

Titel : Theoretische Untersuchung von Quantengasexperimenten in einem Forschungslabor in der Erdumlaufbahn

Schlagwörter : Bose-Einstein Kondensate, quantentartete Mischungen, Mikrogravitation



Eines der wichtigsten Ziele der Grundlagenphysik ist die Vereinheitlichung der allgemeinen Relativitätstheorie, die makroskopische Phänomene unter dem Einfluss der Schwerkraft beschreibt, mit der Quantenmechanik, die sich auf mikroskopische Effekte konzentriert. Als massive Quantenobjekte scheinen kalte Atome prädestinierte Testobjekte an der Schnittstelle beider Theorien zu sein. So können atomare Ensembles benutzt werden, um die Universalität des freien Falls (UFF) zu testen und somit Theorien zu überprüfen, die eine Verletzung des Einstein'schen Äquivalenzprinzips postulieren.

Es gibt aktuell Vorschläge, Mischungen aus Bose-Einstein Kondensaten (BEC) als Quellen für präzise Atominterferometrie-Tests zu verwenden. Diese haben das Potenzial, mit der Präzision der besten Tests mit klassischen Testmassen im Rahmen der MICROSCOPE-Mission gleichzuziehen, und könnten langfristig sogar bessere Ergebnisse liefern. Die Realisierung derartiger Experimente in Mikrogravitation verspricht längere Abfragezeiten und erhöht damit die Performance der Materiewellensensoren. Zur Optimierung dieser UFF-Tests ist aufgrund der strengen Anforderungen an die Fehlerbudgets eine präzise Kontrolle der Atome erforderlich. In dieser Arbeit konzentrieren wir uns auf die Präparation des initialen Zustands mittels der Kontrolle über die Position und Geschwindigkeit der Atomwolken sowie deren Expansionsverhalten.

Die in dieser Arbeit untersuchten Experimente nutzen Atomchips, die die Atome mittels magnetischer Fallen manipulieren. Die meisten Versuche wurden im NASA Cold Atom Laboratory an Bord der Internationalen Raumstation als Teil des Consortium for Ultracold Atoms in Space durchgeführt. Die sich dort befindliche Multi-User-BEC-Maschine erlaubt die Manipulation von Bose-Einstein Kondensaten (BEC) einer atomaren Spezies sowie nach Verbesserungen auch die Kontrolle von Mischungen aus zwei Spezies. Dieser Chronologie folgend untersuchen wir zuerst die Dynamik von Einzel-BECs und dann die Manipulation einer wechselwirkenden Mischung aus zwei BECs.

Im Anschluss an die Kalibrierung des Chipmodells besteht der erste Schritt darin, ein schnelles und robustes Protokoll zu entwerfen, um das atomare BEC vom Atomchip weg zu transportieren. Um dabei die Anforderungen an die Positionskontrolle und die Geschwindigkeitskontrolle zu erfüllen, stellen wir ein auf Reverse-Engineering basierendes Shortcut-To-Adiabaticity (STA)-Protokoll vor. Die freie Expansion der Atomwolke mit ihrem inhärenten Dichteabfall erschwert die Signaldetektion. Mittels der Delta-Kick-Kollimationstechnik ist es möglich, die Atomwolke mit atomaren Linsen in Analogie zu Lichtwellen zu kollimieren. Deren Anwendung im CAL-Experiment führte zu Expansionsenergien im zweistelligen pK-Bereich. Zur Simulation des Abbildungsprozesses und zur Unterstützung der experimentellen Datenanalyse stellen wir theoretische Modelle vor.

Schwereelosigkeit ermöglicht spezielle Eigenschaften für Mischungen aus Bose-Einstein Kondensaten, die unter Gravitation nicht realisierbar sind. Die räumliche Übereinstimmung des Fallenzentrums für die verschiedenen atomaren Spezies in Mikrogravitation kann beispielsweise zu unterschiedlichen Topologien des Fallengrundzustands führen. Außerdem spielt die Wechselwirkungsenergie zwischen den Spezies, die im Grundzustand nahezu vernachlässigbar ist, eine wichtige Rolle für die Dynamik der Mischung während des Transports. Die Simulation der Dynamik von wechselwirkenden BEC-Mischungen mit zwei Spezies ist mit großem numerischen Rechenaufwand verbunden, insbesondere aufgrund der langen Expansionszeiten. In dieser Arbeit werden Skalierungstechniken vorgestellt, um diese Einschränkungen zu überwinden. Ihre Anwendung wird anhand von Weltraumexperimenten in CAL und an Bord von Höhenforschungsraketen erläutert.