

# COMPRENONS-NOUS VRAIMENT LA MECANIQUE QUANTIQUE?

Les aventures de Niels, Albert, Eugène, Grégor, Alice et Bob

IAP, 19 mars 2012

Franck Laloë, LKB, ENS Paris

- 1. Historique, trois périodes:
  - préhistoire: Planck, Bohr, Heisenberg
  - période ondulatoire: de Broglie, Schrödinger
  - synthèse: Born, Copenhague et Von Neumann
  
- 2. Des difficultés subsistent:
  - ami de Wigner
  - mesures négatives et « sans interactions »
  - quelques citations
  
- 3. Théorèmes EPR et de Bell: non-localité
  - des pois, des gousses et des fleurs
  - inégalités BCHSH
  
- 4. Quelques interprétations
  - Copenhague
  - de Broglie et Bohm
  - dynamique de Schrödinger modifiée
  - Everett

# 1. Historique

Trois périodes:

## 1.1 La « préhistoire », Planck, Bohr, Heisenberg



**Planck**, 1900: le calcul de l'équilibre thermique du rayonnement (rayonnement du corps noir). Introduction de la constante  $h$ .

**Einstein** et la (ré)-introduction du quantum de lumière

Le problème principal à l'époque: pourquoi la matière est-elle stable?

Le modèle de **Bohr** (1913) des orbites quantifiées, les « sauts quantiques »

La mécanique des matrices de **Heisenberg** (1925): les propriétés classiques sont remplacées par des matrices, les « observables »

Les atomes sont stables... parce qu'ils sont stables.  
Tout cela est bien mystérieux.....

## 1.2 La période ondulatoire, de Broglie, Schrödinger



De Broglie (1924): à toute particule d'impulsion  $p$  on attribue une longueur d'onde  $\lambda = h/p$ .

Debye: généralement, en physique, quand on a une longueur d'onde, on a également une équation pour cette onde ...

Schrödinger (1926) établit cette équation d'onde pour la fonction d'onde  $\Psi$ , et explique le spectre de l'atome H sans recourir aux orbites quantifiées de Bohr. L'équation explique également les autres atomes, les molécules, les solides, etc.

N'est ce pas un immense soulagement? On est revenu à la physique des ondes, avec ses succès bien connus au 19<sup>e</sup> siècle.

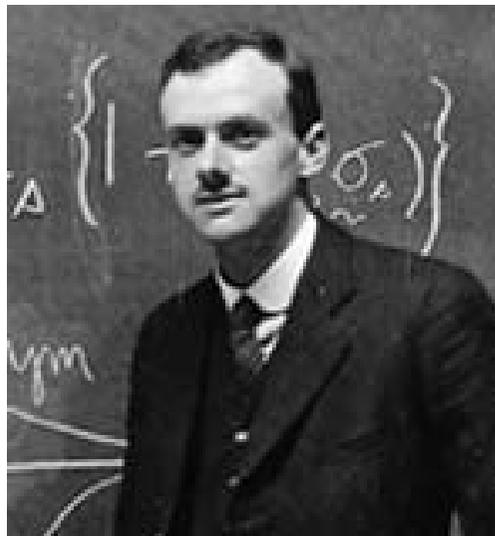
## Mais des difficultés apparaissent:

L'onde de Schrödinger ne se propage pas dans l'espace ordinaire, comme une onde électromagnétique ou sonore par exemple; elle se propage dans **l'espace des configurations**, qui est bien plus grand ( $3 \times 10^{23}$  dimensions pour une molécule de gaz)

Contrairement aux espoirs de Schrödinger (1926), les paquets d'ondes s'étalent. Les particules se diluent dans l'espace!

Par exemple, dans une collision sur un potentiel central, la particule diffusée part dans toutes les directions à la fois, alors qu'en pratique on observe toujours une trajectoire après collision.

## 1.3 Synthèse: Interprétations de Copenhague et « standard »



**M. Born:** interprétation probabiliste de la fonction d'onde (règle de Born)

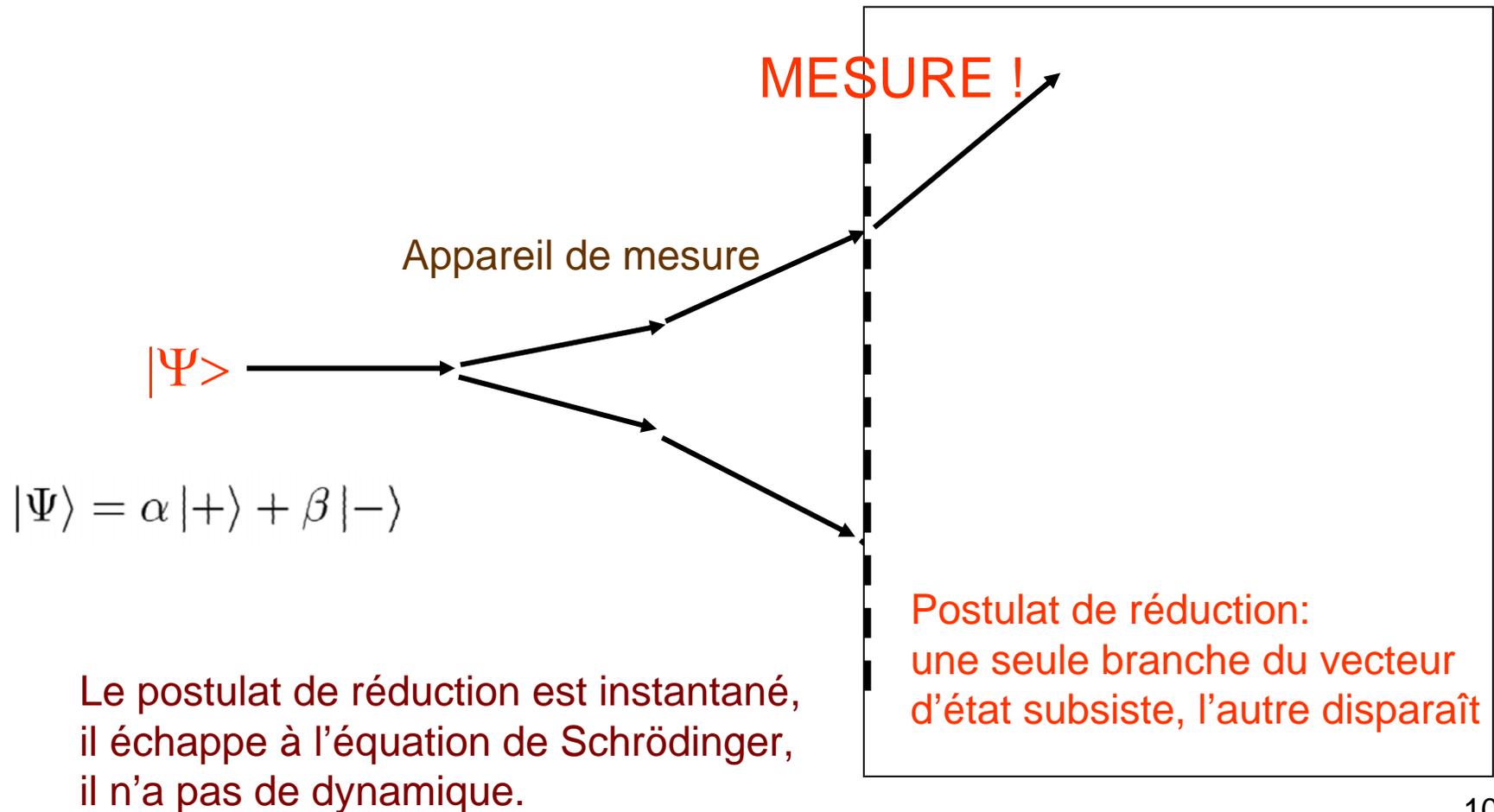
**N. Bohr** (interprétation de Copenhague): rôle essentiel de l'appareil de mesure, car nous n'avons pas directement accès à la réalité du monde atomique. Une expérience de physique est un tout indissociable (holisme). Complémentarité.

**Heisenberg:** « les atomes ne sont pas réels; ils forment un monde de potentialités ou de possibilités, plutôt qu'un monde de faits ».

**Von Neumann:** on ne peut pas donner une présentation complète de la mécanique quantique sans faire intervenir les observateurs.

Introduction du « postulat de réduction du paquet d'ondes »: lors d'une mesure, le vecteur d'état saute brusquement de la valeur prévue par l'équation de Schrödinger vers une « valeur réduite » aléatoire, fixée par le résultat de mesure.

## Equation de Schrödinger vs. postulat de réduction du vecteur d'état



## 2. Des difficultés subsistent

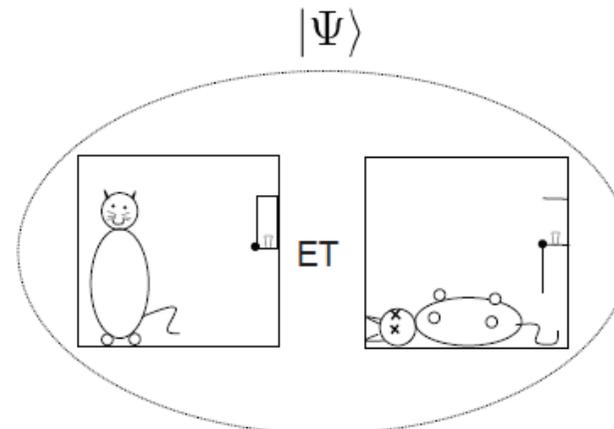
(dans l'interprétation standard)

- Comment se fait-il que l'on a deux postulats d'évolution pour le même vecteur d'état? Quelles sont alors les limites exactes de leurs domaines d'application respectifs?
- Dans le point de vue de Copenhague, d'où vient cette division entre système mesuré d'une part, appareil de mesure et observateur d'autre part? Quelles sont les limites relatives de ces deux mondes?
- Quel est le statut du vecteur d'état  $|\Psi\rangle$  ? Décrit-il la réalité physique elle-même, ou seulement notre connaissance de la réalité? Dans le second cas, est-il juste l'analogie d'une distribution classique de probabilités?
- Si le vecteur d'état donne juste une information, sur quoi porte cette information? Est-elle relative à l'observateur, ou universelle?

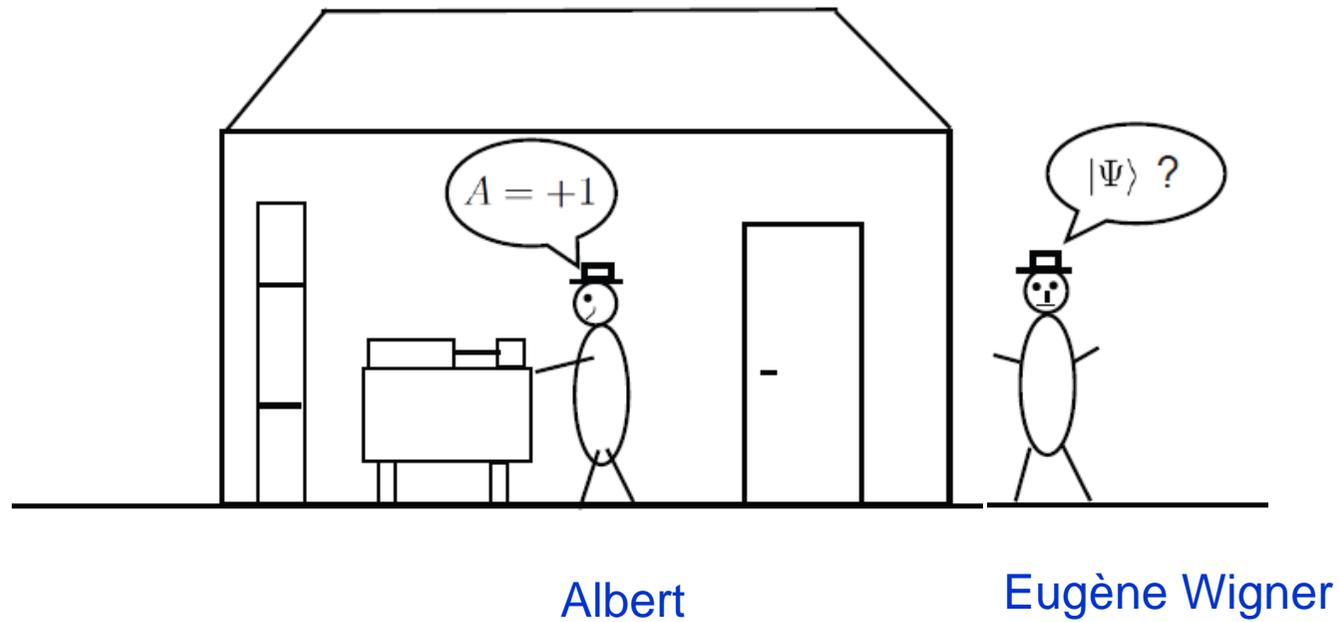
## 2.1 La régression (chaîne) infinie de von Neumann

- Jusqu'à quel point faut-il prendre au sérieux l'équation de Schrödinger?
- Lors d'une mesure, l'équation de Schrödinger prévoit que le vecteur d'état se ramifie, et que cette ramification se propage de plus en plus loin. La superposition se propage jusqu'au monde macroscopique, dont l'unicité semble remise en question. Comment s'arrête cette régression infinie?

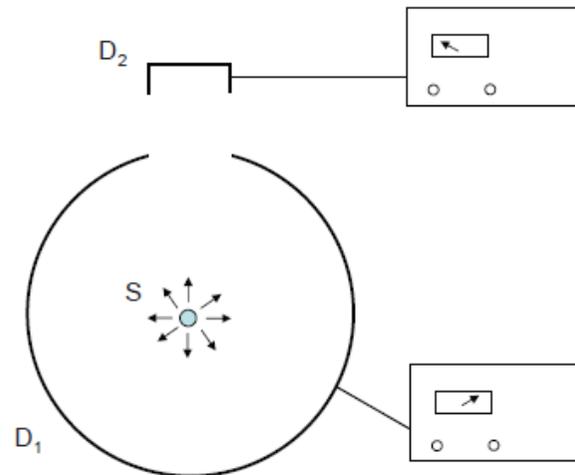
- Le chat de Schrödinger



## 2.2 L'ami de Wigner

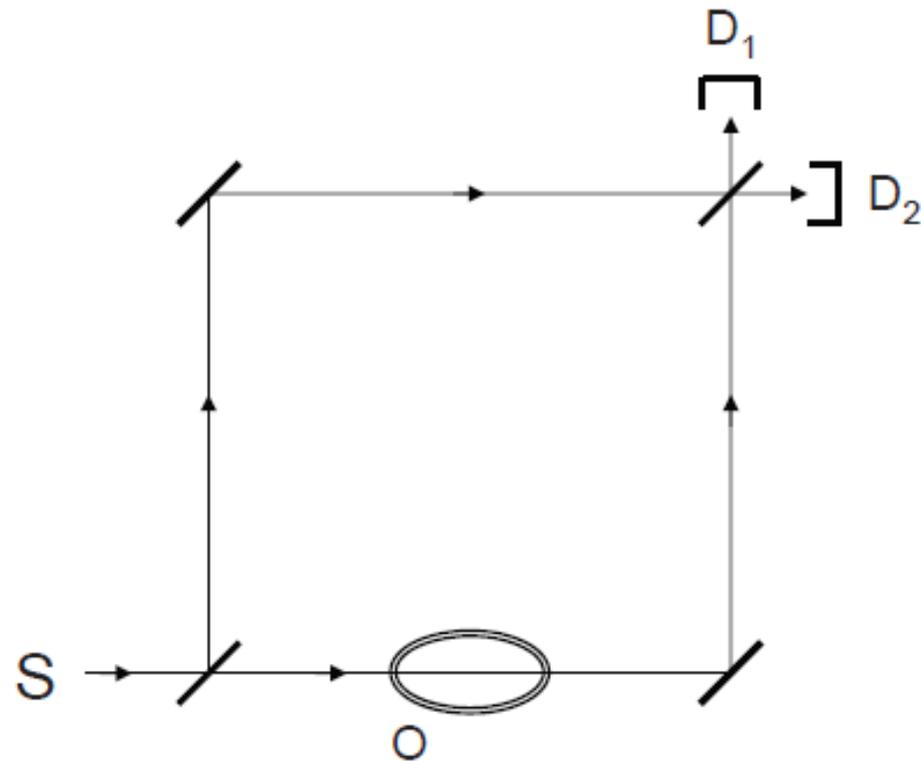


## 2.3 Mesures négatives



L'explication du « microscope de Heisenberg », qui met en avant la « perturbation inévitable produite par l'instrument de mesure », n'est pas satisfaisante. Il y a quelque chose de plus dans la mesure quantique.

## 2.3 Mesures « sans interaction »



Elitzur et Vaidman (1993)

## 2.4 Citations

(i) Bohr ( [21], 2<sup>e</sup> édition, page 204 et [59]) : « Il n'existe pas de monde quantique. Il n'existe qu'une description physique abstraite. Il est faux de penser que la tâche de la physique est de découvrir comment la Nature est réellement. Ce qui concerne la physique est ce que nous pouvons dire sur la Nature ». Ou, de façon similaire : « Il n'existe pas de concept quantique » [60].

(iv) Jordan (tel que cité par Bell dans [69]) : « les observations ne se contentent pas de perturber ce qui doit être mesuré, elles le *produisent*. Dans une mesure de la position, l'électron est forcé de prendre une décision. Nous le contraignons à occuper une position bien précise ; auparavant, il n'était ni ici ni là, il n'avait pris aucune décision concernant une position précise.. ». ».

(vi) Dirac, page 7 de [37] : « *Le seul objet de la physique théorique est de calculer des résultats qui peuvent être comparés avec l'expérience, et il est tout à fait inutile de donner une description globale de l'ensemble du phénomène* ».

## Critiques

(vii) Schrödinger : « le monde ne m'est donné qu'une seule fois, et pas une fois pour son existence et une autre pour sa perception. Le sujet et l'objet sont un. La barrière qui les sépare ne peut être considérée comme brisée du seul fait d'une expérience en sciences physiques, pour la simple raison que cette barrière n'existe pas » [71]. Dans le § 2.B, nous donnons d'autres citations de Schrödinger.

### Einstein:

En 1936 [74] : « La fonction  $\Psi$  ne décrit en aucune manière la condition qu'on puisse attribuer à un seul système; elle concerne en fait un grand nombre d'entre eux, un 'ensemble de systèmes' au sens de la mécanique statistique... si la fonction  $\Psi$  ne fournit que des données statistiques sur les grandeurs mesurées... la raison en tient ... au fait que la fonction  $\Psi$  ne décrit d'aucune manière l'état du système unique ».

(ix) de Broglie [75] :« L'interprétation de la Mécanique ondulatoire de Bohr et Heisenberg a de nombreuses conséquences qui ouvrent des perspectives philosophiques nouvelles. Le corpuscule n'est plus un objet bien défini dans le cadre de l'espace et du temps ; il n'est plus qu'un ensemble de potentialités affectées de probabilités, il n'est plus qu'une entité qui se manifeste à nous de façon fugitive, tantôt sous un aspect, tantôt sous un autre. M. Bohr, qui est un peu le Rembrandt de la Physique contemporaine, car il manifeste parfois un certain goût pour le 'clair-obscur', a dit des corpuscules qu'ils sont 'unsharply defined individuals within finite space-time limits'. »

**Bell:**

« Le problème est le suivant : la mécanique quantique ne s'intéresse qu'aux observations. Elle divise donc nécessairement le monde en deux, une partie qui est observée et une autre qui effectue l'observation. Les résultats dépendent de la façon dont est faite cette division, mais aucune règle précise pour le faire n'est proposée. Tout ce dont nous disposons est une recette qui, du fait des limitations pratiques auxquelles sont sujets les humains, est suffisamment non-ambigüe pour toute question pratique ».

(xiii) Rosenfeld [77], parlant de l'interprétation orthodoxe : « l'observateur humain, que nous avons pris tant de soin à faire sortir du paysage (scientifique), semble s'introduire à nouveau de façon irrésistible,... ».

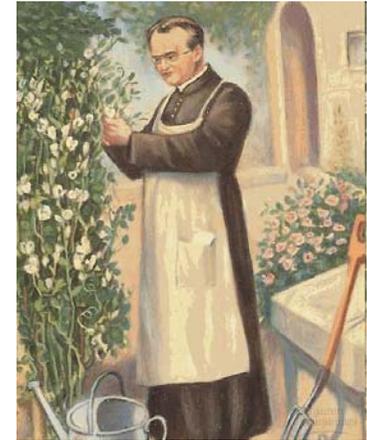
(xvi) Leggett [79] à propos de l'interprétation de Copenhague : « ... le formalisme de la mécanique quantique connu sous le nom d'interprétation de Copenhague (alors qu'il serait probablement plus correct de l'appeler la non-interprétation de Copenhague, du fait qu'elle implique que toute tentative d'interpréter le formalisme est voué à l'échec)... d'une part nie que des objets microscopiques (électrons, photons, atomes, ...) aient nécessairement des propriétés définies en l'absence d'observation, mais d'autre part stipule avec insistance (ou du moins implique) que des objets macroscopiques (compteurs, chats, etc.) possèdent effectivement de telles propriétés, qu'ils soient observés ou non. Cette insistance sur la nécessité de tracer une ligne nette ... entre le monde microscopique et le monde macroscopique de la vie de tous les jours (les appareils de mesure inclus) est un thème constamment présent dans les écrits de Niels Bohr.. ». Dans [80], il commente : « La

(xvii) Van Kampen [82] a émis le caveat amusant suivant : « Toute personne qui attribuera au vecteur d'état plus de signification que ce qui est nécessaire pour calculer des phénomènes observables sera tenue responsable des conséquences! »

# 3. Théorèmes de EPR et de Bell

Ce sont deux théorèmes qui s'enchaînent

## 3.1 Théorème EPR



Une analogie botanique: des pois, des gousses, des couleurs des fleurs. Grégor (Mendel) entre en scène!

Ou: comment utiliser les corrélations pour faire la différence entre un processus aléatoire et un processus déterministe dont les causes sont inconnues.

**Une première expérience:** un processus fondamentalement aléatoire, ou un processus déterministe dont les causes fluctuantes ne sont pas contrôlées?

Les pois emportent-ils avec eux une information génétique qui détermine la couleur des fleurs?

**Une expérience de corrélations:** les causes mises en évidence

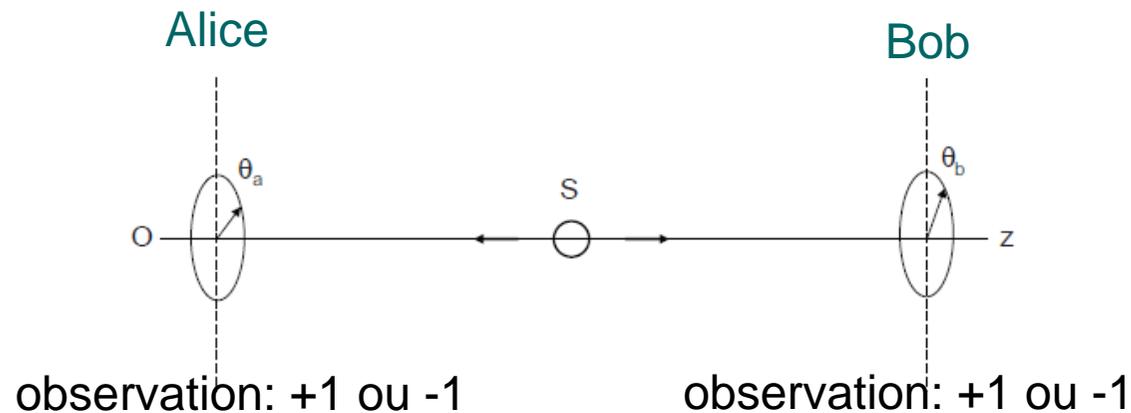
On examine les corrélations entre les couleurs observées à partir de pois issus de la même gousse, que l'on fait pousser dans des serres éloignées, mais exactement dans les mêmes conditions (température, hygrométrie, lumière, etc.).

L'observation de corrélations parfaites permet de démontrer que les pois emportent avec eux, dès leur séparation, des propriétés qui déterminent la couleur des fleurs. Il n'y a pas d'effet (de corrélation) sans cause.

Conclusion: **le processus est déterministe!**

## Transposition à la physique

Une expérience de corrélation entre deux particules qui sont initialement dans un état « intriqué » (deux spins dans un état singulet par exemple).



Critère EPR: si, sans perturber en aucune façon le système, nous pouvons prédire avec certitude la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette quantité physique.

Conclusion: la mécanique quantique, qui n'inclut pas ces éléments de réalité physique, est peut-être exacte, mais incomplète

## 3.2 Théorème de Bell

Il prend la suite du raisonnement EPR. On considère deux orientations de chaque côté de l'expérience,  $a$  et  $a'$  pour Alice,  $b$  et  $b'$  pour Bob.

On appelle  $A$  le résultat d'Alice pour l'orientation  $a$ , et  $A'$  le résultat pour  $a'$ . De même,  $B$  le résultat de Bob pour l'orientation  $a$ , et  $B'$  le résultat pour  $b'$ .

On remarque que:

$$M = AB + AB' - A'B + A'B' = A(B + B') - A'(B - B') = +2 \text{ ou } -2$$

Donc la valeur moyenne de  $M$ , mesurée sur un grand nombre d'expériences, doit être comprise entre  $-2$  et  $+2$ .

C'est une inégalité de Bell, appelée BCHSH, la plus utilisée.

Or la mécanique quantique viole les inégalités de Bell pour certaines valeurs des paramètres, dans un facteur important (40% environ)! De nombreuses expériences ont vérifié que la prédiction quantique est correcte (Freedman et Clauser, 1972 et 1976; Fry et Thomson, 1976; Aspect et al. 1982; etc.).

Comment est-ce possible, compte tenu de la limpidité du raisonnement qui a conduit aux inégalités?

Réponses possibles:

**Bohr:** il faut considérer l'ensemble de l'appareillage expérimental. Les résultats n'ont de sens que dans ce contexte. A est alors une fonction de a ET b, ainsi que B.

**Peres:** « unperformed experiments have no result ».

Il n'est pas légitime de parler des résultats d'expériences qui n'ont pas toutes été réalisées parce qu'elles sont exclusives, même comme des quantités inconnues sur lesquelles on raisonne par l'algèbre.

## 4. Quelques interprétations de la MQ

Elles sont nombreuses et diverses, et se combinent entre elles de multiples façons.

### 4.1 Tout se passe bien dans les laboratoires!

Toutes ces questions sont **sans impact pratique dans les laboratoires** et sur la vie de la recherche. Rares sont les expériences où l'on observe un système quantique unique isolé, un ion par exemple. Généralement on observe des échantillons comprenant un grand nombre de systèmes individuels, et un calcul de valeur moyenne est parfaitement suffisant.

Les physiciens utilisent une règle de bon sens qui évite les questions: on casse « à la main » et sans se poser de questions la chaîne de von Neumann quand elle devient « trop » macroscopique.

Comme le dit Feynman « Shut up and calculate ».

... Cette attitude s'avère extraordinairement productive!

## 4.2 Interprétation dBB (de Broglie et Bohm)

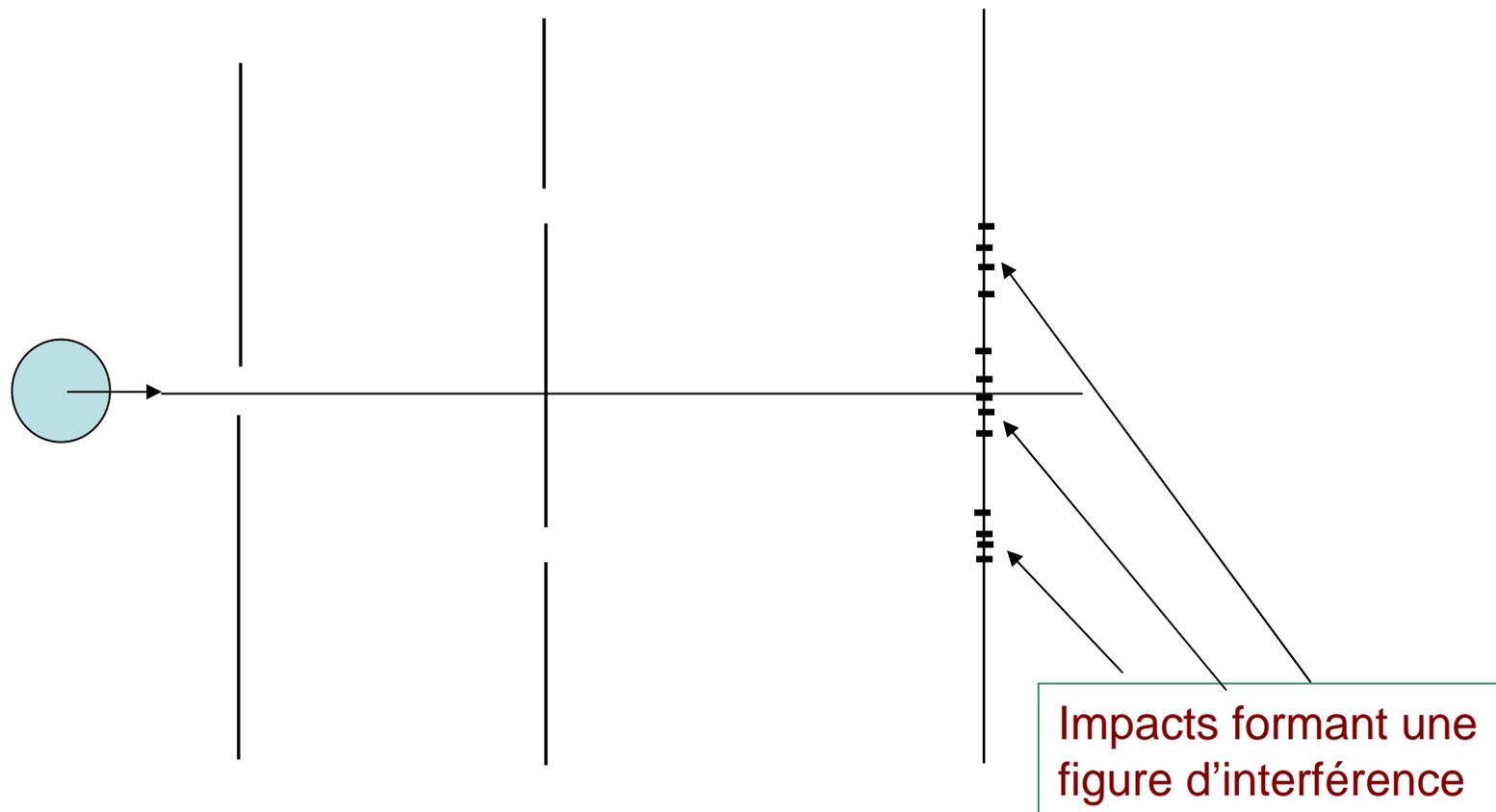
L'objet quantique élémentaire est un duo indissociable constituée d'un Champ (la fonction d'onde) et d'une position (la position bohmiennne).

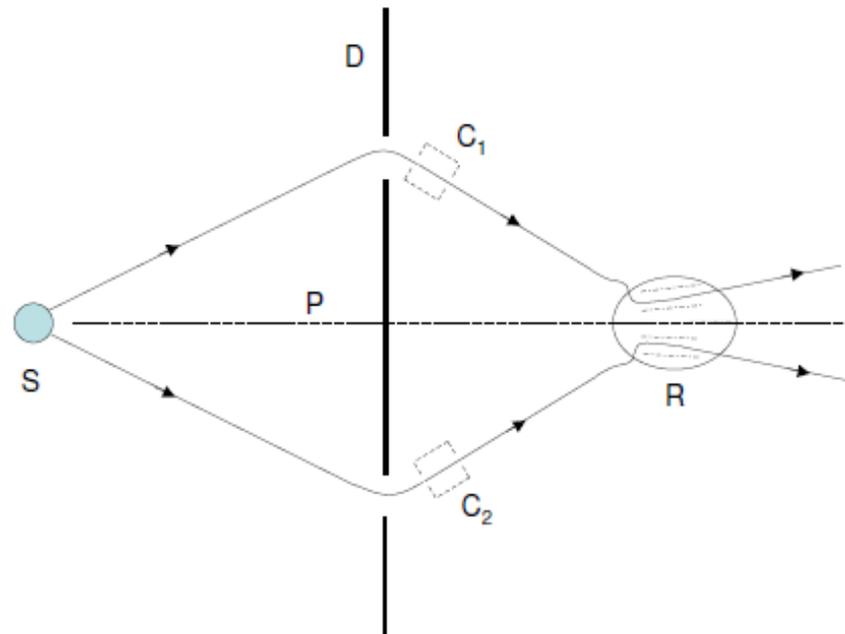
La fonction d'onde  $\Psi$  guide la position  $\mathbf{Q}$ :

$$\frac{d}{dt}\mathbf{Q} = \frac{1}{m|\Psi(\mathbf{Q}, t)|^2} \operatorname{Re} \left[ \frac{\hbar}{i} \Psi^*(\mathbf{Q}, t) \nabla \Psi(\mathbf{Q}, t) \right] = \frac{\hbar}{m} \nabla S(\mathbf{Q}, t)$$

**Condition d'équilibre quantique** La théorie suppose de plus une distribution initiale des variables de position  $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots, \mathbf{Q}_N$  qui est aléatoire et reproduit exactement la distribution quantique  $|\Psi(\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots)|^2$  de la probabilité standard pour des mesures de position. Cette distribution est souvent appelée « distribution d'équilibre quantique ». Elle n'est pas due à

## Interprétation d'une expérience d'interférences





Trajectoires bohmiennes; dans l'espace libre, ce ne sont pas nécessairement des trajectoires rectilignes.  
 Le **mécanisme des ondes vides** explique l'unicité macroscopique et des résultats de mesure.

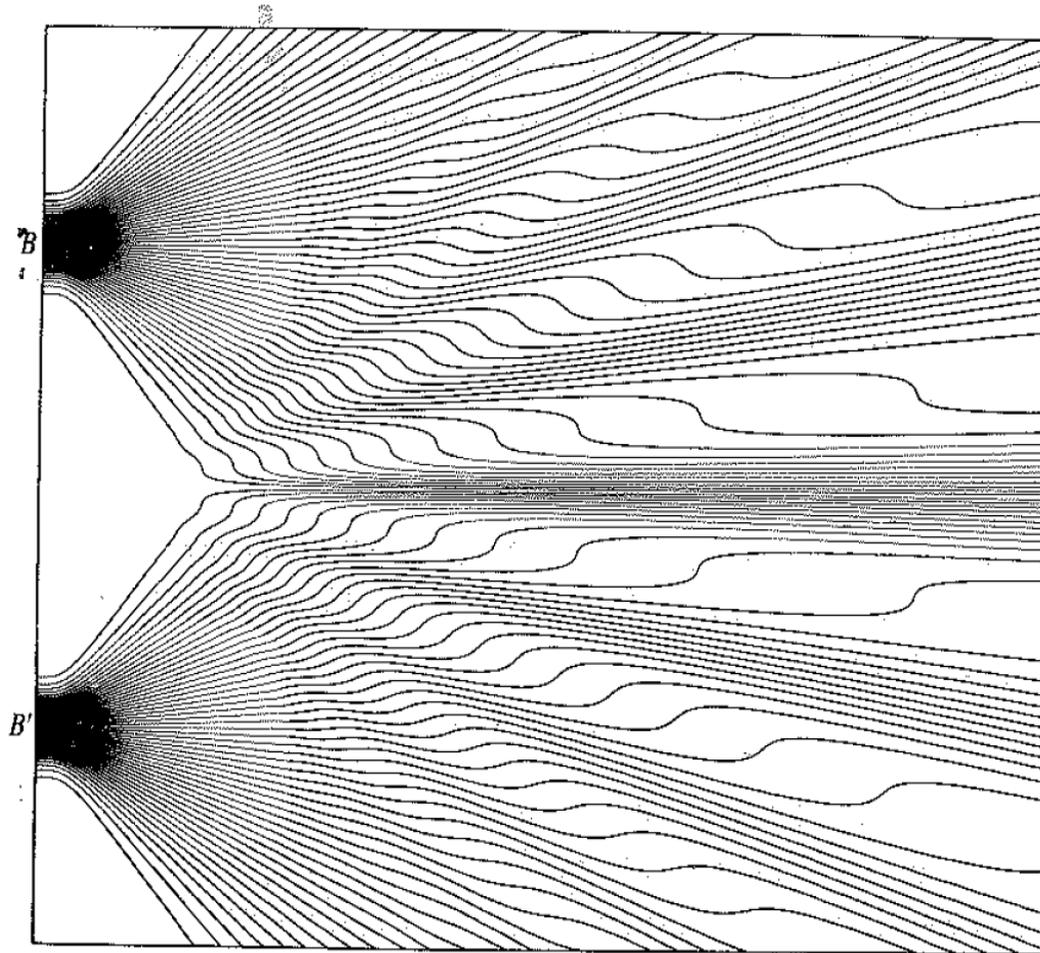


Fig. 5.7 Trajectories for two Gaussian slits with a Gaussian distribution of initial positions at each slit. The probability density is proportional to the number of lines per unit length in the  $y$ -direction (from Philippidis *et al.* (1982)).

## Plusieurs particules

Prenons par exemple deux particules.

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\mathbf{R}_1 &= \frac{1}{m_1|\Psi(\mathbf{R}_1,\mathbf{R}_2;t)|^2} \operatorname{Re} \left[ \frac{\hbar}{i}\Psi^*(\mathbf{R}_1,\mathbf{R}_2;t)\nabla_{\mathbf{R}_1}\Psi(\mathbf{R}_1,\mathbf{R}_2;t) \right] \\ \frac{d}{dt}\mathbf{R}_2 &= \frac{1}{m_2|\Psi(\mathbf{R}_1,\mathbf{R}_2;t)|^2} \operatorname{Re} \left[ \frac{\hbar}{i}\Psi^*(\mathbf{R}_1,\mathbf{R}_2;t)\nabla_{\mathbf{R}_2}\Psi(\mathbf{R}_1,\mathbf{R}_2;t) \right]\end{aligned}$$

Si la fonction d'onde  $\Psi(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2;t)$  est un produit :

$$\Psi(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2;t) = \varphi(\mathbf{r}_1,t)\chi(\mathbf{r}_2,t) \quad (8.14)$$

il est facile de voir que (8.13) se simplifie en :

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\mathbf{R}_1 &= \frac{1}{m_1|\varphi(\mathbf{R}_1,t)|^2} \operatorname{Re} \left[ \frac{\hbar}{i}\varphi^*(\mathbf{R}_1,t)\nabla_{\mathbf{R}_1}\varphi(\mathbf{R}_1,t) \right] \\ \frac{d}{dt}\mathbf{R}_2 &= \frac{1}{m_2|\chi(\mathbf{R}_2,t)|^2} \operatorname{Re} \left[ \frac{\hbar}{i}\chi^*(\mathbf{R}_2,t)\nabla_{\mathbf{R}_2}\chi(\mathbf{R}_2,t) \right]\end{aligned} \quad (8.15)$$

Chaque particule se propage alors indépendamment, guidée de façon locale par sa propre fonction d'onde.

Si la fonction d'onde n'est pas un produit, en général la vitesse de chaque particule dépend de la position de l'autre. Par exemple si:

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; t) = \alpha\varphi(\mathbf{r}_1, t)\chi(\mathbf{r}_2, t) + \beta\varphi'(\mathbf{r}_1, t)\chi'(\mathbf{r}_2, t) \quad (8.16)$$

(i) Prenons un point particulier  $(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2)$  de la trajectoire dans l'espace des configurations. Si, à l'instant  $t$ , l'une des deux fonctions d'onde  $\chi(\mathbf{R}_2, t)$  ou  $\chi'(\mathbf{R}_2, t)$  s'annule, un seul des termes de (8.16) joue un rôle, de sorte que la fonction d'onde de la particule 2 disparaît de l'expression de la vitesse de la particule 1 au point  $\mathbf{R}_1$ . La localité est alors satisfaite.

(ii) Si les deux fonctions d'onde  $\chi(\mathbf{R}_2, t)$  et  $\chi'(\mathbf{R}_2, t)$  sont simultanément non-nulles, alors la même simplification ne se produit plus; en général apparaissent des effets non-locaux.

Lorsque les deux paquets d'onde associés à l'une des particules ne se recouvrent pas, on est toujours dans le cas (i). Une des deux ondes est toujours présente, mais n'est associée à aucune particule, de sorte qu'elle ne joue plus aucun rôle. C'est ce que Bohm appelle une « onde vide ».

## La mesure, le mécanisme des « ondes vides »

Appliquons le modèle de von Neumann d'une mesure idéale; après la mesure, l'état intriqué du système mesuré et de l'appareil de mesure est:

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N; t) = \sum_j \varphi_j(\mathbf{r}, t) \chi_j(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N; t)$$

Les différents états de l'appareil de mesure dans la somme sur  $j$  sont macroscopiquement distinguables. Donc, pour de nombreuses particules qui les constituent, au moins certaines sont en des régions de l'espace différentes, ce qui implique que les fonctions d'ondes de l'appareil de mesure n'ont aucun recouvrement.

On se retrouve donc dans le même cas que précédemment, et le mécanisme des « ondes vides » joue: seule l'une des ondes de  $j$  fixé continue à jouer un rôle dans la dynamique, toutes les autres en disparaissent totalement.

Ainsi la dynamique bohémienne contient la réduction du vecteur d'état; il n'est aucun besoin d'introduire deux postulats différents pour la dynamique quantique. Le processus de mesure est un processus physique d'interaction tout-à-fait ordinaire.

Cette propriété de la théorie de Bohm assure automatiquement la contextualité: à chaque ensemble de dispositifs expérimentaux agissant simultanément sur le système mesure est associée une dynamique différente, donc une formation d'ondes vides différente.

On retrouve également une notion chère à Bohr: ce qui compte, c'est l'ensemble du dispositif expérimental. Ici, ce n'est plus un postulat philosophique, mais une conséquence de la dynamique.

Dans la théorie dBB, la décohérence assure automatiquement l'unicité macroscopique, contrairement à la théorie standard.

## 4.3 Dynamique de Schrödinger modifiée (GRW, Pearle, etc.)

A instants réguliers (ou aléatoires), le vecteur d'état subit des réductions qui tendent à localiser les particules dans l'espace: localisation spontanée.

4.3.1 Localisation par « hits » (GRW); le vecteur d'état est remplacé par:

$$|\Psi'(t)\rangle = \frac{F_j |\Psi(t)\rangle}{\langle \Psi(t) | (F_j)^2 | \Psi(t) \rangle} \quad F_j = c e^{-\alpha(\mathbf{R}-\mathbf{r}_j)^2/2}$$

Tous les processus  $j$  agissent en parallèle, chacun avec une probabilité:

$$\lambda \langle \Psi(t) | (F_j)^2 | \Psi(t) \rangle$$

avec: 
$$\sum_j (F_j)^2 = 1$$

Prenons une superposition cohérente de deux états localisés dans deux régions différentes de l'espace.

- (i) Si ces états mettent en jeu un petit nombre de particules, le terme nouveau introduit dans l'équation de Schrödinger n'a presque aucune influence; la probabilité qu'il en ait une est extrêmement faible.
- (ii) Si ces états mettent en jeu un nombre macroscopique de particules, le terme nouveau agit rapidement pour supprimer l'une des deux composantes de la superposition.

Ce mécanisme reproduit donc la réduction du vecteur d'état, dans le cadre d'une dynamique parfaitement unifiée.

$$i\hbar \frac{d\rho(t)}{dt} = [H(t), \rho(t)] + \lambda \sum_j [F_j \rho(t) F_j - \rho]$$

Il faut un certain compromis: pas trop de localisation, mais suffisamment pour éviter les superpositions cohérentes macroscopiques (chats de Schrödinger)

## 4.3.2 Localisation spontanée continue (CSL, P. Pearle):

On ajoute à l'hamiltonien un terme non-hermitique et stochastique, déterminé par un processus de Wiener  $W(t)$  (sans mémoire).

On suppose que la probabilité de chaque réalisation de ce processus dépend de la norme du vecteur d'état qu'il produit. Ceci introduit une non-linéarité dans l'équation dynamique qui brise la chaîne infinie de Von Neumann.

On obtient des prédictions semblables à GRW, mais dans un cadre plus large.

Evolution moyenne donnée par une équation pilote de Lindblad:

$$i\hbar \frac{d\rho(t)}{dt} = [H(t), \rho(t)] + \frac{\lambda}{2} \sum_{j=1}^N \left[ 2A_j \rho A_j - (A_j)^2 \rho(t) - \rho(t) (A_j)^2 \right]$$

Diosi, Penrose, etc. ont suggéré que l'origine du processus stochastique soit la gravité.

Dans ce type de théorie, le vecteur d'état représente directement la réalité physique.

La notion d'observateur, de mesure, etc. disparaît; un processus de mesure est un processus d'interaction particulier.

La notion de vecteur d'état de l'Univers a un sens.

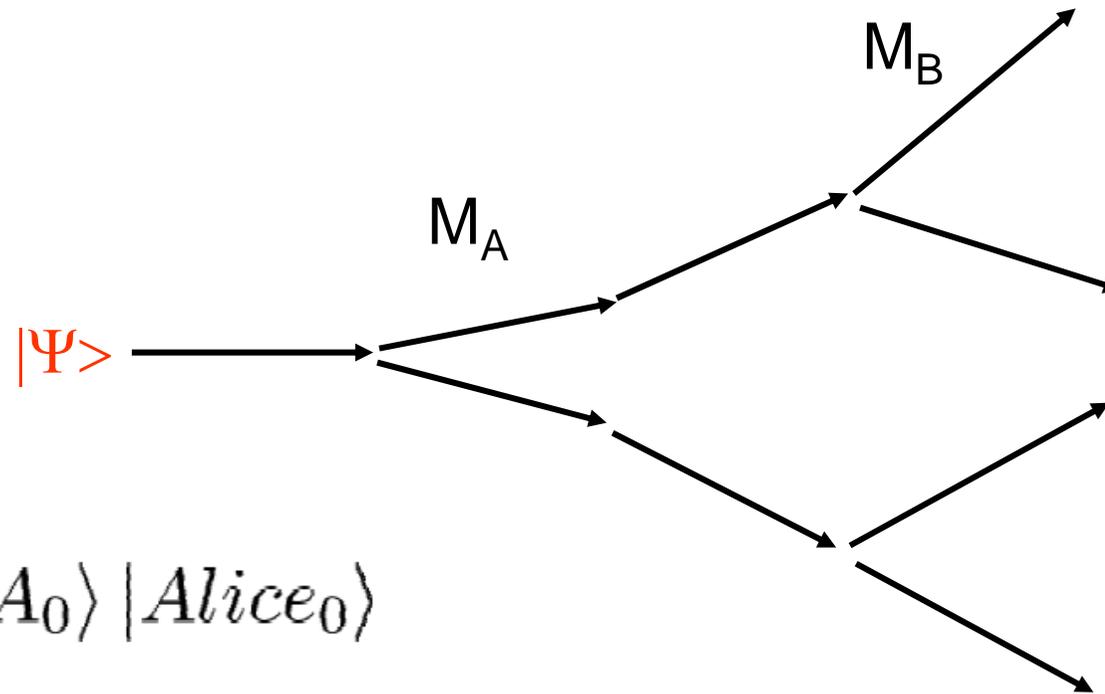
Il ne s'agit pas d'une autre interprétation de la théorie standard, contrairement à dBB, Everett, l'interprétation modale, relationnelle, etc.

Il s'agit d'une théorie différente, en principe testable sur le plan expérimental.

Cependant sa forme reste pour le moment indéterminée, pourvu qu'elle reste dans certaines limites.

Application pratique à l'étude des systèmes ouverts (solution des équations pilotes

## 4.4 Everett (mondes multiples)



$$|\Psi\rangle = |\varphi_0\rangle |A_0\rangle |Alice_0\rangle$$

$$|\Psi'\rangle = \alpha' |\varphi'_1\rangle |A'_1\rangle |Alice'_1\rangle + \beta' |\varphi'_2\rangle |A'_2\rangle |Alice'_2\rangle$$

$$|\Psi''\rangle = \sum_{i=1}^4 \alpha_i |\varphi''_i\rangle |A''_i\rangle |Alice''_i\rangle |Bob''_i\rangle$$

- La théorie d'Everett est déterministe: le vecteur d'état de l'Univers n'évolue que selon l'équation de Schrödinger. On peut parler ici aussi du vecteur d'état de l'Univers, indépendamment de tout rôle des observateurs.
- Cependant les observateurs perçoivent un indéterminisme, car la composante de leur « registre mémoire » sur chaque branche du vecteur d'état n'a aucun moyen de se rendre compte de l'existence des autres branches.
- Cette interprétation rappelle dBB, où toutes les branches du vecteur d'état continuent à se propager. Dans dBB, ce sont les positions bohmiennes qui rendent certaines branches « vides »; ici ce sont les registres mémoires qui produisent le même effet en restreignant spontanément leur enregistrement et leur lecture à une seule branche.
- Comme les différentes branches sont indépendantes, on peut aussi associer à chacune un « monde », d'où la version de la théorie appelée « MWI » (many-world-interpretation).

Trois conditions à remplir:

- 1) Les différentes composantes d'un même observateur sont totalement « indépendantes ». Différents observateurs doivent toujours être en accord lorsqu'ils comparent entre eux les résultats de leurs expériences (intersubjectivité).
- 2) Quand un observateur répète la même expérience, les fréquences d'occurrence qu'il perçoit doivent coïncider avec celles prédites par la règle de Born (mécanique quantique standard)
- 3) Il faut définir précisément la base privilégiée dans laquelle la perception des résultats de mesure se fait pour les observateurs. Dans la version MWI c'est encore plus essentiel puisqu'il faut définir la base dans laquelle se fait la ramification des différents univers.

# Conclusion

La mécanique quantique est, avec la relativité, l'essence de l'immense révolution conceptuelle de la physique du XX<sup>e</sup> siècle. Les progrès, tant théoriques qu'expérimentaux, ont été extraordinaires. De nouvelles percées se sont constamment produites, allant de la pure théorie à des applications très concrètes ; elles ont engendré des milliers de dispositifs et d'appareils qu'il n'était même pas possible de concevoir avant la mécanique quantique. De plus, notre compréhension actuelle de l'Univers fait intervenir la mécanique quantique, presque à chaque étape.

La condensation de Bose-Einstein dans les gaz, prédite en 1925 et observée en 1995

Mais, comme le dit H. Hertz, « les équations mathématiques sont parfois plus intelligentes que ceux qui les ont inventées »!

Il nous reste du travail si nous voulons vraiment comprendre le contenu de ces merveilleuses équations qui marchent si bien.

# Spin

Théorie de Pauli, chaque particule est décrite par un spineur à deux composantes. La vitesse de la particule est définie comme la somme des vitesses associées à chaque valeur du spin (elle est proportionnelle au courant local de probabilité, obtenu par trace sur les variables de spin).

On obtient alors une image où, non seulement la particule a une trajectoire, mais une orientation du spin en chaque point (obtenue à partir des valeurs locales du spineur).

De même qu'une particule ne va pas nécessairement en ligne droite dans l'espace libre, la direction de son spin peut tourner le long de sa trajectoire.

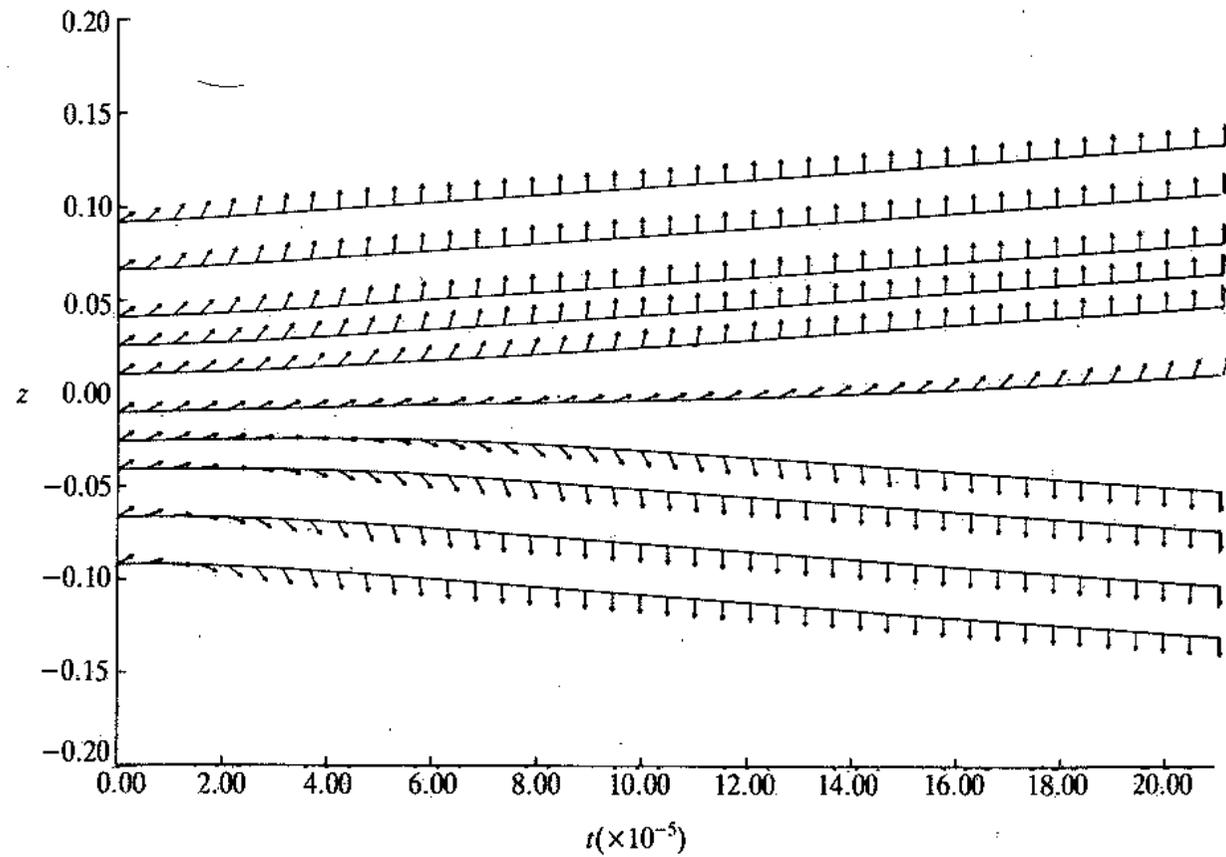
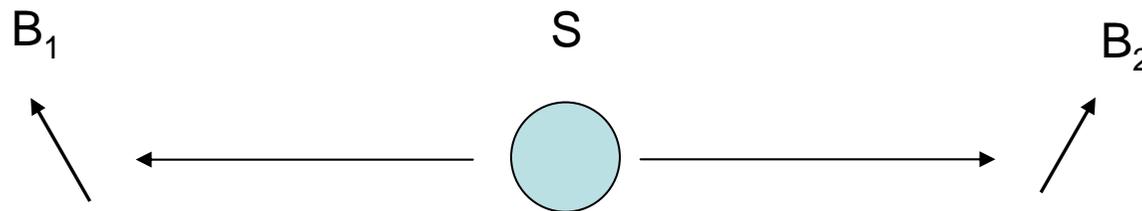


Fig. 9.13 Trajectories and orientations  $\theta(z, t)$  associated with Figs. 9.10 and 9.11 (from Dewdney, Holland and Kyprianidis (1986)).

Expérience EPRB: émission de deux spins dans des directions opposées dans un état de spin singulet



Comme la fonction d'onde n'est pas un produit, la déviation de la première particule par  $B_1$  et sa direction réagit sur la vitesse de la seconde particule d'une façon qui dépend de  $B_1$ . La non-localité est explicite et la violation des inégalités de Bell ne pose aucun problème.