

AUS DEM

GLEICHGEWICHT

AUS DEM GLEICHGEWICHT

STILLSTAND & DYNAMIK

THOMAS GASENZER

Der Zustand des Gleichgewichts wirkt beruhigend auf unser Gemüt. Was aber wäre das Gleichgewicht ohne Bewegung? Die Natur „lebt“ geradezu dadurch, dass sie aus dem Gleichgewicht gerät und sich wieder in es zurückbewegt. Der ständige Wechsel von „Stop“ und „Go“ lässt fragen, wie sich Gleichgewichtszustände überhaupt einstellen. Oder gibt es vielleicht sogar Bedingungen, unter denen der Zustand des Gleichgewichts nicht zu erreichen ist? Diese vordergründig unscheinbaren Fragen eröffnen Einblicke in bislang unbekannte Phänomene von weitreichender praktischer Bedeutung.

D

Der Gedanke an den Urlaub lässt die Menschen ins Schwärmen geraten. Die einen träumen von sich unendlich weit erstreckenden Bergseen, in deren Oberfläche sich die Gipfel spiegeln, andere denken an das unvermeidliche Stop-and-Go auf der Brenner-Route gen Süden. Gleichgewicht herrscht hier wie dort – aller vordergründigen hektischen Dynamik zum Trotz erfahren wir den Zustand des Gleichgewichts als übermächtiges Charaktermerkmal der Natur: An jedem Ort, an jedem Objekt, an jedem Atom greifen Kräfte an, die sich gegenseitig ausgleichen.

Das wirkt beruhigend auf unser Gemüt. Was aber wäre das Gleichgewicht ohne die Bewegung? Die Natur „lebt“ ja erst durch das Überwinden des Gleichgewichts, unser biologisches Leben wäre sonst kaum möglich. „Stop & Go“ – Der ständige Wechsel führt uns zu der interessanten, nur vordergründig unscheinbaren Frage, wie sich Gleichgewichtszustände überhaupt einstellen können – und ob

dies tatsächlich in jedem Fall passiert. Darauf wollen wir mit unseren Arbeiten in der Forschungsgruppe „Synthetic Quantum Systems“ am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg eine Antwort finden.

Was passiert auf dem Weg ins Gleichgewicht?

Schon lange vor uns wollten Naturforscher wissen, was die innere Dynamik und das Gleichgewicht eines gasförmigen Stoffes oder einer Flüssigkeit ausmacht. Was genau passiert zum Beispiel im Kessel oder im Kondensator einer Dampfmaschine? Bis heute ist vieles noch immer nicht verstanden und geheimnisvoll – vor allem dort, wo die Quantenphysik im Spiel ist. Denn beim Nicht-Gleichgewicht haben es Experimentatoren schwer: Die Elektronendynamik in Materialien etwa ist extrem schnell und daher nur schwer zu messen; auch die Dynamik nach dem Urknall oder die Dynamik in einem Neutronenstern lässt sich im Labor nicht so leicht nachstellen.

Extrem kalte Atomgase hingegen erlauben es heute, Modellsysteme gezielt im Nicht-Gleichgewicht zu realisieren. An ihnen lassen sich präzise Messungen durchführen, deren Ergebnisse helfen können, auch andere physikalische Systeme zu verstehen. Die Atomgase ermöglichen es beispielsweise, Aspekte der Elektronendynamik magnetischer Materialien oder der Physik des frühen Universums zu simulieren.

Ein Alltagsbeispiel mag veranschaulichen, um welche Fragen es dabei grundsätzlich geht: Sobald wir eine frische



PROF. DR. THOMAS GASENZER leitet eine Theorie-Forschungsgruppe am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg im Rahmen der Experiment-Theorie-Arbeitsgruppe „Synthetic Quantum Systems“ (SynQS). Bis zum Jahr 2014 war er am Institut für Theoretische Physik der Universität tätig, ab 2006 mit einem Heisenberg-Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Forschungsaufenthalte führten ihn nach Oxford, Großbritannien, und Boulder, Colorado. Er koordiniert das Netzwerk „Analog Quantum Simulators for Many-Body Dynamics“ (AQus) in dem von der EU finanzierten Programm Horizon 2020 „Future and Emerging Technologies“ mit Partnern in Berlin, Cambridge, Heidelberg, München, Paris, Trient und Wien. Darüber hinaus ist er Projektleiter im Sonderforschungsbereich 1225 „Isolated Quantum Systems and Universality in Extreme Conditions“ (ISOQUANT). Seit 2016 wirkt er als Geschäftsführer des Heidelberger Zentrums für Quantendynamik (CQD).

Kontakt: t.gasenzer@uni-heidelberg.de

Tasse Kaffee aus der Thermoskanne oder aus dem Automaten befreit haben, gerät das Getränk aus dem Gleichgewicht und beginnt abzukühlen. Was aber geschieht dabei genau? Die „Atomisten“, allen voran der Physiker Ludwig Boltzmann, verstanden bereits im 19. Jahrhundert die Wärme eines Körpers als Maß der mikroskopischen Bewegungen kleinster Teilchen. Die innere Dynamik der Gase und Flüssigkeiten rührt von den Zusammenstößen unzähliger Atome oder Moleküle her. Dadurch ändern die einzelnen Teilchen beständig ihre Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit. Der Kaffee kühlt ab, wenn sich diese Bewegung beruhigt.

Um diesen Prozess zu verstehen, müssen wir uns die Eigenschaften des Gleichgewichts noch etwas genauer ansehen: Im Gleichgewicht ist die mittlere Bewegungsenergie und damit die Geschwindigkeit der Wassermoleküle proportional zur Temperatur (dass die Temperatur innerhalb der Tasse leicht variieren kann, vernachlässigen wir hier). Nicht jedes Molekül aber hat die exakt gleiche Energie. Vielmehr findet sich eine Verteilung verschiedener Geschwindigkeiten – und damit von Energien –, und deren mittlere Abweichung von der mittleren Energie ist ebenfalls proportional zur Temperatur.

Im Zustand des Gleichgewichts folgt die Anzahl der Teilchen mit verschiedenen möglichen Energien in guter Näherung einem einfachen mathematischen Zusammenhang. Dieses nach Ludwig Boltzmann und dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell benannte Verteilungsgesetz legt nicht die Geschwindigkeiten aller einzelnen Teilchen fest. Stattdessen gibt das Gesetz an, wie wahrscheinlich es ist, dass ein einzelnes Teilchen eine bestimmte Geschwindigkeit hat. Der dadurch beschriebene Gleichgewichtszustand ist allein durch die Temperatur des Systems festgelegt.

Zurück zum frisch eingeschenkt Kaffee: Damit er schneller abkühlt, greifen wir gerne zum Löffel, stellen ihn aber nicht einfach nur in die Tasse hinein, sondern rühren mit ihm die heiße Flüssigkeit an die Oberfläche. Dort verdampfen zuerst die schnellsten Wassermoleküle, die die höchste Bewegungsenergie haben. Genau genommen verstärkt das Umrühren mit dem Löffel das Maß, in welchem der Kaffee aus dem inneren thermischen Gleichgewicht gerät – mit dem angenehmen Nebeneffekt, dass die flüchtigen Aromate die Raumluft veredeln.

Worin äußert sich das Nicht-Gleichgewicht im Kaffee? Sobald aus der Oberfläche übermäßig viele schnelle Moleküle verdunstet sind, ist das „Maxwell-Boltzmann-Verteilungsgesetz“ gestört. Es sind jetzt verhältnismäßig zu wenige schnelle Moleküle vorhanden. Stellen wir uns nun vor, dass die Verdunstung gestoppt wird, indem wir die Tasse mit einem Deckel verschließen. Jetzt wird es interessant.

Denn nach dem Verschließen kann der Kaffee nur dann zurück ins Gleichgewicht gelangen, wenn sich die Bewegungsenergie innerhalb der Flüssigkeit umverteilt. Genau das geschieht, wenn die Moleküle zusammenstoßen und daraufhin ihre Geschwindigkeiten ändern. Dabei sorgt der physikalische Grundsatz, dass die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems stets erhalten bleibt, dafür, dass einige wenige Moleküle die Rolle der zuvor entflohenen „Hitzköpfe“ übernehmen, also Energie gewinnen. Dadurch ermöglichen sie es der Mehrzahl der Teilchen, etwas Energie abzugeben. Insgesamt gesehen sinkt dadurch die mittlere Energie pro Molekül – der Kaffee kühlt ab.

Nach Boltzmann nimmt bei dieser Rückkehr ins Gleichgewicht die Unordnung des Systems – auch als „Entropie“ bezeichnet – zu. Das bedeutet: Der sich herausbildende, weniger geordnete Gleichgewichtszustand ist wahrscheinlicher als der Ausgangszustand in dem Moment, als der Deckel aufgesetzt wurde. Die Wahrscheinlichkeit des weniger geordneten Gleichgewichtszustandes ist deshalb

Quantenphysikalische Grundlagenforschung

Das Zentrum für Quantendynamik wurde im Jahr 2010 im Rahmen der Exzellenzinitiative als Teil des Zukunftskonzepts der Universität Heidelberg eingerichtet. Ziel des von Matthias Weidemüller geleiteten Zentrums ist es, die Grundlagenforschung im Bereich der Quantenphysik voranzutreiben. Die Arbeitsgruppen widmen sich unter anderem Phänomenen nahe des absoluten Nullpunkts der Temperatur sowie quantenmechanischen Effekten in ultraschnellen Prozessen bis hin zu biologisch relevanten Prozessen. Im Vordergrund stehen die Dynamik von Systemen und die Entwicklung von Nicht-Gleichgewichtszuständen. Auch Anwendungen rücken in greifbare Nähe, beispielsweise indem sich Wissenschaftlerteams mit der Rolle der Quantenphysik bei der Messung physikalischer Größen beschäftigen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten haben Einfluss auf zukünftige Hochpräzisionsmessungen, wie sie etwa für das Navigationssystem GPS von Bedeutung sind.

Am Zentrum für Quantendynamik beteiligen sich Arbeitsgruppen der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg, der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften sowie des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Kernphysik. Wichtige Kooperationspartner sind die Graduiertenschule „Fundamental Physics“ sowie die „Max Planck International Research School on Quantum Dynamics in Physics, Chemistry and Biology“.

<http://cqd.uni-heidelberg.de>

„So paradox es klingen mag: Kehrt ein System ins Gleichgewicht zurück, nimmt seine Unordnung zu.“

höher, weil es sozusagen mehr Möglichkeiten gibt, Unordnung als Ordnung zu schaffen – was uns allen ja aus dem Alltag nicht ganz fremd sein dürfte. Es gibt schlichtweg mehr Möglichkeiten, Dinge unordentlich im Zimmer zu verteilen, als sie geordnet übereinanderzulegen, beispielsweise auf einem Stapel. Um die jeweiligen Möglichkeiten abzählen zu können, schreibt man lediglich die mittlere Energie der Teilchen vor. Im Zustand maximaler Entropie ist das System im Gleichgewicht.

Soweit erscheint uns in der Physik der allgegenwärtige Prozess der „Thermalisierung“ eines Systems – also der Entwicklung aus einem Anfangszustand außerhalb des Gleichgewichts zurück ins thermische Gleichgewicht – gut verstanden zu sein. In den Stoßgesetzen der Teilchen ist zwar keine Zeitrichtung zu erkennen, dennoch bewegt sich das Gesamtsystem stets in die Richtung eines Zustandes, der wahrscheinlicher ist als derjenige im zuvor erzeugten Ungleichgewicht. Dieser Prozess wird als irreversibel erfahren – wie auch ein Schreibtisch sich spontan nicht selbst aufräumt.

Kritisch verlangsamte Prozesse

Trotz der soeben beschriebenen Stimmigkeit zwischen Beobachtung und Theorie liegt – nicht unerwartet – die Tücke im Detail. Was genau geschieht auf dem Weg ins Gleichgewicht? Gibt es möglicherweise Abstufungen im Grad der Wahrscheinlichkeit, die es nahelegen, mehr Szenarien als „nur“ Gleichgewicht und Nicht-Gleichgewicht zu unterscheiden? Gibt es vielleicht sogar Bedingungen, unter denen sich gar kein Gleichgewicht einstellen kann?

Träumen wir uns zurück in den Urlaub: Das Stop-and-Go auf der Autobahn überspannt allzu oft unsere Nerven.

Aber es erlaubt uns auch, zu entschleunigen, einen scheinbar zeitlosen Zustand im „Dazwischen“ zu erleben. Physiker sprechen vom „Drift“, einer stark verlangsamten, schleichenden Bewegung. Sie scheint weder im Gleichgewicht noch im Nicht-Gleichgewicht zu sein. Und wie so oft ist es dieser Übergangszustand, der die spannendsten Fragen bereithält.

Fensterglas beispielsweise ist eigentlich eine extrem zähe Flüssigkeit. Die Moleküle im Glas können keine wohlgeordnete Kristallstruktur annehmen, stets kann irgendwo ein Molekül seine Lage wechseln, was wieder den Platzwechsel eines anderen möglich macht und so fort. Man nennt diese Dynamik „kritisch verlangsamte“. Die zeitliche Veränderung ist dabei nicht mehr durch die Exponentialfunktion charakterisiert, sondern durch ein Potenzgesetz in der Zeit. Zur Verdeutlichung: Die Exponentialfunktion beschreibt schnelle Prozesse, zum Beispiel die Inflation. Pro Jahr – also in gleichen Zeitabständen – sinkt die Kaufkraft einer Währung um den Prozentsatz, der der Inflationsrate entspricht. Bei kritischer Verlangsamung – das heißt nach einem Potenzgesetz – würde das Geld nach 2, 4, 8, 16, 32 Jahren und so weiter einen jeweils gleichen Prozentsatz an Wert verlieren.

Kritisch verlangsamte Prozesse treten typischerweise in Systemen auf, die in die Nähe eines Phasenübergangs geraten. Ein einfaches Beispiel für einen Phasenübergang ist der Wechsel des Aggregatzustands eines Stoffes, etwa beim Schmelzen oder Kondensieren. Bei unseren Forschungsarbeiten an Quantengasen interessieren uns besonders solche Phasenübergänge, die in ähnlicher Weise auch in magnetisierbaren Materialien auftreten: der Übergang zwischen der magnetisierten und der ungeordneten

Phase eines ferromagnetischen Materials etwa, der bis heute für die Datenspeicherung auf Computerfestplatten genutzt wird. Was geschieht dabei?

Mit einem von außen angelegten Magnetfeld ist es möglich, die „Spins“ vieler benachbarter Elektronen parallel zueinander auszurichten, ähnlich einer Ansammlung mikroskopischer Magnetnadeln. Im einfachsten Fall – indem man das Feld alternativ in entgegengesetzten Richtungen anlegt – lässt sich so ein „bit“, also die Information „0“ oder „1“ codieren, die sehr lang erhalten bleibt, nachdem das Magnetfeld abgeschaltet wurde. Allerdings darf man die Festplatte nicht über ihre sogenannte Curie-Temperatur von einigen Hundert Grad Celsius aufheizen. Dann ginge die magnetische Ordnung und damit die Information verloren, weil das Material in die ungeordnete Phase übergeht, in der die einzelnen Spins in zufällige Richtungen zeigen.

Tut man es doch und kühlt das Material anschließend wieder bis unterhalb der Curie-Temperatur ab, kann man die kritische Verlangsamung beobachten: Das System ist zunächst ungeordnet und damit aus dem Gleichgewicht. Nur langsam bewegt es sich in Richtung eines geordneten – und damit magnetisierten – Zustands. Doch auf welche Art und Weise wird geordnet, so ganz ohne Magnetfeld?

Zuerst beginnen nebeneinanderliegende Spins spontan, sich wie Kompassnadeln aneinander auszurichten. Nach und nach gesellen sich mehr Elektronenspins hinzu, bis in dem Material viele aneinanderstoßende „Weiss-Bezirke“ entstanden sind (nach dem elsässischen Physiker Pierre-Ernest Weiss). In jedem dieser ausgedehnten Bereiche sind die Magnetnadeln parallel zueinander ausgerichtet. Sie zeigen jedoch in eine – relativ zur Magnetisierung in den Nachbarbezirken – zufällige Richtung. Wartet man noch länger, geht die Zahl der Bezirke zurück, da die einen auf Kosten der anderen anwachsen. Ihre durchschnittliche Größe nimmt dementsprechend zu, und zwar mit einem Potenzgesetz in der Zeit. Es handelt sich hierbei um eine kritisch verlangsamte Bewegung in Richtung eines überall gleich magnetisierten Gleichgewichtszustands.

Kritisch verlangsamte Prozesse lassen sich in wenige dynamische Universalitätsklassen einteilen, und zwar entsprechend der Art und Weise, wie sie zum Gleichgewichtszustand zurückfinden; genauer ausgedrückt: entsprechend des in den Potenzgesetzen jeweils auftretenden Exponenten. Vertreter einer Universalitätsklasse zeigen hierbei dasselbe Verhalten, während sie im Übrigen sehr unterschiedlicher Natur sein können. Die Diffusion von Proteinen in Zellmembranen lässt sich beispielsweise einer Universalitätsklasse der Ferromagneten zuordnen. Nur eine begrenzte Zahl solcher Klassen ist bislang bekannt – neue Universalitätsklassen zu entdecken, ist gebietsübergreifend interessant.

„Bis heute ist vieles
noch immer
nicht verstanden –
vor allem dort,
wo die Quantenphysik
im Spiel ist.“

In meiner Arbeitsgruppe untersuchen wir seit mehreren Jahren Turbulenz und Strukturbildung in Modellsystemen, die für Quantengase, aber auch in anderen Bereichen der Physik Verwendung finden. In vieler Hinsicht ähneln die Phänomene in unseren Modellsystemen dem Anwachsen der Weiss-Bezirke in Ferromagneten. Dennoch warten sie oft mit Überraschungen auf: Unsere Computersimulationen etwa weisen auf die Existenz extrem kleiner Exponenten in den Potenzgesetzen hin. Die kritische Verlangsamung ist dann so stark, dass das Gleichgewicht nicht innerhalb einer realistischen Zeit erreicht werden kann. Wir führen die starke Verlangsamung darauf zurück, dass sich im Quantengas spezielle, sogenannte topologische Strukturen ausbilden. Diese Strukturen zu entfernen kann so schwierig sein, wie ein verheddertes Wollknäuel zu entwirren. Fällt die von uns beobachtete Verlangsamung womöglich in eine bislang unbekannte Universalitätsklasse?

Die Dynamik des jungen Universums

Die Arbeiten unseres Kollegen Jürgen Berges vom Institut für Theoretische Physik haben uns dazu angeregt, solche Fragen näher zu untersuchen. Berges und seine Mitarbeiter haben für die Dynamik des noch jungen Universums (circa 10^{-33} bis 10^{-30} Sekunden nach dem Urknall) die Existenz von „nichtthermischen Fixpunkten“ postuliert. An einem solchen Fixpunkt könnte die räumliche Strukturierung von Materie in einer turbulenten, kritisch verlangsamten Weise vonstattengegangen sein.

OUT OF BALANCE

STANDSTILL & MOTION

THOMAS GASENZER

Equilibrium is a dominating characteristic of nature: Forces acting on every object, on every molecule or atom, mutually balance each other. But in fact, nature literally ‘lives’ on overcoming equilibrium – if it did not, life as we know it would not be possible. The constant change between ‘stop’ and ‘go’ leads us to the interesting question of how equilibrium states – e.g. of gaseous or liquid matter – form, and whether they invariably form at all. What exactly happens in a cup of tea that is cooling down? Although these questions have been on the table since the beginning of industrialisation at least, some intricate problems remain unsolved.

Today, ultra-cold atomic quantum gases, prepared in the lab at temperatures very close to absolute zero, allow us to construct specific model systems that enable us to perform precision measurements of their dynamic properties. We can use them to study how an equilibrium state is reached when starting from a particular, well-defined non-equilibrium state. In especially interesting cases, this equilibration proceeds extremely slowly, so that equilibrium is de facto never reached. Window glass, for example, is an amorphous substance, rather like a highly viscous liquid and can be regarded as an example for such ‘critically slowed’ relaxation.

Critical slowing down typically occurs when a system is brought close to a phase transition separating different forms of ordering; in this case, from a liquid to a solid state. It is a universal phenomenon, which means that the same mathematical laws apply to very different realisations of it in nature. Researchers in the experiment-theory unit ‘Synthetic Quantum Systems’ in Heidelberg aim to explore these phenomena and possibly identify new universality classes of critical slowing down. The project brings together physicists from disciplines as different as early-universe cosmology, nuclear and heavy-ion physics, and ultracold atomic gases. Table-top experiments with cold atoms may, for instance, help us simulate certain aspects of outer-space phenomena that could otherwise never be examined in a lab. ●

PROF. DR THOMAS GASENZER heads a theoretical research group at Heidelberg University's Kirchhoff Institute for Physics within the experiment-theory unit 'Synthetic Quantum Systems' (SynQS). Until 2014 he worked at the University's Institute for Theoretical Physics, from 2006 onward on a Heisenberg Fellowship of the German Research Foundation. He was a postdoctoral research fellow at the University of Oxford (UK) and a visiting researcher at JILA, Boulder, Colorado (USA). Prof. Gasenzer coordinates the 'Analog Quantum Simulators for Many-Body Dynamics' (AQuS) network in the EU-funded Horizon 2020 'Future and Emerging Technologies' programme, working with partners in Berlin, Cambridge, Heidelberg, Munich, Paris, Trento and Vienna. In addition, he is a principal investigator in the Collaborative Research Centre 1225 'Isolated Quantum Systems and Universality in Extreme Conditions' (ISOQUANT). In 2016 he became Managing Director of the Heidelberg Center for Quantum Dynamics (CQD).

Contact: t.gasenzer@uni-heidelberg.de

“Equilibrium is a dominating characteristic of nature. But in fact, nature literally lives on overcoming equilibrium – without this constant change between ‘stop’ and ‘go’, life as we know it would not be possible.”

Für ein vereinfachtes Modell der Dynamik nach dem Urknall konnten wir zeigen, dass dabei Materie und Antimaterie räumlich voneinander getrennt werden und dann nur sehr langsam wieder zueinanderfinden – ähnlich wie in der patchworkartigen Verteilung der Weiss-Magnetisierungsbezirke. Ein derartiger Prozess könnte vielleicht erklären, warum das für uns sichtbare Universum fast keine Antimaterie enthält. Unsere Existenz – wie auch die der hundert Milliarden Galaxien im All – wäre dann kritisch verlangsamer Dynamik zu verdanken, und die betreffende Dynamik könnte nebenbei einer Universalitätsklasse angehören, zu der auch Phänomene in magnetischen Materialien oder in kalten Quantengasen zählen.

Solchen fundamentalen Fragen wollen wir am Kirchhoff-Institut zusammen mit Markus Oberthaler und seinem Team in unserer Arbeitsgruppe „Synthetische Quantensysteme“ auf den Grund gehen. Kürzlich ist es uns bereits gelungen, Potenzgesetze in der Dynamik eines Quantengases aus Rubidium-Atomen nachzuweisen: Hierfür werden einige Zehntausend Atome in einer wenige Mikrometer kleinen Gaswolke nur einige Nanokelvin (10^{-9} Grad) über dem absoluten Temperaturnullpunkt bei minus 273,15 Grad Celsius präpariert und dann aus dem Gleichgewicht gebracht. Die Atome selbst bleiben dabei fast in Ruhe. Ihre magnetischen Ausrichtungen aber beginnen sich gegeneinander zu verdrehen.

Derzeit sind wir einer extremen Form kritischer Verlangsamung in der Ausbildung Weiss-artiger Bezirke der Atomspin-Ausrichtung auf der Spur. Die Anordnung, die wir dabei für unsere Experimente gewählt haben, hat eine Besonderheit: Nur entlang einer geraden Linie im Raum haben die Gase Bewegungsfreiheit, senkrecht dazu werden sie von elektromagnetischen Kräften festgehalten. Die Atome sind also wie Kugeln auf einer Perlenschnur aufgereiht. Die Dynamik in solchen „eindimensionalen Quantengasen“ unterliegt speziellen Regeln: Sie können unter anderem dazu führen, dass die Gase praktisch nie ein thermisches Gleichgewicht erreichen.

Das liegt vor allem daran, dass fast immer nur zwei benachbarte Atome aneinanderstoßen und die Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß dieselben sind. Erst bei dem sehr seltenen gleichzeitigen Aufeinandertreffen dreier Atome am gleichen Ort kann sich die Verteilung der Geschwindigkeiten ändern. Experimente in der Gruppe von Jörg Schmiedmayer an der Technischen Universität Wien haben ergeben, dass aufgrund dieser Effekte außergewöhnliche Zustände erreicht werden können. Mit meiner Arbeitsgruppe begleitete ich diese Untersuchungen von der theoretischen Seite. Unsere im vergangenen Jahr im Fachjournal „Science“ veröffentlichten Resultate zeigen vereinfacht ausgedrückt: Eindimensionale Atomgase können mehrere Temperaturen zugleich aufweisen, und dieser Zustand ist äußerst stabil.

„Unsere Existenz – wie auch die der hundert Milliarden Galaxien im All – könnten wir einer kritisch verlangsamen Dynamik verdanken.“

Zusammen mit Markus Oberthaler wollen wir nun herausfinden, ob die Einschränkung der Bewegung auf eine Raumdimension auch die kritische Verlangsamung im Gas der Atome mit Spin entscheidend beeinflusst und ob sich dabei bislang unbekannt Universalitätsklassen nachweisen lassen. Solche Systeme sind von grundlegendem Interesse für die Entwicklung der Technik im Bereich des „Quantencomputing“. Angesichts der Grenzen weiterer Miniaturisierungen in der konventionellen Hardwaretechnik und der daraus folgenden Notwendigkeit, Informationsdaten unter viel geringerem Energieaufwand verarbeiten zu können, werden diese Technologien unsere Zukunft mitbestimmen.

Darüber hinaus arbeiten im Rahmen des in Heidelberg neu eingerichteten Sonderforschungsbereichs „ISOQUANT“ Wissenschaftler vom Institut für Theoretische Physik, vom Kirchhoff-Institut und Max-Planck-Institut für Kernphysik, vom Physikalischen Institut und von der Technischen Universität Wien zusammen. Eines der wichtigsten Ziele des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs ist es, universelle Aspekte von Dynamik zu ergründen. Neben ultrakalten Quantengasen stehen dabei weitere Phänomene im Zentrum, die ebenfalls noch viele Geheimnisse bergen. Eines dieser geheimnisvollen Phänomene ist ein Plasma aus Quarks und Gluonen, das wenige Zehntel Mikrosekunden lang das Universum nach dem Urknall ausfüllte und in Kollisionen schwerer Ionen im Labor erzeugt werden kann. Wir untersuchen dieses Plasma derzeit am „Large Hadron Collider“ in der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) in Genf. Weitere Experimente sollen künftig im geplanten Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt erfolgen. ●