

Titre : Étude théorique d'expériences de gaz quantiques dans un laboratoire en orbite terrestre

Mots clés : Condensat de Bose-Einstein, mélanges dégénérés quantiques, microgravité



Un des principaux objectifs de la physique fondamentale est d'unifier la relativité générale, qui décrit les phénomènes macroscopiques régis par l'influence de la gravité, à la mécanique quantique, qui se concentre sur les effets à l'échelle microscopique. Les ensembles d'atomes froids, en tant qu'objets massifs quantiques, se trouvent au croisement de ces deux théories et paraissent comme des sujets de tests idéaux. Ils peuvent être utilisés pour tester des théories qui postulent une violation des principes d'équivalence d'Einstein et en particulier une violation de l'universalité de la chute libre (UFF).

Des propositions récentes suggèrent d'utiliser des mélanges de condensats de Bose-Einstein (BEC) comme sources d'interféromètres atomiques de précision pour implémenter des tests UFF. Ces expériences ont le potentiel d'atteindre et même de dépasser la précision des meilleurs tests réalisés avec des masses classiques durant la mission MICROSCOPE. L'exécution d'expériences en microgravité permet des temps d'interrogation plus longs, améliorant par conséquent les performances des capteurs à ondes de matière. Pour optimiser l'implémentation des tests UFF, il est nécessaire d'avoir un contrôle parfait des atomes dû aux exigences strictes sur le budget d'erreurs. Dans ce travail, nous nous concentrons sur la conception d'états d'entrée avec un contrôle en position et vitesse des nuages d'atomes, ainsi que leurs évolutions en taille.

Les expériences étudiées ici sont conçues avec des montages avec puce atomique qui manipulent les atomes à l'aide de pièges magnétiques. La plupart des applications présentées sont des expériences réalisées dans le Cold Atom Laboratory (CAL) de la NASA à bord de la Station Spatiale Internationale dans le cadre du Consortium for Ultracold Atoms in Space. Cette machine à BEC multi-utilisateur permet la manipulation de BEC simple-espèce à son installation ainsi que celle de mélanges de BEC double-espèces après des améliorations. En suivant cette chronologie, nous étudions d'abord la dynamique de BEC simple-espèce puis étendons ce travail à la manipulation d'un mélange de deux BECs en interaction. La première étape après la calibration du modèle à puce est de concevoir un transport rapide et robuste pour éloigner les atomes de la puce. Nous présentons et utilisons un protocole de raccourci à l'adiabaticité sur la base de rétro-ingénierie, pour transporter le BEC et atteindre les exigences sur le contrôle de la position et vitesse finale. L'expansion libre du nuage atomique avec la chute inhérente de densité rend la détection du signal difficile. Par analogie avec la lumière, il est possible de collimater le nuage atomique avec une lentille atomique à l'aide de la technique de Delta-Kick Collimation. Les applications à CAL ont abouti à des énergies d'expansion de l'ordre de la dizaine de pK. Pour simuler le processus d'imagerie et soutenir l'analyse de données, des modèles théoriques qui prennent en compte les effets de résolution de la caméra et les changements de repères associés à l'orientation de la caméra ou l'orientation du potentiel de piégeage par rapport à la puce atomique sont présentés.

L'espace permet la manipulation de mélanges de condensats de Bose-Einstein sous des conditions de miscibilité impossibles à obtenir au sol. La colocation des centres des pièges pour les différentes espèces en microgravité peut mener à des topologies différentes de l'état fondamental du piège. De plus, l'énergie d'interaction entre les espèces peut jouer un rôle significatif dans la dynamique du mélange lors de son transport. Cependant, la simulation de la dynamique de mélanges de BEC double-espèces en interaction est un défi sur le plan des ressources informatiques, surtout à cause des longues durées d'expansion. Dans ce travail, des méthodes de mise à l'échelle pour dépasser ces limitations sont présentées et illustrées dans des cas d'expériences dans l'espace dans CAL et à bord de fusées-sondes.