

Titre: Collimation d'ondes de matière dans des condensats de Bose-Einstein à deux espèces dans le régime picokelvin pour l'interférométrie atomique sur terre et dans l'espace

Mots clés: Condensats de Bose Einstein, Interférométrie atomique, Mesures de précisions, Mélanges quantiques, Molécules froides, Tests fondamentaux

Résumé: Cette thèse présente des techniques de préparation de sources de condensats de Bose-Einstein (BEC) permettant l'interférométrie atomique de précision, en mettant l'accent sur le contrôle des énergies d'expansion des ensembles atomiques. L'interférométrie atomique peut être utilisée pour tester l'universalité de la chute libre (UFF), et des propositions existent pour atteindre une précision au niveau de 10^{-17} . Atteindre un tel niveau nécessite de contrôler le recouvrement des deux ensembles atomiques à l'échelle du micromètre. Plus précisément, leur vitesse relative doit rester inférieure à $0.1 \mu\text{m s}^{-1}$, et leur énergie d'expansion doit être réduite en dessous de 10 pK, soit plusieurs ordres de grandeur en dessous de ce qui est obtenu par refroidissement évaporatif.

J'étudie tout d'abord, d'un point de vue théorique, les effets de l'extinction des courants dans les expériences à puce à atomes et leur impact sur la dynamique du centre de masse d'un mélange de BEC. À titre d'étude de cas, j'applique ces résultats au dispositif MAIUS-B et j'optimise la dynamique double-espèce d'un mélange quantique de 41K et 87Rb, trouvant un très bon accord entre les simulations basées sur un modèle de puce à atomes calibré et les mesures effectuées à la fois au sol et en microgravité. Ceci souligne la nécessité d'une extinction soigneusement conçue, afin d'éviter une forte impulsion différentielle pouvant compromettre la précision d'un test de l'UFF.

J'étudie ensuite la collimation par ajustement des interactions interspécifiques, sur les régimes faiblement et fortement interagissants. Je démontre cette approche sur un BEC de 39K dans le dispositif tout-optique ATLAS, en ajustant les interactions au moyen d'une résonance de Feshbach et en mesurant l'énergie d'expansion résultante, en bon accord avec des approches de mise à l'échelle. Pour collimater davantage l'ensemble, un schéma de lentillage dans le piège est modélisé et mis en œuvre pour collimater en 2D. Enfin, je propose une extension théorique de ce schéma de collimation aux trois axes, pertinente pour les interféromètres à grande base tels

que VLBAI, qui nécessitent des temps de vol longs.

J'étends par ailleurs le lentillage dans le piège par une étape d'excitation supplémentaire afin d'améliorer les performances de collimation. En pratique, j'applique cette séquence à un condensat de ^{87}Rb dans le Cold Atom Laboratory de la NASA, à bord de la Station spatiale internationale. Une simulation de puce à atomes, calibrée sur la dynamique du centre de masse mesurée, est utilisée pour extraire la courbure locale du piège. Grâce à une approche de mise à l'échelle, la dynamique de la taille du nuage est modélisée et concorde bien avec les données mesurées. Des simulations étendant cette séquence à un mélange de BEC suggèrent qu'une énergie d'expansion d'environ 50 pK pour chaque espèce pourrait être atteinte, une première étape compatible avec des tests de l'UFF au niveau de 10^{-15} .

Enfin, je propose une extension théorique de la technique de Delta-Kick Collimation (DKC) à un nuage de molécules de Feshbach faiblement liées, plutôt qu'à deux espèces atomiques en interaction, ce qui supprime les contraintes liées aux degrés de liberté de position et de vitesse différentielles du mélange. Je montre que l'impulsion DKC ne dissocie pas la molécule, et que le couplage entre les degrés de liberté translationnels et internes peut être négligé pour les durées d'impulsion considérées. Cela permet d'utiliser des approches de mise à l'échelle qui prédisent des performances comparables à celles du cas atomique.

Ensemble, ces résultats établissent et valident plusieurs stratégies complémentaires de préparation de sources ultra-froides : le contrôle de la coupure, la collimation mono et double-espèces, ainsi que la collimation moléculaire. Ils ouvrent la voie vers les faibles énergies d'expansion requises par les tests de précision de nouvelle génération de l'universalité de la chute libre.