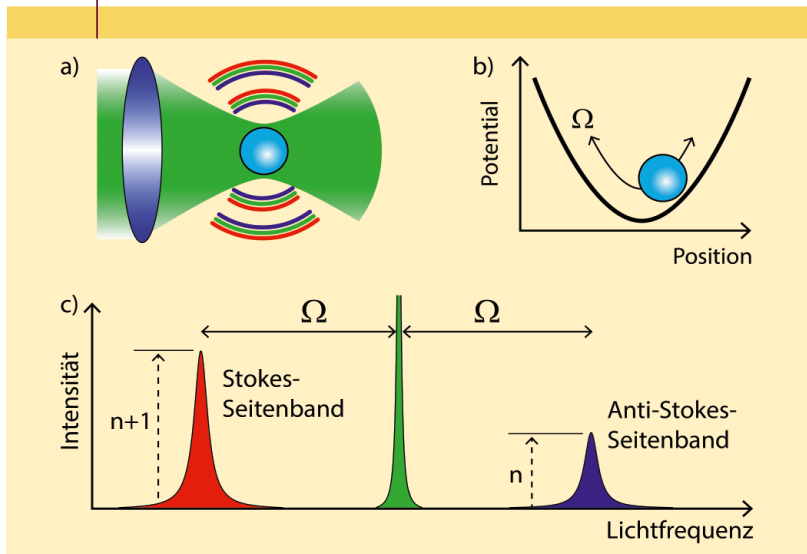


ABB. 2 | MESSAUFBAU



a) Ein fokussierter Laserstrahl (grün) hält ein Glaspartikel fest, welches das Licht streut. b) Das Partikel oszilliert um das Potentialminimum mit Frequenz Ω . c) Spektrum des gestreuten Lichts. Ein Bruchteil des Laserlichts wird in zwei Seitenbänder gestreut. Deren Frequenzen sind jeweils um die Partikelfrequenz Ω vom Laser verschoben. Der Asymmetrie ihrer Intensitäten liegen die Nullpunktsfluktuationen zugrunde.

In Zukunft möchten wir Messung und Kontrolle der Partikelbewegung so weiterentwickeln, dass es möglich wird, das Partikel in exotische Quantenzustände zu bringen. Die Beobachtung der Seitenband-Asymmetrie sowie die Kühlung der Partikelbewegung bis nahe an den absoluten Nullpunkt sind also lediglich erste Schritte, um mit Hilfe von optischen Präzisionsmessungen neue Einsichten in fundamentale Zusammenhänge der Physik zu erhalten.

Literatur

- [1] F. Tebbenjohanns et al., Phys. Rev. Lett. **2020**, *124*, 013603.
- [2] A. H. Safavi-Naeini et al., Phys. Rev. Lett. **2012**, *108*, 033602.
- [3] U. Delić et al., Science **2020**, *367*, 892.

Felix Tebbenjohanns,
Martin Frimmer, Lukas Novotny,
ETH Zürich

QUANTENPHYSIK

Ein einzelnes Atom als Quantensonde

Sensoren und Speicher werden immer kleiner, doch wo liegt die Grenze dieser Miniaturisierung? Kann ein Sensor aus nur einem Atom funktionieren, und wie kann die Quantenmechanik die Eigenschaften eines solchen Einzelatomsensors verbessern? In unserer Arbeitsgruppe an der TU Kaiserslautern haben wir Einzelatom-Quantensonden für ultrakalte Gase konstruiert und untersucht, welchen Mehrwert hier die Quantenmechanik beispielhaft für Temperaturmessungen bringt.

Zur Thermometrie bringt man üblicherweise ein Thermometer in Kontakt mit dem zu messenden System und wartet, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. An einer Skala wird eine Größe abgelesen, die der mittleren kinetischen Energie des Systems entspricht. Auf atomarer Skala kann Temperatur analog gemessen werden – durch die experimentelle Bestimmung der kinetischen Energie einzelner Atome. Das ist mittlerweile mit guter Genauigkeit durch wiederholte Messung an einem Atom möglich; die Messung ist allerdings ein rein klassischer Vorgang.

Um die Quanteneigenschaften der Atome auszunutzen zu können, muss die Information über die Temperatur in die quantisierten internen Zustände des Atoms übertragen werden. Hierzu verwenden wir Cäsiumatome (Cs). Die internen Zustände des Cäsiums sind sogenannte Quasispin-Zustände, die aus der Kopplung von verschiedenen Drehimpulsen und Spins im Atom hervorgehen. Während in einem Quantenbit der Spin genau zwei Einstellmöglichkeiten aufweist, besitzt der (Hyperfein-) Grundzustand von Cs sieben mögliche Orientierungen, sogenannte Zeeman-

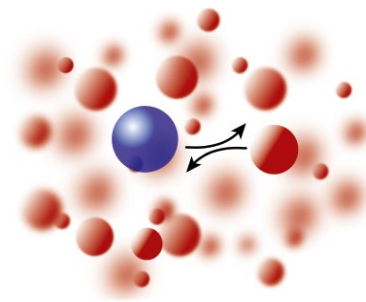
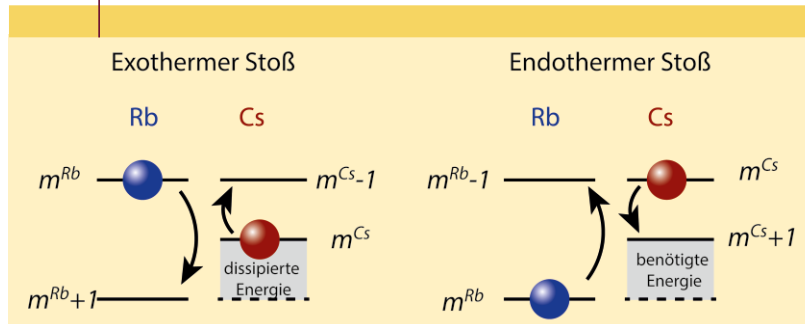


Abb. 1 Einzelnes Cäsiumatom (blau) als Quantensonde in einem Rubidiumgas (rot). Atomare Stöße übertragen Information über die Gastemperatur auf die Quantenzustände des Cs-Atoms.

Niveaus, bezeichnet mit der Quantenzahl m .

Um zu verstehen, wie die Information über die Temperatur in die Quantenzustände gelangt, muss man die experimentelle Realisierung betrachten [1]. Einzelne lasergekühlte Cs-Atome werden als Sonde in ein ultrakaltes Gas aus Rubidiumatomen (Rb) eingebracht. Dieses ist das zu messende System. Die Temperatur des Rb-Gases liegt dabei unterhalb von einem Mikrokkelvin. Hier findet thermische Bewegung so langsam statt, dass die atomaren Kollisionen zwischen Cs- und Rb-Atomen im Experiment in Mikro- und Millisekunden beobachtbar werden. Dabei gibt es zwei Arten von Stoßprozessen: Bei elastischen Stößen wird kinetische

ABB. 2 | INELASTISCHE SPINAUSTAUSCHSTÖSSE



Bei exothermen Stößen (links) wird durch die Zustandsänderung des Rb-Atoms mehr Energie frei als benötigt wird, um den Cs-Spin zu ändern. Die Differenz wird dissipiert. Bei endothermen Stößen (rechts) wird hingegen Energie aus der kinetischen Energie benötigt, damit durch einen Spinaustausch der Rb-Spin auf ein höheres Energieniveau gebracht werden kann.

Energie gemäß Energie- und Impulserhaltung ausgetauscht, das Cs-Atom thermalisiert mit dem Rb-Gas. Diese Thermalisierung wird bei der üblichen, klassischen Temperaturmessung ausgenutzt.

Jeder zehnte Stoß ist jedoch inelastisch: In einem sogenannten Spinaustauschstoß kann quantisiert Drehimpuls zwischen Rb- und Cs-Atomen ausgetauscht werden. Dieser Prozess ändert also den Wert der Quantenzahl m des Cs-Atoms um ± 1 ,

während die zugehörige Quantenzahl des Rb-Stoßpartners sich um ∓ 1 ändert. Je nach Vorzeichen ist dieser Prozess exotherm oder endotherm, es wird also entweder kinetische Energie frei oder gebunden. Dabei ist besonders die Rate der endothermen Prozesse abhängig von der Temperatur des Systems, da im Stoß thermische Energie zugeführt werden muss. Dieser Mechanismus führt dazu, dass sich die Temperatur in der Besetzung der Quasispin-Zustände niederschlägt.

Nach einigen Dutzend solcher Spinaustauschstöße stellt sich in der Cs-Sonde eine Gleichgewichtsverteilung der Spinzustände ein. Wir konnten zeigen, dass diese Besetzung eine präzise Messung der Temperatur zulässt. Ein weiteres, überraschendes Ergebnis unserer Messungen ist, dass man bereits nach drei Spinaustauschstößen – lange bevor sich ein Gleichgewicht eingestellt hat – die Temperatur bestimmen kann. Vor allem erzielen wir dabei sogar eine zehnfach höhere Empfindlichkeit als bei der Messung im Gleichgewicht.

Mit diesem neuartigen Einzelatomsensor werden wir in Zukunft offene Fragen der Quantenphysik experimentell adressieren, zum Beispiel wie ein Quantenvielteilchensystem lokal thermalisiert, wenn sich gleichzeitig Quantenkorrelationen und Verschränkung über das gesamte System erstrecken.

[1] Q. Bouton et al., Phys. Rev. X **2020**, *10*, 011018; <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.10.011018>

Daniel Mayer, Felix Schmidt, Artur Widera, TU Kaiserslautern

ASTROPHYSIK

Im Herzen des Quasars

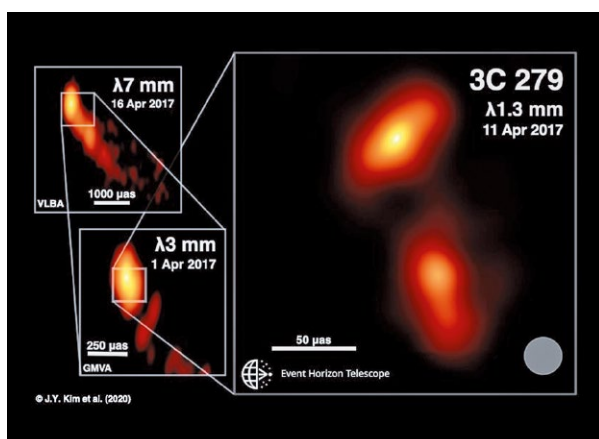


Abb. 1 Die Jetstruktur im Zentralbereich bei unterschiedlichen Wellenlängen mit jeweils höherer Winkelauflösung (J. Y. Kim (MPIfR), Boston University Blazar Program, EHT-Coll.).

Nach der spektakulären Beobachtung des Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie Messier 87 mit dem Event Horizon Telescope (Physik in unserer Zeit **2019**, 50(4), 162) hat ein internationales Astronomenteam ein weiteres Ergebnis aus der Kampagne veröffentlicht. Damals wurde auch der Quasar 3C 269 beobachtet. In seinem Zentrum befindet sich ein Schwarzes Loch mit 800 Mio. Sonnenmassen. In zwei entgegengesetzte Richtung schießen zwei Gasstrahlen (Jets) ins All.

Die neuen Aufnahmen zeigen die beiden Jets mit einer bis dahin unerreichten Auflösung von 20 Mikrobo-

gensekunden. Da 3C 270 hundert Mal weiter entfernt ist als M 87, entspricht dies im Vergleich dazu einer recht großen räumlichen Auflösung von 0,4 Lichtjahren oder 1700 Schwarzschild-Radien des Schwarzen Lochs. Eine relativistische Krümmung der Lichtstrahlen spielt deshalb auch keine Rolle.

Damit wurde es möglich, den Jet bis an die erwartete Gasscheibe heran zu verfolgen, die das Schwarze Loch umgibt. Der Jet scheint an seiner Basis verdrillt zu sein, und es werden Strukturen quer zur Jetrichtung sichtbar, die vermutlich Teile der Scheibe sind.

[1] J.-Y. Kim et al., Astron. & Astrophys. **2020**, 7.4.2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037493>
 [2] <https://t1p.de/MPIfR-EHT-3C279>

TB