

Diss. ETH No. 25707

# **Magneto-transport in engineered vacuum fields**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

GIAN LORENZO SIMONE PARAVICINI BAGLIANI

Master of Science in Physics, ETH Zürich

born on 04.08.1989

citizen of Luzern LU - Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jérôme Faist, examiner

Prof. Dr. Cristiano Ciuti, co-examiner

Prof. Dr. Thomas Ebbesen, co-examiner

Dr. Giacomo Scalari, co-examiner

2019

# Abstract

Quantum electrodynamics predicts a non-trivial ground state for an electromagnetic mode. In the absence of photons, the so called zero-point energy of  $\frac{1}{2}\hbar\omega$  remains. It gives rise to vacuum electric field fluctuations and important physical effects such as the spontaneous emission, the Lamb shift and the Casimir effect. Experimentally, it remains difficult to tune vacuum field modes and directly observe their physical consequences. By engineering vacuum fields in cavities one can reach a peculiar situation: an electronic excitation of matter can be revived after its decay by photon emission. In this so called strong light-matter coupling regime, the hybrid light-matter excitations (polaritons) are mostly probed with photonic excitations. Such an approach hides, that the coupling arises already from the vacuum field fluctuations in absence of photons.

In this work, we develop an experimental platform allowing to probe the electronic part of the polaritonic ground state. Intriguingly, we can tune vacuum field modes, while observing the response in the matter part. It is implemented with a cavity-embedded 2D electron gas in the ultrastrong coupling regime and probed by magneto-transport. Transport–depending on virtual transitions to excited states–is modified, as these transitions become the polaritons in presence of a vacuum Rabi splitting. After a theoretical discussion, we experimentally show that few polariton excitations and also vacuum fields alone modify transport. This opens the way to vacuum-field-controlled many-body states in quantum Hall systems.

# Zusammenfassung

Die Quantenelektrodynamik sagt einen nicht-trivialen Grundzustand für eine elektromagnetische Mode voraus. Ohne Photonen (Lichtteilchen), bleibt die sogenannte Nullpunktsenergie  $\frac{1}{2}\hbar\omega$  übrig. Daraus resultieren Vakuumfluktuationen elektrischer Felder, welche wichtige physikalische Effekte hervorrufen, wie z.B. die spontane Emission, die Lamb-Verschiebung und den Casimir Effekt. Experimentell ist es jedoch weiterhin schwierig, Vakuumfeldmoden zu verändern und dabei die physikalischen Konsequenzen zu beobachten. Mit elektromagnetischen Hohlräumen lassen sich Vakuumfelder so verändern, dass ein eigenartiger Prozess abläuft: Eine elektronische Anregung von Materie kann wiederbelebt werden nachdem sie durch Photon-Emission zerfallen ist. In diesem sogenannten starken Licht-Materie-Kopplungsregime, werden die gemischten Anregungen (Polaritonen) meistens mit photonischen Anregungen untersucht. Diese Vorgehensweise verbirgt allerdings die Tatsache, dass diese Kopplung bereits durch das reine Vakuumfeld erzeugt wird - in Abwesenheit von realen Photonen.

In dieser Arbeit entwickeln wir eine experimentelle Plattform, welche es erlaubt, den elektronischen Teil des polaritonischen Grundzustandes zu untersuchen. Faszinierenderweise können wir damit auch die Vakuumfeldmode verändern und dabei die Konsequenzen auf den elektronischen Teil des Polaritons beobachten. Implementiert ist die Plattform mit einem in einem Hohlraum eingebetteten Elektronengas im ultrastarken Kopplungs-

regime, dessen Magneto-Widerstand gemessen wird. Der Magneto-Transport, welcher von den virtuellen Übergängen zu angeregten Zuständen abhängt, wird verändert, da diese Übergänge im Vorhandensein einer grossen Vakuum-Rabi-Frequenz durch die Polaritonen ersetzt werden. Nach einer theoretischen Diskussion werden das Design der Probe und des experimentellen Aufbaus behandelt. Danach zeigen wir experimentell, dass sich der Magneto-Transport durch die Präsenz von wenigen Polariton Anregungen und durch Vakuumfelder alleine bereits verändern.