PEUT-ON COMPRENDRE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

Jean BRICMONT

COLLOQUE DE PHYSIQUE,
30 NOVEMBRE 2011

Premier cours :
La mécanique quantique pose-t-elle un problème ?

Il n'existe pas des choses qui sont "des choses". Les objets sont fantomatiques, sans propriétés définies (telles que position ou masse) avant d'être *mesurées*. Avant cela, les propriétés sont dans une pénombre appelée "superposition".

Toutes les particules sont des ondes et les ondes des particules, qui apparaissent sous l'une ou l'autre forme, en fonction du type de *mesure* qui est faite.

Une particule qui se déplace entre deux points parcourt tous les chemins possibles simultanément.

Des particules qui se trouvent à des millions de kilomètres de distance peuvent agir l'une sur l'autre instantanément.

The Economist, 7 janvier 1989 ; *The queerness of quanta.*

Nous ne pouvons plus parler du comportement de la particule indépendamment du processus *d'observation*. En conséquence de quoi, les lois naturelles formulées mathématiquement dans la théorie quantique ne traitent plus des particules élémentaires elles-mêmes, mais de notre *connaissance* à leur sujet. De même, il n'est plus possible de se demander si ces particules existent objectivement dans l'espace et le temps...

W. HEISENBERG

Aucun phénomène élémentaire n'est un phénomène avant qu'il ne soit un phénomène *observé*.

J. A. WHEELER

Lors d'une mesure de la position d'un électron, celui-ci “est forcé à prendre une décision. Nous l'obligeons à prendre une position bien définie; avant cela, il n'était ni ici ni là ; il n'avait pas encore pris de décision concernant sa position. ... Si, dans une autre expérience, la vitesse de l'électron est mesurée, cela signifie : l'électron est forcé à se décider à prendre une valeur définie de sa vitesse”.

P. JORDAN

Vous voyez, la description de la mécanique quantique se fait en terme de *connaissance*. Et la connaissance nécessite quelqu'un qui connaît.

R. PEIERLS

La thèse “la lumière consiste de particules” et l'antithèse “la lumière consiste d'ondes” se sont combattues jusqu'à ce qu'elles se soient unies dans la synthèse de la mécanique quantique ... Mais l'idée de la complémentarité va plus loin. En fait, cette thèse et cette antithèse [libéralisme et communisme] représentent deux mobiles psychologiques et deux forces économiques, toutes deux justifiées en elles-même, mais, poussées à l'extrême, mutuellement exclusives. (...) Il doit exister une relation entre le niveau de liberté Δf et de régulation Δr du type $\Delta f \cdot \Delta r = p$. (...) Mais quelle est la “constante politique” p ? Je dois laisser cela à une théorie quantique future des affaires humaines.

M. BORN

Peut-être que tout cela, ce sont de vieilles histoires, éliminées ou clarifiées par le développement de la physique. Mais un physicien contemporain écrit :

"La doctrine selon laquelle le monde est fait d'objets dont l'existence est indépendante de la *conscience* humaine se trouve être en conflit avec la mécanique quantique et avec des faits établis expérimentalement".

Ainsi que :

"On peut démontrer que la lune n'est pas là quand personne ne la *regarde*".

D. MERMIN

Et on lit dans *Nature* en 2005 :

"Quel est le message du quantum ? ... Je suggère que la distinction entre la réalité et notre *connaissance* de la réalité, entre réalité et *information*, ne peut pas être faite".

A. ZEILINGER

On peut être capable d'avoir une attitude réaliste par rapport au monde, de parler du monde comme s'il était réellement là, même si on ne l'observe pas. Je crois certainement en un monde qui était là avant moi, et qui sera là après moi et je crois que vous en faites partie ! Et je crois que la plupart des physiciens prennent ce point de vue quand ils sont coincés par des philosophes.

J.S. BELL

La philosophie tranquillisante de Heisenberg et Bohr – ou est-ce une religion ? – est si habilement échafaudée qu'elle permet aux vrais croyants de se reposer sur un oreiller si doux qu'il n'est pas facile de les réveiller.

A. EINSTEIN à E. SCHRÖDINGER (lettre)

Tu sais que je t'aime bien et rien ne peut changer cela. Mais je dois te passer un savon. Aussi, ne bouge pas. L'impudence avec laquelle tu affirmes de façon répétée que l'interprétation de Copenhague est pratiquement universellement acceptée, que tu l'affirmes sans hésitation, même devant un public de non-experts, qui est complètement à ta merci, est à la limite de l'acceptable. . . . N'as tu aucune inquiétude concernant le verdict de l'histoire ? Es-tu tellement convaincu que l'humanité entière va succomber sous peu à votre folie ?

E. SCHRÖDINGER à M. BORN (lettre)

Premier mystère : la superposition

SPIN

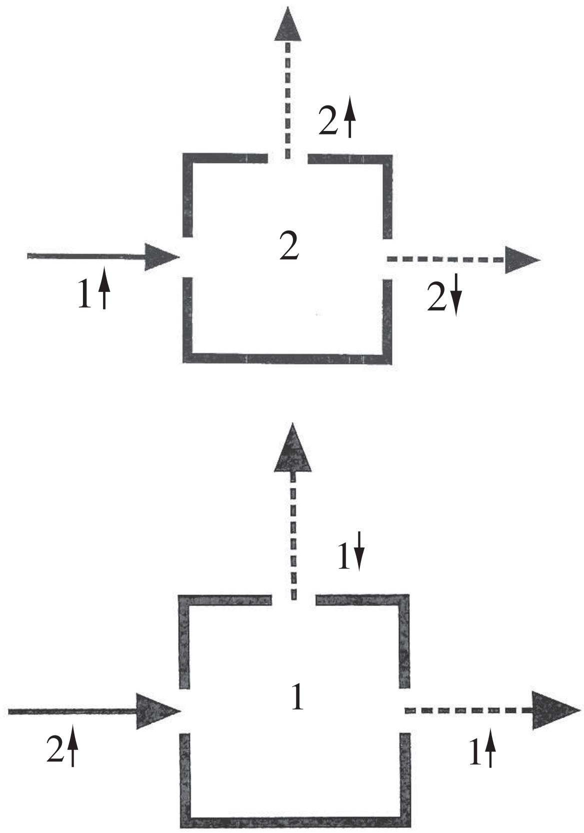
Propriétés : prend deux valeurs

up et down $\uparrow$ et $\downarrow$

deux directions 1 et 2

$1\uparrow$ $1\downarrow$ $2\uparrow$ $2\downarrow$

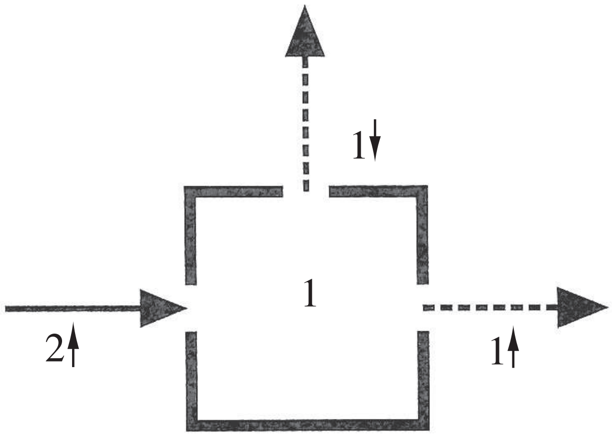
Appareils "mesurant" le spin dans les directions 1 ou 2

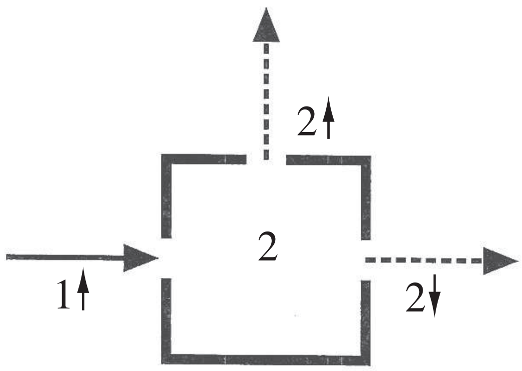


$$
\begin{array}{lll}
1\uparrow & \longrightarrow & \text{on mesure le spin dans la direction 2} \\
 & \longrightarrow & \text{moitié } \uparrow\text{, moitié } \downarrow \\
1\downarrow & \longrightarrow & \text{idem} \\
2\uparrow & \longrightarrow & \text{on mesure le spin dans la direction 1} \\
 & \longrightarrow & \text{moitié } \uparrow\text{, moitié } \downarrow \\
2\downarrow & \longrightarrow & \text{idem}
\end{array}
$$

Deux boîtes :

Direction 1 $\underset{\uparrow}{\longrightarrow}$ Direction 2





$$2\uparrow \quad \longrightarrow \quad 50\ \%\ 1\uparrow \quad 50\ \%\ 1\downarrow$$

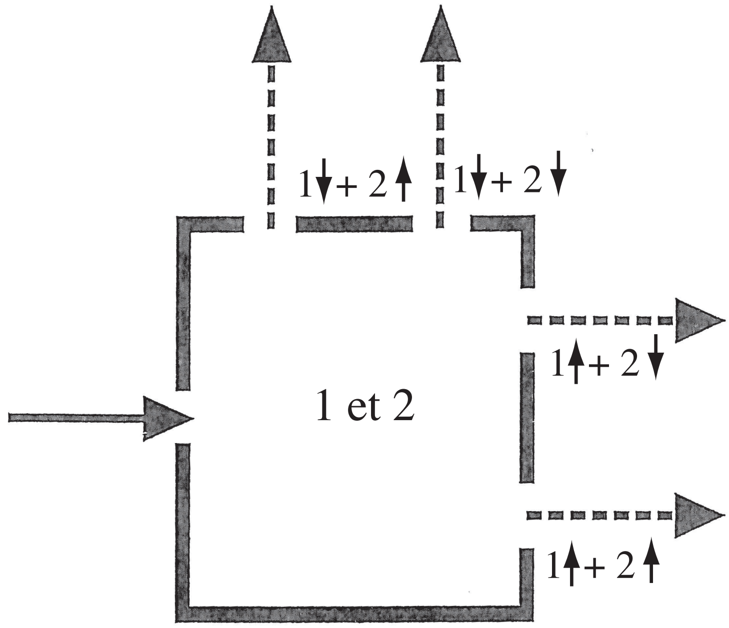
Considérons les $1\uparrow$. A la fois $2\uparrow$ *et* $1\uparrow$?

On mesure la direction 2 *après* avoir mesuré la direction 1.

$$50\ \%\ 2\uparrow \quad 50\ \%\ 2\downarrow\ !$$

idem si on met

direction 2 $\longrightarrow$ direction 1



impossible à construire :

deux boîtes successives, qui mesurent le

spin dans la direction 1 puis 2

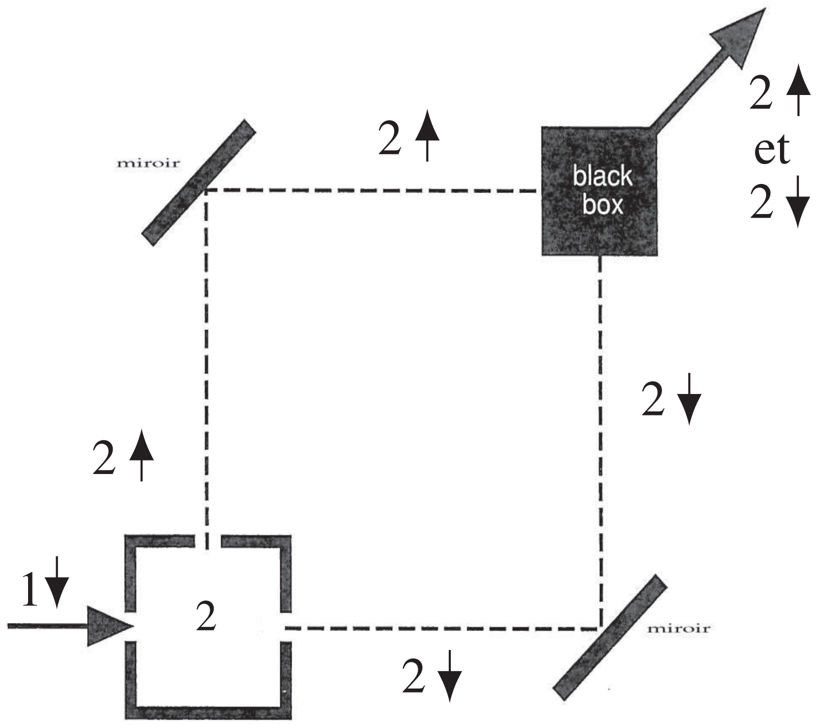
rendent le spin dans la direction 1

indéterminé.

Exemple de *complémentarité* (Bohr) ou

de relation d'indétermination ou d'incertitude

d'Heisenberg.



2 chemins, l'un pour les 2 $\uparrow$,

l'autre pour les 2 $\downarrow$

2 $\uparrow$ au départ :

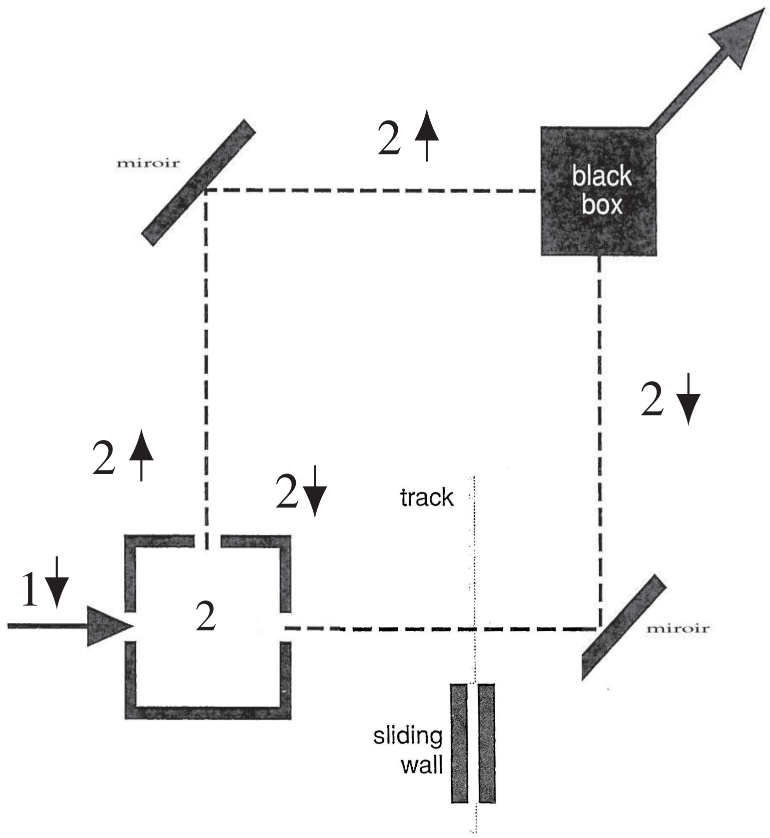
100 % un chemin ($\uparrow$)

après la Black box : 50 % 1 $\uparrow$, 50 % 1 $\downarrow$

2 $\downarrow$ au départ idem

1 $\downarrow$ au départ	$\longrightarrow$	50 %	un chemin (2 $\uparrow$)
		50 %	l'autre chemin (2 $\downarrow$)

Après la Black box, 100 % 1 $\downarrow$



1. 50 % de particules en moins.
2. après Black box :

sans l'obstacle :

100 % de ceux qui prennent le chemin 2 $\uparrow$ sont 1 $\downarrow$.

Idem pour le chemin 2 $\downarrow$.

Si on bloque le chemin 2 $\downarrow$, cela ne peut pas affecter les particules qui prennent le chemin 2 $\uparrow$.

Donc, 100 % 1 $\downarrow$ (dans les 50 % qui restent) ?

NON : 50 % 1 $\downarrow$ 50 % 1 $\uparrow$! On agit d'une certaine façon sur les particules qui prennent un chemin en bloquant le chemin *qu'elles ne prennent PAS !*

Impasse :

Expérience sans obstacle :

Que fait la particule ?

— Suit-elle le chemin 2 $\uparrow$? Non parce que sinon

50 % 1 $\uparrow$ 50 % 1 $\downarrow$ à la Black box.

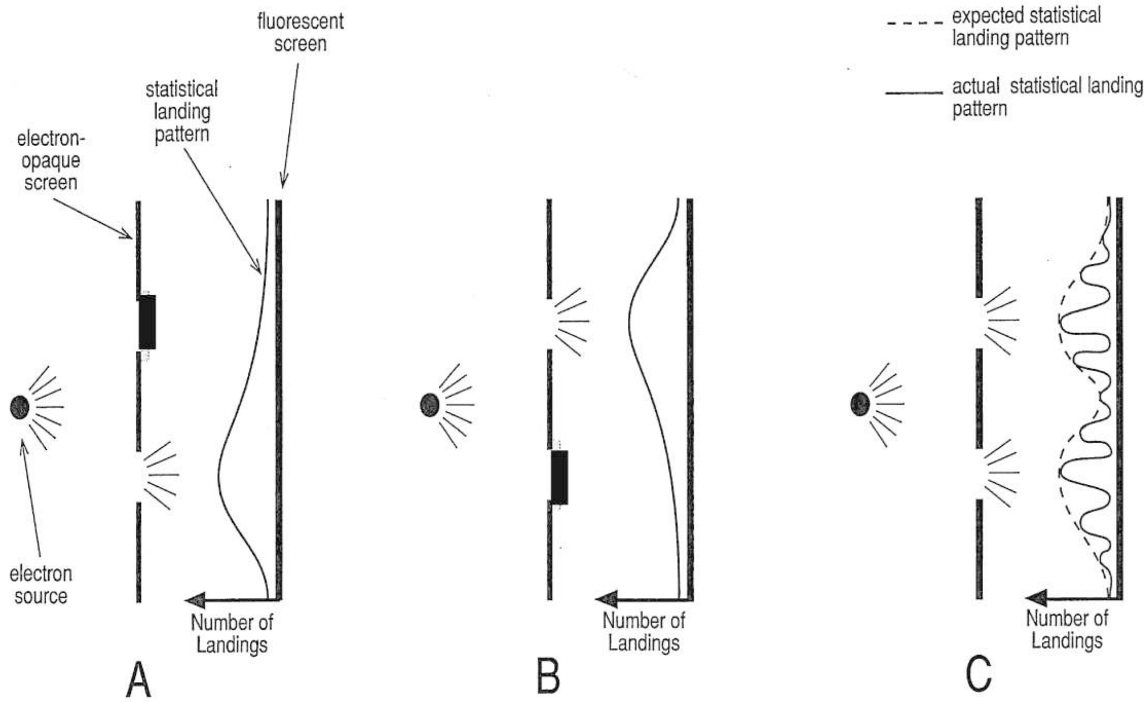
— Le chemin 2 $\downarrow$? Non, pour la même raison.

— Les deux chemins ? Non, on trouve toujours la particule le long d'un des chemins.

— Aucun des chemins ? Non : si on bloque les deux chemins rien ne se passe.

ESSENCE DU MYSTERE QUANTIQUE !

AUTRE VERSION

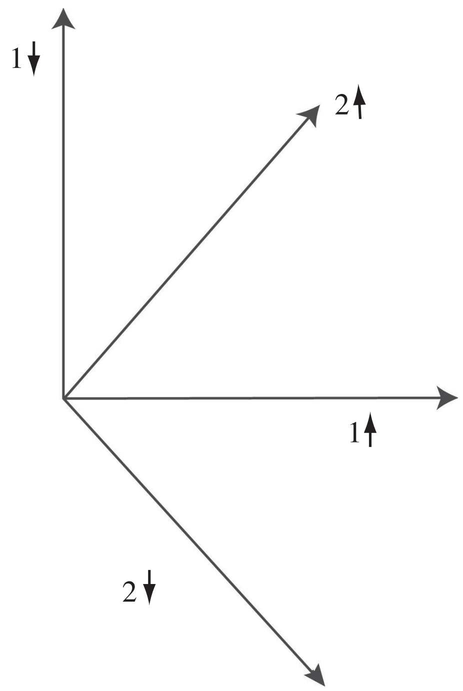


Solution quantique

Représenter les états par des vecteurs

$$| 1 \uparrow> = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad | 1 \downarrow> = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$| 2 \uparrow> = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad | 2 \downarrow> = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$



$$| 2 \uparrow> \; = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(| 1 \uparrow> \; + | 1 \downarrow>\right)$$

$$| 2 \downarrow> = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(| 1 \uparrow> \; - | 1 \downarrow>\right)$$

$$| 1 \uparrow> \; = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(| 2 \uparrow> \; + | 2 \downarrow>\right)$$

$$| 1 \downarrow> \; = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(| 2 \uparrow> \; - | 2 \downarrow>\right)$$

Règles

1. Caractérisation de l'état d'un système et de son évolution en dehors des mesures.

$$
\begin{aligned}
|\text{ état } > &= c_1 \; |1 \uparrow> + \, c_2 \; |1 \downarrow> \\
&= d_1 \; |2 \uparrow> + \, d_2 \; |2 \downarrow>
\end{aligned}
$$

$c_1(t)$, $c_2(t), d_1(t), d_2(t)$

varient au cours du temps

(équation de Schrödinger)

$|c_1(t)|^2 + |c_2(t)|^2 = 1$

$|d_1(t)|^2 + |d_2(t)|^2 = 1$

(ci-dessus $|c_1| = |c_2| = |d_1| = |d_2| = \dfrac{1}{\sqrt{2}}$)

2. Ce qui se passe lors d'une mesure:

Si on mesure le spin dans la direction 1 :

$\uparrow$ avec probabilité $|c_1|^2$

$\downarrow$ avec probabilité $|c_2|^2$

$(|c_1(t)|^2 + |c_2(t)|^2 = 1)$

Si on mesure le spin dans la direction 2 :

$\uparrow$ avec probabilité $|d_1|^2$

$\downarrow$ avec probabilité $|d_2|^2$

$(|d_1(t)|^2 + |d_2(t)|^2 = 1)$

Après la mesure dans la direction 1

si on "voit" $\uparrow$

$|$ état $> \rightarrow |1 \uparrow>$

si on voit $\downarrow$

$|$ état $> \rightarrow |1 \downarrow>$

idem pour mesure dans la direction 2 :

"Réduction de l'état"

incompatible avec *l'évolution de Schrödinger.*

Deux règles mutuellement incompatibles; l'une sur ce qui se passe "en dehors des mesures", l'autre sur ce qui se passe "lors de mesures".

PARENTHÈSE= QUID DE LA FONCTION D'ONDE ?

$$\Psi$$

$\Psi(x) =$ ÉTAT, comme ci-dessus.

$x =$ position, comme le spin, mais prend des valeurs "continues" et pas "discrètes".

$|\Psi(x)|^2 =$ (densité de) probabilité de trouver la particule en x si on "mesure" sa position.

$\Psi(x,t)$ varie au cours du temps

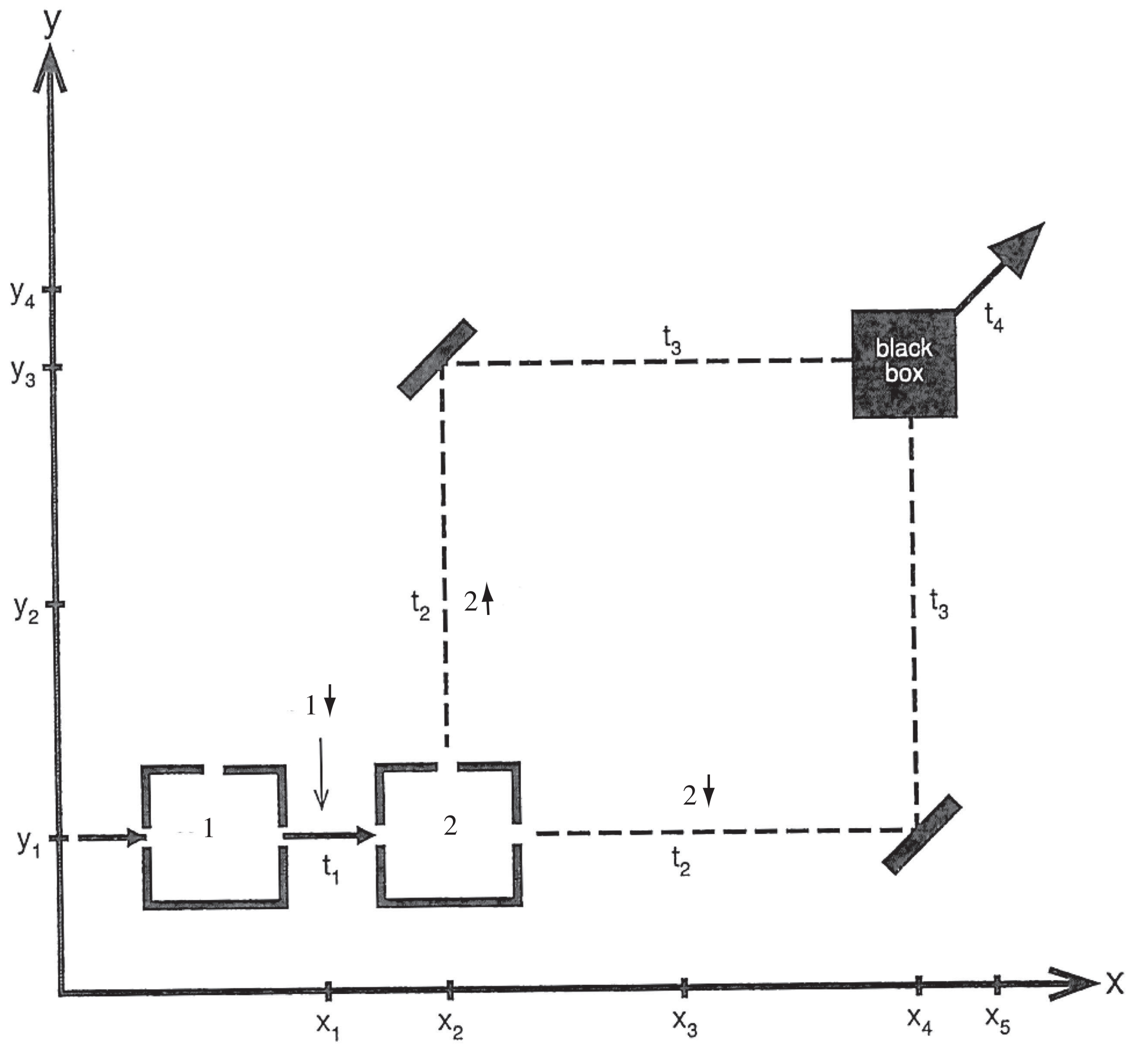
(équation de Schrödinger)

$\int |\Psi(x,t)|^2 dx = 1$ pour tout temps,

analogue à

$|c_1(t)|^2 + |c_2(t)|^2 = 1.$

Voyons comment cela marche



en t_1

$| 1 \downarrow> = \frac{1}{\sqrt{2}} (| 2 \uparrow> \; - | 2 \downarrow>)$

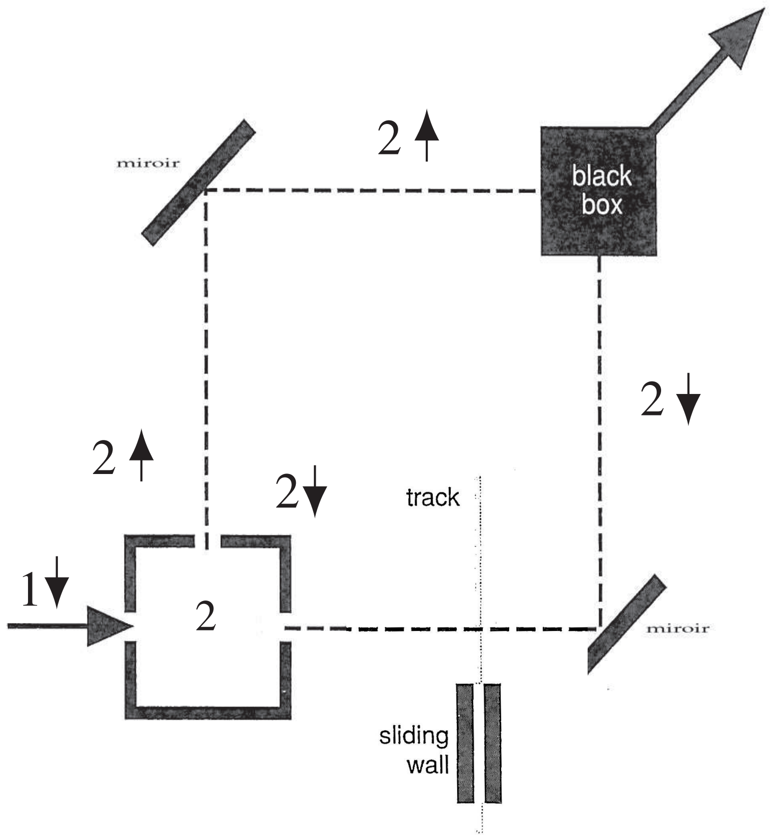
en t_2 et t_3

$\frac{1}{\sqrt{2}}(| 2 \uparrow> \; | \text{chemin2} \uparrow> -| 2 \downarrow> \; | \; \text{chemin} \downarrow>)$

en t_4

$= \frac{1}{\sqrt{2}}(| 2 \uparrow> \; - | 2 \downarrow>) \, | \, \text{chemin} \nearrow>$

$= | 1 \downarrow> \; | \, \text{chemin} \nearrow> \to 100\% \; 1 \downarrow$



Bloquer chemin $2 \downarrow$

$|$ état $> \rightarrow |2 \uparrow> \; |$ chemin $2 \uparrow >$

en t_2 et t_3

$= \frac{1}{\sqrt{2}} (|1 \uparrow> + |1 \downarrow>) \; |$ chemin $\nearrow>$

en t_4

à la "Black box" $\rightarrow$ 50 % $\uparrow$ 50 % $\downarrow$.

Ici intervient le rôle essentiel de la "mesure" et donc, de "l'observation".

Processus de mesure (simplifié)

$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$

$\Psi_0 = \varphi_0(x) \left(c_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$

x = variable macroscopique = position de l'appareil de mesure.

$H = i\sigma \frac{\partial}{\partial x}$

Equation de Schrödinger ($\hbar = 1$)

$i \frac{\partial}{\partial t} \Psi = i\sigma \frac{\partial}{\partial x} \Psi$

Solution :

$$c_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \varphi_0(x+t) + c_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \varphi_0(x-t)$$

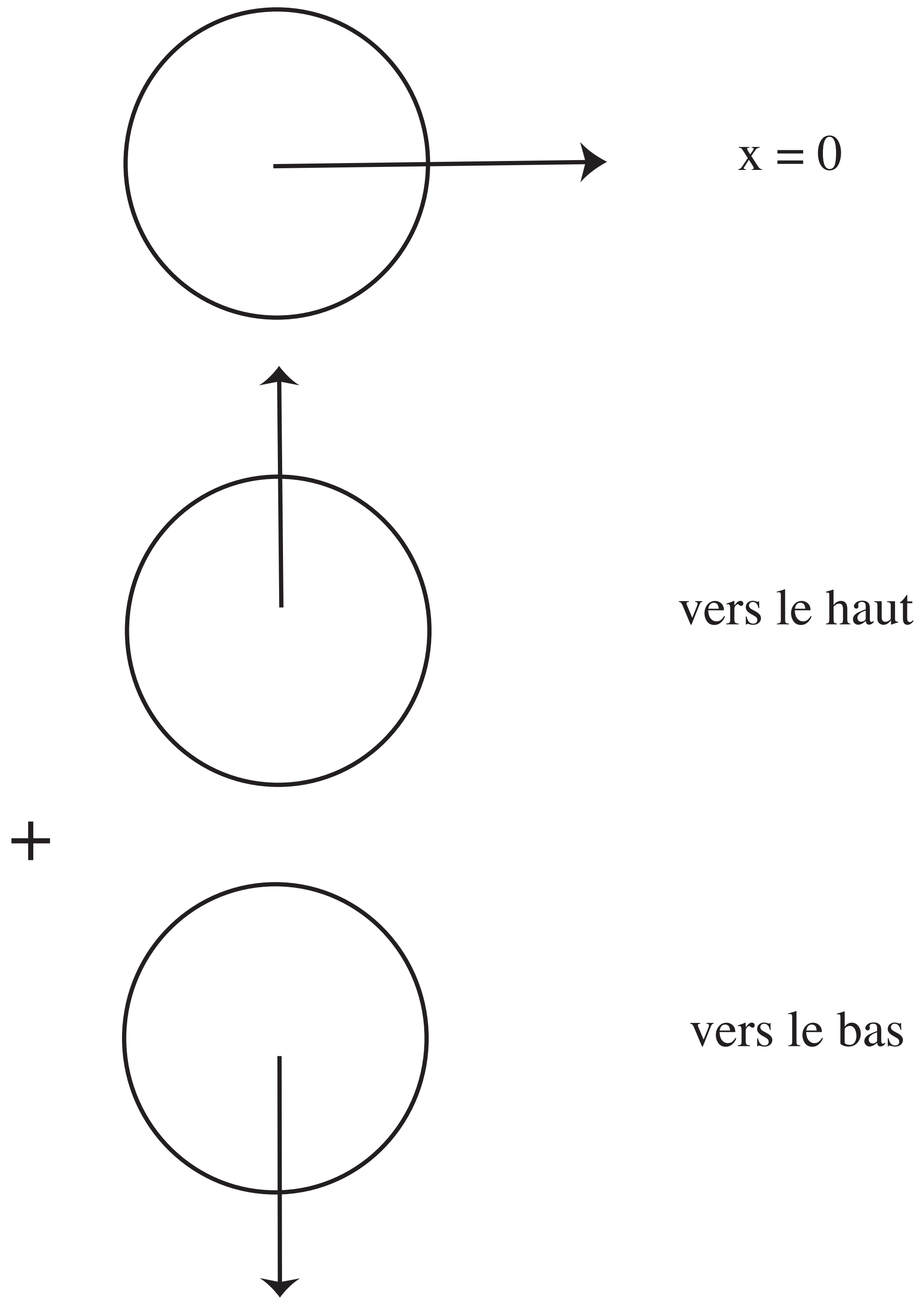
$\varphi_0(x)$ centré en $x = 0$

$\rightarrow \quad \varphi_0(x \pm t)$ centré en $x = \mp t$.

$\rightarrow \quad$ Appareil se trouve dans une superposition de deux états macroscopiquement distincts :

L'appareil ou le pointeur est "vers le haut" et "vers le bas".

Pointeur



Mais, comme la situation est macroscopique $\rightarrow$ on peut *regarder*.

Si vers le haut $\rightarrow$ $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \varphi_0(x-t)$

Si vers le bas $\rightarrow$ $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \varphi_0(x+t)$

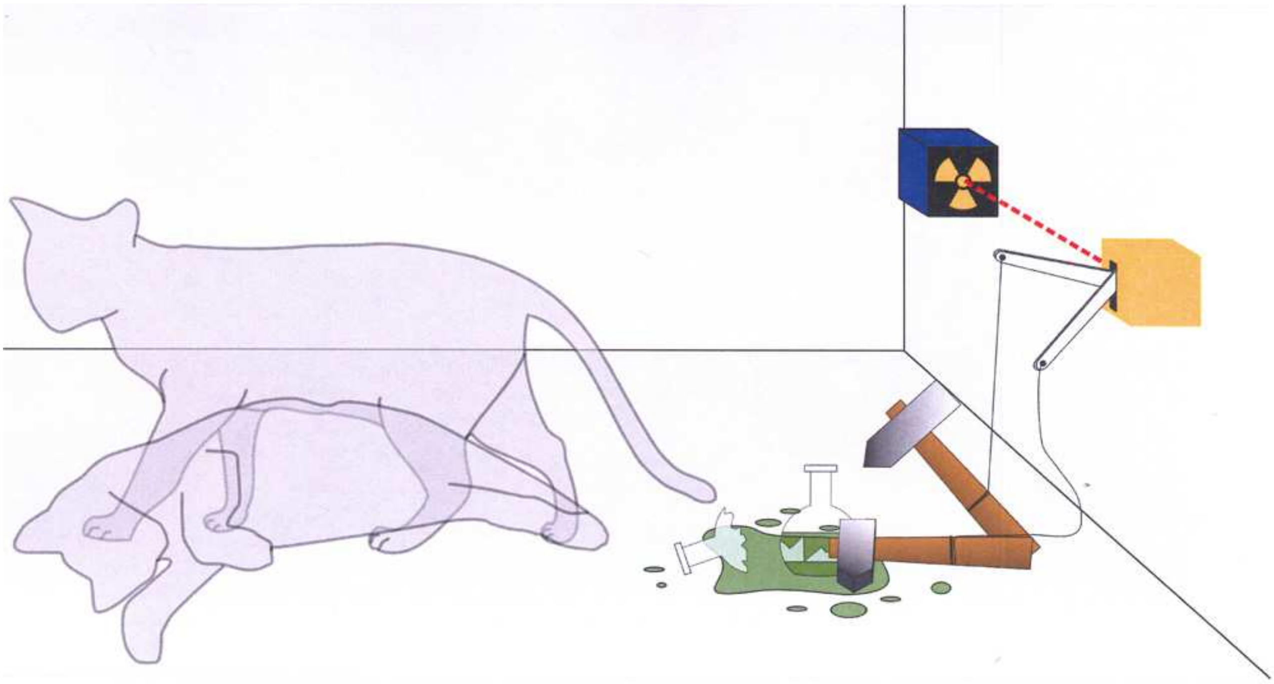
On réduit l'état quantique.

Problème du chat

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\,(|\text{ chat vivant }> + |\text{ chat mort }>)$$

"on mesure $\uparrow$" $\rightarrow$ on tue le chat

"on mesure $\downarrow$" $\rightarrow$ on le laisse vivant.



Racine du problème : que signifie la probabilité en mécanique quantique ?

Deux réponses possibles :

1. Orthodoxe, standard

$\longrightarrow$ Nos théories physiques les plus fondamentales ne portent *que* sur certains phénomènes macroscopiques, réalisés en laboratoire, appelés “mesures”.

2. Implicite

$\longrightarrow$ Des expériences bien faites révèlent des propriétés préexistantes (mais inconnues et incontrôlables) du système, telles que le spin dans les directions 1 ou 2. C'est-à-dire que la mécanique quantique est *incomplète*.

On dirait que la théorie se préoccupe seulement des "résultats de mesure" et n'a rien à dire sur quoi que ce soit d'autre. Mais qu'est-ce qui permet à certains systèmes physiques de jouer le rôle de "mesureur" ? Est-ce que la fonction d'onde de l'univers a dû attendre des milliers de millions d'années avant de faire un saut, attendant l'apparition d'une créature unicellulaire ? Ou a-t-elle dû attendre plus longtemps, jusqu'à ce qu'apparaisse un système plus qualifié, muni d'un doctorat ?

J. BELL

Le problème de la mesure et de l'observateur est le problème de savoir où la mesure commence et où elle se termine. Prenez mes lunettes par exemple: si je les enlève, à quelle distance dois-je les mettre pour qu'elle fassent partie de l'objet plutôt que de l'observateur ? Il y a des problèmes semblables de la rétine jusqu'au cerveau en passant par le nerf optique. Je pense que quand vous analysez ce langage dans lequel sont tombés les physiciens, à savoir que la physique concerne les résultats d'observations, vous voyez qu'il s'évapore si on l'analyse et que rien de très clair n'est dit.

J.S. BELL

Théorème sur l'inexistence de "variables cachées"

(Kochen-Specker, Gleason, Bell, Mermin)

"variables cachées"= propriétés préexistantes (mais inconnues) du système.

$\nexists$ fonction $v : \mathcal{A} \to \mathbb{R}$

$\mathcal{A}$ = ensemble des quantités "mesurables" ("spin" etc.) (= ensemble de matrices)

$v(A)$ = valeur préexistante, mais inconnue de A,

telle que $\forall\ A \in \mathcal{A}$,

$v(A) \in$ {résultats possibles obtenus lors de la mesure de la quantité A}, c'est-à-dire,

$v(A) \in$ {valeurs propres de la matrice A}

et, $\forall A, B$,

si $[A, B] = 0$, alors

$$v(AB) = v(A)v(B).$$

Ce théorème rend intenable la vue "implicite". Au moins pour *certaines* quantités, la "mesure" ne mesure rien (de préexistant) et doit être vue comme une sorte *d'interaction* entre l'objet "mesuré" et l'appareil. Rôle "actif" de l'appareil.

MAIS le chat possède des "variables cachées"–qui ne sont pas cachées du tout– il est vivant OU mort. L'état superposé vivant + mort ne décrit pas entièrement l'état du chat. *Pour le chat,* la mécanique quantique *est* incomplète.

Une façon de poser le problème: où mettre la limite entre objets "classiques" (appareils de mesure ou chat) et "quantiques"? Comment passe-t-on de *et* (états superposés) à *ou* ?

Démonstration

$\sigma_x{}^i \quad \sigma_y{}^i \qquad i=1,2$

$\sigma_\alpha{}^1 = \sigma_\alpha \otimes 1 \qquad \sigma_\alpha^2 = 1 \otimes \sigma_\alpha{}^2 \quad \alpha = x, y.$

On a

$$(\sigma_x{}^i)^2 = (\sigma_y{}^i) = 1 \quad i=1,2$$

$$\sigma_x{}^i\sigma_y{}^i = -\sigma_y{}^i\sigma_x{}^i \quad i=1,2$$

$$\sigma_\alpha{}^1\sigma_\beta{}^2 = \sigma_\alpha{}^2\sigma_\beta{}^1 \quad \alpha,\beta = x,y$$

Donc, $\sigma_x{}^1\sigma_y{}^2\sigma_y{}^1\sigma_x{}^2\sigma_x{}^1\sigma_x{}^2\sigma_y{}^1\sigma_y{}^2 = -1$

car

$= -\sigma_y{}^2\sigma_y{}^1\sigma_x{}^2\sigma_x{}^1\sigma_x{}^1\sigma_x{}^2\sigma_y{}^1\sigma_y{}^2 = -1$

Soit

$$\begin{aligned} X &= \sigma_x{}^1\sigma_y{}^2\sigma_y{}^1\sigma_x{}^2 \\ Y &= \sigma_x{}^1\sigma_x{}^2\sigma_y{}^1\sigma_y{}^2 \end{aligned}$$

$$[X,Y] = 0 \to v(XY) = -1 = v(X)v(Y)$$

par hypothèse.

$X = A \cdot B$

$A = {\sigma_x}^1 {\sigma_y}^2 \qquad B = {\sigma_y}^1 {\sigma_x}^2$

$Y = C \cdot D$

$C = {\sigma_x}^1 {\sigma_x}^2 \qquad D = {\sigma_y}^1 {\sigma_y}^2$

$[A, B] = [C, D] = 0.$

$v(X) = v(A)v(B)$

$v(Y) = v(C)v(D)$

Donc, $-1 = v(A)v(B)v(C)v(D)$

A, B, C, D sont des produits de matrices qui commutent (indices 1 et 2). Donc,

$$\begin{aligned} v(A) &= v({\sigma_x}^1)v({\sigma_y}^2) \\ v(B) &= v({\sigma_y}^1)v({\sigma_x}^2) \\ v(C) &= v({\sigma_y}^1)v({\sigma_x}^2) \\ v(D) &= v({\sigma_y}^1)v({\sigma_y}^2) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \; -1 = v({\sigma_x}^1)v({\sigma_y}^2)v({\sigma_y}^1)v({\sigma_x}^2)v({\sigma_x}^1)v({\sigma_x}^2)$$

$$v({\sigma_y}^1)v({\sigma_y}^2) =$$

$$v({\sigma_x}^1)^2 v({\sigma_y}^2)^2 v({\sigma_y}^1)^2 v({\sigma_x}^2)^2 = 1$$

REACTIONS

— Pragmatisme

— Nier le problème (mauvaise philosophie, idéalisme, instrumentalisme)

— Prétendre que la théorie quantique usuelle apporte une solution (“décohérence” “mondes multiples”)

— Autre ? → 3e cours

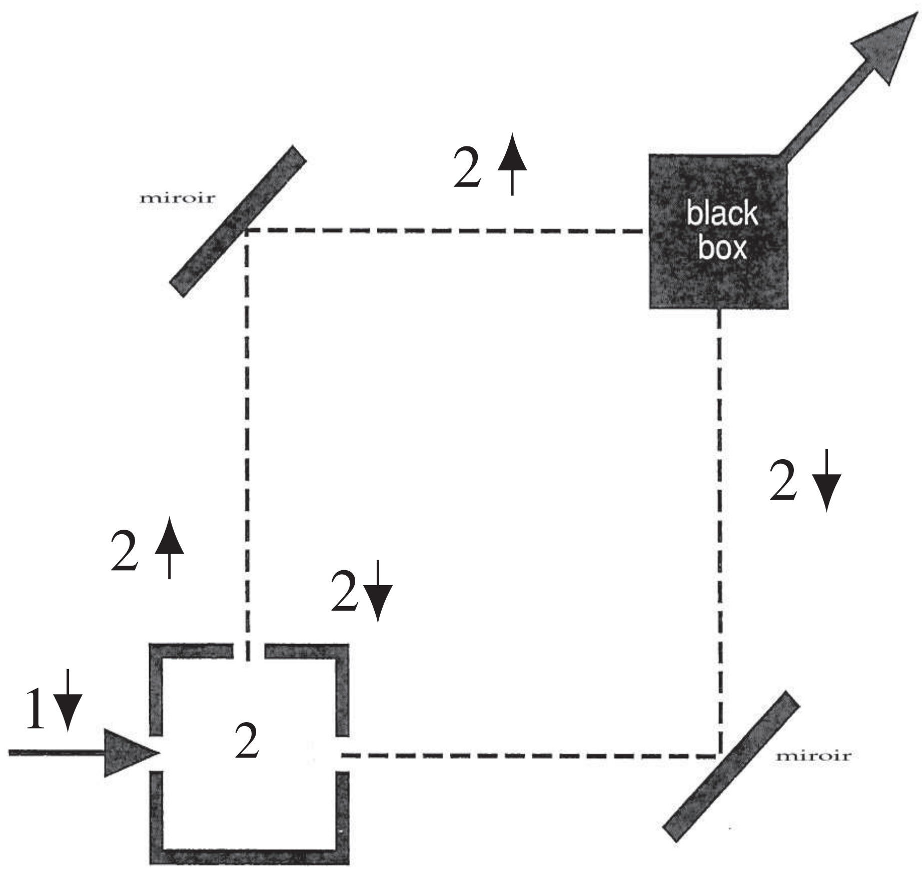
— Mais avant cela, autre mystère, le théorème de Bell et la non localité.

Décohérence

Idée

Comme $\varphi_0(x+t)$ et $\varphi_0(x-t)$

représentent des fonctions d'onde pour des objets macroscopiques, c'est-à-dire composés d'un grand nombre de sous-systèmes, on ne peut pas les recomposer comme on le fait pour une particule par une paire de miroirs ou par tout autre système.



La décohérence est essentielle pour la cohérence de l'algorithme quantique.

En effet si on pouvait produire des effets d'interférence entre états pour des objets macroscopiques, la partie "chat vivant" de l'état pourrait affecter la partie "chat mort", et vice-versa, ce qui aurait des conséquences visibles étranges.

C'est VRAI.

Mais cela ne résout nullement le problème : la mécanique quantique prédit, de façon non ambigüe, des états superposés pour les objets macroscopiques et ce n'est qu'en *regardant* que l'on réduit l'état quantique à l'un des termes de la superposition.