

Titel: Kollimation von Materiewellen in Bose-Einstein-Kondensaten zweier Spezies im Pikokelvin-Regime für die Atominterferometrie auf der Erde und im Weltraum

Schlagwörter: Bose-Einstein-Kondensat, Atominterferometrie, Präzisionsmessungen, Quantengemische, Kalte Moleküle, Fundamentaltests

Zusammenfassung: Diese Dissertation stellt Techniken zur Präparation von Bose-Einstein-Kondensaten (BEK) vor, die präzise Atominterferometrie ermöglichen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Kontrolle der Expansionsenergien dieser atomaren Ensembles. Atominterferometrie kann genutzt werden, um die Universalität des freien Falls (UFF) zu testen, und es gibt Vorschläge für Experimente, die eine Genauigkeit von 10^{-17} erreichen sollen. Dies erfordert einen Überlapp der beiden atomaren Ensembles, der auf der Mikrometerskala kontrolliert wird. Insbesondere muss ihre relative Geschwindigkeit unter $0.1 \mu\text{m s}^{-1}$ bleiben, und ihre Expansionsenergie, in Temperatureinheiten ausgedrückt, auf unter 10 pK reduziert werden, mehrere Größenordnungen unter dem, was direkt durch evaporative Kühlung erreicht wird.

Ich untersuche zunächst den Einfluss des Abschaltens der Magnetfalle im MAIUS-B Experiment auf die Schwerpunktsdynamik einer BEK-Mischung aus 41K und 87Rb . Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulationen, die auf einem kalibrierten Atomchip-Modell basieren, und den Messungen, die sowohl am Boden als auch in Mikrogravitation durchgeführt wurden. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines sorgfältigen Designs des Abschaltens, um starke differentiellen Geschwindigkeiten zwischen den beiden Spezies zu vermeiden, was die Präzision eines UFF-Tests beeinträchtigen könnte.

Anschließend untersuche ich Kollimationsprozesse im ATLAS Experiment, einem rein optischen Aufbau, indem ich die Wechselwirkungen eines 39K -BEK über eine Feshbach-Resonanz einstelle und die resultierende Expansionsenergie messe. Skalierungsansätze, die an die schwach und stark wechselwirkenden Bereiche angepasst sind, erklären das beobachtete Verhalten. Um das Ensemble in 2D zu kollimieren, wird eine In-Trap-Linsentechnik modelliert und implementiert. Schließlich schlage ich eine theoretische Erweiterung dieses Kollimationsschemas auf alle drei Achsen vor, die für Interferometer auf großen Skalen und langen Flugzeiten wie VL-BAI relevant ist.

Darüber hinaus berichte ich über eine Kollimationssequenz, die im Cold Atom Laboratory der NASA an Bord der Internationalen Raumstation durchgeführt wurde und die In-Trap-Linsentechnik um einen zusätzlichen Anregungsschritt erweitert, um ein ^{87}Rb -Kondensat zu kollimieren. Eine Atomchip-Simulation, die anhand der gemessenen Schwerpunktsdynamik kalibriert wurde, wird verwendet, um die lokale Fallenkrümmung zu bestimmen. Mittels eines Skalierungsansatzes wird so die Größendynamik der Wolke modelliert, die gut mit den gemessenen Daten übereinstimmt. Simulationen, die diese Sequenz auf eine BEK-Mischung erweitern, deuten darauf hin, dass eine Expansionsenergie von etwa 50 pK für zwei Spezies erreicht werden könnte. Diese Präparation ist ein erster Schritt, um UFF-Tests auf dem Niveau von 10–15 zu ermöglichen.

Abschließend schlage ich eine theoretische Erweiterung der Delta-Kick-Collimation (DKC) auf eine Wolke schwach gebundener Feshbach-Moleküle statt zwei wechselwirkender atomarer Spezies vor. So entfallen die Kriterien bezüglich der differentiellen Positions- und Geschwindigkeitsfreiheitsgrade der Mischung. Ich zeige, dass der DKC-Puls das Molekül nicht dissoziiert und die Kopplung zwischen translatorischen und internen Freiheitsgraden für die betrachteten Pulsdauern vernachlässigt werden kann. Dies ermöglicht die Anwendung von Skalierungsansätzen, die Leistungen vorhersagen, die mit denen des atomaren Falls vergleichbar sind.

Zusammen begründen und validieren diese Ergebnisse mehrere komplementäre Strategien zur Präparation ultrakalter Quellen: die kontrollierte Abschaltung, die Einzel- und Zweispezies-Kollimation sowie die molekulare Kollimation. Sie bereiten den Weg für die niedrigen Expansionsenergien, die für hochpräzise Tests der nächsten Generation der Universalität des freien Falls erforderlich sind.