



Doctoral Thesis

## Quantum magnetism with ultracold fermions in an optical lattice

**Author(s):**

Greif, Daniel Günther

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010008097> →

**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. 21243

# Quantum Magnetism with Ultracold Fermions in an Optical Lattice

A dissertation submitted to the  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

DANIEL GÜNTHER GREIF

Master of Arts,  
State University of New York at Stony Brook, USA

born 13th January 1984 in Hialeah, Florida, USA  
citizen of Germany and USA

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Tilman Esslinger, examiner  
Prof. Dr. Manfred Sgrist, co-examiner

2013

# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt Experimente mit ultrakalten, fermionischen Quantengasen in optischen Gittern zur Untersuchung von Festkörper Modellsystemen für Quantenmagnetismus und Graphen vor. Zentral für die Realisierung der niedrigen Temperaturen, die Detektion der Spin Korrelationen, sowie die Herstellung des hexagonalen Gitters von Graphen ist ein neu entwickeltes optisches Gitter mit variabler Geometrie, welches im Zuge dieser Doktorarbeit entwickelt und gebaut wurde. Dieses Gitter erlaubt ein breites Spektrum an realisierbaren Topologien, welche von dreieckigen und hexagonalen Mustern bis hin zu schachbrettartigen und dimerisierten Strukturen reichen. Zudem erlaubt der Aufbau eine dynamische Veränderung zwischen den verschiedenen Geometrien.

Die für Quantenmagnetismus notwendigen niedrigen Temperaturen werden durch ein lokales Entropieumverteilungsschema erreicht. Im Experiment wird ein repulsives, fermionisches Quantengas bestehend aus zwei Spinkomponenten des Elements  $^{40}\text{K}$  in entweder ein dimerisiertes oder anisotropes kubisches Gitter geladen. Die magnetische Ordnung zwischen den zwei Spinkomponenten wird anschliessend beobachtet. Diese wird charakterisiert durch die Messung der Spinkorrelationen auf benachbarten Gitterplätzen, welche anhand von kohärenten Singlet-Triplet Oszillationen und anschliessender Verschmelzung zweier benachbarter Gitterplätze gemessen wird. Ein Vergleich unserer experimentellen Resultate mit theoretischen Berechnungen basierend auf einer Hochtemperatur Entwicklung bis zur zweiten Ordnung ergibt eine sehr gute Übereinstimmung.

Eine weitere, alternative Detektionsmethode zur Messung von Korrelation auf benachbarten Gitterplätzen für wechselwirkenden Fermionen in optischen Gittern wird ausserdem vorgestellt. Die Messgrösse ist sensitiv sowohl auf Dichte- als auch Spinkorrelationen und misst die Wahrscheinlichkeit, zwei Teilchen mit entgegengesetztem Spin auf benachbarten Gitterplätzen zu finden. Die experimentelle Methode basiert auf periodischer Modulation der Gittertiefe, was zur Erzeugung von zusätzlichen Doppelbesetzungen führt. Für stark repulsive, fermionische Gase in isotropen, einfach kubischen Gittern wird eine starke Abhängigkeit des Messsignals von der Entropie pro Teilchen beobachtet. Die experimentellen Beobachtungen sind in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Berechnungen, welche ebenfalls auf einer Hochtemperatur Entwicklung bis zur zweiten Ordnung basieren.

In einer weiteren experimentellen Messreihe wird ein nichtwechselwirkendes fermionisches Gas in ein hexagonales Gitter geladen und die Existenz zweier Dirac Punkte in der Bandstruktur direkt beobachtet. Die Detektionsmethode basiert auf der Identifikation eines Minimums in der Bandlücke, welches durch impuls aufgelöste Interbandübergänge beobachtet wird. Die Flexibilität des Gitteraufbaus erlaubt eine Veränderung der Eigenschaften der Dirac Punkte, so zum Beispiel deren Position im Impulsraum oder die Steigung der linearen Dispersionsrelation. Des Weiteren kann die effektive Masse der Dirac Fermionen kontrolliert werden indem

---

die Inversionssymmetrie des Gitters gebrochen wird. Für einen kritischen Wert der Gitterparameter wird die Verschmelzung und Vernichtung der beiden Dirac Punkte beobachtet. Dieser topologische Übergang ist in exzellenter Übereinstimmung mit *ab initio* Bandstrukturechnungen.

# Abstract

This thesis reports on experiments with ultracold fermionic quantum gases in an optical lattice for the study of solid state model systems of quantum magnetism and graphene. The key for reaching the low-temperature regime of quantum magnetism, detecting the magnetic spin correlations and realizing the honeycomb lattice of graphene is a newly developed tunable-geometry optical lattice, which was designed and built during the course of this thesis. This lattice gives access to a broad variety of geometries ranging from triangular, honeycomb, chequerboard and dimerized lattices, and additionally allows dynamic tuning between the different structures.

The low temperatures necessary for quantum magnetism are achieved via a local entropy redistribution scheme. After loading a repulsive two-component fermionic quantum gas of  $^{40}\text{K}$  into either a dimerized cubic lattice or anisotropic simple cubic lattice, magnetic ordering on neighbouring sites is observed. The magnetic ordering is characterized by measuring spin correlations on neighbouring sites, which are obtained from coherent singlet-triplet oscillations and subsequent merging of adjacent lattice sites. When comparing our results to the predictions of a high-temperature series up to second order, we find very good agreement.

An alternative probe of nearest-neighbour correlations for fermions with interactions in an optical lattice is realized. This probe is sensitive to both density and spin correlations and measures the probability of finding two particles with opposite spins on neighbouring sites. The experimental method relies on periodic modulation of the lattice depth, which leads to the creation of additional double occupancies. Applying this method for strongly repulsive fermionic quantum gases in isotropic simple cubic lattices, a strong dependence of the doublon production rate on entropy per particle is found. The observations are in close agreement to theoretical predictions from a high-temperature series up to second order.

When changing the lattice geometry to a honeycomb lattice and loading a non-interacting fermionic gas into the lattice potential, we directly observe Dirac points in the band structure. The detection method is based on identifying a minimum band gap inside the Brillouin zone, which is observed from momentum-resolved interband transitions. The flexibility of the tunable-geometry optical lattice allows adjusting the properties of the Dirac points, for example their position in momentum space and the slope of the linear dispersion at the Dirac points. Additionally, the effective mass of the Dirac fermions can be changed by breaking the inversion symmetry. For a critical value of lattice parameters, the two Dirac points are observed to merge and annihilate each other. This topological transition is found to be in excellent agreement with *ab initio* band structure calculations.