

# MÉCANIQUE QUANTIQUE IÈRE PARTIE

PHI 6346

Séance 9

Jonathan Simon

# PROGRAMME

- 1) **Superposition**, interférence, «incertitude»
- 2) **Intrication**, non-localité et non-séparabilité, Bell
- 3) **Le problème de la mesure/interprétation**
  - **A) Il y a plus dans le monde que l'état quantique.** (Copenhague, Bohm)
  - **B) Il y a plus dans la dynamique que l'équation de Schrodinger** (effondrement)
  - **C) La mécanique quantique est complète** (Mondes multiples - Everett)

**SUPERPOSITION**

# SUPERPOSITION

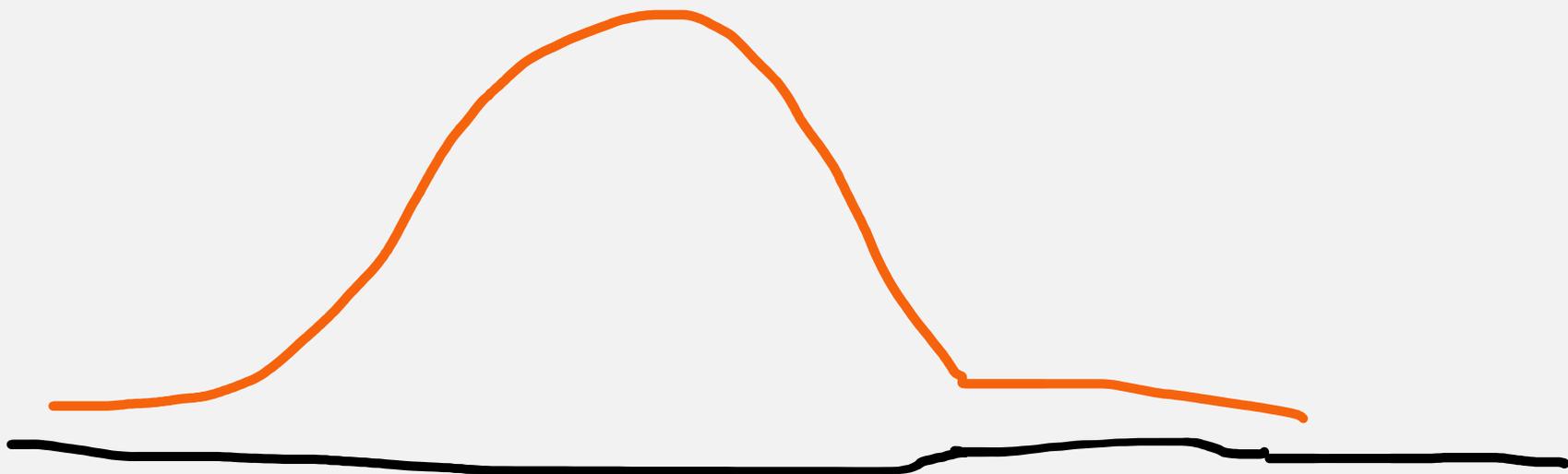
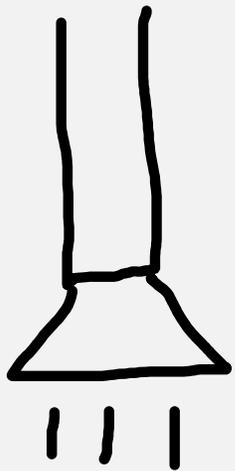
- La théorie quantique décrit l'état quantique.
- L'état quantique d'un système à un moment donné correspond à un (type particulier) de distribution de probabilité sur les façons dont vous pourriez mesurer le système à ce moment-là.

# SUPERPOSITION

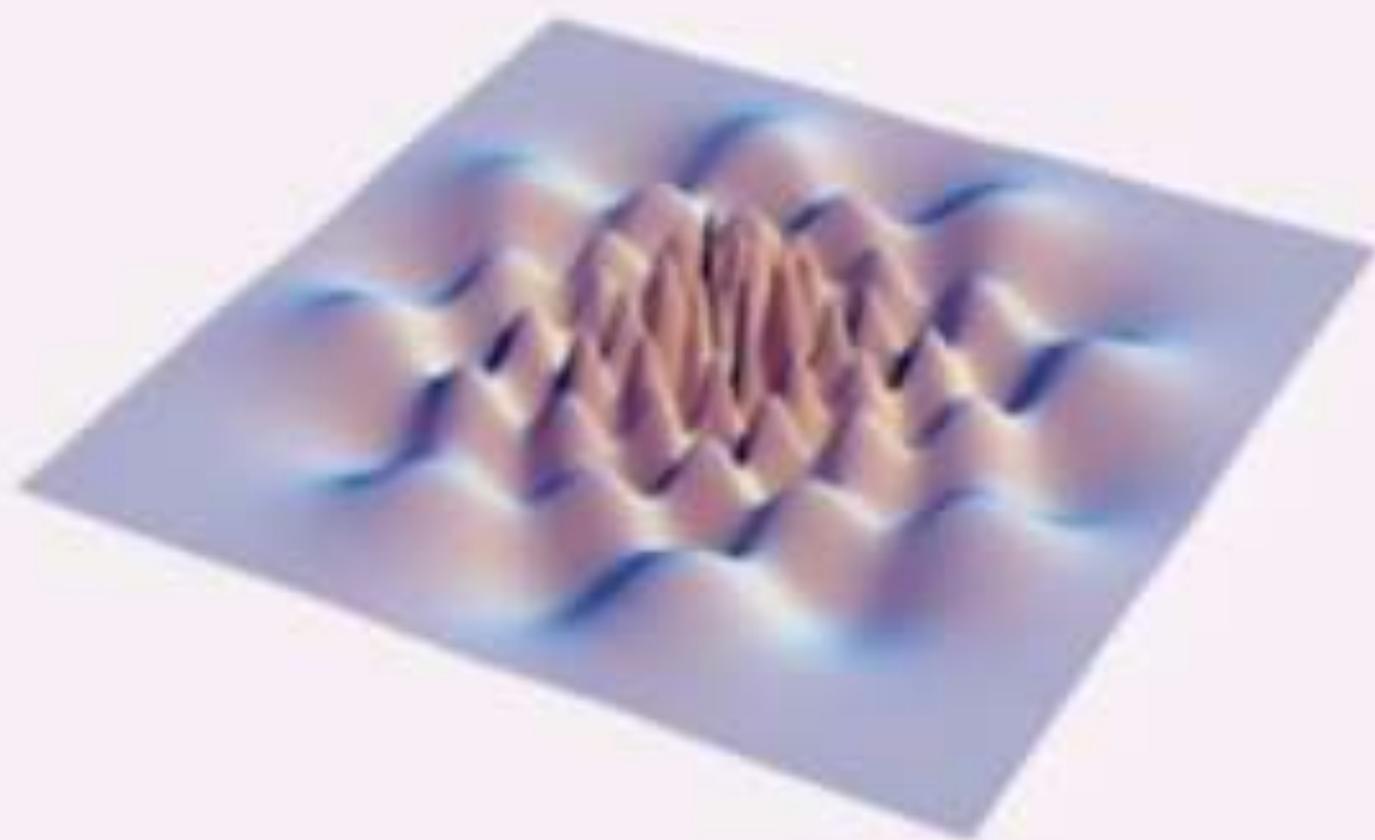
- **Exemple** : Spin - on peut mesurer la rotation d'un électron dans le sens horaire ou antihoraire.
- Dans certaines situations, nous pouvons mesurer l'un ou l'autre avec la même probabilité. Dans ce cas, l'état quantique dira en effet :
- $50\% | \text{sens horaire} \rangle + 50\% | \text{sens anti-horaire} \rangle$ .

# SUPERPOSITION

- **Exemple** : Position : une source de lumière (par exemple une lampe) émet un photon. Vous avez un écran qui va détecter le photon. Où sur l'écran allez-vous le mesurer ?
- Ici, les probabilités sont une distribution lisse sur les points de l'écran.



Particles are described by a *wavefunction*



$\psi(\vec{x})$  is a function that tells us the probability that a particle is at position  $\vec{x}$

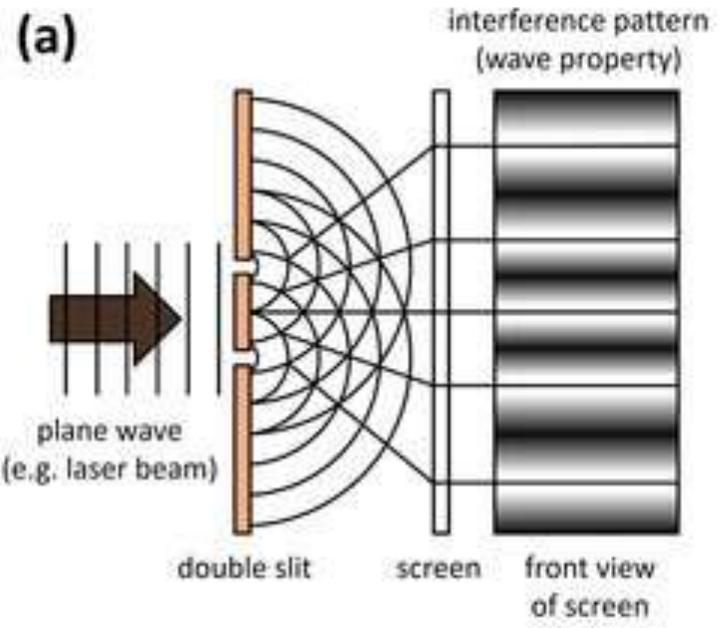
# SUPERPOSITION

- La première chose vraiment bizarre (confirmée expérimentalement, sans réelle explication) :
- il existe des moyens de préparer un système (par exemple, d'électrons ou de photons) de sorte que tout ce que nous pouvons savoir correspond à une distribution probabiliste comme celle-ci.

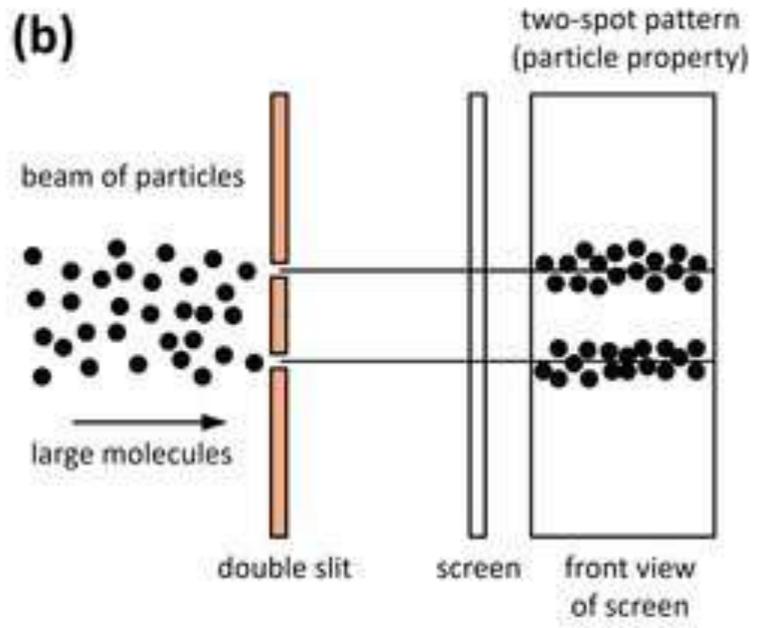
# SUPERPOSITION

- La deuxième chose vraiment bizarre : lorsque des systèmes comme celui-ci évoluent dans le temps, la façon dont leurs probabilités changent donne l'impression que les différentes possibilités interagissent les unes avec les autres...
- (e.g. l'expérience de la double fente)

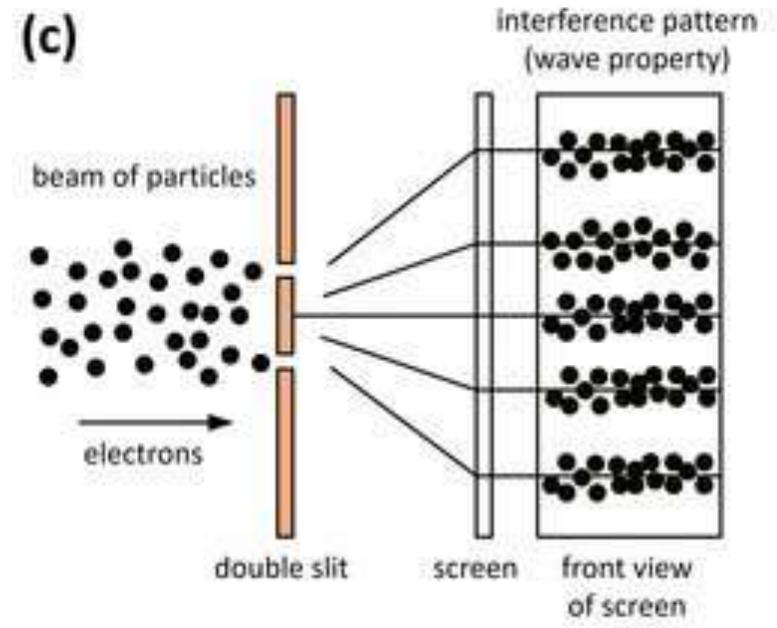
**(a)**



**(b)**



**(c)**



# SUPERPOSITION

- En réalité, l'état quantique donne des amplitudes, pas des probabilités. Les amplitudes sont des nombres complexes  $x + iy$ . Elles ont une phase (une direction dans le plan complexe). Les probabilités sont les nombres réels que l'on obtient en prenant le mod-carré de l'amplitude....  $(x + iy)(x - iy)$
- $\frac{1}{\sqrt{2}} |\text{sens horaire}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{sens anti-horaire}\rangle$ .

# SUPERPOSITION

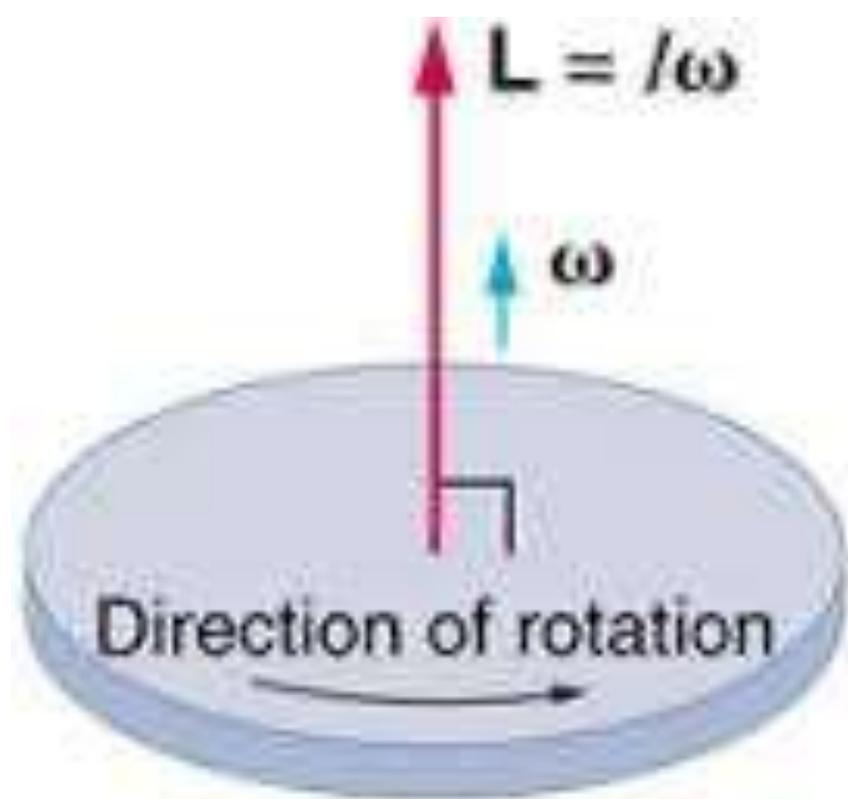
- L'interférence est déterminée par la phase : les termes pointant dans la même direction complexe s'additionnent, les termes pointant dans la direction opposée s'annulent.

# SUPERPOSITION

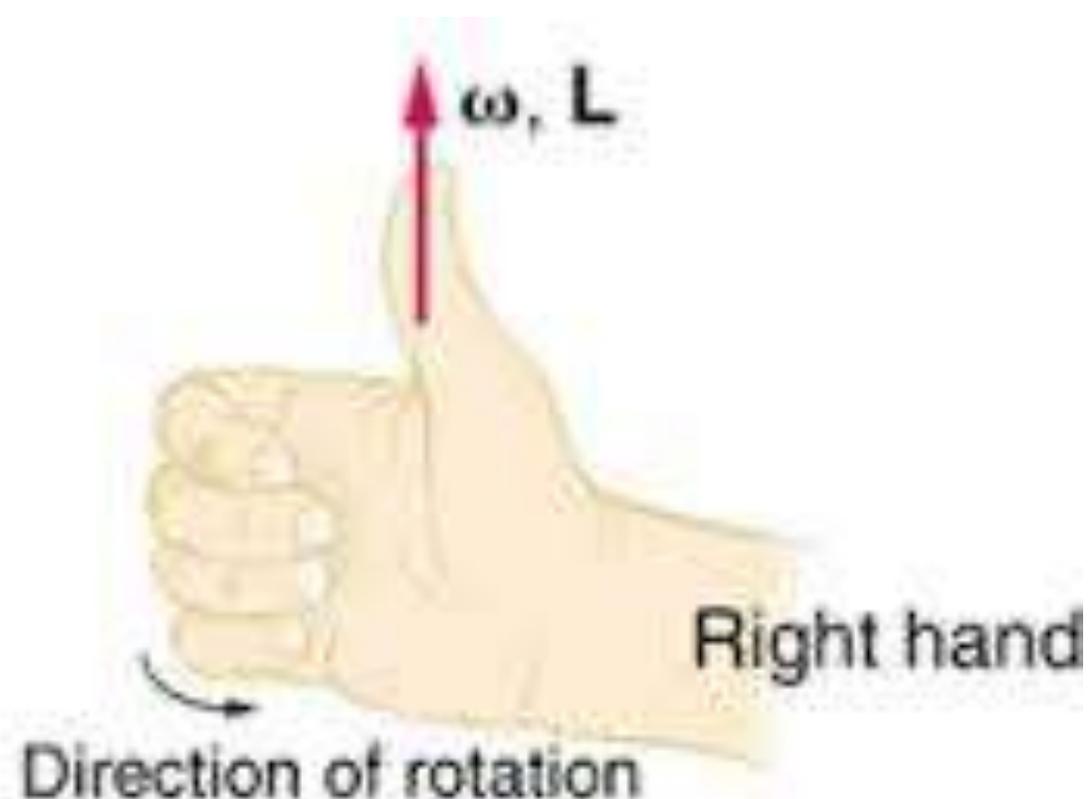
- **La troisième chose vraiment bizarre** : de nombreuses variables (observables) que l'on pourrait croire indépendantes sont en fait dépendantes, et telles que la concentration de la probabilité sur une valeur de  $x$ , répartit la probabilité sur de nombreuses valeurs de  $y$  (incertitude, non-commutativité)..

# SUPERPOSITION

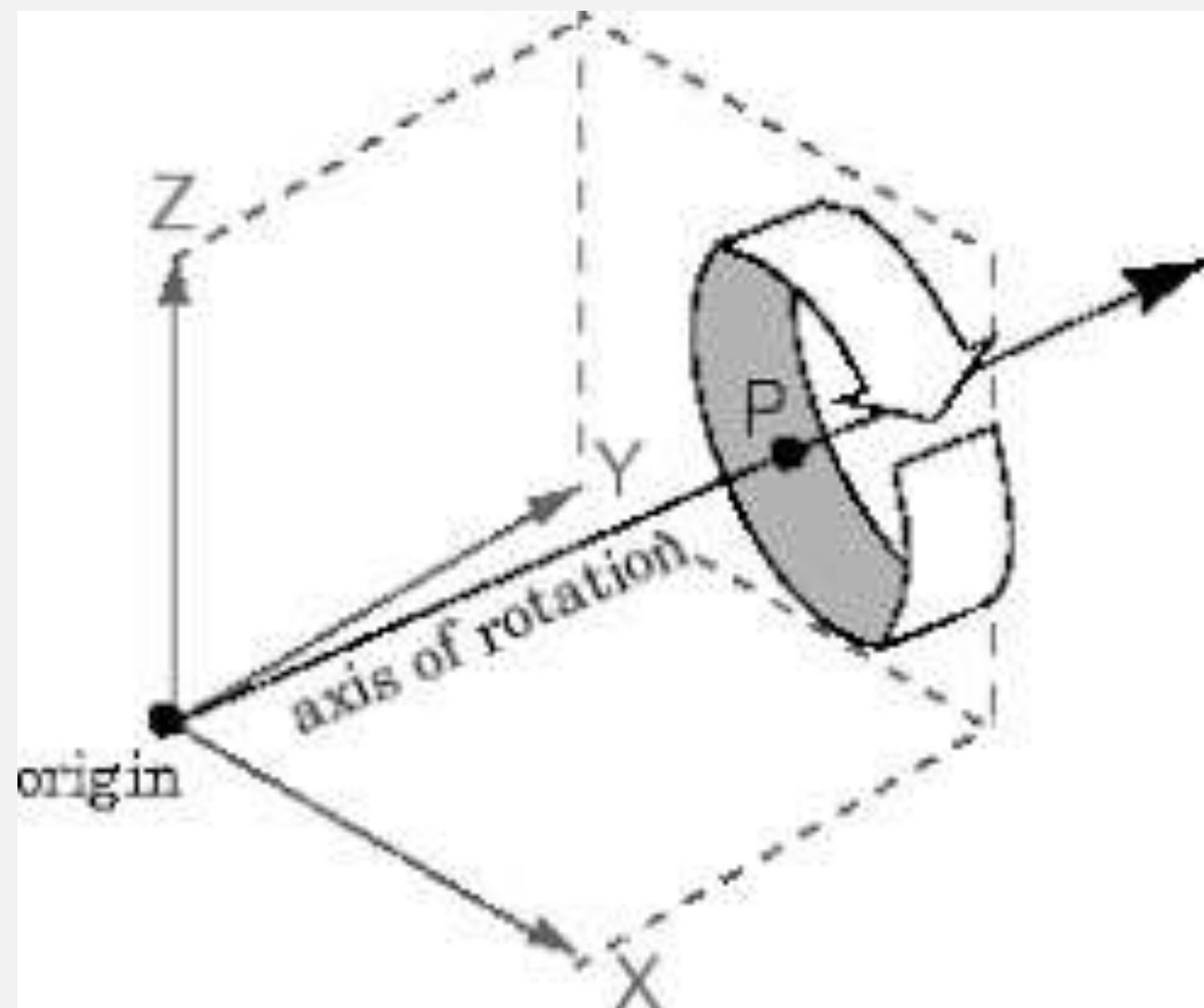
- Par exemple : spin.
- Intuitivement, une particule, comme une balle, peut tourner autour d'un axe quelconque.
- En utilisant la règle de la main droite, nous pouvons représenter une direction de rotation comme un point sur une sphère.



(a)

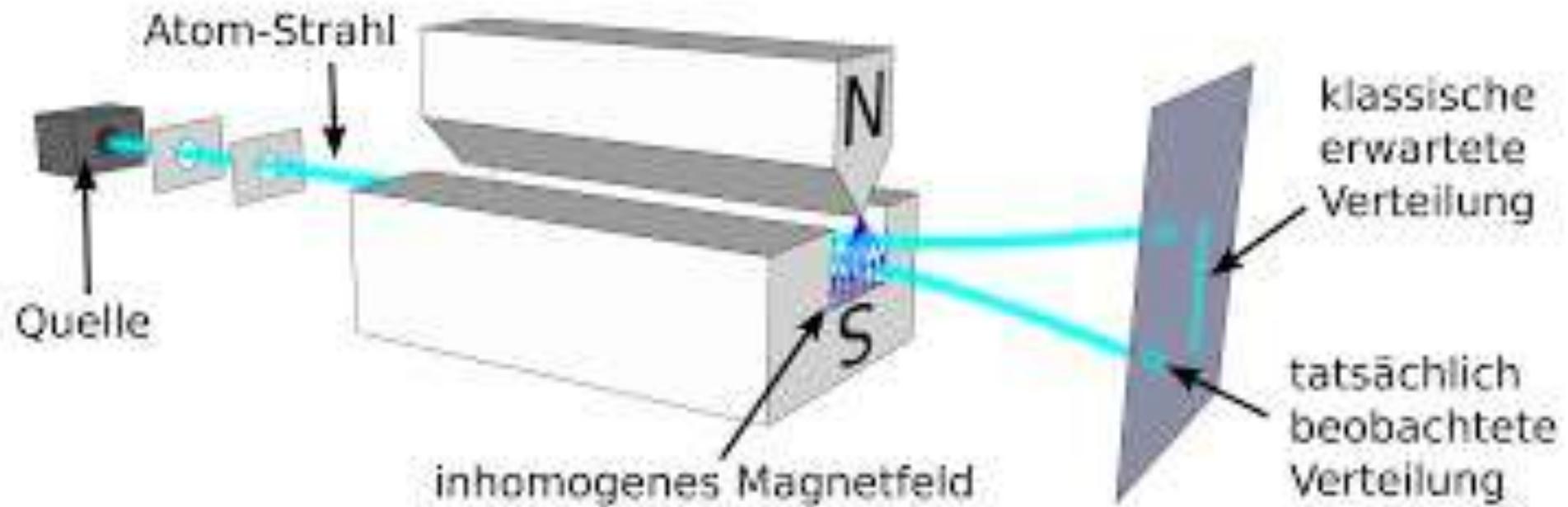


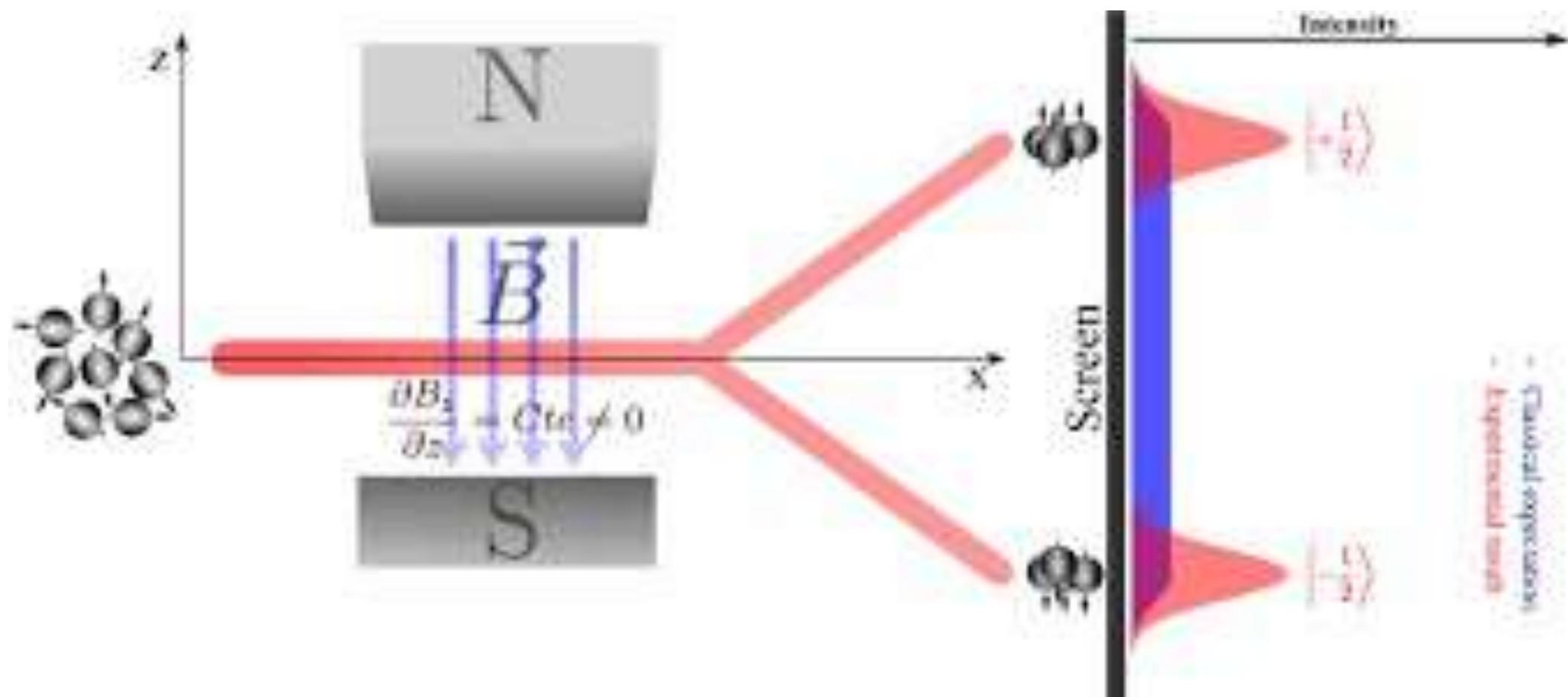
(b)



# SUPERPOSITION

- Donc, on pourrait imaginer que les composantes  $x$ ,  $y$  et  $z$  du spin sont indépendantes.
- Mais il s'avère qu'elles ne le sont pas. Si vous mesurez le spin  $z$  (par exemple, en envoyant une particule à travers un champ magnétique orienté dans la direction  $z$ , puis en observant à quel point elle atterrit vers le haut ou vers le bas), vous ne mesurerez que  $+1$  ou  $-1$ . (e.g., un appareil Stern-Gerlach)



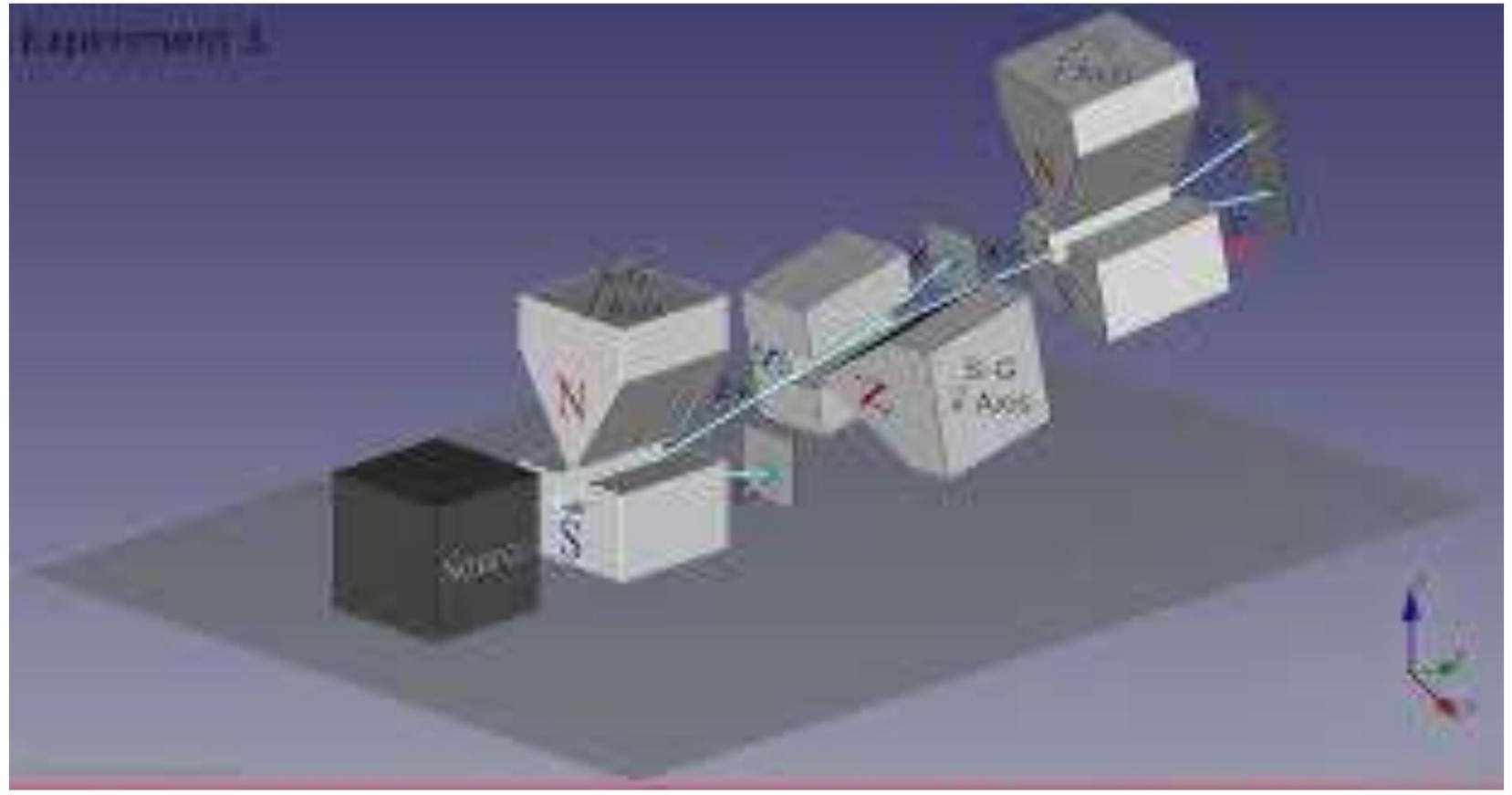


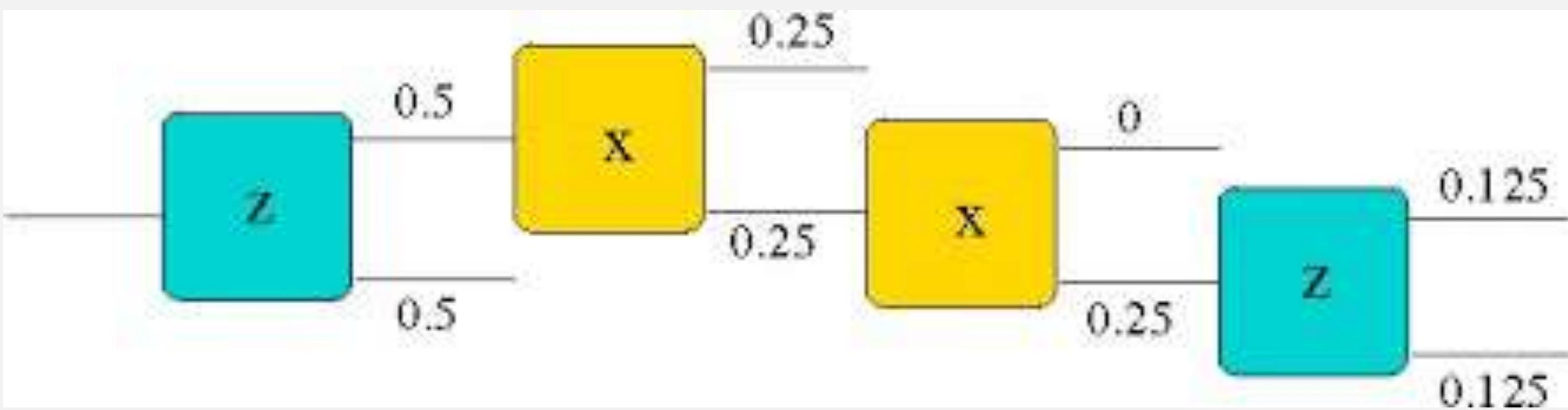
- Classical expectation:  
 - Experimental result

# SUPERPOSITION

- Vous pouvez utiliser un tel dispositif pour obtenir un électron dont vous savez qu'il est  $z = +1$  (spin droit vers le haut).
- Vous pouvez ensuite envoyer cet électron à travers un second dispositif Stern-Gerlach polarisé selon l'axe  $x$ . Si l'électron était "réellement"  $z=+1$ , vous vous attendriez à le voir atterrir à  $x=0$ , et non à  $x=+1$  ou  $x=-1$ . Pourtant, c'est ce qu'il fait !

Experiment 3





# SUPERPOSITION

- En effet, cela signifie que:
- $|z\text{-haut}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |x\text{-gauche}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |x\text{-droit}\rangle$
- (et  $|z\text{-bas}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |x\text{-gauche}\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |x\text{-droit}\rangle$  )

## SUPERPOSITION

- Il s'agit d'une relation d'incertitude : plus vous en savez sur le spin  $z$ , moins vous en savez sur le spin  $x$ . (bien que l'aspect épistémique puisse être secondaire : le fait est que l'état quantique lui-même est construit de telle sorte que l'amplitude ne peut être concentrée sur une valeur  $z$  et une valeur  $x$  (alors que dans un cas classique, elle serait concentrée sur une direction de spin spécifique spécifiée dans les trois dimensions)).

# SUPERPOSITION

- La fameuse incertitude position-momentum est un autre exemple : classiquement, une particule a une masse, une vitesse et une position spécifiques.
- Dans le cas quantique, la quantité de mouvement et la position sont liées de la même manière que le spin x et le spin z.

INTRICATION

# INTRICATION

- ça devient encore plus bizarre. Lorsque des systèmes quantiques interagissent, leurs états quantiques s'enchevêtrent, c'est-à-dire qu'ils peuvent devenir corrélés ou anti-corrélés.
- Par exemple, vous pouvez avoir deux électrons, enchevêtrés de telle sorte qu'ils auront un spin opposé : si l'un est z-haut, l'autre est z-bas - mais de telle sorte que cela peut se produire de deux manières différentes

# INTRICATION

- Notez que cela signifie que pour chaque électron, A et B, leur état quantique individuel peut-être:
  - $\frac{1}{\sqrt{2}} |A_{x\text{-gauche}}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |A_{x\text{-droit}}\rangle$
  - $\frac{1}{\sqrt{2}} |B_{x\text{-gauche}}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |B_{x\text{-droit}}\rangle$

# INTRICATION

- Mais le simple fait d'énoncer ces deux éléments laisse ouverte la possibilité de les mesurer comme x-gauche.
- Pour capturer la corrélation, nous devons considérer leur état quantique comme vivant dans un espace plus complexe d'options, l'espace produit de leurs espaces individuels.

# INTRICATION

- Alors on peut représenter l'état où ils sont anti-corrélés comme :
- $\frac{1}{\sqrt{2}} (|A_{x\text{-gauche}}\rangle |B_{x\text{-droit}}\rangle) + \frac{1}{\sqrt{2}} (|A_{x\text{-droit}}\rangle |B_{x\text{-gauche}}\rangle)$

# INTRICATION

EPR / Bell etc :

--Vous pouvez emmêler une paire de particules de cette façon et les envoyer dans des directions différentes. Disons que l'une va à Ottawa et l'autre à Québec.

--Mesurez celle qui se trouve à Ottawa, et vous changez également l'état quantique de la particule qui se trouve à Québec !

# INTRICATION

Cela semble être en contradiction avec la relativité restreinte

Cependant, il n'y a aucun moyen pour vous de savoir si Ottawa a mesuré en premier sans leur demander plus tard, donc pas d'information sur la vitesse supérieure à la lumière...

# INTRICATION

Il y a quand même un sens dans lequel l'état du système à Québec change à cause de quelque chose qui s'est produit à Ottawa plus vite que la lumière, même si nous ne pouvons pas le savoir. (Non-localité, non-séparabilité)

(c'est la vraie raison pour laquelle Maudlin pense qu'il existe un cadre de référence privilégié. C'est aussi la raison pour laquelle Einstein (le E de EPR) était si opposé à cette conséquence de la théorie...)

# INTRICATION

Un peu de vocabulaire :

Les états quantiques sont généralement représentés par des vecteurs dans un espace de Hilbert. Un espace de Hilbert est une sorte d'espace vectoriel qui peut avoir une infinité de dimensions.

# INTRICATION

On peut considérer que les dimensions de l'espace de Hilbert représentent des façons spécifiques d'observer le système. En général, un état quantique sera un vecteur, c'est-à-dire une combinaison linéaire de vecteurs de base, dans cet espace.

En général, l'espace aura plusieurs bases : par exemple, pour le cas du spin, il y a une base  $x$ , une base  $y$  et une base  $z$ . Pour une particule en mouvement, il y aura une base de position et une base de quantité de mouvement...

# INTRICATION

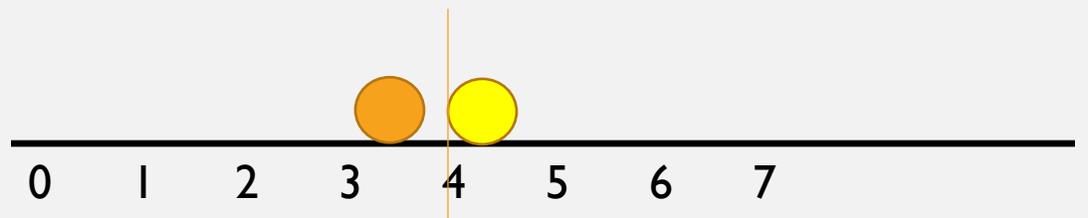
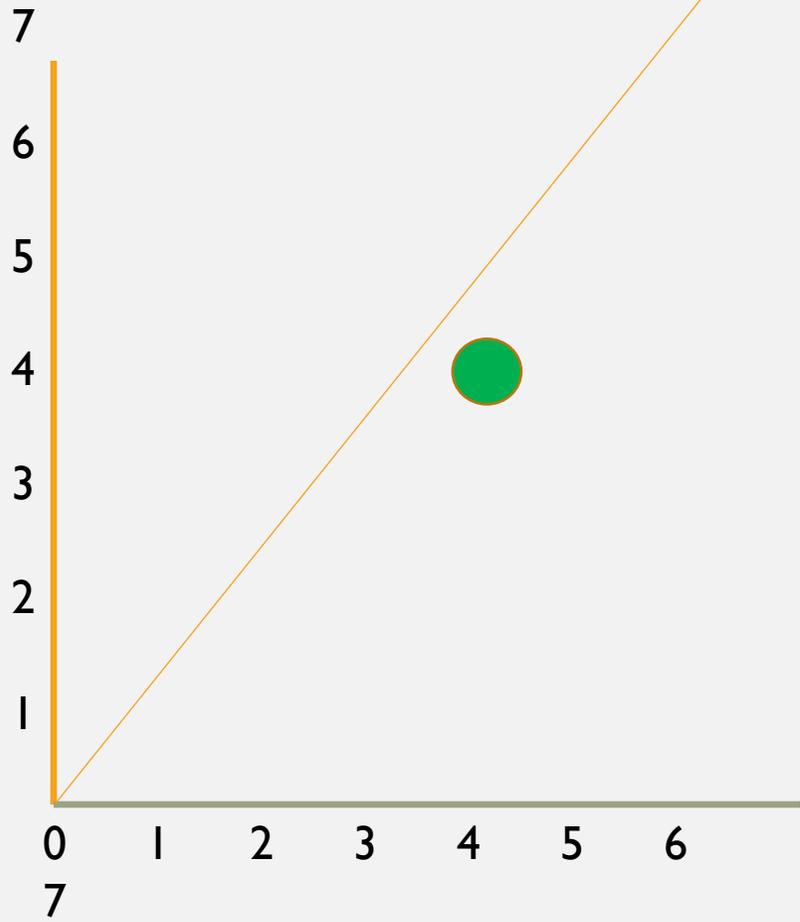
On peut considérer que les dimensions de l'espace de Hilbert représentent des façons spécifiques d'observer le système. En général, un état quantique sera un vecteur, c'est-à-dire une combinaison linéaire de vecteurs de base, dans cet espace.

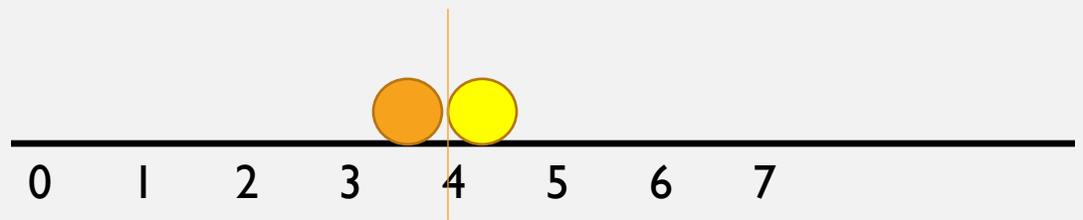
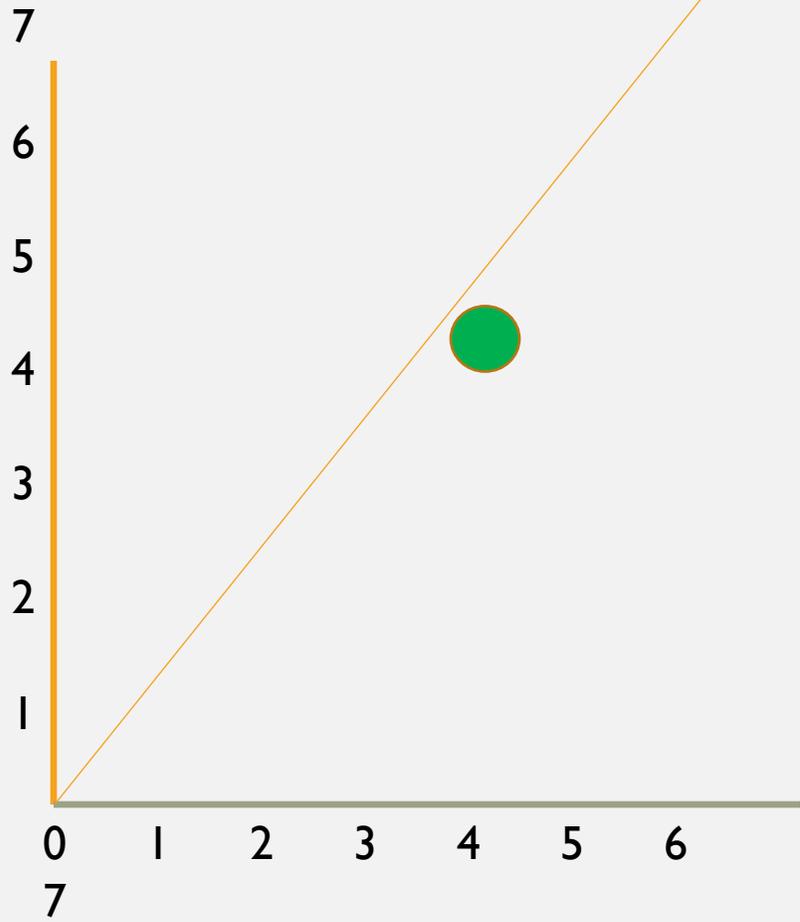
En général, l'espace aura plusieurs bases : par exemple, pour le cas du spin, il y a une base  $x$ , une base  $y$  et une base  $z$ . Pour une particule en mouvement, il y aura une base de position et une base de quantité de mouvement...

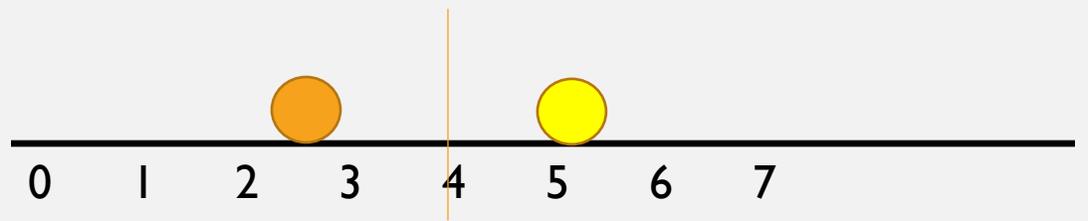
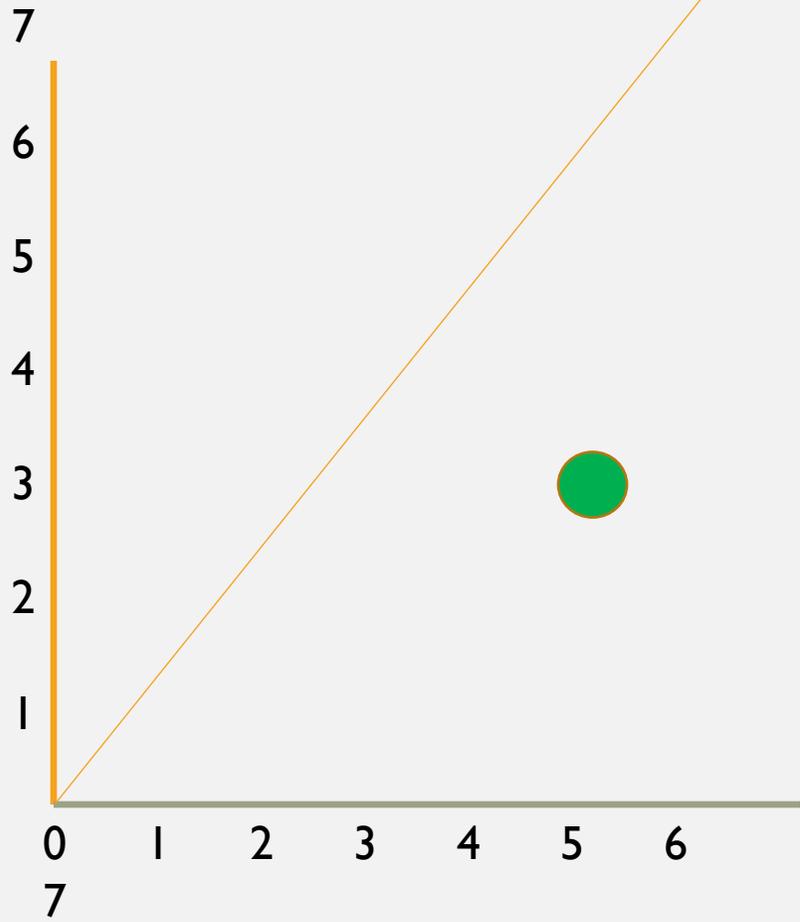
# INTRICATION

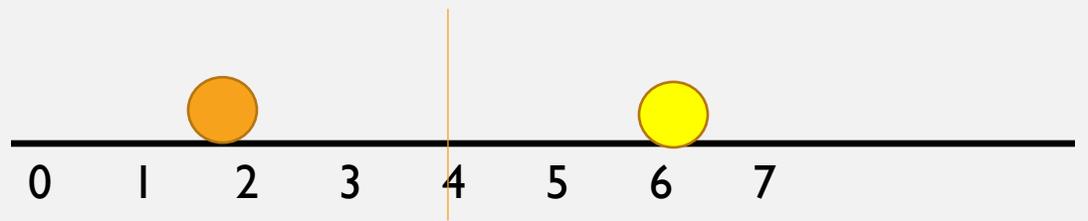
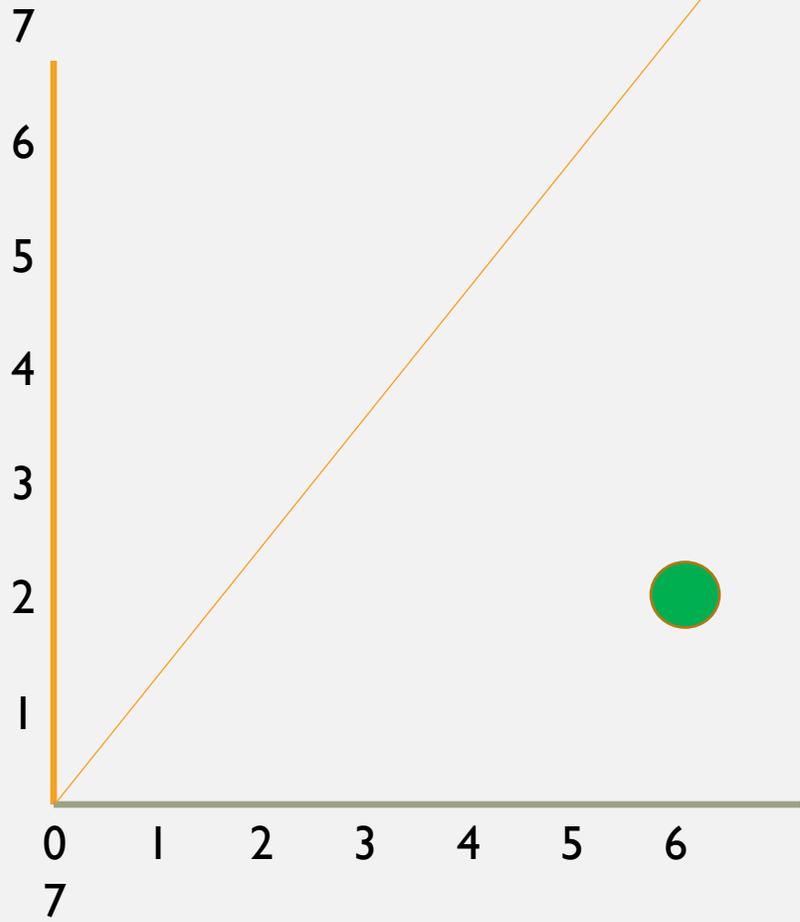
La base de position s'avère équivalente à prendre l'état quantique comme un champ défini sur l'espace de configuration.

(rappelons qu'un point dans l'espace de configuration représente une configuration classique du système)

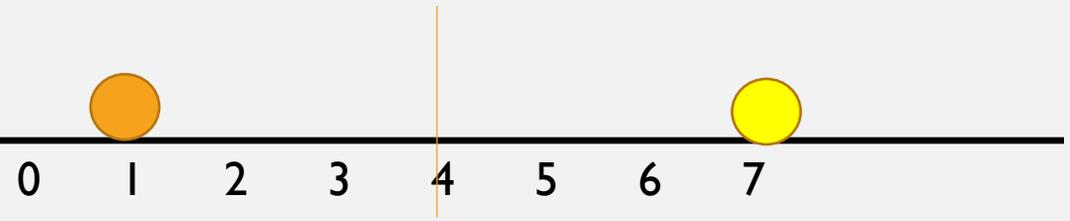
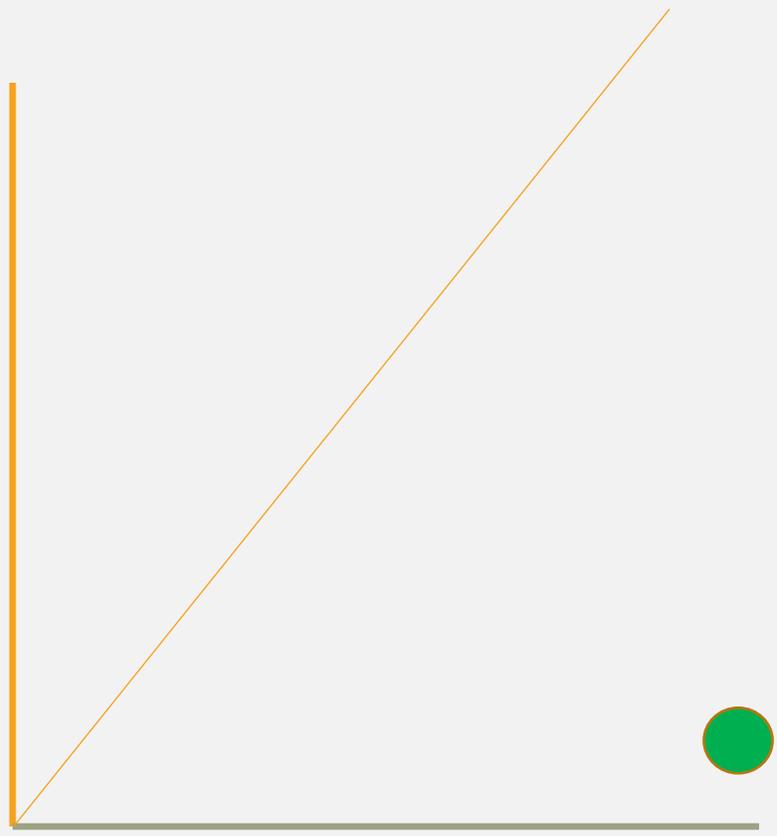


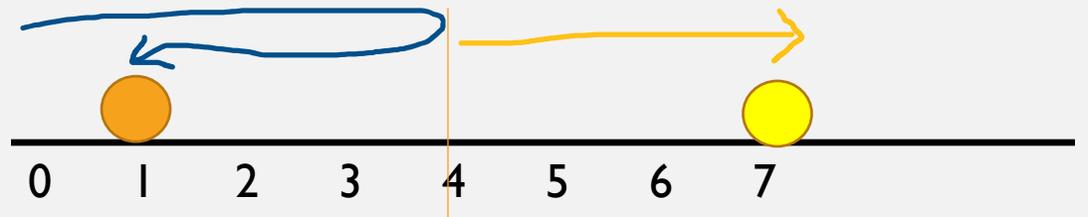
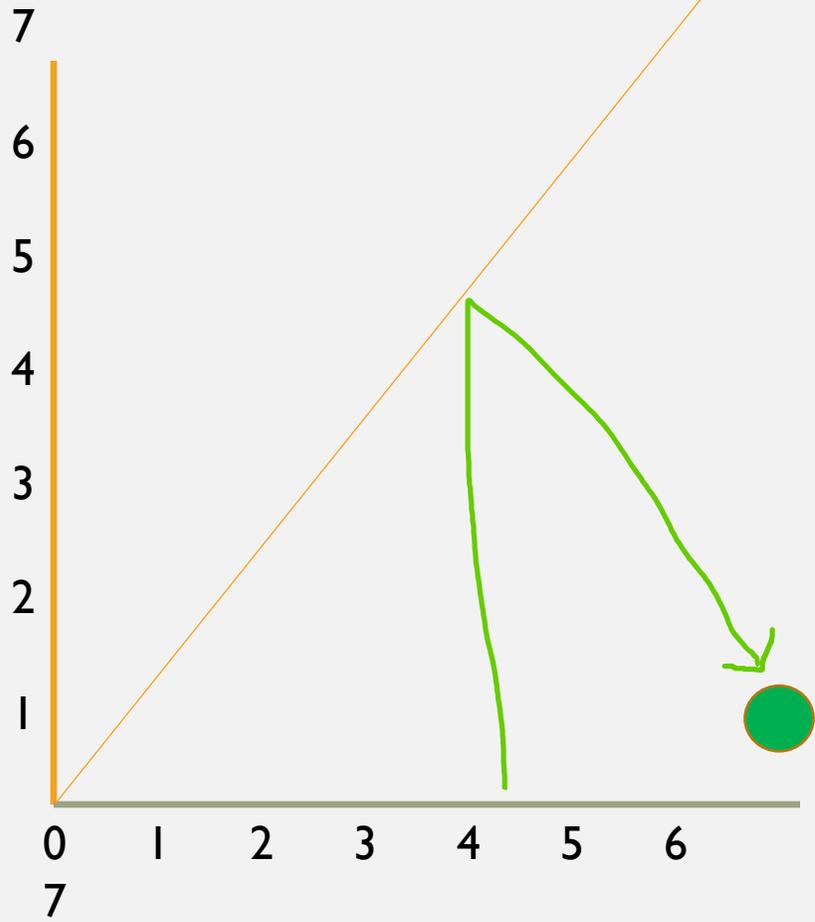






7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0  
7





# LE PROBLÈME DE LA MESURE

## LE PROBLÈME DE LA MESURE

- **A) Il y a plus dans le monde que l'état quantique.**  
(Copenhague, Bohm)
- **B) Il y a plus dans la dynamique que l'équation de Schrodinger** (effondrement)
- **C) La mécanique quantique est complète** (Mondes multiples - Everett)

# COPENHAGUE

- Shut up and calculate
- Problème: *eppur si muove...* (à mon avis, il s'agit au mieux d'une note prometteuse pour dire ce qu'est vraiment la réalité, ou cela revient à quelque chose d'idéaliste / kantien / positiviste...)

## BOHM / VARIABLES CACHÉES

- Faits déterminés concernant au moins quelques observables (variables), par exemple la position.
- Problème: ontologie extravagante; la tension avec la relativité spéciale semble aiguë; toujours impossible de préserver le réalisme de TOUTES les variables qui semblent réelles (on ne peut pas avoir à la fois la position et la quantité de mouvement...)

# EFFONDREMENT

- Effondrement spontané (GRW) : probabilité d'un effondrement automatique ou spontané, par le système lui-même, qui croît avec la taille du système.
- Problème: tails (les queues)
- Effondrement déclenché (Conscience ?): Quelque chose d'autre, extérieur au système, par exemple un mesureur conscient, lui fait quelque chose qui provoque son effondrement.
- Problème: ontologie extravagante

## EVERETT / MONDES MULTIPLES

- **Structure supplémentaire** (copies de mondes, copies des esprits,...définies indépendamment, avec une mesure stipulée pour correspondre à la règle de Born)
- **Décohérence** (pas de structure supplémentaire, la ramification n'est pas fondamentale, c'est juste une façon que nous avons de dessiner des motifs dans la fonction d'onde... mais la structure de décohérence aide...).

# DÉCOHERENCE?

- Rappelons que l'interférence quantique dépend de la phase ; les termes peuvent s'additionner ou s'annuler.
- Les interactions avec d'autres particules (extérieures au système) perturbent suffisamment les phases des éléments pour que les effets d'interférence s'annulent, plus ou moins, en moyenne.

# DÉCOHERENCE?

- Il ne s'agit pas d'un effondrement : vous avez toujours de nombreuses possibilités différentes, mais elles n'interfèrent pas les unes avec les autres.
- L'effet sera spécifique à une base, par exemple la position.

# LE PROBLÈME DES PROBABILITÉS

- Pourquoi s'intéresser au poids des branches quantiques ?  
Pourquoi avoir des attentes en fonction de celui-ci ?
- (Imaginez que vous appreniez que vous allez "fissionner" en trois exemplaires (pensez au voyage dans le temps)).



## LE PROBLÈME DES PROBABILITÉS

- Devriez-vous vous préoccuper de l'une plus que de l'autre ? Devriez-vous essayer de bien faire pour le plus grand nombre possible d'entre elles ?
- Et s'il y avait une quantité supplémentaire mystérieuse, le "poids", et que certains de vos nouveaux "moi" pesaient plus que d'autres ? Cela devrait-il affecter l'importance que vous leur accordez ?

# LE PROBLÈME DES PROBABILITÉS

- L'argument de Deutsch:
- La différence est que le "nombre" de nouveaux "moi" n'est pas un invariant de la théorie...

## LE PROBLÈME DES PROBABILITÉS

- Si nous avons intégré une structure mondiale supplémentaire, par exemple, nous pourrions imaginer que leur "mesure" soit différente du poids de leur branche. Le comptage par branche serait alors une alternative cohérente.

## LE PROBLÈME DES PROBABILITÉS

- Mais dans l'approche "seulement la décohérence", il n'y a aucune autre mesure invariante:
- Rappelez-vous l'équivalence:
- $|z\text{-haut}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |x\text{-gauche}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |x\text{-droit}\rangle$

## LE PROBLÈME DES PROBABILITÉS

- La vraie question est de savoir si la décohérence ne privilégie pas finalement une base
- Elle ne le fera pas dans le cas du spin. *Dans le cas de la position, je ne vois pas très bien pourquoi... (mais je ne suis pas un expert).*

## LE PROBLÈME DES PROBABILITÉS

- La vraie question est de savoir si la décohérence ne privilégie pas finalement une base
- Elle ne le fera pas dans le cas du spin. *Dans le cas de la position, je ne vois pas très bien pourquoi... (mais je ne suis pas un expert).*