

DISS. ETH NO. 22902

Creation of Squeezed Schrödinger's Cat States in a Mixed-Species Ion Trap

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCE of ETH ZÜRICH
(Dr. sc. ETH ZÜRICH)

presented by

HSIANG-YU LO

M.S., National Chiao Tung University, 2007

born on 22.12.1983

citizen of
Taiwan

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. P. Home

Dr. C. F. Roos

2015

Abstract

This thesis reports on novel experiments in the field of quantum state engineering and preparation using a single trapped $^{40}\text{Ca}^+$ ion. It also covers the laser system, optical setups, experimental characterizations and theoretical study for the $^9\text{Be}^+$ ions. In addition, a newly set-up mixed-species ion trap and imaging system are described.

We demonstrate the generation of squeezed Schrödinger's cat states by applying a state-dependent force (SDF) to a single trapped ion initialized in a squeezed vacuum state. Using SDF technique allows us to directly measure the phase coherence and quadratures of the initial squeezed wavepacket by monitoring the spin-motion entanglement. The evolution of the number states of the oscillator is measured as a function of the duration of the force. In both experiments, we observe clear differences between displacements aligned with the squeezed and anti-squeezed axes. Coherent revivals of the squeezed Schrödinger's cat state are observed after separating the wavepackets by more than 19 times the ground state root-mean-square extent, which corresponds to 56 times the r.m.s. extent of the squeezed wavepacket along the displacement direction. To our knowledge, this is the largest cat state created in any technology so far.

The beryllium laser system built as part of this thesis is designed to perform a high-fidelity control of beryllium qubits. The new 235 nm laser source is first described and used for loading beryllium ions. For quantum control of the ion, we generated 1.9 Watts of continuous-wave ultraviolet light at 313 nm, which may help towards fault-tolerant quantum computation. Using these sources, the control of beryllium is described, including the ground state cooling and a long-lived quantum memory. The coherence time of the $^9\text{Be}^+$ qubit with a first-order magnetic-field-independent hyperfine transition is measured to be ≈ 1.5 seconds.

This work provides basic techniques for quantum control of both ion species in the same experimental setup as well as developing new tools for quantum state engineering, quantum metrology and quantum information processing.

This is the first edition of the thesis, released on Monday 27th July, 2015. This is the second edition of the thesis with corrections according to examiners' comments, released on Monday 1st February, 2016.

Zusammenfassung

Diese Dissertation dokumentiert neuartige Experimente mit einzelnen gefangenen $^{40}\text{Ca}^+$ Ionen im Forschungsfeld der Quantenzustandspräparation. Sie behandelt ausserdem ein Lasersystem, den optischen Aufbau, die experimentelle Charakterisierung, sowie theoretische Studien für $^9\text{Be}^+$ Ionen. Zusätzlich werden eine neu aufgebaute Ionenfalle und ein Abbildungssystem für Ionenkristalle verschiedener Spezies beschrieben.

Wir demonstrieren die Erzeugung gequetschter Schrödingers-Katzen Zustände durch die Anwendung einer zustandsabhängigen Kraft auf ein in einem gequetschten Grundzustand initialisierten, gefangenen Ion. Die Verwendung der Methode der zustandsabhängigen Kraft erlaubt es uns, durch die Beobachtung der Verschränkung zwischen Spin- und Bewegungszustand direkt die Phasenkohärenz und Quadraturen des gequetschten Wellenpakets zu messen. Die Entwicklung der Fock-Zustände des Oszillators wird als Funktion der Dauer der zustandsabhängigen Kraft gemessen. In beiden Experimenten beobachten wir deutliche Unterschiede für den Versatz entlang der gequetschten und der anti-gequetschten Achse. Kohärente Wiederkehr der gequetschten Schrödinger-Katzen-Zustände nach einer Separation der Wellenpakete von mehr als 19 mal der Ausdehnung des Grundzustandswellenfunktion wird beobachtet (quadratischer Mittelwert). Dies entspricht einer Separation von 56 mal der Ausdehnung des gequetschten Wellenpakets (quadratischer Mittelwert) entlang der Richtung des Versatzes. Nach unserem Wissen ist dies der grösste Katzen-Zustand der bisher, unabhängig von der angewandten Technologie, erzeugt wurde.

Das Lasersystem für Beryllium, gebaut als Teil dieser Arbeit, wurde entworfen, um Kontrolle hoher Güte von Beryllium-Ionen auszuüben. Die neue 235 nm Laserquelle wird zuerst beschrieben und verwendet um Beryllium-Ionen zu laden. Für Quantenkontrolle erzeugen wir 1.9 W an Dauerstrich-Ultraviolett-Licht bei 313 nm, was hilfreich für fehler-tolerantes Quanten-Rechnen sein könnte. Die Kontrolle von Beryllium mit Verwendung dieser Quellen wird beschrieben, inklusive Grundzustandskühlen und eines langlebigen Quantenspeichers. Die Kohärenzzeit eines $^9\text{Be}^+$ Qubits mit einem in erster Ordnung magnetfeldunabhängigen Übergang in der Hyperfeinstruktur wurde zu ≈ 1.5 Sekunden gemessen.

Diese Arbeit beschreibt grundlegende Techniken zur Quantenkontrolle von beiden Ionenspezies im selben experimentellen Aufbau sowie die Entwicklung neuer Techniken zum Erzeugen von Quantenzuständen, der Quantenmeteorologie und der Quanteninformationsverarbeitung.