

Le problème de l'interprétation et de la mesure en mécanique quantique. Apport de la théorie de Bohm.

M. A. Bouchene

Laboratoire « Collisions, Agrégats, Réactivité »

Université Paul Sabatier,

-Toulouse- France

Plan de l'exposé

- **Physique classique vs physique quantique**
- **Interprétation : position du problème**
- **Interprétation : position standard**
- **Théorie quantique du mouvement**

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ?

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!
- Intuitive ?

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!
- Intuitive ? Lagrangien, entropie !

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!
- Intuitive ? Lagrangien, entropie !
- Exempte de paradoxes ?

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!
- Intuitive ? Lagrangien, entropie !
- Exempte de paradoxes ? action à distance sans contact !

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!
- Intuitive ? Lagrangien, entropie !
- Exempte de paradoxes ? action à distance sans contact !

MAIS

- Concepts naturels
- « Idées claires et distinctes »

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!
- Intuitive ? Lagrangien, entropie !
- Exempte de paradoxes ? action à distance sans contact !

MAIS

- Concepts naturels
- « Idées claires et distinctes »

Physique quantique:

- Rend compte de toutes les observations expérimentales

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!
- Intuitive ? Lagrangien, entropie !
- Exempte de paradoxes ? action à distance sans contact !

MAIS

- Concepts naturels
- « Idées claires et distinctes »

Physique quantique:

- Rend compte de toutes les observations expérimentales

MAIS

Malaise: l'interprétation heurte le sens commun.

Introduction: Phys. Class. / Phys. Quant.

Physique classique:

- Simple ? chaos!
- Intuitive ? Lagrangien, entropie !
- Exempte de paradoxes ? action à distance sans contact !

MAIS

- Concepts **naturels**
- « **Idées claires et distinctes** »

Physique quantique:

- Rend compte de toutes les observations expérimentales

MAIS

Malaise: l'interprétation heurte le sens commun.

➔ Double- révolution {
– Concepts
– Fondements de la connaissance

Interprétation : le problème

- Problème d'interprétation ?

OU

- L'interprétation pose problème?

Interprétation : le problème

- Problème d'interprétation ?

OU

- L'interprétation pose problème?



LES DEUX!

Interprétation : le problème

- Problème d'interprétation ?
- Les **concepts** issus des postulats sont purement **mathématiques**

Interprétation : le problème

- **POSTULAT 1:**

A un **système quantique** est associé un vecteur d'état $|\psi\rangle$ appartenant à un **espace de Hilbert**

- **POSTULAT 2:**

A toute **grandeur physique** mesurable est associé un **opérateur** \hat{A} (observable)

- **POSTULAT 3:** l'évolution du système est donné par l'équation de Schrödinger

$$i\hbar \frac{d|\psi\rangle}{dt} = \hat{H}|\psi\rangle$$

- **POSTULAT 4:**

Résultat de mesure : valeur propre a de \hat{A} avec probabilité $P(a) = |\langle a|\psi\rangle|^2$

Théorie statistique!

- **POSTULAT 5:**

Après la mesure : $|\psi\rangle \rightarrow |a\rangle$ (réduction du Paquet d'onde)

- **POSTULAT 6:**

Particules identiques \rightarrow Faut **symétriser** (Bosons) ou **antisymétriser** (Fermions) la fonction d'onde.

Intrication sans interaction

Interprétation : le problème

- Problème d'interprétation ?
- Les **concepts** issus des postulats sont purement **mathématiques**
- Les postulats **sous-déterminent** l'interprétation

Interprétation : le problème

- Problème d'interprétation ?
 - Les **concepts** issus des postulats sont purement **mathématiques**
 - Les postulats **sous-déterminent** l'interprétation
- L'interprétation pose problème?

Quelque soit l'interprétation choisie, **on ne peut répondre à toutes les questions** légitimes que l'on peut se poser

Interprétation standard: position de principe

- Interprétation basée sur le point de vue de Bohr, Heisenberg, Born (**école de Copenhague**) opposé à celui d'Einstein, Schrödinger, De Broglie.

Interprétation standard: position de principe

- Interprétation basée sur le point de vue de Bohr, Heisenberg, Born (**école de Copenhague**) opposé à celui d'Einstein, Schrödinger, De Broglie.
- Contexte philosophique favorable (**positivisme**)

Interprétation standard: position de principe

- Interprétation basée sur le point de vue de Bohr, Heisenberg, Born (**école de Copenhague**) opposé à celui d'Einstein, Schrödinger, De Broglie.
- Contexte philosophique favorable (**positivisme**)
- Position: « **Prescriptions** » pour éviter le conflit entre le **réel mesurable** (sûr) et le **réel intrinsèque** (supposé).

Interprétation standard: position de principe

- Interprétation basée sur le point de vue de Bohr, Heisenberg, Born (**école de Copenhague**) opposé à celui d'Einstein, Schrödinger, De Broglie.
- Contexte philosophique favorable (**positivisme**)
- Position: « **Prescriptions** » pour éviter le conflit entre le **réel mesurable** (sûr) et le **réel intrinsèque** (supposé).
- **Interprétation minimale ou Refus d'interprétation.**
« **Calcule (ou mesure) et tais-toi!** »

Interprétation standard: position de principe

- Prescription pour l'état d'un système.
- Prescription pour les grandeurs dynamiques.

Interprétation standard: position de principe

- **Prescription pour l'état d'un système.**

Statut de $|\psi\rangle$: Outil de calcul des probabilités de mesure.

Van Kampen: « 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 ! »

Il contient tout ce qu'il faut pour **prédire** les statistiques de mesure mais ne dit rien sur le système: c'est une **entité mathématique** et non pas physique!

Au mieux, on peut dire que c'est une entité informationnelle : elle « contient » toutes les informations sur le système

- **Prescription pour les grandeurs dynamiques.**

Interprétation standard: position de principe

- **Prescription pour l'état d'un système.**

Statut de $|\psi\rangle$: Outil de calcul des probabilités de mesure.

Van Kampen: « 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 ! »

Il contient tout ce qu'il faut pour **prédire** les statistiques de mesure mais ne dit rien sur le système: c'est une **entité mathématique** et non pas physique!

Au mieux, on peut dire que c'est une entité informationnelle : elle « contient » toutes les informations sur le système

- **Prescription pour les grandeurs dynamiques.**

Positivisme (non-Réalisme): le système n'a pas de propriétés physiques en dehors de la mesure.

Entre deux mesures pas d'existence donnée aux grandeurs physiques (énergie, position,...) : il n'y a que des maths!

La réalité en dehors de la mesure est inaccessible: elle est décrite par un formalisme symbolique

Interp.Std: conséquences sur les concepts

Concepts quantiques

Interp.Std: conséquences sur les concepts

Concepts quantiques

- **Définition: Un lexique révélateur**

Non-localité, **non**-séparabilité, **in**déterminisme, relations d'**in**certitude, **non**-cloning,...

Interp.Std: conséquences sur les concepts

Concepts quantiques

- Définition: Un lexique révélateur

Non-localité, non-séparabilité, indéterminisme, relations d'incertitude, non-cloning,...

→ Les concepts quantiques ne se définissent que par des remises en cause de concepts classiques

Ex: interférences quantiques, champs quantiques, ...



Terme classique



Remise en cause

Interp.Std: conséquences sur les concepts

Concepts quantiques

- Définition: Un lexique révélateur

Non-localité, non-séparabilité, indéterminisme, relations d'incertitude, non-cloning,...

→ Les concepts quantiques ne se définissent que par des remises en cause de concepts classiques

Ex: interférences quantiques, champs quantiques, ...

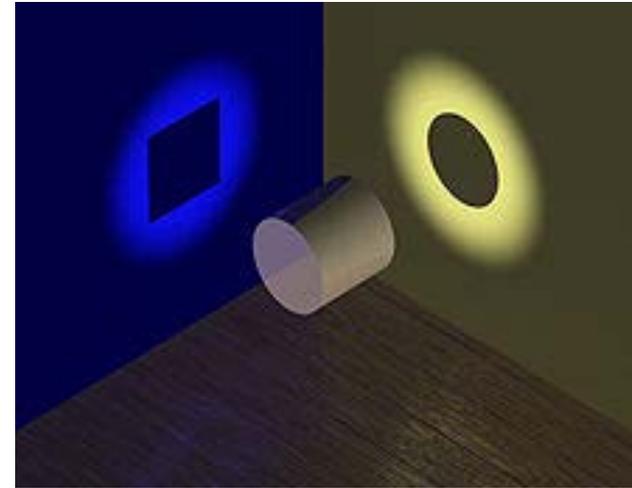


Terme classique



Remise en cause

Métaphore du cylindre



Interp.Std: conséquences sur les concepts

Concepts quantiques

- Définition: Un lexique révélateur

Non-localité, non-séparabilité, indéterminisme, relations d'incertitude, non-cloning,...

→ Les concepts quantiques ne se définissent que par des remises en cause de concepts classiques

Ex: interférences quantiques, champs quantiques, ...



Terme classique

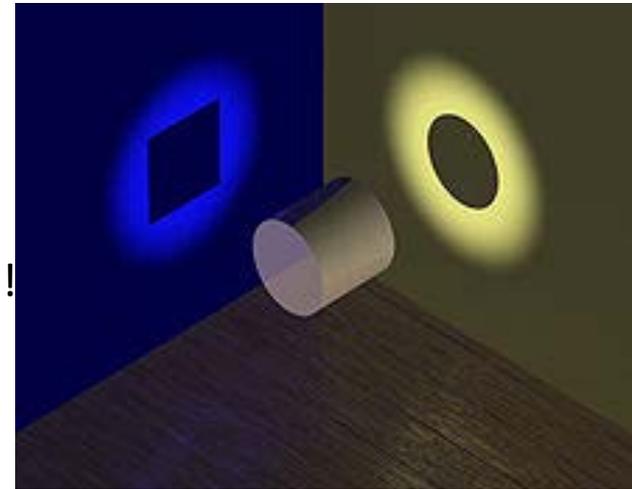


Remise en cause

- Redéfinition du tiers exclu: complémentarité

La MQ rapproche des concepts classiques opposés (onde-corpus.)!

Métaphore du cylindre



Interp.Std: conséquences sur les concepts

Concepts quantiques

- Définition: Un lexique révélateur

Non-localité, non-séparabilité, indéterminisme, relations d'incertitude, non-cloning,...

→ Les concepts quantiques ne se définissent que par des remises en cause de concepts classiques

Ex: interférences quantiques, champs quantiques, ...



Terme classique

Remise en cause

- Redéfinition du tiers exclu: complémentarité

La MQ rapproche des concepts classiques opposés (onde-corpus.)!

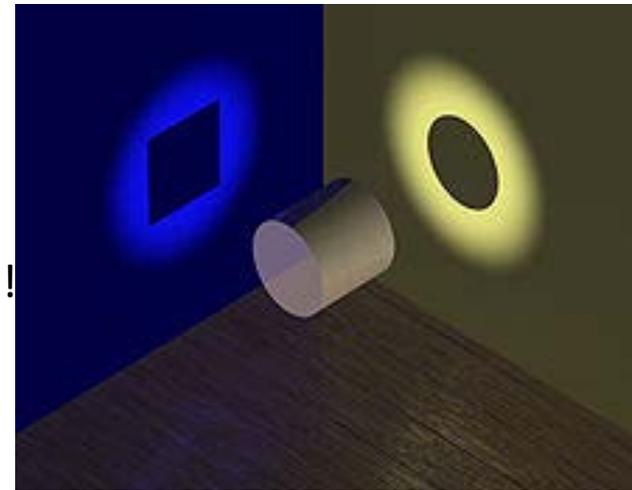
- Construction de la théorie:

Phys.Class : Concepts → Formalisme → Pratique → Réalité plus claire

Phys.Quant : Formalisme → Pratique → "Concepts" et Réalité flous

On introduit le formalisme puis on analyse les fondements!

Métaphore du cylindre



Interp.Std: conséquences sur les concepts

En appliquant le formalisme à diverses situations, on ouvre une « boîte de Pandore » quantique:

- Dualité onde-corpuscule (fentes d'Young...)
- Quantification (spectre d'absorption et d'émission)
- Non-séparabilité et non-localité (paradoxe EPR)
- Indéterminisme irréductible (paradoxe EPR)
- Superpositions macroscopiques (problème de la mesure, chat de Schrödinger)
- Intrication des particules identiques (exp. HBT, condensation de Bose, étoiles à neutron,...)
- Contextualité (Théorème Koechen-Specker, expérience GHZ)
- Impossibilité de dupliquer des états inconnus (théorème de no-cloning)
- ...



Interp.Std: conséquences sur les fondements de la connaissance

Fondements de la connaissance: Remise en cause profonde.

Interp.Std: conséquences sur les fondements de la connaissance

Fondements de la connaissance: Remise en cause profonde.

- **Théorie non-ontologique:**

Prédit tous les résultats expérimentaux mais sans expliquer le réel.



Prédire n'est pas expliquer!

Interp.Std: conséquences sur les fondements de la connaissance

Fondements de la connaissance: Remise en cause profonde.

- **Théorie non-ontologique:**

Prédit tous les résultats expérimentaux mais sans expliquer le réel.



Prédire n'est pas expliquer!

- **Théorie de l'observation active:**

Une mesure n'est plus un acte d'observation passif



Observer c'est créer !

Interp.Std: conséquences sur les fondements de la connaissance

Fondements de la connaissance: Remise en cause profonde.

- **Théorie non-ontologique:**

Prédit tous les résultats expérimentaux mais sans expliquer le réel.

→ **Prédire n'est pas expliquer!**

- **Théorie de l'observation active:**

Une mesure n'est plus un acte d'observation passif

→ **Observer c'est créer !**

- **Théorie fondamentalement indéterministe:**

Une particule soumise à des contraintes garde son « libre arbitre »

→ **Hasard sans causes!**

Interp.Std: conséquences sur les fondements de la connaissance

Fondements de la connaissance: Remise en cause profonde.

- **Théorie non-ontologique:**

Prédit tous les résultats expérimentaux mais sans expliquer le réel.

→ **Prédire n'est pas expliquer!**

- **Théorie de l'observation active:**

Une mesure n'est plus un acte d'observation passif

→ **Observer c'est créer !**

- **Théorie fondamentalement indéterministe:**

Une particule soumise à des contraintes garde son « libre arbitre »

→ **Hasard sans causes!**

Implications philosophiques au-delà de la physique

Interprétation standard: le problème de la mesure

Appareil de mesure: Dispositif particulier

Interprétation standard: le problème de la mesure

Appareil de mesure: Dispositif particulier

- Macroscopique (donc couplé à l'environnement)

Interprétation standard: le problème de la mesure

Appareil de mesure: Dispositif particulier

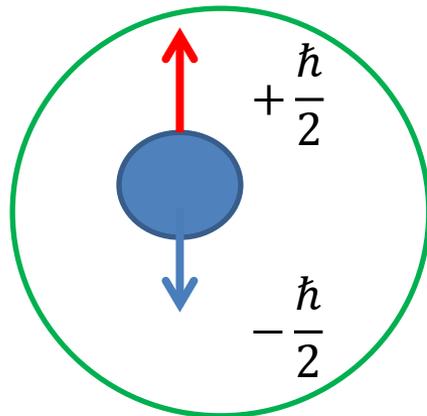
- Macroscopique (donc couplé à l'environnement)
- Calibration (Van Neumann) : Corrèle chaque valeur de l'observable à un état différent de cet appareil (procédé intuitif de l'expérimentateur)

Interprétation standard: le problème de la mesure

Appareil de mesure: Dispositif particulier

- Macroscopique (donc couplé à l'environnement)
- Calibration (Van Neumann) : Corrèle chaque valeur de l'observable à un état différent de cet appareil (procédé intuitif de l'expérimentateur)

Système quantique SQ



INTERACTION



Appareil de mesure SM



Interprétation standard: le problème de la mesure

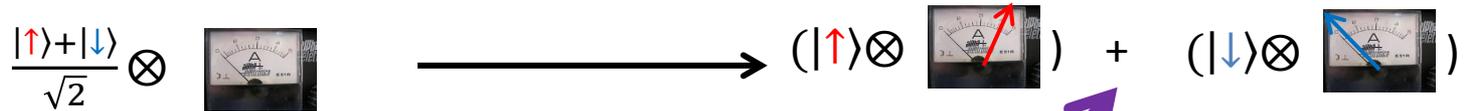
Si on traite l' A.M comme un système quantique

$$\frac{|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \otimes \text{AM} \longrightarrow (|\uparrow\rangle \otimes \text{AM}_{\uparrow}) + (|\downarrow\rangle \otimes \text{AM}_{\downarrow})$$

Résultat: **intrication SQ-AM**

Interprétation standard: le problème de la mesure

Si on traite l' A.M comme un système quantique

$$\frac{|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \otimes \text{AM} \longrightarrow (|\uparrow\rangle \otimes \text{AM}_{\uparrow}) + (|\downarrow\rangle \otimes \text{AM}_{\downarrow})$$


Résultat: **intrication SQ-AM**

Mystère de la mesure: on n'observe jamais de superposition d'états macroscopiques

Interprétation standard: le problème de la mesure

Si on traite l' A.M comme un système quantique

$$\frac{|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \otimes \text{AM} \longrightarrow (|\uparrow\rangle \otimes \text{AM}_{\uparrow}) + (|\downarrow\rangle \otimes \text{AM}_{\downarrow})$$

Résultat: **intrication SQ-AM**

Mystère de la mesure: on n'observe jamais de superposition d'états macroscopiques

Postulats 4 et 5: On obtient **une seule possibilité** soit:

$$(|\uparrow\rangle \otimes \text{AM}_{\uparrow})$$

Soit:

$$(|\downarrow\rangle \otimes \text{AM}_{\downarrow})$$

POURQUOI ?

Interprétation standard: le problème de la mesure

Interprétations:

Interprétation standard: pas clair !

- Bohr: Frontière quantique-classique (sorte de « transition de phase »)
Quand ? Comment ? Pas de réponse

Interprétation standard: le problème de la mesure

Interprétations:

Interprétation standard: pas clair !

- Bohr: Frontière quantique-classique (sorte de « transition de phase »)
Quand ? Comment ? Pas de réponse

LA MQ STANDARD DECRIT LES CONSEQUENCES D'UNE MESURE MAIS N'EXPLICITE PAS LE PROCESSUS DE MESURE EN LUI-MÊME.

Interprétation standard: le problème de la mesure

Interprétations:

Interprétation standard: pas clair !

- Bohr: Frontière quantique-classique (sorte de « transition de phase »)
Quand ? Comment ? Pas de réponse

LA MQ STANDARD DECRIT LES CONSEQUENCES D'UNE MESURE MAIS N'EXPLICITE PAS LE PROCESSUS DE MESURE EN LUI-MÊME.

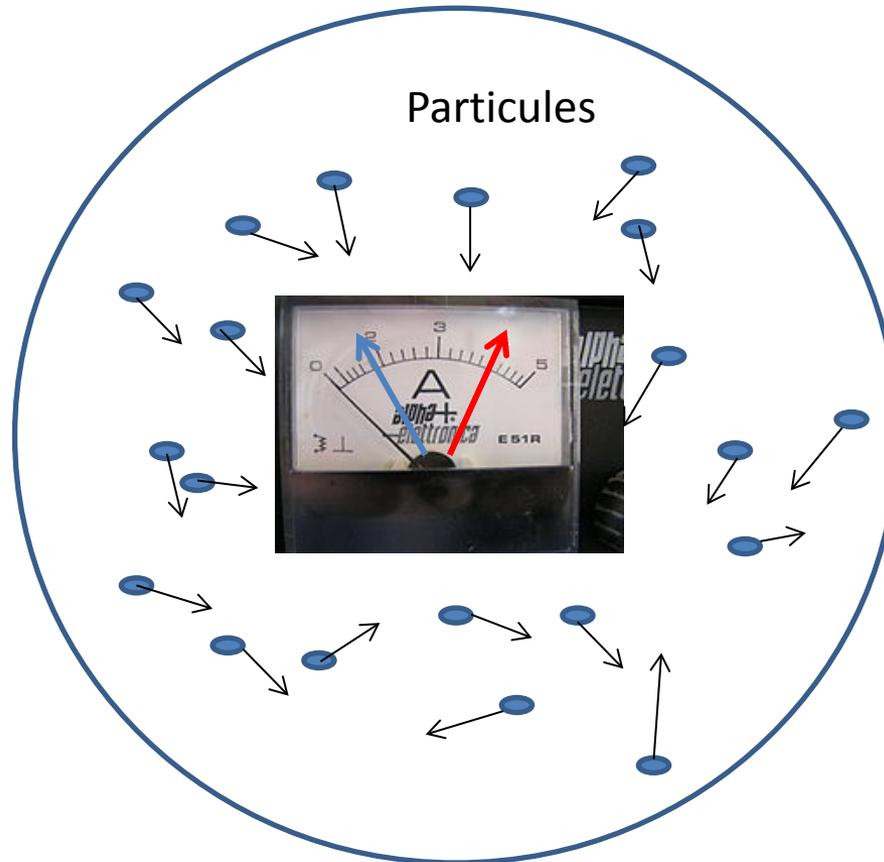
Autres interprétations hardies (mais sérieuses)

- **Wigner**: la réduction du paquet d'onde se fait dans la conscience de l'observateur (étape ultime de la mesure)

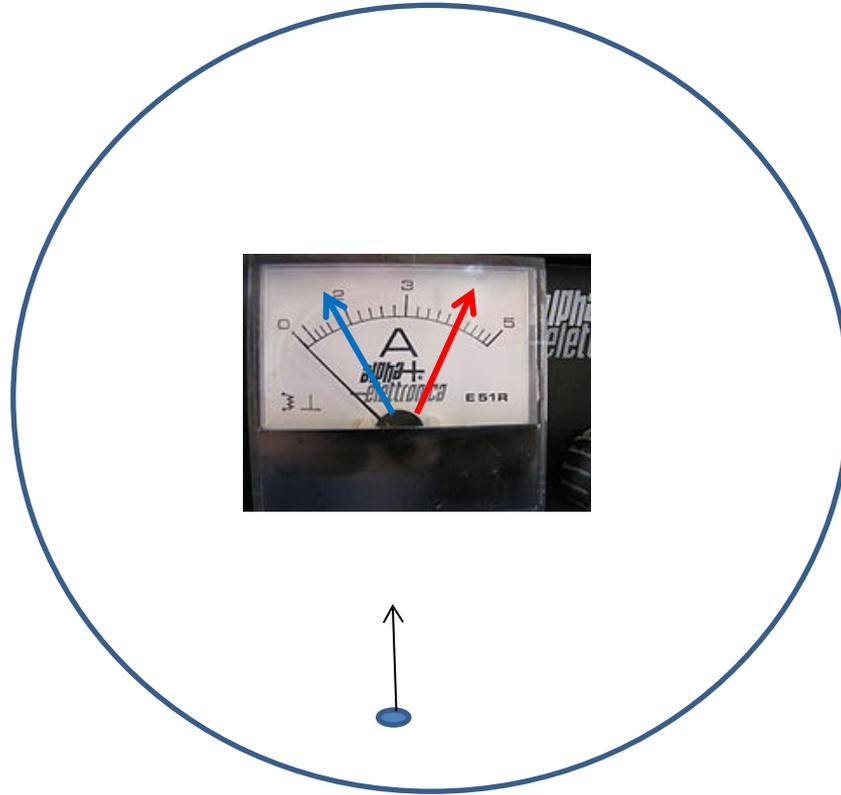
- **Everett** : toutes les possibilités se produisent mais dans des univers parallèles

-....

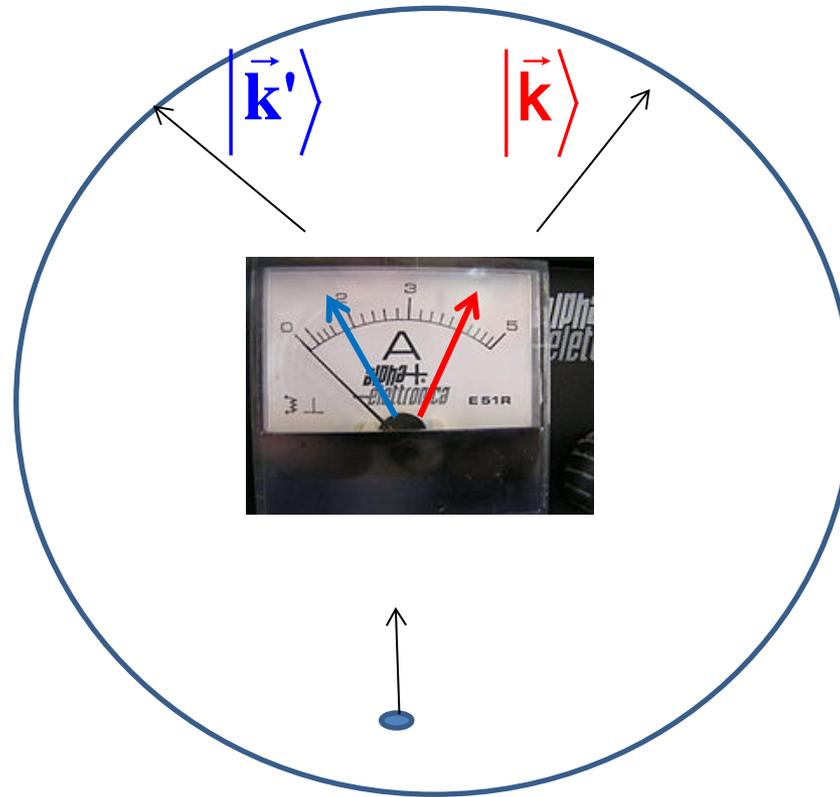
Une lueur d'espoir: La théorie de la décohérence (Zeh, Joos, Zurek 70-80)



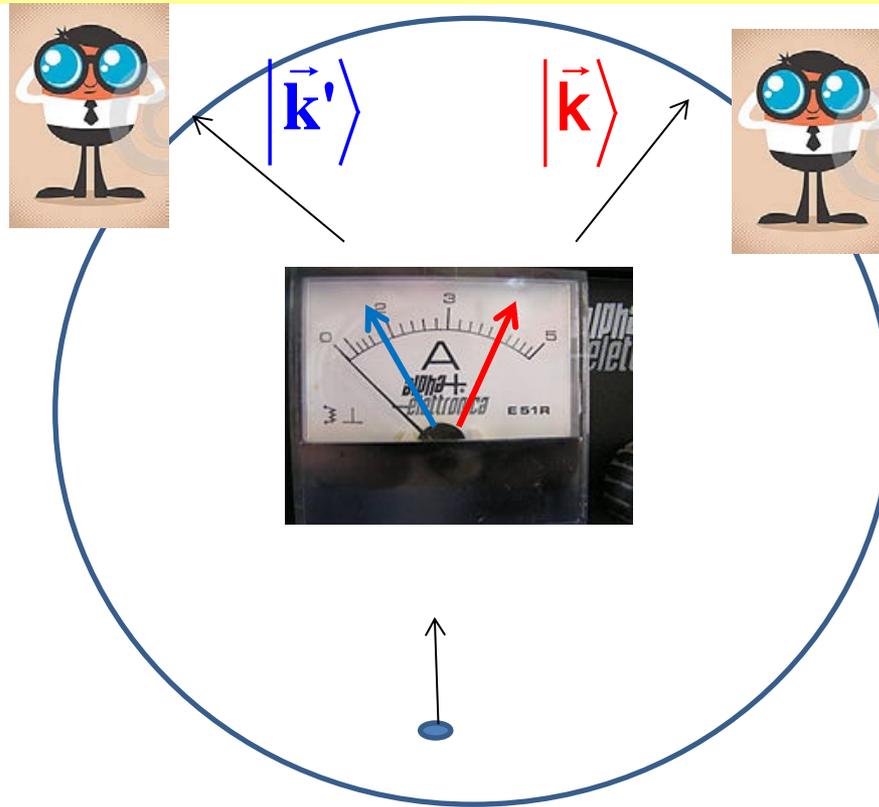
Décohérence : Rôle de l'environnement



Décohérence : Rôle de l'environnement

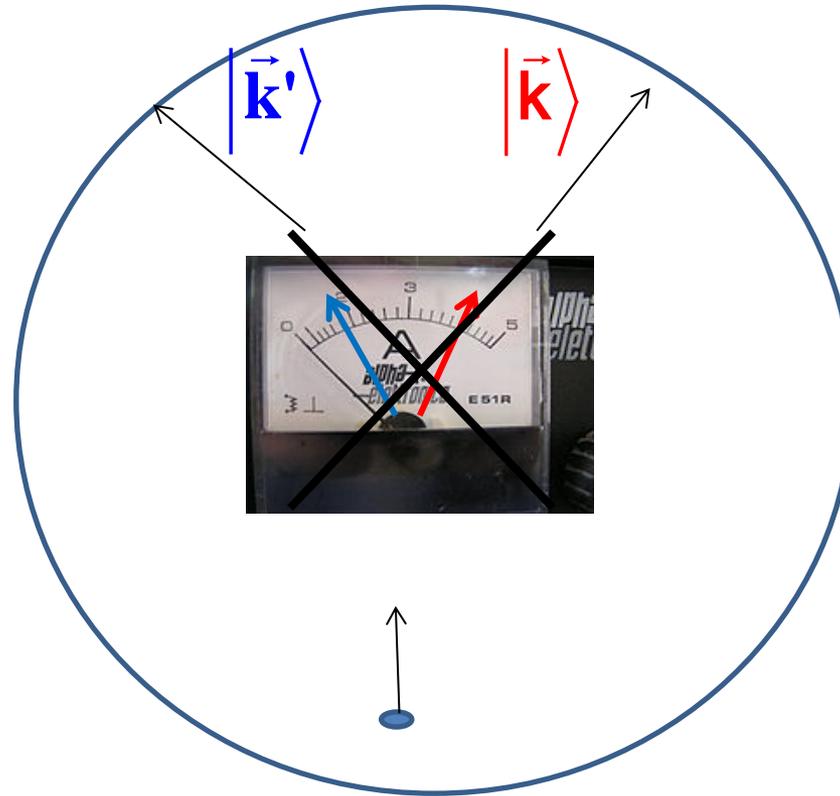


Décohérence : Rôle de l'environnement



- **Complémentarité** : Impossible d'avoir les interférences et le chemin suivi

Décohérence : Rôle de l'environnement



- **Complémentarité** : Impossible d'avoir les interférences et le chemin suivi
- Il suffit d'une diffusion d'une particule de l'environnement par l'appareil de mesure pour que la décohérence s'effectue : **processus très efficace**
- Temps de collision: **$T_{1E-1AM}/N_{AM} \sim 10^{-32} \text{ s} !$**

Au-delà de l'interprétation standard: Théorie de D.Bohm (1952)

- Théorie **ontologique** à **variables «cachées»** (supplémentaires) et **non-locale**.
- Développement de la **théorie de l'onde pilote** de de Broglie (1927)
- Concilie la vision **classique** et **quantique** (**théorie quantique du mvt**)
- **La mesure est un processus d'interaction ordinaire**

Théorie quantique du mouvement

Hypothèses:

Théorie quantique du mouvement

Hypothèses:

- **Equation d'onde** : La fonction d'onde la particule correspond à **un champ physique**. Elle appartient toujours à un espace de Hilbert et évolue selon l'équation de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \text{ (postulats 1, 3 réaménagés)}$$

Théorie quantique du mouvement

Hypothèses:

- **Equation d'onde** : La fonction d'onde la particule correspond à un **champ physique**. Elle appartient toujours à un espace de Hilbert et évolue selon l'équation de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \text{ (postulats 1, 3 réaménagés)}$$

- **Guidage par l'onde**: Une particule occupe une position \vec{r} à chaque instant (théorie **ontologique**) et subit l'action de sa fonction d'onde : $\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} S$, avec $\psi = R e^{iS}$. (**Position: variable supplémentaire** –cachée-)

Théorie quantique du mouvement

Hypothèses:

- **Equation d'onde** : La fonction d'onde la particule correspond à **un champ physique**. Elle appartient toujours à un espace de Hilbert et évolue selon l'équation de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \text{ (postulats 1, 3 réaménagés)}$$

- **Guidage par l'onde**: Une particule occupe une position \vec{r} à chaque instant (théorie **ontologique**) et subit l'action de sa fonction d'onde : $\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} S$, avec $\psi = R e^{iS}$. (**Position: variable supplémentaire** –cachée-)

- **Equilibre quantique** : A un instant $t = 0$, la particule se trouve dans une position **indéterminée** avec une densité de probabilité donnée par $|\psi|^2(t = 0)$

Théorie quantique du mouvement

Hypothèses:

- **Equation d'onde** : La fonction d'onde la particule correspond à **un champ physique**. Elle appartient toujours à un espace de Hilbert et évolue selon l'équation de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \text{ (postulats 1, 3 réaménagés)}$$

- **Guidage par l'onde**: Une particule occupe une position \vec{r} à chaque instant (théorie **ontologique**) et subit l'action de sa fonction d'onde : $\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} S$, avec $\psi = R e^{iS}$. (**Position: variable supplémentaire** –cachée-)

- **Equilibre quantique** : A un instant $t = 0$, la particule se trouve dans une position **indéterminée** avec une densité de probabilité donnée par $|\psi|^2(t = 0)$

Postulat 6 conservé

Postulat 2: plus loin; postulats 4 et 5 : démontrables

Théorie quantique du mouvement: Potentiel quantique

Potentiel quantique :

$$\begin{cases} -\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} S \\ -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \\ H = T + V \end{cases}$$

Théorie quantique du mouvement: Potentiel quantique

Potentiel quantique :

$$\begin{cases} -\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} S \\ -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \\ H = T + V \end{cases} \rightarrow m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\vec{\nabla} (V + Q) \quad \text{loi de Newton modifiée!!}$$

Potentiel classique Potentiel quantique $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R}$

Théorie quantique du mouvement: Potentiel quantique

Potentiel quantique :

$$\begin{cases} -\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} S \\ -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \\ H = T + V \end{cases} \rightarrow m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\vec{\nabla} (V + Q) \quad \text{loi de Newton modifiée!!}$$

Potentiel classique Potentiel quantique $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R}$

Effet Non local: Même les endroits où $R \approx 0$ contribuent

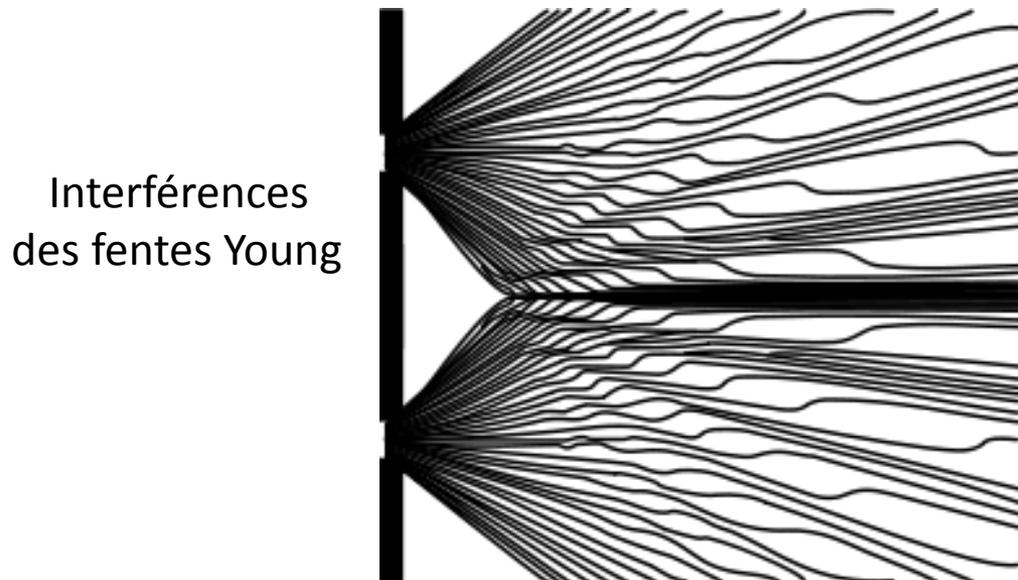
Théorie quantique du mouvement: Potentiel quantique

Potentiel quantique :

$$\begin{cases} -\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} S \\ -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \\ H = T + V \end{cases} \rightarrow m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\vec{\nabla} (V + Q) \quad \text{loi de Newton modifiée!!}$$

Potentiel classique
Potentiel quantique $Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R}$

Effet Non local: Même les endroits où $R \approx 0$ contribuent



Interprétation:

Particule passe par un seul trou (selon condition initiale) et évite les franges sombres car guidée par l'onde à travers le potentiel quantique

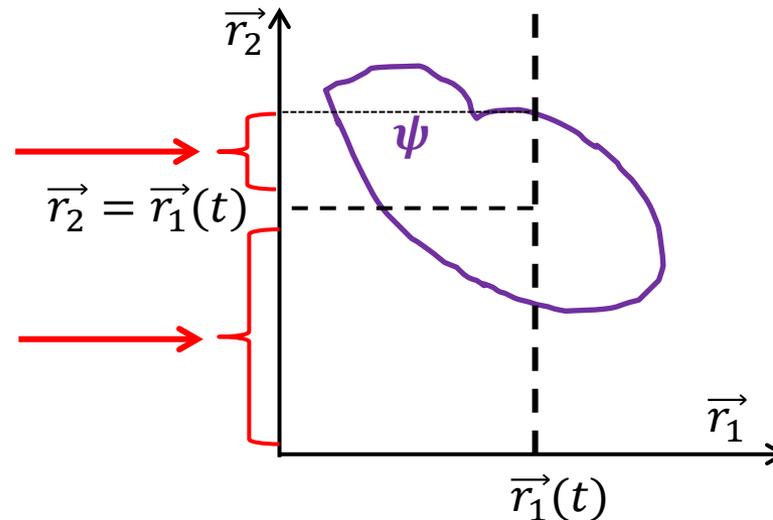
(Trajectoires courbées par Q)

Théorie quantique du mouvement: Non-localité

Système N Particules

$$\psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N, t): \quad \frac{d\vec{r}_l}{dt} = \frac{1}{m_l |\psi|^2} \text{Re} \left(\frac{\hbar}{i} \psi^* \vec{\nabla}_l \psi \right), l = 1, \dots, N.$$

Dépendance
Non locale
(instantanée)



Théorie quantique du mouvement: Particules identiques

Postulat 6 (maintenu) : on symétrise ou antisymétrise la fonction d'onde $\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots)$

Conséquence sur le mouvement:

$$m \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = -\vec{\nabla}_i (V + Q), \quad Q = - \sum_i \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta_i R}{R}$$

Théorie quantique du mouvement: Particules identiques

Postulat 6 (maintenu) : on symétrise ou antisymétrise la fonction d'onde $\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots)$

Conséquence sur le mouvement:

$$m \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = -\vec{\nabla}_i (V + Q), \quad Q = - \sum_i \frac{\hbar^2 \Delta_i R}{2m R}$$

On peut montrer que : **Bosons** \rightarrow Q : potentiel *attractif*
Fermions \rightarrow Q : potentiel *répulsif*

Théorie quantique du mouvement: Particules identiques

Postulat 6 (maintenu) : on symétrise ou antisymétrise la fonction d'onde $\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots)$

Conséquence sur le mouvement:

$$m \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = -\vec{\nabla}_i (V + Q), \quad Q = - \sum_i \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta_i R}{R}$$

On peut montrer que : **Bosons** $\rightarrow Q$: potentiel *attractif*
Fermions $\rightarrow Q$: potentiel *répulsif*

\rightarrow Explication simple du principe de Pauli et de la condensation de Bose-Einstein

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

On distingue deux grandeurs:

- Les **observables physiques** habituelles en MQ : $\hat{A}(\hat{\vec{r}}, \hat{\vec{p}} = \frac{\hbar}{i} \vec{\nabla}, t)$.
- Les **grandeurs dynamiques locales** (associées à la trajectoire): $A_{loc}(\vec{r}, t)$

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

On distingue deux grandeurs:

- Les **observables physiques** habituelles en MQ : $\hat{A}(\hat{\vec{r}}, \hat{\vec{p}} = \frac{\hbar}{i} \vec{\nabla}, t)$.
- Les **grandeurs dynamiques locales** (associées à la trajectoire): $A_{loc}(\vec{r}, t)$

RELATION ?

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

On distingue deux grandeurs:

- Les **observables physiques** habituelles en MQ : $\hat{A}(\hat{\vec{r}}, \hat{\vec{p}} = \frac{\hbar}{i} \vec{\nabla}, t)$.
- Les **grandeurs dynamiques locales** (associées à la trajectoire): $A_{loc}(\vec{r}, t)$

RELATION ?

On part de $\langle \hat{A} \rangle = \int \psi^* \hat{A} \psi d^3 \vec{r} = \int A_{loc}(\vec{r}, t) |\psi|^2 d^3 \vec{r} \rightarrow A_{loc}(\vec{r}, t) = \frac{\psi^* \hat{A} \psi}{|\psi|^2}$

MQ

interprétation Bohmienne

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

On distingue deux grandeurs:

- Les **observables physiques** habituelles en MQ : $\hat{A}(\hat{\vec{r}}, \hat{\vec{p}} = \frac{\hbar}{i} \vec{\nabla}, t)$.
- Les **grandeurs dynamiques locales** (associées à la trajectoire): $A_{loc}(\vec{r}, t)$

RELATION ?

On part de $\langle \hat{A} \rangle = \int \psi^* \hat{A} \psi d^3 \vec{r} = \int A_{loc}(\vec{r}, t) |\psi|^2 d^3 \vec{r} \rightarrow A_{loc}(\vec{r}, t) = \frac{\psi^* \hat{A} \psi}{|\psi|^2}$

MQ

interprétation Bohmienne

- Position : $\vec{r}_{loc} = \vec{r} \rightarrow$ position est une grandeur **intrinsèque**

- Impulsion: $\vec{p}_{loc} = \hbar \vec{\nabla} S = m \vec{v}$

- Energie : $E_{loc} = \frac{(\hbar \vec{\nabla} S)^2}{2m} + V + Q$

- Moment cinétique: $\vec{L}_{loc} = \vec{r} \times \vec{\nabla} S$

....

Grandeurs **non intrinsèques**:

(définition dépendante de ψ)

\rightarrow *origine de la contextualité*

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Le problème de la mesure devient:

Dans une mesure on devrait détecter les valeurs locales $A_{loc}(\vec{r}, t) = \frac{\psi^* \hat{A} \psi}{|\psi|^2}$

OR

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Le problème de la mesure devient:

Dans une mesure on devrait détecter les valeurs locales $A_{loc}(\vec{r}, t) = \frac{\psi^* \hat{A} \psi}{|\psi|^2}$

OR

MQ → on détecte spectre de $\hat{A}(\hat{\vec{r}}, \hat{\vec{p}} = \frac{\hbar}{i} \vec{\nabla}, t)$ (continue ou discret!)

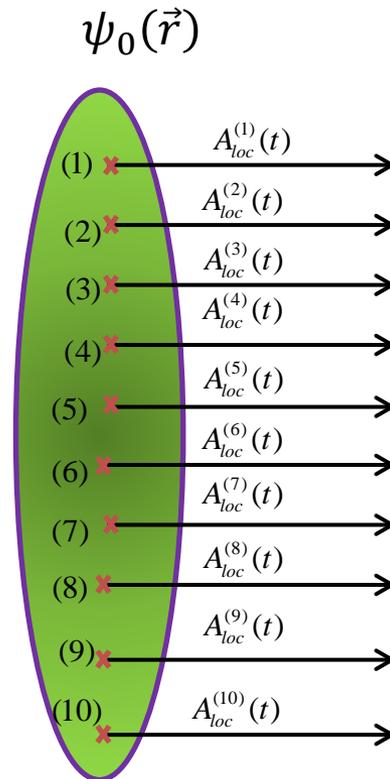
On peut le démontrer ! (pas de postulat)

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Avant la mesure de la grandeur associée à \hat{A}

1 particule :

- Position initiale aléatoire selon $|\psi_0|^2(\vec{r})$
- Suit 1 trajectoire

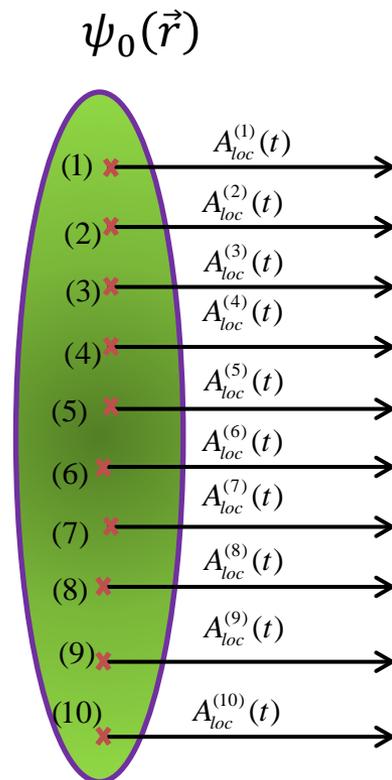


Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

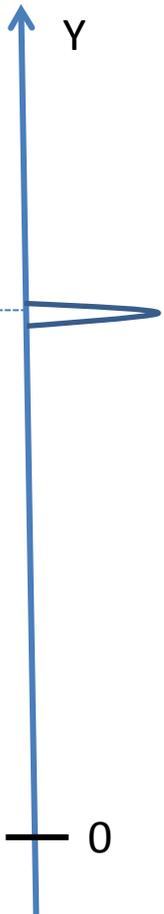
Avant la mesure de la grandeur associée à \hat{A}

1 particule :

- Position initiale aléatoire selon $|\psi_0|^2(\vec{r})$
- Suit 1 trajectoire



$\phi_0(Y)$



$$\psi(\vec{r}, Y, t = 0) = \psi_0(\vec{r}) \phi_0(Y)$$

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Pendant la mesure de \hat{A} : *Interaction particule – AM* ($\hat{H}_{int} = g\hat{A} \hat{P}_y$)

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Pendant la mesure de \hat{A} : *Interaction particule – AM* ($\hat{H}_{int} = g\hat{A} \hat{P}_y$)

Que se passe t-il pour l'onde?

Résolution de l'équation de Schrödinger :

- $i\hbar \frac{d\psi}{dt} = \hat{H}_{int} \psi$
- Cond. Init. $\psi(\vec{r}, Y, t = 0) = \psi_0(\vec{r}) \phi_0(Y)$
- Base de \hat{A} : $\psi_0(\vec{r}) = \sum_a c_a \psi_a(\vec{r})$

$$\rightarrow \psi(\vec{r}, Y, T) = \sum_a c_a \psi_a(\vec{r}) \phi_0(Y - g a T)$$

(Intrication particule-AM)

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Pendant la mesure de \hat{A} : *Interaction particule – AM* ($\hat{H}_{int} = g\hat{A} \hat{P}_y$)

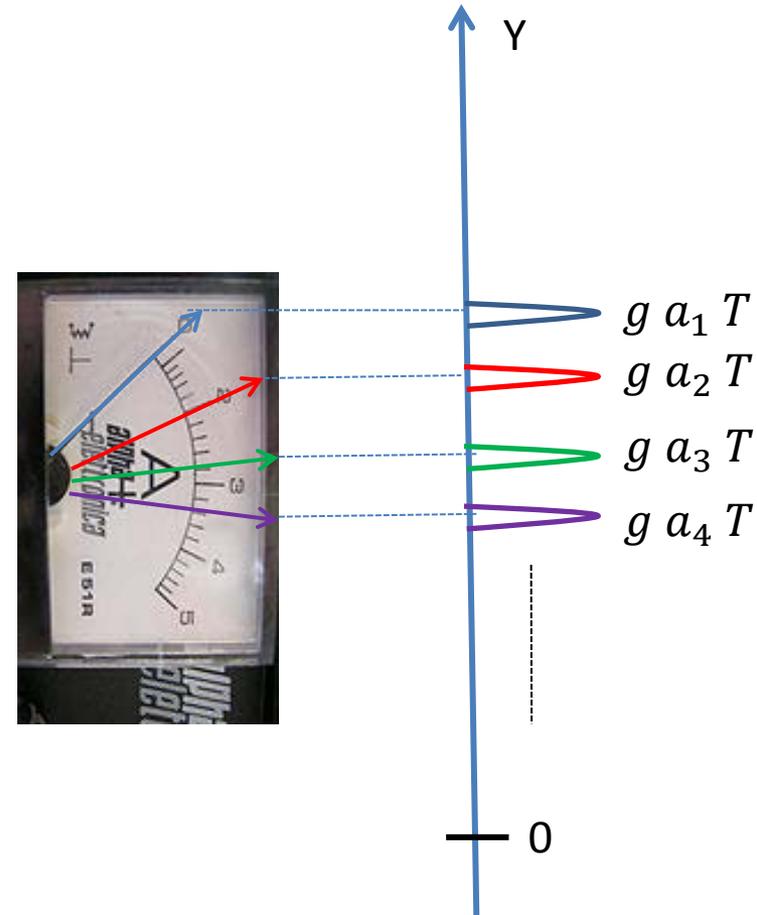
Que se passe t-il pour l'onde?

Résolution de l'équation de Schrödinger :

- $i\hbar \frac{d\psi}{dt} = \hat{H}_{int} \psi$
- Cond. Init. $\psi(\vec{r}, Y, t = 0) = \psi_0(\vec{r}) \phi_0(Y)$
- Base de \hat{A} : $\psi_0(\vec{r}) = \sum_a c_a \psi_a(\vec{r})$

$$\rightarrow \psi(\vec{r}, Y, T) = \sum_a c_a \psi_a(\vec{r}) \phi_0(Y - g a T)$$

(Intrication particule-AM)



Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

$$\rightarrow \psi(\vec{r}, Y, T) = \sum_a c_a \psi_a(\vec{r}) \phi_0(Y - g a T)$$

Que se passe-t-il pour la particule ?

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

$$\rightarrow \psi(\vec{r}, Y, T) = \sum_a c_a \psi_a(\vec{r}) \phi_0(Y - g a T)$$

Que se passe-t-il pour la particule ?

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{1}{m|\psi|^2} \text{Re} \left(\frac{\hbar}{i} \psi^* \vec{\nabla} \psi \right), A_{loc}(\vec{r}, t) = \frac{\psi^* \hat{A} \psi}{|\psi|^2}$$

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

$$\rightarrow \psi(\vec{r}, Y, T) = \sum_a c_a \psi_a(\vec{r}) \phi_0(Y - g a T)$$

Que se passe-t-il pour la particule ?

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{1}{m|\psi|^2} \text{Re} \left(\frac{\hbar}{i} \psi^* \vec{\nabla} \psi \right), A_{loc}(\vec{r}, t) = \frac{\psi^* \hat{A} \psi}{|\psi|^2}$$

Les $\phi_0(Y - g a T)$ ne se recouvrent pas: L'effet de l'intrication disparaît

Décohérence par l'appareil de mesure

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

$$\rightarrow \psi(\vec{r}, Y, T) = \sum_a c_a \psi_a(\vec{r}) \phi_0(Y - g a T)$$

Que se passe-t-il pour la particule ?

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{1}{m|\psi|^2} \text{Re} \left(\frac{\hbar}{i} \psi^* \vec{\nabla} \psi \right), A_{loc}(\vec{r}, t) = \frac{\psi^* \hat{A} \psi}{|\psi|^2}$$

Les $\phi_0(Y - g a T)$ ne se recouvrent pas: L'effet de l'intrication disparaît

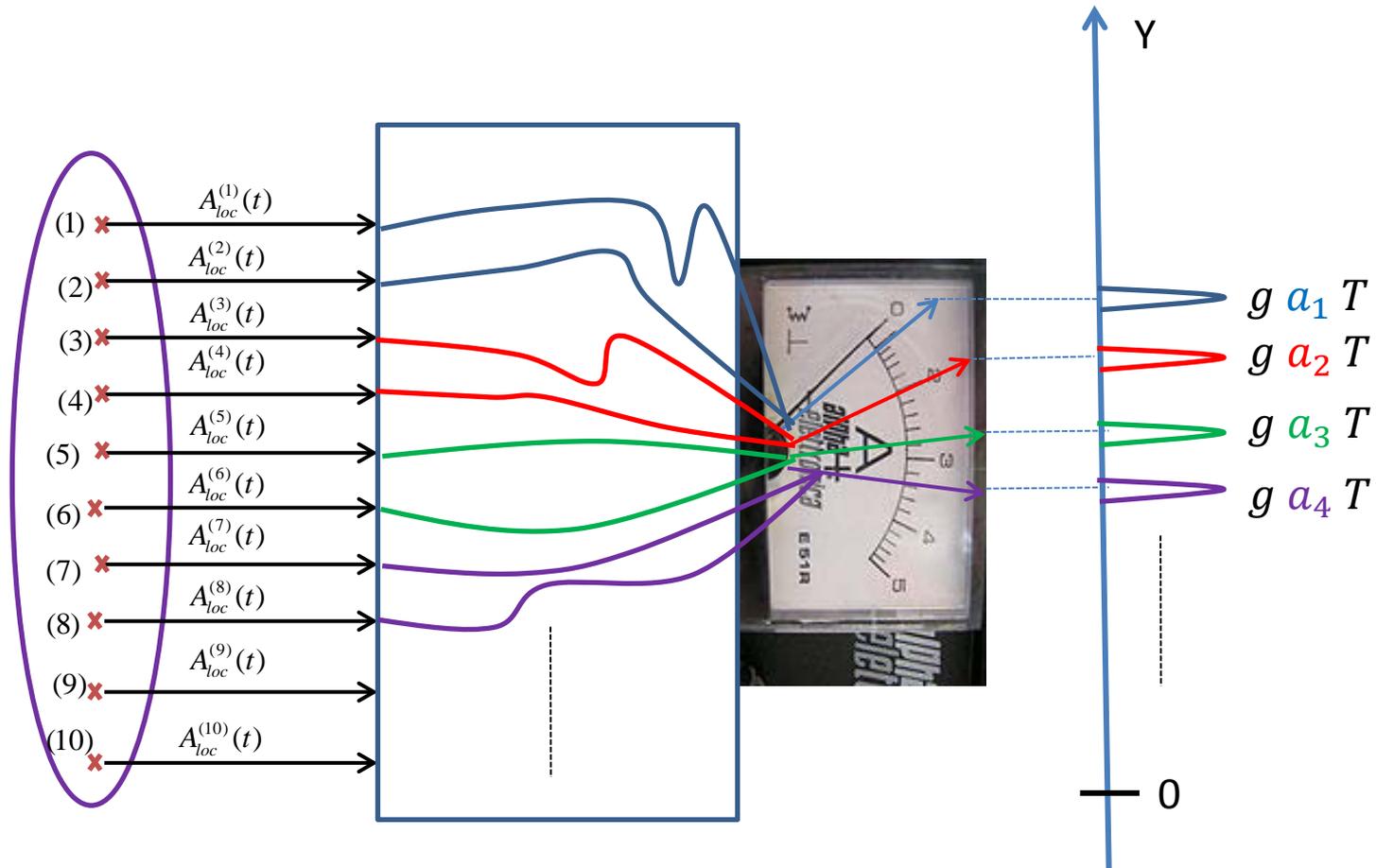
Décohérence par l'appareil de mesure

A T, « l'aiguille » est sur une position Y aléatoire: une seule composante ψ_a donne une contribution non-nulle.

$$\rightarrow \frac{d\vec{r}}{dt}(T) = \frac{1}{m|\psi_a|^2} \text{Re} \left(\frac{\hbar}{i} \psi_a^* \vec{\nabla} \psi_a \right), A_{loc}(\vec{r}, T) = \frac{\psi_a^* \hat{A} \psi_a}{|\psi_a|^2} = a!$$

Phénomène des ondes vides: Résolution du problème de la mesure

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

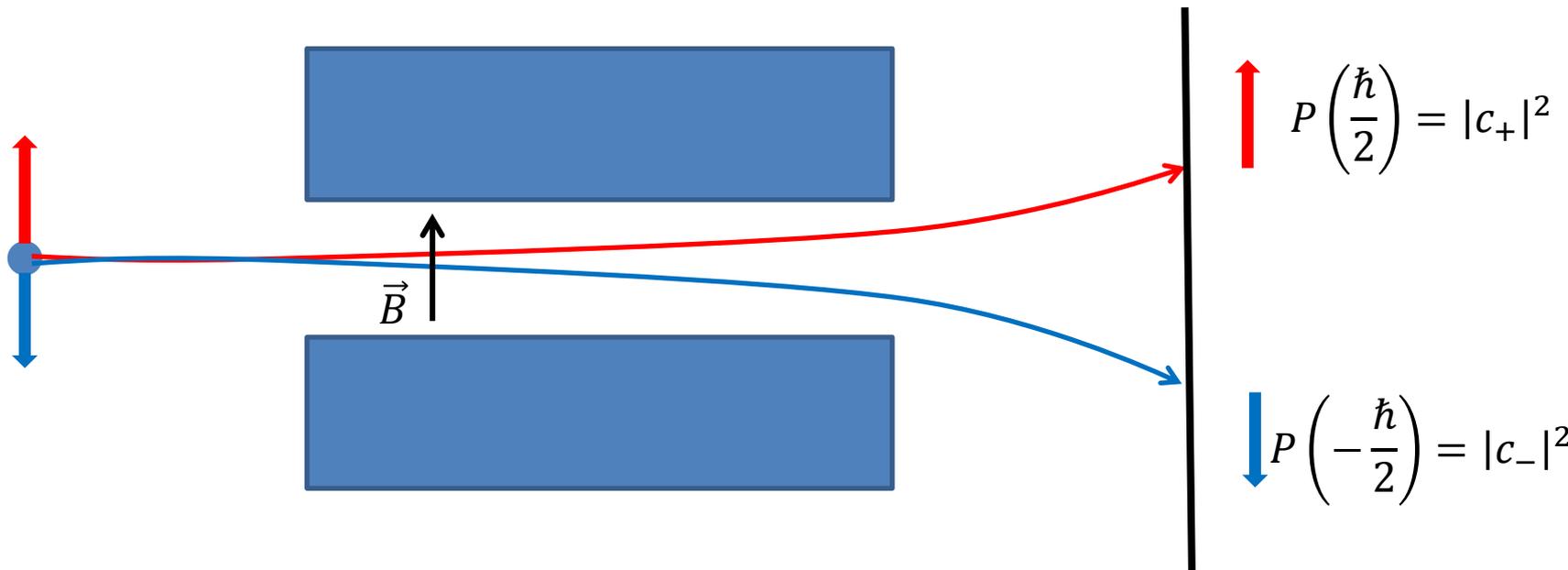


Quelque soit la condition initiale, A_{loc} se transforme continument et irrémédiablement en une valeur propre de \hat{A} ! Grand succès de cette théorie!

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Exemple: expérience de Stern-Gerlach

$$\psi = c_+ \psi_{1/2} + c_- \psi_{-1/2}$$



Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Exemple: expérience de Stern-Gerlach

$$\psi = c_+ \psi_{1/2} + c_- \psi_{-1/2}, (|c_+|^2 = 0.75, |c_-|^2 = 0.25)$$

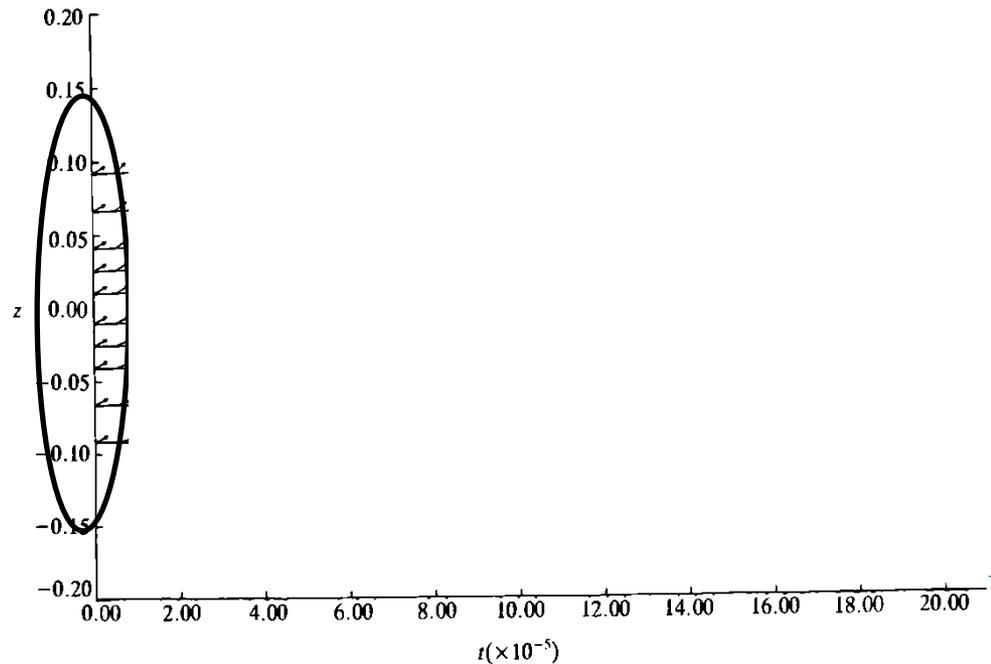


Fig. 9.13 Trajectories and orientations $\theta(z, t)$ associated with Figs. 9.10 and 9.11 (from Dewdney, Holland and Kyprianidis (1986)).

Théorie quantique du mouvement: Opération de mesure

Exemple: expérience de Stern-Gerlach

$$\psi = c_+ \psi_{1/2} + c_- \psi_{-1/2}, (|c_+|^2 = 0.75, |c_-|^2 = 0.25)$$

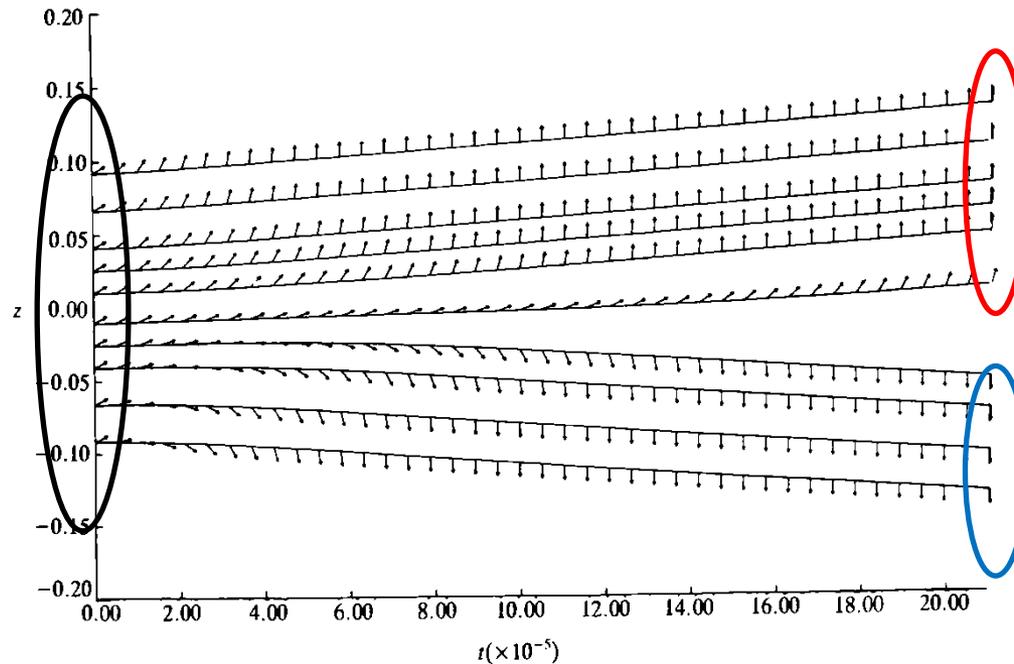


Fig. 9.13 Trajectories and orientations $\theta(z, t)$ associated with Figs. 9.10 and 9.11 (from Dewdney, Holland and Kyprianidis (1986)).

Le potentiel quantique fait tourner le moment cinétique de la particule !

Théorie quantique du mouvement: Accord / Désaccord avec la relativité

Deux niveaux de réalité:

- **Réalité observable**: conforme à la MQ standard
- **Réalité cachée**: non-locale au sens stricte → n'obéit pas à la relativité restreinte

Théorie quantique du mouvement: Extension relativiste

Extension à une particule relativiste:

- Spin $\frac{1}{2}$: Possibilité de définir des trajectoires relativistes
- Spin 0: Pas de théorie à trajectoire (difficulté de définir opérateur position pour spin 0)

)

Théorie quantique du mouvement: Extension relativiste

Extension à une particule relativiste:

- Spin $\frac{1}{2}$: Possibilité de définir des trajectoires relativistes
- Spin 0: Pas de théorie à trajectoire (difficulté de définir opérateur position pour spin 0)

Extension à la théorie de champs:

- **Changement dans la définition de la quantité ontologique** : champs et non plus particules (beable: « position » des OH du champs)
- **Théorie covariante que de manière statistique** (conforme aux observations expérimentales)
- **Existence d'un référentiel privilégié** (non observable) où le vide est statique (concept non covariant)

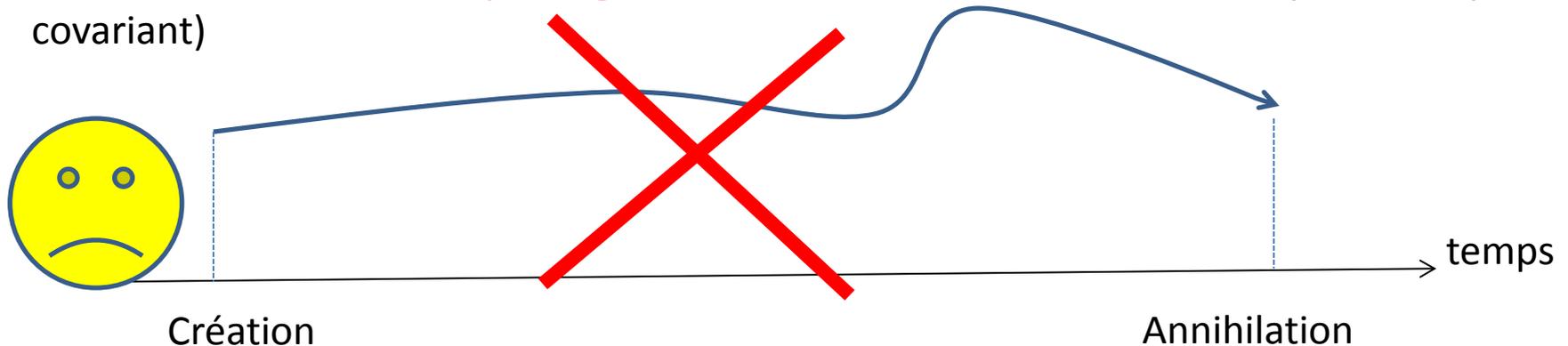
Théorie quantique du mouvement: Extension relativiste

Extension à une particule relativiste:

- Spin $\frac{1}{2}$: Possibilité de définir des trajectoires relativistes
- Spin 0: Pas de théorie à trajectoire (difficulté de définir opérateur position pour spin 0)

Extension à la théorie de champs:

- **Changement dans la définition de la quantité ontologique** : champs et non plus particules (beable: « position » des OH du champs)
- **Théorie covariante que de manière statistique** (conforme aux observations expérimentales)
- **Existence d'un référentiel privilégié** (non observable) où le vide est statique (concept non covariant)



Conclusion

- **MQ Standard:** De **grands progrès** dans la clarification des mystères quantiques: rôle de la non-localité, contextualité, décohérence.

MAIS!

La réalité nous échappe toujours!

- **Dynamique Bohmienne:**
 - Théorie ontologique satisfaisante pour **l'interprétation** en MQNR.
 - N'explique pas l'origine de l'indéterminisme, ni l'origine de l'onde pilote
 - Source d'inspiration pour théorie future ?