

La version de de Broglie et Bohm (dBB) de la mécanique quantique



GRUPE d'HISTOIRE de la CHIMIE,
SOCIETE CHIMIQUE de FRANCE

μ -colloque Louis de Broglie
14 Déc. 2024, Société Chimique de France

F. Laloë (LKB, ENS)

1. La mécanique quantique, une théorie fantastique, mais dont certains aspects restent difficiles à comprendre
2. La version dBB de la théorie, une seule particule, plusieurs particules
3. Conclusion: pourquoi dBB ne remporte-t-elle pas le consensus général?

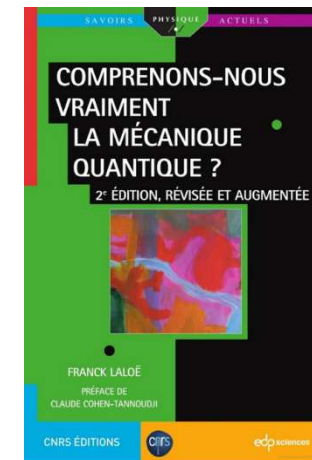
1- La mécanique quantique: une théorie triomphante, ... mais qui reste toujours délicate à « vraiment comprendre ».

La mécanique quantique est partout et fonctionne à merveille! Elle explique:

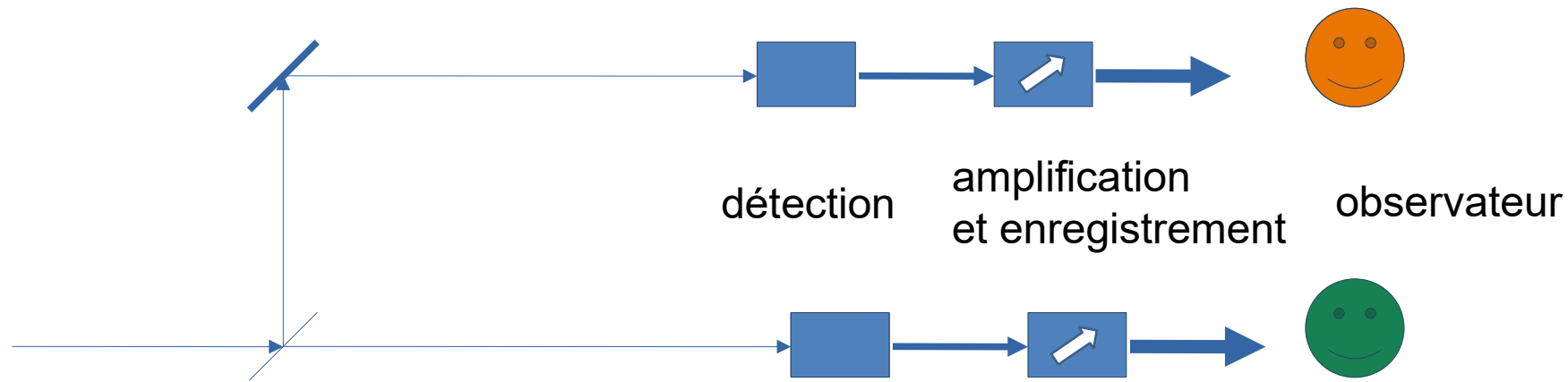
- la stabilité de la matière, qui classiquement implorerait
- la chimie, les propriétés des molécules, leur forme, leurs réactions, etc.
- toute la physique du solide → transistors — telecommunications, ordinateurs, Internet, etc.
- les lasers, horloges atomiques, la navigation et le GPS, etc.

Mais elle contient aussi d'étranges limitations internes; elle utilise une "dynamique unitaire" qui prédit les probabilités de résultats pour un ensemble d'expériences identiques, mais ne dit rien de ce qui se produit lors d'une réalisation unique de l'expérience.

Ce problème logique de cohérence interne a déjà été identifié par von Neumann dans son livre historique que la mécanique quantique (1932). On parle souvent de "régression logique de von Neumann" or "chaîne infinie", ou tout simplement de "problème de la mesure".



Considérons par exemple une expérience très simple:



$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}[|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle] \\
 &\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}[|\psi_1\rangle|D_1^*\rangle|D_2\rangle + |\psi_2\rangle|D_1\rangle|D_2^*\rangle] \\
 &\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}[|\psi_1\rangle|D_1^*\rangle|R_1^*\rangle|D_2\rangle|R_2\rangle + |\psi_2\rangle|D_1\rangle|R_1\rangle|D_2^*\rangle|R_2^*\rangle] \\
 &\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}[|\psi_1\rangle|D_1^*\rangle|R_1^*\rangle|O_1^*\rangle|D_2\rangle|R_2\rangle|O_2\rangle + |\psi_2\rangle|D_1\rangle|R_1\rangle|O_1\rangle|D_2^*\rangle|R_2^*\rangle|O_2^*\rangle]
 \end{aligned}$$

La chaîne de von Neumann ne s'arrête jamais! Les QSMDs (Quantum Superpositions of Macroscopically Distinct States) semblent émerger directement du formalisme, alors qu'elles ne sont jamais observées.

- La dynamique unitaire standard n'explique pas pourquoi un résultat unique émerge lors d'une réalisation d'une expérience quantique. Elle admet juste que les résultats apparaissent aléatoirement, « à partir de rien », et fournit des probabilités.

Mais pourquoi la dynamique d'une théorie physique serait-elle incapable de décrire ce qui se produit lorsqu'une expérience est réalisée une seule fois? Pensons à l'exemple du big bang.

- Plus généralement: la dynamique de la mécanique quantique est basée sur des équations différentielles linéaires qui semblent prédire, dans certains cas, l'apparition de QSMDS, par exemple une lune est délocalisée sur toute son orbite autour de la terre. Cela n'est pas observé. Les QSMDS sont LE problème fondamental de la mécanique quantique.

En conséquence, il est nécessaire de postuler des limites à cette dynamique linéaire, afin d'obtenir une description du monde macroscopique qui ressemble à ce que nous observons (et à la mécanique classique). Diverses interprétations réalisent ce programme de façons différentes.

Bohr (interprétation de Copenhague) : L'outil de base de la mécanique quantique, la fonction d'onde, ne décrit pas les propriétés physiques d'un système microscopique. Il ne concerne que des résultats de mesures, et permet de calculer les probabilités des différents résultats possibles avec chaque type d'appareillage. La fonction d'onde ne décrit donc pas une réalité, mais un état de nos connaissances (statut épistémique, et non ontique).

Von Neumann propose de résoudre le « problème de la mesure » en introduisant un postulat ad hoc, le « postulat de projection (ou de collapse) de von Neumann » . Ce postulat modifie la fonction d'onde lors de chaque mesure, en fonction du résultat obtenu.

Une mesure de position ne révèle donc pas où se trouvait la particule avant la mesure; elle indique quelle position elle a été “forcée de prendre” par cette mesure.

Dans les deux cas, il faut définir ce qu'est une mesure, quel type de processus d'interaction possède ce statut, où se situe la limite entre système mesuré et appareil de mesure (“cut de Heisenberg”), quel est le rôle de l'observateur (anthropocentrisme), etc.

2. Théorie dBB (de Broglie et Bohm)

Mécanique quantique standard

$$\Psi = R e^{iS} \quad \text{Courant de probabilité:} \quad \mathbf{J} = \frac{\hbar}{m} |\Psi|^2 \nabla S$$

Conservation locale de la probabilité: $\frac{\partial}{\partial t} |\Psi|^2 + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0$

Mécanique quantique dBB : enrichissement de la théorie standard

On prend le courant de probabilité au sérieux : à la fonction d'onde standard d'une particule sans spin, on ajoute une position \mathbf{Q} , dont le mouvement est donné par l'équation de guidage:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{Q} = \frac{\hbar}{m} \nabla S$$

Lorsque la même expérience est répétée plusieurs fois, la fonction d'onde reste la même, mais les valeurs initiales de la position \mathbf{Q} sont aléatoires, distribuées selon la distribution $|\Psi|^2$ (condition d'équilibre quantique).

On peut montrer que la condition d'équilibre quantique reste satisfaite à tout instant t ultérieur. Cet équilibre est en fait un attracteur de la dynamique (Valentini).

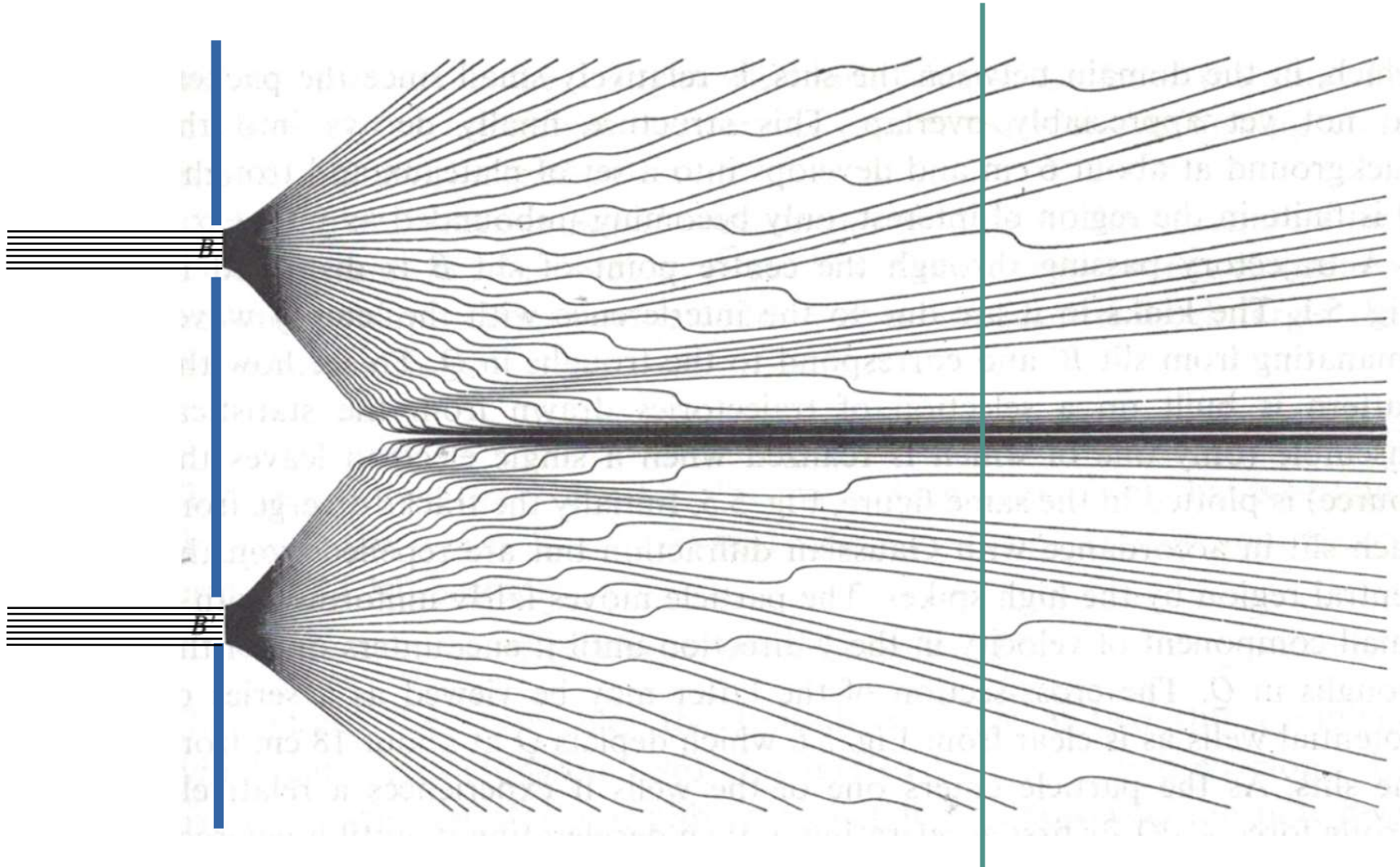
2-a Une particule (de Broglie)

La particule a donc une position, comme en mécanique classique, mais cette position n'est connue qu'après une mesure. L'indéterminisme lors de la mesure de la théorie quantique standard est remplacé par un indéterminisme sur les conditions initiales.

La variable Q est cependant considérée comme la position réelle de la particule, alors que la fonction d'onde a juste comme rôle de guider cette position dans l'espace (onde pilote de de Broglie).

La notion de trajectoire, qui avait totalement disparu de la mécanique quantique standard, redevient pertinente. Les trajectoires sont cependant très différentes des trajectoires de la mécanique classique; par exemple, une particule libre ne se déplace plus en ligne droite.

Un exemple : l'expérience d'interférence à deux fentes



2-b Plusieurs particules (Bohm)

La fonction d'onde est :

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = R(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) e^{i\xi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)}$$

Les deux positions \mathbf{Q}_1 et \mathbf{Q}_2 sont guidées par :


$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{Q}_1(t) &= \frac{\hbar}{m} \nabla_{\mathbf{r}_1} \xi(\mathbf{r}_1 = \mathbf{Q}_1, \mathbf{r}_2 = \mathbf{Q}_2) \\ \frac{d}{dt} \mathbf{Q}_2(t) &= \frac{\hbar}{m} \nabla_{\mathbf{r}_2} \xi(\mathbf{r}_1 = \mathbf{Q}_1, \mathbf{r}_2 = \mathbf{Q}_2) \end{aligned}$$

L'évolution de chacune des positions dépend de la valeur de l'autre, ce qui produit des **effets non locaux** (théorème de Bell, etc.)

L'espace qui intervient n'est pas l'espace ordinaire, mais **l'espace des configurations**

Mesure quantique

En théorie dBB, une mesure donne lieu à une interaction ordinaire, comme toutes les autres interactions qui se produisent sans intervention humaine.

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots; t_0) = [\alpha\phi_1(\mathbf{r}) + \beta\phi_2(\mathbf{r})] \Phi_0^M(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots)$$
$$\Rightarrow \Psi(\mathbf{r}, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots; t_M) = [\alpha\phi'_1(\mathbf{r})\Phi_1^M(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots) + \beta\phi'_2(\mathbf{r})\Phi_2^M(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots)]$$


Fonction d'onde relative et fonction d'onde « vide »

La réduction de la fonction d'onde de von Neumann est assurée par la dynamique, sans avoir besoin d'un postulat ad hoc.

Applications : dynamique moléculaire, processus d'adsorption sur une surface, nano-électronique, simulations d'atomes en champ laser intense .. et cosmologie quantique.

Benseny, Albadera, Sanz, Mompert, Oriols

« Applied Bohmian mechanics », Eur. J. Phys. J. 68286 (2014).

En cosmologie, l'Univers ne nous est donné qu'une seule fois! Utiliser une théorie qui ne fait de prédictions pour un ensemble d'expériences identiques répétées pose des problèmes.

En cosmogénèse primordiale quantique, mécanique quantique et relativité générale jouent toutes deux un rôle essentiel. Les équations couplées de l'évolution de la matière quantique et de la métrique d'espace-temps peuvent être résolues si la métrique de l'espace-temps est traitée comme une variable bohmienne.

P. Peter, E. Pinho and N. Pinto-Neto, "Tensor perturbations in quantum cosmological backgrounds" JCAP 07, 014 (2005); Phys. Rev. D73, 104017 (2006).

Synthèse: qu'apporte l'enrichissement dBB de la mécanique quantique?

- une description visuelle des processus quantiques (trajectoires, etc.)
qui, parfois, permet des calculs intéressants.
- une ontologie si l'on considère que les positions des particules décrivent directement la réalité
- le déterminisme de la dynamique. Hmm..
- Une **unification** de cette dynamique: il n'existe plus deux processus d'évolution temporelle pour la description d'un standard système physique; les mesures deviennent un processus d'interaction comme tous les autres.

3- Conclusion: mais alors, pourquoi dBB reste-t-il un point de vue minoritaire?

On considère en physique que la théorie quantique fondamentale est la théorie des champs, qui est relativiste (relativité restreinte) et inclut la possibilité de créations et annihilations de particules. C'est cette théorie qui est utilisée en physique des particules, conduit au « modèle standard » (quarks et gluons) et à l'unification entre électromagnétisme, interactions faibles, et interactions fortes.

L'équation de Schrödinger n'est considérée que comme une approximation, certes valable dans de nombreux cas, mais pas une équation de base. Or dBB ne s'applique pas à la théorie quantique des champs, mais reste limité à la théorie de Schrödinger (ou de Dirac à une particule).

De ce point de vue fondamental, la théorie dBB est un échec, et cela explique probablement pourquoi beaucoup de physiciens ne s'y intéressent pas.

Conclusion (bis)

- La mécanique quantique est, comme la relativité générale, l'une des plus grandes constructions de l'esprit humain. Son pouvoir de prédiction est immense, allant du microscopique au macroscopique, de la théorie du modèle standard des particules élémentaires à celle de la cosmogénèse, en passant par la supraconductivité au fonctionnement des étoiles.

Elle possède un statut particulier : tout le monde est d'accord sur ses équations mathématiques et la façon de les utiliser, mais il n'existe aucun accord général sur le sens physique des objets mathématiques qui apparaissent dans ces équations. Quel est le statut de la fonction d'onde, ou du vecteur d'état, que représentent-ils ? Ont-ils un caractère objectif ou subjectif ?

On peut dire, comme le faisait Einstein, que c'est une théorie incomplète: elle prédit merveilleusement et en grands détails les phénomènes microscopiques, mais sa dynamique est incapable de rendre compte de ce qui se passe lors de l'interaction entre un système microscopique et un appareil de mesure macroscopique, si l'expérience n'est faite qu'une seule fois. Il est nécessaire d'ajouter à la dynamique un (ou des) postulats ad hoc, ou alors de changer cette dynamique.