

T

R

U

E

T

U

B

L

N

E

T

I

C

E

N

E

L

H

TURBULENTE TEILCHEN

AUF DEM WEG ZUM GLEICHGEWICHT

JÜRGEN BERGES

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eines Heidelberger Sonderforschungsbereichs untersuchen sehr verschiedene Quantensysteme und stellen dabei erstaunliche Übereinstimmungen fest. Die Entdeckung universeller Bereiche fern des Gleichgewichts liefert neue Erkenntnisse über die Zeitentwicklung komplexer Systeme und die grundlegende Frage, was „vor“ und „zurück“ in der Zeit unterscheidet.

„Wie kommt ein Quantensystem dem Gleichgewicht beliebig nahe, ohne wieder davon abzuweichen, obwohl die zugrunde liegenden Naturgesetze keine Zeitrichtung auszeichnen?“

D

Die Vereinten Nationen haben das Jahr 2025 zum „Internationalen Jahr der Quantenwissenschaft und -technologie“ erklärt. Mit dieser Entscheidung wird nicht nur die Formulierung der Quantenmechanik vor nunmehr 100 Jahren gewürdigt. Damit werden auch die große Bedeutung und die hohen Erwartungen betont, die an die Quantenphysik hinsichtlich eines grundlegenden Verständnisses von Natur und Technologie geknüpft werden.

Die Anwendungsgebiete der Quantenphysik sind sehr vielfältig – sie reichen von der Kosmologie des frühen Universums kurz nach dem Urknall bis hin zur Technologie eines Quantencomputers. Zwischen den verschiedenen Quantensystemen gibt es erhebliche Unterschiede in so zentralen Parametern wie Temperatur und Dichte, dennoch können sie wichtige Eigenschaften gemeinsam haben.

Die Suche nach ähnlichen Phänomenen in scheinbar sehr unterschiedlichen Quantensystemen ist Schwerpunkt des Heidelberger Sonderforschungsbereichs „Isolierte Quantensysteme und Universalität unter extremen Bedingungen“, kurz ISOQUANT. Der Sonderforschungsbereich verfolgt einen integralen Ansatz und führt üblicherweise getrennt voneinander arbeitende Forschungsfelder der Physik und angrenzender Wissenschaften zusammen. Das erlaubt es, die Grenzen spezialisierter Teildisziplinen zu überwinden und wichtige Fortschritte bei Antworten auf bislang ungelöste Fragen zu erzielen.

Extreme Bedingungen

Die Forschungsarbeiten von ISOQUANT gelten sehr unterschiedlichen, „extremen“ Bedingungen, wie sie experimentell beispielsweise der größte Teilchenbeschleuniger der Welt am internationalen Forschungszentrum CERN in Genf realisiert. Dafür werden schwere Atomkerne in entgegengesetzter Richtung auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, um sie frontal kollidieren zu lassen. Die nach der Kollision erreichten Temperaturen übersteigen die Oberflächentemperatur unserer Sonne um mehr als das 100-Millionen-Fache. Im Rahmen von ISOQUANT werden die dynamischen Eigenschaften dieses äußerst heißen Quantensystems unter anderem mit denen von ultrakalten Atomen verglichen, die in kompakten Tischexperimenten auf die kältesten Temperaturen im Universum nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt werden. Insgesamt decken

die in ISOQUANT untersuchten Quantensysteme einen Energie- oder Temperaturbereich über mehr als zwanzig Größenordnungen hinweg ab.

Diese Quantensysteme sind von der Umgebung sehr gut isoliert. Sie zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass sie durch physikalische Naturgesetze beschrieben werden, die sich nicht ändern, wenn man in der Zeit vor oder zurück geht. Das kann man sich erst einmal so vorstellen, dass man einen Film im Kino auch rückwärts ansehen könnte, ohne einen Unterschied zu bemerken, wenn er auf dem Niveau der grundlegenden Quantenphysik gedreht würde. Wieso aber erscheint uns ein rückwärts angesehener Film dann als offensichtlich wenig sinnvoll?

Die entsprechende Frage wird in ISOQUANT quantenphysikalisch untersucht. Man startet beispielsweise mit einem System sehr weniger Quantenteilchen (Atome) und

Quantensysteme unter extremen Bedingungen

Der Sonderforschungsbereich „Isolierte Quantensysteme und Universalität unter extremen Bedingungen“ (SFB 1225, ISOQUANT) beschäftigt sich mit einem Thema, das für eine Vielzahl von Anwendungen von großer Bedeutung ist – von der Teilchenphysik über die Kernphysik bis zur Atom- und Festkörperphysik. Viele dieser Systeme zeigen ähnliche Eigenschaften, obwohl wesentliche Parameter wie Temperatur, Dichte oder Feldstärke sehr verschieden sind. Es existieren sogar universelle Bereiche, in denen quantitative Übereinstimmungen zwischen scheinbar grundverschiedenen physikalischen Systemen zu beobachten sind. Die Forscher:innen untersuchen mit gemeinsamen Herangehensweisen sowohl zeitabhängige Phänomene als auch Gleichgewichtseigenschaften, um Lösungen für übergreifende Fragestellungen in der Physik zu finden.

Beteiligt sind Arbeitsgruppen des Instituts für Theoretische Physik, des Kirchhoff-Instituts für Physik, des Physikalischen Instituts und des Physikalisch-Chemischen Instituts der Universität Heidelberg sowie Wissenschaftler:innen des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg, des Max-Planck-Instituts für Mathematik in den Naturwissenschaften in Leipzig und der Technischen Universität Wien. Sprecher des SFB ist Prof. Dr. Jürgen Berges vom Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert den 2016 eingerichteten SFB in der dritten Förderperiode seit 2024 mit rund 14,8 Millionen Euro.

www.isoquant-heidelberg.de

fügt dann immer mehr Teilchen hinzu. Einem System einzelne Atome hinzuzufügen oder wegzunehmen und die nachfolgende Zeitentwicklung des Systems unter kontrollierten Bedingungen zu vermessen, ist eine der großartigen Errungenschaften der experimentellen Quantenphysik. Zudem hat die theoretische Quantenphysik große Fortschritte darin gemacht, die komplexe Zeitentwicklung vieler Teilchen auch zu langen Zeiten vorhersagen zu können.

Für wenige Teilchen sollte der „Film“ eines solchen Quantensystems, ob vor- oder rückwärts angesehen, in der Tat im Wesentlichen gleich aussehen – so, wie es die Naturgesetze nahelegen. Wird die Anzahl der Teilchen größer, spielen statistische Effekte für die Eigenschaften des Systems eine wichtige Rolle. Wie sich sehr viele Teilchen statistisch verhalten, entspricht dabei im Wesentlichen unseren Alltagserfahrungen. Ein Beispiel: Ein heißer Kaffee wird sich in einem abgeschlossenen Raum bei Zimmertemperatur abkühlen. Es ist äußerst unwahrscheinlich, dass sich der Kaffee spontan weiter erhitzt und der Raum dabei abkühlt. Ein weiteres Beispiel: Das Mischen eines neuen, sortierten Kartenspiels wird die Karten in eine zufällige Reihenfolge bringen; ein wiederholtes Mischen wird die Karten praktisch niemals wieder derart nach Rang und Farbe sortieren. Der Endzustand, in dem der Kaffee die gleiche Temperatur wie der Raum angenommen hat und alle Karten gut durchmischt sind, kennzeichnet das Gleichgewicht.

Als Endzustand ist das Gleichgewicht also meistens eindeutig. Ob und wie ein Quantensystem, das sich anfänglich fern des Gleichgewichts befindet, diesen Endzustand erreicht, ist eine aktuelle Frage der Forschung. Genauer formuliert lautet die Frage: Wie kommt ein Quantensystem dem Gleichgewicht beliebig nahe, ohne wieder davon abzuweichen, obwohl die zugrunde liegenden Naturgesetze keine Zeitrichtung auszeichnen? Die zeitliche Entwicklung hin zum Gleichgewicht ist ein dynamischer Prozess, der in der Physik als „Thermalisierung“ bezeichnet wird. Das Verständnis der Thermalisierung liefert letztendlich auch eine Antwort auf die Frage, was die Richtung der Zeit bestimmt.

Quantenteilchen fern des Gleichgewichts

Lässt man in einem Teilchenbeschleuniger zwei schwere Atomkerne mit nahezu Lichtgeschwindigkeit kollidieren, erwartet man nach dem „Knall“ zunächst einmal ein großes Durcheinander von sehr vielen produzierten Teilchen. Eine große Überraschung ist es daher, dass der Prozess der Thermalisierung bereits früh in der Zeitentwicklung fern des Gleichgewichts sehr strukturiert abläuft und in unterschiedlichen Quantensystemen durch nur wenige universelle Zahlen bestimmt wird. Diese Zahlen treten als Potenzen eines Skalierungsverhaltens der Systeme in Zeit und Raum auf: Eine Potenz der verstrichenen Zeit zieht



PROF. DR. JÜRGEN BERGES wurde 2011 an die Universität Heidelberg berufen und forscht und lehrt am Institut für Theoretische Physik der Fakultät für Physik und Astronomie. Sein Arbeitsgebiet ist die theoretische Quantenphysik mit verschiedenen Anwendungen von der Hochenergiephysik und Kosmologie des frühen Universums bis hin zu Systemen ultrakalter Atome als Quantensimulatoren. Nach dem Studium der Physik an den Universitäten Osnabrück und Heidelberg wurde er 1997 promoviert und war wissenschaftlicher Angestellter am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA). Er habilitierte 2003 an der Universität Heidelberg und wurde 2006 als Professor an die Technische Universität Darmstadt berufen. Seit 2016 ist er Sprecher des Heidelberger Sonderforschungsbereichs „Isolierte Quantensysteme und Universalität unter extremen Bedingungen“ (ISOQUANT) und seit 2019 Teilprojektleiter am Heidelberger Exzellenzcluster STRUCTURES.

Kontakt: j.berges@thphys.uni-heidelberg.de

„Durch die Koordination vieler Teilchen können größere Strukturen entstehen, die sich als Ganzes gemäß neuen effektiven Naturgesetzen bewegen.“

Der Exzellenzcluster STRUCTURES

Die Frage, wie in komplexen Systemen aus dem Zusammenspiel vieler Komponenten neue Phänomene entstehen können, ist das Thema des Exzellenzclusters „STRUKTUREN: Emergenz in Natur, Mathematik und komplexen Daten“ („STRUCTURES: A Unifying Approach to Emergent Phenomena in the Physical World, Mathematics, and Complex Data“). Das Themengebiet des von den Fakultäten für Physik und Mathematik gemeinsam getragenen Exzellenzclusters reicht von der subatomaren Teilchenphysik bis zur Kosmologie und von der fundamentalen Quantenphysik bis zur Neurowissenschaft. In sieben „Comprehensive Projects“ und zahlreichen „Exploratory Projects“ forschen rund 100 Wissenschaftler:innen aus Physik, Mathematik und Informatik. Anwendungsgebiete für ihre Fragestellungen sind beispielsweise Quanten- oder neuromorphe Computer, die Rechnungen ausführen können, welche mit traditionellen Computern nicht möglich sind, oder Strukturbildungsprozesse in der Astro- oder Biophysik, die ebenfalls auf dem Zusammenspiel vieler Bestandteile beruhen.

Der Exzellenzcluster wurde 2019 im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder an der Universität Heidelberg eingerichtet. Beteiligt sind neun Universitätsinstitute sowie die Max-Planck-Institute für Astronomie (MPIA) und Kernphysik (MPIK) in Heidelberg, das Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) und das Zentralinstitut für seelische Gesundheit (ZI) in Mannheim. Sprecher:innen sind Prof. Dr. Manfred Salmhofer (Institut für Theoretische Physik), Prof. Dr. Anna Marciniak-Czochra (Institut für Angewandte Mathematik) und Prof. Dr. Markus Oberthaler (Kirchhoff-Institut für Physik).

nach einem festen Verhältnis immer auch eine Änderung der Positionen von Teilchen im Raum nach sich und umgekehrt. Für das Skalierungsverhalten erweist sich ein wesentlicher Teil der Informationen über die zugrunde liegenden Quantensysteme als irrelevant, insbesondere Details über deren Anfangsbedingungen.

Daher können die gleichen universellen Zahlen unterschiedliche Quantensysteme beschreiben. Dies führt dazu, dass grundlegende erste Schritte auf dem Weg zum Gleichgewicht in einer hochenergetischen Kollision schwerer Atomkerne nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten ablaufen können wie Tischexperimente mit sehr niederenergetischen Atomen fern des Gleichgewichts. Die quantitative Übereinstimmung für Systeme innerhalb einer „Universalitätsklasse“ geht so weit, dass ein Quantensystem ein anderes Quantensystem in diesem Bereich simulieren kann.

Es ist bemerkenswert, dass viele Quantenteilchen fern des Gleichgewichts ein strukturiertes Verhalten zeigen, anstatt planlos durcheinandergewürfelt zu sein. Würden alle Teilchen weitgehend individuell agieren wie in einem sehr dünnen Gas, wäre dies schlecht vorstellbar. Stattdessen beginnen die Quantenteilchen, sich zu koordinieren. Dies kann man sich als eine Art Flüssigkeit vorstellen, in der sich die Teilchen kollektiv bewegen. Diese Bewegung ist fern des Gleichgewichts alles andere als ruhig. Es treten Turbulenzen auf, die nach universellen Schemata den Teilchen- und Energiefluss des Systems bestimmen.

Das Phänomen der Emergenz

Wenn Teilchen in größerer Zahl die Tendenz zeigen, sich zu koordinieren und kollektiv zu verhalten, können „emergente Phänomene“ auftreten. Das sind qualitativ neue Phänomene, deren effektive Eigenschaften sich nicht direkt in den grundlegenden Naturgesetzen widerspiegeln, die jedes individuelle Teilchen immer noch erfüllen muss. Dies kann beispielsweise zu den universellen Gesetzmäßigkeiten in der frühen Zeitentwicklung führen, bei denen „vor“ und „zurück“ nicht mehr gleich erscheinen.

Die Koordination vieler Teilchen kann größere Strukturen entstehen lassen. Als Ganzes bewegen sie sich dann gemäß neuen effektiven Naturgesetzen. Eine derartige Strukturbildung fern des Gleichgewichts konnte im Fall des universellen Skalierungsverhaltens im Rahmen von ISOQUANT experimentell nachgewiesen werden. Dass sich viele individuelle Atome plötzlich koordiniert bewegen, erscheint statistisch gesehen nicht sehr wahrscheinlich, vor allem dann, wenn das Quantensystem isoliert ist und keine Parameter auf spezielle Werte eingestellt werden. Diese Art der Selbstorganisation in einem physikalischen System basiert auf starken Wechselwirkungen zwischen den Atomen, die eine solche Koordination erst möglich machen.

TURBULENT PARTICLES

ON THE WAY TO EQUILIBRIUM

JÜRGEN BERGES

Over the past years, quantum systems in extreme conditions have become a unifying research theme crossing traditional lines of specialisation from high-energy and nuclear physics to atomic and condensed matter physics. Quantum systems in extreme conditions can exhibit characteristic common properties despite dramatic differences in key parameters such as temperature, density or field strength. The existence of universal regimes, where even quantitative agreements between seemingly disparate physical systems can be observed, is one of the core topics of the Heidelberg Collaborative Research Centre “Isolated quantum systems and universality in extreme conditions” (ISOQUANT). Using the thermalisation process in quantum systems that are far from equilibrium as an example, this article describes how synergies between different fields of research can lead to important progress in some of the most urgent questions of contemporary physics. ●

PROF. DR JÜRGEN BERGES was appointed to Heidelberg University in 2011 and has since been conducting research and teaching at the Institute for Theoretical Physics of the Faculty of Physics and Astronomy. His field of specialisation is theoretical quantum physics, with various applications ranging from high-energy physics and the cosmology of the early universe to systems of ultracold atoms as quantum simulators. He studied physics at the universities of Osnabrück and Heidelberg and, after earning his doctorate in 1997, became a research assistant at the Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA). Jürgen Berges completed his habilitation at Heidelberg University in 2003 and in 2006 accepted a professorship at the Technical University of Darmstadt. Since 2016 he has been the Spokesperson of the Heidelberg Collaborative Research Centre "Isolated quantum systems and universality in extreme conditions" (ISOQUANT) and is a Principle Investigator at the Heidelberg Cluster of Excellence STRUCTURES since 2019.

Contact: j.berges@
thphys.uni-heidelberg.de

“It is remarkable that many quantum particles far from equilibrium exhibit structured behavior instead of being randomly jumbled.”

Der „Film“ der Thermalisierung in einem solchen Quantensystem kann daher sehr differenziert ablaufen. Das geht weit hinaus über statistische Überlegungen zum Gleichgewicht wie bei den Alltagsbeispielen des sich abkühlenden Kaffees oder des durchmischten Kartenspiels. Auf dem Weg zum Gleichgewicht kann kollektives Verhalten auch Strukturen entstehen lassen, die sehr langlebig sind, auch wenn sie nicht im Gleichgewicht existieren.

Diese Untersuchungen werfen einen Blick auf eine grundsätzliche Frage: Warum ist die Welt um uns herum strukturiert und nicht diffus? Die Aussicht, verschiedenste Systeme fern des Gleichgewichts nach gemeinsamen Prinzipien klassifizieren zu können, scheint die Beantwortung dieser Frage näher zu bringen. Ähnliche Fragestellungen der Strukturbildung treten auch jenseits der Quantenphysik in klassischen Systemen auf, bis hin zur Neurowissenschaft. Die Untersuchung derartiger Zusammenhänge ist ein wichtiger Teil des Forschungsprogramms des Heidelberger Exzellenzclusters STRUCTURES.

Wie viele Quantenteilchen sind viele?

Kollektives Verhalten spielt für unser Verständnis komplexer Quantensysteme eine wesentliche Rolle, auch nahe des Gleichgewichts. Eine wichtige generelle Frage ist dabei, wie viele Quantenteilchen man braucht, um Kollektivität zu beobachten. Reichen eventuell schon wenige Teilchen, oder braucht man hunderte oder sogar tausende? Experimente mit relativistischen Protonen, die auf schwere Atomkerne treffen, oder noch kleinere Systeme in Proton-Proton-Kollisionen legen nahe, dass diese Zahl gar nicht so groß sein könnte wie ursprünglich angenommen.

Motiviert durch die Kollisionsexperimente untersucht ein übergreifendes ISOQUANT-Projekt die entsprechende Fragestellung mit ultrakalten Atomen. Die sehr große Kontrolle, die man bei diesen kompakten Tischexperimenten hat, und die unvergleichliche Möglichkeit, die Systeme zeitaufgelöst im Detail zu studieren, lassen neue Erkenntnisse zu, die auch zu einem verbesserten Verständnis der Kollisionsexperimente führen.

Eine überraschende Antwort: Ein robustes kollektives Verhalten ist bereits mit etwas weniger als zehn stark wechselwirkenden Atomen zu beobachten. Dabei wurden viskositätsartige Eigenschaften untersucht, die man üblicherweise Flüssigkeiten zuschreibt, die aus einer praktisch unendlich großen Zahl von Teilchen bestehen. Kollektive Phänomene aus der Vielteilchen-Quantenphysik, bei denen beispielsweise Paare von Atomen in einen sogenannten suprafluiden Zustand gehen, können auch schon in kleinen Systemen ihre Schatten vorauswerfen. Die Tragweite endgültiger Antworten auf diese Fragen für unser grundlegendes Natur- und Technologieverständnis der Quantenphysik kann nicht überschätzt werden. ●

„Es ist bemerkenswert, dass viele Quantenteilchen fern des Gleichgewichts ein strukturiertes Verhalten zeigen, anstatt planlos durcheinandergewürfelt zu sein.“