GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Bildung und Forschung
GEFÖRDERT DURCH DIE Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung

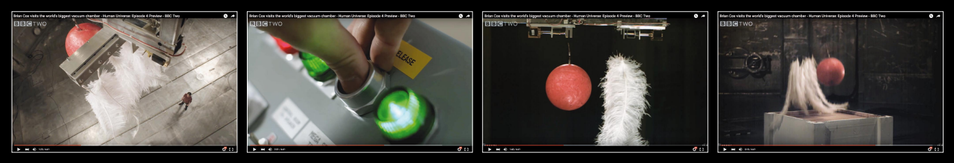
100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie

Einstein inside

Quantenexperimente in der Schwerelosigkeit

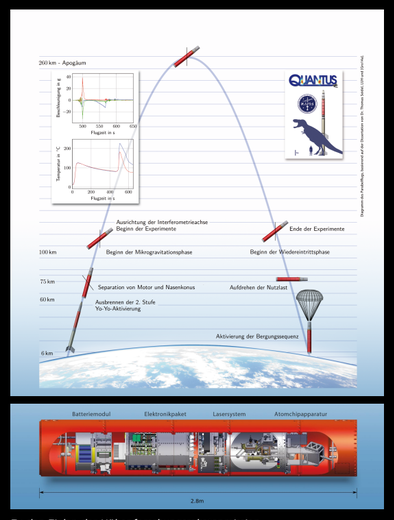
Überprüfung von Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie mit Hilfe von Materiewellen

Das Äquivalenzprinzip auf dem Prüfstand: Wie lässt sich die „Universalität des freien Falls“ experimentell testen?



Freifall-Experiment in der größten Vakuum-Kammer der Welt, ausgeführt mit einem Bowlingball und einer Feder. Diese Screensequenz stellt einen Auszug aus einer spannenden Reportage von Brian Cox, BBC2 dar.

Werden tatsächlich alle Massen bei Abwesenheit anderer Einflüsse, wie etwa des Luftwiderstands, durch die Schwerkraft gleich beschleunigt? Dies zumindest hatten die Astronauten der Apollo 15 anschaulich gezeigt, als sie auf dem Mond eine Feder und einen Hammer fallen ließen. Und geht die „Universalität des freien Falls“ sogar so weit, dass sich beispielsweise in einem frei fallenden Aufzug alle physikalischen Phänomene so verhalten, als liefen sie in der Schwerelosigkeit ab?

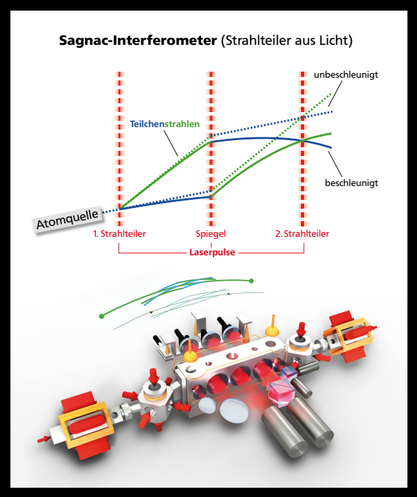


Zu den Zielen der Höhenforschungsraketenmission MAIUS-1 gehört die erstmalige Realisierung eines Bose-Einstein-Kondensats und eines Materiewellen-interferometers im Weltraum. Bei einer durchschnittlichen Flugzeit von 10 Minuten erreicht die Rakete eine Höhe von 260 Kilometern. (Montage: GD90 auf Basis der Dissertation von Dr. Thomas Seidel, LHU)

Anstelle von Hammer und Feder verwenden wir Atominterferometer, um unterschiedliche Quantengase (Bose-Einstein-Kondensate) im freien Fall miteinander zu vergleichen und somit als „Universalität des freien Falls“ zu überprüfen.

Licht wird zu Materie und Materie wird zu Licht

Traditionell basieren Interferometer auf elektromagnetischer Strahlung (z. B. Laserlicht), welche mit Strahlteilern und Spiegeln aus Materie (z. B. Glas) manipuliert wird. Im Gegensatz dazu sind die Rollen von Materie und Licht bei einem Atominterferometer vertauscht. Dort verwendet man kurze Laserpulse als Strahlteiler und Spiegel und nutzt die Interferenz von Materiewellen aus, also ein rein quantenmechanisches Merkmal mikroskopischer Teilchen (z. B. Atome).



Das CASI-Experiment an der LUH verwendet zur gleichzeitigen Messung von Beschleunigungen und Drehgeschwindigkeiten zwei gegenläufige Atominterferometer. (Bild: LHU, GD90)

Der Phasenunterschied der beiden Interferometerarme hängt vom relativen Abstand zwischen dem atomaren Wellenpaket und den Wellenfronten des Laserlichtes ab. Man kann dies ausnutzen, um Beschleunigungen und Drehgeschwindigkeiten sehr genau zu messen. Der von Beschleunigungen verursachte relative Abstand wächst dabei quadratisch mit der Zeit, so dass die Genauigkeit des Interferometers gesteigert werden kann, indem man die Freifallzeit zwischen den Laserpulsen verlängert. Dies kann mit einer kompakten Apparatur in der Schwerelosigkeit (z. B. im Fallturm oder auf Forschungsraketen und -satelliten) erreicht werden.

Bose-Einstein-Kondensate

Für präzise Interferenzmessungen verwenden wir in unseren Experimenten die kälteste Materie des Universums. In der Tat befinden sich dabei die Atome bzw. Atomwolken meist in einem besonderen Aggregatzustand, der als Bose-Einstein-Kondensat bezeichnet wird, bei dem sich der Zustand der „ununterscheidbaren Teilchen“ im System durch eine einzige quantenmechanische Wellenfunktion beschreiben lässt. Dadurch ergeben sich überraschende und nützliche Eigenschaften, die dieses besondere „fünfte Element“ einzigartig machen: zum einen sind die Atome extrem kalt (nahe dem absoluten Nullpunkt), zum anderen kann man an diesen Materiewellen ähnliche Phänomene wie beim Laserlicht beobachten.

Universität Ulm
Institut für Quantenphysik
und
Leibniz-Universität Hannover
Exzellenzcluster QUEST

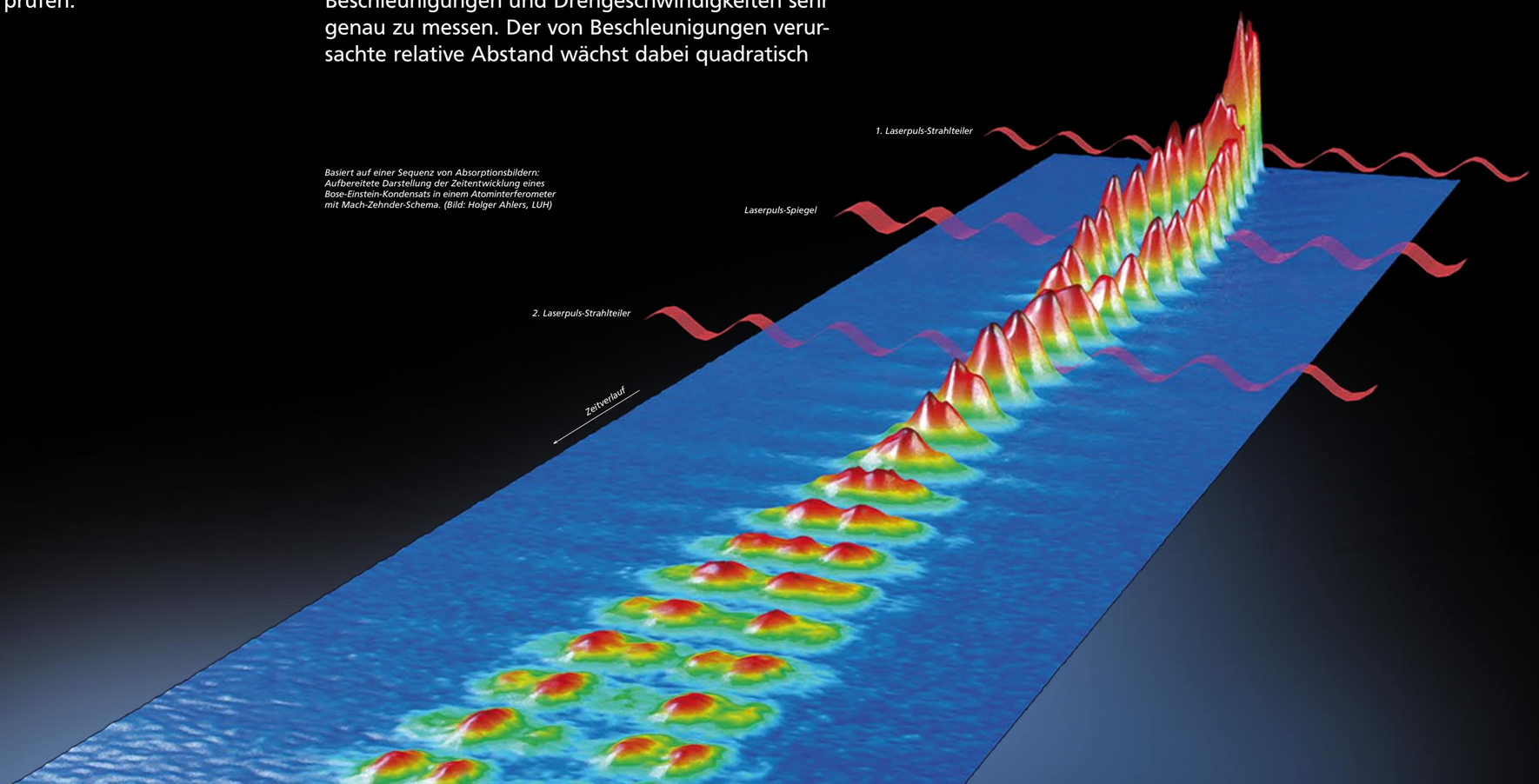
QUANTUS ist ein großes, vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) finanziertes Projekt mit dem Ziel, das Verhalten von Quantengasen, insbesondere Bose-Einstein-Kondensaten (BECs), unter Schwerelosigkeit zu untersuchen und besser zu verstehen. Die Experimente werden dazu im Freifallturm des ZARM (Zentrum für angewandte Raumfahrttechnik und Mikrogravitation) in Bremen durchgeführt und sollen zukünftig auch auf Forschungsraketen im Weltraum stattfinden.

Die Herausforderung bestand zunächst darin, den normalerweise raumfüllenden und höchstempfindlichen Aufbau auf eine mannsgroße Kapsel zusammenzuschrumpfen, die außerdem Beschleunigungen von bis zu 50 g ohne jegliche Schäden überstehen muss. Die Konzeption und Umsetzung der kompakten, aber dennoch widerstandsfähigen Apparatur ist eine großartige technische Leistung. Dies war nur unter enormem Aufwand und unter Beteiligung vieler Institute mit verschiedenen Expertisen zu meistern. Zugleich erfordert die Durchführung und Auswertung der laufenden und der kommenden Forschungsaktivitäten einen engen Austausch zwischen Theorie und Experiment.

Folgende Einrichtungen sind beteiligt:

- *Leibniz-Universität Hannover*
- *ZARM / Universität Bremen*
- *Humboldt-Universität zu Berlin*
- *Universität Hamburg*
- *Ferdinand-Braun-Institut (FBH) für Höchstfrequenztechnik in Berlin*
- *Universität Ulm*
- *TU Darmstadt*
- *Johannes-Gutenberg-Universität Mainz*
- *DLR RY und MORABA*
- *Max-Planck-Institut für Quantenoptik, München*
- *École Normale Supérieure (Paris, Frankreich)*
- *Universität Birmingham (UK)*

GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Basiert auf einer Sequenz von Absorptionsbildern: Aufbereitete Darstellung der Zeitentwicklung eines Bose-Einstein-Kondensats in einem Atominterferometer mit Mach-Zehnder-Schema. (Bild: Holger Ahlers, LUH)

Design: www.gd90.de