

Comment faut-il comprendre la Mécanique Quantique ?

1

Jean Schneider – Observatoire de Paris

jean.schneider@obspm.fr

7 Déc 2004

- Le « problème de la mesure »: un débat ouvert depuis ~ 1930
- Pourquoi la solution récente (la décohérence) n'est pas satisfaisante.
- Quelle est la solution ?

Les règles de la mécanique quantique

Etat

R1 Tout système S est décrit par un espace de Hilbert $Hilb$.

$$\text{Pour } S = (S1, S2), \quad Hilb = Hilb1 \otimes Hilb2$$

R2 Un état du système est décrit par $\psi \in Hilb$

$$\text{Pour } S = (S1, S2), \quad \psi = \psi 1 \otimes \psi 2$$

R3 Livré à lui-même le système évolue selon l'équation

$$-i \hbar \frac{d\psi}{dt} = H \psi$$

R4 Une grandeur phys. (observable) est décrite par $A \in Herm(Hilb)$

Observable

R5 Les seuls résultats de mesure de A sont les valeurs propres a_i de A : $A \psi_i = a_i \psi_i$

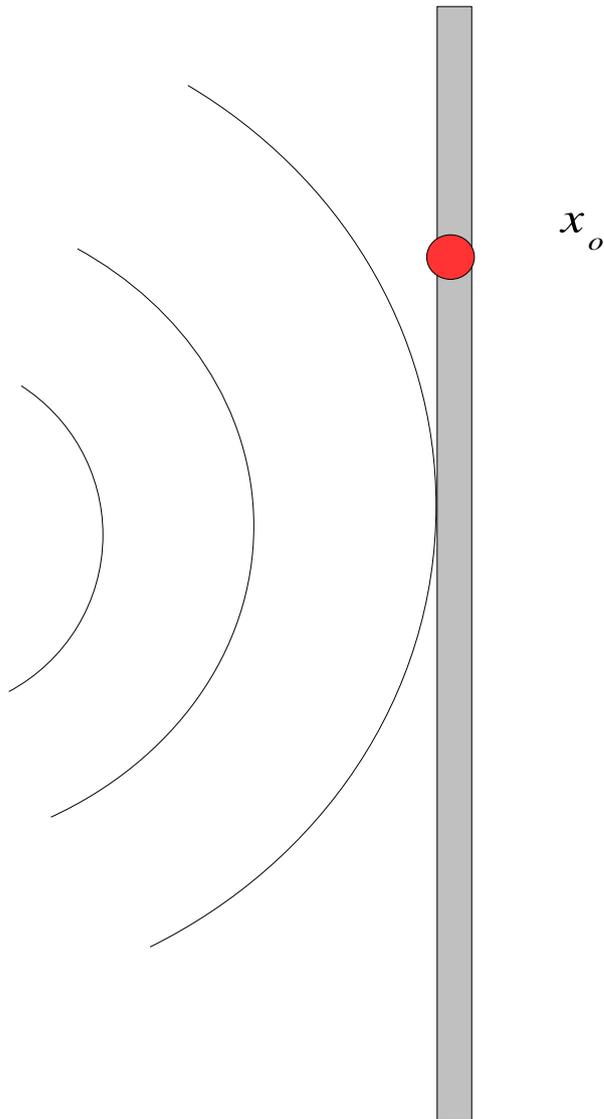
R6 Le résultat de la mesure est aléatoire avec une probabilité $p_i = |\langle \psi | \psi_i \rangle|^2$

R7 Après la mesure le système est dans l'état ψ_i

(« Réduction du Paquet d'Onde » = RPO)

Le premier exemple de RPO

Détection d'une particule sur un écran



$$\frac{e^{ik.r}}{r} f(\theta) \rightarrow \delta(x - x_0)$$

Question:

Qu'est-ce qui déclenche la RPO?

Où est le problème?

- Il est naturel pour un physicien de chercher à décrire
 - la mesure comme une interaction physique (entre l'appareil de mesure et le système).
 - par voie de conséquence, les appareils comme des systèmes physiques
- Mais voilà, lorsqu'on traduit cette démarche dans le formalisme de la mécanique quantique, on aboutit à une contradiction.

Où est le problème? (suite)

En effet, soient:

- ψ_{SA} le vecteur décrivant le méta-système système+appareil
- H_A l'opérateur d'interaction système-appareil.

Alors:

- Selon (R3), après la mesure, le méta-système doit être dans l'état (unique et prédictible)

~~$$\psi_{SA}(t) = e^{-i(H_s + H_A)t} \psi_{SA}(t_0) \quad (1)$$~~

- selon (R7), après la mesure, le système doit être, au hasard, dans l'un des états

$$\psi_{SA}(t) = |a_i\rangle \quad (2)$$

Il y a incompatibilité entre (1) et (2)

D'où le problème



Où est le problème? (fin)

Le chat de Schrödinger: pourquoi n'observe-t-on pas d'interférence macroscopiques?

$$\psi_{SA}(t) = e^{-i(H_A + H)t} \psi_{SA}(t_0) \quad (1)$$

$$\psi_{SA}(t) = |a_i\rangle \quad (2)$$

Dans la cas particulier où A est un chat et où il n'y a que 2 états finaux (chat mort et chat vivant):

$$\psi_{SA}(t) = \alpha_1 \psi_1 + \alpha_2 \psi_2 = \alpha_1 |mort\rangle + \alpha_2 |vivant\rangle \quad (1')$$

$$\psi_{SA}(t) = |mort\rangle \text{ ou } |vivant\rangle \quad (2')$$

Pourquoi n'observe-t-on jamais (1') mais seulement (2') ?

Les solutions proposées

- Opinion la plus répandue: « Le problème ne m'intéresse pas. La solution est sûrement dans la complexité du processus (irréversible) de mesure. »
- Il faut changer quelque chose à la MQ
 - Variables cachées (cf EPR, inégalités de Bell, expérience d'Aspect, Gisin,..)
 - « RPO spontanée », sans observateur (Ghirardi, Rimini, Weber)
 - Nanopoulos, Penrose et al: $-i\hbar d\rho/dt = [H, \rho] + \epsilon \rho \rho^\dagger$
 - Modèle de RPO covariante (Droz-Vincent (?) et al)
 - Il n'y a jamais de mesure (« multi-mondes » d'Everett)
- Il n'y a rien à changer dans la MQ:
 - Copenhague poussé à l'extrême: La RPO est produite par la « conscience de l'observateur » (London et Bauer 1938)
 - Décohérence

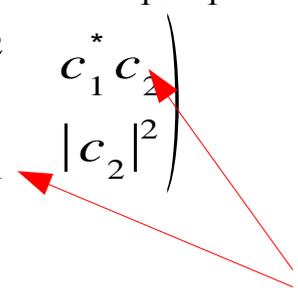
Qu'est ce que la décohérence ? (1/3)

Cadre: une mesure est décrite par l'interaction système-appareil

- La matrice statistique:

$$|\psi\rangle \rightarrow \rho = |\psi\rangle\langle\psi| \quad (\rho \text{ représente un ensemble de systèmes identiques})$$

$$\text{Pour } |\psi\rangle = c_1|a_1\rangle + c_2|a_2\rangle$$

$$\rho = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & c_1^*c_2 \\ c_2^*c_1 & |c_2|^2 \end{pmatrix}$$


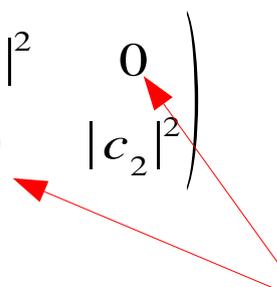
Termes d'interférence

Qu'est ce que la décohérence ? (2/3)

- Matrice statistique et RPO:

'' $\psi \rightarrow |a_1\rangle$ (prob. $|c_1|^2$) ou $\psi \rightarrow |a_2\rangle$ (prob. $|c_2|^2$) ''

devient:

$$\rho = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & c_1^* c_2 \\ c_2^* c_1 & |c_2|^2 \end{pmatrix} \rightarrow \rho = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & 0 \\ 0 & |c_2|^2 \end{pmatrix}$$


Termes d'interférence
ont disparu

==> Pour comprendre la RPO il faut comprendre pourquoi les interférences disparaissent

Qu'est ce que la décohérence ? (3/3)

- La décohérence:

On tient compte de l'appareil A (et de l'environnement E):

$$\psi = c_1 |a_1\rangle |(A+E)_1\rangle + c_2 |a_2\rangle |(A+E)_2\rangle$$

$$\langle c_1^* c_2 \rangle = \sum \prod c_i^* c_j = \sum \prod e^{i(\phi_i - \phi_j)} |c_i| |c_j|$$

Le terme d'interférence devient

Théorème:

L'incohérence de phase entre les nombreux constituants de $A+E$

détruit les interférences (décohérence). Conséquence de l'eq. de Schrödinger:

$$\rho = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & \langle c_1^* c_2 \rangle e^{-t/\tau} \\ \langle c_2^* c_1 \rangle e^{-t/\tau} & |c_2|^2 \end{pmatrix} \rightarrow \rho = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & 0 \\ 0 & |c_2|^2 \end{pmatrix}$$

Termes d'interférence ont disparu dynamiquement

Vérification expérimentale: Brune, Haroche, Raimond et al

Critique de la décohérence (1/3)

- Problème no 1:

$$\rho = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & 0 \\ 0 & |c_2|^2 \end{pmatrix} \text{ représente un ensemble statistique:}$$

$$\psi = \begin{pmatrix} |a_1\rangle |(A+E)_1\rangle \text{ (prob. } |c_1|^2) \\ \text{ou} \\ |a_2\rangle |(A+E)_2\rangle \text{ (prob. } |c_2|^2) \end{pmatrix} \text{ soit: } \begin{pmatrix} A = a_1 \\ \text{ou} \\ A = a_2 \end{pmatrix}$$

Mais, dans **une** expérience, on n'a pas: 'le résultat est $(A = a_1 \text{ ou } A = a_2)$ '
 mais: *ou le résultat est* $(A = a_1)$ *ou le résultat est* $(A = a_2)$ '

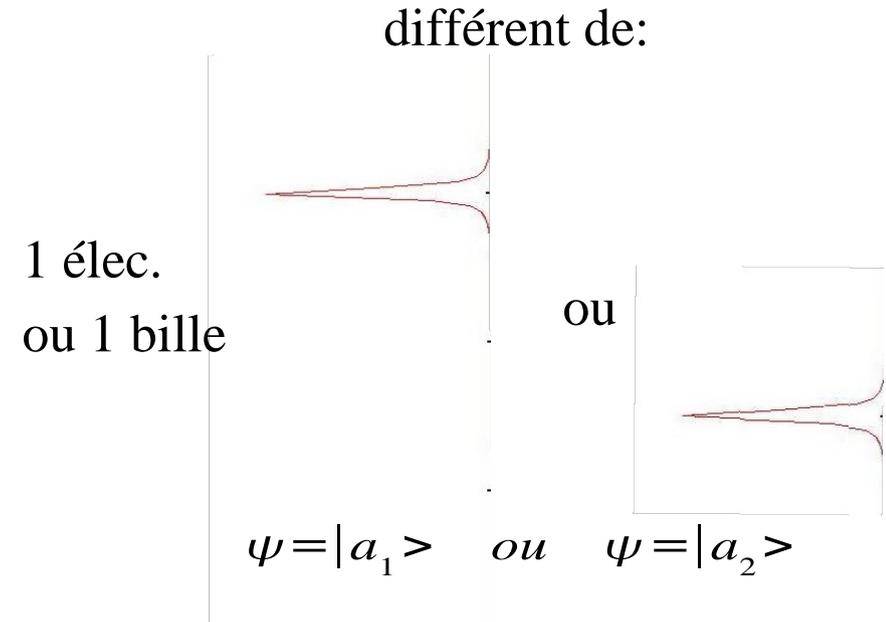
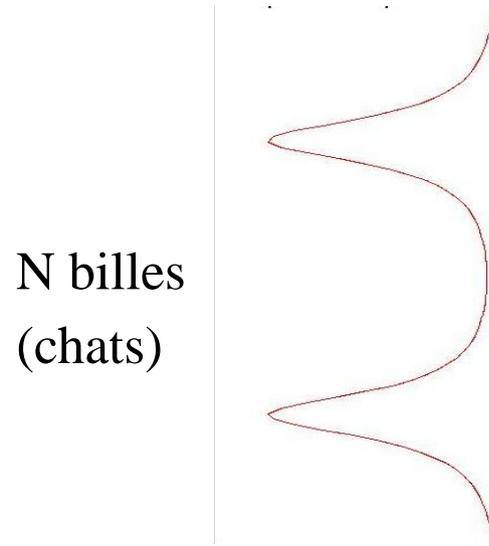
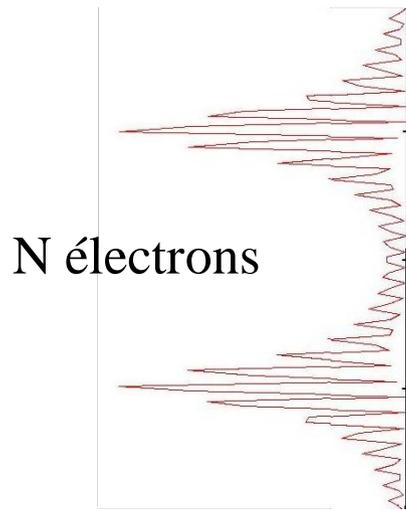
C'est l'unicité du résultat, non exprimé par une matrice statistique diagonale.
 Autrement dit:

$$\rho = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{pmatrix} \neq \rho = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ ou } \rho = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Le choix individuel entre $A = a_1$ et $A = a_2$ n'est pas expliqué par $-i\hbar \dot{\psi} = H \psi$

Critique de la décohérence (2/3)

Exemple: figures d'interférence



$$\rho = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & c_1^* c_2 \\ c_2^* c_1 & |c_2|^2 \end{pmatrix}$$

$$\rho = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & 0 \\ 0 & |c_2|^2 \end{pmatrix}$$

$$\rho = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ ou } \rho = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Analogie:

« je prends 'fromage ou dessert' » \neq « je prends fromage » ou « je prends dessert »

Critique de la décohérence (3/3)

- Problème no 2:

Question inhérente à toute description de la mesure comme interaction système-appareil et sa formalisation par

$$-i\hbar \frac{d\psi_{SA}}{dt} = H_{inter} \psi_{SA}$$

Si l'interaction système-appareil était un modèle complet, on devrait pouvoir, à partir des seuls concepts *Hilb* et *H*:

- Expliquer ce qu'on entend par:

- « Observable »
- « Telle observable a telle valeur »

- Démontrer:

- Que après l'interaction, sont les justes en phase de tel opérateur A_i >

(Cf Bell « Against measurement »: ~~observable~~ \implies « beable »)

La solution (1/3)

- Conclusion de ce qui précède:
 - La matrice statistique n'est pas adaptée au problème.
- Qu'est-ce qu'une mesure?
 - Les ingrédients d'une mesure:
 - Un dispositif manipulable (l'appareil), objet des perceptions
 - Un instrument universel: des symboles (mathématiques) pour exprimer le résultat
 - Un constat empirique: il n'y a pas de mesure sans (\implies avant) l'expression (mathématique) de son résultat.
- \implies Une mesure est l'expression (mathématique) du résultat de la mesure.

i.e. Une mesure est la production aléatoire et sans cause d'un symbole (mathématique) : son résultat (ex: ' $A = a_i$ ')

\implies pas besoin de la « conscience » de l'observateur.

La solution (2/3)

- La mesure (comme production de symbole mathématique) n'est pas une interaction physique
- Elle ne peut être décrite par un hamiltonien
- Les observables A sont arbitraires, irrémédiablement hétérogènes à la seule donnée de $Hilb$ et de H .

C'est pourquoi une observation ne peut être décrite par une interaction.

- Qui fait la mesure?
 - C'est un acte symbolique (i.e. pure inscription d'un symbole mathématique)
 - Un symbole (par ex. \vec{E}) ne désigne pas une « réalité » (le champ électrique) qui le précède: il est cette réalité.
 - C'est le langage, intersubjectif, impersonnel, sans sujet, qui fait la mesure.

La solution (3/3)

Von Neuman:

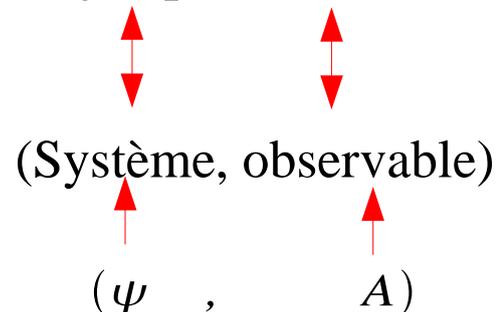
« Experience only makes statements of this type:
 'an observer has made a certain observation' , and never any like this:
 'a physical quantity has a certain value'. »

Bohr:

« By the word experiment , we simply refer to a situation
 where we can tell others what we have done and what we have learned. »

Vision linguistique en harmonie avec la structure du langage:

Tout énoncé est $(x, p) = (\text{sujet}, \text{prédicat})$



Perspectives

- ~~Axiomatisation de la MQ:~~

~~Niveau quantique ---> niveau classique~~

Niveau classique précède
le niveau quantique

- « Histoires rationnelles » (Omnès et al): histoires après-coup

- Application aux sciences cognitives

e.x. Que faire de: $|N\rangle = c_1|N_1\rangle + c_2|N_2\rangle$?

- Revisite du paradoxe de Landau-Peierls (non covariance de la

RPO): Mesure de p en $x = x_1$ à l'instant t_1 avec $\Delta p \implies \Delta x = h / \Delta p$
 puis de x à l'instant t_2 avec le résultat $x = x_2$ ($|x_2 - x_1| < \Delta x$)
 Aucun principe de MQ n'interdit

$$|x_2 - x_1| > c(t_2 - t_1)$$

Bibliographie:

Droz-Vincent: *QM evolution of relativistic particles*

Lurçat: *Niels Bohr et la physique quantique*

Omnès: *Comprendre la MQ*

Schneider: *The New Relativity Theory and QM*