

Intrication non-gaussienne avec des peignes de fréquences optiques

February 2023

1 Contexte général

De nombreuses avancées vers les technologies quantiques ont vu le jour ces dernières années. Ces développements sont souvent basés sur la nature discrète de certaines observables : c'est l'approche en variables discrètes (DV). Au contraire, il est également possible de développer des technologies quantiques à partir de systèmes représentés dans l'espace des phases, et dont les observables ont un continuum de résultats de mesure possibles. Cette approche en variables continues (CV) a progressivement acquis de l'importance dans le développement de l'information quantique grâce à la réalisation expérimentale de grands états optiques intriqués.

Les états en variables continues sont mesurés selon leurs opérateurs de quadrature. On distingue alors deux types d'états : les états gaussiens sont ceux pour lesquelles toutes les quadratures ont des statistiques gaussiennes, par opposition aux états non-gaussiens. En optique quantique CV, les états gaussiens sont bien compris et facilement produits. En revanche, les états non-gaussiens sont nécessaires pour effectuer des opérations inaccessibles à un ordinateur classique.

En particulier, la présence d'intrication au sein d'un état multimode gaussien est dépendante de la base de représentation. En effet il existe toujours une base dans laquelle l'état multimode gaussien est séparable. Ainsi l'intrication non-gaussienne, ou intrication indépendante de la base, est une ressource quantique essentielle.

2 Intrication non-gaussienne

Les critères d'intrication sont étudiés dans les systèmes à variables continues depuis plusieurs décennies. Les premiers critères d'intrication [3, 7] dans ce régime étaient basés sur la matrice de covariance de l'état quantique, et peuvent être simplement testés par des mesures gaussiennes. Cependant, pour les états quantiques non gaussiens, ces techniques sont souvent insuffisantes pour caractériser toute l'intrication dans l'état. Néanmoins, les états non gaussiens sont nécessaires [4] dans les protocoles d'information quantique et il est donc important de trouver un moyen de caractériser l'intrication dans ces états au-delà des outils gaussiens standard.

Dans le dispositif expérimental du Laboratoire Kastler Brossel, de grands états intriqués gaussiens ont été produits [6] et rendus non gaussiens par soustraction de photons [5]. Bien que certaines caractéristiques non gaussiennes de ces états quantiques de la lumière aient été étudiées avec les techniques existantes, les propriétés

d'intrication de cette lumière non gaussienne restent obscures. Les travaux récents du groupe ont conduit à une proposition [1] suffisamment résistante au bruit pour témoigner de l'intrication, avec détection homodyne, dans un régime où la matrice de covariance ne dévoile aucune corrélation quantique. La mise en œuvre de ces techniques sera une première étape cruciale du projet de doctorat.

Il a également été démontré que l'intrication dans les états soustraits aux photons présente une caractéristique encore plus remarquable : elle peut persister dans chaque base de modes [9, 8]. Cette observation est remarquable car il peut être démontré que tout état gaussien peut être transformé en un état séparable par un changement de base de modes bien choisi. Si, au départ, cela semblait être une simple curiosité, il a été démontré [2] depuis que ce type d'intrication est crucial pour la mise en œuvre de protocoles de calcul quantique qui ne peuvent être simulés efficacement sur un ordinateur classique.

Ce type d'intrication non gaussienne qui persiste dans chaque base de mode est particulièrement difficile à détecter. Par construction, chaque dispositif expérimental mesure les modes dans une base de mode spécifique et prouver la présence d'intrication dans chaque choix possible de base de mode nécessiterait naïvement une quantité infinie de paramètres de mesure. Le grand défi théorique de ce projet est de concevoir de nouveaux protocoles de détection qui peuvent témoigner de ce type d'intrication non gaussienne, par exemple en essayant d'identifier les observables quantiques qui sont invariantes sous les changements de base de modes.

3 Génération et mesure expérimentale

Dans le cadre de la thèse, au delà de l'étude théorique, il s'agira de développer l'expérience en cours pour la rendre compatible avec la mise en évidence d'intrication non-gaussienne. En particulier, il s'agira tout d'abord d'optimiser la source de peignes de fréquences quantique, dont les modes propres sont des modes de temps/fréquence. Il faudra ensuite compléter le système de soustraction de photon pour permettre la soustraction d'un ou plusieurs photons sur un noeud d'un état cluster, configuration idéale pour les états intriqués. Enfin, il s'agira de compléter le système de détection avec une détection homodyne / heterodyne multimode.

References

- [1] D. Barral, M. Isoard, G. Sorelli, M. Gessner, N. Treps, and M. Walschaers. Metrological detection of purely-non-gaussian entanglement, 2023.
- [2] U. Chabaud and M. Walschaers. Resources for bosonic quantum computational advantage, 2022.
- [3] L.-M. Duan, G. Giedke, J. I. Cirac, and P. Zoller. Inseparability criterion for continuous variable systems. *Phys. Rev. Lett.*, 84:2722–2725, Mar 2000.
- [4] A. Mari and J. Eisert. Positive wigner functions render classical simulation of quantum computation efficient. *Phys. Rev. Lett.*, 109:230503, Dec 2012.

- [5] Y.-S. Ra, A. Dufour, M. Walschaers, C. Jacquard, T. Michel, C. Fabre, and N. Treps. Non-gaussian quantum states of a multimode light field. *Nature Physics*, 16(2):144–147, Feb 2020.
- [6] J. Roslund, R. M. de Araújo, S. Jiang, C. Fabre, and N. Treps. Wavelength-multiplexed quantum networks with ultrafast frequency combs. *Nature Photonics*, 8(2):109–112, Feb 2014.
- [7] R. Simon. Peres-horodecki separability criterion for continuous variable systems. *Phys. Rev. Lett.*, 84:2726–2729, Mar 2000.
- [8] M. Walschaers. Non-gaussian quantum states and where to find them. *PRX Quantum*, 2:030204, Sep 2021.
- [9] M. Walschaers, C. Fabre, V. Parigi, and N. Treps. Entanglement and wigner function negativity of multimode non-gaussian states. *Phys. Rev. Lett.*, 119:183601, Oct 2017.