

**LIEBE**

**UND HASSEN**

LIEBE UND HASS

# MAGNETES GEHEIMNIS

RÜDIGER KLINGELER

**Anziehung und Abstoßung gehören zu den grundlegenden Eigenschaften von Magneten. Sie sind ein Grund dafür, dass magnetische Materialien in zahlreichen technischen Anwendungen zum Einsatz kommen – von Elektromotoren über bildgebende Verfahren in der Medizin bis hin zu Datenspeichern. Physikalisch betrachtet sind Magnetismus und magnetische Ordnung rein quantenmechanische Erscheinungen. Quanteneffekte können die magnetische Ordnung aber auch verhindern. Systeme, in denen dies der Fall ist, zeigen eine Vielzahl neuer und spektakulärer Eigenschaften.**

# M

**„Magnetes Geheimnis,  
erkläre mir das!  
Kein größer Geheimnis  
als Lieb' und Haß.“**

Johann Wolfgang von Goethe

Warum zeigt eine Kompassnadel nach Norden und „erspürt“ damit die Richtung des Magnetfeldes der Erde? Bereits vor Jahrtausenden wurden Magneteisensteine als Richtungsweiser eingesetzt, und auch heute sind Ferromagnete – Materialien mit einem spontanen magnetischen Moment – die Grundlage für viele technische Anwendungen wie Elektromotoren, medizinische Verfahren zur Bildgebung oder Datenspeicher. Physikalisch ist Magnetismus ein rein quantenmechanisches Phänomen. Schon einfache Modelle verdeutlichen die kollektive Natur des Magnetismus: Ein Ferromagnet etwa lässt sich durch gleichgerichtete Vektorpfeile beschreiben; sie repräsentieren die zugrunde liegenden elektronischen magnetischen Momente, oftmals sogenannte „Spins“. Ferromagnetismus ist somit ein Ordnungsphänomen, bei dem die Richtung jedes einzelnen Spins in Bezug auf alle anderen Spins des gesamten Systems festgelegt ist (siehe Abbildung 1a auf Seite 118).

# „Woher weiß die Kompassnadel, wo Norden ist?“

Abbildung 1a:  
Ferromagnetische Ordnung



Abbildung 1b:  
Antiferromagnetische Ordnung

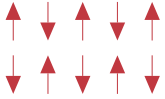
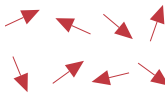


Abbildung 1c:  
Magnetische Unordnung



Das Wechselspiel zwischen einem oder mehreren konkurrierenden geordneten Zuständen und magnetischer Unordnung (siehe Abbildung 1c) ist somit ein zentraler Aspekt des Magnetismus fester Körper. Wie beim Schmelzen eines Eiskristalls, bei dem die Wassermoleküle aus einer geordneten Kristallstruktur in den ungeordneteren flüssigen Zustand übergehen, führt auch die Erwärmung eines Ferromagneten zur Zerstörung der magnetischen Ordnung. Man bezeichnet dies als durch thermische Fluktuationen getriebene Phasenübergänge. Die Temperatur, bei der die magnetische Ordnung verschwindet, hängt von der Stärke der magnetischen Wechselwirkungen ab (sowie von dem Gewinn an magnetischer Entropie im ungeordneten Zustand). Das in Magneteisensteinen vorkommende Mineral Magnetit beispielsweise besitzt eine Ordnungstemperatur von 585 Grad Celsius, das heißt die magnetische Ordnung tritt bereits weit oberhalb der Raumtemperatur auf.

## Eine Frage der Größe

In vielen praktischen Anwendungen magnetischer Materialien ist die Größe der magnetischen Strukturen ein entscheidender Aspekt. Dies wird besonders bei der magnetischen Datenspeicherung deutlich, bei der Information durch die Richtung der Spins in einem ferromagnetisch geordneten Bereich einer Festplatte gespeichert wird. Die Erhöhung der Speicherichte erfordert immer kleinere magnetische Strukturen. Was geschieht aber mit einem Magneten, wenn man dessen Größe immer weiter verkleinert - und zwar bis in den Bereich von wenigen Nanometern -, sodass der Magnet nur noch aus wenigen 100 oder 1.000 Atomen besteht? Auch hier bilden die Spins ein untereinander geordnetes Ensemble. Die thermische Energie bei Raumtemperatur ist jedoch so hoch, dass sich die Richtung des aus diesem Ensemble resultierenden magnetischen Moments fortlaufend ändert. Eine dauerhafte Speicherung von Information wird somit unmöglich, und es müssen Wege gesucht werden, um dieses „superparamagnetische“ Verhalten möglichst stark zu unterdrücken.

Für medizinische Anwendungen ist Superparamagnetismus hingegen von Vorteil. In der Magnetresonanztomographie etwa wird die Abbildung von Gewebe und Organen des menschlichen Körpers durch den Einsatz von Eisenoxid-Nanopartikeln als Kontrastmittel deutlich verbessert. Superparamagnetische Nanomagnete dienen in vielen biomedizinischen Anwendungen zudem als Sonden für äußere Magnetfelder und können durch diese berührungsfrei von außen lokalisiert, bewegt, fixiert oder sogar erhitzt werden. Der große Vorteil magnetischer Felder besteht darin, dass sie durch organische Materie kaum abgeschirmt werden und somit auch in tiefen Gewebeschichten wirksam sein können. Unsere eigenen Arbeiten in diesem Bereich erforschen die Erwärmung von Nanomaterialien in magnetischen Wechselfeldern mit dem Ziel, Krebszellen selektiv zu zerstören (magnetische Hyperthermie). Dabei werden mit Kohlenstoff umhüllte und damit geschützte Nanopartikel wie beispielsweise magnetisch gefüllte Kohlenstoffnanoröhren erforscht. Diese können aber nicht nur als magnetische Nanoheizer für die Hyperthermie, sondern auch als Transporter für Medikamente und als Sensoren auf der Ebene einzelner Zellen eingesetzt werden.

## Konkurrierende Wechselwirkungen und Quantenmagnetismus

Während bei superparamagnetischen Nanostrukturen die direkte Anwendungsperspektive eine wichtige Motivation für die Forschungsaktivitäten an dieser Materialklasse darstellt, ergeben sich Fragen zur Entstehung von komplexen magnetischen Ordnungsphänomenen und zum Einfluss von Quantenfluktuationen in magnetischen Materialien zunächst aus der Grundlagenforschung. Auch hier zeigt sich aber, dass gerade die Erforschung fundamentaler Fragestellungen direkt mit möglichen Anwendungen verknüpft sein kann, wie die folgenden Beispiele aus den Gebieten der unkonventionellen Supraleitung, des Quantenmagnetismus und der magnetischen Frustration deutlich machen.

Selbst das Magnetit in den antiken Magneteisensteinen ist ein solches Beispiel eines komplexen, auch aus grundlegender Sicht interessanten magnetischen Systems, da hier die den Ferromagnetismus kennzeichnende Tendenz zur parallelen Ausrichtung benachbarter Spins mit antiferromagnetischen Wechselwirkungen konkurriert, die eine antiparallele Ausrichtung benachbarter Spins begünstigen (siehe Abbildung 1b). Da im Allgemeinen weder die magnetischen Wechselwirkungen in verschiedenen Richtungen noch die einzelnen Momente gleich groß sein müssen, können in Festkörpern sehr komplexe Ordnungsphänomene entstehen. Von ganz besonderem Interesse sind aber Systeme, bei denen selbst bei sehr tiefen Temperaturen *keine* magnetische Ordnung auftritt. Bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt - am

Kirchhoff-Institut für Physik werden hierzu Experimente bei Temperaturen bis zu wenigen tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt durchgeführt - verhindert dann nicht die Temperatur, sondern Quanteneffekte verhindern die magnetische Ordnung.

Diese Quanteneffekte beruhen auf der in der Heisenberg'schen Unschärferelation formulierten quantenmechanischen Natur der Materie, nach der beispielsweise Ort und Impuls nicht gleichzeitig exakt messbar sind. Für die hier betrachteten magnetischen Momente gilt, dass zwischen den einzelnen Komponenten eines Spins eine Unbestimmtheit vorliegt, die auch am absoluten Temperaturnullpunkt zu zeitlichen Veränderungen führt, sogenannten Quantenfluktuationen. Das durch Quantenfluktuationen verursachte „Schmelzen“ einer (magnetischen) Ordnung unterscheidet sich damit grundlegend von einem konventionellen thermischen Phasenübergang und wird als Quantenphasenübergang bezeichnet. Quantenfluktuationen sind aber nicht nur bei tiefen Temperaturen relevant, sondern können das Verhalten von Materie auch bei Raumtemperatur entscheidend beeinflussen und besitzen damit auch eine hohe Relevanz für viele außergewöhnliche Materialeigenschaften wie zum Beispiel die Hochtemperatur-Supraleitung.

Um neue festkörperphysikalische Phänomene entdecken, verstehen und letztlich für Anwendungen nutzen zu können, müssen die entsprechenden Materialien zunächst hergestellt werden. Hierzu steht am Kirchhoff-Institut für Physik ein aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziertes Kristallzüchtungslabor zur Verfügung, in dem neue Materialien in Form hochreiner Einkristalle für die physikalische und materialwissenschaftliche Grundlagenforschung hergestellt werden. Diese Arbeiten finden in enger Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen des Heidelberger Instituts für Geowissenschaften und des Anorganisch-Chemischen Instituts statt.

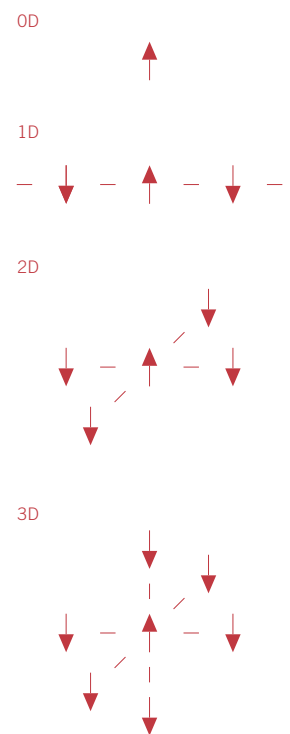
Konzeptionell fokussiert sich die Suche nach Quantenmagneten auf antiferromagnetische Materialien, da bei diesen die Bedeutung von Quantenfluktuationen besonders ausgeprägt ist. Ein weiteres, die Suche nach neuen Quantenmagneten leitendes Kriterium ist eine möglichst kleine Anzahl an magnetisch mit einem Spin wechselwirkenden Nachbarspins. In diesem Zusammenhang spricht man von der Dimensionalität der magnetischen Wechselwirkungen, die dreidimensional (3D) in allen Raumrichtungen wirken oder vorwiegend zwei- (2D), ein- (1D) oder sogar nulldimensional (0D) sein können (siehe Abbildung 2). Am Kirchhoff-Institut für Physik werden hauptsächlich null- und eindimensionale Quantenmagnete erforscht, bei denen der Einfluss von Quantenfluktuationen besonders stark ist.

# „Eine besondere Klasse magnetischer Systeme sind frustrierte Quantenmagnete.“

Quanteneffekte sind darüber hinaus für kleine Spins besonders ausgeprägt. Daher stellen gerade magnetische Systeme mit Spins der beiden kleinsten möglichen Werte  $\frac{1}{2}$  und 1 (jeweils in Einheiten des reduzierten Planck'schen Wirkungsquantums  $\hbar$ ) interessante Kandidaten für Quantenmagnete dar, wohingegen der Einfluss von Quantenfluktuationen für sehr große Spins verschwindet. Dieser Übergang von „besonders quantenmechanischen“ zu „eher klassischen“ Spins erlaubt es daher, anhand magnetischer Materialien mit verschiedener Spingröße und magnetischer Dimensionalität den Grenzbereich zwischen den beiden Beschreibungen und den Übergang von einem quantenmechanischen zu einem klassischen Bild experimentell zu untersuchen.

Beispiele für magnetisch nulldimensionale (also punktförmige) Systeme sind sogenannte Einzelmolekülmagnete, in denen kleine Cluster magnetischer Ionen in eine organische Matrix einbettet sind und magnetisch voneinander isolierte Zentren bilden. In bestimmten Fällen kann jedem dieser Zentren ein - magnetisch nahezu isolierter - Spin zugeschrieben werden. Einzelmolekülmagnete gelten damit als eine natürliche Realisierung von Datenspeichern mit extrem hoher Speicherdichte, bei denen jedes Molekül ein Bit trägt. Aktuell sind für derartige Anwendungen von Einzelmolekülmagneten aber die magnetischen Anisotropien, das heißt die Energieunterschiede zwischen verschiedenen Ausrichtungen eines Spins, bei Weitem zu klein. In den letzten Jahren stehen stattdessen mögliche Anwendungen in der Quanteninformationsverarbeitung im Vordergrund. Kristalle aus Einzelmolekülmagneten realisieren makroskopische Ensembles aus Billiarden identischer quantenmechanischer Einzelsysteme und bieten damit einen

**Abbildung 2:**  
Illustration von 0D-, 1D-, 2D- und 3D-Magneten





**PROF. DR. RÜDIGER KLINGELER** forscht und lehrt als experimenteller Festkörperphysiker seit dem Jahr 2010 am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg. Zudem ist er Sprecher der in der Exzellenzinitiative geförderten Graduiertenschule HGSFP und einer der Direktoren am Centre for Advanced Materials (CAM). Frühere wissenschaftliche Stationen waren die RWTH Aachen, das Magnetfeldlabor LNCMP Toulouse und das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden. In dieser Zeit leitete Rüdiger Klingeler unter anderem das EU-Netzwerk CARBIO zur Anwendung funktionalisierter Kohlenstoffnanostrukturen in der Tumorthherapie und wurde mit einer BMBF-Nachwuchsgruppe zu Materialien für Lithium-Ionen-Batterien ausgezeichnet. Seine weiteren Forschungsschwerpunkte sind strukturelle, elektronische und magnetische Eigenschaften korrelierter Elektronensysteme, eisenbasierte Supraleiter, molekulare Magnete und frustrierte Quantenmagnete.

Kontakt: klingeler@kip.uni-hd.de

direkten Zugang, um mit makroskopischen Methoden zum Beispiel quantenmechanische Tunnelprozesse zu untersuchen oder den Zustand eines Quantensystems kohärent zu verändern. Darüber hinaus bieten Einzelmolekülmagnete als Modellsysteme aber auch einen idealen Zugang, um grundlegende Aspekte magnetischer Wechselwirkungen und magnetischer Anisotropie bei verschiedenen Bindungsgeometrien, Bindungslängen und chemischen Umgebungen zu erforschen. Dies geschieht in Heidelberg unter anderem mithilfe der Elektronenspinresonanz-Spektroskopie, bei der Mikrowellenstrahlung mit Frequenzen zwischen 10 und 1.000 Gigahertz, also Licht mit einer Wellenlänge zwischen 0,3 und 30 Millimetern, verwendet wird.

Eindimensionale (also linienartige) Quantenspinsysteme werden in Heidelberg anhand von Übergangsmetallverbindungen erforscht. Hier stehen beispielsweise Verbindungen mit Kupfer- (mit dem Spin  $\frac{1}{2}$ ) oder Nickelionen (mit dem Spin 1) im Vordergrund, da in diesen Fällen die Materialien durch Quanteneffekte besonders stark beeinflusst werden. Diese Materialien weisen daher neuartige Quantenzustände mit ungewöhnlichen Eigenschaften auf, bei denen am Kirchhoff-Institut neben den Ordnungsphänomenen auch magnetische Anregungen experimentell untersucht werden. Wie die Schwingungen der Atome in einem Kristall, bei denen diese sich aus ihrer „perfekten“ Position im Kristall herausbewegen und damit charakteristische quantisierte „Anregungen“ bilden – die sogenannten Gitterschwingungen oder Phononen –, so charakterisieren auch magnetische Anregungen die Eigenschaften eines Magneten. Diese Anregungen sind in klassischen und Quantenmagneten fundamental verschieden und können mit theoretischen Modellen verglichen werden.

### Magnetische Frustration

Eine besondere Klasse magnetischer Systeme bilden „frustrierte“ Quantenmagnete. Geometrische Frustration entsteht immer dann, wenn es aus geometrischen Gründen unmöglich ist, die vorhandenen magnetischen Wechselwirkungen gleichzeitig zu minimieren. Ein einfaches Beispiel dafür ist das Dreiecksgitter, bei dem eine antiparallele beziehungsweise antiferromagnetische Ausrichtung aller drei Spins auf den Ecken des Dreiecks zueinander nicht realisiert werden kann. Als Kompromiss können sich die Spins im Winkel von 120 Grad zueinander anordnen (siehe Abbildung 3 auf Seite 123). Dies löst die magnetische Frustration der eigentlich favorisierten, streng antiparallelen Ausrichtung der jeweiligen Nachbarspins aber nur teilweise auf, und die Tendenz der Materialien zur Ausbildung von magnetischer Ordnung ist geschwächt. Auch magnetische Frustration steht daher in Konkurrenz zu magnetischer Ordnung und führt zu neuen physikalischen Phänomenen.

Am Kirchhoff-Institut werden neben frustrierten 1D-Magneten auch 3D-Systeme untersucht, die aufgrund

konkurrierender Effekte ebenfalls ungewöhnliche Eigenschaften zeigen. Da die verstärkte Tendenz zur magnetischen Unordnung direkt mit der magnetischen Entropie verknüpft ist, sind geometrisch frustrierte Magnete darüber hinaus vielversprechende Materialien für magnetische Kühlschränke, bei denen auf konventionelle, FCKW-basierte Kühlmittel verzichtet werden kann. Auch die magnetische Kühlung beruht auf einem Wechselspiel zwischen magnetischer Ordnung und Unordnung. Dabei werden in einem sich wiederholenden Prozess zunächst ungeordnete Spins durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet, während nach Abschalten des Magnetfeldes thermische Fluktuationen diese aufgeprägte Ordnung wieder zerstören und das Material insgesamt kälter wird.

Konkurrierende Ordnungsphänomene sind auch für unkonventionelle Supraleiter von zentraler Bedeutung. In supraleitenden Materialien kann elektrischer Strom verlustfrei transportiert werden, allerdings setzt das bei den heute bekannten Supraleitern die Abkühlung auf Temperaturen weit unterhalb der Raumtemperatur voraus. Selbst für die als Hochtemperatur-Supraleiter berühmten Kuprate werden dazu bei Normaldruck noch etwa minus 140 Grad Celsius benötigt. Die mikroskopische Theorie der Supraleitung basiert auf dem Zusammenschluss von Elektronen zu Paaren, den sogenannten Cooper-Paaren. In konventionellen Supraleitern wird die dafür notwendige Anziehung der beiden jeweils beteiligten Elektronen durch Gitterschwingungen des Kristalls vermittelt. Im Fall der Hochtemperatur-Supraleitung in Kupraten, die magnetisch

### Interdisziplinäre Materialforschung

Das Centre for Advanced Materials (CAM) wurde im Jahr 2011 als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Heidelberg gegründet. An dem materialwissenschaftlichen Forschungszentrum arbeiten Wissenschaftler der Fakultät für Physik und Astronomie, der chemischen Institute an der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften sowie des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen (IWR). Die Forscherinnen und Forscher beschäftigen sich mit einem zukunftsweisenden Feld der modernen Technik: Ziel ist es, Materialeigenschaften besser zu verstehen und neue Materialien zu entwickeln. Ein Schwerpunkt liegt derzeit auf dem Vorhaben, die herkömmliche, auf dem Halbleitermaterial Silizium basierende Elektronik durch Bauelemente und Schaltungen zu ergänzen, die auf organischen Materialien beruhen. Prof. Dr. Rüdiger Klingeler ist einer der Direktoren des CAM und arbeitet dort unter anderem an metallorganischen Materialien und Lithium-Ionen-Batterien.

[www.cam.uni-heidelberg.de](http://www.cam.uni-heidelberg.de)

LOVE AND HATE

# THE SECRET OF MAGNETS

RÜDIGER KLINGELER

Magnetic materials are crucial for a large variety of applications – some of which, like loadstone-equipped magnetic compasses, range back to ancient times, while others such as magnetic data storage, medical imaging or electrical motors are essential for modern society. But why does a material become magnetic in the first place and is thus able to sense the direction of a magnetic field, for example that of the earth?

Magnetism is in fact a purely quantum mechanical phenomenon. A key aspect, however, is its collective nature in macroscopic matter. This makes magnetic materials perfect model systems to study the evolution of complex order arising from the interaction of a nearly infinite number of particles. The interplay of order and disorder in magnets becomes particularly interesting when such order is suppressed not by thermal, but rather by quantum effects. Following basic concepts that aim at increasing the relevance of quantum fluctuations in magnetic materials, our research addresses both the synthesis of new magnetic materials and their study by means of sophisticated spectroscopic and thermodynamic techniques that are applied in high external magnetic fields and down to extremely low temperatures. As is typical for the research at the Kirchhoff Institute of Physics, our efforts aim at exploiting the potential of magnetic materials to answer fundamental questions on quantum-mechanical many-body systems. Almost inevitably, however, our research also yields results that can be translated immediately into application. Carbon-encapsulated magnetic nanostructures are one example of how fundamental research may be converted directly into biomedical applications, for example in tumour therapy.

Unconventional superconductivity, quantum magnetism, molecular magnetism, frustration, even lithium-ion batteries – these are some of the research topics that are studied experimentally at the Kirchhoff Institute of Physics and that are directly associated with unresolved questions on solid state magnetism. Today we actually do know why loadstone is magnetic, but this finding has given rise to a multitude of new questions. ●

PROF. DR RÜDIGER KLINGELER joined the teaching and research staff at Heidelberg University's Kirchhoff Institute of Physics in 2010 as an experimental condensed matter physicist. He is also the speaker of the HGSFP graduate school of the Excellence Initiative and one of the directors of the Centre for Advanced Materials (CAM). Before transferring to Heidelberg he worked at RWTH Aachen, the high magnetic field laboratory LNCMP Toulouse, France, and the Leibniz Institute for Solid State and Materials Research in Dresden. During this time, Rüdiger Klingeler also headed the EU network CARBIO, which investigates the use of multifunctional carbon nanostructures in cancer therapy, and was head of a junior research group sponsored by the German Ministry of Education and Research that studies materials for lithium-ion batteries. Prof. Klingeler's other research interests include structural, electronic and magnetic properties of correlated electron systems, iron-based superconductors, molecular magnets and frustrated quantum magnets.

Contact: [klingeler@kip.uni-hd.de](mailto:klingeler@kip.uni-hd.de)

**“Why does a material become magnetic in the first place and is thus able to sense the direction of a magnetic field?”**

einen zweidimensionalen Quantenmagneten darstellen, werden stattdessen magnetische Anregungen als ursächlich für die Bildung der Cooper-Paare vermutet.

Dieser Zusammenhang ist ein wichtiger Grund für die weltweiten intensiven Forschungsaktivitäten im Bereich des Quantenmagnetismus. Generell scheinen konkurrierende Ordnungsphänomene und Magnetismus eng mit dem Auftreten von Supraleitung verknüpft zu sein. Dies gilt auch für die Klasse der Eisen-Pniktid-Supraleiter, die seit ihrer Entdeckung im Jahr 2008 weltweit großes Aufsehen erregt haben und die am Kirchhoff-Institut für Physik ebenfalls intensiv untersucht werden. Auch in diesen Materialien treten Supraleitung und Antiferromagnetismus auf, was in Heidelberg zum Beispiel durch Messungen der thermischen Ausdehnung in Magnetfeldern und der Wärmekapazität bis zu tiefsten Temperaturen erforscht wird.

#### Lernen im Umfeld aktuellster Forschung

Die Heidelberger Graduiertenschule für Fundamentale Physik (HGSFP) wird seit 2007 durch die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder gefördert. Sie bietet ihren Doktorandinnen und Doktoranden eine exzellente und strukturierte Ausbildung in sehr unterschiedlichen Bereichen der physikalischen Grundlagenforschung. Hierzu zählen die Astronomie und die Physik des Kosmos, die Quantendynamik sowie komplexe Quantensysteme, fundamentale Wechselwirkungen und Kosmologie, die mathematische Physik und die Umweltphysik sowie die Physik von klassischen komplexen Systemen. Ziel der HGSFP ist es, eine junge Generation von Wissenschaftlern auszubilden, die in und zwischen diesen Bereichen forscht und damit zu neuen Erkenntnissen in der fundamentalen Physik beiträgt. Die Graduiertenschule ermöglicht ihren Doktoranden das Lernen im Umfeld aktuellster Forschung und hat sich damit zur zentralen Säule der Heidelberger Nachwuchsausbildung in den Fächern Physik und Astronomie entwickelt.

Aktuell arbeiten an der HGSFP etwa 350 Doktorandinnen und Doktoranden an ihren Dissertationen, 38 Prozent von ihnen kommen aus dem Ausland und knapp 27 Prozent der Promovierenden sind Frauen. Insgesamt 480 junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Graduiertenschule wurden seit Ende 2007 promoviert. Die HGSFP wird gemeinsam von der Fakultät für Physik und Astronomie, den Max-Planck-Instituten für Astronomie sowie für Kernphysik und dem Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) getragen. Ihr Sprecher ist Prof. Dr. Rüdiger Klingeler.

[www.fundamental-physics.uni-hd.de](http://www.fundamental-physics.uni-hd.de)

# „Auch in konventionellen magnetischen Materialien werden immer wieder neue Phänomene und Anwendungen entdeckt.“

Unkonventionelle Supraleitung, Quantenmagnetismus, magnetische Frustration, Nanomagnetismus, sogar Lithium-Ionen-Batterien – in all diesen in Heidelberg bearbeiteten Forschungsgebieten spielt Magnetismus eine zentrale Rolle. Besonders interessant sind dabei Systeme mit ausgeprägten Quantenfluktuationen und miteinander konkurrierenden Ordnungsphänomenen, die eine Vielzahl neuer und spektakulärer Eigenschaften zeigen. Sie bieten darüber hinaus einen experimentellen Zugang zur Beantwortung fundamentaler physikalischer Fragestellungen. Im Gegensatz dazu sind klassische magnetische Phänomene wie der Magnetismus von Eisen heute weitgehend verstanden. Aber auch in konventionellen magnetischen Materialien werden immer wieder neue Phänomene und Anwendungen entdeckt, beispielsweise in nanoskaligen Strukturen. Auch für das Magnetit der antiken Magneteisensteine sind die grundlegenden Aspekte weitgehend verstanden, viele Details sind aber weiterhin Gegenstand der internationalen Forschung: Magnetes Geheimnis bleibt spannend. ●

Abbildung 3:  
Geometrische Frustration

