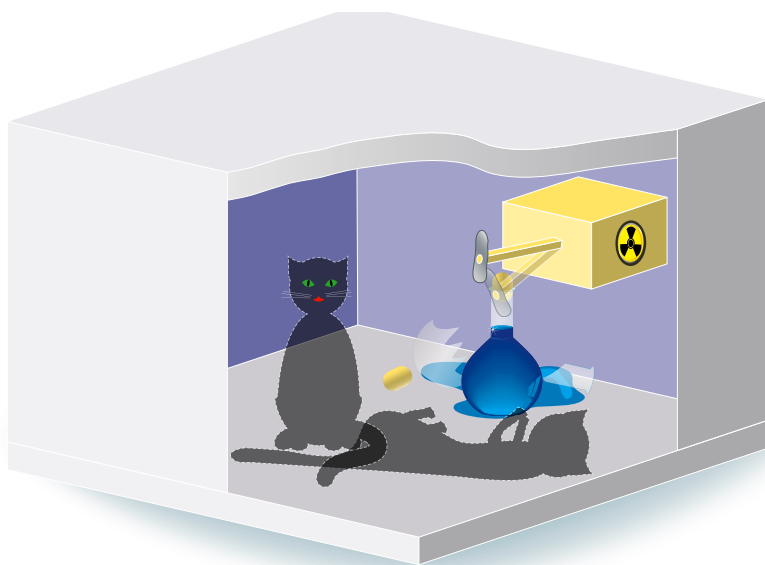




LE CHAT DE SCHRÖDINGER

La célèbre expérience de pensée du physicien autrichien Erwin Schrödinger, imaginée en 1935, met en exergue le caractère problématique de certains concepts de la physique quantique. Un chat est enfermé dans une pièce contenant un dispositif où un atome a deux états quantiques de base possibles, E_1 et E_2 . On suppose que s'il est dans l'état E_2 , le dispositif déclenche la libération d'un poison mortel. Il est possible de placer cet atome dans une superposition $E_1 + E_2$ de ses deux états de base ; dans ce cas, les lois quantiques indiquent que l'état du chat devrait être une superposition de son état vivant et de son état mort. Or une telle superposition semble impossible ou dépourvue de sens pour un système macroscopique tel que le chat – lequel pourrait d'ailleurs être remplacé (toujours par la pensée !) par un expérimentateur humain.

Une autre application est la modélisation des interactions d'un système quantique avec un système classique, par exemple la diffusion de particules (quantiques) sur la surface d'un solide. En principe, il faudrait utiliser la mécanique quantique pour décrire la surface, mais c'est irréalisable en pratique. On se contente donc d'une représentation classique de cette surface. Au début des années 2000, des travaux de divers chercheurs (notamment Oleg Prezhdo et Craig Brooksby, à l'université de Washington, Étienne Gindensperger, Christoph Meier et Alberto Beswick, à l'université Paul-Sabatier de Toulouse) ont montré qu'une modélisation où l'on couple le système classique à des particules décrites par la mécanique bohmienne produit des résultats plus précis qu'avec des couplages similaires fondés sur la mécanique quantique habituelle.

Comme je l'ai indiqué, la mécanique bohmienne est une théorie non relativiste. Il faudrait donc la généraliser pour tenir compte des lois de la relativité restreinte d'Einstein. Avec la mécanique quantique ordinaire, cette tâche difficile a été entreprise il y a longtemps. Son résultat a été la théorie quantique des champs, qui est aujourd'hui le cadre général permettant de décrire le monde des particules subatomiques et de leurs interactions.

L'une des principales différences avec la mécanique quantique est qu'en théorie quantique des champs, le nombre de particules n'est

pas fixe : il peut y avoir création ou annihilation de particules. Afin de rendre compte de ces processus de création et d'annihilation, la dynamique bohmienne doit être modifiée. Pour les particules de la classe des fermions (particules dont le spin, dans les unités atomiques, est demi-entier : électron, proton, quarks...), essentiellement deux procédures différentes ont été proposées, la première en 2004 par Detlef Dürr, Sheldon Goldstein, Roderich Tumulka et Nino Zanghì, la seconde en 2007 par Samuel Colin et moi.

Pour les bosons (particules dont le spin est un nombre entier, comme le photon ou la particule de Higgs), en revanche, on n'a pas trouvé de moyen naturel d'introduire des particules ponctuelles. Comme l'avait déjà montré Bohm, il semble qu'il faille décrire fondamentalement les bosons non pas par des particules, mais par des champs dont l'interaction avec les fermions donnerait lieu, en apparence, à la création et à l'annihilation de particules bosoniques.

Mais une théorie plus profonde pourrait mettre en jeu une autre réalité. Par exemple, dans le cas de la théorie des cordes, la formulation bohmienne naturelle ne fait pas intervenir des particules ou des champs, mais de minuscules cordes unidimensionnelles.

Un autre aspect important de la théorie quantique des champs est que celle-ci intègre les symétries imposées par la relativité restreinte (symétries qui traduisent l'invariance de la vitesse de la lumière et des expressions des lois physiques quand on passe d'un référentiel à un autre, en mouvement rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre). Or l'une des conséquences de la relativité restreinte est qu'il



Une théorie bohmienne compatible avec la relativité d'Einstein est à élaborer

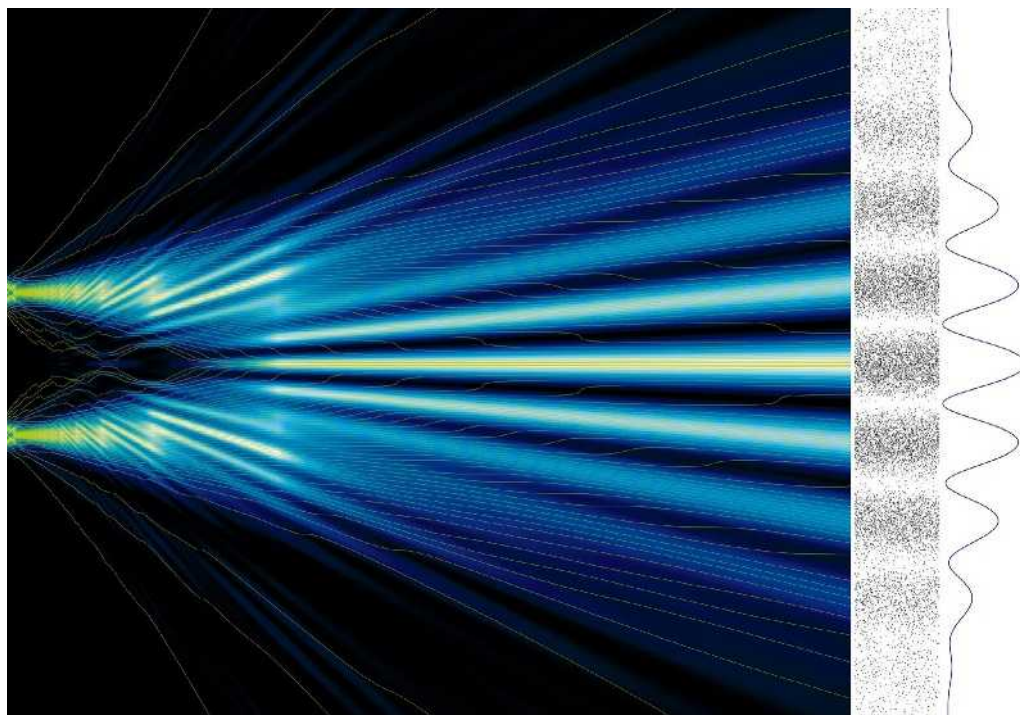


n'existe pas de notion absolue de simultanéité : deux événements qui sont simultanés pour un observateur ne le seront pas pour un observateur en mouvement par rapport au premier.

Mais comment accorder cette relativité de la simultanéité à la non-localité, une caractéristique qui semble indésirable, mais inhérente à la physique quantique (voir l'encadré page 39) ? ➤

L'EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG AVEC DES ÉLECTRONS

Cette figure indique la densité de probabilité de présence (élevée en clair, faible en sombre) d'électrons traversant de gauche à droite un écran percé de deux fentes voisines (tout à gauche de l'image). Les trajectoires de quelques électrons, telles qu'on les calcule par la mécanique bohmienne, sont tracées en jaune. Dans la partie droite de la figure, chaque point correspond à l'impact d'un électron sur l'écran de détection; la courbe indique la densité des impacts. La densité de probabilité calculée par la mécanique bohmienne est exactement la même que celle calculée par la mécanique quantique usuelle et reproduit très bien les observations.



> La non-localité correspond à une influence instantanée d'un endroit à un autre; mais alors, dans quel référentiel cette influence est-elle instantanée? Existe-t-il un tel référentiel privilégié, auquel cas les symétries relativistes seraient violées? Ces questions difficiles ont été beaucoup étudiées, mais n'ont pas encore de réponse satisfaisante. De toute évidence, la non-localité ne fait pas bon ménage avec la relativité. Et il faut bien voir que ce problème se pose dans n'importe quelle version de la théorie quantique des champs, qu'il s'agisse de la version orthodoxe ou d'une autre, telle que la théorie bohmienne.

GRAVITATION QUANTIQUE À LA BOHM

Un autre domaine d'application de la théorie dBB, qui fait l'objet de mes recherches actuelles, est celui de la gravitation quantique et de ses conséquences en cosmologie. La quête d'une théorie quantique de la gravitation est l'un des principaux problèmes ouverts en physique théorique. Selon la théorie de la relativité générale d'Einstein, la gravitation correspond à une courbure de l'espace-temps. Mais cette théorie décrit comment l'espace-temps interagit avec la matière représentée de façon classique, et non quantique. Que change le fait que la matière doive obéir aux lois quantiques? L'espace-temps lui-même (donc la gravitation) doit-il obéir à des lois quantiques? Et si oui, lesquelles?

Les physiciens ont fait plusieurs propositions d'une théorie quantique de la gravitation. Citons la gravitation quantique dite canonique,

la gravitation quantique à boucles et la théorie des cordes. La gravitation quantique canonique est construite en appliquant à la relativité générale d'Einstein les techniques habituelles utilisées pour passer d'un champ classique (tel que le champ électromagnétique) à sa version quantique. Mais la théorie ainsi obtenue, où l'équation d'onde résultante est l'équation dite de Wheeler-DeWitt, présente des défauts de

Une version bohmienne de la gravitation quantique serait d'un grand intérêt

nature mathématique qui semblent insurmontables. On est alors conduit à construire, à partir de versions à symétrie réduite de la relativité générale, des modèles simplifiés, dans l'espoir que ces derniers permettent de saisir certaines des propriétés de la théorie complète.

La gravitation quantique à boucles résulte également de la quantification de la théorie d'Einstein, mais en procédant sur des variables