

Ultracold Quantum Matter: Basic Research and Applications

777. WE-Heraeus-Seminar

Für viele der 80 Teilnehmenden des Seminars zur Physik ultrakalter Quantenmaterie, das vom 12. bis 16. Dezember 2022 im Physikzentrum in Bad Honnef stattfand, war dies die erste Präsenztagung nach der Pandemie. Dank tatkräftiger organisatorischer Unterstützung der Wilhelm und Else-Heraeus-Stiftung konnten weitere 50 Personen via Zoom am wissenschaftlichen Programm teilnehmen. Es bestand aus 25 eingeladenen Vorträgen internationaler Expertinnen und Experten, sechs Präsentationen engagierter Nachwuchswissenschaftler sowie knapp 50 Postern. Insbesondere vor Ort waren die Diskussionen im Plenum, während der Pausen oder aber bei den Mahlzeiten äußerst lebhaft. Hierzu haben unter anderem eine Wanderung, eine Weinprobe und die Übertragung der Halbfinalspiele der Fußballweltmeisterschaft im Hörsaal beigetragen.

Ein Schwerpunkt des Seminars bestand darin, die aktuelle Grundlagenforschung ultrakalter Quantengase zu beleuchten. So wurde kürzlich geklärt, dass die Fluktuationen eines atomaren Bose-Einstein-Kondensats in einer harmonischen Falle eher durch ein mikrokkanonisches als durch ein kanonisches Ensemble beschrieben werden. Bei dipolaren Bose-Gasen gelang es erstmals, Wirbel durch ein rotierendes Magnetfeld zu erzeugen. Außerdem wurde nachgewiesen, dass paradoxerweise thermische Fluktuationen die Erzeugung eines dipolaren Supersolids erleichtern können. Ein weiterer Durchbruch bestand darin, ein dreidimensionales Gas von heteronuklearen Molekülen durch Mikrowellenabschirmung soweit abzukühlen, dass erstmalig Quantenentartung erzielt wurde. Ferner zeigten aufwändige numerische Untersuchungen von Fermionen in optischen Gittern, dass sowohl Wechselwirkung als auch Unordnung unter Umständen eine topologische Phase induzieren. Zudem wurden in eindimensionalen Polariton-Exzitonen-Experimenten Nichtgleichgewichtseigenschaften

von photonischen Kondensaten beobachtet. Mithilfe eines Datenkollaps⁷ wurde gezeigt, dass aufgrund von Phasenfluktuationen die räumliche Kohärenz von Korrelationsfunktionen trotz vorhandener Superfluidität schneller als algebraisch zerfällt.

Im Rahmen des Seminars wurde aber auch diskutiert, wie sich ultrakalte Quantengase aufgrund ihrer extrem guten Kontrollierbarkeit beispielsweise in der Quantenmetrologie oder als Quantensimulator anwenden lassen. So erlauben es optische Gitterruhren aufgrund von Vielteilchenwechselwirkungen, die Gravitationsrotverschiebung im Bereich von einem Millimeter aufzulösen, was einer relativen Genauigkeit von $7,6 \times 10^{-21}$ entspricht. Des Weiteren gelang es durch Raman-Kopplung zweier Bose-Einstein-Kondensate, eine topologische Eichtheorie zu simulieren, bei der durch explizite Brechung der Galilei-Invarianz Chiralität auftritt. Hier besteht die faszinierende Perspektive, künftig anyonische Anregungen untersuchen zu können, die weder einer Bose-Einstein- noch einer Fermi-Dirac-Statistik genügen.

Priv.-Doz. Dr. Axel Pelster, TU Kaiserslautern
und **Prof. Dr. Carlos Sá de Melo**,
GATECH Atlanta, USA

Coping with Errors in Scalable Quantum Computing Systems

778. WE-Heraeus-Seminar

Quantencomputing entwickelt sich rasant von einer grundlagenorientierten Forschungsaktivität in Universitätslabors zu einer weltweiten Unternehmung mit stark steigenden Investitionen von Start-ups und großen Firmen, die zukünftige Anwendungsmöglichkeiten in ihren Produkten und Prozessen prüfen. Im Gegensatz zu klassischen Rechnern müssen Quantenprozessoren jedoch noch mit einer Vielzahl von Fehlern bei ihren Quantenberechnungen umgehen. Diese schränken den derzeitigen Nutzen und die Komplexität von Algorithmen noch ein.

Dieses Seminar, das vom 8. bis 11. Januar 2023 im Physikzentrum Bad Honnef stattfand, setzte sich zum Ziel, den Umgang mit Fehlern in skalierbaren Quantencomputersystemen auf dem Weg hin zu nützlichen Quantenanwendungen zu beleuchten und den aktuellen Entwicklungsstand der wichtigsten Plattformen darzustellen. Eine interdisziplinäre Gruppe von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus Informatik, Physik, Mathematik, Sicherheitsforschung und dem Ingenieurwesen diskutierte unterschiedlichste Aspekte der Quantenhardware, insbesondere inwiefern Fehlerkorrektur nötig ist, damit Quantenrechner die hohen Erwartungen der Wirtschaft erfüllen können.

Aktuell gibt es zwei grundlegende Strategien, um Fehler in Quantenprozessoren zu umgehen: Die erste besteht darin, die Fehlerrate zu reduzieren, indem die Qualität von Quantengatteroperationen auf der Hardwareebene durch eine bessere Qubit-Steuerung, Materialien oder Abschirmungen von externen Störungen erhöht wird. Dazu wurde über beeindruckende Fortschritte bei Ionen, supraleitenden Schaltkreisen und Spin-Qubits berichtet, sowohl aus der Industrie als auch von führenden akademischen Gruppen.

Die zweite Möglichkeit, mit Fehlern umzugehen, besteht darin, die Auswirkungen der Fehler auf Quantenoperationen zu messen und aktiv zu korrigieren – mit dem Ziel, einen vollständig fehlerkorrigierten, universellen Quantenprozessor zu realisieren, der also beliebige Algorithmen ausführen kann. Da der Messvorgang den Zustand eines Qubits verändert, codiert man in fehlerkorrigierten Quantenrechnern die Informationen in verschränkte Zustände von mehreren Qubits, den „logischen Qubits“, und kann so den Einfluss von lokalen Störungen reduzieren und auftretende Fehler nachweisen, ohne die Berechnungen zu stören.

Zum Auftakt des Seminars hat Daniel Gottesmann dieses Vorgehen mit dem inspirierenden Vortrag „Chancen und Herausforderungen der Fehlerkorrektur von Quantenrechnern“ eingeführt. Auch die spätere Podiumsdiskussion „Der Weg zum Quantenvorteil“ zeigte beeindruckend, dass die führenden Plattformen an der Schwelle dazu stehen, die Nützlichkeit der aktiven Fehlerkorrektur nachzuweisen. Es sind also äußerst spannende Zeiten für das Gebiet, in denen einerseits mit rasantem Tempo immer bessere und größere Quantensysteme entwickelt werden, andererseits aber noch einige Hürden durch intensive internationale Zusammenarbeit und Wissensaustausch überwunden werden müssen. Diesbezüglich war das Seminar ein voller Erfolg und wir danken der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung für die Finanzierung und ausgezeichnete Organisation.

Dr. Andreas Fuhrer, IBM Research Zürich,
Prof. Dr. Stefan Filipp, Walther-Meißner-Institut, Garching, **Prof. Dr. Frank Wilhelm-Mauch**, FZ Jülich & U Saarland,
und **Dr. Maud Vinet**, CEA Grenoble

Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung

Deadline für Anträge zur nächsten Sitzung der Stiftungsgremien:

17. März 2023
(zur Sitzung Mitte April 2023)

Bitte nehmen Sie vor der Deadline Kontakt mit der Stiftung auf.