

# ***Simulation quantique avec des atomes de Rydberg circulaires en pinces optiques***

Laboratoire Kastler Brossel, UMR 8552  
Collège de France  
11 place Marcelin Berthelot, Paris  
[www.cqed.org](http://www.cqed.org)

**Directeur de thèse** : Michel Brune ([michel.brune@lkb.ens.fr](mailto:michel.brune@lkb.ens.fr))

**Co-encadrant** : Clément Sayrin ([clement.sayrin@lkb.ens.fr](mailto:clement.sayrin@lkb.ens.fr))

## **Projet de recherche doctorale**

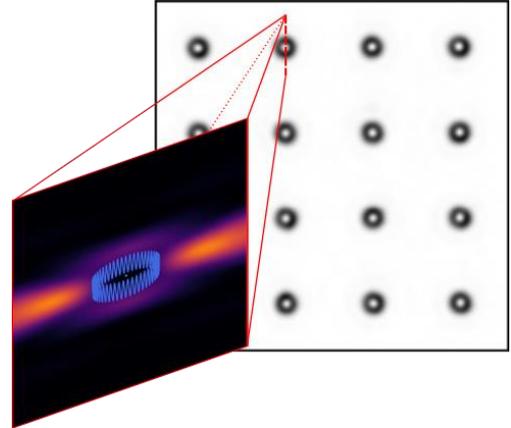
Un effort important est aujourd'hui dirigé vers le développement de simulateurs quantiques. En émulant la dynamique quantique de systèmes complexes, typiquement de matière condensée, sur des systèmes parfaitement contrôlés expérimentalement, les simulateurs quantiques permettent l'étude de ces systèmes dans des régimes hors d'atteinte des super-calculateurs et l'accès à toutes les observables pertinentes du problème, certaines étant inaccessibles aux expériences de « bulk ». De très nombreuses plateformes expérimentales sont aujourd'hui utilisées pour le développement de tels simulateurs. En particulier, les atomes de Rydberg, atomes qui interagissent très fortement même espacés de quelques microns, se sont montrés particulièrement adaptés à cette tâche. Des résultats majeurs ont ainsi pu être obtenus récemment en utilisant des atomes individuels, piégés dans des réseaux de pinces optiques, et excités vers des niveaux de Rydberg de bas moment orbital. Des réseaux de plusieurs centaines d'atomes ont été utilisés pour la réalisation de simulations quantiques sur quelques micro-secondes (une dizaine de cycles d'interaction). Le temps de simulation de ces dernières expériences est toutefois limité par le fait que les atomes de Rydberg ne sont pas piégés par les pinces optiques, et que le temps de vie de ces atomes dans l'environnement à température ambiante est au mieux de quelques centaines de microsecondes.

Ce projet de recherche doctorale a pour objectif la réalisation de simulations quantiques avec des atomes de Rydberg circulaires individuels, piégés optiquement dans un environnement cryogénique. Les atomes de Rydberg circulaires, de moment orbital maximal, ont un temps de vie naturel de plusieurs dizaines de millisecondes. Ils sont en outre insensibles à la photoionisation et peuvent être piégés optiquement sur des temps longs. L'utilisation d'atomes de Rydberg circulaires permet donc la combinaison de fortes interactions et de longs temps de simulation : l'observation de la dynamique de systèmes complexes est alors possible sur plusieurs centaines de cycles d'interaction, ouvrant la voie vers l'étude de processus lents, comme la thermalisation d'un ensemble de spins après un « quench », hors d'atteinte des simulateurs actuels.

Récemment, l'équipe d'Electrodynamique quantique en cavité du Laboratoire Kastler Brossel a pu préparer des atomes de Rydberg circulaires au sein d'un gaz d'atomes de rubidium refroidis par laser et dans un environnement cryogénique [1]. Nous avons ainsi pu mesurer un temps de vie des niveaux circulaires de près de 5ms, et obtenu une température du corps noir micro-onde, facteur limitant du temps de vie des atomes, de 11K seulement. Par ailleurs, nous avons pu piéger à deux dimensions ces mêmes atomes de Rydberg circulaires au sein d'un faisceau laser creux (mode de Laguerre-Gauss (0,1)) et montrer un temps de piégeage supérieur à 10ms [2].

Ces deux résultats ont ouvert la voie à la réalisation de simulations quantiques avec des atomes de Rydberg circulaires [3] individuels piégés dans un réseau de pinces optiques et au sein d'un environnement cryogénique.

La réalisation de ces simulations quantiques nécessite le développement de nouvelles techniques expérimentales et l'adaptation de techniques maîtrisées à la nouvelle plateforme en cours de développement. L'expérience consiste dans un premier temps à piéger des atomes de Rubidium 87 dans leur état fondamental dans un réseau de pinces optiques, chaque pince correspondant à un faisceau gaussien fortement focalisé. Dans une telle pince optique, au plus un atome peut être piégé. Un réarrangement éventuel des atomes dans le piège permet la préparation déterministe d'un réseau d'atomes sans défauts.



Atomes de Rydberg individuels piégés dans un réseau de pinces optiques « creuses »

Les atomes piégés sont ensuite excités vers les niveaux de Rydberg circulaires, et les pinces optiques modifiées en des pinces « creuses », autorisant le piégeage des atomes de Rydberg circulaires, repoussés par la lumière. Il est alors possible de manipuler l'état interne des atomes par rayonnement micro-onde.

Ces premières étapes ont très récemment été réalisées dans notre groupe au sein d'un dispositif expérimental à température ambiante, reprenant l'essentiel des caractéristiques du futur dispositif cryogénique. En particulier, le système optique est directement transposable à notre futur dispositif cryogénique. Le projet de recherche doctorale ici proposé est donc prêt à être lancé.

Le hamiltonien naturellement simulé par ce réseau d'atomes est un hamiltonien de spins en interaction de type XXZ. La réalisation de simulations quantiques de ce hamiltonien sur des temps longs est au cœur du travail doctoral ici proposé. Ce hamiltonien présente de multiples phases ordonnées dont l'observation constituera l'un des résultats importants du projet de recherche. Pour ce faire, nous exploiterons notre capacité à contrôler expérimentalement et dynamiquement tous les paramètres du hamiltonien. En particulier, nous montrerons qu'il est possible d'ajuster librement la force relative de l'interaction d'échange et de l'interaction directe (sans échange de spins) entre deux atomes voisins. Une modification lente de ces paramètres permettra de préparer adiabatiquement les multiples phases du hamiltonien, quand une variation rapide permettra au contraire d'étudier la dynamique des atomes après un « quench ».

## Références :

[1] [T. Cantat-Moltrecht et al., PRR 2, 022032\(R\) \(2020\)](#)

[2] [R. Cortiñas et al., PRL 124, 1123201 \(2020\)](#)

[3] [T. L. Nguyen et al., PRX 8, 011032 \(2018\)](#)

## Encadrement

L'encadrement des étudiants en thèse est assuré par Michel Brune (DR CNRS) et Clément Sayrin (MCF SU). Michel Brune est le directeur de l'équipe *Électrodynamique quantique en cavité* qui inclut deux autres projets de recherche autour de simulations quantiques avec des atomes de Rydberg

circulaires. Clément Sayrin est responsable de l'expérience concernée par ce projet de recherche, à savoir celle permettant la préparation d'atomes de Rydberg circulaires dans un réseau de pinces optiques. Cette expérience a récemment permis pour la première fois la préparation d'atomes de Rydberg circulaires dans un gaz d'atomes de Rubidium refroidis par laser [1]. Le piégeage de ces atomes circulaires dans un faisceau de Laguerre-Gauss [2] puis, plus récemment, dans un réseau de pinces optiques « bouteille » constituent également une première.

Michel Brune a une longue expertise dans la préparation et la manipulation des atomes de Rydberg, en particulier circulaires, mais aussi dans le refroidissement laser et le piégeage d'atomes, notamment via l'expérience de puce à atomes en environnement cryogénique, qui a servi de base aux résultats récemment obtenus en environnement cryogénique.

Clément Sayrin est responsable de ce dispositif expérimental depuis 2015, et a donc construit une expertise dans la préparation d'atomes de Rydberg circulaires à partir d'atomes froids. Son expérience dans le piégeage d'atomes dans des pièges individuels acquise lors de son travail postdoctoral dans le groupe d'Arno Rauschenbeutel (Vienne, Autriche) est directement utile pour le piégeage des atomes dans le réseau de pinces optiques.

#### Publications en lien avec le projet

Michel Brune et Clément Sayrin

[1] [T. Cantat-Moltrecht \*et al.\*, PRR 2, 022032\(R\) \(2020\)](#)

[2] [R. Cortiñas \*et al.\*, PRL 124, 1123201 \(2020\)](#)

[3] [T. L. Nguyen \*et al.\*, PRX 8, 011032 \(2018\)](#)

Michel Brune

[4] [M. Brune et D. Papoular, PRR 2, 023014 \(2020\)](#)

Clément Sayrin

[5] [T. Yefsah et C. Sayrin, Reflets de la Physique 71, 8 \(2022\)](#)