



Doctoral Thesis

## Resonant Collective Dynamics in Circuit Quantum Electrodynamics

**Author(s):**

Mlynek, Jonas

**Publication Date:**

2014

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010252538> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22099

# Resonant Collective Dynamics in Circuit Quantum Electrodynamics

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Jonas Mlynek

Dipl. Phys., FU Berlin

born August 12, 1984

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Andreas Wallraff, examiner

Dr. Patrice Bertet, co-examiner

2014

## Abstract

The coupling of superconducting qubits to coplanar transmission line resonators has proven to be a fertile system to study the fundamental aspects of light-matter interaction.

A major advantage of this particular physical implementation is that the system's key parameters that govern the interaction can be designed in advance and fabrication is achieved under highly controllable conditions. Moreover coupling constants can be realized with very high accuracy, which allows to observe collective effects so far difficult to observe other system. Especially those experiments are challenging, which require almost identical coupling of multiple qubits to a single mode of the field. At the same time coupling constants can be varied over several orders of magnitude, which offers the possibility to perform and compare measurements in various distinct parameter regimes.

In this thesis I will present how the collective dynamics in a strongly coupled circuit QED system is explored to efficiently generate maximally entangled multi-particle states. Thereby we explicitly take advantage of the fact that the simultaneous interaction of multiple two-level systems with a single mode of the field leads to a significant enhancement of the interaction.

The strong coupling allows for a coherent exchange of excitations between two-level systems and the microwave field. For weak coupling in contrast, the resonator simply acts as a controlled dissipation channel. As a consequence any radiation that is emitted during collective dissipative processes may be guided efficiently to a detection system, where it can be fully characterized. Moreover experiments strongly benefit from the ability to observe and compare collective decay dynamics for different, well-defined initial states. Therefore superradiance, an effect mostly studied in large atomic ensembles, has been studied in this thesis from a new and unforeseen quantum mechanical point of view.

The results presented in this thesis indicate a promising path for future investigations, where coherent and furthermore dissipative photon-atom interactions may shed light on the essential concepts of quantum mechanics and where collective dynamics may work as a key resource for practical applications in the field of quantum information technology.

## Zusammenfassung

Die Kopplung von supraleitenden Qubits mit koplanaren Mikrowellenresonatoren hat sich als erkenntnisreiches System für die Untersuchung der elementaren Wechselwirkungsbeziehungen zwischen Licht und Materie gezeigt.

Ein grosser Vorteil dieser speziellen physikalischen Implementierung ist, dass viele Kerngrössen, die die Wechselwirkung bestimmen, im Vorfeld geplant und unter kontrollierten Bedingungen fabriziert werden können. Insbesondere, die hohe Präzession, mit der die Kopplungskonstanten realisiert werden können, erlaubt die Beobachtung von kollektiven Effekten, wie sie in vergleichbaren Systemen nur schwer realisierbar sind. Davon sind insbesondere solche Experimente betroffen, bei denen nahezu identische Kopplung mehrerer Qubits an eine einzelne Feldmode verlangt wird. Gleichzeitig erlaubt die Tatsache, dass die Kopplungskonstanten über viele Grössenordnungen variiert werden können, kollektive Dynamiken in unterschiedlichen Parameterkonfigurationen zu messen und miteinander zu vergleichen.

In dieser Arbeit werde ich aufzeigen, wie die kollektive resonante Dynamik in einem stark gekoppelten supraleitenden Schaltkreissystem genutzt werden kann um effizient maximal verschränkte Vielteilchenzustände zu generieren. Dabei ist entscheidend, dass eine gleichzeitige Wechselwirkung mehrerer Zwei-Niveau-Systeme mit derselben Feldmode, mit einer signifikanten und nachweisbaren Beschleunigung der Wechselwirkung einhergeht.

Während eine starke Kopplung den kohärenten Austausch von Anregung zwischen dem Zwei-Niveau-System und dem Mikrowellenfeld erlaubt, stellt der Resonator bei schwacher Kopplung einen kontrollierten Zerfallskanal dar. Dadurch ist es möglich, die während der kollektiven dissipativen Dynamik entstehende Strahlung praktisch verlustfrei an Detektoren weiterzuleiten und umfassend zu charakterisieren. Bei unseren Experimenten haben wir dabei speziell von der Möglichkeit gebraucht gemacht, Zerfälle für verschiedene, wohl-definierte Ausgangszustände, miteinander zu vergleichen. Dies hat dazu geführt, dass der bisher hauptsächlich in grossen atomaren Ensembles beobachtete Effekt der Superstrahlung unter bisher ungeahnten quantenmechanischen Gesichtspunkten studiert und bewertet werden konnte.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Resultate weisen einen vielversprechenden Weg für zukünftige Projekte auf, bei der sowohl eine kohärente als auch eine dissipative Licht-Atom Wechselwirkung wesentliche quantenmechanis-

che Konzepte in Erscheinung treten lässt und bei denen die involvierten kollektiven dynamischen Prozesse im Zuge der Quanteninformationsverarbeitung gezielt zur Anwendung kommen könnten.