



Die kältesten Orte des Universums

Es scheint keine gute Zeit für Entdecker zu sein. Männer in Uniformen, mit Tropenhelm auf dem Kopf, die sich im Dienst der Wissenschaft durch den malariaverseuchten Urwald kämpfen oder durch Eiswüsten, auf der Suche nach den letzten weißen Flecken auf der Landkarte – das ist lang vorbei. Selbst die letzte Mondlandung liegt Jahrzehnte zurück, es gibt keine weißen Flecken mehr, die Reise zum Pol, auf den Everest oder ins All bucht man heute im Reisebüro. Auch die Entdecker scheinen verschwunden zu sein – eine ausgestorbene Art? Mitnichten!

Text: Reinhard Kleindl

Rudi Grimm macht sich auf den Weg zur Arbeit. Wir befinden uns in Innsbruck, im Westen der Stadt, in der Nähe des Flughafens. Grimm betritt einen großen Gebäudekomplex und steigt in den Keller hinab, öffnet eine Tür, auf der ein großes Warnschild angebracht ist – hier sind Laser im Einsatz. Zwei junge Physiker, Kollegin und Kollege, begrüßen ihn. Im Raum stehen große Tische, was sich auf ihnen befindet, sieht man nicht, es ist verborgen hinter schwarzen Vorhängen, die an der Decke befestigt sind. Nichts deutet darauf hin, dass heute etwas Besonderes geplant ist.

Grimm sieht nicht aus wie ein Entdecker. Er schwitzt nicht, friert nicht, sondern strahlt die Gelassenheit von jemandem aus, der gern zur Arbeit geht. Der weiße Fleck, den er sich ansehen will, liegt nicht in fernen unwirtlichen Gegenden, sondern direkt vor ihm, hinter dem Vorhang, in einer Vakuumkammer von der Größe eines Fußballs. Im Inneren ist es sehr kalt. Extrem kalt, um genau zu sein.

Alles in diesem Raum, einem Labor im Institutsgebäude für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Akademie der Wissenschaften (ÖAW), ist auf diese gläserne Kugel konzentriert: Unterschiedlichste Laser, Kameras, Messgeräte. Darin befindet sich eine winzige Menge eines sehr dünnen Gases aus Caesium-Atomen, eine rot leuchtende Wolke, so groß wie ein Fingernagel. Grimms Ziel ist es, das Gas extrem abzukühlen, bis es sich in etwas völlig Neuartiges verwandelt, einen Zustand, der in freier Natur nicht vorkommt, weil es dort

nicht kalt genug ist: Der aktuelle Kälterekord auf der Erdoberfläche liegt bei minus 93 Grad Celsius, das Vakuum des Weltraums hat eine durchschnittliche Temperatur von etwa minus 270,4 Grad, 2,75 Grad über dem absoluten Nullpunkt. Wenn die Forscher fertig sind, wird das Gas nur noch eine Temperatur von wenigen Nano-Grad über dem absoluten Nullpunkt haben, immer noch geringfügig über dem Weltrekord für die tiefste jemals erreichte Temperatur, der bei einem zehntel Nano-Grad liegt.

Diese astronomisch kleinen Zahlenwerte lösen bei den Physikern nur Schulterzucken aus, ebenso wie der Rekord. Grimm und seine Leute haben mehrere eigene Rekorde in petto. Sie sind vielmehr gebannt vom Verhalten des kalten Gases, das sich plötzlich verändert, wie die Bildschirme an der Wand belegen. Die Wolke beginnt sich bei Erreichen der Endtemperatur plötzlich zusammenzuziehen, ein Effekt, der mit der „alten“ Physik nicht erklärt werden kann.

Wärme ist nichts anderes als ungeordnete Bewegung der kleinsten Materiebausteine. Wie stark diese Bewegung ist, darüber gibt die Messgröße „Temperatur“ Aufschluss. Bewegung kann aber verlangsamt werden – oder sogar gestoppt. Deshalb hat die Temperaturskala eine untere Grenze: Bei minus 273,15 Grad Celsius (0 Kelvin) hört jede Bewegung auf. Ein theoretischer Zustand, der sich nie erreichen lässt, dem man aber sehr nahekommen kann. Überraschend nahe.

Wozu diese Rekordtemperaturen, wenn es nicht um Rekorde geht? Weil Grimm

und seine Kollegen nach neuer Physik suchen, und die ist paradoxerweise in den superkalten Gasen der Labors leichter zu studieren als in den Weiten des Alls, wo es für die Effekte, für die sich Grimm interessiert, viel zu „heiß“ ist.

Einer dieser Effekte heißt „Bose-Einstein-Kondensation“, kurz BEC. Man kann ihn sich als neuen Aggregatzustand vorstellen, der von zwei Forschern vor fast hundert Jahren theoretisch vorhergesagt wurde.

Satyendranath Bose war ein junger indischer Mathematiker, der sich in den frühen 1920er-Jahren, fernab von Kopenhagen oder anderen Zentren der neuen Physik, mit der Quantentheorie auseinandersetzte. Er verfolgte eine Idee, die ihm vielversprechend erschien. Weil er es genau wissen wollte, schickte er eine Kopie seiner Arbeit nach Europa an jemanden, der ihren Wert bestimmt beurteilen konnte: Albert Einstein. Dieser antwortete tatsächlich, und die beiden publizierten ihr Konzept der „Bose-Einstein-Statistik“, die das quantenmechanische Verhalten von Vielteilchen-Systemen erklärt. (Genauer gesagt, das Verhalten von „Bosonen“, zu denen etwa die Photonen gehören; Materieteilchen wie etwa Elektronen sind „Fermionen“ und funktionieren anders.) Eine Konsequenz der Arbeit von Bose und Einstein war, dass die Teilchen bei sehr niedrigen Temperaturen auf völlig neuartige Weise „kondensieren“ müssten. Sie wären dann im gleichen Zustand, nicht mehr unterscheidbar. Erst 1995 gelang es Eric Cornell, Carl Wiemann und einer Gruppe um Wolfgang Ketterle, das sonderba-

BOSE-EINSTEIN-KONDENSAT

Darunter versteht man einen sonderbaren Aggregatzustand der Materie nahe am absoluten Nullpunkt: Die Atome sind nicht mehr unterscheidbar, alle befinden sich im selben quantenmechanischen Zustand. Das äußert sich unter anderem in Suprafluidität oder in Supraleitung.



ALBERT EINSTEIN

Der zweifache Nobelpreisträger sagte 1924 gemeinsam mit dem indischen Physiker Satyendranath Bose voraus, dass es bei extrem tiefen Temperaturen einen quantenmechanischen, aber dennoch makroskopischen Materiezustand geben müsste. Das konnte erst im Jahr 1995 erstmals im Labor beobachtet werden.

RUDOLF GRIMM

Vor seiner wissenschaftlichen Karriere war der Experimentalphysiker Gitarrist der Neue-Deutsche-Welle-Band „Bärchen und die Milchbubis“. Er studierte in Hannover, nach Forschungsaufenthalten in Zürich und Troizk bei Moskau forschte er in Heidelberg. 2000 wurde er an die Uni Innsbruck berufen, seit 2003 ist er wissenschaftlicher Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW).



RICHARD FEYNMAN

Von dem Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman stammt der denkwürdige Satz: „Sie verstehen es nicht? Das ist in Ordnung, weil ich es auch nicht verstehe. Niemand versteht es.“

re Kondensat zum ersten Mal herzustellen, wofür den dreien schon 2001, also ungewöhnlich schnell, der Nobelpreis verliehen wurde.

Wie kommt man dazu, sich mit so exotischen Materiezuständen zu beschäftigen? „Bei mir begann es mit dem Interesse für Laser“, erzählt Grimm. „Als Physiker habe ich begonnen, Laser auf Wolken von Teilchen anzuwenden. Als dann die ersten BECs kamen, war es logisch, in diese Richtung weiterzugehen. Und ein BEC hat lustigerweise selbst Ähnlichkeiten mit dem Konzept des Lasers, nur dass es sich hier um Atome handelt und nicht um Licht. Das war mir damals natürlich nicht bewusst.“

Ähnlichkeiten, die nicht ganz offensichtlich sind und sich nur in der theoretischen Beschreibung zeigen, die leider nach wie vor für Fachfremde schwer zugänglich ist. Das, obwohl Quantenmechanik inzwischen in jedem unserer Computer, in den Festplatten, in allen Handys, überhaupt in jedem Siliziumchip eine Rolle spielt. Dennoch haben wir immer noch Schwierigkeiten, zu verstehen, was auf der Ebene der Atome wirklich passiert. „Wir“, das sind nicht etwa durchschnittliche Leser dieses Magazins, sondern auch die Forscher selbst. Die Quantentheorie entstand Anfang des 20. Jahrhunderts, ist also bald hundert Jahre alt. Damals trug man Filzhüte und rechnete mit Bleistift und Papier; technische Innovationen wie Autos gab es erst seit wenigen Jahren. Ein paar Jahre zuvor war die Idee, dass es Atome gibt, noch heftig umstritten. Ernst Mach etwa, nach dem die Einheit

für die Schallgeschwindigkeit benannt ist, war ein Gegner der Atomhypothese. Dann ging alles sehr schnell: Noch in den 1920ern war die Quantentheorie fertiggestellt, nachdem ein dreiundzwanzigjähriger sommersprossiger Physiker namens Werner Heisenberg den richtigen Ansatz gefunden hatte. Er täuschte vor, krank zu sein, und zog sich zurück, um allein darüber zu brüten, weil er ahnte, dass er der Lösung nahe war.

Und heute? Immer noch wird unter Physikern diskutiert, wie die „neuen“ Theorien zu interpretieren sind. In Fachmagazinen wie „Nature“ erscheint immer noch alle paar Jahre ein Artikel dazu. Schlaue Bücher, die alles „ganz einfach“ erklären, gibt es auch stapelweise, dabei hat schon in den 1980ern kein Geringerer als Nobelpreisträger Richard Feynman bei einem Vortrag die ungemütliche Wahrheit ausgesprochen: „Sie verstehen es nicht? Das ist in Ordnung, weil ich es auch nicht verstehe. Niemand versteht es.“

Während viele Physiker jahrzehntelang damit kämpften, den Schock darüber zu verdauen – Albert Einstein ist nur das populärste Beispiel, seine Einwände sind Legende –, begannen andere, die neu gefundenen Regeln auszutesen. Dabei zeigte sich, dass auch in unserer direkten Umgebung, von der wir eigentlich alles zu wissen glaubten, viele Dinge ein wenig anders laufen als bisher gedacht.

Rudi Grimm hat in der Vakuumkammer den Beweis dafür. Er beobachtet zufrieden die Anzeigen seiner Instrumente, die das Zusammenziehen der Wolke dokumentieren. Der Prozess ist hier in Innsbruck tatsächlich

Routine: BECs aus Caesiumatomen stellt man hier seit 2002 her, übrigens weltweit zum ersten Mal, ebenso wie kurz darauf aus Strontiumatomen. Erst vorletztes Jahr gelang es Francesca Ferlaino aus Grimms Gruppe, das seltene Element Erbium zu kondensieren, das wegen seiner magnetischen Eigenschaften interessant ist – auch das hatte zuvor niemand geschafft. Insgesamt gibt es nur 13 Elemente, mit denen BECs erzeugt wurden, drei davon zum ersten Mal in Grimms Labor; falls es noch einen Beweis gebraucht hätte, dass hier absolute Weltklasse-Forschung betrieben wird.

Provokante Frage an einen Weltklasse-Forscher: Nobelpreisträger Feynman gab zu, die Quantenphysik nicht zu verstehen. Verstehen Sie es, Herr Grimm? „Was heißt verstehen eigentlich genau?“, fragt Grimm schmunzelnd zurück. „Ich bin Experimentator. Für mich ist interessant, ob ich Testexperimente anstellen kann, um offene Fragen zu klären. Was ich nicht experimentell beantworten kann, ist für mich irrelevant.“ Um dann doch philosophisch zu werden: „Ich kenne die Werkzeuge der Quantentheorie, kann das Ganze anwenden. Dass es quantenmechanische Überlagerungszustände gibt, Unschärfe, das hat man so verinnerlicht, da habe ich selbst das Gefühl, das habe ich verstanden. Bei Verschränkung, da hört es irgendwie auf, da habe ich selbst das Gefühl, das würde ich vielleicht nicht mehr Verständnis nennen. Aber bei allem, wo man das Gefühl hat, es ist nicht ganz verstanden, liegt zugleich großes Potenzial für Entdeckungen.“



AUFWENDIGE EXPERIMENTE

Versuche sind in der Quantenphysik sehr aufwendig, weil man in extreme Bereiche vordringt und meist mit einzelnen oder ganz wenigen Elementarteilchen hantiert. Auf schwingungsge-dämpften Tischen werden dazu unzählige Laser, Spiegel, Vakuumkammern und Messgeräte installiert – der Aufbau für ein Experiment kann schon einmal ein ganzes Jahr dauern.



Ihr Schoko-Tag bei

z o t t e r

Schoko-Laden-Theater & Essbarer Tiergarten

Schoko naschen & Natur genießen
Das Ausflugsziel für Groß und Klein

Laut internationalem Schokoladentest
zählt Zotter
zu den besten Chocolatiers der Welt.

Besuchen Sie Zotter und erleben Sie, wie Schokolade entsteht. Über 160 unterschiedliche Schoko-Kostproben warten auf Sie. Im Essbaren Tiergarten können Sie entspannen und in einem der ungewöhnlichsten Restaurants Österreichs speisen. Die Öko-Essbar bietet Ihnen Speisen direkt von den eigenen Weiden und Gärten inmitten der Natur!

z o t t e r Schokoladen Manufaktur
Bergl 56, 8333 Riegersburg
www.zotter.at

Wie kühlt man ein Gas auf ein halbes Nanokelvin? Anleitung, von Physikern für Physiker:

Schritt 1:

Doppler-Kühlung, ca. ein Millikelvin

Man bestrahlt das Gas mit Lasern, die auf eine ganz bestimmte Frequenz eingestellt sind, sodass die Teilchen des Gases bevorzugt mit jenen Photonen zusammenstoßen, die ihnen entgegenkommen. Während bei Einstrahlung von normalem Licht die Photonen, je nach deren zufälliger Eigenbewegung, entweder abbremsen oder aber weiter beschleunigen, werden hier die Teilchen von den entgegenkommenden Photonen gebremst. Weniger Bewegung bedeutet niedrigere Temperatur.

Schritt 2:

Sub-Doppler-Kühlung (auch „Sisyphus-Kühlung“ genannt), ca. zehn Mikrokkelvin

Mit Lasern werden „Gruben“ geschaffen, in denen die Teilchen gefangen sind. Mithilfe eines Tricks gelingt es, dass die Teilchen beim Versuch, den Hang zu bezwingen, Geschwindigkeit verlieren, aber diese beim Zurückfallen nicht zurückbekommen. Dieser Vorgang wiederholt sich, wie bei Sisyphus mit seinem Stein.

Schritt 3:

Verdampfungskühlung, zehn Nanokelvin oder weniger

Vielleicht das einfachste, aber zugleich das effektivste Prinzip. Wer sich nach dem Duschen nicht abtrocknet, dem wird kalt. Eine Tasse Tee kühlt aus. Beides passiert schneller, wenn es windig ist. Auf mikroskopischer Ebene muss man sich vorstellen, dass die Teilchen (etwa Wassermoleküle auf nasser Haut) auch bei einer bestimmten Temperatur unterschiedliche Geschwindigkeiten haben: Manche sind schneller, andere langsamer. Die besonders schnellen werden dabei die Oberfläche manchmal verlassen. Wenn sie vom Wind abtransportiert werden, geht besonders viel Energie verloren – Wärmeenergie. Dieses Prinzip nutzen die Forscher aus. Zwar geht ihnen dabei ein Teil des Gases verloren, mit dem sie arbeiten, aber der Rest ist dafür so kalt wie nie zuvor.

TEMPERATURREKORDE

Kälteste je auf der Erdoberfläche gemessene Temperatur (2010 in der Antarktis): **-93°C, 180 K**

Temperatur des Alls: **-270,4°C, 2,75 K**

Kältester Ort außerhalb eines Labors (Bumerangnebel): **-272°C, 1,15 K**

Kältestes Bose-Einstein-Kondensat (am MIT, mit Natrium-Atomen): **450 pK** (ein halbes Milliardstel Kelvin)

Kälteste je gemessene Temperatur (in einem Stück Rhodium): **100 pK** (ein Zehntel eines Milliardstel Kelvin, oder 0,000 000 000 1 Kelvin)

Bose-Einstein-Kondensate gehören also zu den kältesten Zuständen, die wir kennen. Auf der Jagd nach immer tieferen Temperaturen haben Physiker aus aller Welt Verschiedenes zutage gefördert: Supraleitung, Superfluidität, und eben Bose-Einstein-Kondensate. Letztere sind vor allem im Hinblick auf das Konzept eines „Quantensimulators“ interessant. Es scheint möglich, schwer zugängliche Phänomene wie Neutronensterne mit anderen Quantensystemen zu imitieren. Dieses Gebiet beschäftigt auch die anderen Arbeitsgruppen am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Innsbruck: die zweite Experimentalgruppe von Rainer Blatt und die Theoriegruppe von Peter Zoller. Grimms BEC aus Caesium-Atomen ist hier besonders nützlich, weil die Forscher eine Möglichkeit gefunden haben, die Kräfte zwischen den Atomen auf ein gewünschtes Maß einzustellen – fast so, als würde man an einem Regler drehen. So können sie wirklich unterschiedliche Teilchenarten imitieren.

Die kältesten Orte des Universums? Ist das nicht etwas übertrieben? Dass es derartige Kälte in freier Natur gibt, lässt sich mit großer Sicherheit ausschließen, aber dass der irdische Weltrekord von 100 Picokelvin wirklich die absolute Grenze ist, steht dennoch nicht fest. Um so einen Rekord aufzustellen, braucht es geschickte Experimentatoren, aber nicht notwendigerweise Menschen – denn Experimentatoren könnte es ja auch auf anderen Planeten geben. Überlegungen, die der Entdecker Grimm nur mit einem Schmunzeln quittiert. Ω



UNI INNSBRUCK

EXZELLENT FÖRSCHEUNG

Die Quantenforschung zählt zu jenen Bereichen, in denen Österreichs Wissenschaft Weltruhm erlangt hat. In diesem Gebiet ist es vor mehr als zehn Jahren gelungen, exzellente junge Wissenschaftler nach Wien und Innsbruck zu locken, man hat sie mit erstklassigen Geräten ausgestattet und in Ruhe arbeiten lassen. Einer der beiden Hotspots befindet sich an der Uni Innsbruck bzw. in der Tiroler Dependence des Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der ÖAW; die Wiener Quantenforscher (an der Uni Wien, der TU Wien und der ÖAW) haben sich im Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ) zusammengesetzt.