

Während sich die bisherige Forschung im Wesentlichen auf kollektive schwach verstärkte Moden konzentriert hat, haben Schlickeiser und Yoon eine kinetische Theorie der spontanen Plasmafluktuationen entwickelt, die auch aperiodische Moden umfasst [7]. Damit war es möglich, die aufgrund der thermischen Fluktuationen entstehenden magnetischen Saatfelder abzuschätzen, zu denen die aperiodischen Moden potenziell besonders stark beitragen. Diese Fluktuationen bilden ein charakteristisches Grundrauschen, das die minimale Magnetfeldstärke im Plasma festlegt. Wenn zusätzlich die viskose Dämpfung aufgrund von Kollisionen berücksichtigt wird, ergibt sich eine minimale Magnetfeldstärke von etwa  $2 \times 10^{-21}$  G in den ausgedehnten Bereichen im Universum mit einer unterdurchschnittlichen Dichte (*Voids*) und

ein Wert von  $2 \times 10^{-12}$  G in den frühen Protogalaxien, die in den ersten 500 Millionen Jahren im Universum entstanden. Beide Werte sind deutlich größer als die von anderen Mechanismen vorhergesagten Saatfelder. So würde z. B. die „Biermann-Batterie“ einen Wert von nur  $10^{-20}$  G in Protogalaxien liefern.

Wie Rechnungen im Rahmen der kleinskaligen Dynamo-Theorie bereits gezeigt hatten, ist die Verstärkung dieser Saatfelder für eine Vielzahl astrophysikalischer möglicher Turbulenzszenarien sehr effizient [8]. Damit kann das Magnetfeld als Folge von Turbulenz und Schockwellen selbst in frühen Protogalaxien ähnliche Werte erreichen wie heute in der Milchstraße, wo der Wert in der Umgebung der Sonne rund  $6 \times 10^{-4}$  G beträgt. Zusammengefasst darf somit die Entstehung starker Saatfelder in ursprünglich nicht magnetisierten

Plasmen als etabliert gelten, und ihre Verstärkung ist innerhalb von rund 100 000 Jahren möglich. Die Arbeit liefert damit wertvolle Perspektiven zum Verständnis der kosmischen Entwicklung der Magnetfelder und insbesondere für die Stärke der ersten Saatfelder, welche für Dynamo-Prozesse zur Verfügung stehen.

Dominik Schleicher

- [1] E. J. Murphy, *Astrophys. J.* **706**, 482 (2009)
- [2] M. L. Bernet et al., *Nature* **454**, 302 (2008)
- [3] R. Beck et al., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **34**, 155 (1996)
- [4] A. Brandenburg und K. Subramanian, *Physics Reports* **417**, 1 (2005)
- [5] R. Schlickeiser, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 261101 (2012)
- [6] T. H. Greif et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **399**, 639 (2009)
- [7] R. Schlickeiser und P. H. Yoon, *Phys. Plasmas* **19**, 022105 (2012)
- [8] J. Schober et al., *Phys. Rev. E* **85**, 026303 (2012)

## ■ Ultrakalt und doch heißer als unendlich heiß

Erstmals gelang es, ein Quantengas mit einer negativen absoluten Temperatur herzustellen.

Am absoluten Nullpunkt befindet sich ein physikalisches Vielteilchensystem in seinem Grundzustand: Die thermische Bewegung ist hier vollständig eingefroren. Nach dem 3. Hauptsatz der Thermodynamik ist es nicht möglich, einen solchen Zustand im Labor herzustellen. Umso erstaunlicher erscheint es daher, dass es einer Gruppe Münchener Physiker um Ulrich Schneider und Immanuel Bloch in einem spektakulären Experiment gelungen ist, ein Quantengas mit einer negativen absoluten Temperatur zu realisieren [1]. Wie kann es negative Temperaturen geben?

Negative absolute Temperaturen sind keine Neuerung, sondern Bestandteil der Thermodynamik. Anschaulich lassen sie sich anhand von Spins in einem Magnetfeld erklären [2]: Nehmen wir an, dass das Magnetfeld „nach unten“ gerichtet ist, so zeigen im Grundzustand alle Spins nach unten. Pumpt man Energie in das System, klappen

einzelne Spins nach oben – die Entropie des Systems nimmt also mit steigender Energie zu (Abb. 1). Irgendwann zeigen genauso viele Spins nach oben wie nach unten, und die Entropie ist maximal. Bei noch höherer Energie nimmt die Entropie wieder ab, da die Mehrzahl der Spins nun nach oben zeigt und der Ordnungsgrad somit steigt. Schließlich sind bei maximaler Energie alle Spins nach oben ausgerichtet – die Entropie verschwindet. Negative Temperaturen treten dort auf, wo die Entropie als Funktion der Energie abnimmt,  $1/T = dS/dE < 0$ , denn Temperatur ist die inverse Ableitung der Entropie nach der Energie. In unserem Beispiel erscheinen negative Temperaturen folglich bei hohen Energien.

Negative Temperaturen sind also keinesfalls kälter als unendlich kalt – sie sind sogar heißer als unendlich heiß, denn hochenergetische Zustände sind dabei wahrscheinlicher als niederener-

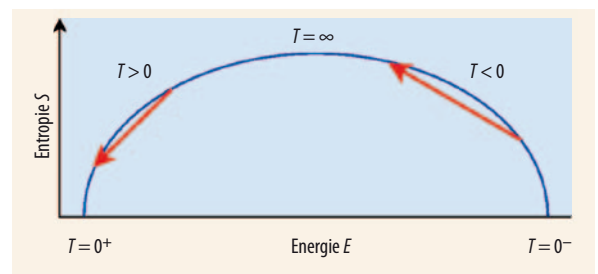
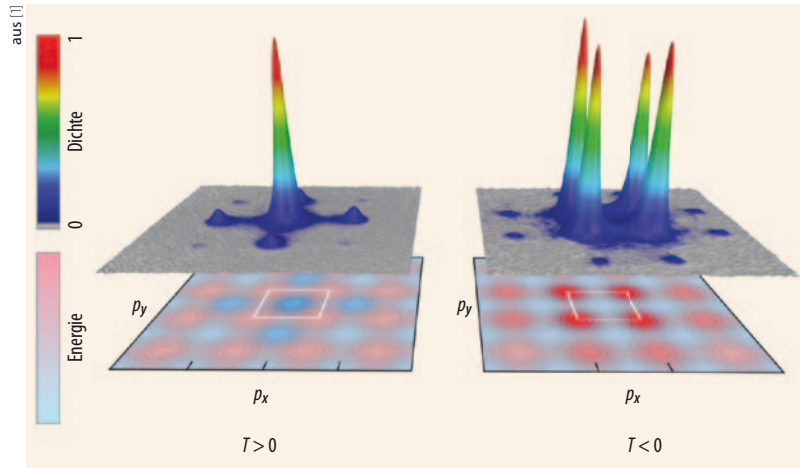


Abb. 1 In einem System mit beidseitig beschränktem Energiespektrum (z. B. einem Spin-System) ist die Steigung der Entropiekurve bei hohen Energien in der Regel negativ. Daher ergeben sich negative Temperaturen. Entzieht man dem System bei  $T > 0$  Energie, so verringert sich die Entropie, während sie bei  $T < 0$  zunimmt (durch Pfeile angedeutet) [3].

getische. Das ist auch an der thermischen Boltzmann-Verteilung  $n_B(E) \sim \exp(-E/k_B T)$  zu sehen, die für  $T < 0$  als Funktion der Energie ansteigt statt abzufallen. Fasst man diese als Wahrscheinlichkeitsverteilung von Energien auf, so muss es einen Zustand maximaler Energie geben, denn ansonsten wäre ihr Integral divergent und sie folglich nicht normierbar. Dieses Energiemaximum ist für die Existenz negativer Temperaturen essenziell.

+) vgl. www.quantum-munich.de



**Abb. 2** Oben: Die Impulsverteilung eines Bose-Gases zeigt im Experiment einen Peak bei positiver absoluter Temperatur (links) und vier bei einer negativen absoluten Temperatur (rechts). Unten: Im Intensitätsplot der Bandstruktur ist die

kinetische Energie als Funktion des zwei-dimensionalen Impulses dargestellt. Während sich bei  $T > 0$  die Impulse im Minimum der Bandstruktur häufen, häufen sie sich bei  $T < 0$  in ihrem Maximum.

Aus dem gleichen Grund muss es bei positiven Temperaturen ein Energieminimum, also einen Grundzustand, geben.

Bereits 1950 wurden negative Temperaturen in einem System aus schwach gekoppelten Kernspins nachgewiesen [4]. Das Experiment ähnelte unserem Beispiel: Anfänglich gab ein starkes Magnetfeld die Ausrichtung der Spins vor. Durch das schnelle Umschalten des Magnetfelds in die entgegengesetzte Richtung wurden die Spins in einen hochenergetischen Zustand gebracht, der zu einer negativen Temperatur relaxiert. Doch waren bislang keine Systeme aus bewegten Teilchen mit negativen Tempera-

turen bekannt, denn normalerweise ist die kinetische Energie nicht nach oben beschränkt.

Dieses Problem konnten die Münchener Physiker nun überwinden: Basierend auf theoretischen Vorschlägen von Mosk [5] sowie Rapp, Mandt und Rosch [3], gelang es ihnen, negative Temperaturen in einem ultrakalten Quantengas bewegter bosonischer Atome im Hochvakuum experimentell zu erzeugen [1, 6]. Die kinetische Energie der Atome war dabei durch ein optisches Gitter beschränkt. Eine stehende Welle aus Laserlicht zwingt die Atome aufgrund elektromagnetischer Kräfte zur periodischen Anordnung in einer Gitterstruktur

– ähnlich wie Elektronen in einem kristallinen Festkörper. Aus den gleichen quantenmechanischen Gründen bewegen sich die Atome ebenfalls in einer Bandstruktur. Das unterste Energieband ist von den oberen Bändern durch eine Bandlücke separiert – eine Energiebarriere zu höher angeregten Zuständen, die für das Quantengas unerreichbar sind. Die Vakuumkammer sorgt zudem für eine hinreichende thermische Isolierung von der Außenwelt – die Existenzbedingungen für negative Temperaturen sind also vorhanden.

Das mehrstufige Experiment startet in einem Gleichgewichtszustand mit positiver Temperatur. Ein parabolisches Fallenpotential hält die Atome in der Mitte des optischen Gitters zusammen. Das Potential variiert auf großen Längenskalen und wirkt in erster Näherung wie ein lokales chemisches Potential, das also nicht die Bandstruktur beeinträchtigt, sondern nur die lokale Füllung des Bandes. Erhöht man die Intensität des Gitterlasers, wird die Beweglichkeit der Atome im optischen Gitter stark eingeschränkt. Durch Umkehrung des Fallenpotentials wird aus einer nach oben geöffneten eine nach unten geöffnete Parabel. Mit Magnetfeldern ändert man gleichzeitig die Wechselwirkung der Atome untereinander von abstoßend zu anziehend. Beides zusammen bewirkt, dass die Gesamtenergie des Systems nur noch nach oben beschränkt ist. Wenn es einen thermischen Gleichgewichtszustand in diesem System gibt, dann folglich nur noch bei einer negativen Temperatur. Schließlich wird die Laserintensität auf den ursprünglichen Wert reduziert, sodass sich die Atome im optischen Gitter wieder bewegen können. Nach diesen Schritten befindet sich das System zunächst nicht im Gleichgewicht. Man kann sich das bildlich so vorstellen, dass sich die Atome anfänglich in einem Tal befanden und nun auf der Spitze eines Berges sind.<sup>+) Überraschenderweise kann das Gas jedoch nicht aus dem invertierten Fallenpotential „herausfallen“: Wegen der Energieerhal-</sup>

**KURZGEFASST**

■ **Proton bleibt zu klein**

Die Laserspektroskopie an myonischem Wasserstoff, bei dem das Elektron durch ein negativ geladenes Myon ersetzt ist, lieferte 2010 eine Überraschung: Der Ladungsradius des Protons fiel signifikant kleiner aus als bei Messungen an natürlichem Wasserstoff oder bei Elektron-Proton-Streuung. Das internationale Forscherteam, das diese Messungen am Schweizer Paul-Scherrer-Institut durchgeführt hat, hat nun in weiteren Experimenten erneut den elektrischen Protonenradius ermittelt. Der Wert 0,84087(39) fm bestätigt den 2010 veröffentlichten Wert 0,84184 fm, ist jedoch 1,7-mal genauer. Außerdem gelang es erstmals, auch den magne-

tischen Radius des Protons im myonischem Wasserstoff zu bestimmen.<sup>+) A. Antognini et al., Science 339, 417 (2013)</sup>

■ **Laserkühlung eines Halbleiters**

Physikern aus Singapur ist es erstmals gelungen, einen Halbleiter mithilfe von Laserlicht abzukühlen, und zwar um bis zu 40 K. Dazu verwendeten sie „Nanostreifen“ aus Cadmiumsulfid auf einem Siliziumsubstrat. Fällt grünes Laserlicht auf die Probe, werden Exzitonen angeregt, das sind gebundene Elektron-Loch-Zustände. Bei deren Zerfall kommt es zur Absorption von Gitterschwingungen (longitudinal optischen Phononen), wodurch sich der Halbleiter abkühlt. Jun Zhang et al., Nature 493, 504 (2013)

+) vgl. A. Antognini und R. Pohl, Physik Journal, August/September 2012, S. 47

tung müsste sich dabei potentielle in kinetische Energie umwandeln. Da letztere aber durch das optische Gitter beschränkt ist, bleibt das Gas gefangen und relaxiert stattdessen zu einer negativen Temperatur [1, 3].

Bosonische Quantengase bilden bei tiefen Temperaturen ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC): Ein makroskopischer Anteil der Atome besetzt dabei in der Bandstruktur den Impuls Null, also den Grundzustand. Braun et. al. konnten zeigen, dass ihr Quantengas dominant den Zustand des Energiemaximums der Bandstruktur besetzt – in der Impulsverteilung zeigten sich vier symmetrische Peaks bei endlichen Impulsen (Abb. 2). Dies unterstreicht eindrucksvoll, dass negative Temperaturen nahe der negativen Phasenübergangstemperatur zum BEC realisiert werden konnten.

Negative Temperaturen können zu Effekten führen, die der Intuition widersprechen. Dem Gravitationsfeld ausgesetzt, würde ein atomares Gas mit einer negativen Temperatur im optischen Gitter

beispielsweise aufwärts steigen anstatt herunterzufallen [7]. Auch für eine Carnot-Maschine ergeben sich überraschende Konsequenzen [3, 8]: Operiert diese nämlich zwischen zwei Reservoirs mit einer positiven Temperatur  $T_{\text{kalt}} > 0$  und einer negativen Temperatur  $T_{\text{heiß}} < 0$ , so überführt sie Entropie vom kälteren ins heißere Reservoir und kann dabei aus beiden Reservoirs Energie entziehen. Dies illustrieren die roten Pfeile in Abb. 1. Die Maschine kann also nicht nur die Energie des heißeren Reservoirs vollständig nutzen: Anstatt einen Anteil von Restwärme an das kältere Bad abzugeben, entzieht sie dem kälteren Bad zusätzlich Energie. Formal ergeben sich folglich Wirkungsgrade größer als eins:  $\eta = 1 - (T_{\text{kalt}} / T_{\text{heiß}}) > 1$ . Das ist jedoch kein Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik, sondern ein definitorisches Problem des Wirkungsgrads [9].

Was bringen uns Experimente mit negativen Temperaturen? Für das Feld der ultrakalten Quanten-

gase bieten sie die Perspektive, neue quantenmechanische Phasen zu realisieren [10]. Hinsichtlich technischer Verwertbarkeit bleiben sie vielleicht „lediglich eine philosophische Kuriosität“, wie Freeman Dyson 1954 schrieb [2]. Eine weitere solche Kuriosität wäre die Realisierung einer Carnot-Maschine mit kalten Atomen, die zwischen positiven und negativen Temperaturen operiert [7] und dabei mechanische Arbeit verrichtet.

**Stephan Mandt**

**Dr. Stephan Mandt**,  
Princeton Center for  
Complex Materials,  
329 Jadwin Hall,  
Princeton University,  
Princeton, NJ 08544,  
USA

- [1] S. Braun et al., *Science* **339**, 52 (2013)
- [2] F. Dyson, *Scientific American* **191**, 58 (1954)
- [3] A. Rapp, S. Mandt und A. Rosch, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 220405 (2010)
- [4] E. M. Purcell und R. V. Pound, *Phys. Rev.* **81**, 279 (1951)
- [5] A. P. Mosk, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 040403 (2005)
- [6] L. D. Carr, *Science* **339**, 42 (2013)
- [7] S. Mandt, A. Rapp und A. Rosch, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 250602 (2011)
- [8] N. Ramsey, *Physical Review* **103**, 20 (1956)
- [9] P. T. Landsberg, *J. Phys A: Math. Gen.* **10**, 1773 (1977)
- [10] A. Rapp, *Phys. Rev. A* **85**, 043612 (2012)