

Quantenmetrologie mit Materiewellen

Carsten Klempt¹, Ernst M. Rasel², Maike D. Lachmann³

Atominterferometrie mit Materiewellen .

Kalte und ultra-kalte atomare Wolken sind durch ihre gut kontrollierbaren quantenmechanischen Eigenschaften interessant als Testmassen fundamentaler Physik. Durch die Entwicklung vielfältiger Methoden und Technologien lassen sie sich in ihrem internen Zustand sowie ihren äußeren Freiheitsgraden manipulieren. Diese Methoden ermöglichen den Einsatz ultra-kalter Atome für Präzisionsmessungen mit Atominterferometern. Hier werden die Atome durch Strahlteiler in quantenmechanische Überlagerungszustände gebracht, in denen sie sensitiv auf eine Messgröße, wie Beschleunigung oder Rotation sind.

Durch ihre langen Kohärenzzeiten, ihre schmale Impulsverteilung und ihre kleine Größe haben Bose-Einstein-Kondensate (BEK) einige Vorteile für den Einsatz in Atominterferometern. Bei diesen ultra-kalten Wolken nahe dem absoluten Nullpunkt sind die Atome ununterscheidbar im gleichen Quantenzustand und werden durch eine gemeinsame Wellenfunktion beschrieben [1], [2]. Die im Vergleich zu thermischen Wolken langsamen Expansionsraten ermöglichen eine Detektion auch nach längeren freien Entwicklungszeiten und mit geschwindigkeitsselektiven Strahlteilern lassen sich höhere Beugungseffizienzen erreichen.

Verschiedene Interferometriegeometrien und Testumgebungen ermöglichen neben der Vermessung

von fundamentalen Konstanten auch Tests der Universalität des freien Falls [3], die Suche nach dunkler Energie [4], Messungen von Gravitationswellen [5] und Anwendungen zur Erdbeobachtung [6].

In Analogie zu optischen Interferometern, wie sie beispielsweise kürzlich zum spektakulären direkten Nachweis von Gravitationswellen [7] verwendet wurden, basieren auch Materiewelleninterferometer auf der Trennung und Rekombination von Wellen. Im Gegensatz zu optischen Interferometern tauschen hier allerdings Materie und Licht die Rollen: Strahlteiler und Spiegel werden durch Laserstrahlen realisiert und erzeugen Materiewellenüberlagerungen. Eine der meist genutzten Anordnungen ist die Mach-Zehnder-Geometrie, die in *Abbildung 7.1* schematisch dargestellt ist. Dabei werden alle Atome eines Ensembles kohärent in eine Superposition zweier unterschiedlicher Zustände überführt und damit auf zwei getrennte Pfade gelenkt. Nach einer freien Entwicklungszeit T , in der sich ein Phasenunterschied zwischen den beiden Pfaden aufbaut, werden diese nochmals miteinander gekoppelt und interferieren miteinander. Dies bedeutet, dass abhängig vom Phasenunterschied zwischen den beiden Pfaden, am Interferometerausgang verschiedene Zustandsbesetzungen detektiert werden. Durch dieses Signal kann dann auf die zu vermessende Größe Rückschluss gezogen werden. Hängt der Phasenunterschied beispielsweise vom Magnetfeld ab, so kann auf diese Weise das Magnetfeld bestimmt

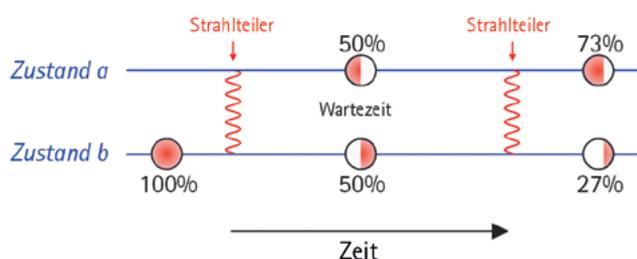


Abbildung 7.1:

Funktionsweise eines Atominterferometers. Ein Atom wird in einen Überlagerungszustand aus Zuständen a und b gebracht. Während der Wartezeit ist das Atom sensitiv auf die zu messende Größe. Abhängig von deren Wert, ändert sich das Verhältnis am Ausgang.

¹ Apl. Prof. Dr. Carsten Klempt, Jahrgang 1976, ist seit 2016 außerplanmäßiger Professor an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2016 ist er Mitglied des Vorstands des Sonderforschungsbereichs 1227 „Designed quantum states of matter“ (DQ-mat). Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Quanten-Atomoptik, der Atominterferometrie, und der Ultrakalten Quantengase. E-Mail: klempt@iqo.uni-hannover.de

² Prof. Dr. Ernst M. Rasel, Jahrgang 1965, ist Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsschwerpunkte sind Atomoptik, Quantenoptik sowie Präzisionssensoren für Raum und Zeit. E-Mail: rasel@iqo.uni-hannover.de

³ Maike D. Lachmann, Jahrgang 1990, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Quantenoptik und arbeitet an den MAI-US-Projekten. Ihre Forschungsschwerpunkte sind Quantengase unter Schwerelosigkeit, insbesondere für Weltraumanwendungen. E-Mail: lachmann@iqo.uni-hannover.de

werden. Alternativ können die beiden Pfade auch räumlich getrennt werden. Verlaufen sie entlang verschiedener Höhen des Gravitationspotentials, kann die Gravitation gemessen werden; haben sie unterschiedliche Geschwindigkeiten, können Beschleunigung oder Rotation bestimmt werden. Mit einem Vergleich von Interferometern verschiedener atomarer Spezies können auch differentielle Messungen durchgeführt werden.

Atominterferometrie in Mikrogravitation

Ein Ansatz zur Verbesserung derzeitiger Messungen ist eine Erhöhung der Genauigkeit, welche quadratisch mit der freien Entwicklungszeit im Interferometer steigt. Auf der Erde in typischen Laboraufbauten kommt die Wolke bereits nach etwa hundert Millisekunden auf dem Boden auf. Deshalb bergen Weltraummissionen mit quasi unbegrenzter freier Fallzeit großes Potential.

In der QUANTUS-Kollaboration (Quantengase Unter Schwerelosigkeit) wurde an der Idee von frei fallenden Laboratorien gearbeitet. Hierbei fällt die Apparatur zum Betrieb der Experimente mit den Atomen mit. In den vergangenen Jahren ist es unserer Kollaboration gelungen, im Fallturm Bremen BEKs über eine Zeitspanne von zwei Sekunden Schwerelosigkeit zu erzeugen und zu untersuchen [8]. Dabei wurde die gesamte Experimentkapsel im evakuierten Turm aus einer Höhe von etwa 110 Metern fallen gelassen. Auch Interferometer in verschiedenen Konfigurationen wurden realisiert [9]. Durch die Entwicklung von Methoden, wie einer magnetischen Kollimation [10], konnten die Expansionsraten weiter reduziert und die Wolke nach sekundenlangem freien Fall

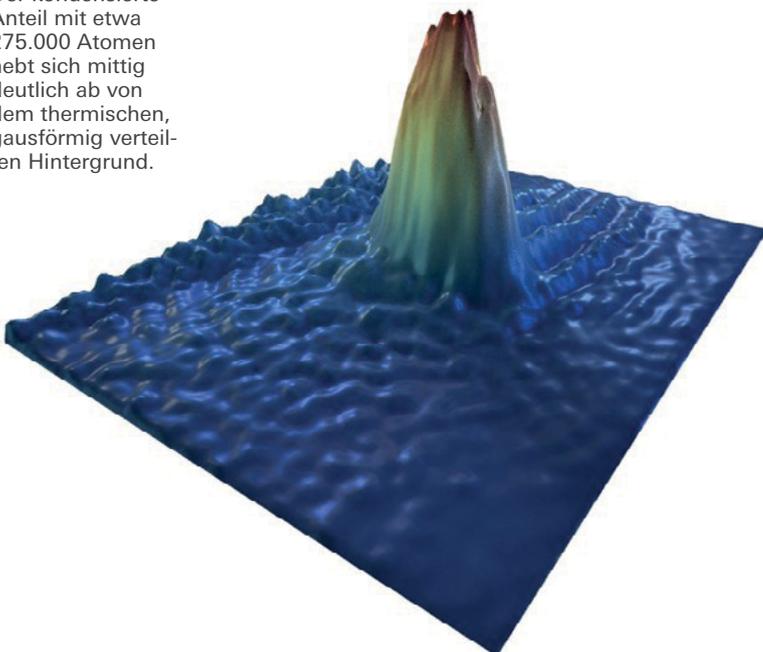
noch detektiert werden. Dabei ist die Kontrolle über die Position und Geschwindigkeit der Wolke von ebenso großer Bedeutung für präzise Messungen. Deshalb wurden Studien zu Transportprotokollen, wie dem *Shortcut to adiabaticity* [11], und zur Nutzung von *Optimal-Control*-Verfahren [12] durchgeführt.

Um noch längere Fallzeiten zu ermöglichen, werden derzeit Apparaturen für Weltraumwendungen gebaut. Raketenmissionen eröffnen Experimentierzeiten von mehreren Minuten und Satelliten bieten zeitlich fast unbegrenzte Schwerelosigkeit.

Am 23. Januar 2017 ist es der MAIUS-Kollaboration unter Federführung der Leibniz Universität Hannover erstmals gelungen, Bose-Einstein-Kondensate im Weltraum an Bord einer Forschungsrakete zu erzeugen [13] (siehe A. 2) und deren Kohärenz durch Interferenzexperimente zu demonstrieren. Durch eine Intensitätsmodulation der Lichtfelder für die Strahlteiler wurde der Wolke zudem eine Phase aufgeprägt, die nach der freien Expansion in einem räumlichen Streifenmuster resultierte. So konnten Verschiebungen unterschiedlicher Spinorkomponenten der Wolke zueinander aufgrund von Restmagnetfeldern sichtbar gemacht werden.

Die Mission MAIUS-1 (Materiewellen-Interferometrie unter Schwerelosigkeit) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) startete um 3.30 Uhr morgens vom schwedischen Startplatz ESRANGE (siehe *Abbildung 7.3*) in der Nähe der Stadt Kiruna nördlich des Polarkreises und flog bis zu einer Höhe von 243 Kilometern. Ein Team aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern von insgesamt elf deutschen Forschungseinrichtungen, sowie der schwedische Startplatzbetreiber überwachten die autonom operierende Nutzlast und den Flug der Rakete vom Boden aus. Bereits während der Beschleunigungsphase konnte die Robustheit der Apparatur durch den stabilen Betrieb von Kühlmethoden, wie der magneto-optischen Falle, auch bei statischen Beschleunigungen von 12 g und Vibrationen gezeigt werden. Während der antriebslosen Flugphase, oberhalb von etwa 100 Kilometern bis zum Scheitelpunkt und zurück, standen sechs Minuten Experimentierzeit bei schwerelosen Bedingungen zur Verfügung. Insgesamt wurden 86 Experimente in dieser Zeit durchgeführt, welche die Manipulation der Wolken und verschiedene Schritte für präzise Materiewellen-Interferometrie getestet haben. So wurde der Phasenübergang optimiert, genauso wie die interne Zustandspräparation mit einer schnellen adiabatischen Passage. Eine Vermessung der Auskopplung aus der Magnetfalle konnte die Reproduzierbarkeit der BEK-Erzeugung demonstrieren. Durch Experimente mit Strahlteilern und Scherinterferometrie-

Abbildung 7.2: 3D-Visualisierung der atomaren Dichteverteilung des ersten im Weltraum erzeugten Bose-Einstein-Kondensats. Der kondensierte Anteil mit etwa 275.000 Atomen hebt sich mittig deutlich ab von dem thermischen, gausförmig verteilten Hintergrund.



Geometrien wurde die Kohärenz der Kondensate nachgewiesen. Die Landung der Nutzlast erfolgte ebenfalls planmäßig an einem Fallschirmsystem im tief verschneiten Nordschweden. Die Apparatur wurde mit drei Tagen Verzögerung aufgrund der Wetterbedingungen geborgen und den Forschern wieder ausgehändigt. Nach gründlicher Inspektion und kleinen Reparaturen konnte die Nutzlast wieder in Betrieb genommen und es konnten erneut Bose-Einstein-Kondensate erzeugt werden. Die bei dieser Mission gewonnenen Erkenntnisse gehen in die Entwicklung neuer Methoden ein, welche für zukünftige Weltraummissionen notwendig sind.

Das Projekt wurde vom DLR-Raumfahrtmanagement in Bonn mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert. Nach einer detaillierten Auswertung der Experimentdaten ist die nächste Raketenmission für 2021 geplant. Sie dient der Erforschung von Bose-Einstein-Kondensaten zweier Atomspezies: Neben Rubidium wird auch Kalium in die neue Apparatur integriert. Außerdem werden Strahlteiler mit Doppel-Raman-Beugung zum Einsatz kommen, gleichzeitige magnetische Kollimation beider Spezies und weitere erforderliche Schritte hin zu präzisen Tests des Einsteinschen Äquivalenzprinzips mit Materiewellen werden untersucht werden. Darüber hinaus sind die MAIUS-Raketenmissionen und die QUANTUS-Experimente im Bremer Fallturm ein wichtiges Bindeglied für die im Mai 2017 gestartete Kooperation mit der NASA (BECCAL) für geplante Experimente mit ultra-kalten atomaren Wolken auf der Internationalen Raumstation (ISS), an denen unsere Arbeitsgruppe maßgeblich beteiligt ist.

Verschränkung

Allen angestrebten Messungen ist jedoch gemein, dass die bestmögliche Präzision der Messungen durch das Schrotrauschen limitiert ist. Diese fundamentale Grenze kann man nur überwinden, indem verschränkte atomare Ensembles verwendet werden. Um das Konzept der Verschränkung zu verstehen, muss man zwei Atome betrachten. Beide seien je in einem 50-50-Überlagerungszustand der beiden Zustände *a* und *b*, und eine Messung ihres Zustands ergibt entsprechend zufällige Ergebnisse. Sind die beiden Atome nun aber verschränkt, so legt sich der quantenmechanische Zustand des einen Atoms bereits durch eine Messung des anderen fest. Misst man beim ersten Atom also Zustand *a*, so weiß man mit Sicherheit, dass das andere Atom im Zustand *b* ist. Bei einem verschränkten Atompaar ist diese Korrelation der Messergebnisse wiederum unabhängig davon, ob vor der Messung eine beliebige Kopplung zwischen den Zuständen durchgeführt wird. Es wird gleich offensichtlich, dass durch solche verschränkten



Abbildung 7.3: Start der MAIUS-1-Mission. Die Nutzlast verlässt die Startvorrichtung oben. Während der Brennphase wird die Apparatur durch Beschleunigungen von bis zu 12 g und Vibrationen bei bis zu 5.41 g_{rms} belastet.

Paare das Schrotrauschen unterboten werden kann, da die Messergebnisse zwar zufällig sind, aber zu jedem Atom in *a* auf jeden Fall genau ein Atom in *b* gehört. Im Folgenden wird beschrieben, wie Präzisionsmessungen mithilfe verschränkter Atome verbessert werden können.

Erzeugung verschränkter Atome

In mehreren Gruppen weltweit wird an Methoden zur Erzeugung verschränkter Atome geforscht [14]. Unsere Arbeitsgruppe ist dabei auf ultra-kalte Atome in Bose-Einstein-Kondensaten spezialisiert. Die Atome werden in einem BEK präpariert und im Fokus von zwei Laserstrahlen festgehalten (siehe Abbildung 7.4.1). Nun können je zwei Atome in der Wolke miteinander stoßen und so in ein Atompaar in zwei Spin-Zuständen, *a* und *b*, übergehen. Aufgrund der Energieerhaltung muss zu jedem Atom in *a* auch immer ein Atom in *b* generiert werden. So können atomare Wolken mit exakt der gleichen Anzahl von *a*- und *b*-Atomen erzeugt werden – ein sogenannter *Twin-Fock*-Zustand.

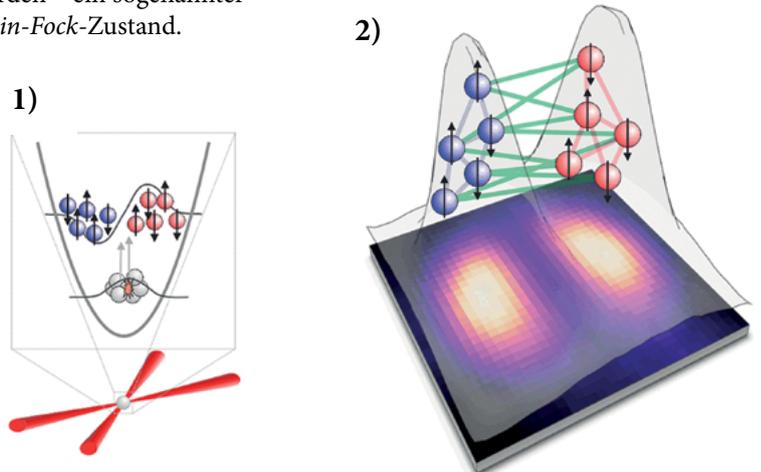


Abbildung 7.4: **1)** Die Atome werden im Fokus von zwei Laserstrahlen festgehalten. Hier können sie stoßen und Paare von Atomen im Zustand *a* (Pfeil nach oben) und *b* (Pfeil nach unten) erzeugen. Sie werden hier in einer angeregten räumlichen Mode erzeugt, sodass sich die Wolke in einen linken (blau) und einen rechten (rot) Teil trennt. **2)** Gemessenes Dichteprofil der Atomwolke, die sich klar in links und rechts aufteilt. Die Verbindungslinien symbolisieren die Verschränkung zwischen den Atomen.

Da die Atome ununterscheidbar sind, muss eine solche Wolke aus miteinander verschränkten Atomen bestehen.

Im Jahr 2011 konnten wir beweisen, dass der erzeugte Zustand tatsächlich verschränkt ist, und dass er für die Präzisionsinterferometrie jenseits der Schrotrauschgrenze tatsächlich geeignet ist [15]. Mit derselben Verschränkungserzeugung gelang uns 2016 in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt die Demonstration einer prototypischen Atomuhr, die von der Verschränkung profitiert [16]. Nichtsdestotrotz waren alle diese Ergebnisse auf interne Spinzustände beschränkt, ein Nachweis der Verschränkung zwischen räumlich getrennten atomaren Wolken war bisher nicht gelungen. Aber nur räumlich getrennte, verschränkte Atome können genutzt werden – für eine verbesserte Messung der Gravitation, der Beschleunigung und der Rotation.

2018 ist es unserer Gruppe erstmals gelungen, den erzeugten Twin-Fock-Zustand in zwei räumlich getrennte Wolken aufzuteilen und die Verschränkung zwischen den beiden Wolken direkt nachzuweisen [17]. Dazu wurden die verschränkten Atome in einem angeregten räumlichen Zustand erzeugt. Das bedeutet, dass die Atome in einer zweigeteilten Wolke präpariert wurden (siehe [Abbildung 7.4.2](#)). Wiederum ist hier jedes Atom in beiden Wolken – zu je 50 % in der rechten und in der linken Wolke. Erst durch eine Messung wird dann festgelegt, in welcher Wolke das Atom tatsächlich ist. Nun konnte bei jedem Atom gemessen werden, ob es rechts oder links und ob es im Spinzustand a oder b war. Diese Messergebnisse konnten dann mit einem Kriterium verglichen werden, das gemeinsam mit theoretischen Physikern in Bilbao speziell entwickelt worden war. Dieses Kriterium konnte nun verwendet werden, um zweifelsfrei nachzuweisen, dass die Atome in der linken Wolke mit den Atomen der rechten Wolke verschränkt sein müssen. Parallel zu den Arbeiten in Hannover wurden entsprechende Ergebnisse mit anderen Methoden durch Arbeitsgruppen in Heidelberg und Basel erzielt [17], [18], [19].

Gerade arbeiten unsere Arbeitsgruppen gemeinsam daran, verschränkte Ensembles in Spin-Zuständen herzustellen und diese mithilfe von Raman-Lasern in den Impulsraum zu transferieren. Damit wäre erstmals möglich, Atominterferometrie zur Messung inertialer Kräfte jenseits des Schrotrauschens zu betreiben. In ihrer Gesamtheit können die beschriebenen Entwicklungen dafür genutzt werden, eine bisher unerreichbare Präzision in atom-interferometrischen Messungen zu erreichen. Solch hochpräzise Atominterferometer werden/können präzise Tests fundamentaler Physik oder auch Vermessungen des Schwerfelds der Erde mit bisher unerreichter Genauigkeit möglich machen.

Literatur

- [1] S. N. Bose. „Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese“. *Zeitschrift für Physik* **26** (1924)
- [2] A. Einstein. „Quantentheorie des einatomigen idealen Gases,“. *Sitzungsbericht Kgl. Preuss. Akad. Wiss.* (1924)
- [3] T. Damour. „Testing the equivalence principle: why and how?“. *Classical and Quantum Gravity* **13**, (1996) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/13/11A/005/pdf>
- [4] Hamilton, P. and Jaffe, M. and Haslinger, P. and Simmons, Q. and Müller, H. and Khoury, J. „Atom-interferometry constraints on dark energy“. *Science* **349**, 849-851 (2015) <https://science.sciencemag.org/content/349/6250/849>
- [5] J. M. Hogan, M. A. Kasevich. „Atom-interferometric gravitational-wave detection using heterodyne laser links“. *Phys. Rev. A* **94**, 033632 (2016) <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.94.033632>
- [6] M. de Angelis, A. Bertoldi, L. Cacciapuoti, A. Giorgini, G. Lamporesi, M. Prevedelli et al. „Precision gravimetry with atomic sensors“. *Measurement Science and Technology* **20**, 022001 (2008) <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/022001>
- [7] B. P. Abbott et al. „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger,“. *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016) <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- [8] T. van Zoest, N. Gaaloul, Y. Singh, H. Ahlers, W. Herr, S. T. Seidel et al. „Bose-Einstein Condensation in Microgravity“. *Sciences* **328**, 1540–1543 (2010) <http://science.sciencemag.org/content/328/5985/1540.abstract>
- [9] H. Müntinga, H. Ahlers, M. Krutzik, A. Wenzlawski, S. Arnold, D. Becker et al. „Interferometry with Bose-Einstein Condensates in Microgravity“. *Phys. Rev. Lett.* **110**, 093602 (2013) <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.093602>
- [10] T. Kovachy, J. M. Hogan, A. Sugarbaker, S.M. Dickerson, C. A. Donnelly, C. Overstreet, M. A. Kasevich. „Matter wave lensing to picokelvin temperatures.“ *Physical review letters* **114**, 143004 (2015) <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.143004>
- [11] R. Corgier, S. Amri, W. Herr, H. Ahlers, J. Rudolph, D. Guéry-Odelin et al. „Fast manipulation of Bose-Einstein condensates with an atom chip“. *New Journal of Physics*, **20**, 055002 (2018) <https://doi.org/10.1088/1367-2630/20/5/055002>
- [12] S. Amri, R. Corgier, D. Sugny, E. M. Rasel, N. Gaaloul, E. Charron. „Optimal control of the transport of Bose-Einstein condensates with atom chips“. *Scientific reports*, **9**, 1–11 (2019) <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41784-z>

- [13] D. Becker, M. D. Lachmann, S. T. Seidel, H. Ahlers, A. N. Dinkelaker, J. Grosse et al. „Spaceborne Bose–Einstein condensation for precision interferometry“. *Nature* **562**, 391–395 (2018) <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0605-1>
- [14] L. Pezzè, A. Smerzi, M. K. Oberthaler, R. Schmied, and P. Treutlein (2016). Non-classical states of atomic ensembles: Fundamentals and applications in quantum metrology. arXiv:1609.01609v1
- [15] B. Lücke, M. Scherer, J. Kruse, L. Pezzè, F. Deuretzbacher, P. Hyllus, et al. (2011). Twin matter waves for interferometry beyond the classical limit. *Science* **334**, 773. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1208798>
- [16] I. Kruse, K. Lange, J. Peise, B. Lücke, L. Pezzè, J. Arlt, et al. (2016). Improvement of an atomic clock using squeezed vacuum. *Phys. Rev. Lett.* **117**, 143004. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.143004>
- [17] K. Lange, J. Peise, B. Lücke, I. Kruse, G. Vitagliano, I. Apellaniz, et al. (2018). Entanglement between two spatially separated atomic modes. *Science* **360**, 416. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aao2035>
- [18] M. Fadel, T. Zibold, B. Décamps, and P. Treutlein (2018). Spatial entanglement patterns and Einstein-Podolsky-Rosen steering in Bose-Einstein condensates. *Science* **360**, 409. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aao1850>
- [19] P. Kunkel, M. Prüfer, H. Strobel, D. Linnemann, A. Frölian, T. Gasenzer, et al. (2018). Spatially distributed multipartite entanglement enables EPR steering of atomic clouds. *Science* **360**, 413. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aao2254>

