

kosmischer Strahlung stammt. Für den hadronischen Ursprung der Gammastrahlung spricht, dass das beobachtete Spektrum ohne weitere Annahmen mit dem theoretisch vorhergesagten Impuls-Potenzspektrum der Protonen übereinstimmt [6]. Da die Ortsauflösung von Fermi bei 100 MeV für eine Trennung einzelner Komponenten in Quellen mit komplexer Struktur wie W44 und IC443 – die innerhalb der Stoßwelle noch zusätzliche Röntgennebel aufweisen, – nicht ausreicht, war dieses Ergebnis überraschend deutlich.

Beim Supernova-Überrest RX J1713.7-3946 hatte dagegen eine frühere Untersuchung Gegenteiliges ergeben: Hier verursacht die inverse Compton-Streuung relativistischer Elektronen die Gammastrahlung [5]. Bei Tycho, W44 und IC443 würde aber eine Erklärung der Gammastrahlung durch inverse Compton-Streuung oder Bremsstrahlung klar zu energetischen Problemen führen oder Zusatzannahmen über die Form des Elektrospektrums erforderlich machen.

Die Effizienz der Quellen bei der Beschleunigung der kosmischen Strahlung beträgt nur einige Prozent und ist somit etwas zu niedrig für die Aufrechterhaltung der beobachteten Gesamtintensität. Vielleicht gleichen andere Quellen dies aus. Da sich jedoch die meisten

der mehr als eintausend erwarteten Supernova-Überreste in komplexen Staub- und Molekülwolken befinden und die Methoden der Gammastrahlen-Astronomie sie dort räumlich nicht auflösen können, bleibt ihr kalorimetrischer Beitrag zur kosmischen Strahlung ungewiss [7].

Es stellt sich daher die Frage, ob die Protonen und Ionen auch auf andere Weise in ihren Quellen beobachtet werden können. Im Tycho-Supernovaüberrest zeigen sich energiereiche Protonen durch ihre makroskopischen Larmor-Radien in hochauflösenden Röntgenbeobachtungen des Chandra-Observatoriums [8]. Unerwartete Schützenhilfe kommt auch aus der optischen Astronomie: Die neuartige, revolutionäre Integralfeldspektroskopie²⁾ konnte zeigen, dass schnelle, suprathemische Protonen offenbar eine entscheidende Rolle beim Energietransport an der Stoßwelle des Supernovaüberrests SN 1006 spielen [9]. In Zukunft könnten hochempfindliche MeV-Gammastrahlendetektoren auch nukleare Linien nachweisen und so die kosmische Strahlung im Energiebereich von 10 bis 100 MeV erfassen [10]. Das Tscherenkow-Teleskoparray CTA und die Luftschauerarrays HAWC und HiSCORE sollen Gammaspekten bis in den 100-TeV-Bereich verfolgen, und die

Beobachtung der Milchstraße mit dem Neutrinoobservatorium KM3NeT könnte in einigen Jahren die ersten Hinweise auf Neutrinos aus den Zerfällen geladener Pionen liefern. IceCube, Auger und JEM-EUSO untersuchen den Ursprung der kosmischen Strahlung jenseits der Energien, die Supernova-Überreste erreichen können.

Die neuen Ergebnisse stellen zweifelsohne einen Meilenstein für die Klärung des Ursprungs der kosmischen Strahlung dar. Es bleiben aber noch sehr viele einzelne Aspekte unbeantwortet, für deren Untersuchung die Zusammenarbeit von klassischer Astronomie und Astroteilchenphysik ausschlaggebend sein wird.

Karl Mannheim

- [1] V. L. Ginzburg und S. I. Syrovatsky, Prog. Theor. Phys. Suppl. **20**, 1 (1961)
- [2] F. Giordano et al., Astrophys. J. **744**, L2 (2012).
- [3] M. Ackermann et al. (Fermi-LAT Collab.), Science **339**, 807 (2013)
- [4] A. Giuliani et al. (AGILE Collab.), Astrophys. J. **742**, L30 (2011)
- [5] F. Aharonian et al. (H.E.S.S. Collab.), Nature **432**, 75 (2004)
- [6] P. L. Biermann und R. Strom, Astron. Astrophys. **275**, 659 (1993)
- [7] Y. Butt, Nature **460**, 701 (2009)
- [8] K. Eriksen et al., Astrophys. J. **728**, L28 (2011)
- [9] S. Nikolic et al., ScienceExpress **10.1126/science.1228297** (2013)
- [10] A. Summa, D. Elsässer und K. Mannheim, Astron. Astrophys. **533**, 13 (2011)

²⁾ Die Integralfeldspektroskopie ist ein Beobachtungsmodus des Weitfeld-Multiobjekt-spektrographen VIMOS am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) auf dem Paranal, Chile. Die Verwendung einer Mikrolinsenplatte mit 6400 Fasern ermöglicht niedrig- bis hochauflösende Spektroskopie im Wellenlängenbereich von 360 bis 1000 nm.

Prof. Dr. Karl Mannheim, Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Würzburg, Campus Hubland Nord, Emil-Fischer-Str. 31, 97074 Würzburg

■ Verborgene Ordnung

Löst eine neue Theorie das jahrzehntealte Rätsel um den Phasenübergang im Material URu₂Si₂ ?

Festkörper zeigen ein reichhaltiges Spektrum an Ordnungsphänomenen. Dazu gehören die verschiedenen Formen von Magnetismus und Supraleitung, die Phasen mit spontan gebrochenen Symmetrien entsprechen. Diese Ordnung geht notwendigerweise mit einem thermischen Phasenübergang einher: Da im Grenzfall großer Temperatur alle Symmetrien wiederhergestellt werden, müssen thermische Fluktuationen die Ordnung zerstören. Umgekehrt ist ein kontinuierlicher Phasenübergang

üblicherweise mit spontaner Symmetriebrechung verbunden.¹⁾

Die Festkörperphysik kennt ein Arsenal von Techniken, mit denen sich Phasenübergänge einerseits und Symmetriebrechung andererseits detektieren lassen: Messungen thermodynamischer Eigenschaften wie der Wärmekapazität zeigen Anomalien an einem Phasenübergang, während in Streuexperimenten z. B. zusätzliche Bragg-Reflexe als Folge von gebrochener Translationssymmetrie sichtbar werden. Das volle Verständnis eines Ordnungsphe-

nomens erfordert im Allgemeinen beides, die symmetriebrechende Ordnung beispielsweise durch einen Ordnungsparameter zu charakterisieren und den Phasenübergang zu untersuchen.

Die metallische Verbindung URu₂Si₂ ist diesbezüglich seit langem rätselhaft [1, 2]. Sie zeigt einen kontinuierlichen Phasenübergang bei $T_0 \approx 17$ K, mit ausgeprägten Signaturen in der Wärmekapazität und im elektrischen Widerstand. Jedoch gelang es trotz intensiver Suche bisher nicht, eine symme-

¹⁾ Dies gilt nicht für Phasenübergänge erster Ordnung, wie den Flüssig-Gas-Übergang, und für topologische Phasenübergänge.

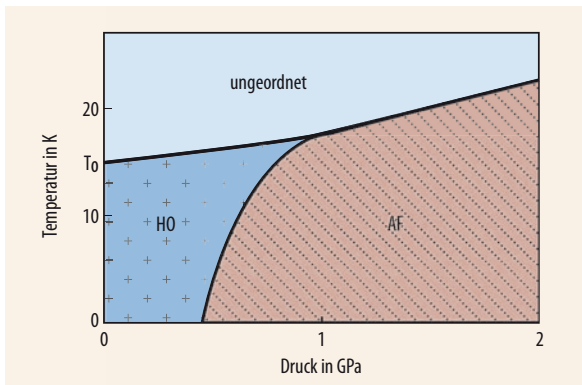


Abb. 1 Im Phasendiagramm von URu_2Si_2 treten als Funktion von Druck und Temperatur Antiferromagnetismus (AF) und verborgene Ordnung (HO) auf. Bei kleinen Drücken und Temperaturen wird das Material zusätzlich supraleitend.

triebrechende Ordnung unterhalb von T_0 zu detektieren, die die Anomalien am Phasenübergang erklären könnte. Daher wird der Tieftemperatur-Zustand in URu_2Si_2 traditionell als „verborgene Ordnung“ („hidden order“) bezeichnet. Zwei weitere Beobachtungen tragen zum Rätsel bei: (i) URu_2Si_2 wird unterhalb von 1,5 K supraleitend, d. h. Supraleitung entsteht aus dem nicht identifizierten Zustand verborgener Ordnung. (ii) Unter Druck wird die Verbindung ab ca. 0,5 GPa ein Ising-Antiferromagnet (Abb. 1), wobei Ordnungstemperatur und thermodynamische Signaturen des antiferromagnetischen Übergangs denen des Übergangs bei Normaldruck sehr ähneln. Dies

deutet auf eine Verwandtschaft von verborgener Ordnung und Antiferromagnetismus hin.

In den vergangenen 25 Jahren sind viele Vorschläge zur Erklärung der verborgenen Ordnung gemacht worden [2]. Einige davon wurden nachfolgend explizit falsifiziert; andere scheitern an neueren Experimenten: Dazu gehören eine schwache Anisotropie in der ab-Ebene des Kristalls unterhalb von T_0 sowie eine Reihe spektroskopischer Messungen, die andeuten, dass sich der elektronische Zustand in URu_2Si_2 von einem inkohärenten in ein kohärentes Metall verwandelt, wenn T unter T_0 sinkt.²⁾

Chandra und Mitarbeiter haben nun eine neue Ordnung vorgeschlagen, die sie „hastatic order“³⁾ nennen [3]. Dem Vorschlag liegt zunächst eine mikroskopische Beschreibung zugrunde, in der die 5f-Elektronen der Uran-Ionen lokalisierte Momente bilden, die wie in anderen Schwerfermion-Verbindungen durch die Kopplung an Leitungselektronen abgeschirmt werden können (Abb. 2a, b). Üblicherweise bilden sich aufgrund dieses Kondo-Effekts bei tiefen Temperaturen kohärente Quasiteilchen, die sich als Superposition von Leitungs- und f-Elektronen verstehen lassen und große effektive Massen haben (daher die Be-

zeichnung „schwere Fermionen“). In Ref. [3] gehen die Autoren allerdings von einem Szenarium des Zweikanal-Kondo-Effekts aus, bei dem ein lokales Moment an zwei gleichstarke unabhängige Kanäle von Leitungselektronen koppelt (Abb. 2c). Während in Festkörpern die Kopplung eines *Spin*-Moments an zwei Bänder normalerweise nicht zu gleichstarken Kanälen führt, können Symmetrien zu einem alternativen Pseudospin-Kondo-Effekt führen [4]: Als Folge von Spin-Bahn-Kopplung und Kristallfeldern kann ein lokalisiertes Moment durch zwei entartete Zustände des Ions gebildet werden, die nicht durch Zeitumkehr (wie im Falle eines Spin-Moments), sondern durch eine Kristallsymmetrie auseinander hervorgehen. Ein solches „Nicht-Kramers-Doublet“ repräsentiert einen nichtmagnetischen Pseudospin. Dieser kann durch Kopplung an Leitungselektronen mit dem gleichen durch Kristallsymmetrie diktierten Freiheitsgrad abgeschirmt werden. Da dies voneinander unabhängig durch Leitungselektronen mit beiden *Spin*-richtungen möglich ist (Abb. 2d), liegt eine natürliche Realisierung des Zweikanal-Kondo-Effekts vor.

Beim Zweikanal-Kondo-Effekt treten interessanterweise beide Kanäle in Konkurrenz, was zu einem

2) Ein Metall heißt kohärent, wenn seine niederenergetischen elektronischen Anregungen langlebig, d. h. schwacher Streuung unterworfen, sind.

3) „hasta“ lat. für „Speer“, bezieht sich hier auf den Spinor-Charakter der Ordnung.

KOMETEN-ALARM!

Schweifsterne haben längst ihr Image als Unheilsbringer abgelegt und gelten als eines der faszinierendsten Himmelschauspiele – sofern das Wetter und ihre Flugbahn mitspielen. Amateur- und Profiastronomen freuten sich gleichermaßen auf C/2011 L4 (PANSTARRS), der Mitte März nach seiner größten Annäherung an die Sonne auch auf der Nordhalbkugel sichtbar wurde. Aufnahmen wie diese am australischen Parkes-Radioteleskop lassen seinen Schweif erkennen, der am Himmel etwa die Länge des Vollmonddurchmessers hatte. Ihn in der Abenddämmerung zu finden bedurfte – neben Wolkenlücken – etwas Übung und einen Feldstecher mit Stativ oder ein kurz Brennweitiges Fernrohr mit entsprechend geringer Vergrößerung. Die Hoffnungen ruhen jetzt auf Komet C/2012 S1 (ISON), der Ende November mit bloßem Auge zu sehen sein könnte.



J. Sarkissian, CSIRO Parkes Observatory

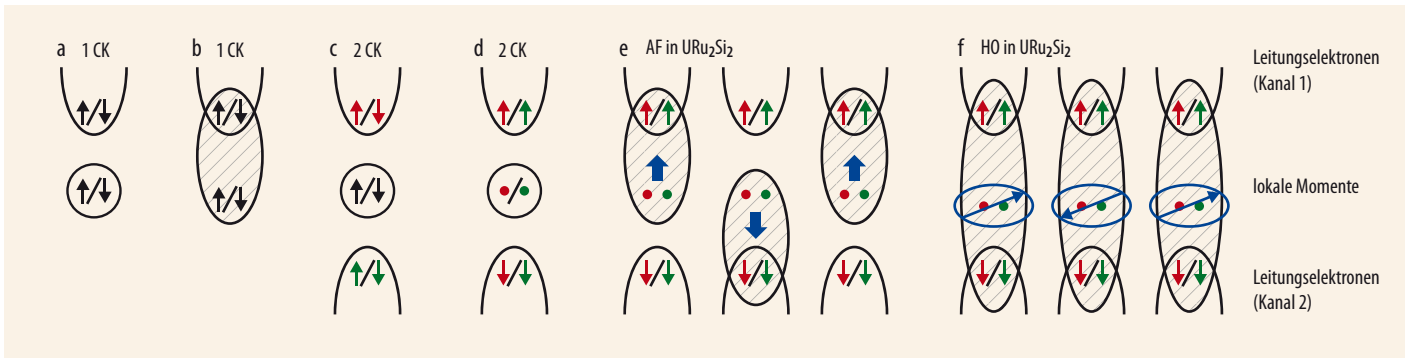


Abb. 2 Beim Einkanal-Kondo-Effekt (1CK) koppelt ein lokalisiertes Spin-Moment mit entarteten Zuständen \uparrow und \downarrow an ein Bad von Leitungselektronen, die denselben Spinfreiheitsgrad tragen (a). Bei tiefen Temperaturen bildet sich ein Kondo-Singulett (schraffiert) aus lokalem Moment und Leitungselektronen (b). Beim Zweikanal-Kondo-Effekt (2CK) koppelt der Spin an zwei Kanäle von Leitungselektronen, die sich durch einen nichtmagnetischen Freiheits-

grad unterscheiden (rot/grün in c). Eindeutige Singulett-Bildung ist nicht möglich. Liegt ein Nicht-Kramers-Doublett vor, so koppelt das lokalisierte Moment mit entarteten Zuständen rot und grün an zwei Kanäle von Leitungselektronen mit unterschiedlichem Spin (d). Gegenüber (c) haben Spin- und Kanalfreiheitsgrade die Rollen getauscht. Ist die Kanalsymmetrie für ein periodisches System aus Zweikanal-Kondo-Ionen gebrochen, beschrieben durch eine spontane

Ausrichtung des Spinor-Ordnungsparameters ψ (blaue Pfeile in d,e), so kann das lokale Moment auf jedem Gitterplatz ein Singulett mit Elektronen in einem der Abschirmkanäle bilden (e). Alternierende Ordnung führt dabei zu einem Antiferromagneten. Der Kandidat für die verborgene Ordnung entsteht hingegen, wenn sich auf jedem Gitterplatz ein Singulett in einer kohärenten Superposition der beiden Abschirmkanäle bildet (f).

fragilen Zustand mit unvollständiger Abschirmung führt [4]. Insbesondere besitzt ein solches System eine endliche Nullpunksentropie von $(k_B/2) \ln 2$ pro Moment, verbunden mit starken Quantenfluktuationen und Abweichungen von üblichem metallischen Verhalten. Instabilitäten von Zweikanal-Schwerfermion-Systemen liegen daher nahe, wurden aber erst kürzlich ausführlicher untersucht [5]. Dabei ist eine grundsätzliche Idee, dass die Symmetrie zwischen den beiden Kanälen spontan gebrochen sein kann. Eine solche Symmetriebrechung ermöglicht insbesondere die vollständige Abschirmung der lokalen Momente z. B. durch jeweils einen der beiden Kanäle und führt damit auf kohärentes metallisches Verhalten bei tiefen Temperaturen.

Eine spezifische Instabilität wird nun in Ref. [3] für URu₂Si₂ diskutiert: Unterhalb von T_0 wird, so der Vorschlag, die Symmetrie zwischen den beiden Abschirmkanälen räumlich alternierend gebrochen (Abb. 2e, f). Die Kanalsymmetrie ist hier wie in Abb. 2d die physikalische Spinsymmetrie; unterhalb von T_0 sind damit sowohl Translations- als auch Zeitumkehrsymmetrie spontan gebrochen.

Technisch gesehen ist der Ordnungsparameter ein zweikomponentiger Spinor $\psi = \begin{pmatrix} \psi_\uparrow \\ \psi_\downarrow \end{pmatrix}$, der die Hybridisierung zwischen den Momenten und ihren Abschirmka-

nälen \uparrow und \downarrow misst. Wie ein quantenmechanischer Spin 1/2 kann dieser Spinor nun in verschiedene Richtungen zeigen. Eine Ausrichtung entlang der z-Achse, $\psi \propto \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ bzw. $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, ergibt einen Zustand, wo die lokalen Momente abwechselnd von \uparrow - bzw. \downarrow -Elektronen abgeschirmt werden (Abb. 2e) – dies ist ein Ising-Antiferromagnet, wie er in URu₂Si₂ unter Druck auftritt. Der Spinor kann jedoch auch in der xy-Ebene ausgerichtet sein, $\psi \propto \begin{pmatrix} e^{-i\phi/2} \\ e^{i\phi/2} \end{pmatrix}$ bzw. $\begin{pmatrix} -e^{-i\phi/2} \\ e^{i\phi/2} \end{pmatrix}$, (Abb. 2f) – dies ist der von Chandra et al. vorgeschlagene Zustand verborgener Ordnung. Auch dies ist ein Antiferromagnet, mit Momenten in der xy-Ebene; allerdings sind diese aufgrund der Kristallfelder in URu₂Si₂ extrem klein. Eine Kopplung an Gitterfreiheitsgrade führt außerdem zu einer Anisotropie in der kristallinen ab-Ebene.

Dieses Szenarium erklärt also nicht nur, warum in URu₂Si₂ kohärentes metallisches Verhalten abrupt unterhalb von T_0 einsetzt, sondern zeigt auch die Verwandtschaft zwischen verborgener Ordnung und Antiferromagnetismus unter Druck, die durch eine effektive Drehung des Spinor-Ordnungsparameters auseinander hervorgehen. Ist die Art der vorgeschlagenen Symmetriebrechung identisch zu konventionellem Antiferromagnetismus, wo ebenfalls Zeitumkehr und Translations-

symmetrie gebrochen werden? Die theoretische Analyse beantwortet diese interessante Frage mit Nein: Die Transformationseigenschaften des Spinors ψ sind vergleichbar mit denen eines Spin 1/2, der unter *doppelter* Anwendung des Zeitumkehroperators sein Vorzeichen ändert. Die verborgene Ordnung ist also ein neues Phänomen in dem Sinne, dass die Symmetrie der doppelten Zeitumkehr gebrochen wird.

Zusammengefasst erscheint das Szenarium von Chandra und Mitarbeitern [3] konsistent mit vielen wichtigen Experimenten an URu₂Si₂ und hat damit das Potenzial, ein fast 30 Jahre altes Problem der Korrelationsphysik zu lösen. Allgemeiner betrachtet ist es ein eindrucksvolles Beispiel, wie emergente Freiheitsgrade (hier der Kanalfreiheitsgrad der Kondo-Abschirmung) zu unkonventionellen Ordnungsphänomenen führen können.

Matthias Vojta

- [1] T. T. M. Palstra et al., Phys. Rev. Lett. **55**, 2727 (1985).
- [2] J. A. Mydosh und P. M. Oppeneer, Rev. Mod. Phys. **83**, 1301 (2011).
- [3] P. Chandra, P. Coleman und R. Flint, Nature **493**, 621 (2013).
- [4] D. L. Cox und A. Zawadowski, Adv. Phys. **47**, 599 (1998).
- [5] S. Hoshino, J. Otsuki und Y. Kuramoto, Phys. Rev. Lett. **107**, 247202 (2011) und preprint arXiv:1210.7310.

Prof. Dr. Matthias Vojta, Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden