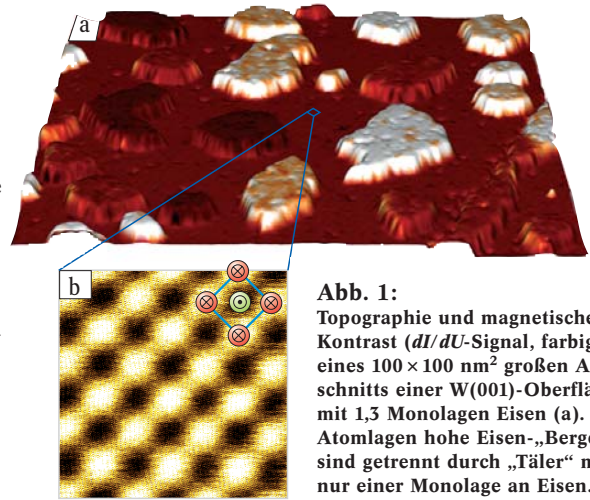


## Schizophrenes Eisen

Eisen ist zweifellos eines der wichtigsten Metalle und zudem dasjenige mit den größten Vorkommen auf der Erde. Als Hauptbestandteil von Stahl hat es eine zentrale Rolle in der technologischen Entwicklung der Menschheit gespielt. Seine außergewöhnlichen magnetischen Eigenschaften wurden bereits vor Jahrhunderten erkannt, und massives Eisen weist das prototypische Verhalten eines Ferromagneten auf (dem es seinen Namen gegeben hat). Eisen ist daher eine äußerst wichtige Komponente für die meisten Anwendungen des Magnetismus in der Elektrotechnik und der Informationstechnologie, auf die unsere moderne Gesellschaft in großem Maße angewiesen ist.

Und doch sind die magnetischen Eigenschaften von Eisen noch nicht vollständig verstanden. In der Tat ist Eisen ein „schizophrener“ Ferromagnet, da er eine ausgeprägte Tendenz zum Antiferromagnetismus, also zur antiparallelen Ausrichtung der magnetischen Momente aufweist. Dies liegt in der Natur

der (auf die Coulomb-Wechselwirkung sowie das Pauli-Prinzip zurückgehenden) Austauschwechselwirkung in metallischen Magneten, die für die magnetische Ordnung verantwortlich ist: Sie oszilliert in Vorzeichen und Stärke als Funktion des Abstands zwischen den atomaren magnetischen Momenten und verursacht damit einen Wettstreit zwischen ferromagnetischen und antiferromagnetischen Wechselwirkungen. Diese „Friedel-Oszillationen“ sind eine intrinsische Eigenschaft metallischer Magnete, da sie die Präsenz einer Fermi-Fläche voraussetzen. Mangan und Chrom, die anderen magnetischen Übergangsmetalle, die wie Eisen bcc-Kristallstruktur haben, sind Antiferromagnete. Das deutet darauf hin, dass Eisen in der Tat nahe an der Grenze zwischen Ferromagnetismus und Antiferromagnetismus liegt und dass Änderungen an seiner Kristallstruktur verwandeln können. Obwohl dies bereits vor Jahrzehnten vorgeschlagen wurde, verlief die Suche nach antiferromagnetischem Eisen bislang erfolglos.



**Abb. 1:** Topographie und magnetischer Kontrast ( $dI/dU$ -Signal, farbig) eines  $100 \times 100 \text{ nm}^2$  großen Ausschnitts einer W(001)-Oberfläche mit 1,5 Monolagen Eisen (a). Zwei Atomlagen hohe Eisen-„Berge“ sind getrennt durch „Täler“ mit nur einer Monolage an Eisen.

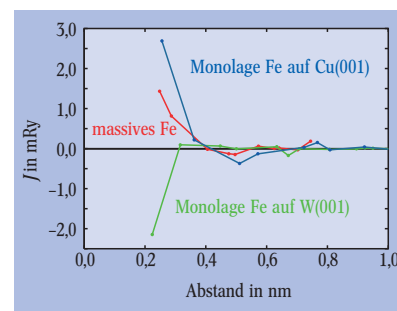
Die Berge oder Inseln sind ferromagnetisch geordnet mit einer spontanen Magnetisierung in der Ebene, deren vier äquivalente Richtungen durch die vier Farbabstufungen wiedergegeben sind. In den Tälern existiert hingegen eine antiferromagnetische Ordnung, bei der die magnetischen Momente abwechselnd aus der Ebene heraus bzw. in sie hineinzeigen (b). (adaptiert nach [1])

Dies hat sich nun geändert. Physiker aus Hamburg und Jülich haben kürzlich mithilfe der spin-polarisierten Rastertunnelmikroskopie auf spektakuläre Weise Antiferromagnetismus in einer Eisen-Monolage auf einem Wolfram-Substrat (W(001)) aufgedeckt (Abb. 1) [1].

Diese Technik beruht darauf, dass der Tunnel-Strom zwischen einer ferromagnetischen Spitze und einer magnetischen Oberfläche von der relativen Orientierung zwischen den magnetischen Momenten in Spitze und Probe abhängt (Tunnel-Magnetowiderstand). Damit lässt sich die magnetische Struktur der Oberfläche aufdecken. A. Kubetzka et al. haben auch ab-initio-Rechnungen durchgeführt, die in der Tat bestätigen, dass der erwartete Grundzustand des Systems antiferromagnetisch geordnet ist.

Um den Ursprung des Antiferromagnetismus im Fe/W(001)-System zu erhellen, haben wir ab-initio-Rechnungen der Austauschwechselwirkung durchgeführt. Abb. 2 zeigt diese Ergebnisse gemeinsam mit früheren Ergebnissen für massives Eisen [2] und Fe/Cu(001) [3]: In all diesen Fällen ist das oszillierende Verhalten der Austauschwechselwirkungen klar zu sehen. Während jedoch bei massivem Fe und Fe/Cu(001) die Wechselwirkung zwischen nächsten Nachbarn ferromagnetisch ist und sich damit eine ferromagnetische Ordnung einstellt, ist die Wechselwirkung bei Fe/W(001) überwiegend antiferromagnetisch [4], wodurch die beobachtete antiferromagnetische Ordnung entsteht.

Die Beobachtungen von Kubetzka et al. sind ein wichtiger Schritt für unser Verständnis der grundlegenden Mechanismen des Magnetismus. Sie bestätigen, dass die spin-polarisierte Rastertunnelmikroskopie und -spektroskopie extrem wertvolle Werkzeuge sind, um Magnetismus auf atomarer Skala zu



**Abb. 2:** Rechnungen zur Stärke  $J$  der Austauschwechselwirkung zeigen, dass diese für eine Fe-Monolage auf W(001) [4] bei kleinen Abständen negativ ist und die Momente daher antiferromagnetisch ordnen. Im Gegensatz dazu ist  $J$  für massives Eisen [2] oder eine Fe-Monolage auf Cu(001) [3] positiv, sodass diese Systeme ferromagnetisch ordnen. ( $1 \text{ Ry} \approx 13,6 \text{ eV}$ )

untersuchen. Man kann sich ausmalen, dass diese herausragende analytische Leistungsfähigkeit kombiniert werden könnte mit den Möglichkeiten der Atommanipulation, die das Rastertunnelmikroskop bietet, um damit beispiellose Einblicke in den Magnetismus von künstlichen Nanostrukturen zu erhalten.

PATRICK BRUNO UND  
LEONID M. SANDRATSKII

- [1] A. Kubetzka et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 087204 (2005)
- [2] M. Pajda, J. Kudrnovský, I. Turek, V. Drchal und P. Bruno, Phys. Rev. B **64**, 174402 (2001)
- [3] M. Pajda, J. Kudrnovský, I. Turek, V. Drchal und P. Bruno, Phys. Rev. Lett. **85**, 5424 (2000)
- [4] L.M. Sandratskii und P. Bruno, unveröffentlicht (2005)

Prof. Dr. Patrick Bruno, Priv.-Doz. Dr. Leonid M. Sandratskii, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Weinberg 2, 06114 Halle

## KURZGEFASST...

### ■ Unkonventionelle Supraleitung

Im Gegensatz zu den gewöhnlichen Supraleitern, die durch die BCS-Theorie beschrieben werden, sind mit den Hochtemperatur- sowie den Schwere-Fermionen-Supraleitern auf Ce- oder U-Basis zwei weitere supraleitende Materialklassen bekannt, deren Mechanismus nicht durch die BCS-Theorie beschrieben wird. Da sich die Übergangstemperaturen dieser Materialklassen um zwei Größenordnungen unterscheiden, war eine gemeinsame Erklärung für die Supraleitung bisher fraglich. Diese Temperaturlücke schließt nun die Substanz PuCoGa<sub>5</sub>, die – wie amerikanische Physiker gezeigt haben – bei einer Temperatur  $T_c = 18 \text{ K}$  supraleitend wird. Die Ergebnisse weisen auf einen magnetischen Paarungsmechanismus hin, der den betrachteten Materialien gemeinsam ist und bislang unbekannt „exotische“ Supraleiter nahelegt.

N. J. Curro et al., Nature **434**, 622 (2005)

### ■ Neue Gamma-Quellen in der Milchstraße

Am HESS-Teleskop in Namibia wurden acht neue Quellen von Gammastrahlung mit Energien jenseits von 100 MeV in der Milchstraße entdeckt und damit die Zahl der bekannten Quellen fast verdoppelt. Einige der neuen Quellen sind mehrere Lichtjahre groß und mindestens zwei sind im Radio- und Röntgenbereich dunkel. Diese Quellen können daher keine „normalen“ kosmologischen Teilchenbeschleuniger wie Pulsare oder Supernova-Überreste sein, die Gammastrahlung emittieren. Wie die Strahlung dennoch erzeugt wird, ist derzeit völlig unklar. Das HESS-Teleskop detektiert die von  $\gamma$ -Quanten in der Atmosphäre erzeugte Cherenkov-Strahlung. Betrieben wird es im Rahmen einer internationalen Kollaboration unter Leitung des MPI für Kernphysik in Heidelberg.

F. Aharonian et al., Science **307**, 1938 (2005)