

BA7 Introduction à la philosophie de la physique

Séance facultative

Augustin Baas

Mercredi 18 avril 2018

1 Questions

Cours 1 & 2 : Superpositions Formalisme

A. Vecteurs propres et valeurs propres de l'opérateur position

- A.1 [C2-T13] : On considère un quanta (un électron, un photon, etc.) et l'opérateur position dans la direction x , noté \hat{X} .
- Quels sont les états propres de l'opérateur position ?
 - Quelles sont les valeurs propres de l'opérateur position ?
 - Est-ce que l'état $|x_a\rangle + |x_b\rangle$ est un état propre de l'opérateur de position ?
 - Comment sont reliés les coefficients dans l'état suivant $c_a|x_a\rangle + c_b|x_b\rangle$? Donnez une justification physique.

B. Dureté et couleur

- B.1 Comment préparer un électron dans l'état |blanc> ? Comment être certain qu'un électron est dans l'état |blanc> ?
- B.2 Décomposez l'état |noir> sur la base des états |dur> et |mou>. Faites de même pour l'état |blanc>.
N. B. : une représentation graphique peut vous aider.
- B.3 [C2-T18] : Montrez que les états |dur> et |mou> ne sont pas les vecteurs propres de l'opérateur couleur.
- B.4 [C2-T14] : On considère l'expérience à deux chemins. Peut-on évacuer les 4 possibilités énoncées par Albert dans une seule et même expérience ?
- B.5 [C1-T11-12] : Expliquez les 4 cas considérés dans le cours.
- B.6 [Question d'un étudiant] Comment et pour quelles raisons la physique quantique utilise la géométrie vectorielle (de Hilbert je crois), et non pas une géométrie non-euclidienne, hyperbolique par exemple ?
- B.7 [C2-T26]. Dans l'approche de Constantin Piron (Piron, 1998), une expérience est considérée comme le test d'une propriété – par exemple la couleur blanche –, de sorte que faire l'expérience revient à poser une question – le système est-il de couleur blanche ? Le résultat de l'expérience est ainsi la réponse à cette question – soit oui, soit non.
Proposez un exemple de deux propriétés en physique classique qui ne commutent pas. Indication : la réponse donnée à chaque question dépend de l'ordre dans lequel les questions sont posées.

Cours 3 & 4 : Bohr-Einstein-EPR, Théorème de Bell et non-localité

C. Complémentarité, EPR

- C.1 Propriétés complémentaires en physique classique.
- Quelles sont les propriétés classiques qui caractérisent l'état physique d'une balle de tennis ?
 - Donnez des exemples de phénomènes classiques impliquant des balles de tennis.
 - Quelles sont les propriétés classiques qui caractérisent l'état d'une onde sonore ?
 - Donnez des exemples de phénomènes classiques impliquant des ondes sonores ?
- C.2 [C3-T4] : Selon Bohr, l'évidence expérimentale doit être exprimée dans les termes de la physique classique. Expliquez.
- C.3 [Question d'un étudiant] En quoi le développement EPR constitue-t-il un "paradoxe" ?

[C3-T20] Le raisonnement peut-être décomposé comme suit : - affirmer que la fonction d'onde n'est pas complète = affirmer que des opérateurs (non-commutatifs) ne peuvent avoir de réalité simultanée; soit, en supprimant la négation : -affirmer que la fonction d'onde est complète = affirmer que les opérateurs (non-commutatifs) peuvent avoir une réalité simultanée et EPR de conclure : - la fonction d'onde n'est pas complète

Plutôt que d'un "paradoxe" ne s'agit-il pas plutôt d'une argumentation -volontariste- reposant sur le principe de localité, dont l'inviolabilité doit primer sur celui de complétude de la mécanique quantique ?

D. Violation des inégalités de Bell

D.1 Quel est le rapport entre les inégalités de Bell et la mécanique quantique ?

D.2 Soit une expérience dans laquelle un expérimentateur avec les yeux bandés place dans une boîte une boule noire et dans une autre une boule rouge. On sépare ces deux boîtes d'une distance arbitrairement grande. En ouvrant une des boîtes, on découvre quelle boule elle contient et on sait instamment quelle est la couleur de la boule dans l'autre boîte.

a) En quoi cette expérience diffère de l'expérience de Bell ? À quel cas dans [C4-T8] peut être rapportée l'expérience proposée ?

b) On considère à présent des boules dont la surface est divisée en trois aires égales. On fait la même expérience que précédemment, mais on doit à présent spécifier quelle aire est considérée dans chaque mesure. Pourrait-on ainsi rendre compte des deux aspects de l'expérience dans la version de Mermin (voir [T6]) ?

N.B. : Lisez la section *How they do it* dans [Maudlin 2012].

D.3 [Question d'un étudiant] Comment justifier l'importance accordée au principe de localité ([C3-T28]) ?

Pour respecter la nature indépassable de la vitesse de la lumière, le principe de localité est appliqué à deux systèmes tellement distants l'un de l'autre qu'aucune interaction n'est possible. La "localité", terme quasi topographique, a-t-elle été précisément définie par Einstein ? Au-delà de quelle distance en km ou en années-lumière estime-t-on l'interaction impossible ? Cette distance est-elle calculée entre les objets censés interagir ou entre les objets et l'observateur qui enregistre cette interaction ? Si l'existence de multivers par exemple venait à être corroborée, une interaction réelle (cad hors observateur) serait-elle imaginable au sein de sous-systèmes quantiques mutuellement intriqués ? Peut-on affirmer la réalité d'une interaction indépendante de toute observation, en d'autres termes la mesure "épouse"-t-elle la réalité ou existe-t-il une réalité en soi ?

2 Mécanique quantique et expériences

L'expérience des fentes de Young

E.1 Quels sont les résultats attendus pour des objets de type corpusculaire et des objets de type ondulatoire ?

E.2 La première mesure avec des quanta uniques a été faite en 1989 en utilisant des électrons (Tonomura et al., 1989). Cette expérience est parfois appelée l'expérience de Hitachi. La vidéo est disponible à cette adresse : https://www.youtube.com/watch?v=PanqoHa_B6c. Une nouvelle expérience avec de électrons a été faite en 2013 (Bach et al., 2013). La vidéo est disponible à cette adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=ZqS8Jjkk1HI>.

E.3 Il existe de nombreuses expériences d'interférences à un photon. Le site suivant décrit une expérience faite à l'Université de Princeton en 2010 : http://phy-page-imac.princeton.edu/~page/single_photon.html.

E.4 [Question d'un étudiant] Pour mieux comprendre le mécanisme de la formalisation (quand même ardu pour les béotiens en math!) peut-on avoir un exemple chiffré de prédictions corroborées dans la réalité ? Pour vous donner un exemple, on considère les résultats de la mesure de l'intensité des électrons en fonction de la position (Bach et al., 2013). Ces résultats sont disponibles à cette adresse : <http://iopscience.iop.org/1367-2630/15/3/033018/media/njp458349suppdata.pdf>.

E.5 Les prédictions considérées à la question précédente ne sont pas celles les mieux vérifiées. La mesure la plus précise est celle du moment magnétique de l'électron $g/2=1.00115965218073(28)$ (Hanneke et al., 2008).

E.6 L'expérience des fentes de Young a été faite avec des "grosses" molécules (Gerlich et al., 2011). On observe des interférences pour des molécules contenant 430 atomes avec une masse de 5310 masses atomiques. Le dernier record est atteint avec une molécule ayant une masse moléculaire de 10123 masses atomiques (Eibenberger et al., 2013).

E.7 [Question d'un étudiant] En quoi consiste une fonction d'onde ? Qu'est-ce qui la distingue d'un opérateur linéaire ? Est-elle une pure abstraction mathématique ? Possède-t-elle des propriétés physiques ? Correspond-t-elle à une sorte de "halo de probabilités" qui s'effondre lors de la mesure ?

Produire de l'intrication

F.1 Amplification paramétrique descendante spontanée.

Un faisceau pompe –une onde électromagnétique monochromatique–, de fréquence ω_p et de vecteur d'onde \vec{k}_p , est envoyé dans un cristal non-linéaire (la pulsation est reliée à la fréquence f par : $\omega = 2\pi f$). En sortie on obtient deux faisceaux, appelés signal et complémentaire, de pulsations respectives ω_s et ω_c , de vecteurs d'ondes respectifs \vec{k}_s et \vec{k}_c . La conservation de l'énergie impose : $\omega_p = \omega_s + \omega_c$, et la conservation de la quantité de mouvement impose : $\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_c$.

N.B. : La pulsation et l'énergie, de même que le vecteur d'onde et la quantité de mouvement, sont reliés par la constante de la mécanique quantique, \hbar , dans les relations de De Broglie-Einstein : $E = \hbar\omega$ et $\vec{p} = \hbar\vec{k}$. Suivant le type de cristal, les faisceaux en sortie sont de même polarisation (cristal de type I) ou de polarisations croisées (cristal de type II).

En baissant l'intensité de la pompe jusqu'à exciter le cristal avec une source de photons uniques, on obtient en sortie des paires de photons. En utilisant un cristal de type II, on sélectionne les photons émis à l'intersection du cône signal et du cône complémentaire (voir le dessin au tableau). Si on a un photon d'un côté, on a nécessairement un photon de l'autre avec une polarisation orthogonale. Les paires ainsi produites sont intriquées. Elles sont dans l'état :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|+, -\rangle + |-, +\rangle) \quad (1)$$

F.2 L'amplification paramétrique est un processus non-linéaire mise en oeuvre avec différents types d'ondes (en optique classique) et de quanta. Ce processus est le plus utilisé pour produire des paires intriquées, que ce soient des paires de photons, d'atomes, ou de polaritons (états mixtes lumière-matière). D'autres processus font usage d'atomes de Rydberg, de cascades atomiques, de boîtes quantiques ou encore de fibres optiques.

F.3 Une expérience récente montrerait que l'intrication peut jouer un rôle dans la photosynthèse (Sarovar et al., 2010).

L'expérience de Bell

B.1 La première expérience de mise en évidence de non-localité qui fit date est celle d'Aspect, Dalibard et Roger (Aspect et al., 1982).

B.2 L'expérience est reproduite avec une distance de 10km entre les endroits de mesure, qui montre la robustesse de l'intrication sur des longues distances et "ferme" l'échappatoire de localité (Tittel et al., 1998).

B.3 La distance a été presque doublée 10 ans plus tard dans une expérience qui donne une valeur minimale de $10^4 c$ à la vitesse d'un hypothétique signal entre Alice et Bob (Salart et al., 2008).

B.4 Pour montrer que la mesure d'Alice ne peut causalement influencer la mesure de Bob, et vice versa, les mesures ont été faites avec des détecteurs en mouvement, de sorte que dans chacun des référentiels dans lesquels l'appareil de mesure est au repos, la mesure en question est la "première" (Stefanov et al., 2002). Cette expérience est parfois appelé l'expérience "before-before".

B.5 Jusqu'à présent la gravité n'a joué aucun rôle dans ces mises en évidence de violation des inégalités de Bell. De récentes propositions suggèrent des expériences de violation des inégalités de Bell dans lesquelles la gravité serait la force responsable de l'intrication (Bose et al., 2017; Marletto & Vedral, 2017). Si de telles expériences pouvaient être faites, les auteurs avancent que cela mettrait en évidence le caractère quantique de la force de gravité. Toutefois (Hall & Reginatto, 2018) ont soutenu, à raison me semble-t-il, que cela ne mettrait en évidence que le caractère non-classique de la force de gravité.

B.6 Un des enjeux des expériences est de fermer tous les échappatoires possibles (de localité, de détection, du superdéterminisme, etc), parfois non sans humour. Ainsi dans (Shalm et al., 2015), ils utilisent des sources pseudo-aléatoires "culturelles" : des séquences de bits extraits de films, notamment *Retour vers le futur*, *Star trek* et *La quête du sacré Graal*.

Références

- Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental test of bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical review letters*, *49*(25), 1804.
- Bach, R., Pope, D., Liou, S.-H., & Batelaan, H. (2013). Controlled double-slit electron diffraction. *New Journal of Physics*, *15*(3), 033018.
- Bose, S., Mazumdar, A., Morley, G. W., Ulbricht, H., Toroš, M., Paternostro, M., Geraci, A. A., Barker, P. F., Kim, M., & Milburn, G. (2017). Spin entanglement witness for quantum gravity. *Physical review letters*, *119*(24), 240401.
- Eibenberger, S., Gerlich, S., Arndt, M., Mayor, M., & Tüxen, J. (2013). Matter–wave interference of particles selected from a molecular library with masses exceeding 10000 amu. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *15*(35), 14696–14700.
- Gerlich, S., Eibenberger, S., Tomandl, M., Nimmrichter, S., Hornberger, K., Fagan, P. J., Tüxen, J., Mayor, M., & Arndt, M. (2011). Quantum interference of large organic molecules. *Nature communications*, *2*, 263.
- Hall, M. J. & Reginatto, M. (2018). On two recent proposals for witnessing nonclassical gravity. *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical*.
- Hanneke, D., Fogwell, S., & Gabrielse, G. (2008). New measurement of the electron magnetic moment and the fine structure constant. *Physical Review Letters*, *100*(12), 120801.
- Marletto, C. & Vedral, V. (2017). Gravitationally induced entanglement between two massive particles is sufficient evidence of quantum effects in gravity. *Physical review letters*, *119*(24), 240402.
- Piron, C. (1998). *Mécanique quantique : Bases et applications*. PPUR presses polytechniques.
- Salart, D., Baas, A., Branciard, C., Gisin, N., & Zbinden, H. (2008). Testing the speed of ‘spooky action at a distance’. *Nature*, *454*(7206), 861.
- Sarovar, M., Ishizaki, A., Fleming, G. R., & Whaley, K. B. (2010). Quantum entanglement in photosynthetic light-harvesting complexes. *Nature Physics*, *6*(6), 462.
- Shalm, L. K., Meyer-Scott, E., Christensen, B. G., Bierhorst, P., Wayne, M. A., Stevens, M. J., Gerrits, T., Glancy, S., Hamel, D. R., Allman, M. S., et al. (2015). Strong loophole-free test of local realism. *Physical review letters*, *115*(25), 250402.
- Stefanov, A., Zbinden, H., Gisin, N., & Suarez, A. (2002). Quantum correlations with spacelike separated beam splitters in motion : Experimental test of multisimultaneity. *Physical Review Letters*, *88*(12), 120404.
- Tittel, W., Brendel, J., Zbinden, H., & Gisin, N. (1998). Violation of bell inequalities by photons more than 10 km apart. *Physical Review Letters*, *81*(17), 3563.
- Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., Kawasaki, T., & Ezawa, H. (1989). Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *Am. J. Phys*, *57*(2), 117–120.