

XHVpressure

Towards XHV pressure sensing in space

Programm / Ausschreibung	ASAP, ASAP, ASAP 16. Ausschreibung (2019)	Status	abgeschlossen
Projektstart	01.06.2021	Projektende	31.05.2022
Zeitraum	2021 - 2022	Projektlaufzeit	12 Monate
Keywords	vacuum, gauge, optical trapping		

Projektbeschreibung

In den letzten Jahren hat sich die technologische Bereitschaft vieler Quantentechnologien bedeutend erhöht, und es gab ein steigendes Interesse daran, aus diesen neuen Technologien einen Vorteil für Anwendungen im Weltraum zu gewinnen. Einige Beispiele sind die mögliche Quantenverschlüsselung über globale Distanzen hinweg, Tests der Quantenverschränkung über große Distanzen und die mögliche weitere Verbesserung der Sensitivität von Hochpräzisions-messungen. Zudem bietet der Weltraum eine einzigartige Umgebung für Tests der Grundlagen der Quantenphysik. Eine vielversprechende Quantentechnologie für hochpräzise Messungen sowie für fundamentale Tests ist die Quantenoptomechanik. Dabei betreibt man massive mechanische Resonatoren im Quantenregime – also im Regime nicht-klassischer Zustände. Eine der zentralen Herausforderungen bei solchen Experimenten ist es, das Quantensystem von störenden Wechselwirkungen mit der Umgebung (Dekohärenz) zu isolieren. Zu diesem Zweck hat man vorgeschlagen, statt fest verankerter mechanischer Oscillatoren optisch gefangene dielektrische Kugeln zu verwenden. Dieser Zugang ist die Grundlage des MAQRO Proposals, welches Quantenoptomechanik und Materiewelleninterferometrie mit hohen Massen verwenden will, um die Grundlagen der Quantenphysik zu testen. Selbst in diesem Fall kann das Quantensystem auf vielfältige Weise dekohärieren. Eine zentrale Limitierung sind Stöße mit Gas/Plasma Teilchen. Aus diesem Grund würden makroskopische Quantenexperimente wie MAQRO ein extrem hohes Vakuum (XHV) benötigen – idealerweise $\leq 1e-15$ mbar. Abgesehen von der Herausforderung, XHV im Weltraum zu erreichen, ist es keine triviale Aufgabe, solche Vakuumniveaus zu messen. Experimente haben einen steigenden Grad der Kontrolle über solche Systeme erreicht. Vor kurzem wurde die Schwerpunktsbewegung eines optisch gefangenen Teilchens zum ersten Mal in den Quantengrundzustand gekühlt. Falls man die Schwerpunktsbewegung ausreichend kühlt, kann selbst eine einzelne Kollision mit einem Gasteilchen einen merklichen Effekt haben und die Besetzungszahl des Oscillators erhöhen, der die Schwerpunktsbewegung der Kugel beschreibt. Derzeitige experimentelle Realisierungen optomechanischer Systeme mit optisch gefangenen Teilchen sind bereits jetzt nahe an dem nötigen Grad an Kontrolle, um einzelne Zusammenstöße mit Gasteilchen auflösen zu können. Das vorliegende Proposal hat zum Ziel, diese Möglichkeit auszunutzen, um eine grundlegende Demonstration eines XHV-Sensors zu umzusetzen. Wir werden untersuchen, wie der Sensor auf Gaskollisionen reagiert, während wir den Druck von moderatem, zu ultrahohem und dann zu extremem Vakuum verringern. Unser Sensor sollte es ermöglichen, die Vakuumdrücke aufzulösen, die für makroskopische Quantenexperimente nötig sind. In diesem Projekt werden wir großes Augenmerk darauf legen, dass unser Sensor in Zukunft für die Verwendung im Weltraum adaptiert werden kann. Abgesehen von seinem Nutzen für

makroskopische Quantenexperimente hat ein zuverlässiger, weltraumtauglicher Sensor für extrem hohes Vakuum im Weltraum potentielle Anwendungen in anderen Bereichen. Beispiele sind die Erdbeobachtung, die Beobachtung des Weltraumwetters oder die Charakterisierung von Weltraumbedingungen.

Abstract

Recent years have seen a leap in the technological readiness of a variety of quantum technologies, and there has been increasing interest in quantum technology for applications in space. Examples are quantum key distribution over global distances, long-distance tests of quantum entanglement, and possibilities to boost the sensitivity of high-precision measurements in space. Moreover, space offers a unique environment for tests of the foundations of quantum physics. A promising quantum technology for high-sensitivity sensing and for fundamental tests is quantum optomechanics, where massive mechanical resonators are operated in the quantum regime. One of the central challenges in such experiments is to isolate the quantum systems from detrimental interactions with the environment (decoherence). To this end, it was suggested to use optically trapped dielectric spheres instead of mechanically clamped oscillators. This approach is at the heart of the MAQRO proposal to use quantum optomechanics and high-mass matter-wave interferometry to test the foundations of quantum physics. Even in this case, the quantum system can decohere in multiple ways. A key limiting factor are collisions with gas/plasma particles. For that reason, quantum experiments like MAQRO would require extremely high vacuum (XHV) conditions – ideally $\approx 1\text{e-}15\text{mbar}$. Apart from the challenge of reaching XHV in space, it is no trivial task to detect such vacuum levels. The present proposal intends to harness the extreme sensitivity of quantum systems to gas collisions in order to realize an XHV-capable sensor using an optically trapped sphere. Experiments have shown an increasing level of control in such systems, and very recently, the centre-of-mass motion of optically trapped spheres was cooled to the quantum ground state for the first time. If the centre-of-mass motion cooled sufficiently, even single collisions with gas molecules can have a noticeable effect and increase the mean occupation number of the oscillator describing the centre-of-mass motion of the sphere. Current experimental realizations have already achieved a level of control putting them on the verge of resolving such individual kicks. This would not only allow sensing extremely low pressures, but it promises gaining information about the momentum and direction of the scattered gas particles. The present proposal aims to harness this capability to realize a proof-of-principle demonstration of an XHV sensor. We will investigate the sensor's response to gas collisions as we lower the pressure from moderate, to ultra-high and finally to extreme vacuum. Our sensor should be able to resolve the vacuum pressures required for macroscopic quantum experiments. In this project, we will place an emphasis on the potential of our sensor's capability for being adapted for the operation in a space environment. Apart from its use for macroscopic quantum experiments, a reliable, space-ready sensor of extremely high vacuum in space could have a range of other applications. Examples are Earth observation, prove a powerful tool for Earth observation, monitoring of space weather or the characterization of the space environment.

Projektpartner

- Österreichische Akademie der Wissenschaften