

TEMPERATUREN

IM KELLER

TEMPERATUREN IM KELLER

DAS KÄLTESTE GAS DES UNIVERSUMS

MATTHIAS WEIDEMÜLLER

Wie nahe kann man dem absoluten Nullpunkt der Temperatur kommen? Der Wettlauf um das Erreichen der niedrigstmöglichen Temperatur begann Mitte des 19. Jahrhunderts und hält bis heute an – mit spektakulären Quanteneffekten.

D

Der erste Frühlingstag des Jahres. Wochenende, strahlend blauer Himmel, und die Sonne wärmt das Gemüt. Draußen spielen die Kinder. Wenn da nur nicht der lang versprochene Artikel für das Forschungsmagazin der Universität wäre. Die Redaktion drängt, weiterer Aufschub ist nicht mehr verhandelbar. Passend zum Schwerpunktthema soll es um den absoluten Nullpunkt der Temperatur gehen. Aber wo beginnen? Vielleicht sollte man erst einmal die kleinen Schlauköpfe draußen fragen: „Was ist eigentlich Temperatur?“ Antwort: „Temperatur ist, wenn der Wind weht und die Sonne scheint – gehen wir jetzt endlich Eis essen?“ Eigentlich kein schlechter Anfang ...

Was ist Temperatur?

Was wir als angenehme Wärme auf der Haut empfinden, ist einerseits die Bewegungsenergie der Atome und Moleküle in der Luft, andererseits die von der Sonne in Form von Strahlung abgegebene Energie. Offensichtlich haben wir es

hier mit zwei verschiedenen Energieformen – Strahlung und Bewegung – zu tun, denen wir eine „Temperatur“ zuordnen können. Was bestimmt nun diese Temperatur? Am einfachsten lässt sich dies für die Luft erklären. Bei angenehmen 25 Grad Celsius bewegen sich die Luftmoleküle mit Geschwindigkeiten nahe der Schallgeschwindigkeit. Das sind rund 1.250 Kilometer pro Stunde und entspricht in etwa der Geschwindigkeit eines Flugzeugs. Glücklicherweise ist die Masse der Moleküle sehr gering, so dass wir die durch Stöße von ihnen abgegebene kinetische Energie als angenehme Wärme empfinden.

Entscheidend für die Bestimmung der Temperatur ist jedoch nicht die absolute Energie des einzelnen Moleküls, sondern die relative Verteilung der Energien aller Moleküle im Gas. Tatsächlich erstrecken sich diese Energien über einen weiten Bereich. So gibt es einige (verhältnismäßig wenige) Moleküle, die sich mit bequemer Fußgängergeschwindigkeit bewegen. Andere sind mit der Geschwindigkeit eines Düsenjägers unterwegs. Diese Unordnung des Gases wird durch seine Entropie – das Maß für die zur Verfügung stehende Information über die Bewegung aller einzelnen Moleküle – quantifiziert, und es besteht ein enger Zusammenhang zwischen Entropie, Energie und der formalen Definition von Temperatur. Je geringer die Änderung der Entropie durch Änderung der Energie ist, desto höher ist die Temperatur des Gases. Infolgedessen weist Luft bei niedrigerer Temperatur eine geringere mittlere Energie (und entsprechend die mittlere Geschwindigkeit) wie auch eine geringere Breite der Energieverteilung auf. Ähnlich verhält es sich mit der Lichtstrahlung, die als Gas von Photonen, den elementaren Quanten der Strahlung, verstanden werden kann.

Wenn aber die Temperatur durch die Verteilung von Energien bestimmt wird, dann muss es so etwas wie eine minimale Temperatur geben, die nicht unterschritten werden



PROF. DR. MATTHIAS WEIDEMÜLLER ist seit 2008 Professor für Experimentalphysik an der Universität Heidelberg sowie Gründungsdirektor des Heidelberger Zentrums für Quantendynamik. Vor seiner Berufung nach Heidelberg forschte er von 1997 bis 2003 am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, von 2003 bis 2008 hatte er einen Lehrstuhl am Physikalischen Institut der Universität Freiburg inne. Forschungsaufenthalte führten ihn nach Paris (Frankreich), Amsterdam (Niederlande), São Paulo (Brasilien) und Innsbruck (Österreich). An der University of Science and Technology of China etablierte er im Rahmen des „1000 Talents Program“ der Chinesischen Akademie der Wissenschaften ein Labor in Shanghai, an dem er ebenfalls forsch und lehrt. Matthias Weidemüller ist unter anderem Fellow der American Physical Society sowie des Marsilius-Kollegs der Universität Heidelberg. Seine Arbeitsgruppe erforscht Grundlagenfragen der modernen Quantenphysik auf verschiedenen Ebenen der Komplexität.

Kontakt: weidemueller@uni-heidelberg.de

Physikalisches Institut

Das Physikalisches Institut der Universität Heidelberg hat eine lange Tradition in der experimentellen Untersuchung der Struktur von Materie und der fundamentalen Wechselwirkungen. Aktuell arbeiten hier elf Forschungsgruppen in den Bereichen Niederenergie- und Hochenergiepartikelphysik, Schwerionenphysik und komplexe Quantensysteme. Die Suche nach neuen Phänomenen in der Physik konzentriert sich unter anderem auf Fragen der Materie-Antimaterie-Asymmetrie, der Suche nach Leptonzahlverletzung, der Untersuchung der Materieeigenschaften kurz nach dem Urknall und der Untersuchung von Quanteneffekten in Vielteilchensystemen.

www.physi.uni-heidelberg.de

kann. Dieser magische Zustand, bei dem alle Moleküle ruhen, bestimmt den absoluten Nullpunkt der Temperatur. Zu Ehren von Lord Kelvin definiert diese Temperatur eine Skala für Temperaturmessungen mit derselben Einteilung wie die uns geläufige Celsius-Skala, allerdings um 273,15 Grad gegenüber dieser verschoben: Null Kelvin entsprechen minus 273,15 Grad Celsius.

... Das wäre also hoffentlich geklärt. Was steht denn weiter in den Richtlinien zum Forschungsmagazin? Es soll eingeordnet werden, wo wir in Heidelberg stehen und was unser spezifischer Forschungsansatz ist. Okay, den meisten Menschen ist gar nicht bekannt, dass Heidelberg einer der kältesten Orte des Universums ist. Aber trotz dieser Steilvorlage bitte jetzt keinen Kalauer ...

Atome im Schneckentempo

Wie nahe kann man dem absoluten Nullpunkt der Temperatur kommen? Mit dem Verständnis der modernen Thermodynamik begann Mitte des 19. Jahrhunderts ein bis heute anhaltender Wettlauf um das Erreichen der niedrigstmöglichen Temperatur. Der Entwicklung von Kältemaschinen im späteren 19. Jahrhundert kommt aufgrund ihrer Anwendung für das Aufbewahren von Lebensmitteln eine ähnlich revolutionäre Bedeutung zu wie den Dampfmaschinen für die Industrie. Die Gasverflüssigung beispielsweise durch das Linde-Verfahren erlaubte es – neben seiner technischen Bedeutung für die Stahl- und Düngemittelproduktion –, auf großem Maßstab immer niedrigere Temperaturen zu erreichen. Im 20. Jahrhundert markieren viele Nobelpreise den Weg zum absoluten Nullpunkt der Temperatur – mit Verbindungen zur Universität Heidelberg bei einigen der ausgezeichneten Wissenschaftler: Entdecker der Supraleitung bei Temperaturen um fünf Kelvin war der niederländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes, der an der Universität Heidelberg studierte und für seine Entdeckung 1913 den Nobelpreis erhielt. Oder die Erzeugung der Bose-Einstein-Kondensate, für die Wolfgang Ketterle, der in Heidelberg studierte und als Postdoktorand forschte, gemeinsam mit Eric A. Cornell und Carl E. Wieman 2001 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde.

Um die niedrigsten Temperaturen des Universums im Labor zu erreichen, werden atomare Gase mit Laserlicht gekühlt. Der Rekord liegt bei Temperaturen im Bereich von 10^{-10} Kelvin: ein Zehntel eines Milliardstel Grads über dem absoluten Nullpunkt. Die so gekühlten Atome bewegen sich nahezu im Gleichschritt im Schneckentempo von wenigen Metern pro Stunde. Entscheidend für diese ultimative Annäherung an den Punkt der absoluten Ruhe war folgende Erkenntnis: Laserlicht, dessen Frequenzspektrum in guter Näherung aus nur einer einzigen Frequenz besteht und damit eine extrem geringe Entropie aufweist, lässt sich ideal nutzen, um einem atomaren Gas durch das Wechselspiel von Absorption und Emission kinetische Energie zu entziehen.

„Der magische Zustand, bei dem alle Atome ruhen, bestimmt den absoluten Nullpunkt der Temperatur.“

Wie schon im Jahr 1911, als Heike Kamerlingh Onnes feststellte, dass der elektrische Widerstand von Metallen bei tiefen Temperaturen plötzlich verschwindet, wartet die Natur immer wieder mit Überraschungen auf, wenn man sich dem absoluten Nullpunkt nähert. Bei den atomaren Gasen sorgt eine fundamentale Dichotomie von Quantenobjekten für spektakuläre Effekte. Die fundamentalen Konstituenten von Materie teilen sich in zwei Klassen: die Bosonen und die Fermionen, benannt nach Satyendranath Bose und Enrico Fermi. Die beiden Physiker haben erstmals die unterschiedlichen quantenstatistischen Eigenschaften dieser beiden Klassen beschrieben, also die Verteilung der

Objekte auf die quantenphysikalisch zur Verfügung stehenden Energien. Nach dem heutigen Standardmodell der Elementarteilchen sind alle fundamentalen Konstituenten der Materie Fermionen. Die Austauschteilchen hingegen, welche die fundamentalen Kräfte vermitteln, sind bosonischer Natur.

Wie beschrieben, verringern sich bei abnehmender Temperatur die mittlere Energie und die Energieverteilung der Teilchen. Ab einer bestimmten kritischen Temperatur kommt die Quantenphysik ins Spiel, die für jedes auf einen bestimmten Raumbereich begrenzte Quantenobjekt - in

„Computersysteme, das Internet und die Vielzahl von Cloud-Diensten sind für fünf bis zehn Prozent des weltweiten Energieverbrauchs verantwortlich.“

unserem Falle ein Atom – keinen Zustand der absoluten Ruhe zulässt. Aus der „Heisenberg’schen Unschärferelation“ folgt vielmehr, dass dieses Atom immer eine von null verschiedene Bewegungsenergie aufweist. Ist jetzt also die mit der Temperatur zusammenhängende sogenannte thermische Energie von der Größenordnung dieser quantenphysikalischen Minimalenergie, so offenbart sich die Quantennatur der Atome, denn in diesem Regime verhalten sich Fermionen gänzlich anders als Bosonen. Während es gleichartigen Fermionen nicht erlaubt ist, gemeinsam einen Quantenzustand einzunehmen, wird die Wahrscheinlichkeit, ein weiteres Boson in einem bestimmten Quantenzustand zu finden, sogar erhöht, wenn sich bereits gleichartige Bosonen in diesem Zustand befinden. Bei der Abkühlung eines Gases hat dies nun beispielsweise zur Folge, dass bei der kritischen Temperatur das Gas aus bosonischen Atomen plötzlich einen Phasenübergang aufweist – die „Bose-Einstein-Kondensation“ – ähnlich dem Gefrieren von Wasser, bei dem sich die meisten Atome im energetisch tiefsten Quantenzustand ansammeln. Sie bilden so ein makroskopisches Quantenobjekt, welches man mit bloßem Auge beobachten kann. Experimente mit ultrakalten fermionischen und bosonischen Gasen werden in verschiedenen Labors des Physikalischen Instituts und des Kirchhoff-Instituts für Physik der Universität Heidelberg mittlerweile routinemäßig durchgeführt.

... Jetzt sind wir also in Heidelberg angekommen. Alle wollen doch immer wissen: Wozu das Ganze? Dass es

cool ist, mit ultrakalten Gasen zu experimentieren, reicht wahrscheinlich nicht. ABSOLUT und RELATIV war ja das Thema. Und Sonderforschungsbereich und Exzellenzcluster sollen auch zu ihrem Recht kommen ...

Universelles Quantendesign

Da sich ultrakalte Gase ebenso verhalten wie die fundamentalen Bausteine der Materie und die Vermittler von deren Wechselwirkungen, lassen sie sich verwenden, um exotische oder aber universelle Eigenschaften von komplexen Systemen in der Natur zu simulieren. Die Eigenschaften der meisten in der Natur vorkommenden Systeme können nicht auf Basis der zugrunde liegenden mikroskopischen physikalischen Gesetzmäßigkeiten erschlossen werden – und dies liegt weniger am Unvermögen der Kollegen aus der theoretischen Physik, sondern vielmehr an der Struktur der mathematischen Gleichungen: Diese lassen sich grundsätzlich nicht mehr mit gängiger Computertechnologie lösen, sobald zu viele Konstituenten im Spiel sind. Ein Beispiel ist die Entschlüsselung der Funktionsweise großer, für die Biologie wichtiger Moleküle oder das Design neuer funktioneller Materialien. Dieses Problem erkennend hat der amerikanische Physiker Richard Feynman in den frühen 1980er-Jahren vorgeschlagen, einen Computer so zu konstruieren, dass die Elemente selbst auf den Gesetzen der Quantenphysik basieren. Die Idee des Quantensimulators war geboren. In den vergangenen fünf Jahren hat es – nicht zuletzt durch das verstärkte Engagement von Firmen wie Google, Alibaba, Microsoft und IBM – einen wahren

„Bildlich gesprochen entsteht in irgendeinem Computerzentrum jedes Mal ein kleines CO₂-Wölkchen, wenn man bei Google für eine Suchanfrage die Enter-Taste drückt.“

Goldrausch bei der Entwicklung von Quantencomputern und -simulatoren gegeben. Innerhalb der Europäischen Union werden Aktivitäten auf großer internationaler Skala innerhalb des „Quantum Flagships“ gefördert, an dem wir gemeinsam mit der Gruppe von Selim Jochim vom Physikalischen Institut der Universität Heidelberg beteiligt sind.

Noch eine weitere Eigenschaft macht Gase nahe dem absoluten Nullpunkt der Temperatur zu idealen Quantensimulatoren: Durch eine Vielzahl von in den vergangenen Jahren entwickelten Tricks lassen sich die Wechselwirkungen zwischen den ultrakalten Atomen präzise einstellen. Ganz im Feynman'schen Sinne kann so eine große Vielfalt von Modellsystemen synthetisiert und in ihren Quanteneigenschaften simuliert werden. Die Simulatoren profitieren dabei davon, dass sich Grundgleichungen für scheinbar unterschiedliche Systeme durch Transformation der absoluten auf geeignete relative Skalen, etwa der für das System relevanten Energien, ineinander überführen lassen. Ein Beispiel ist das Verschwinden jeglicher Viskosität in einem fermionischen, stark wechselwirkenden System, die sogenannte fermionische Superfluidität unterhalb einer Schwellentemperatur. Die genauen Ursachen dieses spektakulären Effekts sind noch weitgehend unbekannt, aber die physikalischen Gegebenheiten eines ultrakalten Gases bei einem Millionstel Kelvin über dem absoluten Nullpunkt sind dieselben wie bei dem bereits oben genannten seltenen Helium-Isotop (ein Tausendstel Kelvin), einem Supraleiter (einige Kelvin), Kernmaterie (eine Mil-

liarde Kelvin) und Neutronensternen (jenseits von zehn Milliarden Kelvin).

Das Auffinden derart universellen Verhaltens bildet das zentrale Motiv des Sonderforschungsbereichs „Isolierte Quantensysteme und Universalität unter extremen

Zentrum für Quantendynamik

Das Zentrum für Quantendynamik wurde im Jahr 2010 im Rahmen des Zukunftskonzepts der Universität Heidelberg eingerichtet und befasst sich mit der Grundlagenforschung im Bereich der Quantenphysik. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Zentrums erforschen unter anderem Phänomene nahe dem absoluten Nullpunkt der Temperatur sowie quantenmechanische Effekte in ultraschnellen Prozessen bis hin zu biologisch relevanten Vorgängen. Im Vordergrund stehen Fragen der Dynamik von Systemen und der Entwicklung von Nicht-Gleichgewichtszuständen. Beteiligt sind Arbeitsgruppen aus der Fakultät für Physik und Astronomie, der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften sowie aus dem Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik. Mitgründer und Leiter des Zentrums ist Prof. Dr. Matthias Weidemüller.

<http://cq.d.uni-heidelberg.de>

„Im digitalen Zeitalter wird jegliche Information durch physikalische Systeme repräsentiert.“

Bedingungen“, der vor drei Jahren an der Universität Heidelberg eingerichtet wurde. Darüber hinaus beschäftigt sich eines der sieben „Comprehensive Projects“ innerhalb des kürzlich gewonnenen Exzellenzclusters „STRUKTUREN“ mit der Frage, welche fundamentalen und emergenten Phänomene die Quantenstruktur und -dynamik in komplexen Quantensystemen bestimmen. In beiden Projekten spielen die synthetischen Modellsysteme, wie sie durch ultrakalte Quantengase realisiert werden können, eine wichtige Rolle.

... Zeit für den Endspurt. Jetzt heißt es noch, eine der heißesten Entwicklungen in der Physik in Heidelberg, die von großer Bedeutung in unserem digitalen Zeitalter ist, einzuführen, ohne den roten Faden zu verlieren. Vielleicht hilft ja Landauers berühmtes Zitat „Information ist physikalisch“ ...

Die Endlichkeit von Information

In noch einem anderen, mit der digitalen Revolution verbundenen Zusammenhang spielt die absolute Temperatur eine wichtige Rolle. Sie stellt nicht nur eine Beziehung zwischen der Energie und der Entropie eines Systems her, sie ist auch von essenzieller Bedeutung für die Verarbeitung von Information. Eine der unausgesprochenen Voraussetzungen der Entwicklungen von Cloud-Computing, Industrie 4.0 und Künstlicher Intelligenz ist die Annahme, dass Information unbegrenzt zu vermehren ist und ohne weitere Einschränkungen prozessiert werden kann. Dem ist nicht so. Bereits jetzt sind – abhängig von der Art der Berechnung – Computersysteme, das Internet und die Vielzahl von Cloud-Diensten für fünf bis zehn Prozent des weltweiten Energieverbrauchs verantwortlich. Bildlich gesprochen

entsteht in irgendeinem Computerzentrum jedes Mal ein kleines CO₂-Wölkchen, wenn man bei Google für eine Suchanfrage die Enter-Taste drückt.

Der tiefere Grund hierfür liegt darin, dass jegliche Information im digitalen Zeitalter durch physikalische Systeme repräsentiert wird. Und die Vernichtung dieser Information erfordert ein durch die Temperatur des Systems festgelegtes Quantum an Energie. Der amerikanische Physiker Rolf Landauer hat dies im Jahr 1961 in seinem mittlerweile berühmt gewordenen Prinzip formuliert und damit die Grundlage dafür gelegt, dass Information, Energie und Entropie auf derselben Ebene gedacht werden müssen. Diese Einsicht erlaubte dem amerikanischen Physiker Charles Bennett in den 1980er-Jahren den Exorzismus des „Maxwell’schen Dämons“, ein Gedankenexperiment, bei dem ein Wesen mit unbegrenzter Informationskapazität ein Gas ohne Arbeitsaufwand in einen kälteren und einen

Quantensysteme unter extremen Bedingungen

Der Sonderforschungsbereich „Isolierte Quantensysteme und Universalität unter extremen Bedingungen“ (SFB 1225) 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 beobachtet werden können. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchen mit gemeinsamen Herangehensweisen sowohl zeitabhängige Phänomene als auch Gleichgewichtseigenschaften, um mit diesem neuen Ansatz aktuelle Forschungsfragen fachübergreifend bearbeiten zu können.

Beteiligt am Sonderforschungsbereich ISOQUANT sind Arbeitsgruppen des Instituts für Theoretische Physik, des Kirchhoff-Instituts für Physik und des Physikalischen Instituts der Universität Heidelberg sowie Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg und der Technischen Universität Wien (Österreich). Sprecher ist Prof. Dr. Jürgen Berges vom Institut für Theoretische Physik. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert den 14 Teilprojekte umfassenden SFB, der im Juli 2016 seine Arbeit aufnahm, mit rund 10,5 Millionen Euro.

http://isoquant.uni-heidelberg.de/index_de.php

TEMPERATURES AT ROCK BOTTOM

THE COLDEST GAS IN THE UNIVERSE

MATTHIAS WEIDEMÜLLER

Why does an absolute zero point of temperature exist? How close can one get to this point? And which effects are to be expected there? Such questions first emerged in the 19th century, when the physical principles underlying the Industrial Revolution were developed. In the 21st century, they are being raised once again, in the wake of spectacular successes in the cooling of gases, and they play an important role in the development of quantum technologies within the framework of the “second quantum revolution”. At temperatures beyond one billionth of a degree above absolute zero, quantum physics exhibits a rich variety of exotic and extravagant phenomena.

Atoms form macroscopic matter waves, or they show effects that are usually only associated with elementary particles. There are also previously unforeseen possibilities of using ultracold atomic gases to simulate complex quantum systems such as superconductors or novel materials. We may gain new insights into the relation between a system’s temperature and the energy required to process information. Using ultracold atoms, we can develop approaches that broaden our concept of information, taking us far beyond the current digital age.

That is why, at Heidelberg University, quantum phenomena close to absolute zero are a key topic of research, for instance within the DFG Collaborative Research Centre “Isolated Quantum Systems and Universality under Extreme Conditions” and the Cluster of Excellence “STRUCTURES”. ●

PROF. DR MATTHIAS WEIDEMÜLLER has held the Chair of Experimental Physics at Heidelberg University since 2008 and is the founding director of the Heidelberg Center for Quantum Dynamics. From 1997 to 2003, he conducted research at the Max Planck Institute for Nuclear Physics in Heidelberg, and then accepted a professorship at the Institute of Physics of the University of Freiburg, where he worked until 2008. He completed research stays in Paris (France), Amsterdam (Netherlands), São Paulo (Brazil) and Innsbruck (Austria). Working at the University of Science and Technology of China, he set up a laboratory in Shanghai – at which he also teaches and conducts research – within the framework of the “1000 Talents Program” of the Chinese Academy of Sciences. Matthias Weidemüller is a fellow of the American Physical Society and of the Marsilius Kolleg of Heidelberg University. His research group investigates basic questions of modern quantum physics at different levels of complexity.

Contact: weidemueller@
uni-heidelberg.de

**“The magical state in which
all atoms are at rest
determines the absolute zero
point of temperature.”**

wärmeren Anteil teilt. Dieser Temperaturunterschied hätte mittels einer Wärmekraftmaschine zur Energieerzeugung genutzt werden können, wodurch der Zweite Hauptsatz der Wärmelehre verletzt worden wäre. Aus Landauers Prinzip aber folgt: Der Dämon würde genau die Energie benötigen, die gewonnen werden könnte, um die angesammelte Information über die einzelnen Gasmoleküle wieder zu löschen.

Entstehung, Rolle und Aufdeckung von Struktur

Warum gibt es in der Nähe von Sternen Planeten und nicht nur Staub? Wie können wir neuronale Aktivitätsmuster im Gehirn besser verstehen? Welche fundamentalen Zusammenhänge bestehen zwischen mathematischen und physischen Strukturen? Mit solchen Fragen zur Entstehung, Rolle und Aufdeckung von Struktur in einem weiten Feld von Naturphänomenen, die von der subatomaren Teilchenphysik zur Kosmologie und von der fundamentalen Quantenphysik zur Neurowissenschaft reichen, beschäftigt sich seit Januar 2019 der Exzellenzcluster „STRUKTUREN: Emergenz in Natur, Mathematik und komplexen Daten“.

Die rund 100 beteiligten Wissenschaftler aus Physik, Mathematik und Informatik untersuchen in sieben „Comprehensive Projects“, wie Struktur, kollektive Phänomene und Komplexität durch das Zusammenspiel vieler Freiheitsgrade aus den grundlegenden Gesetzen der Physik entstehen. Sie untersuchen dabei Modellsysteme mit einer Kombination von mathematischer Theorie, numerischer Simulation und neuartigen analogen Rechnern. Dabei werden moderne Methoden der Datenanalyse angewandt und weiterentwickelt sowie neue Resultate und Ideen aus Geometrie und Topologie in Anwendungen übertragen. Die Konzepte und Methoden sind auch von zentraler Bedeutung, um relevante Strukturen in großen Datenmengen zu finden und innovative analoge Rechner zu entwickeln.

Der Exzellenzcluster wurde 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 sind Prof. Dr. Manfred Salmhofer (Institut für Theoretische Physik), Prof. Dr. Anna Wienhard (Mathematisches Institut) und Prof. Dr. Ralf S. Klessen (Zentrum für Astronomie).

www.thphys.uni-heidelberg.de/~structures

Eine für unsere Zeit wichtige Konsequenz ist, dass wir über Nachhaltigkeit in Bezug auf die endliche Ressource Information ähnlich nachdenken müssen, wie wir dies bereits für die Energieversorgung tun. Auch wenn der stetig zunehmende Energieverbrauch heutiger Computer noch weit von diesem Landauer-Limit entfernt ist, ist bereits absehbar, dass diese Grenze in absehbarer Zukunft erreicht werden könnte. Daher werden bereits jetzt weltweit neue Wege der Informationsverarbeitung erforscht, die Energie effizienter nutzen.

Ein Beispiel für den schonenden Umgang mit Ressourcen bietet das Gehirn: Es benötigt für all die komplexen Aufgaben, die es zu bewältigen hat, weniger Energie als eine Glühbirne (oder 20 Smartphones). Einen radikalen Ansatz, Informationsverarbeitung neu zu konzipieren und zu realisieren, verwirklichen wir derzeit auf Basis der einmaligen Möglichkeiten, die Heidelberg bietet, im Rahmen eines weiteren „Comprehensive Projects“ innerhalb von STRUKTUREN. Im Zentrum der Aktivitäten steht dabei die Kombination aus ultrakalten Quantensystemen – in denen Informationen reversibel und damit ohne Energieverlust verarbeitet werden können – mit neuronalen Netzwerken. Sie werden beispielsweise in der neuromorphen Plattform „BrainScaleS“ am „European Institute for Neuromorphic Computing“ in Heidelberg bereitgestellt, um die Topologie des Gehirns elektronisch nachzubilden. Und nicht zuletzt motiviert uns die Hoffnung, auf diese Weise der Natur das Geheimnis abzuringen, wie das Gehirn seine schier unglaublichen Leistungen vollbringen kann.

... Geschafft. Die Sonne scheint nach wie vor und selbst die Eisdiele hat die Stühle noch auf der Terrasse stehen. Vielleicht lassen sich dort im Expertenkreis der Schläu-köpfe tiefergehende Erkenntnisse gewinnen. Und beim Blick in den blauen Himmel sind ohnehin immer die besten Ideen gekommen. ●