

## **CONTRATS DOCTORAUX 2024 PROJET QUANTEDU**

### **Sujet de thèse – Laboratoire de Physique des Lasers**

Directeur de thèse : Bruno Laburthe-Tolra (DR CNRS) ;  
co-encadrants/directeurs Benjamin Pasquiou (IR CNRS), Martin Robert-de-Saint-Vincent (CR CNRS)  
(tous membres du Laboratoire de Physique des Lasers)

Ce projet de thèse s'inscrit dans le cadre d'une nouvelle opération au Laboratoire de Physique des Lasers, visant à la production du premier laser super-radiant continu. L'idée principale est qu'une collection d'atomes émette une radiation lumineuse sur une raie d'intérêt métrologique ; les atomes sont placés au sein d'une cavité optique Fabry-Perot, dans un régime dit de couplage fort collectif. Dans ce régime, l'émission lumineuse de chaque atome se fait de façon préférentielle dans le mode de la cavité Fabry-Perot du fait d'un phénomène de synchronisation spontanée entre les dipôles atomiques associé au phénomène de super-radiance. Un des intérêts du laser super-radiant est que la fréquence d'émission dépend très peu des fluctuations en position des miroirs formant la cavité dans le régime dit « Bad Cavity Limit », où la largeur du milieu émetteur est faible par rapport à la largeur intrinsèque associée au taux de fuite des miroirs utilisés. Dans l'idéal, la radiation émise peut alors avoir un spectre bien plus étroit que la largeur naturelle des atomes utilisés, ce qui peut présenter des perspectives nouvelles pour réaliser une horloge atomique active. D'un point de vue fondamental, le laser super-radiant peut être vu comme un système quantique dissipatif non-linéaire qui devrait posséder des propriétés fascinantes. Sous le seuil laser, l'ensemble des atomes peut être vu comme ayant des dipôles aléatoires, formant une phase paramagnétique. Au-dessus du seuil, la synchronisation super-radiante peut être vue comme l'émergence d'une phase ferromagnétique. Le régime le plus intéressant est celui de la transition entre ces deux phases, c'est-à-dire au voisinage du seuil, pour lequel on s'attend à ce que le système soit piloté par de fortes corrélations quantiques entre atomes.

Du fait du rôle prédominant des corrélations quantiques pour établir le régime superradiant, et du fait des applications en termes métrologiques, le laser super-radiant continu que nous cherchons à développer peut ainsi être vu comme une nouvelle technologie quantique potentiellement très utile. Plusieurs démonstrations préliminaires de lasers super-radiants ont été réalisées dans le monde, en utilisant des atomes ultra-froids dans des cavités optiques. Ces démonstrations sont pour l'instant uniquement dans le domaine pulsé. Atteindre le régime permanent serait extrêmement intéressant à la fois d'un point de vue fondamental et pour les applications métrologiques. Il est cependant difficile de combiner refroidissement laser et chargement en continu d'atomes dans une cavité. En parallèle de projets extrêmement ambitieux lancés (à Amsterdam, Boulder, Besançon, Torun) dans cette direction utilisant des atomes ultra-froids et une raie d'horloge, nous avons choisi une approche originale et a priori bien plus simple. Notre approche n'aura pas la même qualité ultime en termes métrologiques, mais sa robustesse, sa compacité et sa stabilité aux temps courts pourraient inaugurer une nouvelle génération d'horloges atomiques, en particulier en systèmes embarqués. Nous proposons en effet d'utiliser un jet continu d'atomes simplement pré-refroidis, et la raie d'inter-combinaison de l'atome de strontium.

Notre expérience consiste ainsi en un jet continu d'atome de strontium (atome d'intérêt métrologique), ralenti dans un ralentisseur Zeeman, refroidi transversalement, et dirigé vers le mode d'une cavité optique. Le gros de l'expérience est aujourd'hui construit, grâce au travail des permanents de l'équipe et de deux CDDs embauchés sur ce projet (Grégoire Coget en 2022, Ziyad Amodjee en 2023). Nous pensons que ce dispositif constitue aujourd'hui un endroit idéal pour commencer une thèse qui s'intéressera aux questions physiques fondamentales associées à l'obtention du laser super-radiant continu. L'objet de la thèse sera tout d'abord d'optimiser la canalisation des atomes vers la cavité Fabry-Perot, d'assurer l'excitation électronique des atomes juste

avant qu'ils ne pénètrent celle-ci, afin d'atteindre l'inversion de population et le seuil laser super-radiant. Dans un second temps, il s'agira de caractériser la lumière produite par les atomes, et d'explorer les différents régimes qui devraient surgir en fonction du nombre d'atomes au sein de la cavité, de leur vitesse le long de l'axe de la cavité et perpendiculairement à celui-ci. Des expériences d'optique quantique seront entreprises afin de caractériser les fluctuations en intensité du laser et comparer les fonctions de corrélation du premier et deuxième ordres à celles d'un laser « classique ». Le régime critique marqué par de fortes corrélations quantiques doit être tout particulièrement intéressant. En fonction de l'avancement de la thèse on pourra en fin de thèse aborder la caractérisation du laser du point de vue métrologique en utilisant la structure Refimeve+ et le lien fibré qui donne accès aux signaux issus des horloges atomiques de strontium.