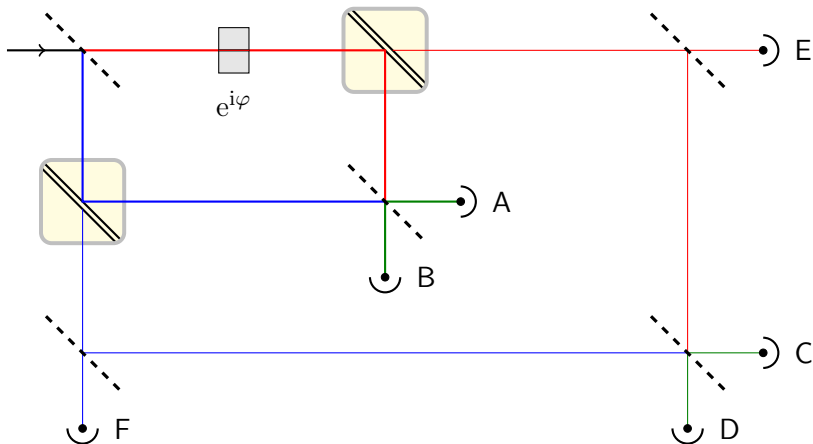
Pour le **sous-système** chat, la *théorie de la décohérence* permet de passer de « vivant **et** mort » à « vivant **ou** mort » mais les deux potentialités restent présentes – **la théorie est linéaire** – on a juste déplacé le problème...

La mécanique quantique sans douleur

50 questions/réponses
pour mieux comprendre



Expérience ultime !

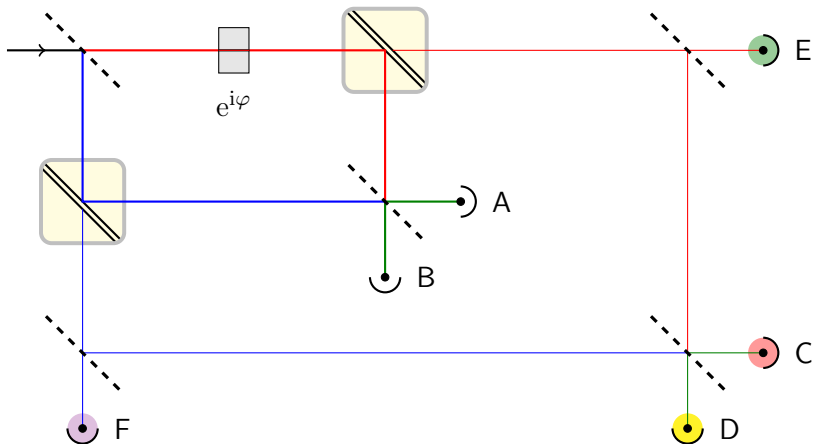


Le photon principal est détecté en A ou en B

Le photon témoin est détecté en C, D, E ou F (chemin connu **ou** pas)

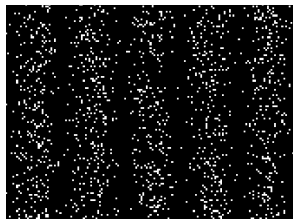
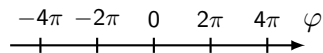
On observe les détections en A en fonction du déphasage φ ...

Expérience ultime !



À chaque fois que le photon principal est détecté en A on colorie l'impact correspondant avec la couleur du détecteur C, D, E ou F
On observe les détections en A en fonction du déphasage φ ...

d'abord **sans** photon témoin



détections en A

sans photon témoin

on voit des interférences

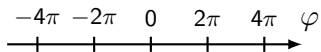
$$P_A(\varphi) = \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi)$$

Formule de Fresnel

représentation type

« fentes de Young »

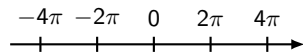
Expérience ultime **avec** photon témoin !



détections en A

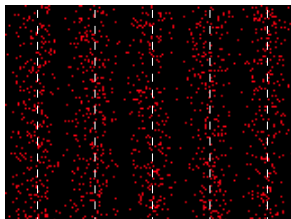
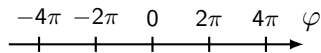
L'*existence* du photon
témoin *supprime* les
interférences quantiques
en A et B. Mais...

Expérience ultime **avec** photon témoin !



détections en A

L'*existence* du photon témoin *supprime* les interférences quantiques en A et B. Mais...



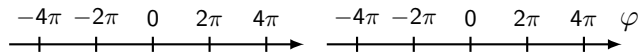
en A si C

... on observe des interférences quantiques associées à la probabilité *conditionnelle* $P_{A \text{ si } C}$!

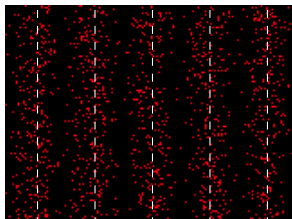
représentation type
« fentes de Young »

Expérience ultime **avec** photon témoin !

représentation type
« fentes de Young »

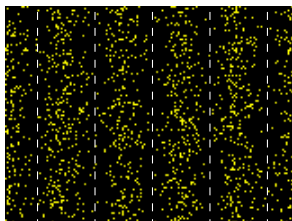


détections en A



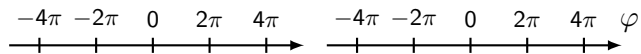
en A si C

L'*existence* du photon
témoin *supprime* les
interférences quantiques
en A et B. Mais...



en A si D

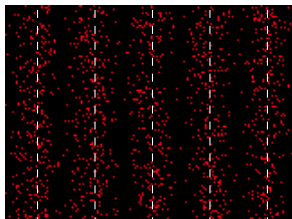
Expérience ultime **avec** photon témoin !



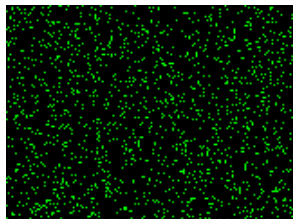
représentation type
« fentes de Young »



détections en A

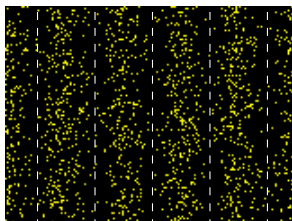


en A si C

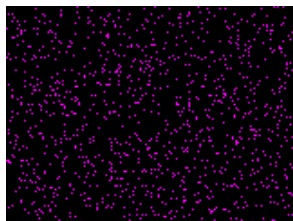


en A si E

L'*existence* du photon témoin *supprime* les interférences quantiques en A et B. Mais...

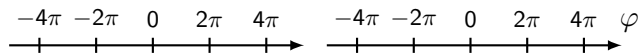


en A si D

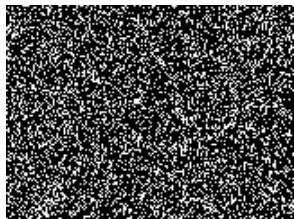


en A si F

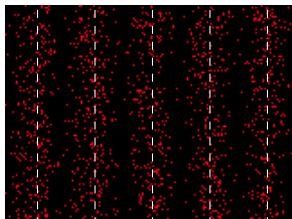
Expérience ultime **avec** photon témoin !



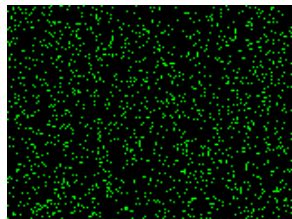
représentation type
« fentes de Young »



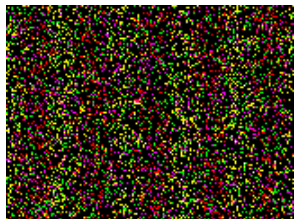
détections en A



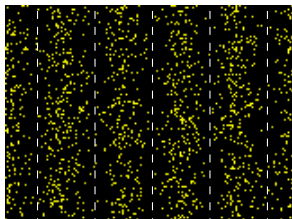
en A si C



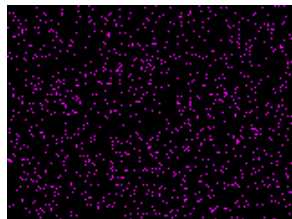
en A si E



détections en A



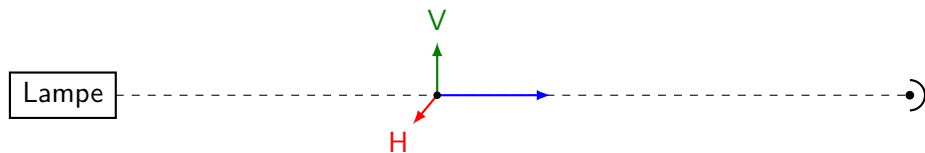
en A si D



en A si F

Les trois polariseurs

La polarisation est décrite par un **vecteur** orthogonal à la **direction de propagation**.

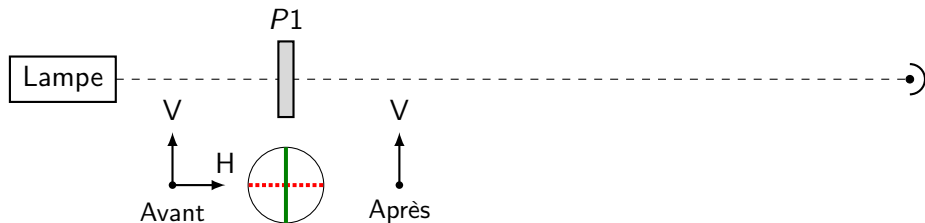


On a deux polarisations **orthogonales** possibles : **Verticale** ou **Horizontale**.

Les photons qui sortent de la lampe sont V ou H (dim = 2)

Les trois polariseurs

La polarisation est décrite par un **vecteur** orthogonal à la direction de propagation.

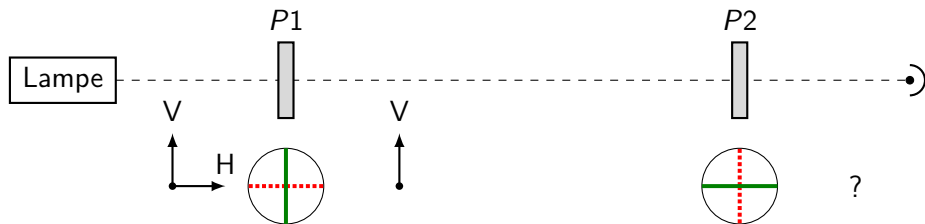


Les photons qui sortent de la lampe sont V ou H (dim = 2)

Le premier polariseur ne laisse passer que les V (il bloque les H)

Les trois polariseurs

La polarisation est décrite par un **vecteur** orthogonal à la direction de propagation.



Les photons qui sortent de la lampe sont V ou H (dim = 2)

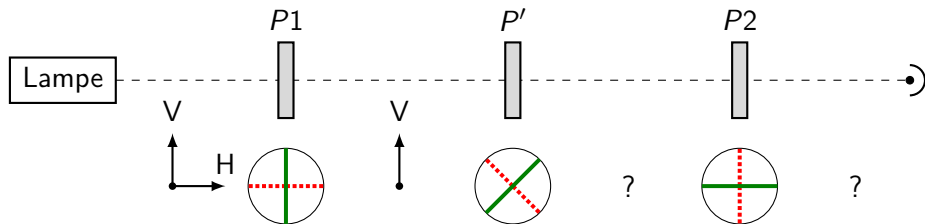
Le premier polariseur ne laisse passer que les V (il bloque les H)

Le second polariseur ne laisse passer que les H (il bloque les V)

Qu'observe-t-on sur le détecteur ?

Les trois polariseurs

La polarisation est décrite par un **vecteur** orthogonal à la direction de propagation.



Les photons qui sortent de la lampe sont V ou H (dim = 2)

Le premier polariseur ne laisse passer que les V (il bloque les H)

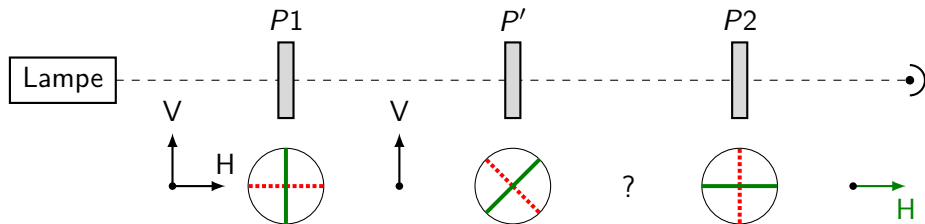
Le second polariseur ne laisse passer que les H (il bloque les V)

On ajoute un troisième polariseur P' à 45° entre les deux premiers

Qu'observe-t-on sur le détecteur? Il faut faire l'expérience !

Les trois polariseurs

La polarisation est décrite par un **vecteur** orthogonal à la direction de propagation.



Les photons qui sortent de la lampe sont V ou H (dim = 2)

Le premier polariseur ne laisse passer que les V (il bloque les H)

Le second polariseur ne laisse passer que les H (il bloque les V)

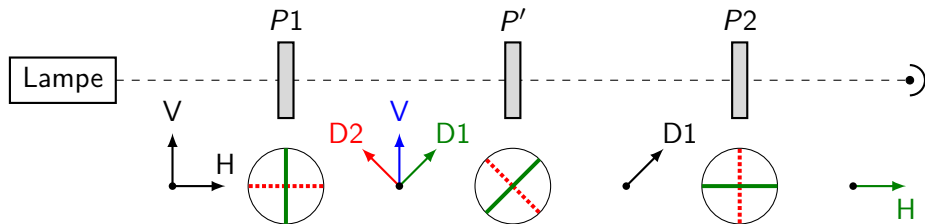
On ajoute un troisième polariseur P' à 45° entre les deux premiers

Qu'observe-t-on sur le détecteur? Il faut faire l'expérience !

Maintenant, il faut trouver une explication...

Les trois polariseurs

La polarisation est décrite par un **vecteur** orthogonal à la direction de propagation.



Les photons qui sortent de la lampe sont V ou H (dim = 2)

Le premier polariseur ne laisse passer que les V (il bloque les H)

Le second polariseur ne laisse passer que les H (il bloque les V)

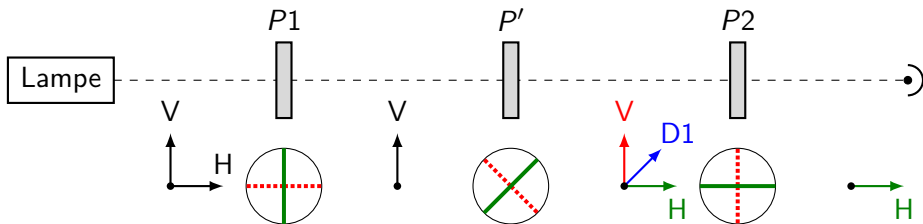
On ajoute un troisième polariseur P' à 45° entre les deux premiers

$$V = D1 + D2 \quad \text{c'est une superposition d'états !}$$

Le polariseur P' laisse passer D1 (il bloque D2).

Les trois polariseurs

La polarisation est décrite par un **vecteur** orthogonal à la direction de propagation.



Les photons qui sortent de la lampe sont V ou H (dim = 2)

Le premier polariseur ne laisse passer que les V (il bloque les H)

Le second polariseur ne laisse passer que les H (il bloque les V)

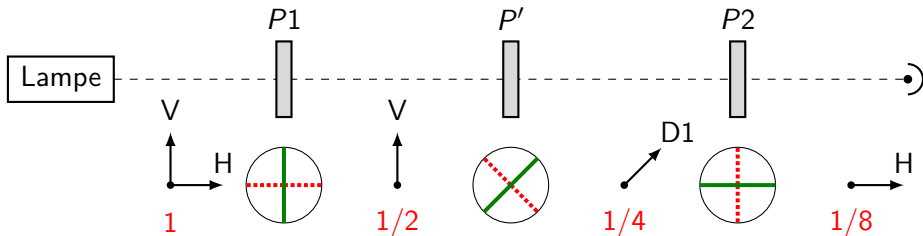
On ajoute un troisième polariseur P' à 45° entre les deux premiers

$D1 = H + V$ c'est une **superposition d'états** !

On observe de la lumière (polarisée horizontalement) sur le détecteur !

Les trois polariseurs

La polarisation est décrite par un **vecteur** orthogonal à la direction de propagation.



Les photons qui sortent de la lampe sont V ou H (dim = 2)

Le premier polariseur ne laisse passer que les V (il bloque les H)

Le second polariseur ne laisse passer que les H (il bloque les V)

On ajoute un troisième polariseur P' à 45° entre les deux premiers

$$D1 = H + V$$

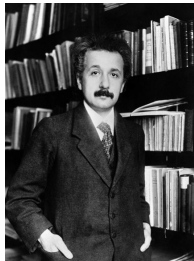
Un photon a une probabilité $1/8$ de traverser les trois polariseurs.

La galerie des pères fondateurs

Les grands anciens et leurs principales contributions (date de leur prix Nobel)



1918



1921



1922



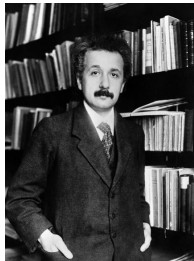
1929

La galerie des pères fondateurs

Les grands anciens et leurs principales contributions (date de leur prix Nobel)



1918



1921



1922



1929

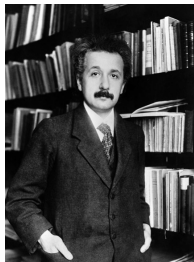
Rapport de Max Planck, sur la candidature d'Albert Einstein à l'Académie des sciences de Berlin (en 1913) : « Il est vrai qu'il a parfois **manqué le but** lors de ses spéculations, par exemple **avec son hypothèse des quanta lumineux** ; mais on ne saurait lui en faire le reproche, car il n'est pas possible d'introduire des idées réellement nouvelles, même dans les sciences les plus exactes, sans parfois prendre des risques »

La galerie des pères fondateurs

Les grands anciens et leurs principales contributions (date de leur prix Nobel)



1918



1921



1922



1929



1932



1938

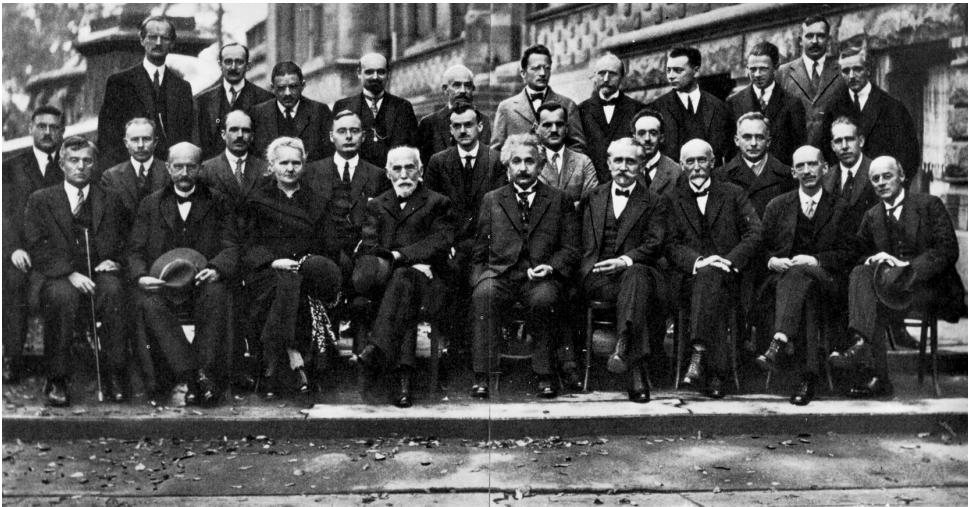


1933



1932

Le congrès Solvay de 1927 « Électrons et photons »

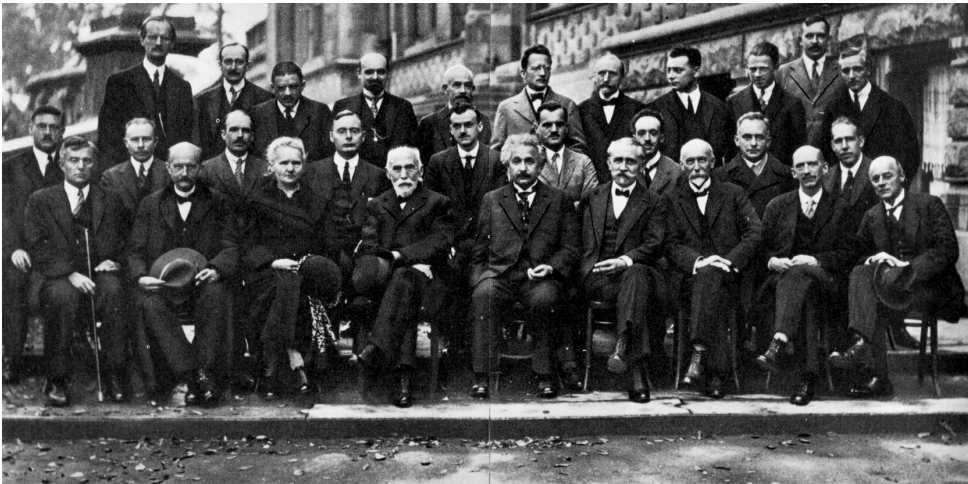


Photographie Benjamin Coupris

28, Avenue Louise, Bruxelles

									R. H. FOWLER
A. PICCARD	E. HENRIOT	ED. HERZEN	TH. DE DONDER	E. SCHROEDINGER	W. PAULI	W. HEISENBERG	L. BRILLOUIN		
		P. EHRENFEST			E. VERSCHAFFELT				
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W. L. BRAGG	H. A. KRAMERS	P. A. M. DIRAC	A. H. COMPTON	L. V. DE BROGLIE	M. BORN	N. BOHR	
I. LANGMEIR	M. PLANCK	MADAME CURIE	H. A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	CH. E. GUYE	C. T. R. WILSON		
									O. W. RICHARDSON

Le congrès Solvay de 1927 « Électrons et photons »



17 des 29 personnalités présentes à ce congrès (59 %)
étaient ou allaient devenir lauréats du prix Nobel !

Marie Curie a eu le prix en physique (1903) et en chimie (1911)

La physique quantique aujourd'hui

Quelques « petits jeunes » et des expériences récentes



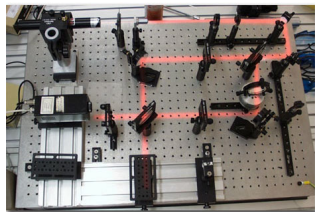
Claude Cohen Tannoudji (1997)



Serge Haroche (2012)

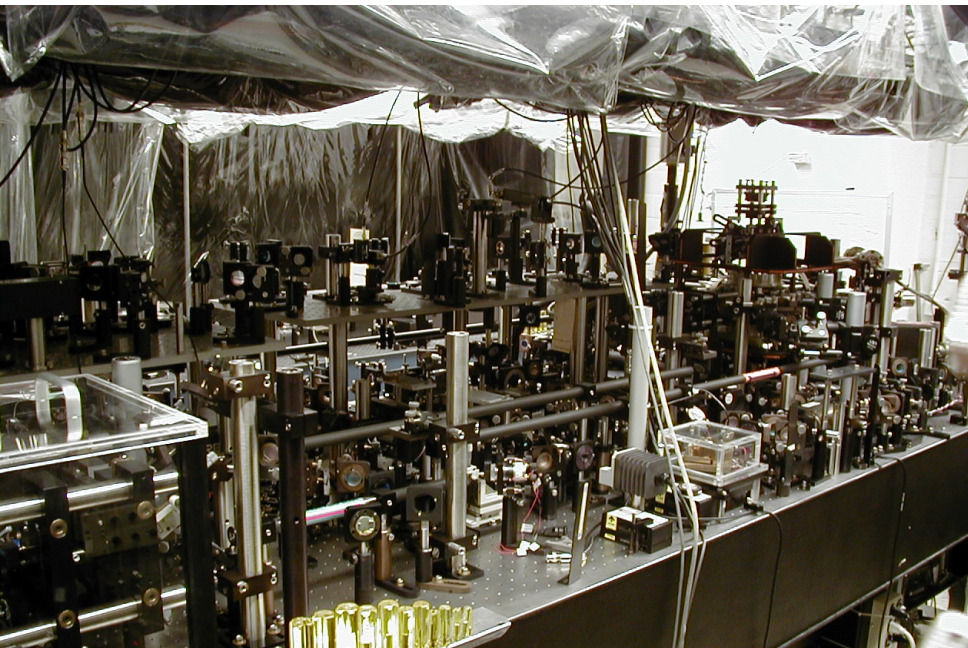


Wojciech Zurek (décohérence)

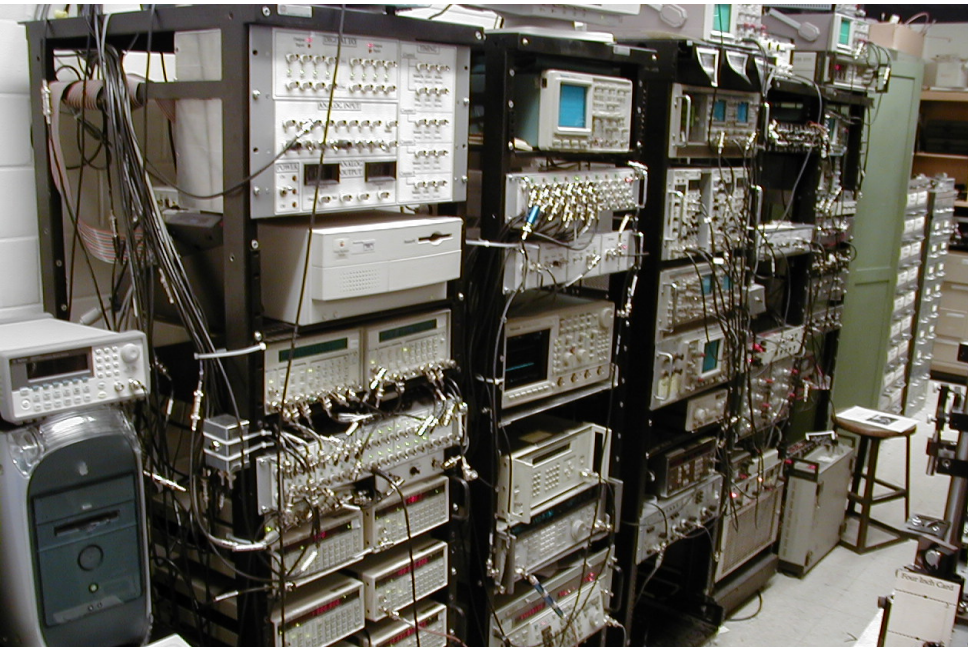


La gomme quantique

La table d'optique d'une expérience d'atomes ultra-froids

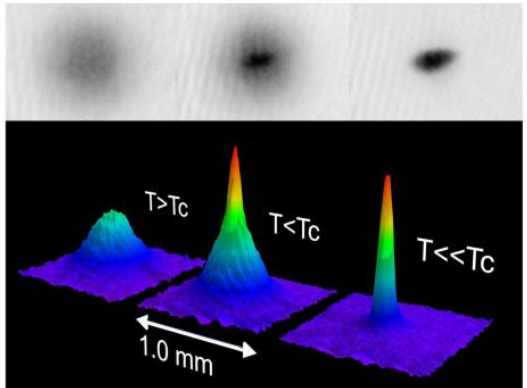
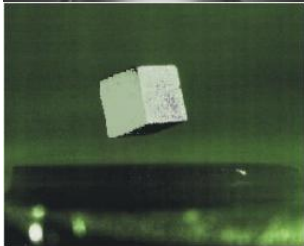
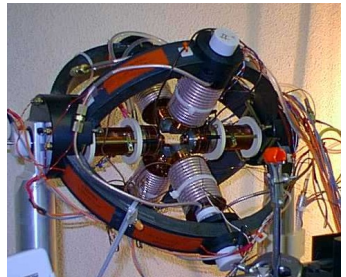


et l'électronique de commande

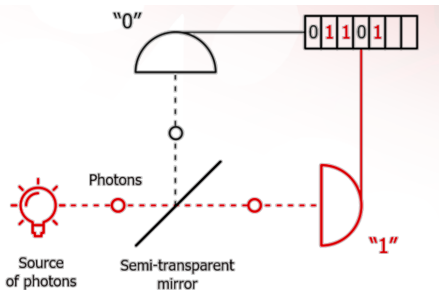


Effets quantiques macroscopiques

superfluidité, supraconductivité, condensation de Bose



Générateur quantique de nombres binaires **aléatoires**



Des applications commercialisées

www.idquantique.com



64.4 mm

Quantis-PCIe-4M

Générateur quantique de
nombres binaires **aléatoires**

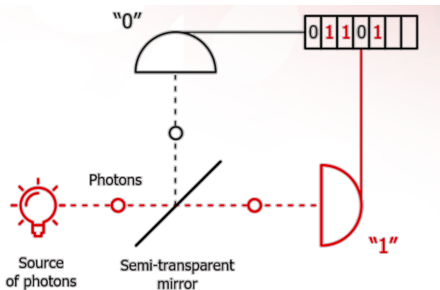


114.0 mm

61.0 mm

Quantis-USB-4M

- ▶ 2001 création par 4 chercheurs de l'université de Genève
- ▶ 2017 incorporation dans un smartphone



Des applications commercialisées

www.idquantique.com



Quantis-PCIe-4M

Générateur quantique de nombres binaires **aléatoires**

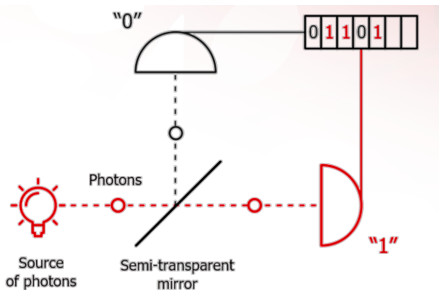


Quantis-USB-4M

- ▶ 2001 création par 4 chercheurs de l'université de Genève
- ▶ 2017 incorporation dans un smartphone

Systèmes de cryptographie :

- ▶ 2004 premier système commercialisé (vendu aux banques Suisses)
- ▶ 2007 système déployé pour sécuriser les élections du canton de Genève
- ▶ 2014 clé quantique échangée sur 307 km (record du monde à l'époque)



What's next ?

- ▶ Relations d'**indétermination** de Heisenberg
- ▶ L'effet tunnel (ou effet saute-mouton ?)
- ▶ Les particules identiques (indiscernables !)
- ▶ Les interférences à **plusieurs** quantons
- ▶ L'information quantique (cryptographie, téléportation, ordinateur ?)
- ▶ **Avant tout ça** : apprendre les bases pour de vrai ...



Conclusion

- ▶ Il existe un « hasard » (très subtil) dans les lois quantiques
- ▶ Dans « l'acte de mesure » il y a une ouverture pour connecter la matière à Autre chose (attention aux extrapolations)

Conclusions

- ▶ Ce sont des **expériences scientifiques** qui ont conduit à introduire les concepts étonnants de la physique quantique.

Conclusions

- ▶ Ce sont des **expériences scientifiques** qui ont conduit à introduire les concepts étonnants de la physique quantique.
- ▶ *Principe de superposition* : la **somme** de deux états est aussi un état possible (facile à calculer, difficile à interpréter).

Conclusions

- ▶ Ce sont des **expériences scientifiques** qui ont conduit à introduire les concepts étonnants de la physique quantique.
- ▶ *Principe de superposition* : la **somme** de deux états est aussi un état possible (facile à calculer, difficile à interpréter).
- ▶ On a des *interférences quantiques* lorsque l'état observé peut être réalisé de plusieurs manières **indiscernables**.

Conclusions

- ▶ Ce sont des **expériences scientifiques** qui ont conduit à introduire les concepts étonnants de la physique quantique.
- ▶ *Principe de superposition* : la **somme** de deux états est aussi un état possible (facile à calculer, difficile à interpréter).
- ▶ On a des *interférences quantiques* lorsque l'état observé peut être réalisé de plusieurs manières **indiscernables**.
- ▶ La **mesure** détruit les superpositions quantiques.
Problème toujours ouvert : comment définir une mesure ?

Conclusions

- ▶ Ce sont des **expériences scientifiques** qui ont conduit à introduire les concepts étonnants de la physique quantique.
- ▶ *Principe de superposition* : la **somme** de deux états est aussi un état possible (facile à calculer, difficile à interpréter).
- ▶ On a des *interférences quantiques* lorsque l'état observé peut être réalisé de plusieurs manières **indiscernables**.
- ▶ La **mesure** détruit les superpositions quantiques.
Problème toujours ouvert : comment définir une mesure ?
- ▶ On peut réaliser des **superpositions à plusieurs particules** : *intrication quantique* (outil de base pour l'ordinateur quantique).

Conclusions

- ▶ Ce sont des **expériences scientifiques** qui ont conduit à introduire les concepts étonnants de la physique quantique.
- ▶ *Principe de superposition* : la **somme** de deux états est aussi un état possible (facile à calculer, difficile à interpréter).
- ▶ On a des *interférences quantiques* lorsque l'état observé peut être réalisé de plusieurs manières **indiscernables**.
- ▶ La **mesure** détruit les superpositions quantiques.
Problème toujours ouvert : comment définir une mesure ?
- ▶ On peut réaliser des **superpositions à plusieurs particules** : *intrication quantique* (outil de base pour l'ordinateur quantique).
- ▶ Il peut exister des objets spatialement séparés qui **ne sont pas indépendants** les uns des autres : *non-séparabilité* ou *implexité*.

Quelques références

- ▶ Vulgarisation de bonne qualité :
“Initiation à la physique quantique” de **Valerio Scarani**
chez Vuibert (2006) cette présentation reprend plusieurs idées du livre
- ▶ Les nouveaux mystères de l'espace et du temps :
“Métaphysique quantique” de **Sven Ortoli** et **J.-P. Pharabod**
aux Éditions La Découverte (2011) après “Le cantique des quantiques”
- ▶ Une super BD qui porte bien son nom, je la conseille :
“Le mystère du MONDE QUANTIQUE” par **Thibault Damour**
et **Mathieu Burniat** chez Dargaud (2016)
- ▶ Ouvrage technique de référence récent (en deux tomes) :
“Physique Quantique” (3^e édition) de **Michel Le Bellac**
chez EDP Science / CNRS Éditions (2013)
voir en particulier le chapitre *11.4.7 Interprétations* dans le tome 1
- ▶ Revue des différentes interprétations par **Franck Laloë** :
“Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?” (2^e édition)
chez EDP Science / CNRS Éditions (2018) Attention : pas facile !

Am I an X-ray
photon...? Or a
radio photon?
Or visible?

Oh hell...! Why worry about
all that again...? I'm
not even sure if I'm a
wave or a particle!



= PHOTON SELF-IDENTITY PROBLEMS =