

*Formation continue physique,
Champéry, 26 septembre 2024*



La non-localité quantique et le temps

Michael Esfeld

Université de Lausanne

Michael.Esfeld@unil.ch

www.michaelesfeld.com

Les boîtes d'Einstein (1927)

- boîte avec une particule préparée à Champéry
- boîte divisée en deux boîtes de taille égale. Une boîte envoyée à New York, l'autre boîte envoyée à Tokyo.
- **formalisme MQ** : fonction d'onde représente particule comme étant répandue sur les deux boîtes : superposition d'être dans la boîte direction New York et être dans la boîte direction Tokyo = probabilité de trouver la particule dans la boîte New York 0.5, probabilité de la trouver dans la boîte Tokyo 0.5
- Alice ouvre sa boîte à New York et la trouve vide.
- fait qu'il y a une particule dans la boîte que Bob reçoit à Tokyo.
- **formalisme MQ** : fonction d'onde représente particule comme étant localisée à Tokyo (« collapse de la fonction d'onde »).

Problème de non-localité

Problème de mesure

- **collapse de la fonction d'onde: *épistémique*, mettre à jour l'information disponible**
 - **particule se trouve toujours ou bien dans la boîte direction New York, ou bien dans la boîte direction Tokyo (= se meut sur une trajectoire classique, non influencée par des opérations effectuée sur l'autre boîte). Lorsque Alice ouvre sa boîte à New York, elle reçoit simplement l'information où se trouve la particule.**
- formalisme de la MQ incomplet, car ne révèle pas la position de la particule : formalisme fournit des probabilités pour les résultats de mesure, mais ne représente pas l'évolution réelle des objets
- **collapse de la fonction d'onde: *ontologique*, processus dans la nature**
 - **Lorsque Alice ouvre sa boîte à New York, elle crée le fait qu'il y a une particule dans la boîte à Tokyo.**
- Einstein : « action à distance fantomatique »


Heisenberg (1930)



“... on voit facilement que cette action se propage avec une vitesse supérieure à celle de la lumière. **Mais il est évident aussi qu’une telle propagation d’action ne peut pas servir à transporter des signaux de telle sorte qu’il n’y a pas de contradiction avec les postulats fondamentaux de la théorie de la Relativité .”**

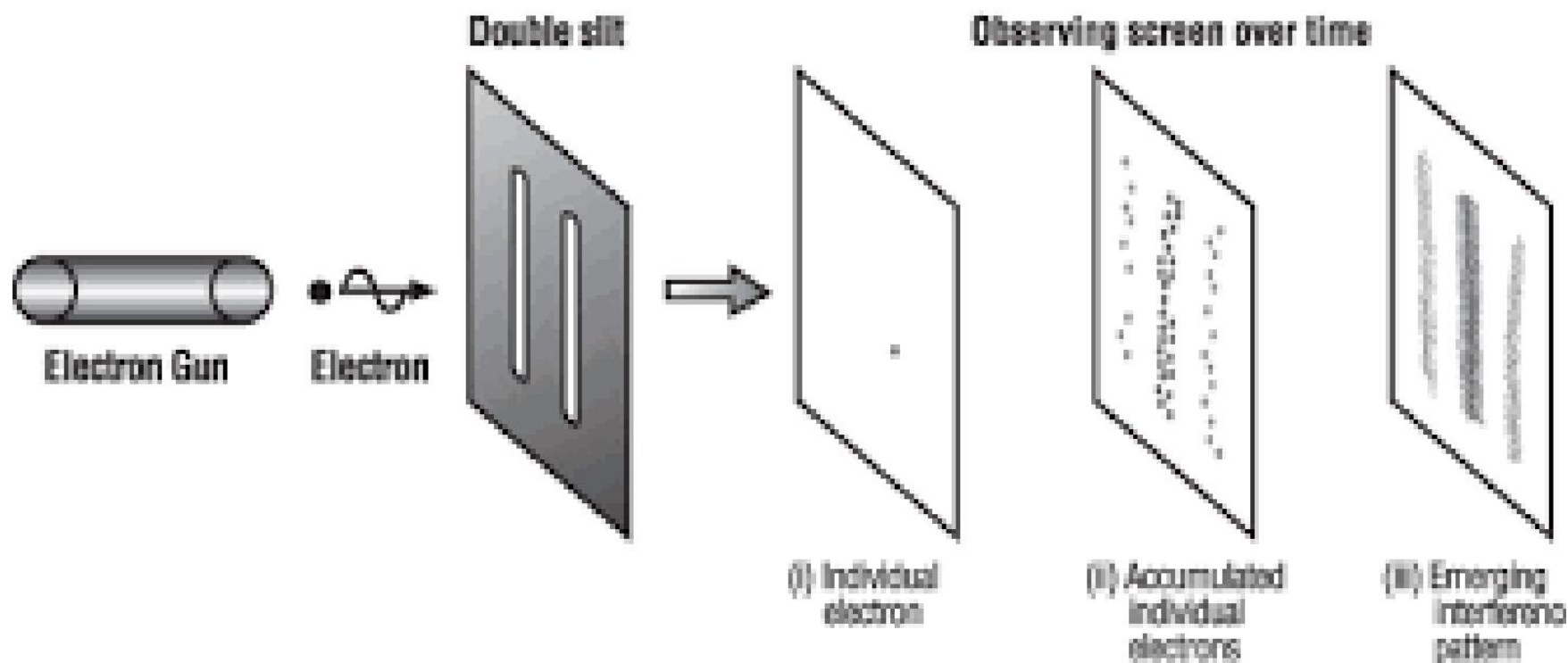
Problème de non-localité

Problème de mesure



- **problème de mesure & problème de non-localité** : la mesure semble créer une réalité qui n'existe pas indépendamment d'elle, et elle fait ceci de manière non-locale
- ordre temporel universel, simultanéité objective
- **algorithme pour calculer des statistiques de résultats de mesure pas de solution**
- question est de savoir ce qui se passe au niveau des processus individuels dans la nature
- raisonnement d'Einstein :
- MQ complète □ non-localité
- pas de non-localité □ MQ incomplète
- ? MQ incomplète □ pas de non-localité ?

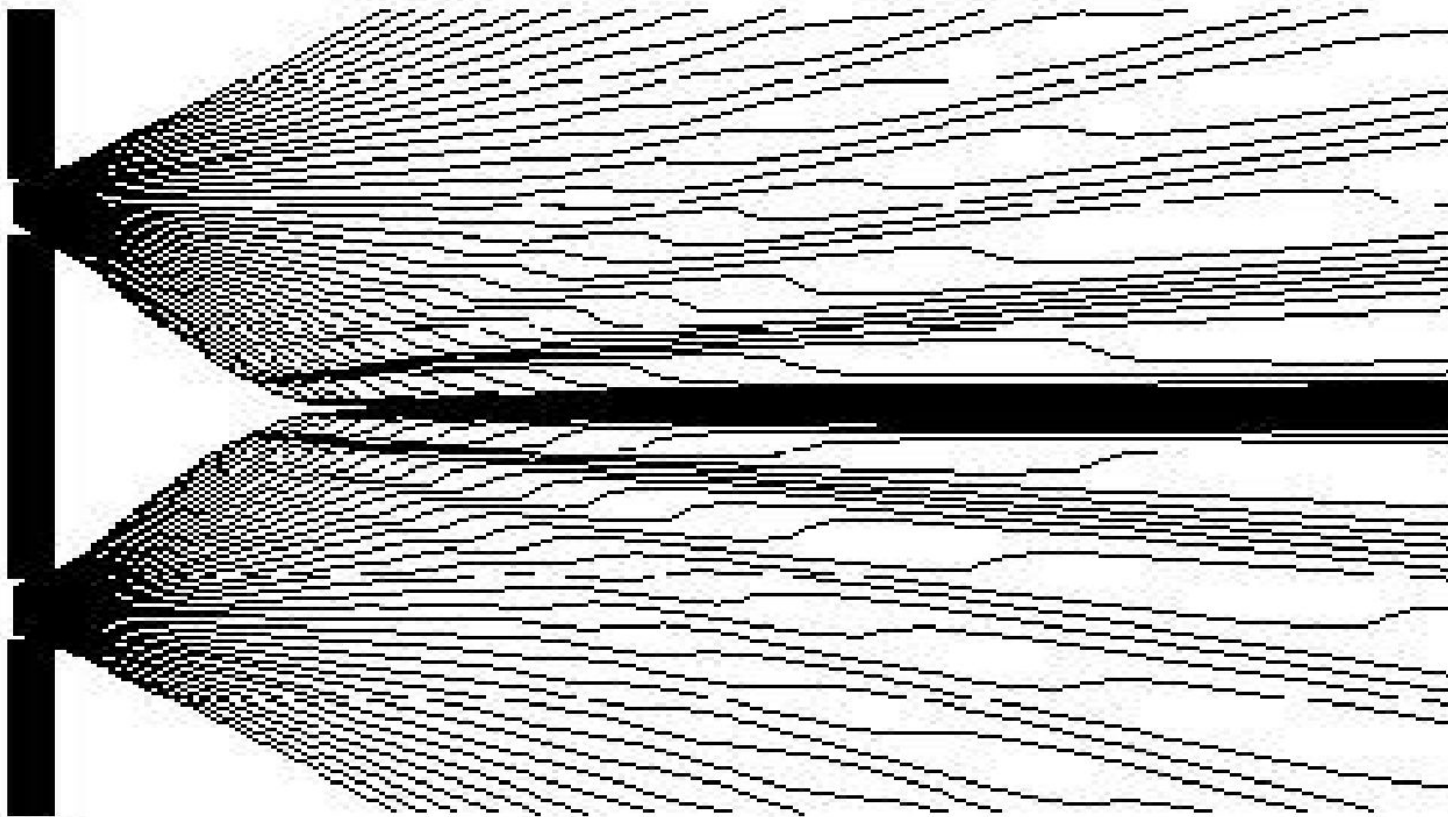
L'expérience de Young



Double-slit apparatus showing the pattern of electron hits on the observing screen building up over time.

L'expérience de Young

Trajectoires : non-localité



L'intrication quantique

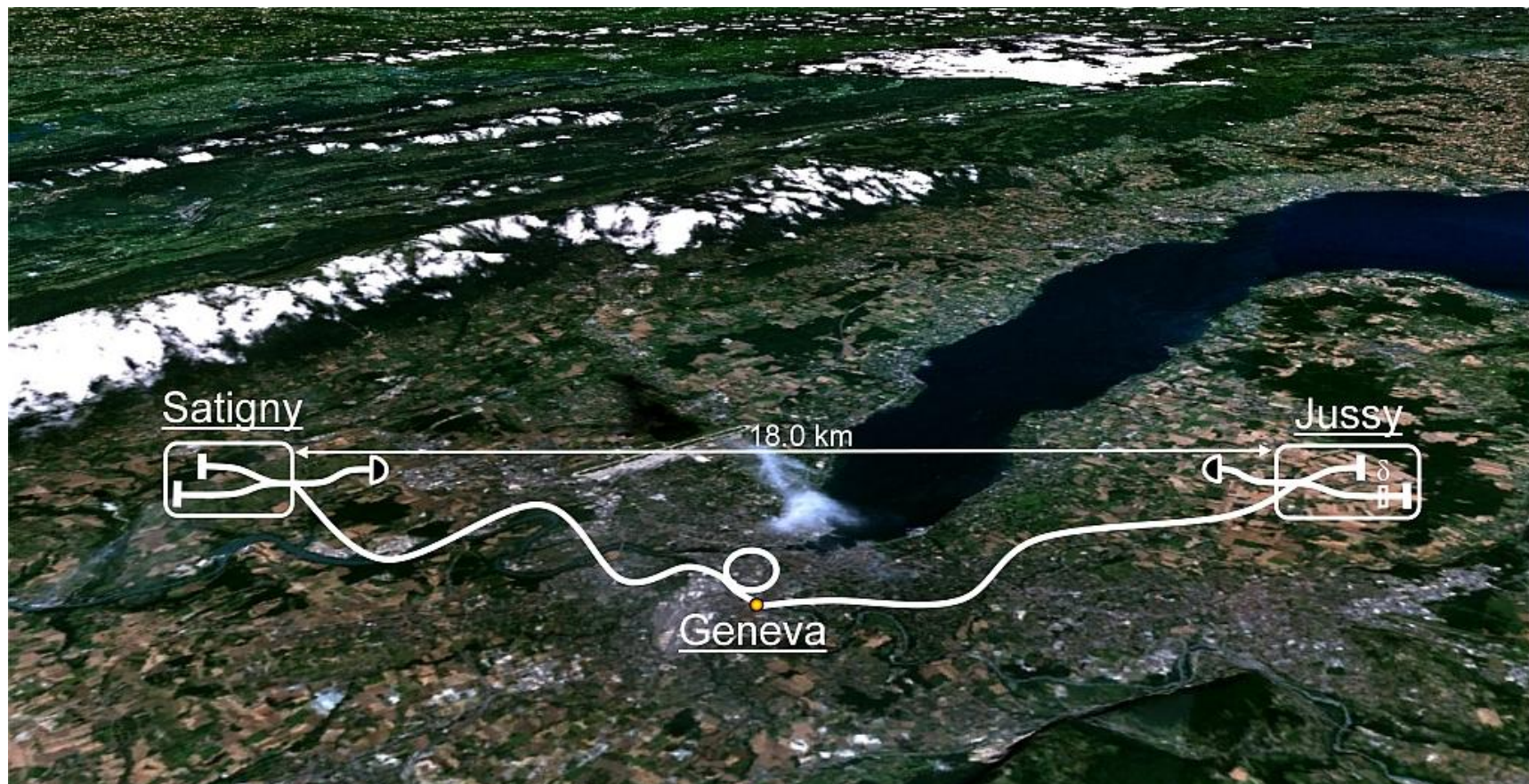
- **Einstein, Podolsky, Rosen (EPR) (1935)** : deux particules, deux observables : position et vitesse
- **Bohm (1951)** : deux particules, deux observables : spin dans deux directions différentes

$$(1) \quad \psi_{12} = 1/\sqrt{2} (\psi_1^+ \otimes \psi_2^- - \psi_1^- \otimes \psi_2^+)$$

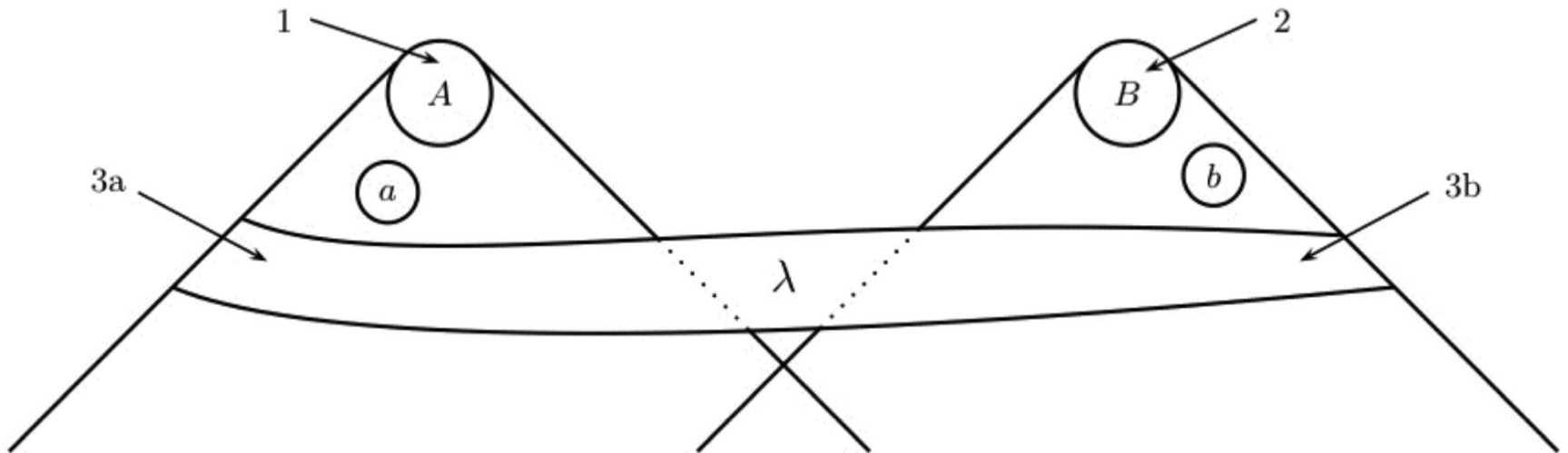
$$(2) \quad \psi_{12} = \psi_1^+ \otimes \psi_2^- \text{ Prob. } 0.5$$

$$(3) \quad \psi_{12} = \psi_1^- \otimes \psi_2^+ \text{ Prob. } 0.5$$

La non-localité quantique



La localité à la Bell



Le théorème de Bell (1964)



- « **pas de conspiration** » : a et b indépendants de λ
- **localité** : étant donné λ , a et A sont indépendants de b et B (et *vice versa*) ; la probabilité d'obtenir une certaine valeur d' A ne change pas, si b et B sont donnés (et *vice versa*)

$$P(A | a, b, B, \lambda) = P(A | a, \lambda)$$

$$P(B | a, b, A, \lambda) = P(B | b, \lambda)$$

- Aucune théorie possible qui correspond aux prédictions expérimentales de la MQ et qui satisfait la localité.

Le théorème de Bell (1964)

Les boîtes d'Einstein (1927)

Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) (1935)

- **OU BIEN action à distance fantomatique**
- absurde
- **OU BIEN MQ incomplète**
- Bell (1964) : impossible de compléter la MQ en respectant le principe de localité
- **tâche après Bell** : trouver une compréhension de la MQ sans tomber dans la piège de « l'action à distance fantomatique »
- formalisme de la MQ ne révèle pas l'évolution des objets dans la nature

Pistes de solution (1)

affaiblir la non-localité quantique

- **rejeter « pas de conspiration »** : a et b indépendants de λ \square super-déterminisme, évolution locale
- **« mondes multiples »** : évolution de la fonction d'onde de l'univers selon l'équation de Schrödinger \square évolution locale, pas de résultats de mesure
- **bayésianisme quantique** : probabilités subjectives \square pas de résultats objectifs de mesure, pas d'évolution objective des systèmes physiques
- **action du futur vers le passé** : influences (ondes) du cône de lumière passé ET du cône de lumière futur \square interaction retardée ET anticipée

Pistes de solution (2)

- réintroduire le temps universel et la simultanéité objective
- **non-localité quantique** : structure spatio-temporelle plus riche que celle que la théorie de la relativité restreinte pose : **ordre temporel objectif d'événements séparés par un intervalle du genre espace**
- **ordre temporel objectif de tous les événements dans l'univers**, foliation objective de l'espace-temps en hypersurfaces spatiales à trois dimensions qui sont ordonnées dans le temps
- **mais** : pas possible de connaître cette foliation objective, car pas de connaissance exacte de la configuration initiale de la matière et de son développement précis (si nous avons cette connaissance, nous pourrions utiliser la non-localité quantique pour la communication super-luminale)

Pistes de solution (2)

- **idée** : foliation objective de l'espace-temps fournie par la fonction d'onde de l'univers = le paramètre qui fixe le développement temporel de la configuration de la matière dans l'espace
- foliation objective de l'espace-temps à cause de la non-localité quantique, **mais pas forcément action à distance : corrélations à distance, dynamique non-locale comme fait primitif**

Bibliographie

- Esfeld, Michael: *Philosophie des sciences. Une introduction*. 4^{ème} édition, EPFL Press 2024.
- Bell, John: *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. 2^{ème} édition, Cambridge UP 2004.
- Gisin, Nicolas: *L'impensable hasard. Non-localité, téléportation et autres merveilles quantiques*. Odile Jacob 2012.
- Maudlin, Tim: *Quantum non-locality and relativity*. 3^{ème} édition, Wiley 2012.

Bibliographie

- Norsen, Travis: «Einstein's boxes». *American Journal of Physics* 73 (2005), 164-176.
- Einstein, Albert, Podolsky, Boris et Rosen, Nathan: «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?». *Physical Review* 47 (1935), 777-780.
- Barrett, Jeffrey: «Entanglement and disentanglement in relativistic quantum mechanics». *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 48 (2014), 168-174.
- Palmer, Tim: «Superdeterminism without conspiracy». *Universe* 1 (2023).
- Wallace, David: *The emergent multiverse. Quantum theory according to the Everett interpretation*. Oxford UP 2012.
- Healey, Richard: «Quantum theory. A pragmatist approach». *British Journal for the Philosophy of Science* 63 (2012), 729-771.
- Cramer, John G.: *The quantum handshake*. Springer 2016.
- Dürr, Detlef et al.: «Can Bohmian mechanics be made relativistic?». *Proceedings of the Royal Society A* 470 (2014), 2162.