

# Superposition

Christian Wüthrich

<http://www.wuthrich.net/>

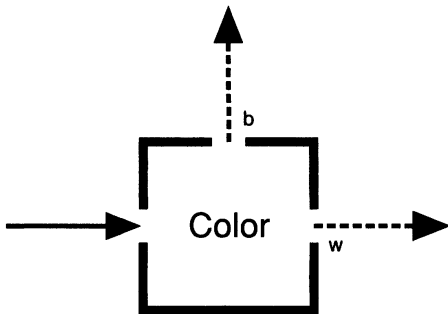
**BA7 Introduction à la philosophie de la physique: mécanique quantique**

Remerciements pour la traduction et des commentaires: Augustin Baas

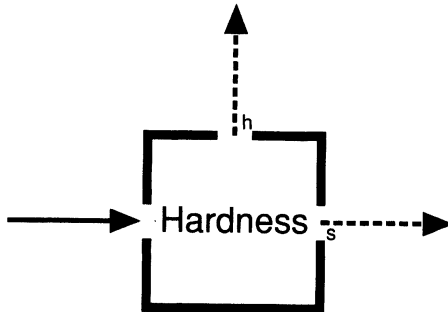
## Superposition quantique: poser le cadre

David Z Albert, *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press (1992), Ch. 1.

- Electrons avec deux propriétés: «couleur» (noir, blanc) et «dureté» (mou, dur).
- **Boîte de couleur**: appareil de mesure avec trois ouvertures tel que les électrons entrant ressortent suivant leur couleur.



- **Boîte de dureté**: appareil similaire à la boîte de couleur, les électrons étant ici triés suivant leur dureté.



- Mesures **répétables**: si à l'issue d'une mesure, un électron est envoyé dans une boîte de même type que celui de laquelle il sort, sans trafiquage, alors on l'observera sortir par la même ouverture.

- Question: est-ce que les propriétés sont reliées, i.e. a-t-on des corrélations entre les valeurs de dureté et de couleur des électrons?
- ⇒ combiner les boîtes pour mesurer les corrélations.
- Exactement la moitié des électrons sortant par une des ouvertures de la première boîte sortent par chacune des ouvertures de la seconde boîte.
- ⇒ pas de corrélations, la couleur (dureté) des électrons ne dit rien sur leur dureté (couleur)

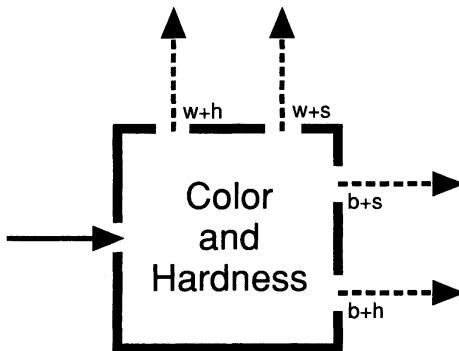
## Expérience à trois boîtes

- Supposons trois boîtes alignées pour des mesures successives, telles que la première et la troisième boîtes sont du même type, mais d'un type différent de la seconde.
  - Pas de trafiquage des électrons entre les boîtes.
  - Un électron entrant dans la troisième boîte est supposé avoir une paire particulière de propriétés de couleur et de dureté (par exemple blanc et mou).
- ⇒ Il semble que nous puissions prédire le résultat de la troisième mesure.
- Il se trouve que nous ne le pouvons pas: exactement la moitié des électrons vont sortir par chacune de deux ouvertures de la troisième boîte.
  - Apparemment, **la boîte du milieu modifie quelque chose (trafiquage)**. En effet, elle semble responsable d'une modification de leurs propriétés pour la moitié des électrons, puisque l'on sait que deux boîtes identiques à la suite ne se comportent pas de la même manière.

- Peut-on fabriquer des boîtes de façon moins grossière? Des mesures intermédiaires pourraient-elles faire éviter le problème que l'on vient d'exposer? Non, on ne peut pas même «écarter les statistiques de [...] perturbation d'un millionième de pourcent du 50-50» (5f). Autrement dit, chaque appareil qui trie à partir de la dureté (de la couleur) randomise la couleur (la dureté).
- Qu'est ce qui détermine précisément **quels** électrons vont avoir leurs propriétés modifiées par la seconde boîte et quels sont ceux qui conserveront les mêmes propriétés? Regardons les corrélations entre les propriétés mesurables des électrons entrant et le résultat final de leurs mesures. Il n'y a absolument aucune corrélation...  $\Rightarrow$  On ne trouve pas de réponse à la question.

## Boîtes de couleur et de dureté

- Boîtes avec cinq ouvertures, incluant une ouverture pour chacune des paires possibles de propriétés mesurées.



- Une telle boîte devrait être composée d'une boîte de couleur et d'une boîte de dureté.
- ⇒ Problème: le deuxième appareil de mesure doit randomiser les électrons par rapport à la première mesure.
- Albert: «Donc la tâche qui consiste à nous mettre dans la position de dire "la couleur de cet électron est maintenant telle et telle et la dureté de cet électron est maintenant telle et telle" semble être fondamentalement au-delà de nos capacités.» (7)
- ⇒ exemple d'une «**principe d'incertitude**» (7), puisque une des deux propriétés incompatibles modifie la mesure de l'autre.



# Expérience de Stern-Gerlach

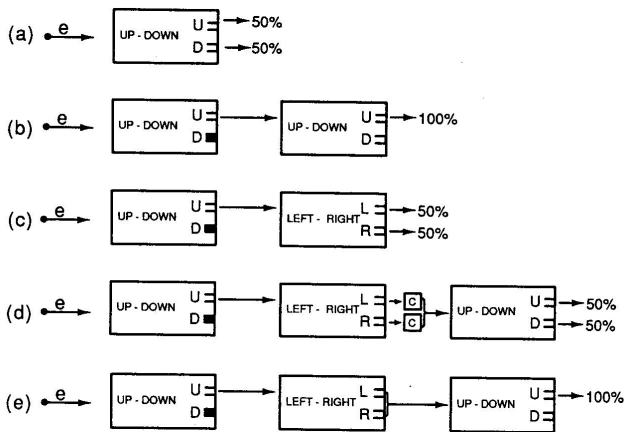
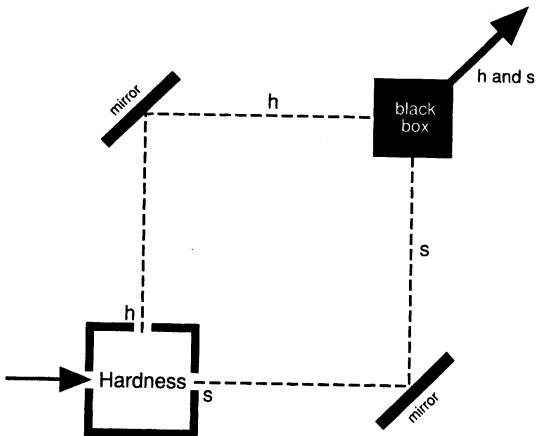


Figure: Expérience de Stern-Gerlach avec «mixture» (d) et «superposition» (e) (Sklar, Fig. 4.4)

## Expérience à deux chemins

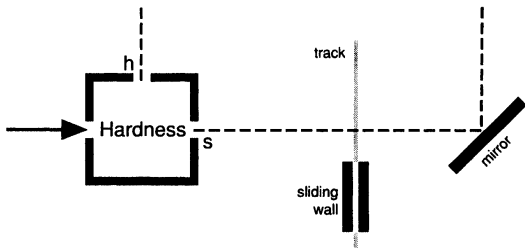
- Considérons un appareil plus compliqué comme dans la figure 1.4 dans le texte d'Albert (c'est un «interféromètre de Mach-Zehnder»):



## Expérience à deux chemins

- Supposons que des électrons (mesurés) blancs sont envoyés dans l'appareil et que nous mesurons leur dureté en *h and s*. Prédiction: on trouve une moitié des électrons dur et l'autre moitié mou. Et c'est ce que nous trouvons.
- Supposons que des électrons durs sont envoyés dans l'appareil et que l'on mesure leur couleur en *h and s*. Prédiction: on trouve une moitié des électrons blanc et l'autre moitié noir. Et c'est ce que nous trouvons.
- Supposons que nous envoyons des électrons blancs dans l'appareil et mesurons leur couleur en *h and s*. Prédiction: la moitié devrait être blanc et l'autre noir. Mais ce n'est pas du tout ce que nous trouvons: tous les électrons sont mesurés blancs!

- Ajoutons une paroi amovible comme sur la figure suivante (Fig. 1.5):



- Que se passe-t-il si on déplace la paroi?
- Prédiction: le nombre total d'électrons sortant chute de 50%, étant donné que tous les électrons viennent d'être mesurés blanc, ils devraient tous l'être encore, n'est-ce pas?
- Mais ils ne le sont pas: seule la moitié des électrons sont blancs maintenant, l'autre est noire.

## Les chemins des électrons: la superposition

Quel chemin emprunte un électron quand la paroi est retirée?

- Peut-il avoir pris  $h$ ? Apparemment non, puisque l'on sait que ces électrons ont une couleur au hasard.
- Peut-il avoir pris  $s$ ? Non, pour la même raison.
- Peut-il d'une certaine façon avoir emprunté **les deux chemins à la fois**? Apparemment non, puisque quelque soit l'instant auquel on interrompt la mesure et l'on regarde pour voir où l'électron se trouve, nous le trouvons soit en  $h$  soit en  $s$ .
- Peut-il n'avoir pris **aucun des chemins**? Non, puisque si on obstrue les deux chemins, rien ne passe.

## Dans les mots de David Albert:



*Les électrons qui traversent cet appareil n'empruntent pas le chemin  $h$  et n'empruntent pas le chemin  $s$  et n'empruntent pas les deux chemins à la fois et n'empruntent pas aucun de ces chemins; et le problème est que ces quatre possibilités épuisent simplement l'ensemble des possibilités logiques envisageables.... La dénomination de ce nouveau mode (qui est simplement un nom pour quelque chose que nous ne comprenons pas) est **la superposition**. (11)*

## Électrons dans une superposition d'états

Nous pouvons écrire la superposition des états de la manière suivante (pour référence ultérieure):

$$\begin{aligned} |\text{black}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{hard}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{soft}\rangle, \\ |\text{white}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{hard}\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{soft}\rangle, \\ |\text{hard}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{black}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{white}\rangle, \\ |\text{soft}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{black}\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{white}\rangle. \end{aligned}$$

## Expérience de fentes doubles

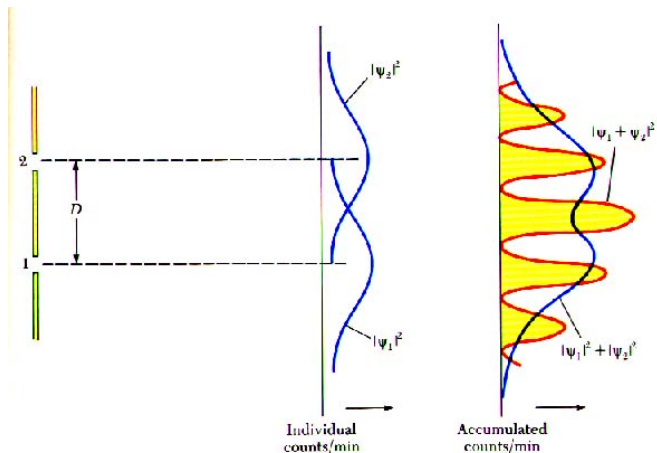


Figure: Figure d'interférence observée dans une expérience de fentes doubles.