Weniger ist mehr

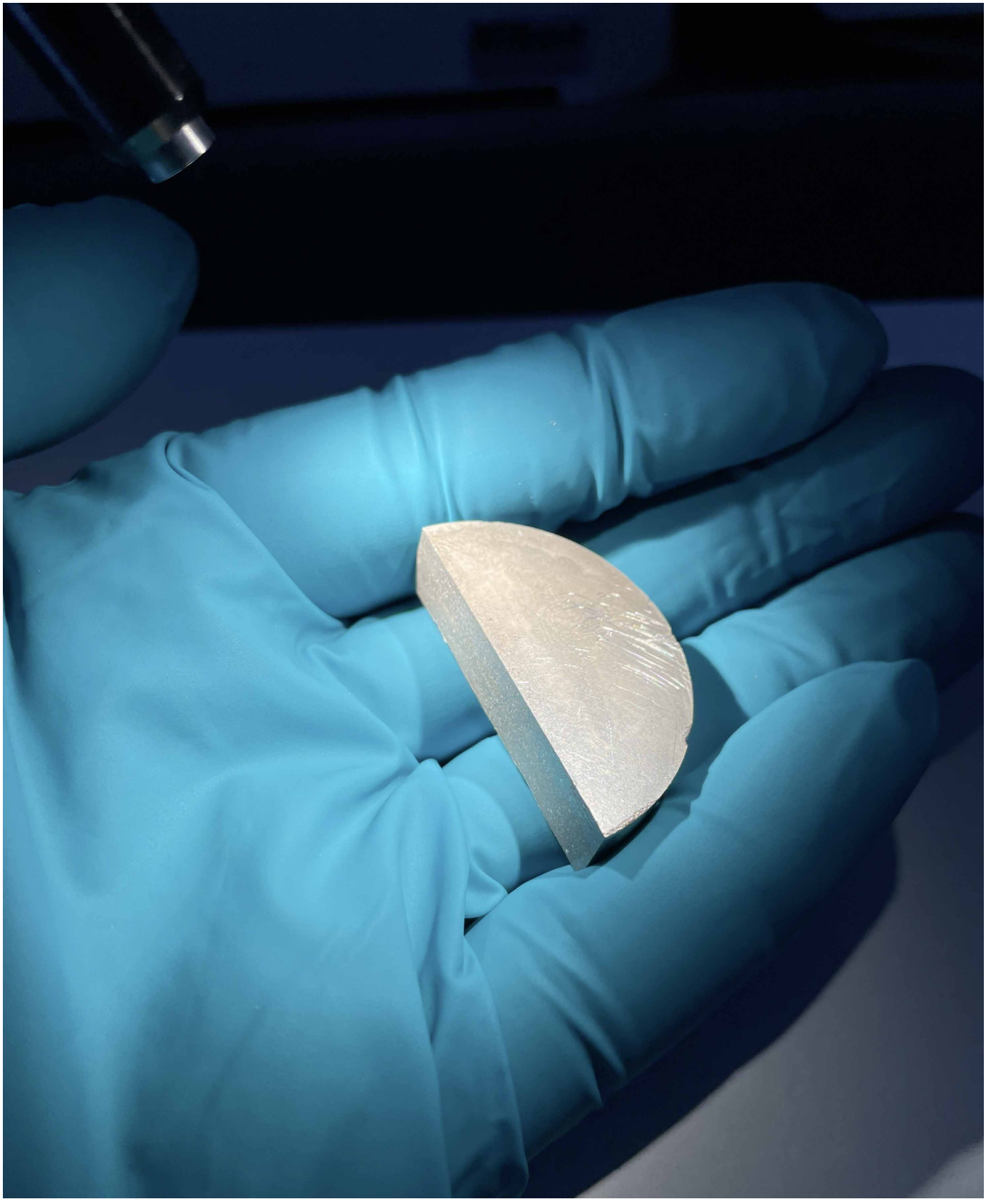


Foto: Solidcryo/Marvin Klinger

Regeln setzen unserem Verhalten Grenzen: Wir sollen nicht stehlen, nicht die Schule schwänzen und nicht bei Rot über die Ampel fahren. In der Welt der kleinsten Teilchen können Einschränkungen jedoch ganz neues Verhalten ermöglichen. Ein Transregio-Sonderforschungsbereich untersucht unter Augsburger Federführung, wie Materialien reagieren, wenn man ihnen bestimmte Freiheiten nimmt und stößt dabei auf hochinteressante Phänomene.

Marvin Klinger sitzt an der Laborbank und löffelt ein feines Pulver in eine kleine Schüssel. Er wiegt eine weitere Chemikalie ab, fügt sie hinzu, vermischt die Substanzen und füllt sie in einen Keramik-Zylinder um. Bevor der Physiker die Tür des Hochtemperatur-Ofens neben sich öffnet, legt er eine Gesichtsmaske und dicke Sicherheitshandschuhe an. Dann greift er den Behälter mit einer unterarmlangen Zange und stellt ihn in das hell glühende Innere des Ofens.

Hier werden die Zutaten nun zu einem Kristall verbacken. Dieser wird anschließend gemahlen und zu einer metallisch glänzenden Tablette gepresst. Das Endergebnis ähnelt einem schlichten runden Magneten. Doch um die Einkaufsliste am Kühlschrank zu fixieren, ist die Tablette nicht geeignet. Dafür hat sie eine andere Fähigkeit – eine Art „Superpower", die sie zu einem Hoffnungsträger eines ganzen Forschungszweiges macht: Sie kann sich selbst kühlen, und zwar äußerst schnell und effizient. Zudem kann sie sehr tiefe Temperaturen erzeugen, bis hin zu wenigen Hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt.

Die Tablette besteht aus „eingeschränkter Quantenmaterie" – einer Materialklasse, die im Fokus des Transregio-Sonderforschungsbereichs ConQuMat (von „constrained quantum matter") steht (siehe Kasten S. 29). Die neuartige Art zu kühlen ist dabei nur eines von vielen interessanten Phänomenen und Anwendungsgebieten, die die beteiligten Einrichtungen unter Federführung der Universität Augsburg seit drei Jahren erforschen.

Aus „eingeschränkter Quantenmaterie" presst Solidcryo Formkörper, die Temperaturen bis auf wenige Hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt erzeugen – ohne das knappe Helium-3.

Wenn Magnete frustriert sind

Klinger arbeitet am Institut für Experimentalphysik VI, in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Philipp Gegenwart. Dort beschäftigt man sich mit einem Phänomen, das als „magnetische Frustration" bekannt ist. Magnetismus entsteht durch eine besondere Eigenschaft der negativ geladenen Elektronen, ihren Spin. „Vereinfacht kann man sich vorstellen, dass die Elektronen um ihre eigene Achse rotieren und dadurch zu kleinen Elektromagneten werden", sagt Klinger. „Jeder davon hat einen Nord- und einen Südpol, wie eine winzige Kompassnadel."

Es gibt nun Materialien, in denen sich die magnetischen Momente benachbarter Elektronen stets antiparallel zueinander ausrichten möchten. Benachbarte Kompassnadeln wollen also in entgegengesetzte Richtungen zeigen. Doch mal angenommen, das Material ähnelt einem Badezimmer, das mit dreieckigen Fliesen ausgelegt ist. Die Kompassnadeln sitzen jeweils auf den Ecken der Fliesen. „Dann können sich zwar die Nadeln auf zwei der drei Ecken antiparallel stellen, aber die auf der dritten Ecke weiß nicht, was sie tun soll", sagt Prof. Dr. István Kézsmárki, der Sprecher von ConQuMat. „Wenn sie zur einen Nadel antiparallel ist, ist sie zur anderen parallel."

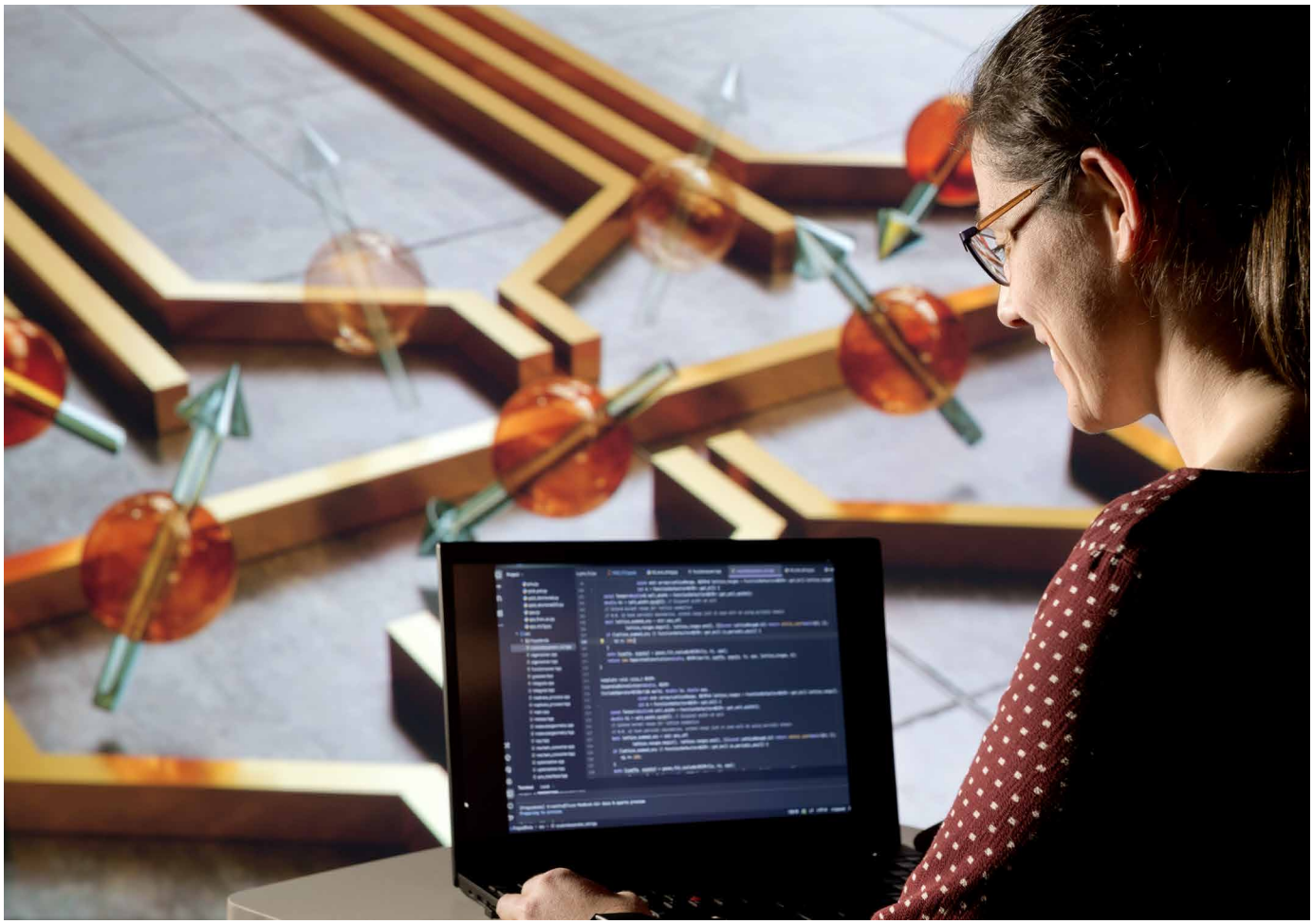


Foto: Bernd Müller

Wenn Kompassnadeln sich nicht einigen können: Die Projektion im Hintergrund veranschaulicht magnetische Momente in einem Kristallgitter, am Laptop werden solche Systeme simuliert.

Ein entsprechendes Material ist daher magnetisch „frustriert". Es enthält aufgrund seiner Geometrie eine eingebaute Beschränkung, die die perfekte Ausrichtung der Kompassnadeln verhindert. Im Transregio-SFB werden unter anderem Kristalle mit einer solchen magnetischen Frustration hergestellt und untersucht. Die neuartige Kühlmethode ist ein Resultat dieser Arbeiten.

Kühlen mit Unordnung

In normalen Materialien richten sich die Magnetnadeln umso genauer zueinander aus, je kälter es wird. Die Ordnung nimmt also immer mehr zu, bis sie am absoluten Nullpunkt perfekt ist. „In Kristallen mit frustriertem Magnetismus geht das nicht", sagt Kézsmárki. „Es gibt keine perfekte Ordnung – etwas Unordnung bleibt immer." Man kann diese Unordnung (in der Physik spricht man von Entropie) etwas verringern, indem man die Nadeln durch ein äußeres Magnetfeld in eine möglichst „energiearme" Richtung zwingt. Da die Gesamtentropie in einem System aus physikalischen Gründen niemals abnehmen kann, muss die Unordnung irgendwo hin: nämlich in die Umgebung, die sich dadurch erwärmt (je wärmer eine Substanz ist, desto größer ihre Unordnung).

Wenn man nun das Magnetfeld abschaltet, richten sich die Magnetnadeln wieder etwas „unordentlicher" aus. Dadurch wird der Umgebung Entropie entzogen, und ihre Temperatur sinkt. Das funktioniert so gut, dass an der Uni Augsburg inzwischen eine Ausgründung entstanden ist, die neuartige Kühlsysteme baut und vermarktet, die Firma Solidcryo (mehr zur Gründung im anschließenden Team-Interview mit Solidcryo, Seite 30). Der Physiker Marvin Klinger arbeitet dort inzwischen als Cheftechniker.

Von der Forschung zur Anwendung

Extreme Kälte zu erzeugen, ist bislang eine komplexe Kunst. Sie erfordert zudem sehr seltene und entsprechend teure Rohstoffe wie etwa das Gas Helium-3. Und der Abkühl-Vorgang dauert sehr lange – Tage bis hin zu Wochen. Bei der neuen Methode sind es dagegen nur wenige Minuten. Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt sind vor allem für die Erforschung quantenphysikalischer Effekte wichtig. Denn Quantenzustände sind so empfindlich, dass sie nur gut gekühlt lang genug überdauern. Daher ist das Interesse an dem neuen Verfahren groß.

Warum weniger mehr sein kann

„Quantenmaterie mit Einschränkungen ist in vielerlei Hinsicht hochinteressant", erklärt Markus



Foto: Universität Augsburg

Prof. Dr. István Kézsmárki, Sprecher des Transregio-Sonderforschungsbereichs ConQuMat.

Heyl, Professor für theoretische Physik an der Uni Augsburg. „Denn das Gesamtsystem erhält durch diese Constraints neuartige Eigenschaften – frei nach dem Motto: Weniger ist mehr." Sein Kollege István Kézsmárki benutzt ein einfaches Bild, um dieses Phänomen zu erklären: „Mal angenommen, Sie haben viele Pferde, die auf einer riesigen Weide grasen", sagt er. „Dann bilden sich irgendwann spezifische Muster – kleine Grüppchen, in denen sich eine bestimmte Anzahl von Tieren zusammenfinden. Wenn Sie die Pferde nun zusammentreiben und in eine umzäunte Koppel pferchen, bilden sich ganz andere Konstellationen, und die Tiere zeigen ein anderes Verhalten – sie sind vielleicht gestresster oder aggressiver."

Ein Kernziel des Transregios ist es, Materialien zu designen, in denen Quanteneffekte sehr robust sind. Das kann gelingen, indem man die Constraints entsprechend stark macht. In Kézsmárkis Beispiel sind sie der Zaun, der die Tiere zusammenhält. Wenn man ihn zu niedrig wählt, brechen die Pferde möglicherweise irgendwann aus und laufen davon. Wenn man ihn hoch und stark genug baut, kann man den neuen Zustand dagegen stabilisieren. „Dadurch kann man beispielsweise erreichen, dass bestimmte Quantenzustände auch noch bei höheren Temperaturen existieren – selbst bei Raumtemperatur", sagt Kézsmárki. „Das ist eine wichtige Voraussetzung, um neue Technologien auf Basis der Quantenphysik zu entwickeln."

Kristalle mit frustriertem Magnetismus könnten dafür ideale Kandidaten sein. Denn aufgrund der Beschränkungen, die ihre Struktur ihnen auferlegt, existiert in ihnen eine Fülle neuartiger quantenphysikalischer Zustände. So gibt es in normalen Materialien nur eine Möglichkeit, die Kompassnadeln so auszurichten, dass sie eine möglichst geringe Energie haben. In magnetisch frustrierten Kristallen gibt es jedoch viele gleichwertige Konfigurationen. Der Kristall befindet sich in einer Überlagerung dieser Zustände – wenn man so will: in allen von ihnen zugleich.

Da durch klug implementierte Constraints derartige Quantenzustände zudem robuster werden können, sind entsprechende Materialien auch für die Speicherung von Quanteninformationen interessant. Materialien „Made in Augsburg" könnten so einen wichtigen Beitrag zu Schlüsseltechnologien der Zukunft liefern. *fl*

Transregio-Sonderforschungsbereiche

In **Sonderforschungsbereichen (SFB)** fördert die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) besonders innovative, anspruchsvolle und langfristige Vorhaben für maximal zwölf Jahre. Alle vier Jahre wird über eine Weiterfinanzierung entschieden. SFB bestehen aus mehreren Teilprojekten. In ihnen arbeiten verschiedene Arbeitsgruppen an unterschiedlichen Aspekten eines Themas und steuern so ihre jeweilige Expertise zum Forschungsprogramm bei.

Während klassische SFB von einer einzelnen Hochschule beantragt und getragen werden, kooperieren in **Transregio-SFB (TRRs)** mehrere Hochschulen und Forschungseinrichtungen miteinander. Die Beiträge der einzelnen Partner ergänzen sich dabei. Die Zusammenarbeit ermöglicht es, komplexe Fragestellungen anzugehen, die durch eine einzelne Universität nicht erfolgreich bearbeitet werden könnten.

Der **TRR ConQuMat** wird von der Universität Augsburg koordiniert. Mit Prof. Dr. István Kézsmárki stellt sie den Sprecher des Großprojekts, das inzwischen seit drei Jahren läuft. Sein Stellvertreter ist Prof. Dr. Frank Pollmann von der TU München, die auch Mitantragstellerin des Projekts ist. Daneben sind Arbeitsgruppen der Universitäten Leipzig und Tokyo, der Max-Planck-Institute für Festkörperforschung (Stuttgart) und für Quantenoptik (Garching), des Walther-Meißner-Instituts (Garching) sowie des Heinz Maier-Leibnitz Zentrums (Garching) beteiligt. Die DFG fördert das Projekt mit zwölf Millionen Euro; rund zehn Millionen davon fließen nach Bayern.

Weitere Informationen unter:
www.trr360.de