

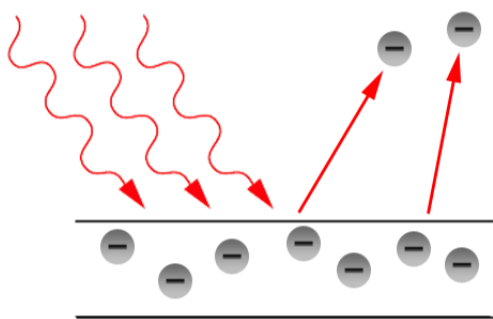
# L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE ET LES CHAMBRES À BROUILLARD

ASPECT CORPUSCULAIRE DE LA MATIÈRE ET DES RAYONNEMENTS

## L'effet photoélectrique

### Principe de l'expérience :

On projette de la lumière sur une plaque de métal. Des électrons peuvent en être émis, que l'on peut détecter via le léger courant qu'ils produisent (éventuellement amplifié par un détecteur basé sur le principe d'émission secondaire), ou bien en observant leurs trajectoires dans une chambre à brouillard.



### Observations :

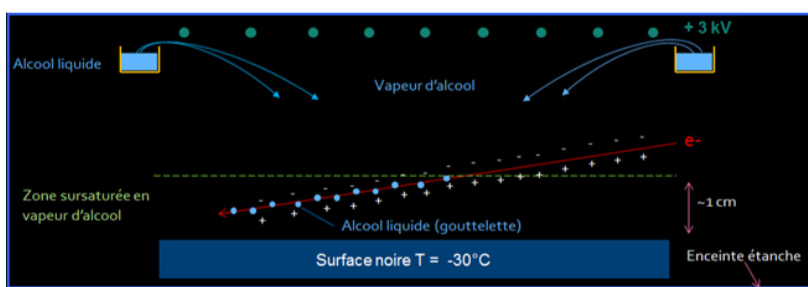
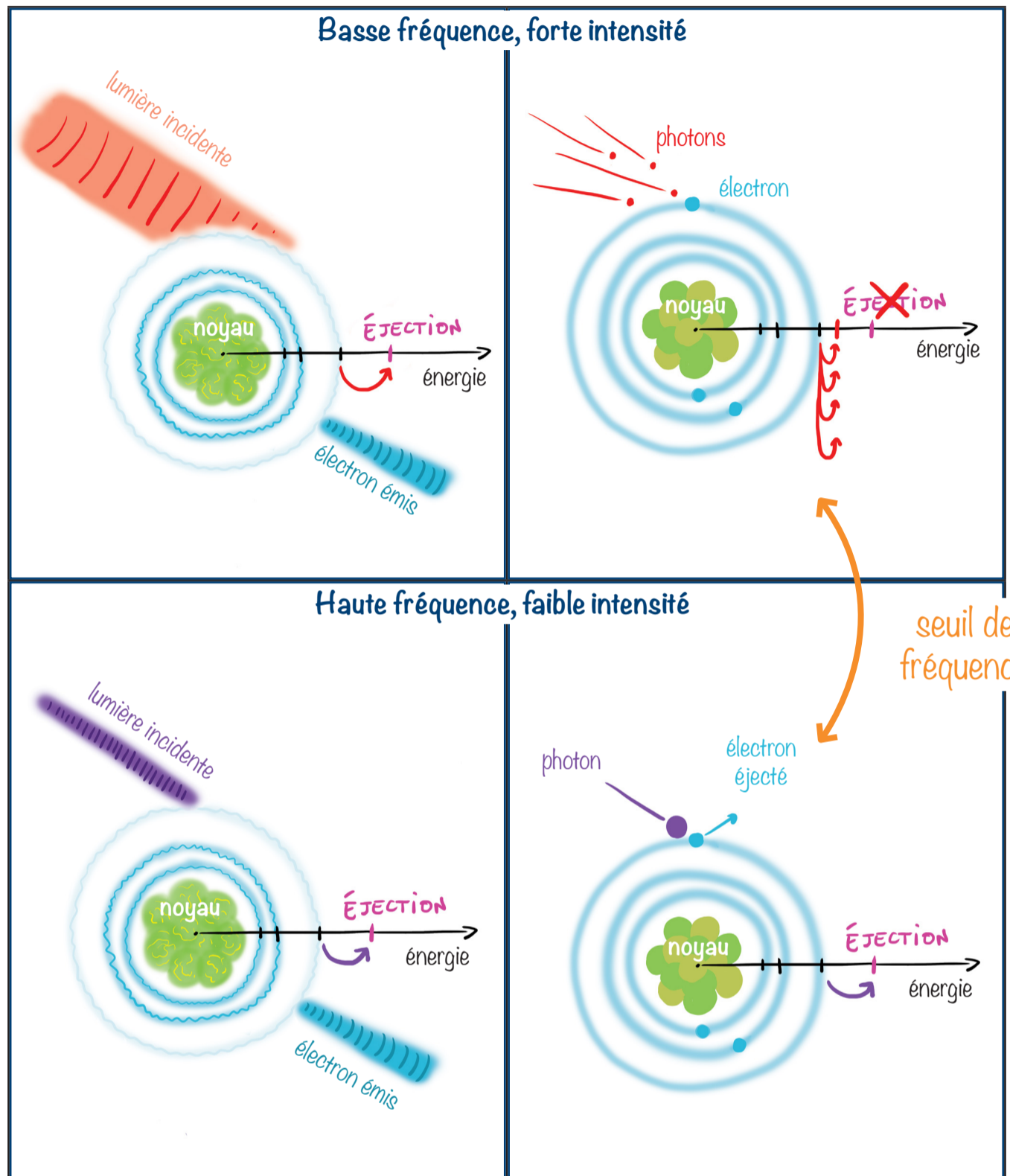
Il y a une fréquence seuil à partir de laquelle les électrons sont émis, qui dépend du métal. En dessous, rien ne se passe, peu importe l'intensité de la lumière. Au-dessus, le nombre d'électrons émis augmente avec l'intensité et leur vitesse avec la fréquence. L'existence de cette fréquence seuil ne peut être comprise que si la lumière est constituée de corpuscules (photons).

À l'échelle atomique

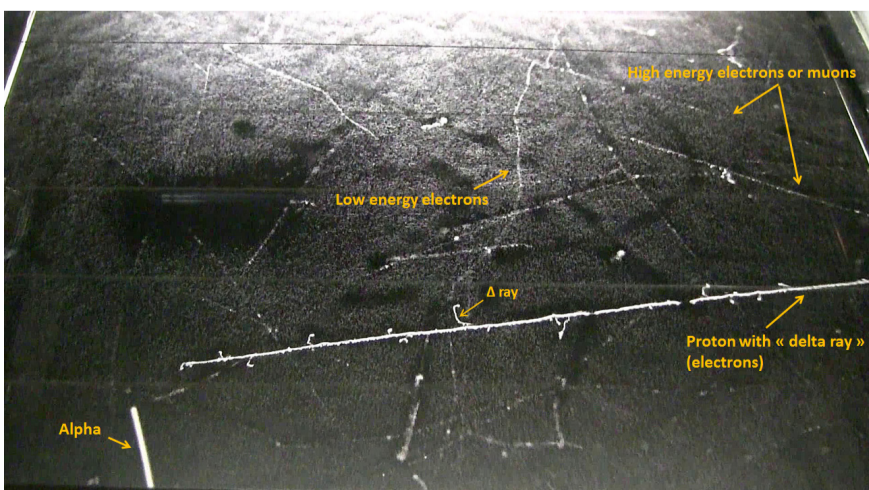


hypothèse continu & ondes

hypothèse corpuscule : **vérifiée**

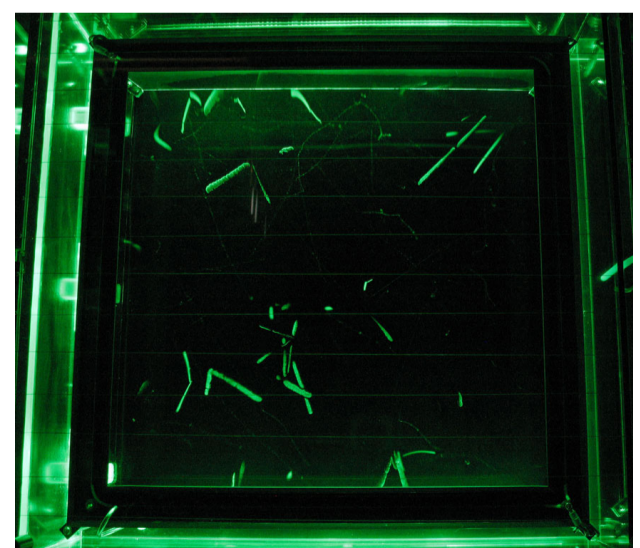


[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Cloud\\_chambers#/media/File:Working\\_principle\\_of\\_a\\_diffusion\\_cloud\\_chamber.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Cloud_chambers#/media/File:Working_principle_of_a_diffusion_cloud_chamber.png)



[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Cloud\\_chambers#/media/File:Cosmic\\_radiations\\_in\\_a\\_diffusion\\_cloud\\_chamber.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Cloud_chambers#/media/File:Cosmic_radiations_in_a_diffusion_cloud_chamber.png)

## Les chambres à brouillard



[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Cloud\\_chambers#/media/File:DESYNebelkammer.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Cloud_chambers#/media/File:DESYNebelkammer.jpg)

Cet appareil de mesure met en évidence un attribut typiquement corpusculaire des particules : des trajectoires.

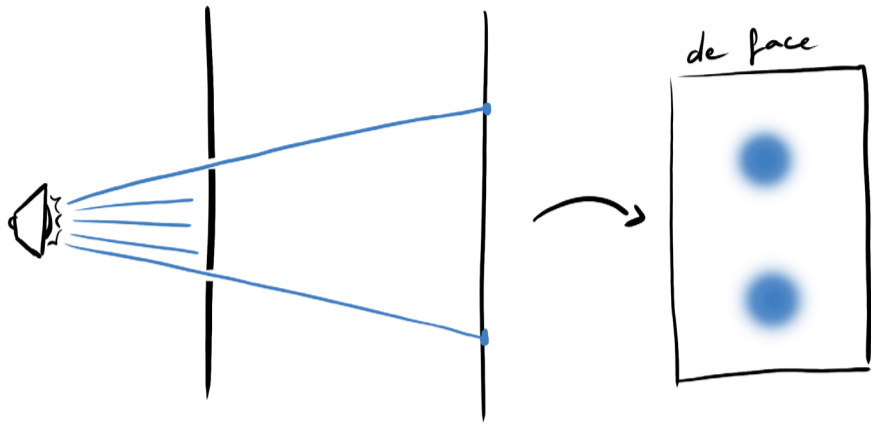
# L'EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG

## ASPECT CONTINU DE LA MATIÈRE ET DES RAYONNEMENTS

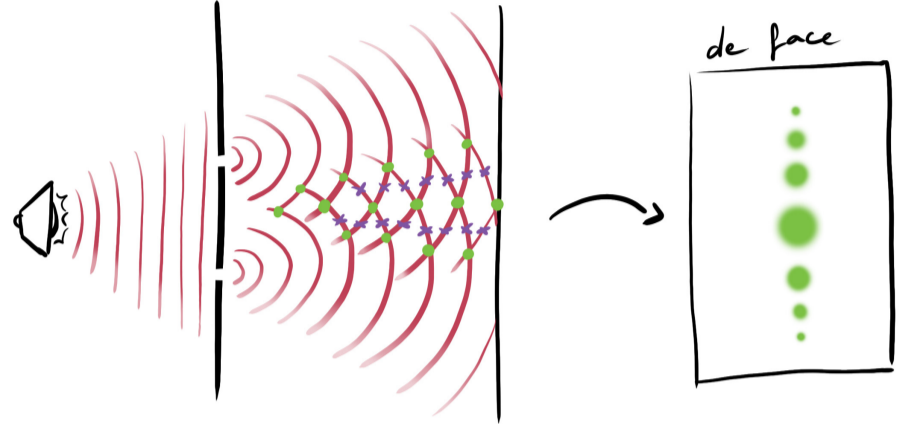
### Expérience initiale

On projette de la lumière sur une plaque percée de deux fentes. On observe la figure projetée sur un écran. Des corpuscules projetteraient deux taches lumineuses alors qu'un continu parcouru d'une onde produirait une figure d'interférences. C'est cette dernière figure qui est effectivement observée, ce qui indique une nature de continu.

#### Hypothèse corpusculaire



#### Hypothèse ondulatoire : vérifiée



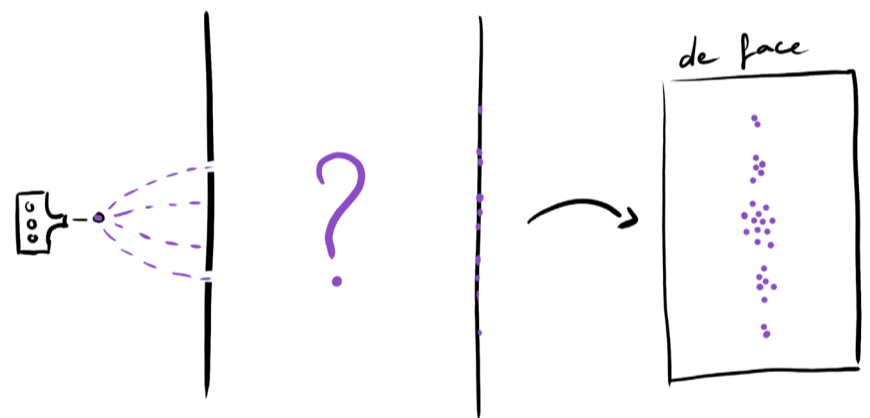
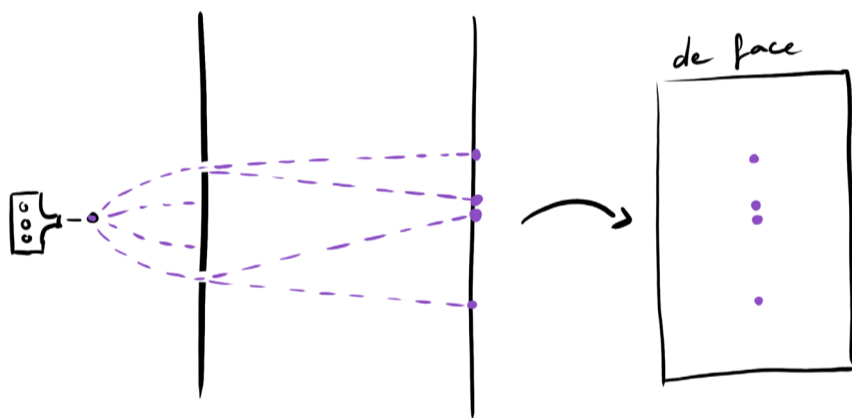
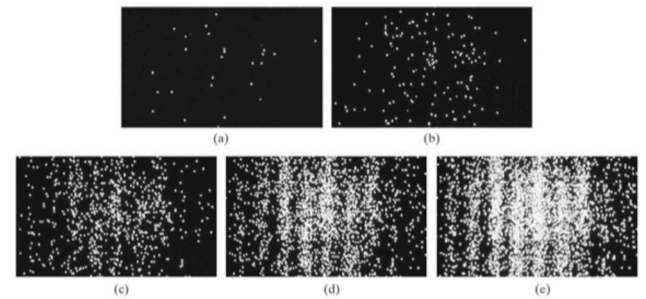
### Expérience photon par photon

On peut aussi envoyer la lumière par très petites quantités à la fois (= photons).

Alors :

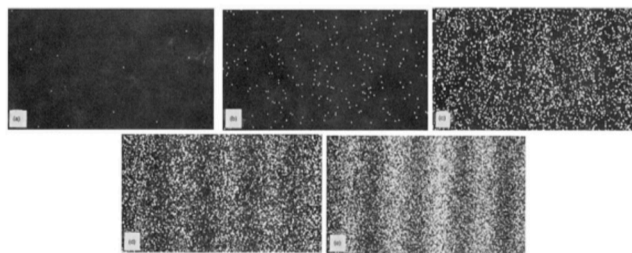
1. Il est impossible de prévoir à quel endroit chaque photon impactera l'écran.
2. Un grand nombre de photons reproduit la même figure d'interférences que lorsqu'on les envoie tous d'un coup, alors même qu'ils ne peuvent pas interagir entre eux.

photons

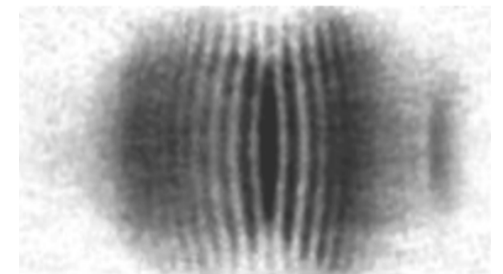


On peut également faire la même expérience avec des électrons et des atomes, ce qui indique que la matière présente également un caractère de continu ondulatoire.

électrons



atomes

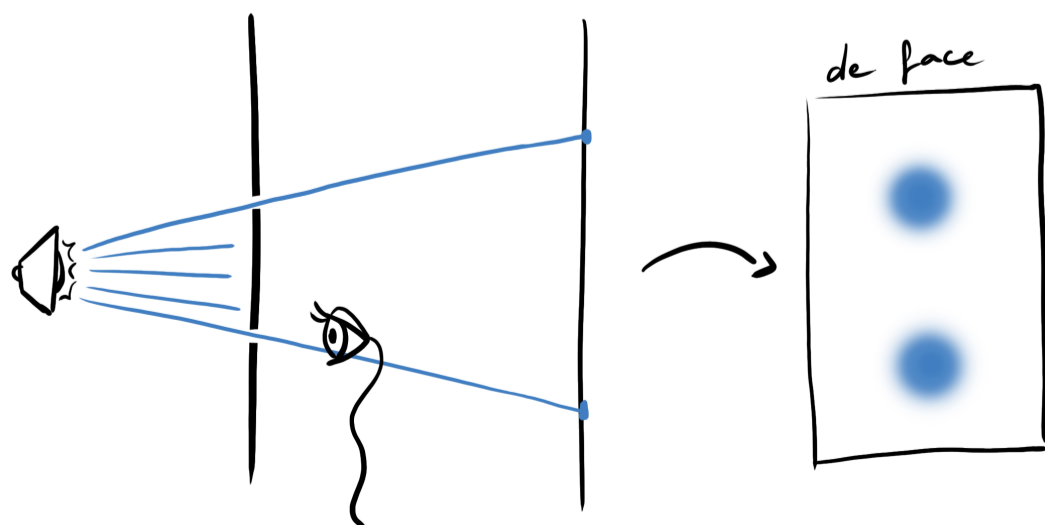


<https://pdfs.semanticscholar.org/cb09/01ee865ba5af8088c745a34d9c6bba0aa7bd.pdf>

Source des deux images particule par particule : Wolfgang Rueckner and Paul Titcomb, «A lecture demonstration of single photon interference», Am J. Phys. 64 (2), 184-188 (1996). Copyright Wolfgang Rueckner, Harvard University Science Center, dans <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1204/1204.4616>

### Perturbation par un détecteur

Lorsqu'on place à la sortie d'une des fentes un détecteur qui ne détruit pas les photons, mais dans lequel ils laissent une trace de leur passage, on observe cette fois les taches qu'on attendrait d'un comportement corpusculaire. Cet effet peut être interprété soit en considérant un rôle de l'observateur dans les propriétés mesurées, soit en envisageant l'expérience de façon holiste (ce n'est pas la même expérience que celle des fentes de Young initiale), soit en conférant une existence propre à la fonction d'onde (qui prédit ces résultats).

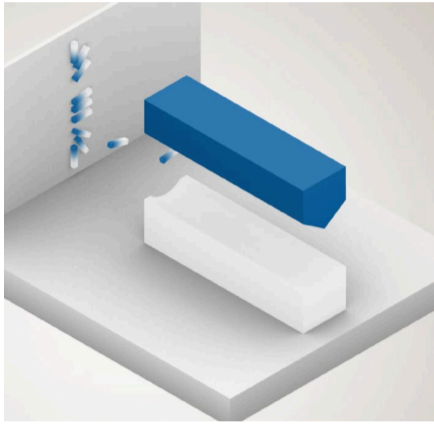


# L'EXPÉRIENCE DE STERN-GERLACH

## PRINCIPE D'INDÉTERMINATION DE HEISENBERG

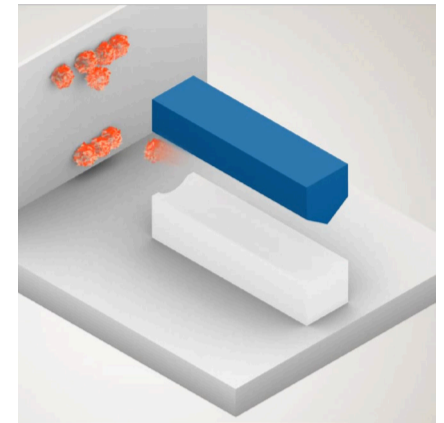
### Expérience initiale : le spin

On fait passer un faisceau d'atomes ou d'électrons dans un champ magnétique uniforme (c'est-à-dire entre deux aimants de forme particulière). Le faisceau se divise en deux faisceaux distincts, alors qu'on s'attendrait à ce que la déviation varie de façon continue. Cela signifie que l'aimantation des électrons (et par extension des atomes) n'est pas continue mais discrète, seules certaines valeurs sont possibles. Le dispositif de Stern-Gerlach permet donc de mesurer le spin pour un électron : «up» ou «down» selon la direction de déviation.



Aimantation continue : tous les degrés de déviation de la trajectoire sont possibles.

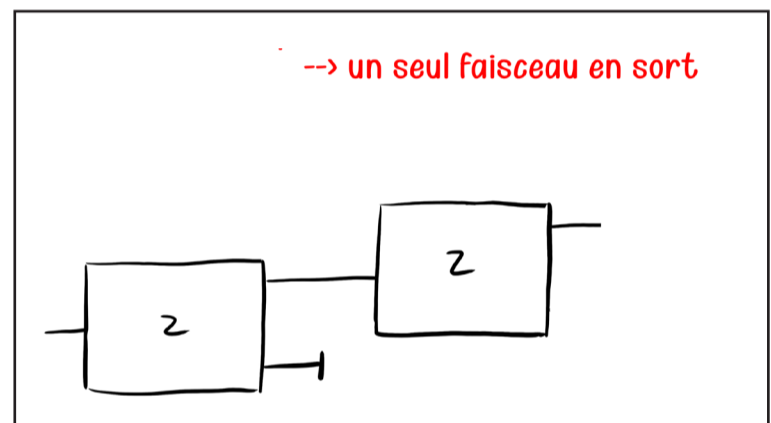
Aimantation discrète : deux directions de déviation seulement = le spin.



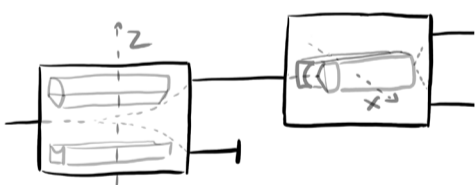
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Spin\\_quantique\\_et\\_experience\\_de\\_Stern\\_et\\_Gerlach.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Spin_quantique_et_experience_de_Stern_et_Gerlach.jpg)

### Déclinaison à plusieurs détecteurs

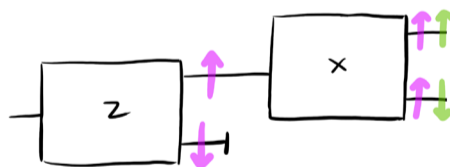
On aligne un deuxième dispositif identique sur l'un des faisceaux qui sortent du premier dispositif.



On tourne l'un des dispositifs à 90°. À l'intérieur ...



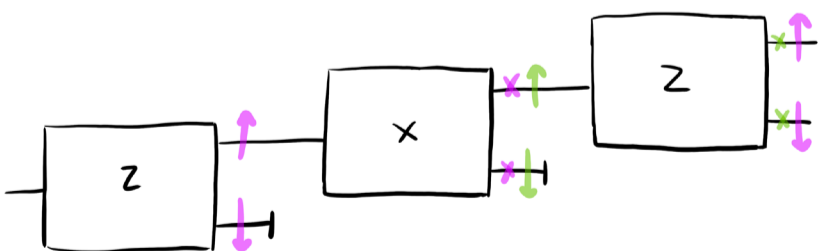
Deux dispositifs mesurant selon des axes perpendiculaires à la suite --> deux faisceaux



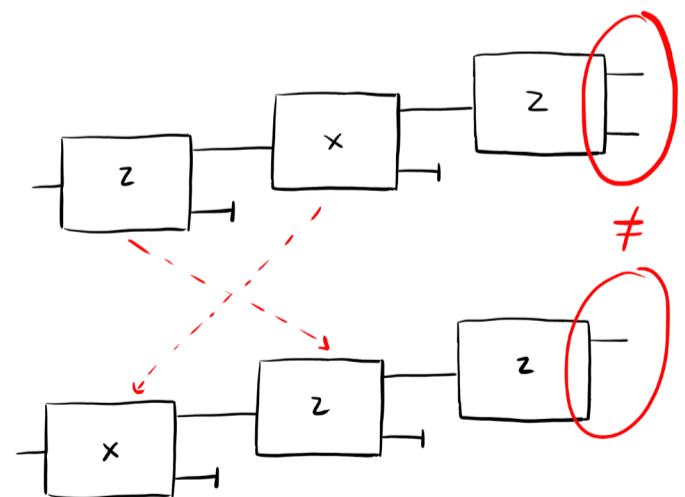
Idee qu'on se fait logiquement de l'état des propriétés des électrons dans les faisceaux :

↑↓ spin selon z (up ou down)  
↑↓ spin selon x (up ou down)

Trois dispositifs à la suite : l'idée de propriétés combinées doit être écartée.



L'ordre dans lequel on effectue les mesures influence le résultat



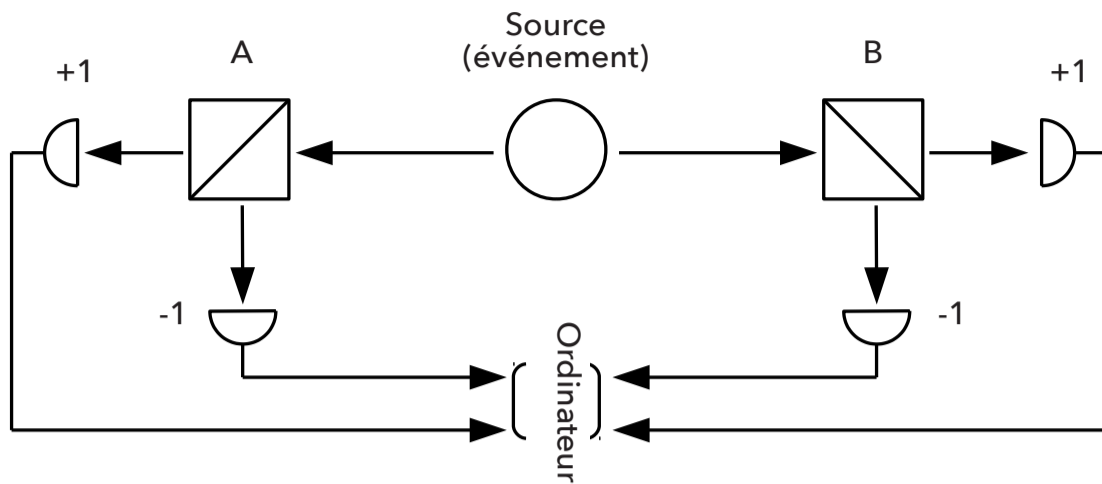
Les spins mesurés selon des axes perpendiculaires sont incompatibles, la mesure de l'un balaye la valeur précédente de l'autre. Ils répondent au théorème d'indétermination de Heisenberg. Ce théorème est la démonstration mathématique d'une imprécision nécessaire sur certaines paires de variables (spin dans des directions opposées, position et impulsion, etc.), qui peut être interprétée soit comme une incertitude soit comme une indétermination de ces variables.

# L'EXPÉRIENCE D'ALAIN ASPECT

## L'INTRICATION QUANTIQUE

### Principe de l'expérience

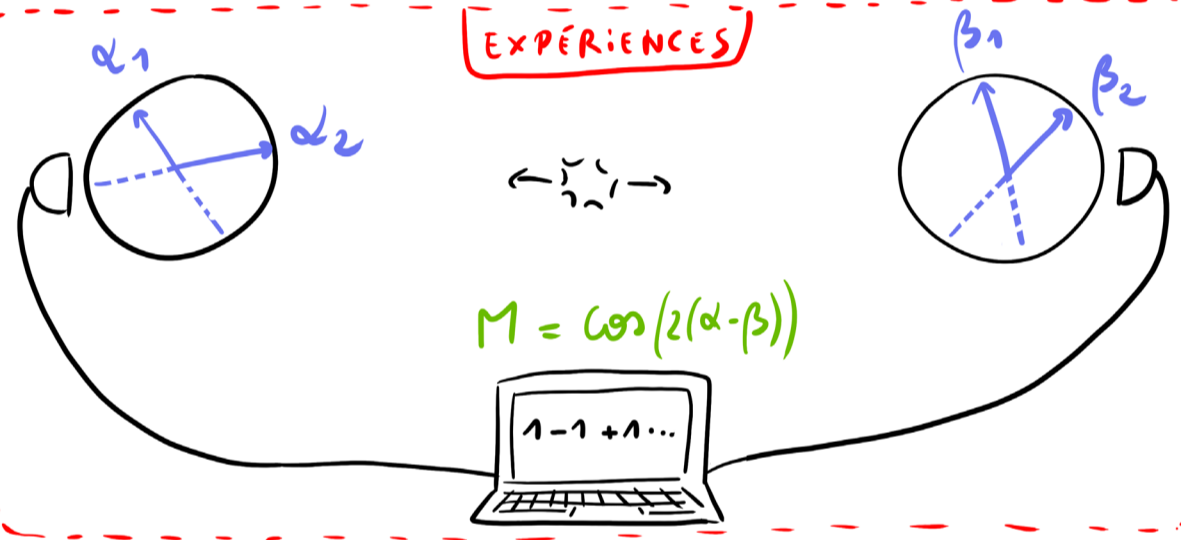
Deux photons sont produits par un même événement dans des directions opposées. On place des polariseurs (= filtre orienté selon une direction d'oscillation) à égale distance des deux côtés (A et B). C'est une mesure de la polarisation selon un angle : si le photon franchit le polariseur, il a cet angle de polarisation, et un compteur enregistre +1. Sinon, il est réfléchi, et un compteur enregistre -1. On fait varier les angles des polarisateurs A et B l'un par rapport à l'autre et on mesure les corrélations entre les passages des deux côtés.



THÉORIE

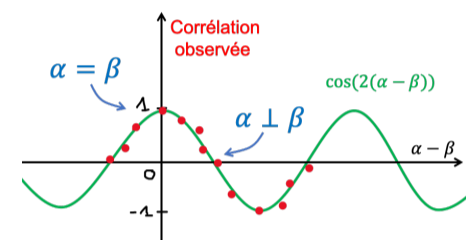
$\alpha_1 \parallel \beta_1$  ou  $\alpha_1 \parallel \beta_2$  ou  $\beta_1 \perp \alpha_2$  ou  $\beta_2 \perp \alpha_2$   
 $|M_{11} + M_{12} + M_{21} - M_{22}| \leq 2$

### EXPÉRIENCES



### Résultats

La moyenne des corrélations entre les résultats des deux côtés est le **cosinus** de la différence d'angle.



Ainsi, si la polarisation est mesurée selon le même angle des deux côtés, le comportement des deux photons est toujours le même (qu'ils soient transmis ou réfléchis), c'est une corrélation parfaite (la moyenne est de 1). Si la polarisation est mesurée selon des angles perpendiculaires, les photons se comportent parfois de la même façon, parfois différemment, sans aucune tendance notable, il n'y a pas de corrélation (la moyenne est de 0). Entre les deux, la corrélation varie comme un cosinus. Par ailleurs, un calcul théorique de John Bell indique que si on se donne le choix de deux angles quelconques de chaque côté, il existe une relation entre les moyennes des quatre configurations possibles, **l'inégalité de Bell**. Or, dans l'expérience d'Aspect, la variation de la moyenne est si forte qu'on peut trouver des angles qui contredisent cette inégalité.

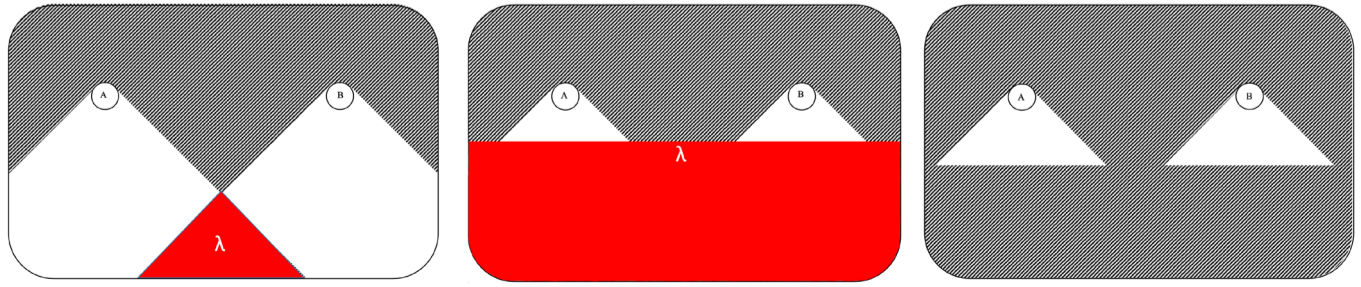
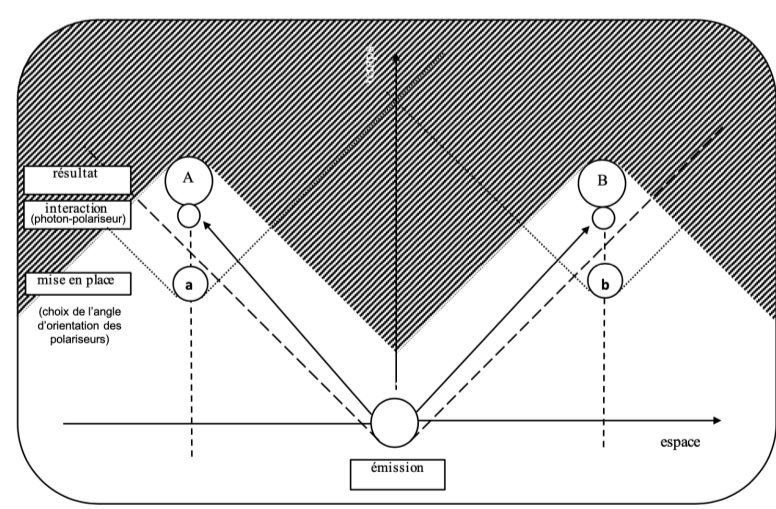
### Conclusion

L'expérience est en contradiction avec l'inégalité de Bell. Cela signifie que l'inégalité est fautive, donc que l'un des présupposés implicites dont Bell est parti pour la démontrer est faux. Les quatre présupposés qui pourraient être faux sont :

1. Qu'il y ait une cause commune expliquant les réactions des deux photons (notée  $\lambda$ )
2. Que cette cause soit spatio-temporelle
3. Qu'il n'y ait pas de rétrocausalité
4. Qu'il n'y ait pas d'action instantanée à distance (= localité)

On choisit généralement de réfuter le quatrième (= non-localité). Bell proposait de réfuter le deuxième, c'est-à-dire de considérer qu'il existe des causes non-physiques. Un exemple de cause non physique serait une relation ontologique (et non établie par nous comme toutes les autres relations connues). Remarque : une action non-locale est également une action non-physique, mais produite par une cause physique (le photon qui agit sur l'autre).

### Négation du deuxième présupposé (représentée dans un diagramme d'espace-temps)

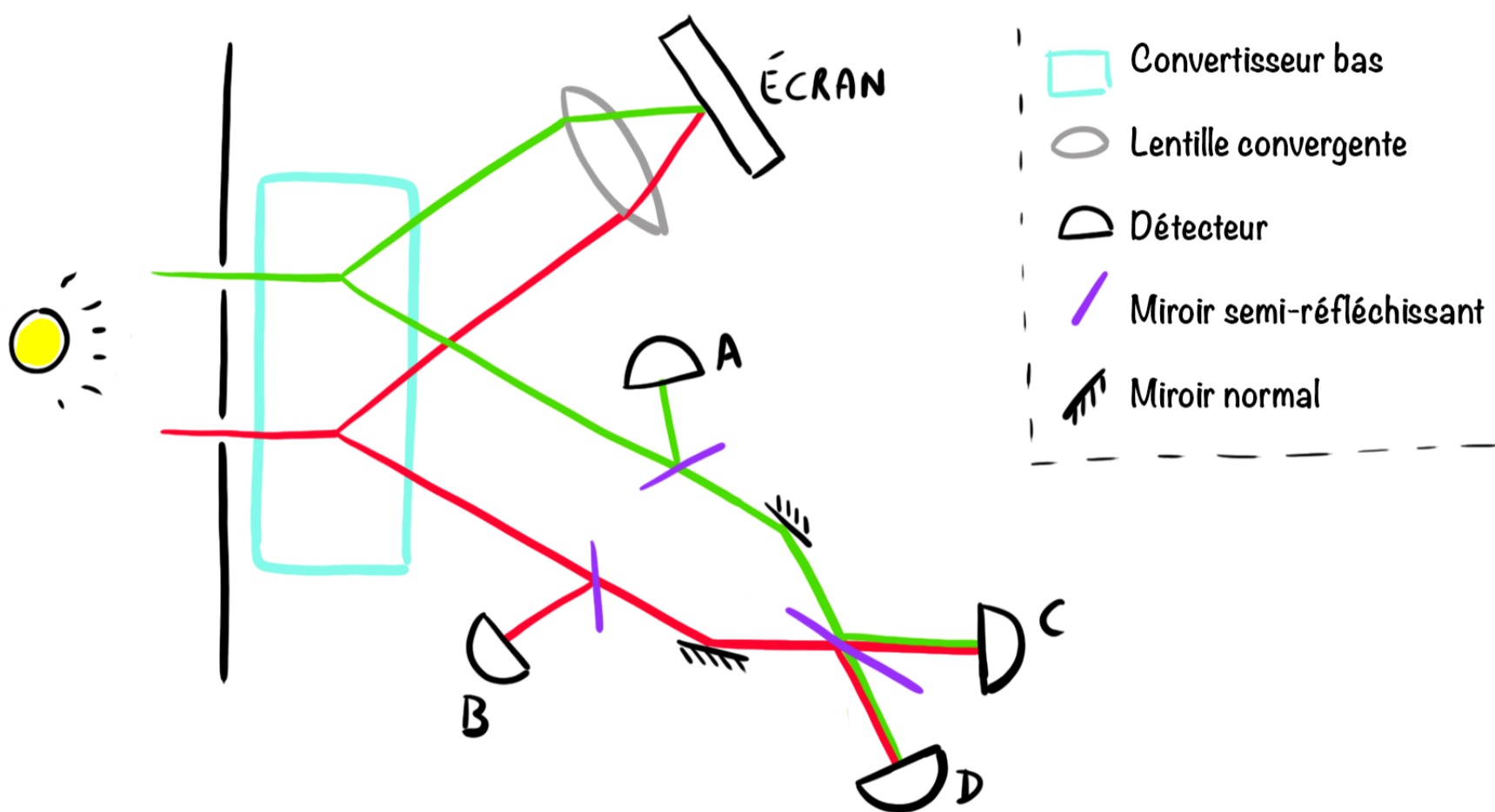


# L'EXPÉRIENCE DE LA GOMME QUANTIQUE À CHOIX RETARDÉ

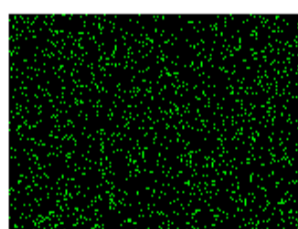
## NON-TEMPORALITÉ DE L'INTRICATION

### Principe de l'expérience

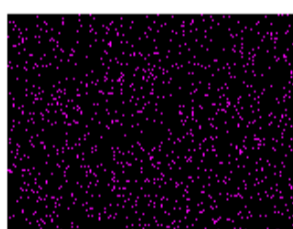
On fait passer de la lumière dans une fente de Young puis dans un convertisseur bas (= matériau qui peut diviser un photon en deux photons de fréquence réduite de moitié). Pour chaque fente, l'un des deux photons est redirigé vers un écran ; ainsi, si le photon initial est passé par les deux fentes, ces photons fils pourront interférer. Pour chaque fente, le deuxième photon est envoyé vers une série de détecteurs. Des miroirs semi-réfléchissants permettent de créer deux chemins pour chaque photon : un chemin qui permet de savoir par quelle fente il est passé (aboutissant aux détecteurs A et B) et un chemin qui perd cette information (détecteurs C et D). C'est en ce dernier que consiste la **gomme quantique**.



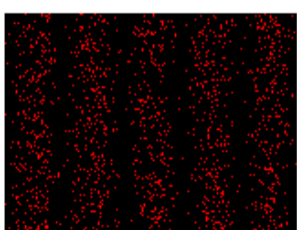
Impression sur l'écran



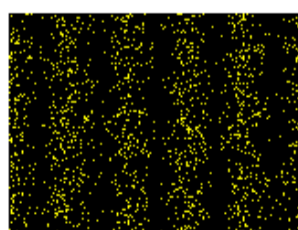
Corrélation avec B



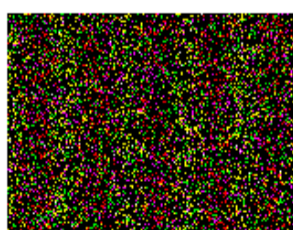
Corrélation avec A



Corrélation avec C



Corrélation avec D



Corrélation avec tous les détecteurs (couleurs conservées)

### Observations

Lorsque le second photon est détecté en A ou B, il n'y a pas de figure d'interférences sur l'écran. Par contre, lorsqu'il est détecté en C ou D, les premiers photons envoyés sur l'écran interfèrent bien. C'est ainsi que l'on constate l'**intrication**.

Ces résultats sont obtenus seulement après la détection, en isolant les impacts sur l'écran qui correspondent aux photons détectés par chaque détecteur. Ceci garantit qu'il n'y a pas de rétrocausalité.

Toutefois, les détecteurs peuvent être placés beaucoup plus loin de la source donc les premiers photons auront formé la figure d'interférences (le cas échéant) bien avant que leurs photons intriqués ne soient envoyés sur le chemin « gomme » (au hasard puisque c'est au hasard que les miroirs semi-réfléchissants réfléchissent ou transmettent). C'est en cela que consiste le **choix retardé**.

Pourtant, la corrélation persiste malgré cet éloignement temporel. Ceci implique que la cause des corrélations entre objets intriqués ne peut pas être un phénomène temporel.