

*PEUT-ON COMPRENDRE
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?*

Jean BRICMONT

SAPHYBRU,
28 OCTOBRE 2017

TROISIÈME COURS :
PEUT-ON PENSER AUTREMENT
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

RÉSUMÉ DES COURS PRÉCÉDENTS

DEUX “MYSTÈRES”:

LA SUPERPOSITION ET LA NON-LOCALITÉ.

1. LA SUPERPOSITION

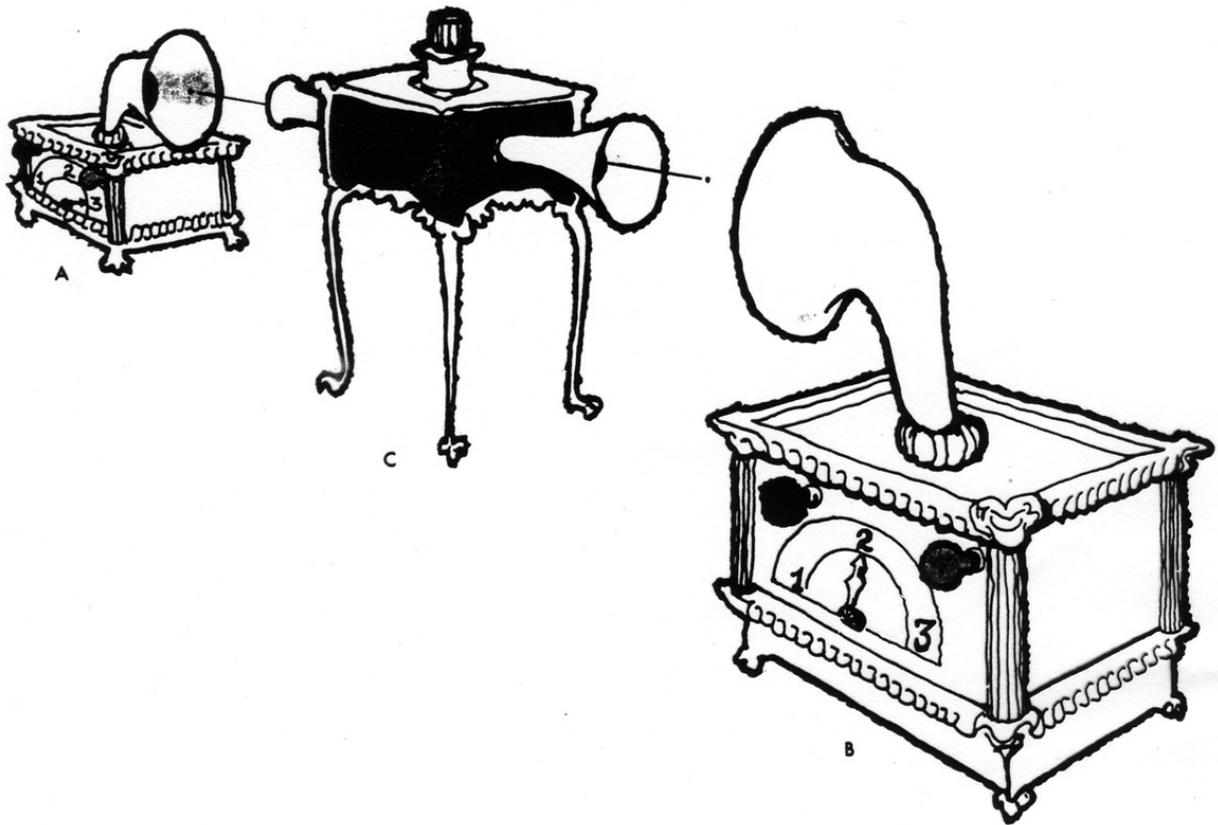
Il existe un formalisme mathématique, qui introduit des états “superposés”, représentés par des vecteurs, qui est totalement contre-intuitif, qui permet de calculer les probabilités de *résultats de mesures* mais rien d’autre.

En particulier, l'état du système ne représente pas (dans la vision standard, orthodoxe) la probabilité que le système *ait* telle ou telle propriété ou qu'il *soit* en tel ou tel endroit, mais seulement qu'une "mesure" produise tel ou tel résultat.

L'état évolue selon des règles différentes selon qu'on l'observe ou non (évolution linéaire, continue et déterministe ou réduction aléatoire). Mais l'observation est un *deus ex machina* dans la version orthodoxe. Elle mène au paradoxe du "chat".

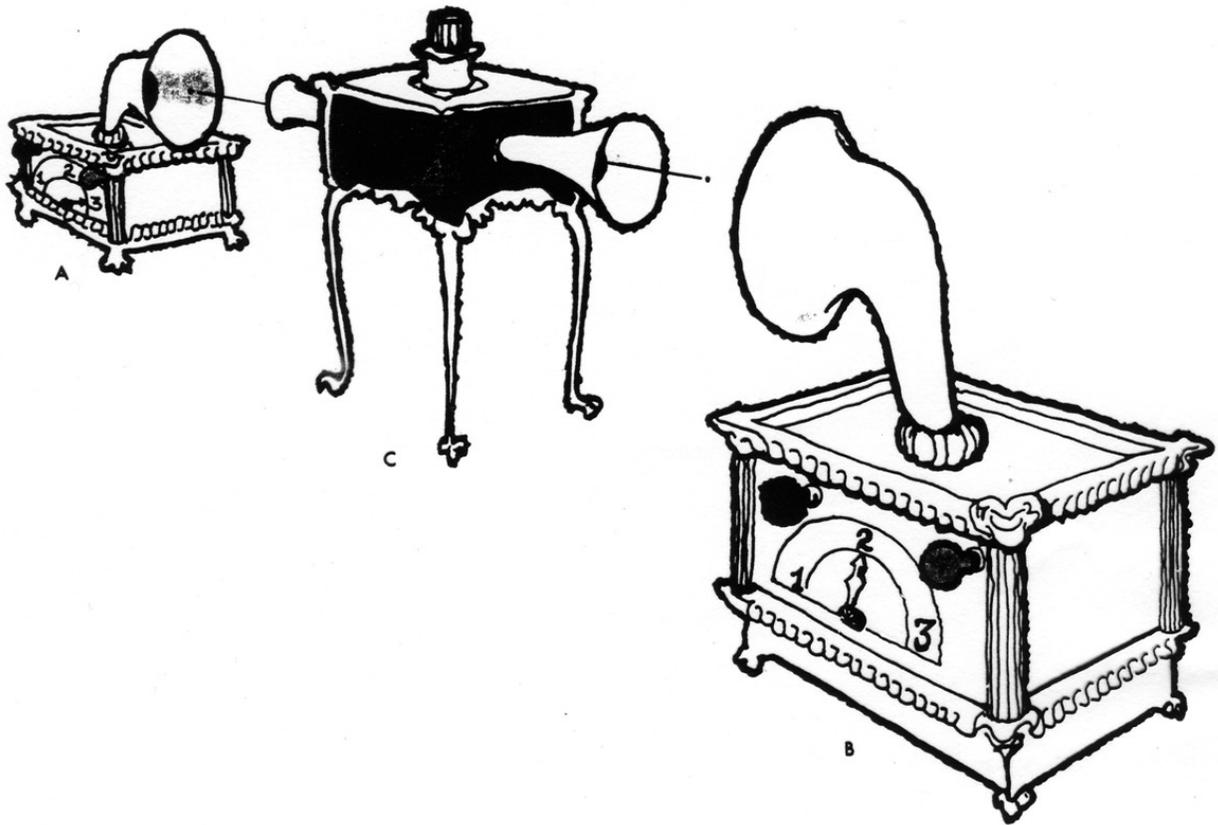
Les théorèmes sur les variables cachées montrent qu'il n'est pas facile d'interpréter l'état quantique comme assignant une distribution de probabilité aux propriétés que pourraient posséder les systèmes quantiques.

2. NONLOCALITÉ OU ACTION À DISTANCE



|état intriqué des deux particules >

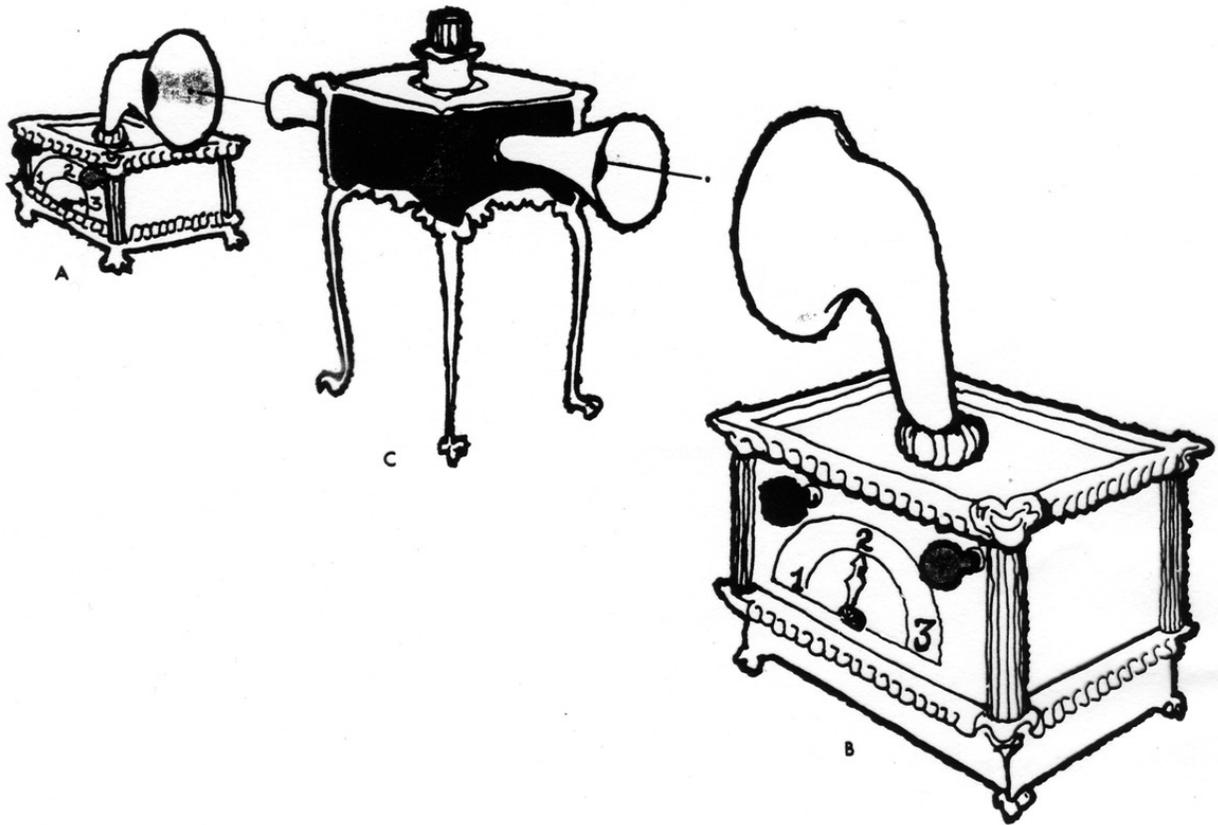
$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \uparrow\rangle |B \downarrow\rangle - |A \downarrow\rangle |B \uparrow\rangle)$$



Si on “mesure” le spin dans la direction 1 en A , avant de le mesurer en B , et qu’on voit \uparrow , l’état devient $\Rightarrow |A \ 1\uparrow\rangle |B \ 1\downarrow\rangle$.

Si on voit \downarrow , l’état devient $\Rightarrow |A \ 1\downarrow\rangle |B \ 1\uparrow\rangle$.

On change ainsi *instantanément* l’état en B .



Mais si on mesurait le spin dans la direction 1 en B , avant de le mesurer en A , on changerait *instantanément* l'état en A .

La même chose est vraie pour d'autres directions:

|état des deux particules >

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \uparrow \uparrow\rangle |B \downarrow \downarrow\rangle - |A \downarrow \downarrow\rangle |B \uparrow \uparrow\rangle)$$

ou

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \uparrow \uparrow\rangle |B \downarrow \downarrow\rangle - |A \downarrow \downarrow\rangle |B \uparrow \uparrow\rangle)$$

Or, si on admet la localité ou que l'on rejette toute forme d'action à distance:

“Ce qui existe réellement en un point B ne devrait pas dépendre du type de mesure qui est faite en un autre point A de l'espace ; cela devrait également être indépendant du fait que l'on mesure ou non quelque chose en A ”.

ALBERT EINSTEIN

On en arrive à l'idée que le spin dans la direction 1 ET dans les directions 2 et 3 doivent être déterminés en *B avant* la mesure. C'est ce que disaient EPR en 1935.

MAIS

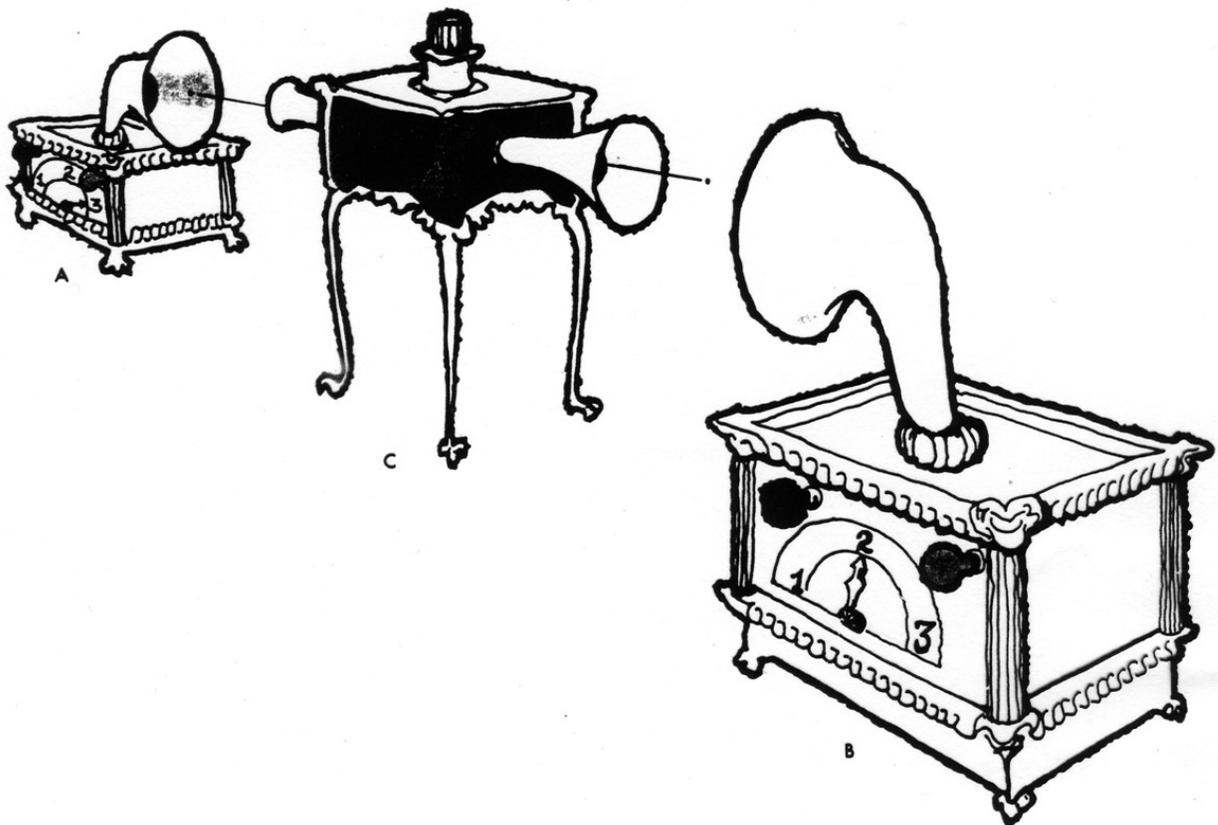
Cette supposition

(à elle seule)

est contredite par les corrélations entre mesures de spin dans des directions différentes pour les particules A et B.

Partie Bell (1964) de l'argument.

DONC, le choix de l'orientation de l'aiguille en *A* affecte instantanément et aussi loin que l'on veut, la situation physique en *B*!!! C'est cela la non localité ou l'action à distance.



“Ce qui existe réellement en un point B dépend du type de mesure qui est faite en un autre point A de l'espace ; cela *n'est pas* indépendant du fait que l'on mesure ou non quelque chose en A ”.

Ou :

Donc, on *ne peut pas* nier que l'intervention d'un côté a une influence causale sur l'autre côté.

(J. Bell)

QUE FAIRE DES DEUX MYSTÈRES ?

Peut-on se débarrasser de la non-localité ?

NON !

Peut-on se débarrasser de l'anthropocentrisme
c'est-à-dire du caractère, central, irréductible,
fondamental de la *mesure* ? OUI !

Comment?

*COMMENÇONS PAR UNE ANGOISSE
EXISTENTIELLE.*

Suis-je un vecteur Ψ dans un espace vectoriel?

Vecteur! Vecteur! Est-ce que j'ai une gueule de vecteur (Arletty)?

Et vous?

Une fois qu'on y réfléchit, il est évident que la mécanique quantique ordinaire ne peut pas être complète. Elle prédit avec une extrême précision les résultats de mesure, mais ne dit rien sur ce qui se passe dans le monde en dehors des laboratoires.

CE DONT NOUS AVONS BESOIN:

Une théorie qui possède une “ontologie” ou qui possède des “variables cachées”.

C'est-à-dire qui nous dit ce qui existe en dehors des laboratoires, et qui n'est pas réduit à l'état quantique, puisque celui-ci nous dit seulement ce qui se passe dans les laboratoires.

Les mesures et leurs résultats devraient être des conséquences de cette théorie et non pas un *deus ex machina*.

A cause des théorèmes sur les variables cachées, cette ontologie ne peut pas inclure les valeurs de toutes les quantités “mesurables”.

Une telle théorie existe et cela depuis 1927...

La théorie dBB- de Broglie (1927), Bohm
(1952), et Bell, est une:

Théorie de “variables cachées”

Qui ne sont nullement cachées

Théorie qui élimine entièrement le rôle de
l’observateur

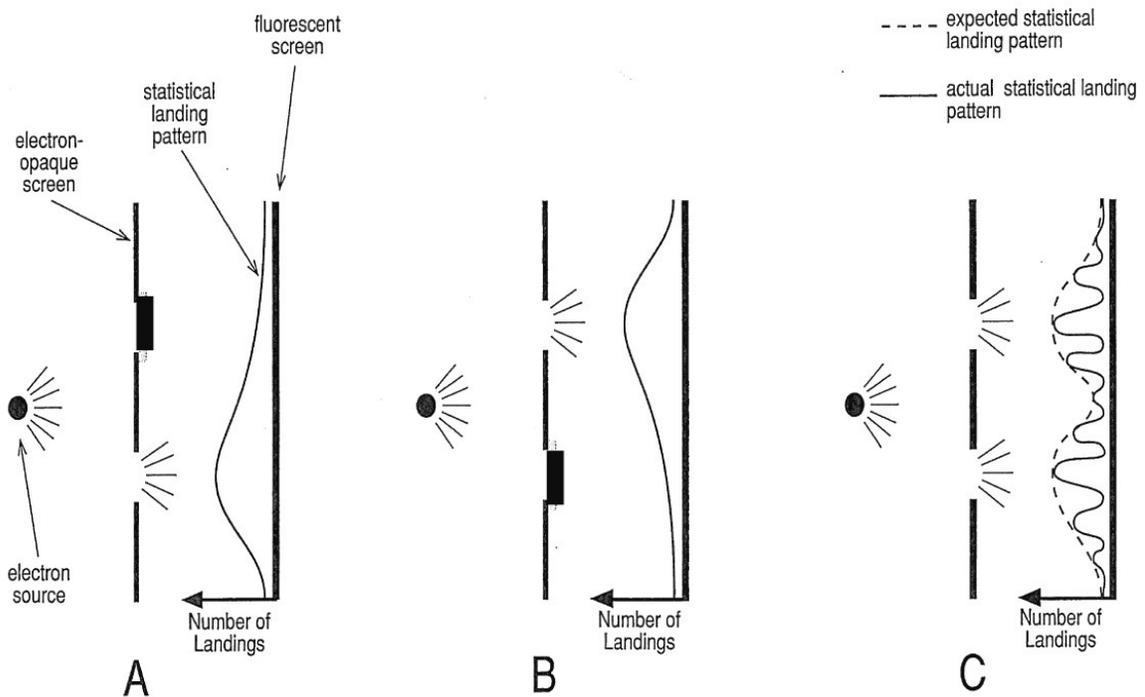
Théorie qui n'est pas réfutée par les théorèmes
sur les variables cachées

Qui rend compte de toutes les expériences
justifiant la mécanique quantique

Qui permet de comprendre le rôle "actif" de
l'appareil de mesure, c'est-à-dire de l'intuition
de Bohr (mais sans en faire un a priori philosophique).

Qui explique, dans la mesure où c'est pos-
sible, la non-localité.

D'ACCORD ! REPENSONS À L'EXPÉRIENCE DES DEUX TROUS



COMMENT LES ÉLECTRONS PEUVENT-ILS ÊTRE À LA FOIS ONDE ET PARTICULE ?

ÉLÉMENTAIRE MON CHER BOHR!

CE SONT DES PARTICLES *GUIDÉES*

PAR DES ONDES.

MÉCANIQUE DE DE BROGLIE-BOHM

ÉTAT: $(| \text{état quantique } \rangle, \mathbf{X})$

$\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_N)$ représente les positions de particules qui existent indépendamment du fait qu'on les "regarde" ou qu'on les "measure".

Ce sont des “variables cachées” en ce sens qu’elles ne sont pas incluses dans la description purement quantique $|\text{état quantique}\rangle$, mais elle ne sont nullement cachées: ce sont ces positions que l’on détecte directement, par exemple sur l’écran dans l’expérience des deux trous.

ÉVOLUTION TEMPORELLE :

1. ÉQUATION de SCHRÖDINGER pour l'évolution de | état quantique \rangle , pour tous les temps et en toutes circonstances *que l'on "mesure" quelque chose ou non.*

2. ÉQUATION PILOTE

Les positions des particules évoluent au cours du temps $\mathbf{X}(t) = (X_1(t), \dots, X_N(t))$. Leur mouvement est déterminé par l'état quantique: leur vitesse est une fonction de la fonction d'onde.

$$\frac{dX_k(t)}{dt} == F(\Psi(X_1(t), \dots, X_N(t)))$$

Plus précisément:

$$\frac{dX_k(t)}{dt} = V_{\Psi}^k(\mathbf{X}(t))$$

$$= \frac{\hbar}{m_k} \frac{\text{Im}(\Psi^* \nabla_k \Psi)}{\Psi^* \Psi}(X_1(t), \dots, X_N(t))$$

avec

$$\nabla_k = \frac{\partial}{\partial X_k}$$

Si on écrit $\Psi = Re^{iS}$,

$$\frac{dX_k(t)}{dt} = \nabla_k S(X_1(t), \dots, X_N(t)).$$

REMARQUE IMPORTANTE: POUR N
PARTICULES EN 1 DIMENSION

$$\Psi = \Psi(X_1, \dots, X_N)$$

EST UNE FONCTION DÉFINIE SUR \mathbb{R}^N .

POUR N PARTICULES EN 3 DIMEN-
SION, Ψ SERA DÉFINIE SUR \mathbb{R}^{3N} .

NOTE: TRÈS DIFFÉRENT DE LA PHYSIQUE
CLASSIQUE.

SI ON A DEUX CHARGES, Q_1 ET Q_2
ENGENDRANT CHACUNE UN CHAMP
ÉLECTRIQUE $E_1(x, y, z)$ ET $E_2(x, y, z)$,
TOUS DEUX DÉFINIS SUR \mathbb{R}^3 ,

LE CHAMP TOTAL DÛ AUX DEUX CHARGES
EST:

$$E(x, y, z) = E_1(x, y, z) + E_2(x, y, z),$$

ET EST ENCORE DÉFINI SUR \mathbb{R}^3 .

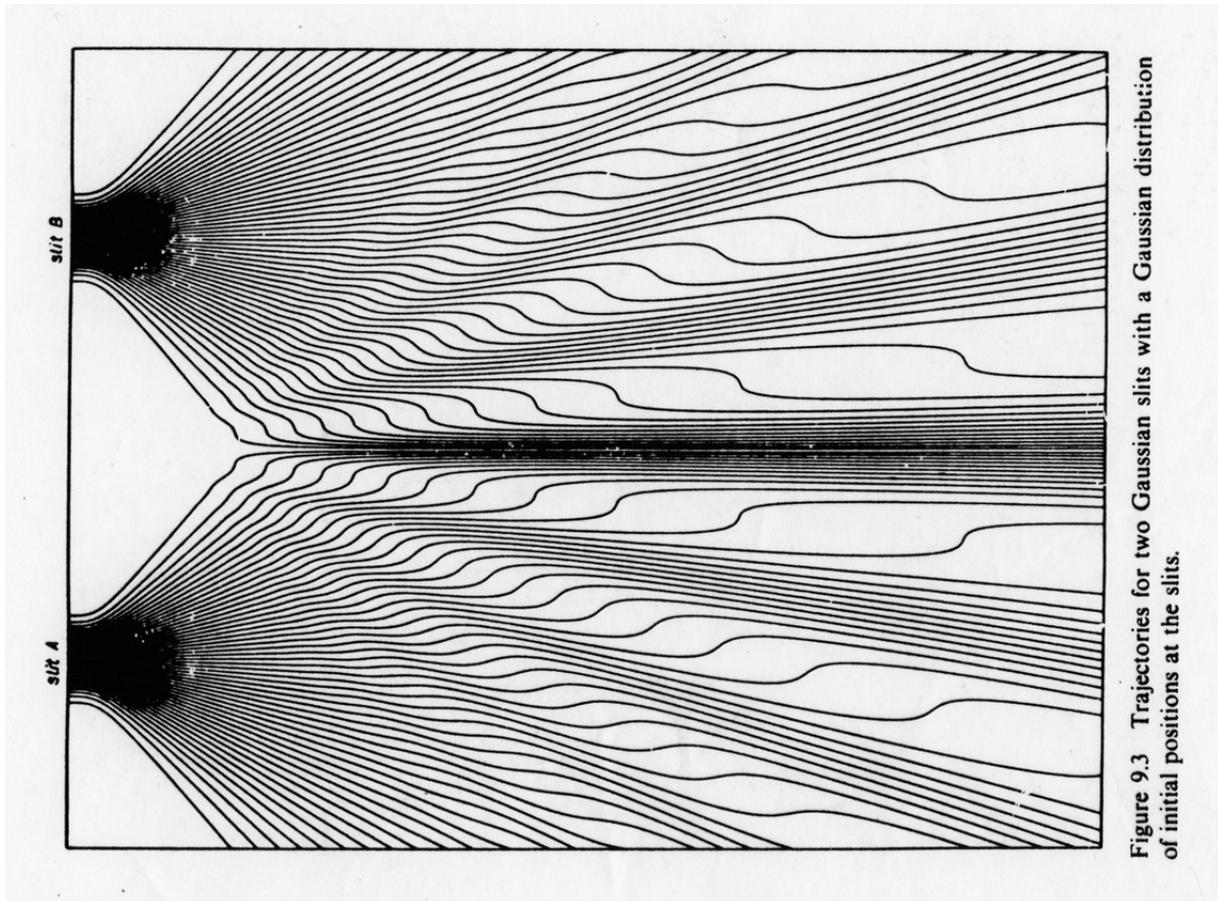
Si on a deux particules en trois dimensions, de coordonnées x_1, y_1, z_1 et x_2, y_2, z_2 , leur fonction d'onde est une fonction sur \mathbb{R}^6 :

$$\Psi = \Psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2).$$

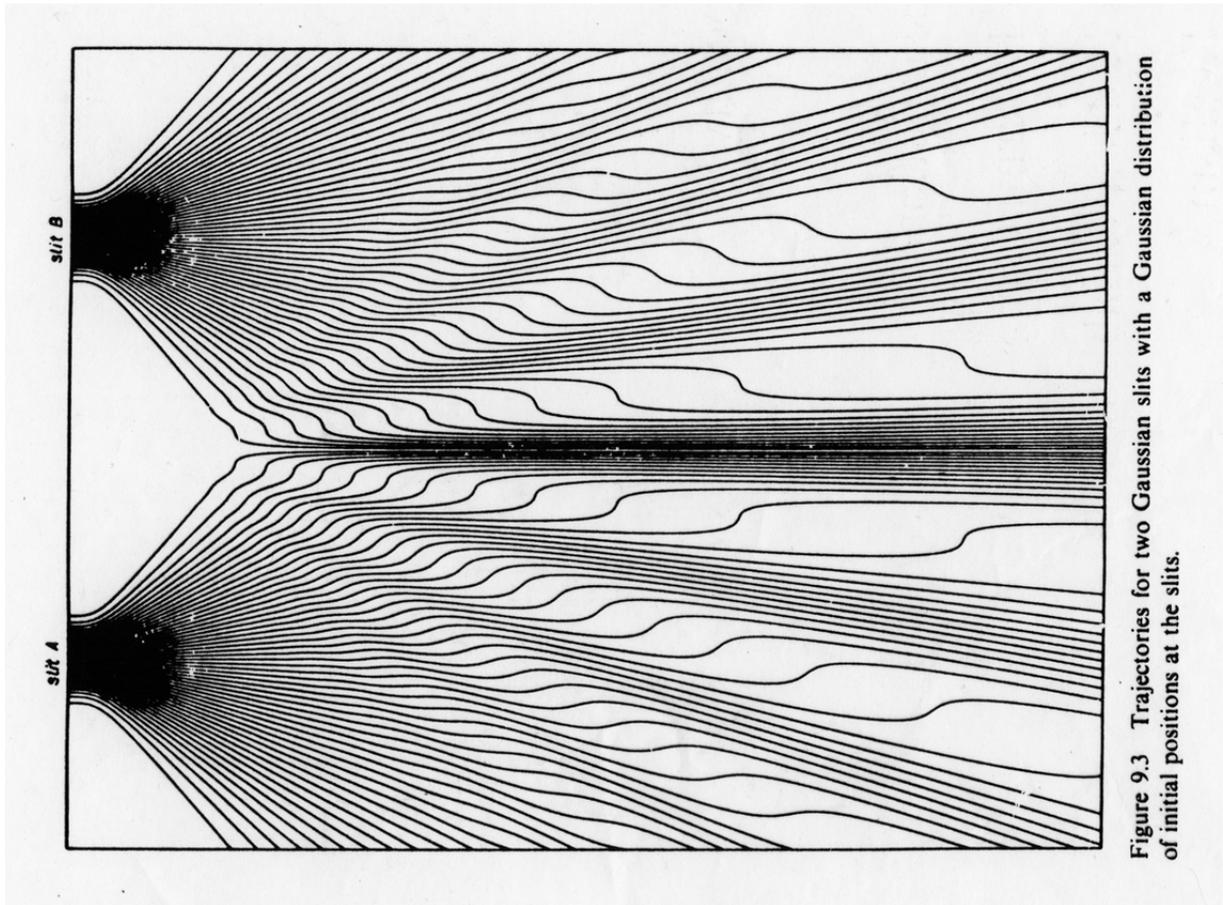
C'est l'origine de la non-localité et la raison pour laquelle la fonction d'onde n'était pas considérée comme "réelle".

Revenons à une particule.

Expérience des deux trous: solution numérique de la dynamique de Bohm.

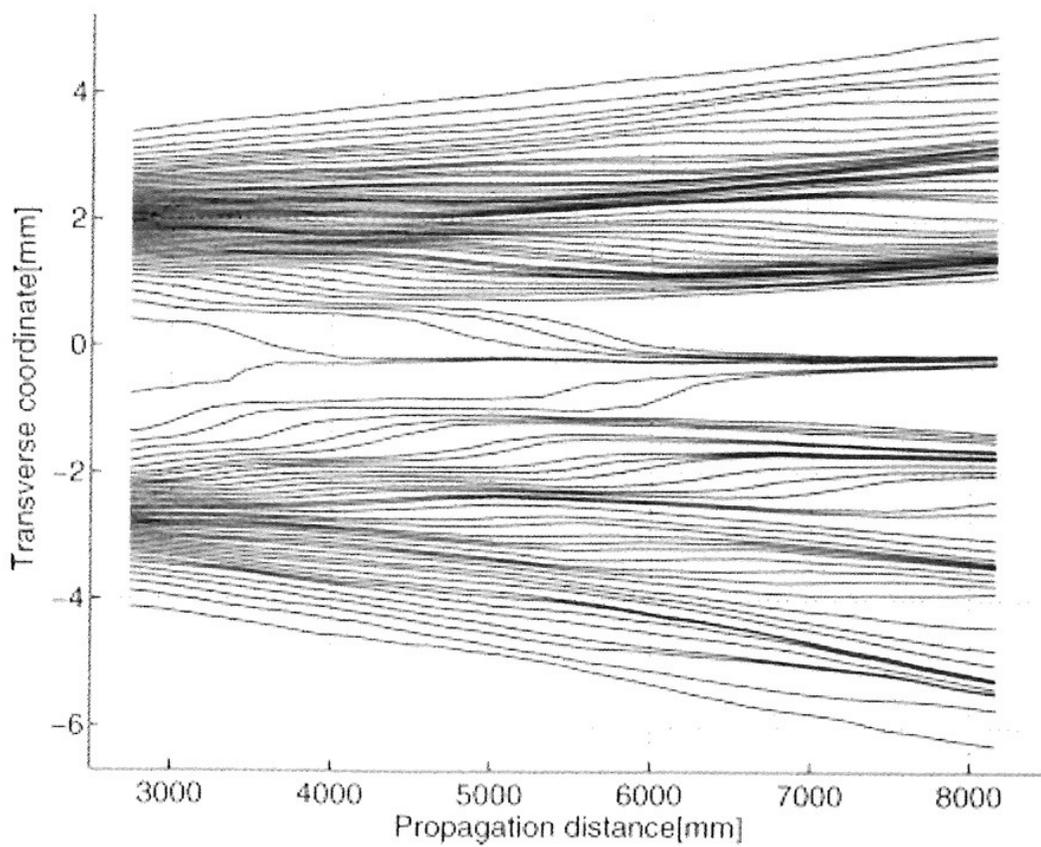


Mouvement *dans le vide* hautement *non-classique*!!



Notez que l'on peut déterminer a posteriori le trou par lequel la particule est passée!

Expérience récente (Science, juin 2011).



Il est clair que l'expérience à deux trous ne peut en aucune façon être réconciliée avec l'idée que les électrons se déplacent selon des chemins. En mécanique quantique, il n'y a pas de concept de chemin d'une particule.

LANDAU et LIFSHITZ

Est-ce si clair que cela?

N'est-il pas évident, étant donné la petitesse des scintillations sur l'écran, que nous avons affaire à une particule? Et n'est-il pas évident, étant donné les franges d'interférence et de diffraction, que le mouvement de la particule est dirigé par une onde?

De Broglie a montré en détail comment le mouvement de la particule, passant par seulement un des trous de l'écran pouvait être influencé par des ondes se propageant à travers les deux trous. Et influencé d'une façon telle que la particule ne va pas là où les ondes s'annulent, mais est attirée là où elles coopèrent.

Cette idée me semble si naturelle et simple pour résoudre le dilemme onde-particule, que le fait qu'elle soit si généralement ignorée me paraît être un grand mystère.

J. BELL

TROIS QUESTIONS:

**-COMMENT REPRODUIRE LES
PRÉDICTIONS STATISTIQUES?**

**-QUE DEVIENNENT LES
MESURES ET COMMENT
ÉCHAPPER AUX THÉORÈMES
SUR LES VARIABLES
CACHÉES?**

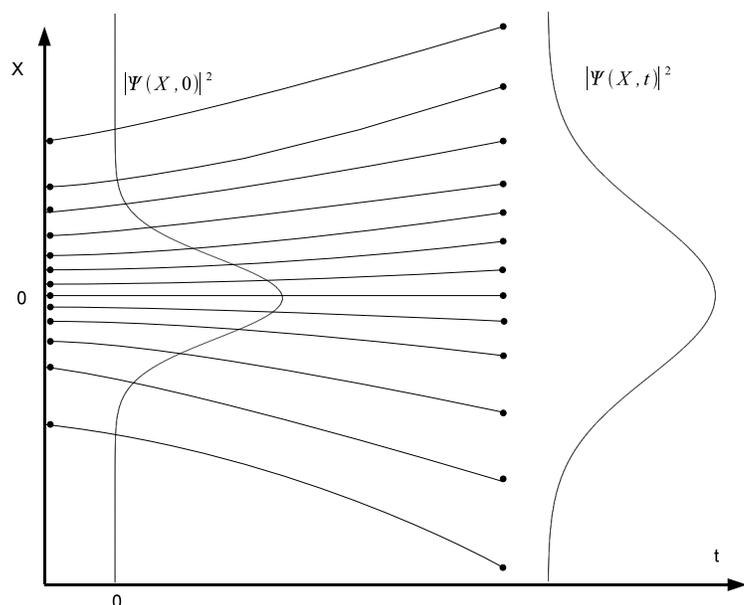
-QUID DE LA NON-LOCALITÉ?

COMMENT LA THÉORIE DE DE
BROGLIE-BOHM REND-ELLE
COMPTE DES PRÉDICTIONS
STATISTIQUES DE LA
MÉCANIQUE QUANTIQUE?

Par l'ÉQUIVARIANCE:

Si la densité des particules à un temps initial ρ_0 est donnée par $\rho_0(X) = |\Psi(X, 0)|^2$, pour une fonction d'onde initiale $\Psi(X, 0)$ ($X \in \mathbb{R}$, pour simplifier), alors, la densité des particules à des temps ultérieurs ρ_t sera donnée par $\rho_t(X) = |\Psi(X, t)|^2$, où $\Psi(X, t)$ est la solution de l'équation de Schrödinger et ρ_t vient de l'équation pilote ($m_k = 1, \hbar = 1$):

$$\frac{d}{dt}X_k = \nabla_k S, \text{ avec } \Psi = Re^{iS}.$$



Chaque point représente la position de la particule, au temps $t = 0$ ou au temps t . Ces points sont reliés par des trajectoires.

La densité des particules est (approximativement) donnée par $|\Psi(X, 0)|^2$ à la gauche de l'image et par $|\Psi(X, t)|^2$ à droite.

Donc, si nous supposons que $\rho_0 = |\Psi_0|^2$ à un temps initial, ce sera vrai pour tous les temps.

DOUBLE STATUT de Ψ :

– Loi gouvernant le mouvement des particules.

– Gouverne également la distribution statistique des positions des particules: $|\Psi|^2$

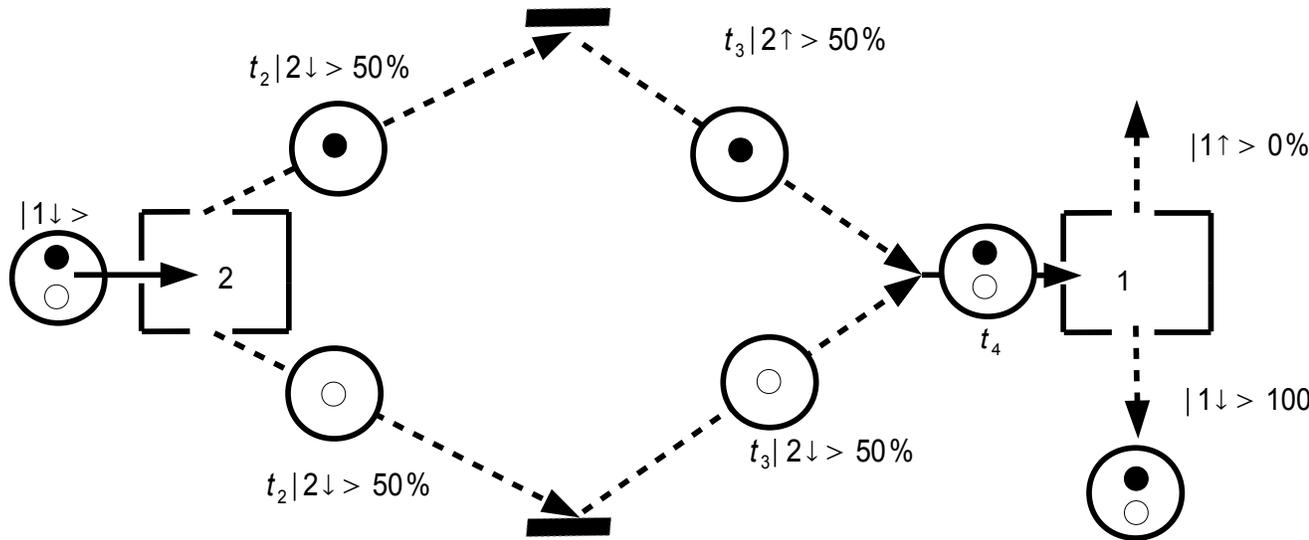
(Comparer avec l'hamiltonien $\mathcal{H} \sim -\log \Psi$

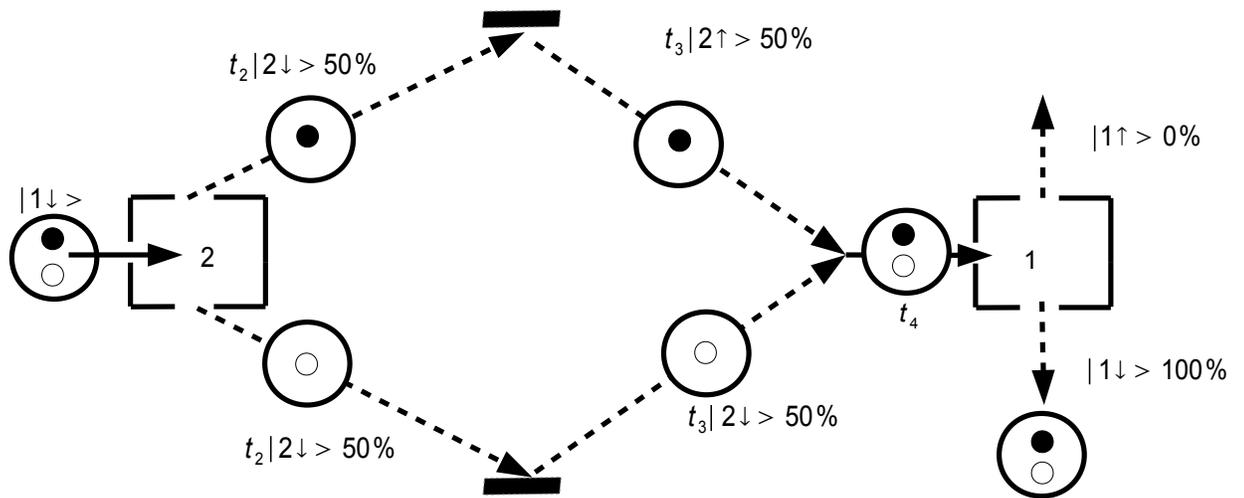
et $|\Psi|^2 \sim \exp(-\beta\mathcal{H})$, avec $\beta = 2$.)

**COMMENT LA THÉORIE DE DE
BROGLIE-BOHM REND-ELLE
COMPTE DES EXPÉRIENCES
AVEC LE SPIN ET DE LA
NON-EXISTENCE DES
VALEURS PRÉEXISTANTES DU
SPIN?**

Commençons par l'interférence dans l'expérience

de Mach-Zehnder:





en t_1

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

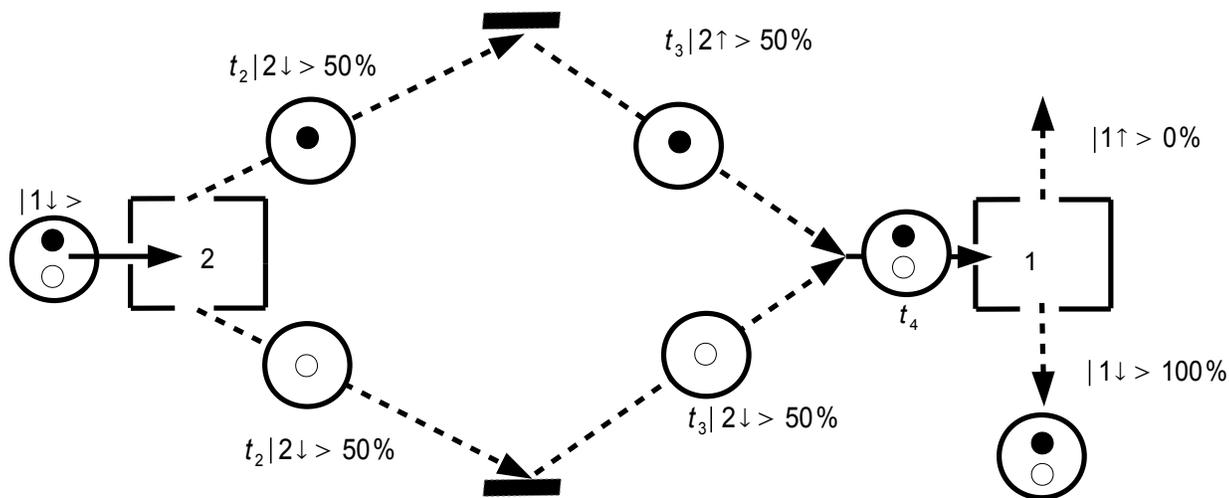
en t_2 et t_3

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|2\uparrow\rangle \quad | \text{chemin}2 \uparrow\rangle$$

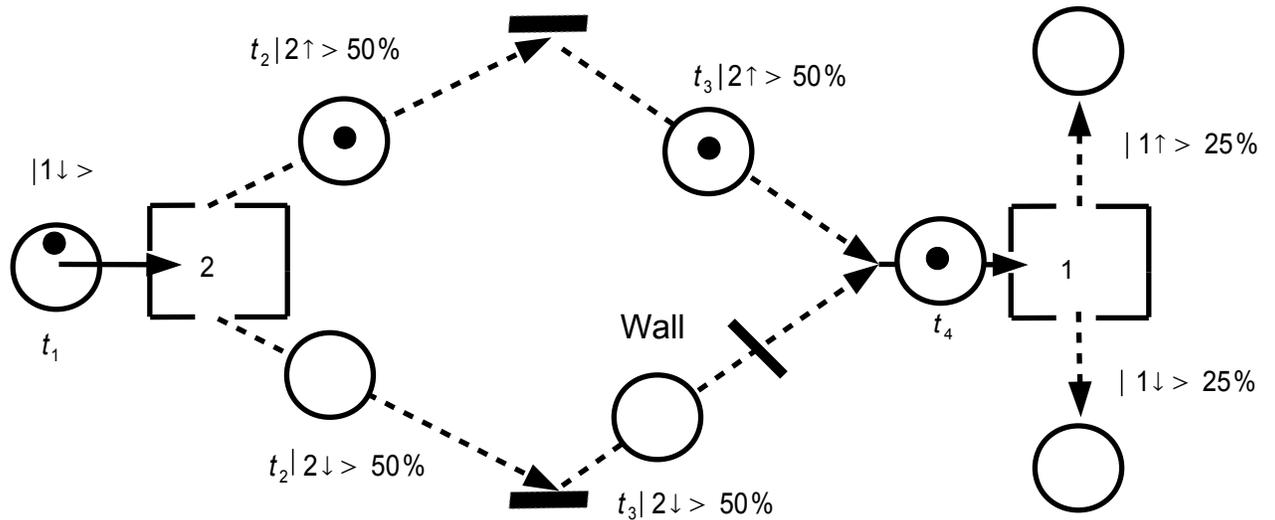
$$- |2\downarrow\rangle \quad | \text{chemin}2 \downarrow\rangle)$$

La particule suit un chemin unique, mais l'onde passe par les deux chemins, comme dans l'expérience des deux trous.

La particule est toujours guidée par la partie de la fonction d'onde dans laquelle elle se trouve.



$$\begin{aligned}
 &\text{en } t_4 \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|2\uparrow\rangle - |2\downarrow\rangle) |\text{chemin } \rightarrow\rangle \\
 &= |1\downarrow\rangle |\text{chemin } \rightarrow\rangle \rightarrow 100\% 1\downarrow
 \end{aligned}$$



Bloquer le chemin $2 \downarrow$ change la fonction d'onde:

en t_3 au-delà du mur:

$\rightarrow |2 \uparrow\rangle$ | chemin $2 \uparrow$ \rangle

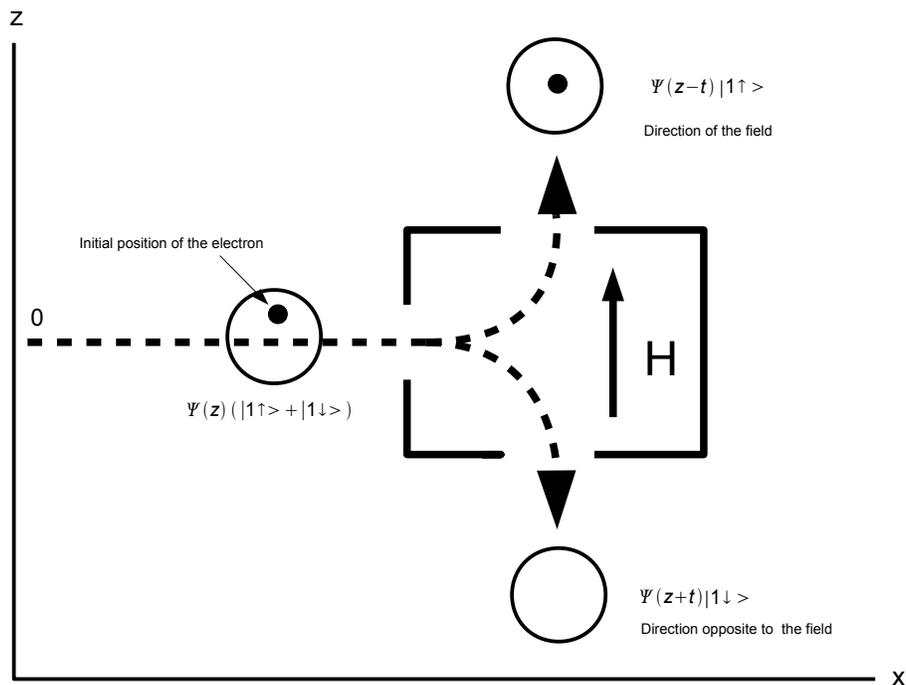
Comme la particule est guidée par la partie de la fonction d'onde dans laquelle elle se trouve:

en t_4 : $= \frac{1}{\sqrt{2}} (|1 \uparrow\rangle + |1 \downarrow\rangle)$ | chemin \rightarrow \rangle
 après la flèche \rightarrow 25 % \uparrow 25 % \downarrow .

Si on combine les deux fonctions d'onde on obtient un résultat différent de ce qui se passe si on en bloque une.

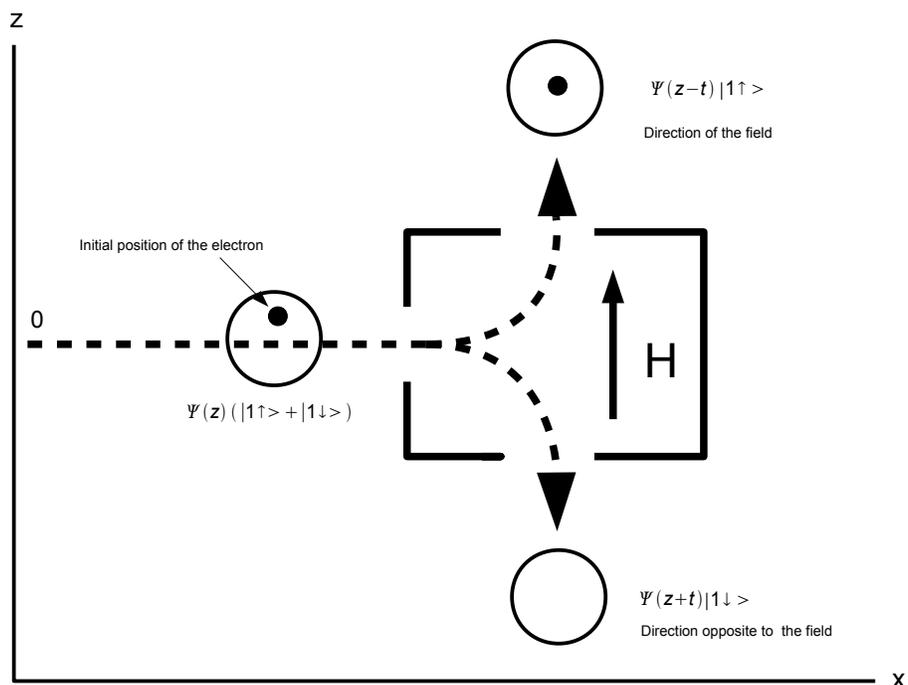
La fonction d'onde a un rôle physique, parce qu'elle guide la particule; elle n'est pas simplement liée à une probabilité de résultats de mesure.

Voyons maintenant pourquoi les “mesures”
– autres que les mesures de position – ne
mesurent (en général) aucune propriété pré-
existante de la particule (le “spin” n’est pas
réel), ce qui est une conséquence des théorèmes
sur la non existence de variables cachées.



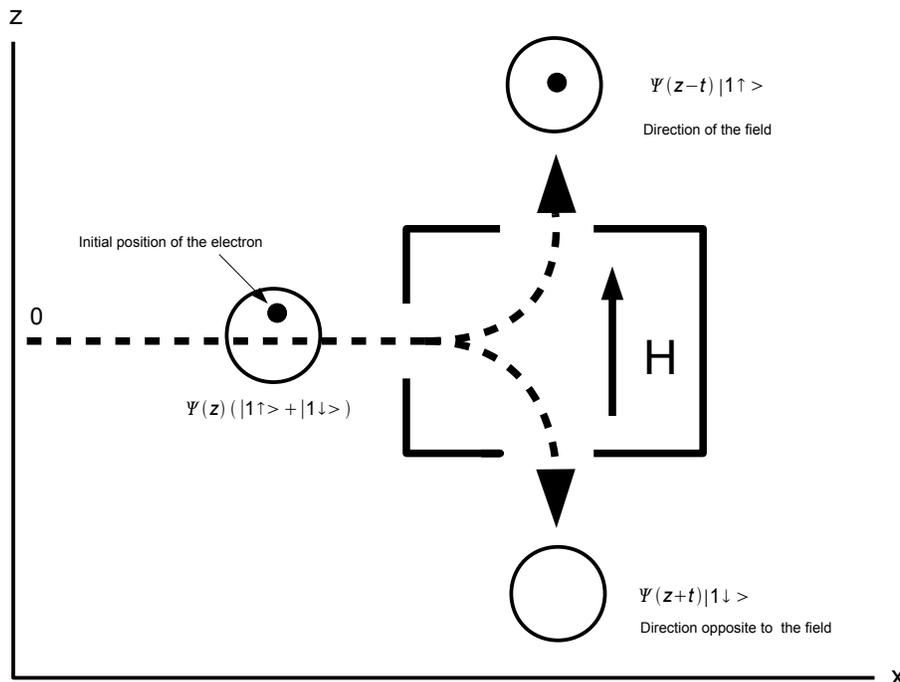
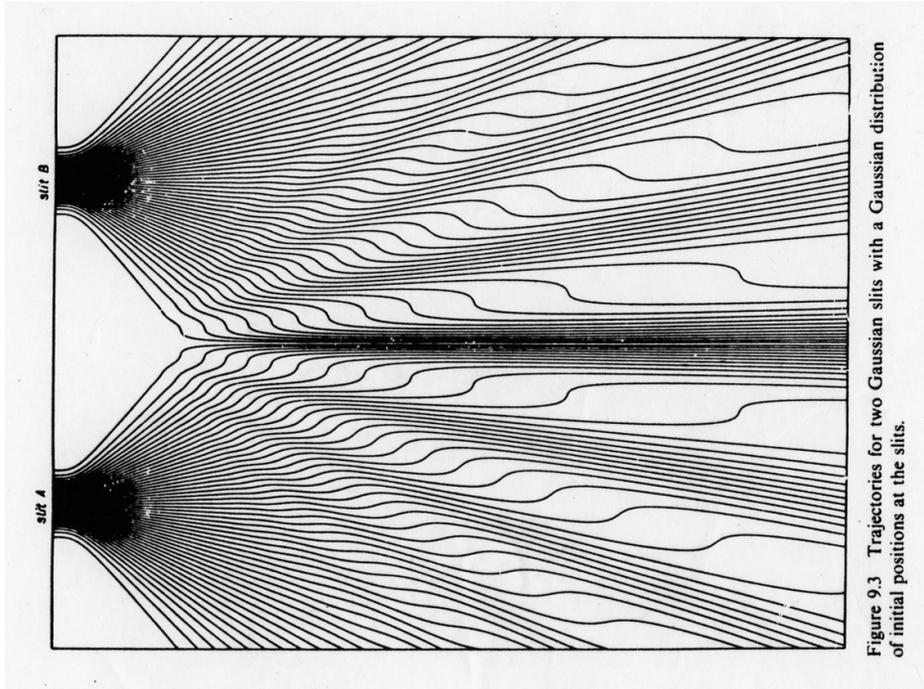
On mesure le spin d'une particule dans un état superposé $|1 \uparrow\rangle$ et $|1 \downarrow\rangle$:

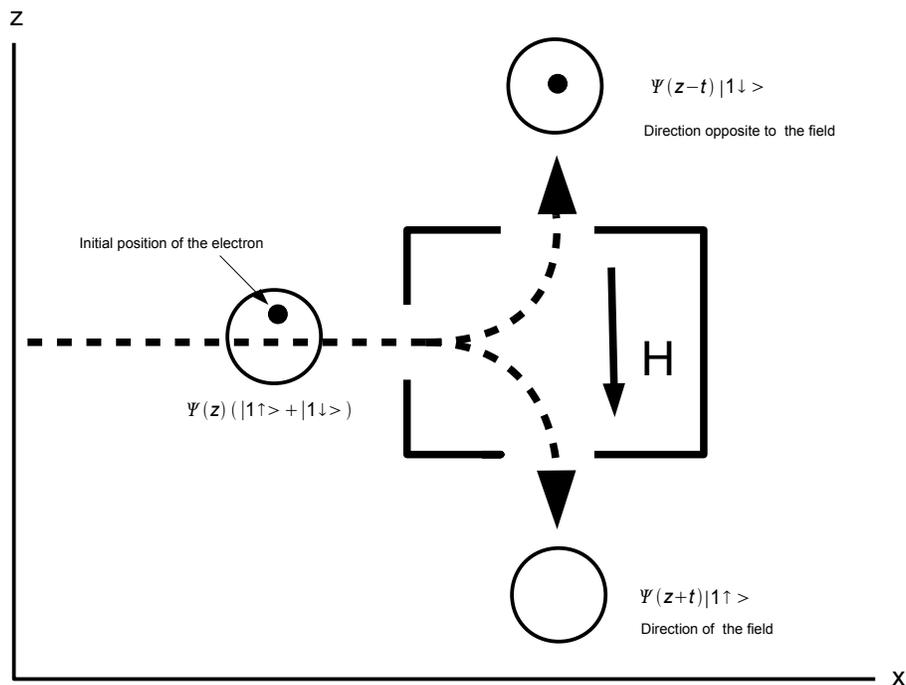
H = champ magnétique ; la partie $|1 \uparrow\rangle$ va toujours dans la direction du champ et la partie $|1 \downarrow\rangle$ va toujours dans la direction opposée.



Mais la particule, si elle est initialement située dans la partie supérieure de la fonction d'onde, va toujours aller vers le haut.

Ceci est dû à la présence d'une ligne que la particule ne peut pas franchir, comme dans:





Mais ceci implique que, si on renverse le sens du champ, la particule, qui était “spin up” devient “spin down”, alors qu’on “mesure” la même “observable”, c’est-à-dire le spin dans la *même* direction dans les deux dispositifs, mais avec des arrangements différents de l’appareil.

Donc, l'appareil de mesure n'est pas "passif" (il n'enregistre pas simplement quelque chose de préexistant à la mesure) mais "actif". → ceci justifie l'intuition de Bohr, mais en l'incorporant dans la théorie même, pas comme un *deus ex machina*.

On peut faire une analyse similaire avec la vitesse (ou le moment).

Il existe des cas où la vitesse de la particule est nulle: quand la fonction d'onde est réelle, par exemple dans un "état fondamental".

Si on écrit $\Psi = Re^{iS}$,

$$\frac{dX_k(t)}{dt} = \nabla_k S(X_1(t), \dots, X_N(t)).$$

Donc, si Ψ est réelle, $S = 0$ et la vitesse

$$\frac{dX_k(t)}{dt} = 0.$$

Néanmoins, pour “mesurer” la vitesse, il faut interagir avec la particule.

Si on analyse cette interaction, les résultats coïncident avec les prédictions quantiques, pour lesquelles la vitesse n’est PAS nulle.

MORALE:

Les mesures ne mesurent (en général) rien.

Les observations n'observent (en général)
rien.

En général: c'est-à-dire sauf pour les posi-
tions!

Ce sont des interactions entre l'appareil et
la particule!

Les particules ont des positions et donc des trajectoires mais aucune autre propriété intrinsèque.

Toutes les “propriétés” quantiques résultent d’interactions entre l’appareil et la particule!

Ceci explique pourquoi la théorie de de Broglie-Bohm n’est pas réfutée par les théorèmes sur les variables cachées.

Explication détaillée de John Bell:

Pourquoi il y a-t-il cette nécessité de faire référence aux ‘appareils’ quand nous discutons des phénomènes quantiques? Les physiciens qui ont été les premiers à rencontrer ces phénomènes les ont trouvés si bizarres qu’ils ont perdu tout espoir de les décrire en termes de concepts ordinaires comme l’espace et le temps, la position et la vitesse. Les pères fondateurs de la théorie quantique ont même décidé qu’aucun concept ne pourrait être trouvé qui permettrait une description directe du monde quantique. Ainsi, la théorie qu’ils ont établie avait seulement pour but de décrire systématiquement la réponse de l’appareil. Et que faut-il de plus, après tout, dans les applications?

Le ‘problème’ est le suivant: comment le monde doit-il être divisé exactement entre un appareil parlable . . . dont on peut parler . . . et un système quantique non parlable, dont on ne peut pas parler? Combien d’électrons, ou d’atomes ou de molécules, faut-il pour constituer un ‘appareil’? Les mathématiques de la théorie ordinaire requièrent une telle division, mais ne disent rien sur la façon de la faire. En pratique, la question est résolue par des recettes pragmatiques qui ont survécu à l’épreuve du temps, appliquées avec discernement et avec un bon goût né de l’expérience. Mais est-ce qu’une théorie fondamentale ne devrait pas permettre une formulation mathématique exacte?

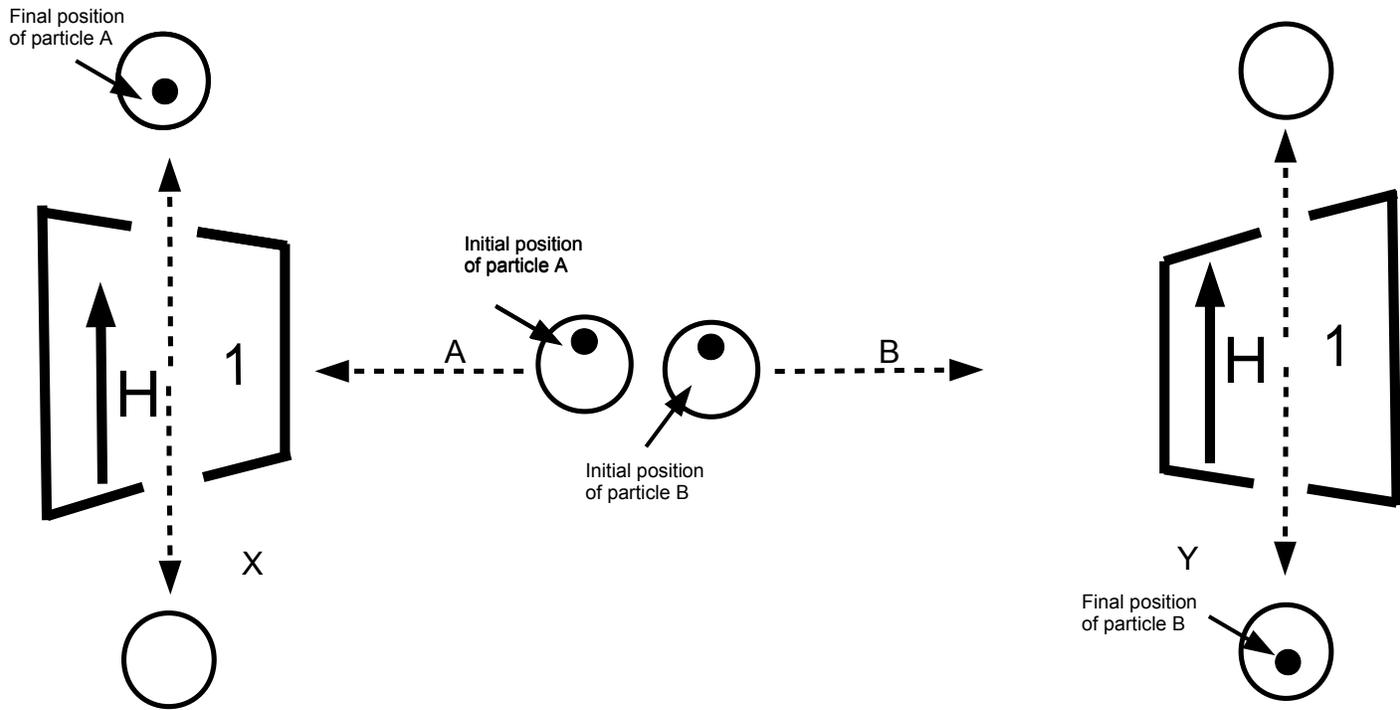
À mon avis, les pères fondateurs avaient tort sur ce point. Les phénomènes quantiques n'excluent *pas* une description uniforme des mondes micro et macro, ... du système et de l'appareil. Il *n'est pas* essentiel d'introduire une vague division du monde de ce type.

Cela a été indiqué déjà en 1926 par de Broglie, quand il a répondu à l'énigme onde ou particule? par onde *et* particule.

Mais, lorsque cela fut complètement clarifié par Bohm en 1952, peu de physiciens théoriciens voulaient en entendre parler. La ligne orthodoxe semblait entièrement justifiée par les succès pratiques. Même aujourd'hui, l'image de de Broglie-Bohm est généralement ignorée, et n'est pas enseignée aux étudiants. Je trouve que c'est une grande perte. Car cette image stimule l'esprit d'une façon très salutaire. L'image de de Broglie-Bohm élimine la nécessité de diviser le monde d'une certaine façon entre système et appareil.

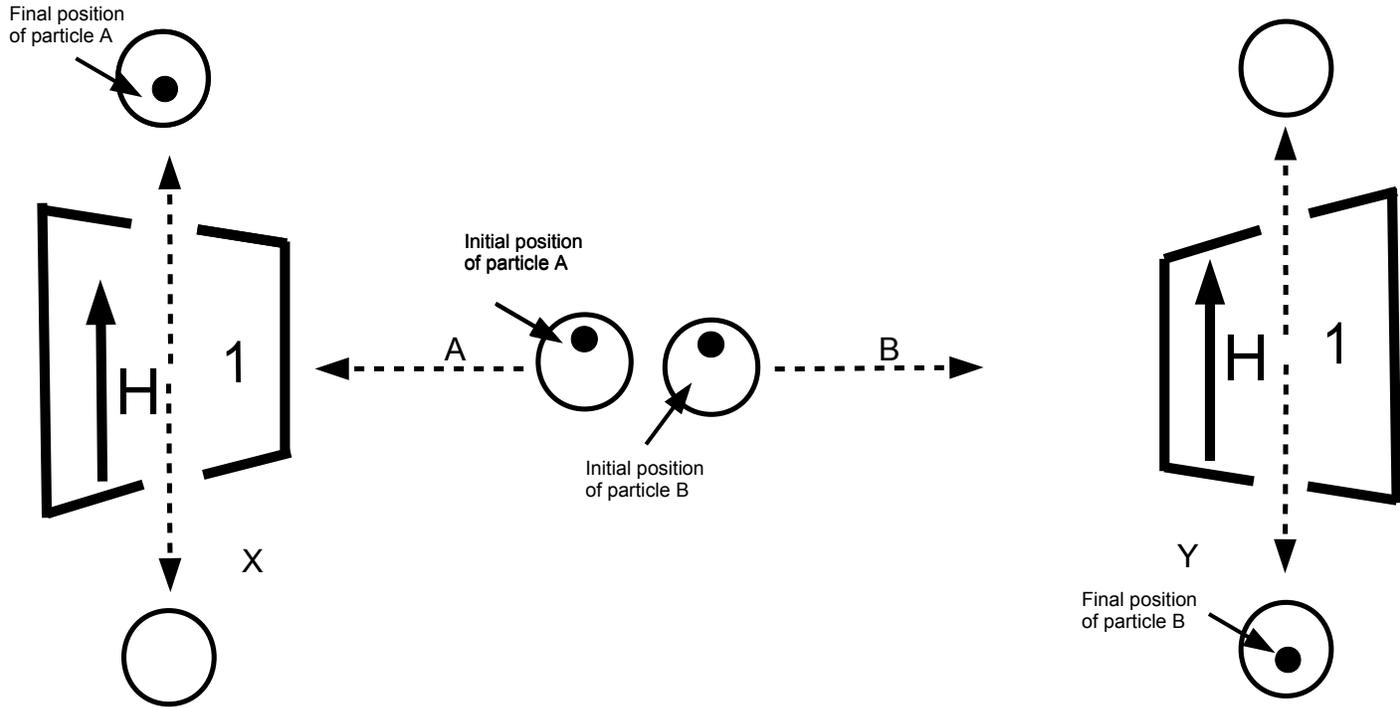
J. S. BELL

ET LA NON-LOCALITÉ?

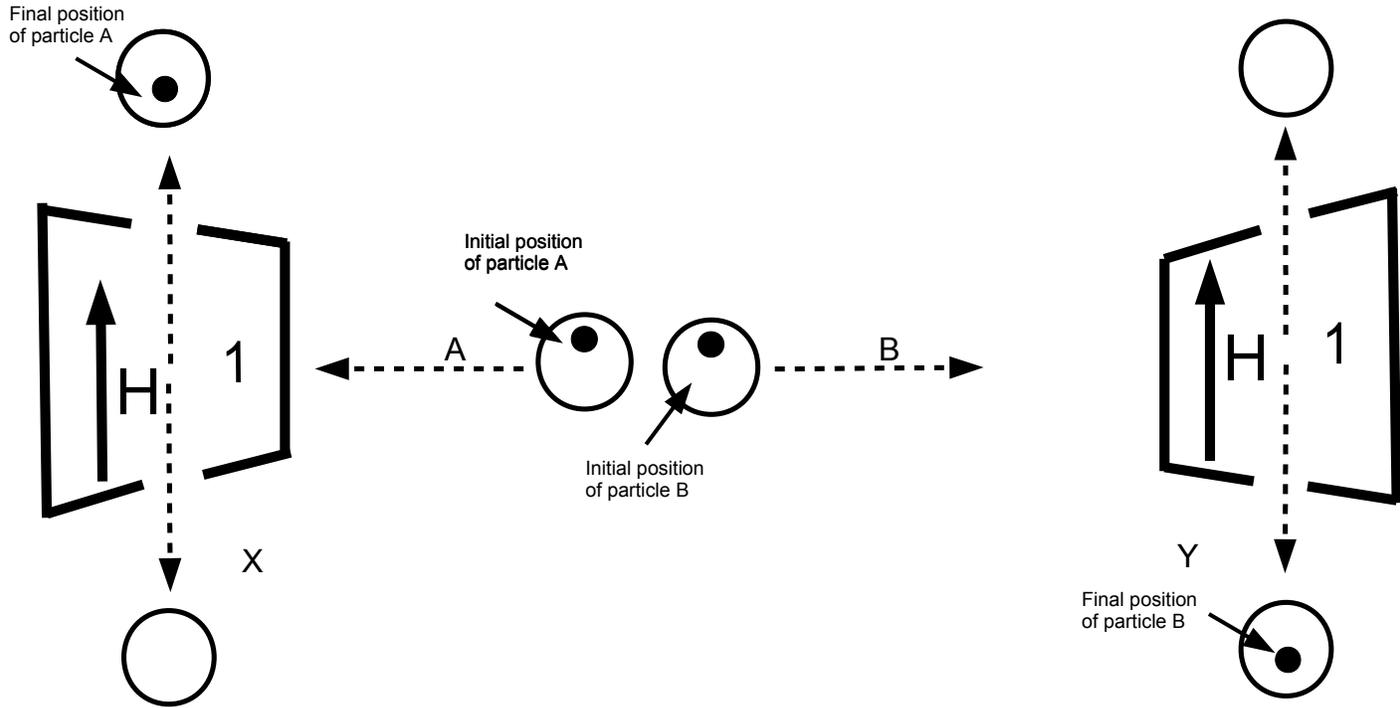


Considérons une paire de particules dans un état intriqué tel que ceux utilisés dans le raisonnement d'EPR-Bell.

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A \uparrow\rangle |B \downarrow\rangle - |A \downarrow\rangle |B \uparrow\rangle)$$

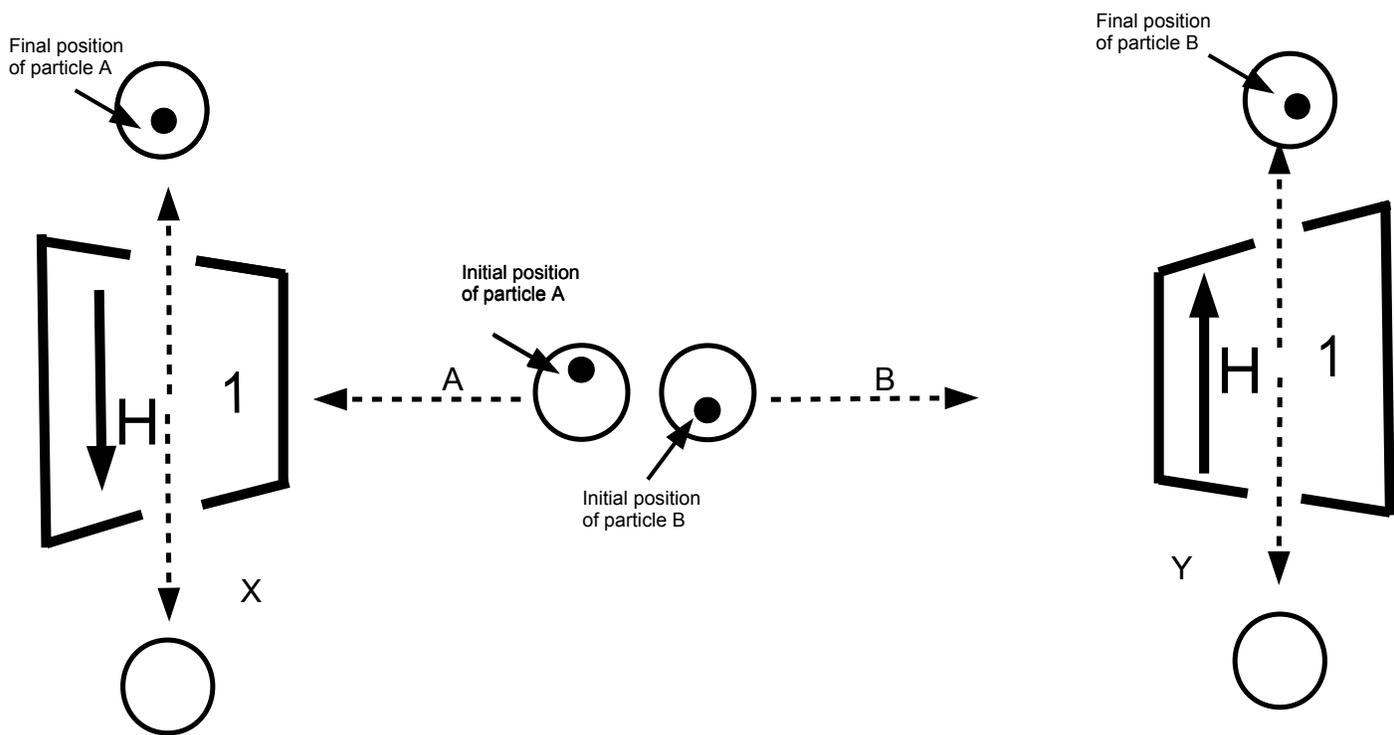


Supposons que l'on mesure le spin de la particule A avant celui de la particule B. À cause de la présence d'une ligne que la particule ne peut pas traverser, la particule A va aller vers le haut, c'est-à-dire dans le sens du champ, et son spin sera "up".

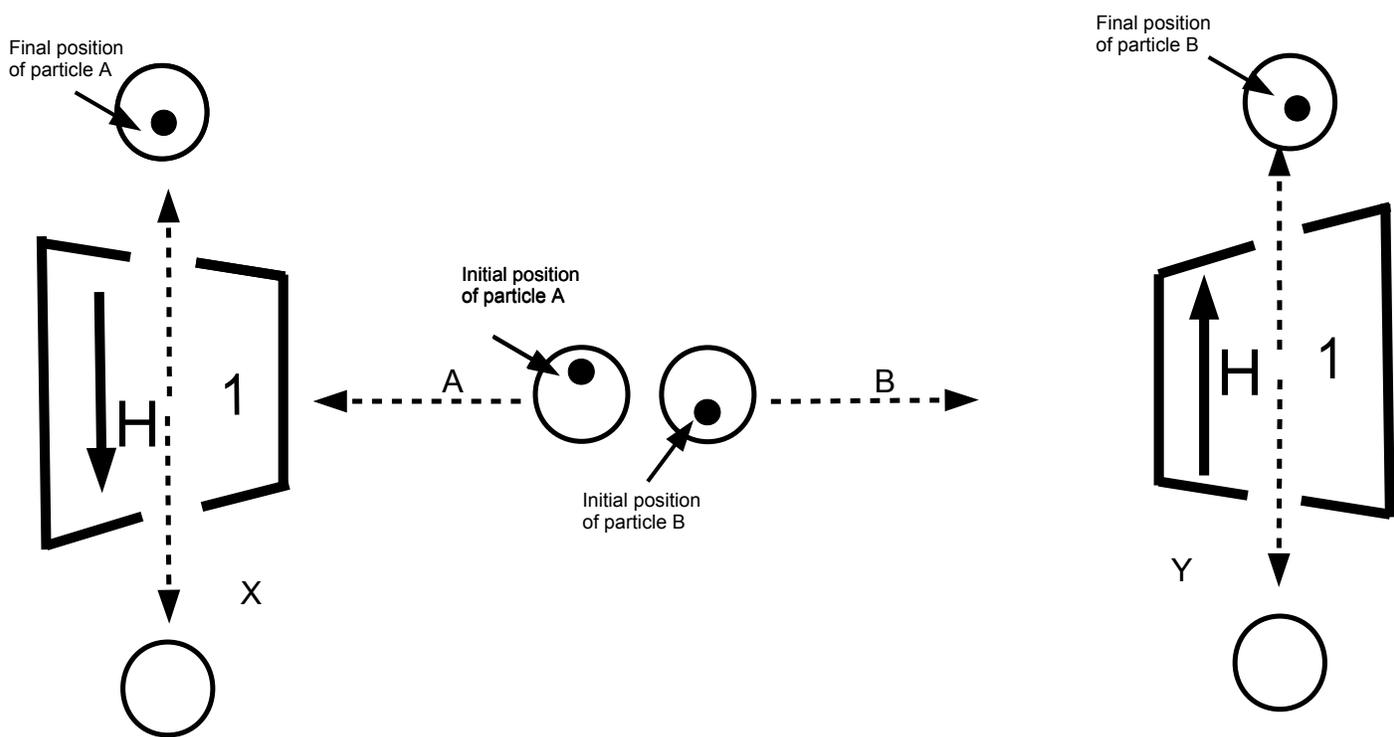


Mais la particule B doit alors nécessairement aller vers le bas, vu que son spin est toujours l'opposé de celui de la particule A.

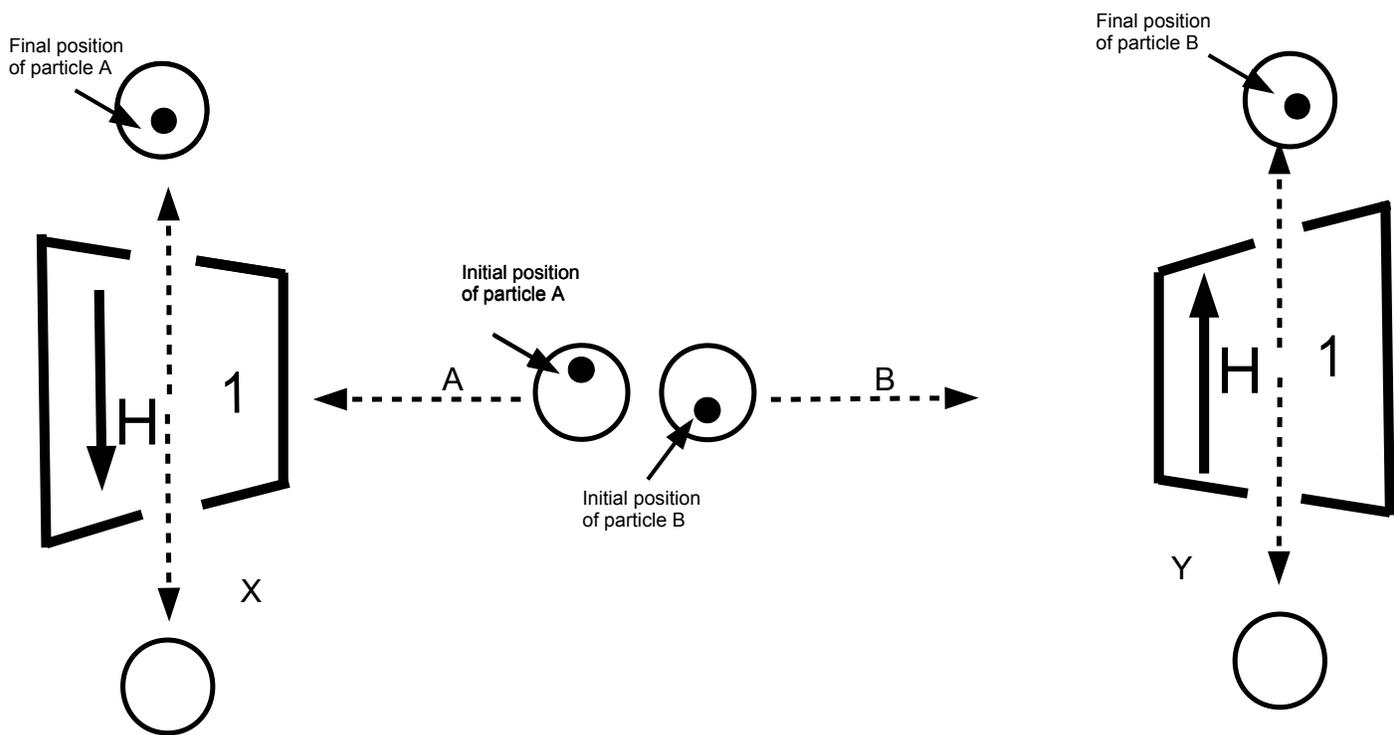
Ou, si on veut, après la mesure du spin de la particule A, l'état a été réduit en $|A \uparrow\rangle |B \downarrow\rangle$.



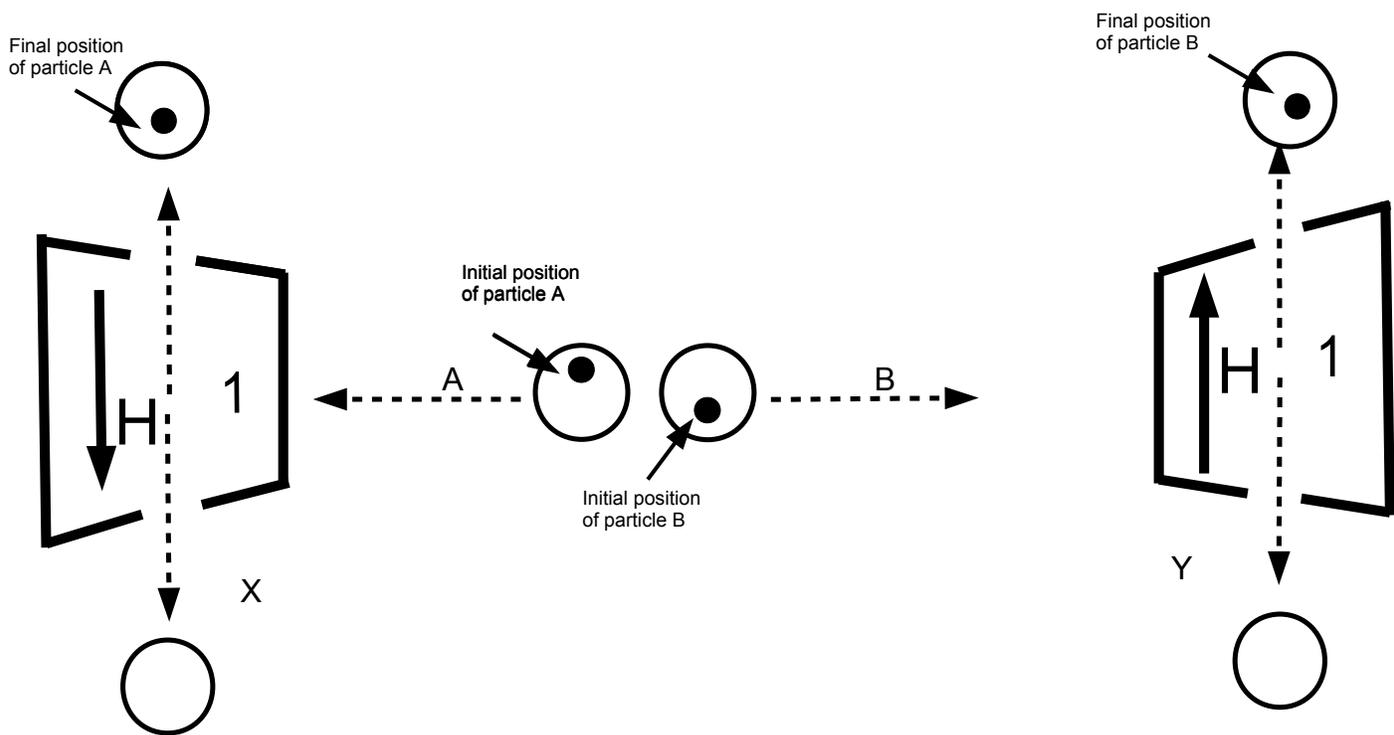
Considérons maintenant le même état initial de la particule (à la fois pour l'état quantique ET les positions des particules), mais avec l'orientation du champ renversé à gauche de la figure (sans le changer à droite).



Si l'on mesure le spin de la particule A avant celui de la particule B, à cause de la ligne que la particule ne peut pas traverser, la particule A va à nouveau aller vers le haut, c'est-à-dire ici dans le sens **opposé** à celui du champ, et son spin sera "down".



Mais alors le spin de la particule B sera
 “up” (l’état est réduit à $|A\ 1\ \downarrow\rangle\ |B\ 1\ \uparrow\rangle$)
 et la particule B devra aller dans le sens du
 champ, c’est-à-dire vers le haut.



Donc, en changeant l'orientation du champ à gauche de la figure, on change la direction que va prendre la particule B à droite de la figure, et cela indépendamment de la distance entre les deux parties de la figure.

C'est cela l'action à distance dans la théorie de de Broglie-Bohm.

Cette action ne permet pas la transmission de messages, parce que les résultats des mesures sont incontrôlables.

Le fait que la théorie de de Broglie-Bohm incorpore des actions à distance est une qualité et non un défaut, vu que le raisonnement d'EPR-Bell implique que de telles actions existent!

UN PEU D'HISTOIRE



DAVID BOHM (à droite) pénètre dans la salle d'audience du House Un-American Activities Committee, le 25 mai 1949, en compagnie de Donald Appel, un membre de la commission d'enquête.

1950: poursuivi pour avoir refusé de dénoncer d'autres personnes et invoqué le 5ème amendement.

1951: Bohm est acquitté, mais son contrat n'est plus renouvelé à Princeton et il ne trouve pas d'emploi aux États-Unis. Part au Brésil (Sao Paulo).

1951: Quantum Theory- un des meilleurs livres orthodoxes; reformule les objections d'EPR sous la forme actuelle (EPRB).

1952: sous l'influence d'Einstein, il change radicalement de point de vue: théorie de de Broglie-Bohm.

REACTIONS (en partie dues aux souvenirs
de Max Dresden)

Nous considérons cela comme du déviation-
nisme juvénile . . . nous ne perdons pas notre
temps à lire l'article [de Bohm]. Si nous
ne pouvons pas le réfuter, nous devons nous
mettre d'accord pour l'ignorer

[Oppenheimer, 1953. Abraham Pais parle
aussi de “déviotionnisme juvénile”.]

[Bohm] est une calamité publique . . . un trotskiste et un traître.

[Princeton Institute, 1953].

[Le travail de Bohm] est un sous-produit à durée de vie courte de la philosophie mécaniste du 19ème siècle.

[Rosenfeld]

Espérer en des variables cachées est aussi ridicule que d'espérer montrer que $2 + 2 = 5$.

[Heisenberg]

“Bohm ne cesse de m’envoyer des lettres comme m’en enverrait un religieux sectaire essayant de me convertir à la vieille théorie de de Broglie de l’onde pilote”. Son approche est d’une “simplicité folle” qui est bien sûr “au-delà de tout espoir”

[Pauli, lettre à Fierz, 1951].

Je ne vais sûrement pas entrer dans une controverse avec vous sur la question de la complémentarité, pour la simple raison qu'il n'existe pas le moindre point de controverse à ce sujet. C'est justement parce que nous sommes passés par ce processus de purification à travers des erreurs que nous sommes si sûrs de nos résultats.

Il n'y a rien de vrai dans votre suspicion selon laquelle nous arrivons à la complémentarité par une sorte d'incantation magique.

Je suis enclin à vous répondre que c'est parmi vos admirateurs parisiens que je discerne des signes inquiétants de mentalité primitive.

[Rosenfeld, lettre à Bohm]

En ce qui concerne Pais et le reste du Princelstitute, ce que ces petits péteux pensent n'a pas d'importance pour moi. Dans ces dernières six années, presque rien n'a été produit là. ... Je suis convaincu que je suis sur le bon chemin.

[D. Bohm]

“Je suis fermement convaincu que le caractère fondamentalement statistique de la théorie quantique contemporaine est uniquement dû au fait que celle-ci repose sur une description incomplète des systèmes physiques.

Dans une description physique complète, la théorie quantique statistique prendrait . . . approximativement une position analogue à la mécanique statistique dans le cadre de la mécanique classique”.

A. EINSTEIN

MAIS, concernant la théorie de Bohm: “Trop facile”. (too cheap). N’oublions pas qu’Einstein était avant tout préoccupé par la localité, que Bohm ne restaurait pas.

Comment ce qui existe peut-il être impossible? (T. Pinch: What does a proof prove if it doesn't prove?)

“Ce n'est pas, comme on le suppose souvent, une question de réinterprétation de la mécanique quantique- le système actuel de la mécanique quantique devrait être objectivement faux pour qu'une description des processus élémentaires autre que celle qui est statistique soit possible”.

J. VON NEUMANN

Nuls paramètres cachés ne peuvent être introduits grâce auxquels la description indéterministe pourrait être remplacée par une description déterministe. Par conséquent, si une future théorie devait être déterministe, elle ne pourrait pas être une modification de la théorie actuelle, mais devrait être essentiellement différente.

M. BORN

Ayant lu cela, j'ai relégué cette question dans mes arrières pensées et je me suis occupé de choses plus pratiques. Mais, en 1952, j'ai vu l'impossible se réaliser. C'était dans des articles de David Bohm. Bohm montrait explicitement comment des paramètres pouvaient effectivement être introduits, dans la mécanique ondulatoire nonrelativiste, grâce auxquels la description indéterministe pouvait être transformée en une description déterministe.

Et, ce qui est plus important, à mon avis, la subjectivité de la version orthodoxe, la référence nécessaire à ‘l’observateur’ pouvait être éliminée. De plus, l’essentiel de cette idée avait été avancée déjà en 1927 par de Broglie, dans son image ‘d’onde pilote’.

Mais alors pourquoi Born ne m'avait pas parlé de cette 'onde- pilote' ? Ne serait-ce que pour signaler ce qu'elle avait d'erroné ? Pourquoi von Neumann ne l'a-t-il pas prise en considération ?

Plus extraordinaire encore, pourquoi continuait-on à produire des preuves d'impossibilité, après 1952, et aussi récemment qu'en 1978 ? Alors que même Pauli, Rosenfeld et Heisenberg ne pouvaient guère produire de critique plus sévère de la version de Bohm que de la dénoncer comme étant 'métaphysique' et 'idéologique' ?

J.S. BELL

CONCLUSIONS

Quelle est la relation entre la théorie de de Broglie-Bohm et la mécanique quantique ordinaire ?

C'EST LA MÊME THÉORIE !

Mais alors, à quoi bon ?

Plus exactement, l'une (la théorie de de Broglie-Bohm) est une théorie, l'autre non (elle ne se présente pas ainsi, mais comme un algorithme permettant de calculer les résultats de mesure) !

La mécanique quantique ordinaire est simplement la théorie de de Broglie-Bohm tronquée : on oublie les trajectoires, cela n'affecte en rien les prédictions empiriques (qui sont en fait une conséquence de la théorie de de Broglie-Bohm), et cela crée "simplement" quelques bibliothèques remplies de confusions, de mysticisme et de mauvaise philosophie.

À part cela (clarifier nos concepts), la théorie
de de Broglie-Bohm n'a aucune utilité !

Pourquoi l'image de l'onde-pilote est-elle ignorée dans les ouvrages de mécanique quantique ? Ne devrait-elle pas être enseignée, non pas comme l'unique voie, mais comme un antidote à l'autosatisfaction régnante ? Pour montrer que l'imprécision, la subjectivité, et l'indéterminisme, ne nous sont pas imposées de force par des faits expérimentaux, mais par un choix théorique délibéré ?

J.S. BELL

En plus bref, sur “Copenhague”:

Une extravagance philosophique dictée par
le désespoir

E. SCHRÖDINGER

La philosophie doit être étudiée, non pas pour obtenir une réponse définitive à ses questions, puisque, en général, aucune réponse définitive ne peut être connue comme étant vraie, mais pour les questions elles-mêmes: parce que ces questions élargissent notre conception de ce qui est possible, enrichissent notre imagination intellectuelle et diminuent l'assurance dogmatique qui ferme l'esprit à la spéculation.

B. RUSSELL

Ce qui m'a toujours intéressée était de comprendre ce que le monde est. C'est pourquoi j'ai étudié la physique : si la physique est l'étude de la nature, alors pour comprendre la nature, il faut d'abord étudier la physique.

Mais mes espoirs ont été déçus par ce qui est (ou semble être) généralement accepté dans beaucoup de départements de physique dans le monde entier : après la mécanique quantique, il faut abandonner l'idée que la physique nous donne une image de la réalité. Au début, j'ai cru que c'était vrai et j'ai été tellement déçue que j'ai décidé d'abandonner mon rêve 'romantique'...

Mais, à un moment donné, . . . J'ai réalisé que certaines des choses que j'avais acceptées n'étaient pas si manifestement vraies, et j'ai repris l'espoir que la mécanique quantique n'était pas réellement la 'fin de la physique', au sens où je l'entendais. Par conséquent, j'ai commencé une thèse en physique pour élucider la situation.

En faisant mon doctorat sur les fondements de la mécanique quantique, j'ai compris que ce que les physiciens considéraient comme étant une vérité inévitable était au contraire une grossière erreur: la mécanique quantique ne nous force pas à abandonner quoi que ce soit, et sûrement pas la possibilité d'étudier la réalité à travers la physique.

V. ALLORI

Jean Bricmont Quantum Sense and Nonsense

Permeated by the author's delightful humor, this little book explains, with nearly no mathematics, the main conceptual issues associated with quantum mechanics:

The issue of determinism. Does quantum mechanics signify the end of a deterministic world-view?

The role of the human subject or of the "observer" in science. Since Copernicus, science has increasingly tended to dethrone Man from his formerly held special position in the Universe. But quantum mechanics, with its emphasis on the notion of observation, may once more have given a central role to the human subject.

The issue of locality. Does quantum mechanics imply that instantaneous actions at a distance exist in Nature?

In these pages the author offers a variety of views and answers — bad as well as good — to these questions. The reader will be both entertained and enlightened by Jean Bricmont's clear and incisive arguments.

Jean Bricmont is a theoretical physicist and a professor at the Université Catholique de Louvain. He works on statistical and mathematical physics but has also written about philosophy of science. He is mostly known to the non-academic audience for co-authoring *Fashionable Nonsense* (also known as *Intellectual Impostures*) with Alan Sokal, in which they criticize abuses of scientific concepts by postmodernist thinkers and relativism in the philosophy of science.



Popular Science

ISBN 978-3-319-65270-2



► springer.com

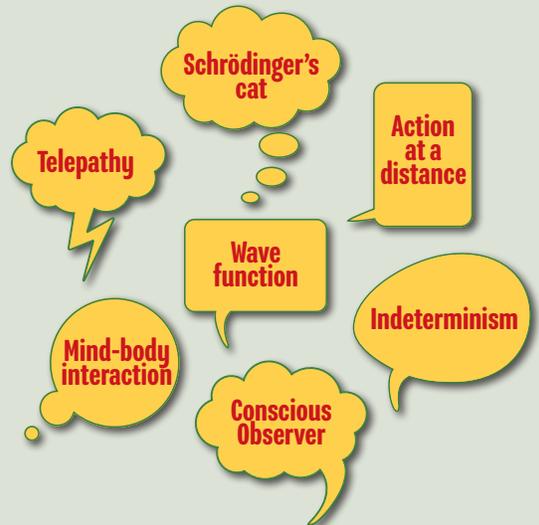
Bricmont



Quantum Sense and Nonsense



Jean Bricmont



Quantum Sense and Nonsense

Springer

References

- [1] D. Albert: *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, Cambridge, 1992
- [2] G. Bacciagaluppi and A. Valentini: *Quantum Mechanics at the Crossroads. Reconsidering the 1927 Solway Conference*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009
- [3] J.S. Bell: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Collected Pa-*

pers on Quantum Philosophy, 2nd edn,
with an introduction by Alain Aspect,
Cambridge University Press, Cambridge,
2004; 1st edn 1993

[4] J. Bernstein: *Quantum Profiles*, Prince-
ton University Press, Princeton, 1991

[5] D. Bohm: *Quantum Theory*, Dover
Publications, New York, New edition,
1989; First edition: Prentice Hall, En-
glewood Cliffs (N.J.), 1951

[6] D. Bohm: A suggested interpretation of

the quantum theory in terms of “hidden variables”, Parts 1 and 2, *Physical Review* **89**, 166–193 (1952). Reprinted in [72] pp. 369–390

[7] D. Bohm: *Causality and Chance in Modern Physics*, Harper, New York, 1957

[8] D. Bohm and B.J. Hiley: *The Undivided Universe*, Routledge, London, 1993

[9] N. Bohr: *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge Univer-

sity Press, Cambridge, 1934; new edition 2011.

[10] N. Bohr: Can quantum mechanical description of reality be considered complete? *Physical Review* **48**, 696–702 (1935)

[11] N. Bohr: Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. In: [62], pp. 201–241

[12] M. Born: *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Clarendon, Oxford, 1949

- [13] M. Born (ed.): *The Born–Einstein Letters*, Macmillan, London, 1971
- [14] J. Bricmont: *Making Sense of Quantum Mechanics*, Springer, Berlin, 2016
- [15] J. Bricmont: *Quantum Sense and Nonsense*, Springer, Berlin, 2017
- [16] P.C.W. Davies and J.R. Brown (eds):
The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics,
Cambridge University Press, Cambridge,
1993

- [17] L. de Broglie: *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?*, Gauthier-Villars, Paris, 1953
- [18] B. d'Espagnat: The quantum theory and reality, *Scientific American* Nov. 1979, p. 158
- [19] B. d'Espagnat: Quantum weirdness: What we call 'reality' is just a state of mind, *The Guardian*, 20 March 2009
- [20] D. Dürr, S. Goldstein, R. Tumulka and N. Zanghì: John Bell and Bell's theo-

rem. In: *Encyclopedia of Philosophy*,
D.M. Borchert ed., Macmillan Reference,
USA, 2005

[21] D. Dürr and S. Teufel, *Bohmian Mechanics. The Physics and Mathematics of Quantum Theory*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009

[22] D. Dürr, S. Goldstein and N. Zanghì:
Quantum Physics Without Quantum Philosophy, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012

- [23] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen:
Can quantum mechanical description of
reality be considered complete?, *Physi-
cal Review* **47**, 777–780 (1935)
- [24] A. Einstein: Remarks concerning the
essays brought together in this co-
operative volume. In [62, pp. 665–688]
- [25] R. Feynman, R.B. Leighton and M.
Sands: *The Feynman Lectures on
Physics*, Vol. 3, *Quantum Mechanics*,
Addison-Wesley, Reading, Ma., 1966

- [26] R. Feynman: *The Character of Physical Law* (Messenger Lectures, 1964), MIT Press, Boston, 1967
- [27] O. Freire: *The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950–1990)*, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 2015
- [28] M. Gell-Mann: *The Quark and the Jaguar*, Little, Brown and Co., London, 1994
- [29] A. George (ed.): *Louis de Broglie*,

physicien et penseur, Albin Michel,
Paris, 1953

- [30] S. Goldstein: Quantum philosophy:
the flight from reason in science. In:
The Flight from Science and Reason,
P. Gross, N. Levitt, and M.W.
Lewis (eds), *Annals of the New York
Academy of Sciences* **775**, 119–125
(1996). Reprinted in [22, Chap. 4]

- [31] S. Goldstein, T. Norsen, D.V. Tausk and
N. Zanghì: Bell's theorem, *Scholarpedia*

6(10): 8378 (2011)

[32] S. Goldstein: Bohmian mechanics, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.) (Spring 2013 Edition)
plato.stanford.edu/archives/spr2013/entries/bohm/

[33] S. Hawking: Does God play dice?
(1999). Available online:
www.hawking.org.uk/doesgod-play-dice.html

- [34] W. Heisenberg: *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, Allen and Unwin, London, 1959.
First edition: Harper and Row, New York, 1958
- [35] W. Heisenberg: *The Physicist's Conception of Nature*, translated by A.J. Pomerans, Harcourt Brace, New York, 1958
- [36] W. Heisenberg: *Physics and Beyond. Encounters and Conversations*, trans-

lated by A.J. Pomerans, Harper and Row, New York, 1971

[37] P. Holland: *The Quantum Theory of Motion. An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993

[38] M. Jammer: *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, Wiley, New York, 1974

[39] D. Kaiser: *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*. W. W. Norton and Company, New York (2011)

[40] S. Kocsis, B. Braverman, S. Ravets, M.J. Stevens, R.P. Mirin, L.K. Shalm and A.M. Steinberg: Observing the average trajectories of single photons in a two-slit interferometer, *Science* **332**, 1170–1173 (2011)

[41] F. Laloë: *Do We Really Understand*

Quantum Mechanics? Cambridge University Press, Cambridge, 2012

[42] L. Landau and E. Lifshitz: *Quantum Mechanics* Vol. 3, *A Course of Theoretical Physics*, Pergamon Press, Oxford, 1965

[43] T. Maudlin: *Quantum Nonlocality and Relativity*, Blackwell, Cambridge, 1st edn, 1994, 3rd edn, 2011

[44] D. Mermin: Quantum mysteries for anyone, *Journal of Philosophy* **78**, 397–

408, 1981.

[45] D. Mermin: Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory, *Physics Today* **38**, April 1985, 38–47

[46] D. Mermin: Hidden variables and the two theorems of John Bell, *Reviews of Modern Physics* **65**, 803–815 (1993)

[47] W. Moore: *Schrödinger: Life and Thought*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989

- [48] T. Norsen: Einstein's boxes, *American Journal of Physics* **73**, 164–176 (2005)
- [49] T. Norsen: *Foundations of Quantum Mechanics. An Exploration of the Physical Meaning of Quantum Theory*, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 2017
- [50] R. Olwell: Physical isolation and marginalization in physics — David Bohm's Cold War exile, *Isis* **90**, 738–756 (1999)

[51] A. Pais: Einstein and the quantum theory, *Reviews of Modern Physics* **51**, 863–914, 1979

[52] W. Pauli: letter to David Bohm, 3 December 1951, in [54, p. 127]

[53] W. Pauli: *Writings on Physics and Philosophy*, C.P. Enz, K. von Meyenn (eds); translated by R. Schlapp, Springer, Berlin, 1994

[54] D. Peat: *Infinite Potential: The Life and Times of David Bohm*, Basic

Books, New York, 1997

- [55] R. Penrose: *Fashion, Faith, and Fantasy in the New Physics of the Universe*, Princeton University Press, Princeton, 2016
- [56] A. Petersen: The philosophy of Niels Bohr, *The Bulletin of the Atomic Scientists* **19**, No. 7, September 1963, 8–14
- [57] C. Philippidis, C. Dewdney, B.J. Hiley: Quantum interference and the quantum potential, *Il Nuovo Cimento B* **52**, 15–

28 (1979)

- [58] K. Przibram (ed.): *Letters on Wave Mechanics, Schrödinger, Planck, Einstein; Lorentz*. Translated and with an Introduction by M.J. Klein, Philosophical Library, New York, 1967
- [59] L. Rosenfeld: Strife about complementarity, in [61, pp. 465–484].
- [60] L. Rosenfeld: Misunderstandings about the foundations of quantum theory. In: *Observation and Interpretation*,

S. Körner (ed.), Butterworths, London, 1957, pp. 41–61. Reprinted in [61, pp. 495–502]

[61] L. Rosenfeld: *Rosenfeld, Selected Papers*, R.S. Cohen and J.J. Stachel (eds), Reidel, Dordrecht, 1979

[62] P.A. Schilpp (ed.): *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, The Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois, 1949

[63] E. Schrödinger: Letter to Wilhelm Wien,

26 August 1926, Wien Archiv, Deutsches
Museum, Munich, quoted in [47, p. 228]

[64] E. Schrödinger: The present situation
in quantum mechanics, translated by J.-
D. Trimmer, *Proceedings of the American
Philosophical Society* **124**, 323–338
(1984). Reprinted in [72, pp. 152–167]

[65] E. Schrödinger: Letter to Max Born, 10
October 1960, Staatsbibliothek Preussis-
cher Kulturbesitz, Berlin, Born Nachlass
704, quoted in [47, p. 479]

[66] *Electrons et photons: rapports et discussions du 5e Conseil de Physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927*, Instituts Solvay, Gauthier-Villars et cie, Paris, 1928. English translation in [2]

[67] M. Towler: *de Broglie–Bohm pilot-wave theory and the foundations of quantum mechanics*, lectures available at www.tcm.phy.cam.ac.uk/~mdt26/

[68] R. Tumulka: Understanding Bohmian

mechanics — A dialogue, *American Journal of Physics* **72**, 1220–1226
(2004)

- [69] J.P. Vigiier, C. Dewdney, P.E. Holland and A. Kyprianidis: Causal particle trajectories and the interpretation of quantum mechanics. In: *Quantum Implications: Essays in Honour of David Bohm*, B.J. Hiley, F.D. Peat (eds), Routledge, London, 1987

- [70] J. von Neumann, *Mathematical Foun-*

dations of Quantum Mechanics,
Princeton University Press, Prince-
ton, 1955. First edition in German,
Mathematische Grundlagen der
Quantenmechanik, 1932

[71] J.A. Wheeler: Law without law. In [72,
pp. 182–213]

[72] J.A. Wheeler and W.H. Zurek (eds):
Quantum Theory and Measurement,
Princeton University Press, Princeton,
1983

[73] E.P. Wigner: Remarks on the mind–body question. In: *The Scientist Speculates*, I. J. Gould (ed.), Heinemann, London, pp. 284–302, 1961. Reprinted in [74, pp. 171–184] and in [72, pp. 168–181]

[74] E.P. Wigner: *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, Bloomington, 1967

[75] E.P. Wigner: Interpretation of quantum mechanics. In: [72, pp. 260–314]

[76] M.N. Wise: Pascual Jordan: quantum

mechanics, psychology, National Socialism. In *Quantum Mechanics: Science and Society*, P. Galison, M. Gordin and D. Kaise (eds), Routledge, New York, 2001

[77] A. Zeilinger: The message of the quantum, *Nature* **438**, 743 (2005)