

QUANTUM NONLINEARITIES IN STRONG COUPLING CIRCUIT QED

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
JOHANNES M. FINK
Mag. rer. nat., University of Vienna
born December 21st, 1981
citizen of Austria

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Andreas Wallraff
Prof. Dr. Ataç İmamoğlu

ABSTRACT

The fundamental interaction between matter and light can be studied in cavity quantum electrodynamics (QED). If a single atom and a single photon interact in a cavity resonator where they are well isolated from the environment, the coherent dipole coupling can dominate over any dissipative effects. In this strong coupling limit the atom repeatedly absorbs and emits a single quantum of energy. The photon and the atom lose their individual character and the new eigenstates are quantum superpositions of matter and light – so called dressed states.

Circuit QED is a novel on-chip realization of cavity QED. It offers the possibility to realize an exceptionally strong coupling between artificial atoms – individual superconducting qubits – and single microwave photons in a one dimensional waveguide resonator. This new solid state approach to investigate the matter-light interaction enables to carry out novel quantum optics experiments with an unprecedented degree of control. Moreover, multiple superconducting qubits coupled via intra-cavity photons – a quantum bus – are a promising hardware architecture for the realization of a scalable quantum information processor.

In this thesis we study in detail a number of important aspects of the resonant interaction between microwave photons and superconducting qubits in the context of cavity QED:

We report the long sought for spectroscopic observation of the \sqrt{n} nonlinearity of the Jaynes-Cummings energy ladder where n is the number of excitations in the resonantly coupled matter-light system. The enhancement of the matter-light coupling by \sqrt{n} in the presence of additional photons was already predicted in the early nineteen sixties. It directly reveals the quantum nature of light. In multi-photon pump and probe and in elevated temperature experiments we controllably populate one or multi-photon / qubit superposition states and probe the resulting vacuum Rabi transmission spectrum. We find that the multi-level structure of the superconducting qubit renormalizes the energy levels, which is well understood in the framework of a generalized Jaynes-Cummings model. The observed very strong nonlinearity on the level of single or few quanta could be used for the realization of a single photon transistor, parametric down-conversion, and for the generation and detection of individual microwave photons.

In a dual experiment we have performed measurements with up to three independently tunable qubits to study cavity mediated multi-qubit interactions. By tuning the qubits in resonance with the cavity field one by one, we demonstrate the enhancement of the collective dipole coupling strength by \sqrt{N} , where N is the number of resonant atoms, as predicted by the Tavis-Cummings model. To our knowledge this is the first observa-

tion of this nonlinearity in a system in which the atom number can be changed one by one in a discrete fashion. In addition, the energies of both bright and dark coupled multi-qubit photon states are well explained by the Tavis-Cummings model over a wide range of detunings. On resonance we observe all but two eigenstates to be dark states, which do not couple to the cavity field. The bright states on the other hand are an equal superposition of a cavity photon and a multi-qubit Dicke state with an excitation equally shared among the N qubits. The presented approach may enable novel investigations of super- and sub-radiant states of artificial atoms and should allow for the controlled generation of entangled states via collective interactions, not relying on individual qubit operations.

Finally, we study the continuous transition from the quantum to the classical limit of cavity QED. In order to access the quantum and the classical regimes we control and sense the thermal photon number in the cavity over five orders of magnitude and extract the field temperature given by Planck's law in one dimension using both spectroscopic and time-resolved vacuum Rabi measurements. In the latter we observe the coherent exchange of a quantum of energy between the qubit and a variable temperature thermal field. In the classical limit where the photon occupation of the cavity field is large, the quantum nonlinearity is small compared to any coupling rates to the environment. Here the signature of quantization vanishes and the system's response is indistinguishable from the response of a classical harmonic oscillator. The observed transition from quantum mechanics to classical physics illustrates the correspondence principle of quantum physics as introduced by Niels Bohr. The emergence of classical physics from quantum mechanics and the role of decoherence in this process is an important subject of current research. In future experiments entanglement and decoherence at elevated temperatures can be studied in the context of quantum information.

KURZFASSUNG

Die grundlegende Wechselwirkung zwischen Materie und Licht kann in der Hohlraum-Quantenelektrodynamik (*cavity QED*) untersucht werden. Wenn ein einziges Atom und ein einzelnes Photon in einer Kavität interagieren, wo sie gut von Umgebungseinflüssen geschützt sind, kann die Dipolwechselwirkung über alle dissipativen Effekte dominieren. In diesem sogenannten Limit der starken Kopplung absorbiert und emittiert das Atom wiederholt ein einzelnes Energiequantum. Photon und Atom verlieren dabei ihren individuellen Charakter und die neuen Eigenzustände des Systems sind quantenmechanische Überlagerungen von Materie und Licht.

Schaltkreis-Quantenelektrodynamik (*circuit QED*) ist eine neuartige, auf einem Mikrochip integrierte Realisierung der Hohlraum-QED. Sie ermöglicht es, außergewöhnlich starke Kopplungen zwischen künstlichen Atomen, individuellen supraleitenden Quantenbits (Qubits) und einzelnen Mikrowellenphotonen in einem eindimensionalen Wellenleiterresonator zu realisieren. Dieser neue festkörperbasierte Ansatz die Materie - Licht Wechselwirkung zu studieren, ermöglicht die Durchführung von neuartigen Quantenoptikexperimenten mit beispielloser Kontrolle. Darüberhinaus können mehrere Qubits mit Hilfe von Photonen in der Kavität über einen so genannten Quantenbus gekoppelt werden. Dieser Ansatz ist einer der aussichtsreichsten für die Realisierung eines Quanteninformationsprozessors mit skalierbarer Hardwarearchitektur.

In dieser Doktorarbeit werden im Kontext der Hohlraum-Quantenelektrodynamik folgende wichtige Aspekte der resonanten Wechselwirkung zwischen Mikrowellenphotonen und supraleitenden Qubits untersucht:

Wir berichten von der seit langem angestrebten Beobachtung der \sqrt{n} Nichtlinearität der *Jaynes-Cummings-Energieleiter*, wobei n die Anzahl der Anregungen im resonant gekoppelten Materie-Licht-System bezeichnet. Die Zunahme der Kopplung um den Faktor \sqrt{n} in Anwesenheit von zusätzlichen Photonen wurde schon in den frühen 1960er Jahren vorausgesagt und offenbart direkt die Quantennatur des Lichts. Die Mehrniveaustuktur des supraleitenden Qubits sorgt bei diesem Experiment für einen zusätzlichen interessanten Aspekt, der im Rahmen eines verallgemeinerten Modells ausgezeichnet erklärt wird. Die beobachtete starke Nichtlinearität auf dem Niveau von einzelnen Quanten eignet sich für die Erzeugung von Mikrowellenphotonen und könnte benutzt werden, um einen Einzelphotonentransistor oder parametrische Abwärtskonvertierung zu realisieren.

In dem dazu dualen Experiment koppeln wir bis zu drei Qubits kollektiv mit einem einzelnen Photon und messen die erwartete \sqrt{N} Skalierung der Kopplungsstärke, wobei N die Anzahl der Qubits bezeichnet. Die Nichtlinearität ergibt sich aufgrund des vergrößerten kollektiven Dipolmoments und wird durch das *Tavis-Cummings-Modell* erklärt. Wir

zeigen dieses Resultat erstmals in einem System, in dem die Atomzahl in diskreten Schritten kontrolliert verändert werden kann. In einem großen Bereich von Frequenzverstimmungen zwischen den Qubits und dem Photon stimmen die gefundenen Eigenenergien ausgezeichnet mit den so genannten Dicke-Zuständen überein. In Resonanz finden wir, dass mit Ausnahme von zwei hellen Zuständen alle Eigenzustände so genannte dunkle Zustände sind, die nicht an das Feld in der Kavität koppeln. Die hellen Zustände entsprechen gleich verteilten Superpositionen von einem Photon und den N Qubits. Der demonstrierte Ansatz ermöglicht neuartige Untersuchungen von sub- und superradianten Zuständen künstlicher Atome. Die gezeigte kollektive Wechselwirkung sollte außerdem eine kontrollierte Erzeugung von verschränkten Zuständen ermöglichen, die sich nicht auf individuelle Qubitoperationen stützt.

Zum Abschluss zeigen wir den kontinuierlichen Übergang vom quantenmechanischen zum klassischen Limit der Hohlraum-QED. Um beide Limits zugänglich zu machen, kontrollieren wir die mittlere thermische Photonenzahl n_{th} in der Kavität über einen Bereich von fünf Größenordnungen und extrahieren die effektive Temperatur des Mikrowellenfelds, die durch das Planck'schen Gesetz in einer Dimension gegeben ist, mittels spektroskopischen und zeitaufgelösten Vakuum-Rabi-Messungen. In den zeitaufgelösten Messungen beobachten wir die kohärente Wechselwirkung zwischen dem Qubit und einem niedrig besetzten thermischen Feld variabler Temperatur. Im klassischen Limit ist die Photonenzahlbesetzung des Feldes in der Kavität groß und die Quantennichtlinearität klein im Vergleich zu jeglichen Kopplungsraten zur Umgebung. In diesem Fall verschwindet die Signatur der Quantisierung und das Verhalten des Systems wird ununterscheidbar von dem eines klassischen harmonischen Oszillators. Der gefundene Übergang von der Quantenmechanik zur klassischen Physik zeigt das von Niels Bohr eingeführte Korrespondenzprinzip der Quantenphysik. Die Emergenz der klassischen Physik aus quantenmechanischen Gesetzen und die Rolle der Dekohärenz bei diesem Prozess, ist ein wichtiges Thema in der aktuellen Grundlagenforschung. In weiterführenden Experimenten kann, im Kontext der Quanteninformationstheorie, Verschränkung und Dekohärenz bei erhöhten Temperaturen untersucht werden.