

■ Interferometrie im freien Fall

Experimente mit einem Bose-Einstein-Kondensat in nahezu perfekter Schwerelosigkeit erlauben es, quantenmechanische Superposition und Interferenz über makroskopische Entfernungen und Zeiten zu beobachten.

Seit den ersten Experimenten zur Quantenoptik mit Neutronen ist bekannt, dass Materiewellen sowohl Demonstrationsobjekte für fundamentale Quantenphysik als auch äußerst empfindliche Sensoren für Rotation, Gravitation und andere Kräfte sein können [1]. Daher hat in den letzten zwei Jahrzehnten eine zunehmende Zahl von Forschern Atominterferometer entwickelt, die mittlerweile mit den besten klassischen Präzisionsinstrumenten konkurrieren können. Interferometer mit ultrakalten Ensembles verdünnter atomarer Gase sind dabei besonders vielversprechend, vor allem, wenn diese Ensembles bei Temperaturen von wenigen Nanokelvin Bose-Einstein-Kondensate (BEC) bilden. Aufgrund der winzigen Atomgeschwindigkeiten – die niedrigsten, die wohl auf der Erde oder im Weltraum erreichbar sind – kann man die thermische Expansion der Atomwolke minimal halten und große kohärente Aufspaltungen erzielen. Daher sind BECs ideale Objekte, um fundamentale Quantenphänomene zu untersuchen und kleine Kräfte präzise zu messen.

Forschern der QUANTUS-Kollaboration ist es nun gelungen, ein Rubidium-BEC auf einem Mikrochip zu erzeugen und es über makroskopische Distanzen und Zeiten kohärent aufzuteilen und anschließend zur Interferenz zu bringen [2]. Ein besonderes Kunststück ist das Experiment, weil es völlig autonom im freien Fall im 110 Meter hohen Fallturm des ZARM in Bremen abläuft, der bei einer internen Restbeschleunigung von wenigen $10^{-6} g$ nahezu ideale Bedingungen für Experimente unter Mikrogravitation bietet. Dabei ist das fallende Labor fast fünf Sekunden lang von der Außenwelt isoliert, bevor es in ein Auffangbecken einschlägt und dabei eine Beschleunigung von $40 g$ unbeschadet übersteht – ein technologischer Meilenstein.

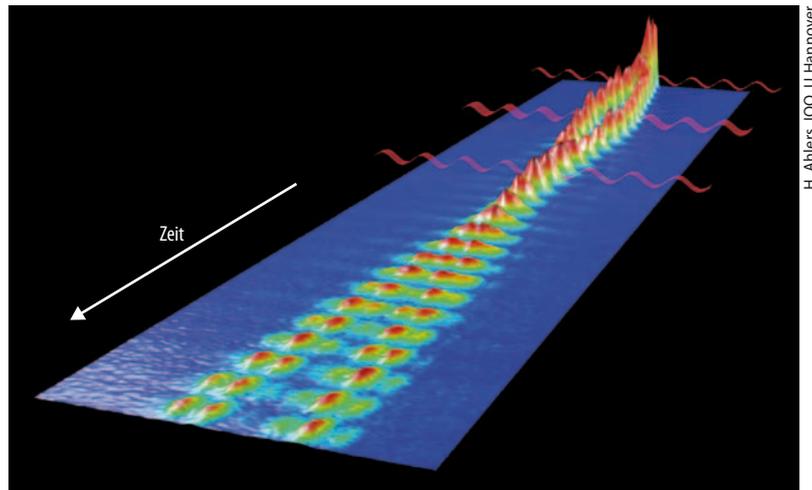


Abb. 1 Dieses Kompositbild zeigt die zeitliche Entwicklung der Atomdichte des frei fallenden Bose-Einstein-Kondensats. Zu Beginn des eigentlichen Interferometrie-Experiments spalten zwei gegenläufige Laserstrahlen (erster Strahlteiler) die Atomwolke in zwei auseinanderlaufende Teilwolken auf, die sich nach dem zweiten Strahlteiler wie-

der aufeinander zu bewegen, bevor sie sich am dritten Strahlteiler überlagern, sodass in den beiden auslaufenden Armen ein Interferenzbild entsteht. Jedes Teilbild zeigt einen Ausschnitt von $0,55 \times 0,11 \text{ mm}^2$. Alle drei Strahlteiler werden vom gleichen Laserpaar erzeugt, das jeweils kurz eingeschaltet wird.

In dem Experiment befindet sich das komplette Labor in einer Kapsel von der Größe eines Menschen: Laser, Vakuumkammer, Elektronik, optische Komponenten, Magnetspulen, Detektoren, Komponenten zur schnellen Informationsverarbeitung etc. Zunächst wird eine magneto-optische Falle auf einem Chip mit einem kalten Ensemble von Rubidium-Atomen beladen. Während der gesamte Zylinder in der evakuierten Röhre des Turms herabfällt, werden die lasergekühlten Atome in eine Magnetfalle umgeladen, in der durch Verdampfungskühlung das BEC entsteht. Wird dieses quantenentartete Ensemble aus der Falle entlassen, so treibt ein leicht abstoßendes Potential die Atome auseinander. Diese unerwünschte Beschleunigung, welche die nutzbare Beobachtungszeit reduzieren würde, lässt sich aber durch das sog. δ -Kick-Kühlen wieder aufheben. Dabei werden die schnelleren und weiter außen befindlichen Atome durch einen verzögerten kurzen Puls der Magnetfalle stärker gebremst als die langsamen

inneren, wobei die Temperatur der atomaren Wolke auf etwa 1 nK fällt.

Da jede weitere Wechselwirkung mit äußeren Magnetfeldern stören würde, pumpt man alle Atome über einen adiabatischen optischen Transfer in einen unempfindlichen Zeeman-Unterszustand. Obwohl all das nur $2,7$ Sekunden dauert, ist die Kapsel schon 36 Meter gefallen, bevor das eigentliche Experiment mit der Interferenz und Detektion der Atomwolke startet. Dafür stehen weitere $1,8$ Sekunden zur Verfügung.

Die Idee eines jeden Materiewelleninterferometers besteht darin, die Materiewellen in mindestens zwei räumlich und/oder zeitlich getrennte Teilarme zu spalten, die klassisch oft klar trennbar wären, quantenmechanisch aber ununterscheidbar sind. Auch im Fallturmexperiment wird die Wellenfunktion jedes einzelnen Atoms durch drei Pulse von zwei gegenläufigen, nichtresonanten und minimal zueinander frequenzverstimmt Laserstrahlen kohärent geteilt, über Millimeter hinweg delokalisiert und nach einer ma-

kroskopischen Zeitskala – hier bis zu 0,7 Sekunden – wieder zusammengeführt und zur Interferenz gebracht. Während dieser einzelnen Schritte lässt sich die atomare Dichteverteilung durch eine optische Absorptionsabbildung sichtbar machen (Abb. 1).

Generell wächst die Messempfindlichkeit vieler Interferometer mit der Fläche, welche die kohärent aufgefächerten Teilarme einschließen. Bei vielen modernen Atominterferometern kontrollieren drei oder vier Laserpulse mit präziser zeitlicher Abfolge die Entwicklung der atomaren Wellenfunktion [3]. Dann ist die eingeschlossene Fläche über den Impulsrückstoß festgelegt, den die Laserstrahlen auf die Atome übertragen, sowie über die Zeit zwischen den Pulsen, während derer sich die Wellenfunktion frei entwickeln kann.

Mehrere Arbeitsgruppen weltweit verbessern derzeit die Phasempfindlichkeit von Atominterferometern: sehr hohe Atomfontänen versprechen lange Fallzeiten auch im stationären Labor [5], Parabelflüge erlauben Experimente unter Schwerelosigkeit über bis zu 20 Sekunden und mehrmals pro Flug [4], Multiphotonen-Strahlteiler [5, 6] ermöglichen größere Interferometerflächen auch in kompakteren Instrumenten. Das Fallturmexperiment ist ein wichtiger Schritt, weil es lange Zeiten und große Aufspaltungen in einem raffinierten und robusten Experiment vereint. Bei einer solchen technologischen Ausgereiftheit eines autonom operierenden Mikrogravitationsexperiments liegt es nahe, bald auch den Einsatz auf einer länger fliegenden Rakete, der Internationalen Raumstation oder einem dedizierten Satelliten anzugehen.

Die ungestörte Schwerelosigkeit eröffnet interessante Perspektiven insbesondere mit Blick auf die Frage nach Dekohärenzmechanismen und Metrologie. Ihr volles Potenzial werden die Atominterferometer vor allem dann ausschöpfen können, wenn sie von den auf der Erde unvermeidlichen Störquellen isoliert sind. Subtile Tests der Quanten-

mechanik könnten davon ebenso profitieren wie Präzisionsexperimente der Geodäsie oder die Suche nach möglichen Verletzungen des Äquivalenzprinzips, nach Gravitationswellen oder anderen relativistischen Effekten.

Im Hinblick auf eine Messreihe im All sind neben der Maximierung der eingeschlossenen Fläche auch die Optimierung von Signalzu-Rausch-Verhältnis und die Reproduzierbarkeit der Phasenlagen entscheidende Schlüsselkriterien. Während letzteres noch eine experimentelle Herausforderung ist und in gewissem Rahmen auch durch die Atomzahl intrinsisch limitiert ist, sind auch Experimente denkbar, bei denen es nur darauf ankommt, Quanteninterferenz mit möglichst hohem Kontrast und über möglichst lange Zeiten und Distanzen zu beobachten, um mögliche Alternativtheorien zur Quantenmechanik in ihren Parametern einzuschränken.

Um aus dem inspirierenden atomaren Demonstrationsobjekt einen funktionierenden Sensor im All zu machen, werden noch einige zusätzliche Versuche nötig sein. Das Experiment, das viele Kollegen auch gerne bald im Orbit fliegen sehen würden, ist auf alle Fälle jetzt schon ein Schulbuchbeispiel für makroskopische Quantenphysik.

Markus Arndt

- [1] H. Rauch und A. Werner, Neutron Interferometry: Lessons in Experimental Quantum Mechanics, Oxford Univ. Press (2000)
- [2] H. Müntinga, H. Ahlers, M. Krutzik, A. Wenzlawski et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 093602 (2013)
- [3] A. D. Cronin, J. Schmiedmayer und D. E. Pritchard, Rev. Mod. Phys. **81**, 1051 (2009)
- [4] R. Geiger et al., Nat. Commun. **2**, 474 (2011)
- [5] S. Chiow et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 130403 (2011)
- [6] H. Müller et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 180405 (2008)