

Temperaturmessung auf Quantenniveau

Der Spin-Freiheitsgrad eines einzelnen Atoms kann als Quantenthermometer dienen.

Maciej Lewenstein und Anna Sanpera Trigueros

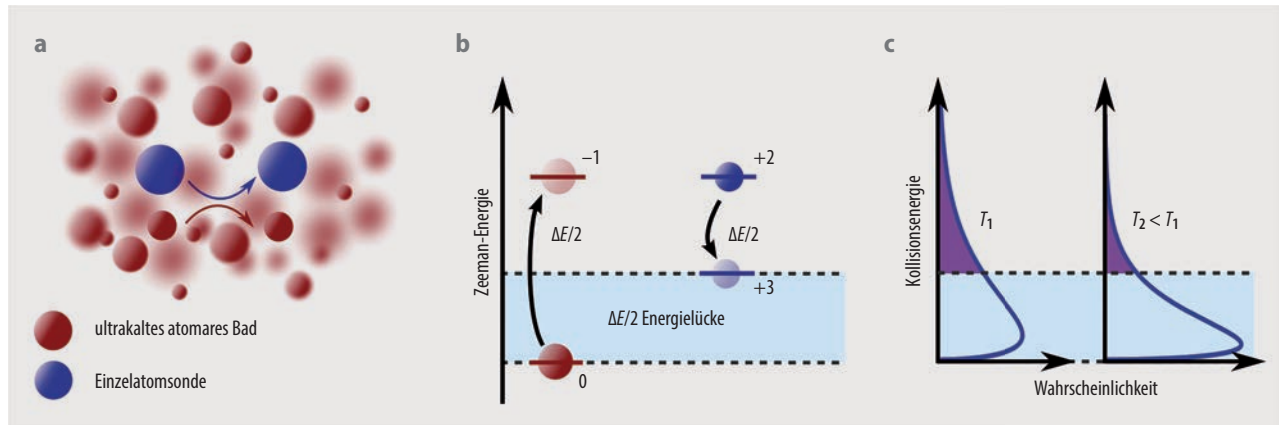


Abb. 1 Cäsium-Atome (blau, a) thermalisieren durch inelastische Kollisionen mit dem Bad des ultrakalten Rubidiums (Rb, rot). Die Cäsium-Atome wirken als einatomige Quantensonden (b) und erlauben es, die Temperatur der Rb-Wolke durch endergonisch inelastische Spin-Austausch-Kollisionen zu erschließen.

Die Thermodynamik ist eine der erfolgreichsten physikalischen Theorien. Ursprünglich für Dampfmaschinen entwickelt, insbesondere für die Umwandlung zwischen Wärme und mechanischer Arbeit, hat sie ihre Gültigkeit auch nach den Revolutionen von Relativitätstheorie und Quantenmechanik behalten. Die jüngsten experimentellen Entwicklungen zur Manipulation von Systemen auf Quantenebene haben das Interesse entfacht, Thermodynamik unter Einschließung quantenmechanischer Effekte und Korrelationen verstehen zu wollen. Dieses Verständnis könnte helfen, Technologien auf Basis klassischer Physik zu übertreffen. All dies ist Thema der Quantenthermodynamik [1].

Die Definition der Temperatur ist gewissermaßen das erste Axiom der Thermodynamik. Statistisch gesehen bestimmt die Temperatur, wie Teilchen in einem System ihre Energie verteilen müssen, damit sie dessen Unordnung maximieren und sich so ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Interessanterweise kann im thermischen Gleichgewicht die Energie eines Systems fluktuieren, wohingegen die Temperatur eine konstante Größe und damit ein Charakteristikum des Systems ist.

Die Temperatur eines Systems im thermischen Gleichgewicht lässt sich mittels Thermometrie und unter Ausnutzung des nullten Axioms der Thermodynamik bestimmen. Dieses Axiom führt den Begriff des thermischen Gleichgewichts als Äquivalenzrelation von Zuständen ein. Die Temperatur kennzeichnet dabei die verschiedenen Äquivalenzklassen. Die Transitivität der Äquivalenzbeziehung impliziert: Wenn ein Körper *A* mit einem Körper *B* im Gleichgewicht ist und *B* mit einem dritten Körper *C*, dann sind auch *A* und *C* im Gleichgewicht. Ein klassisches Thermometer ist eine makroskopische Sonde, die schnell ins thermische Gleichgewicht kommt, sobald sie in Kontakt mit einem thermischen Bad einer bestimmten Temperatur ist. Allein die Messung einer makroskopischen temperaturabhängigen Eigenschaft der Sonde liefert ein Maß für die Temperatur des Bads.

In der Quantenthermometrie studiert man Instrumente von atomarer Größe, die mit einem externen Bad wechselwirken, das entweder den Quantencharakter des Geräts, die Wechselwirkung mit dem Bad oder beides ausnutzt, um auf die thermodynamischen Eigenschaften des Bads zu schließen. Bei einem Quantenther-

момeter werden Informationen über das Bad in die internen Freiheitsgrade der Quantensonde kodiert. Dessen Empfindlichkeit lässt sich über die sogenannte Quanten-Cramer-Rao-Ungleichung bestimmen, welche die Empfindlichkeit der Quantensonde mit einer externen Parameteränderung verknüpft. Somit bestimmt der Quantencharakter der Sonde die Quantennatur des Thermometers [2].

Die Ergebnisse in der Atomthermometrie der Arbeitsgruppe von Artur Widera (TU Kaiserslautern) beruhen darauf, einen Bewegungsfreiheitsgrad eines Atoms zu verwenden, um auf die Temperatur des Bads zu schließen [3]. In den jüngsten Arbeiten ist es gelungen, die Temperatur des makroskopischen Bads in den Spin-Freiheitsgrad eines einzelnen Atoms zu kodieren [4]. Dazu haben die Forscher eine kleine Zahl von Cäsium-Atomen (Cs) mit einem Bad ultrakalter Rubidium-Atome (Rb) der Temperatur T umgeben. Die Cs-Atome können als Quantenthermometer dienen. Die elastischen Stöße zwischen Cs- und Rb-Atomen führen zur Thermalisierung der Cs-Atome. Zudem können inelastische Spin-Austausch-Kollisionen stattfinden, bei denen sich der Spin der einzelnen

Atome ändert, aber der gesamte Spin erhalten bleibt.

Der Pseudo-Spin-Freiheitsgrad von Cs und Rb ist durch die entsprechende Zeeman-Mannigfaltigkeit (F ; m_F) gegeben. Die Energie der verschiedenen Zeeman-Zustände, gekennzeichnet durch unterschiedliche m_F , hängt vom externen Magnetfeld $\Delta E = g_F \mu_B$ ab. Da der Landé-Faktor von Rb doppelt so groß ist wie der von Cs, ist bei einem gegebenen Magnetfeld auch die Zeeman-Aufspaltung doppelt so groß. Die unterschiedlichen Abstände der Zeeman-Energieniveaus sind entscheidend, um mittels der Cs-Atome die Temperatur der Rb-Wolke zu messen.

Denn einige inelastische Kollisionen (endergonisch, **Abb. 1b**) ändern die Temperatur der Rb-Wolke nur, wenn die thermische Gleichgewichtsenergie $k_B T$ größer oder gleich der Zeeman-Aufspaltung der Cs-Atome ist. Auf diese Weise hilft die Besetzung der niedrigsten Energieniveaus der Cs-Atome, um zuverlässig die Temperatur des ultrakalten Rb-Gases zu messen.

Inelastische Spin-Austausch-Kollisionen sind endergonisch, wenn sie Wärmeenergie vom thermischen Bad benötigen, oder exergonisch, wenn sie Energie an das Bad abgeben. Im Experiment der Widera-Gruppe treten endergonische inelastische Austauschprozesse auf, wenn Rb-Atome in einen höheren Energiezustand aufsteigen ($F = 1, m_F = 0 \rightarrow F = 1, m_F =$

-1), während Cs-Atome in niedrigere Energiezustände zerfallen ($F = 3, m_F = 2 \rightarrow F = 3, m_F = 3$). Die Diskrepanz $\Delta E = 2$ zwischen den Zeeman-Niveaus gilt es, durch die kinetische Wärmeenergie $k_B T = \Delta E = 2$ zu kompensieren. Nur wenn die kinetische Energie der kollidierenden Atome die Zeeman-Aufspaltung von Cs übertrifft, können solche Prozesse auftreten. Da die Zeeman-Aufspaltung zudem vom externen Magnetfeld abhängt, bietet ein solcher Prozess ein kontrollierbares Quantenthermometer.

Bei exergonischen Prozessen zerfallen die Rb-Atome in niedrigere Energiezustände ($F = 1, m_F = 0 \rightarrow F = 1, m_F = +1$) und geben dabei eine Energie von $\Delta E = 2$ an das Bad ab, während sie genügend Energie an die Cs-Atome abgeben, damit jene in höhere Energiezustände aufsteigen (z. B. $F = 3, m_F = 2 \rightarrow F = 3, m_F = 1$). Im stationären Zustand begünstigen aufeinanderfolgende Stöße zwischen einem Cs-Atom mit verschiedenen Rb-Atomen exergonische Spin-Austausch-Kollisionen, welche die Mehrheit der Cs-Atome in höhere Energiezustände ($F = 3, m_F = -3$) bringen. Der Energieüberschuss aus dem exergonischen Prozess geht auf das Bad über. Da aber die Anzahl der Cs-Atome viel kleiner als die der Rb-Atome ist, bleibt die Temperatur praktisch unverändert. Das Verhältnis zwischen endergonischen und exergonischen Prozessen gibt Auskunft über die Temperatur des Systems. Das gleiche Verhältnis lässt sich ebenso gut als

präzises Magnetometer nutzen, da die Energieaufspaltung vom äußeren Magnetfeld abhängt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass sich die stationäre Besetzung des Spin-Freiheitsgrads sehr gut für Thermometrie eignet, und dass die Temperaturmessung sich auf das Bestimmen von Quanten-Spin-Verteilungen reduziert hat. Zudem lässt sich der Informationsgewinn pro inelastischer Kollision durch Zugriff auf die Nichtgleichgewichts-Spindynamik vor Erreichen des stationären Zustands maximieren. Unter Beibehaltung des Bewegungsfreiheitsgrads liefern einzelne thermalisierte Spin-Austausch-Kollisionen Quant für Quant Informationen über das Gas. Die Empfindlichkeit dieser Nichtgleichgewichts-Quantenmessung verletzt die stationäre Cramer-Rao-Ungleichung um fast eine Größenordnung, während die Störung des Bads auf nur drei Drehimpulsquanten reduziert ist.

Diese neue Arbeit etabliert ein paradigmatisches Modellsystem für Quantenthermometrie, bei dem sich neben den quantenmechanischen auch die thermischen und dissipativen Eigenschaften auf Ebene eines einzelnen Quants kontrollieren lassen. Dieses saubere Modellsystem könnte besonders wertvoll für die experimentelle Umwandlung von Wärme und Arbeit, Quantenriebwerke, die Umwandlung von Information und Entropie und neue Formen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik an der Grenze zwischen dem klassischen Regime und Quantenregime sein [5].

Kurzgefasst

Verlustfrei leiten im Kristall

Im Kristallgitter von Magnesiumgermanid existieren laut Computersimulationen eines Forscherteams aus Jülich und Mainz dreieckige Anordnungen von Atomen, durch die kreisförmig elektrische Ströme fließen – und das verlustfrei. Senkrecht dazu wird ein topologisches orbitales magnetisches Moment (TOM) induziert, das mit anderen TOMs oder den magnetischen Momenten benachbarter Atome wechselwirken kann. Die chiralen nanoskaligen Magnetstrukturen könnten als Basis neuromorpher Computer dienen, wenn sich daraus dreidimensionale Solitonen erzeugen lassen.

S. Grytsiuk et al., Nat. Commun. **11**, 511 (2020)

Pumpen wie ein Schleimpilz

Der Schleimpilz *Physarum polycephalum* nutzt die Obertöne seiner wellenförmigen Pumpbewegung, um sich ohne zusätzlichen Energieaufwand effizient zusammenzuziehen, sobald ihn schädliches blaues Licht trifft. Diese besondere Form der Peristaltik könnte in Medizintechnik und Soft-Robotik Anwendung finden, betonen die Entdecker des Effekts vom MPI für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen. Dazu gilt es zunächst, die viskoelastischen Eigenschaften des Zellmaterials und die Steuerungsmechanismen des Pilzes besser zu verstehen.

F. Bäuerle et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 098102 (2020)

- [1] F. Binder et al. (Hrsg.), Thermodynamics in the Quantum Regime, Springer, Heidelberg (2019)
- [2] M. Mehboudi, A. Sanpera und L. Correa, J. Phys. A **52**, 30 (2019)
- [3] F. Schmidt et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 130403 (2018)
- [4] Q. Bouton et al., Phys. Rev. X **10**, 011018 (2020)
- [5] M. L. Bera, M. Lewenstein und M. N. Bera, arXiv:1911.07003

Autoren

Prof. Dr. Maciej Lewenstein, CFO-Institut de Ciencies Fotoniques, 08860 Castelldefels, Spanien und ICREA, Psg. Lluís Companys 23, 08001 Barcelona; **Prof. Dr. Anna Sanpera Trigueros**, Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spanien und ICREA