

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Brüche im Weltbild der Physik

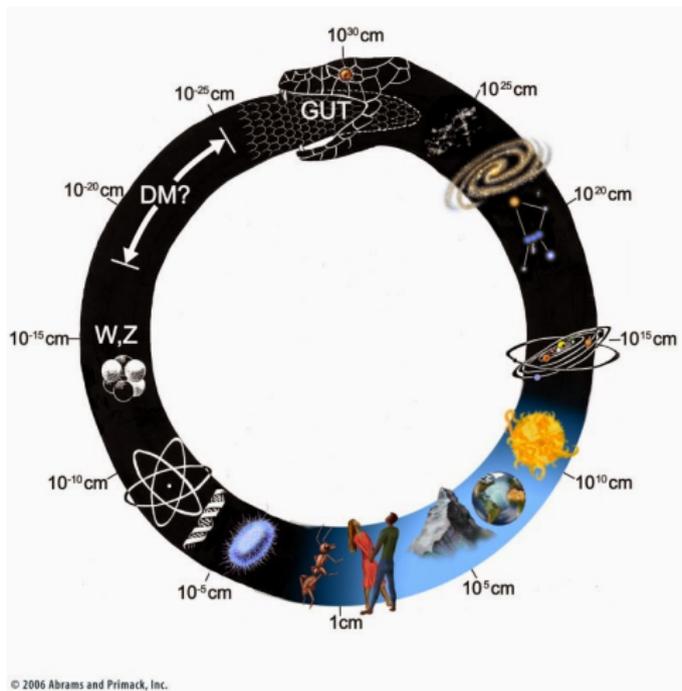
Quantenmechanik und Gravitation

Domenico Giulini

ZARM Bremen
Leibniz Universität Hannover
Riemann Zentrum für Geometrie und Physik

DPG-Frühjahrstagung 2017 in Bremen
Sektion Materie und Kosmos
– Abendvortrag –

Größendimensionen unserer physikalischen Welt



Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



Es begann - wie immer - mit einer "dummen" Frage



Hermann von Helmholtz 1821-1894

- ▶ 1888 stellte der *Deutsche Verein für Gas- und Wasserfachmänner* eine Anfrage beim Präsidenten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Hermann von Helmholtz, nach einer Evaluation der bis dahin benutzten Standards für Lichtstärke.
- ▶ Darauf aufbauend sollte eine nicht-invasive Methode zur Temperaturbestimmung von Glühstrümpfen erdnen werden.

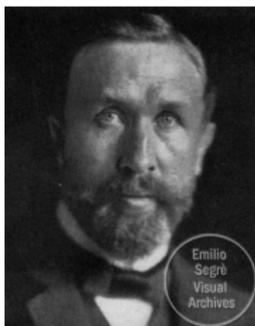
Das PTR-Doppelgespann



Ernst Pringsheim 1859-1917



Otto Lummer 1860-1925



Ferdinand Kurlbaum 1857-1927



Heinrich Rubens 1865-1922

- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft

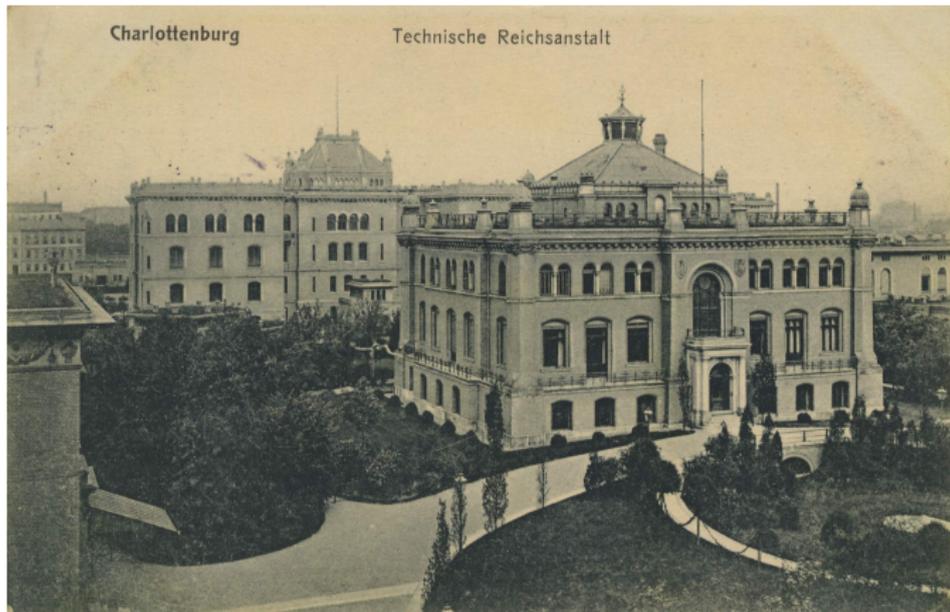
- Materie als Welle
- Interpretation?

Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

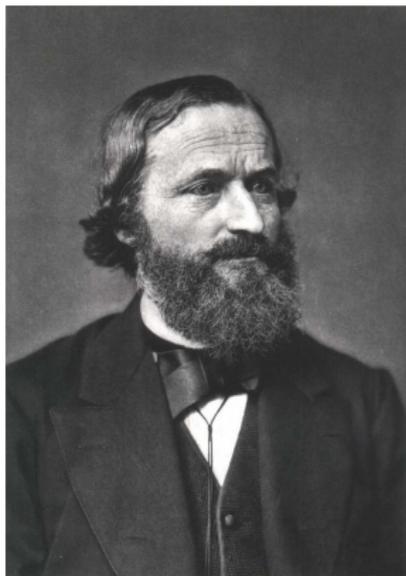
Ausblick Kosmologie

Schlusswort



- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



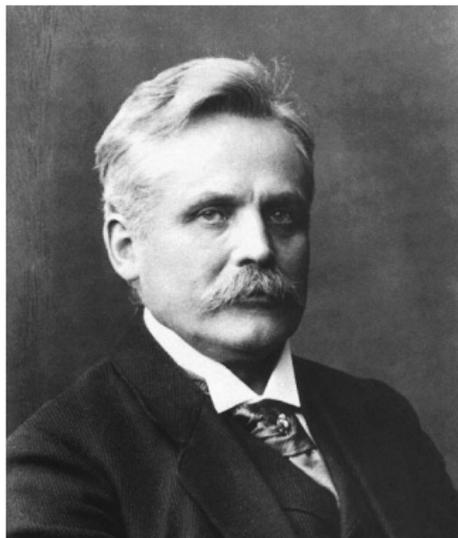
Gustav Kirchhoff 1824-1887

- ▶ Aus der Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichts zwischen EM-Strahlung und Materie folgert Gustav Kirchhoff 1859 die Existenz einer *universellen* Funktion

$$\rho(\nu, T)$$

für die spektrale Energiedichte der EM-Strahlung bei Temperatur T .

- ▶ Unter *spektrale Energiedichte* versteht man die in der EM-Strahlung pro Volumen und Einheits-Frequenzintervall gespeicherte Energie.



Wilhelm Wien 1866-1938 (NP 1911)

- ▶ Durch raffinierte Überlegungen konnte Wilhelm Wien 1893 weiter zeigen, dass aus der Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichts zwischen EM-Strahlung und Materie gefolgert werden kann, dass

$$\rho(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T),$$

- ▶ Damit ist das Kirchhoff'sche Problem reduziert auf das Auffinden der universellen Funktion f einer Variablen.

- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

1. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz:

$$\nu_{\max} = K_1 T.$$

2. Das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz:

$$\int_0^{\infty} d\nu \rho(\nu, T) = K_2 T^4.$$

3. Die Konstanten K_1 und K_2 sind *universell*, d.h. materialunabhängig, und können berechnet werden, sobald die Funktion f bekannt ist.
4. So entstand das theoretische Problem, die Funktion f aus allgemeinen Prinzipien der Mechanik, Thermodynamik und Elektrodynamik abzuleiten, was Max Planck (1858-1947) in den Jahren 1895-1900 scheinbar zweimal gelang, sich dann aber doch im Rahmen der **klassischen Physik** als **unlösbar** erwies.

- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



Albert Einstein 1879-1955 (NP 1921)

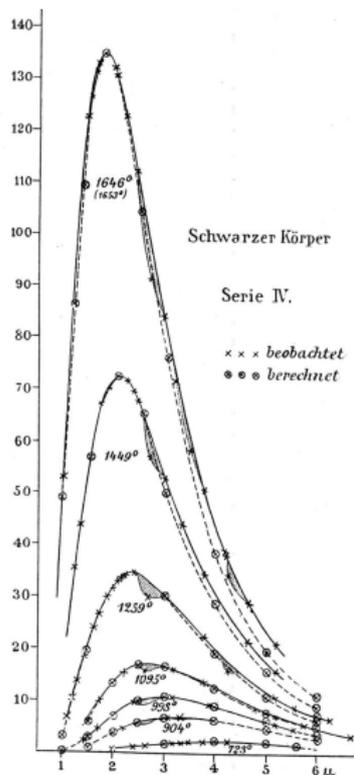
- ▶ „Es wäre erhebend, wenn wir die Gehirnschubstanz auf eine Waage legen könnten, die von den theoretischen Physikern auf dem Altar dieser universellen Funktion f hingeopfert wurde; und es ist diesen grausamen Opfern kein Ende abzusehen!

Noch mehr: auch die klassische Mechanik fiel ihr zum Opfer, und es ist nicht abzusehen, ob Maxwells Gleichungen der Elektrodynamik die Krisis überdauern werden, welche diese Funktion f mit sich gebracht hat.“

Vorgeschichte der QT: „Notwendig“ oder „Hinreichend“

- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



Lummer und Pringsheim 1899

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot h\nu \exp(-h\nu/kT)$$

(Wien → Photonenbild)

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot kT$$

(Rayleigh-Jeans → Wellenbild)

Der Bruch zwischen klassischer und Quantenphysik

- ▶ Planck ist überzeugter Anti-Atomist. Er glaubt, die spektrale Energieverteilung aus den Gesetzen der klassischen Physik (Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik) ableiten zu können. 1899 zeigt er, dass das Wien'sche Gesetz mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik verträglich ist, glaubt aber irrtümlich, gezeigt zu haben, es sei eine notwendige Folge seiner Annahmen und damit der klassischen Physik. Auf den Unterschied von „notwendig“ und „hinreichend“ wird er sofort freundlich durch Lummer und Pringsheim hingewiesen.
- ▶ Im gleichen Jahr zeigen die Messungen an der PTR Abweichungen im Sinne des Rayleigh-Jeans Gesetzes, das eigentlich die notwendige Folge der klassischen Physik (Wellentheorie des Lichts) ist. Wie Einstein 1905 in seiner Nobelpreisarbeit zeigt, ist das Wien'sche Gesetz äquivalent der Annahme von räumlich lokalisierten und statistisch unabhängigen Lichtquanten der Energie

$$E = h\nu$$

- ▶ Wiederholt stellt Einstein in den Jahren 1905-1916 fest, dass das Planck'sche Strahlungsgesetz kein Zurück zur klassischen Physik erlaubt und resümiert 1909: „Die Planck'sche Theorie [Strahlungsgesetz] annehmen heißt nach meiner Meinung geradezu die Grundlagen [Maxwell'sche Theorie] unserer Strahlungstheorie verwerfen“.

[Größendimensionen](#)[Quantenmechanik](#)[- Herkunft](#)

- Materie als Welle
- Interpretation?

[Gravitation](#)

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

[Ausblick Kosmologie](#)[Schlusswort](#)

- ▶ Planck hingegen ist der Auffassung: „Man müsste zunächst versuchen, die ganze Schwierigkeit der Quantentheorie zu verlegen in das Gebiet der *Wechselwirkung* zwischen Materie und strahlender Energie; die Vorgänge im reinen Vakuum könnte man dann noch vorläufig mit den Maxwell'schen Gleichungen erklären.“ Einsteins Argumente zeigen aber klar, dass das unmöglich ist.
- ▶ Rückschauend sagt Planck 1931: Das war eine rein formale Annahme [Energiequantelung], und ich dachte mir eigentlich nicht viel dabei, sondern eben nur das, daß ich unter allen Umständen, koste es, was es wolle, ein positives Resultat herbeiführen müßte. [...] Kurz zusammengefaßt kann ich die ganze Tat als einen Akt der Verzweiflung bezeichnen. Denn von Natur bin ich friedlich und bedenklichen Abenteuern abgeneigt.“
- ▶ *Die Quantentheorie ist also entstanden aus der experimentellen Beobachtung von Abweichungen eines Gesetzes, das irrtümlicherweise als notwendige Folge der klassischen Physik (Wellentheorie des Lichts) angesehen wurde, das aber in der Tat auf einem reinen Teilchenbild des Lichtes aufbaut. Die gemessenen Abweichungen entsprechen gerade dem gleichzeitig vorhandenen Wellencharakter, also dem klassischen Aspekt. Das Planck'sche Strahlungsgesetz vereinigt beide Bilder.*

- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



Prince Louis-Victor de Broglie 1892-1987 (NP 1929)

- ▶ In seiner Dissertation (1924) spekuliert De Broglie über die Verbindbarkeit der beiden Einstein'schen Gleichungen

$$E = mc^2$$

$$E = h\nu$$

und ordnet so jeder Masse einen hypothetisches *periodisches Phänomen* zu mit Frequenz

$$\nu = mc^2/h.$$

- ▶ Er zeigt, dass dieses *innere* periodische Phänomen stets in Phase ist mit einer *äußeren* Welle der Wellenlänge

$$\lambda = h/p$$

und propagiert die *physikalische Realität* dieser *Materiewelle*.

Größendimensionen

Quantenmechanik

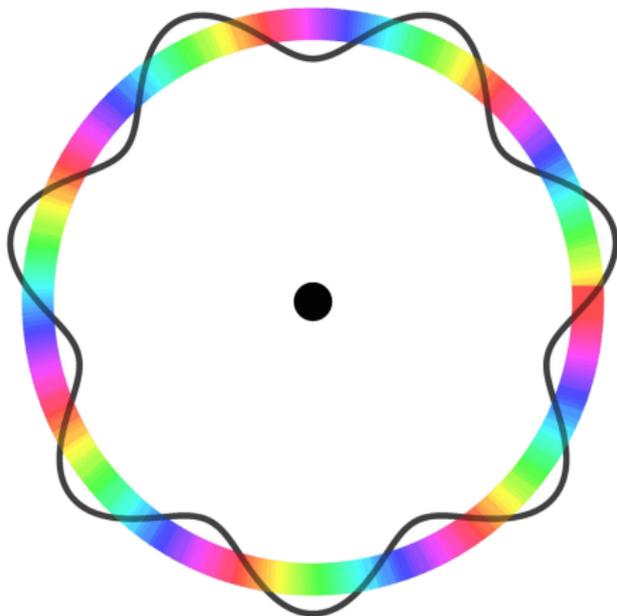
- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort



Quantisierung als Eigenwertproblem

„Quantisierung als Eigenwertproblem“ (1926)

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V\right)\psi = E\psi$$



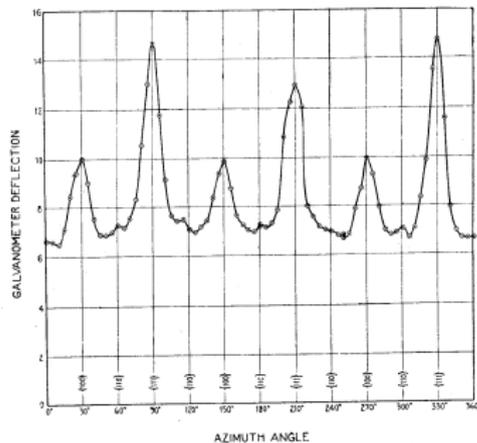
Erwin Schrödinger 1887-1961 (NP 1933)

- ▶ In vier Arbeiten, beginnend 1926, baut Schrödinger die De Broglie'sche Wellenvorstellung der Materie zu einer mathematischen Theorie aus die es u.A. gestattet, die diskreten Energiewerte eines Atoms innerhalb einer Kontinuumstheorie zu verstehen.
- ▶ Dabei geht er zunächst (und mit Vorbedacht) nicht auf die Frage ein, was das Wellenfeld ψ physikalisch bedeutet.

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Erste Experimentelle Bestätigung: Davisson-Germer 1926 (Nobelpreis 1937 an Davisson)



$$\lambda = \frac{h}{p} = \sqrt{\frac{150}{\text{Volt}}} \text{ \AA}$$

- ▶ In den Jahren 1926-28 bestätigten Davisson und sein Student Germer die de Broglie'sche Hypothese qualitativ und quantitativ durch Beobachtung von Interferenzen von an einem Nickel-Kristall gebeugten Elektronen.
- ▶ Die gemessenen Wellenlängen betragen wenige Angström, vergleichbar längerwelligen Röntgenstrahlen.
- ▶ Ein dem Prinzip nach sehr ähnliches Experiment hatten Laue, Friedrich und Knipping 1912 für Röntgenstrahlen durchgeführt und damit deren Wellennatur nachgewiesen (Nobelpreis für Laue 1914).

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



Max Born 1882-1970 (NP 1954)

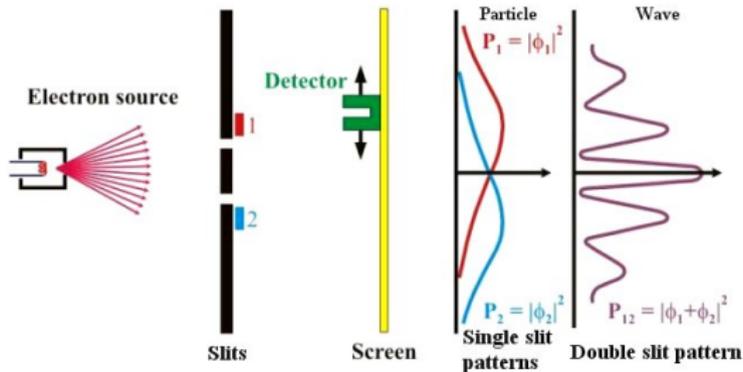
- ▶ Bereits 1926 schlägt Max Born vor, die de Broglie'schen Wellen als *Wahrscheinlichkeitsamplituden* zu interpretieren. Damit wird dem Element des Zufalls eine fundamentale Rolle innerhalb der Physik zugewiesen, mit der viele Physiker nicht einverstanden sind, darunter Einstein, Schrödinger und de Broglie (die „ältere Generation“; „Gott würfelt nicht“).
- ▶ Als Folge dieser Interpretation müssen Materiewellen anders verstanden werden als etwa elektromagnetische Wellen. Insbesondere gehorcht ihre Wechselwirkung mit anderen Feldern, etwa dem Gravitationsfeld, anderen Prinzipien. Aber welchen nur?

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



$$|\phi_1 + \phi_2|^2 = |\phi_1|^2 + |\phi_2|^2 + 2 \cdot \Re(\phi_1 \bar{\phi}_2)$$

Erst Summieren dann Quadrieren \neq Erst Quadrieren dann Summieren

Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

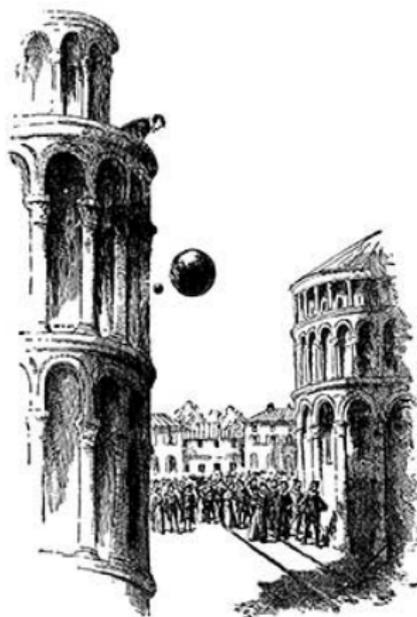
Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort





Galilei in Pisa
eine - schöne - Legende

- ▶ Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie ist das Einstein'sche Äquivalenzprinzip, gemäß dem die Gravitation **universell** auf Materie einwirkt. Erst dadurch wird sie „geometrisierbar“.
- ▶ Eine Folge davon ist, dass alle Testkörper im gegebenen Gravitationsfeld gleich stark beschleunigen.
- ▶ Abweichungen davon können durch den Eötvös-Faktor gemessen werden:

$$\eta(A, B) = 2 \cdot \frac{|a(A) - a(B)|}{a(A) + a(B)}$$

Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

Äquivalenzprinzip zum selberrachen ...



Stephen at „zero g“

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

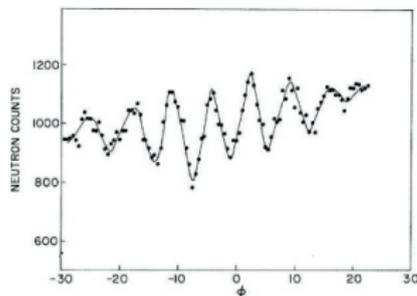
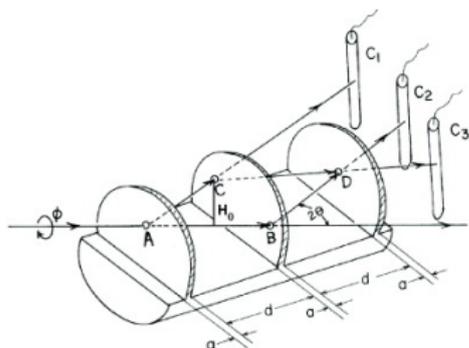
- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Wie also fällt eine Materiewelle?

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip

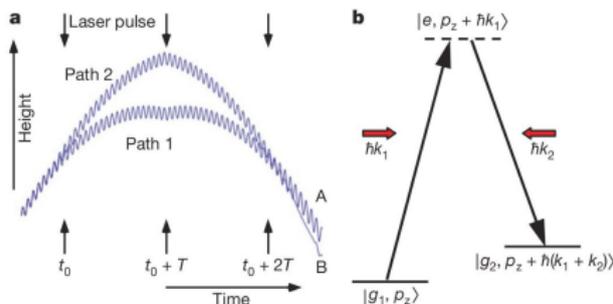
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



(Collela Overhauser Werner 1975)

- ▶ **Streuung von Neutronen-Materiewellen an Siliziumkristallen unter Einfluss des Gravitationsfeldes der Erde.**
- ▶ **Die Kopplung des Newton'schen Gravitationsfeldes der Erde kann anhand der Schrödinger-Gleichung verstanden werden und stimmt mit den gemessenen Effekten genauestens überein.**
- ▶ **Gilt das Einstein'sche Äquivalenzprinzip auch in der Quantenmechanik und kann gegebenenfalls die QM benutzt werden, um neue und genauere Tests des ÄP durchzuführen?**

Test des Äquivalenzprinzips mit Quantenzuständen: Materiewelleninterferometrie an Cäsiumatomen



$$\Delta\phi = \eta(\text{Atom, Körper}) \kappa T^2 g_K$$

$$\eta(\text{Atom, Körper}) = 2 \cdot \frac{|a(\text{Atom}) - a(\text{Körper})|}{a(\text{Atom}) + a(\text{Körper})}$$

- Herkunft
- Materiewellen
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

PRL 112, 203002 (2014)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
23 MAY 2014

Quantum Test of the Universality of Free Fall

D. Schlippert,¹ J. Hartwig,¹ H. Albers,¹ L. L. Richardson,¹ C. Schubert,¹ A. Roura,² W. P. Schleich,^{2,3}
W. Ertmer,¹ and E. M. Rasel^{1*}

¹*Institut für Quantenoptik and Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST),
Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, D-30167 Hannover, Germany*

²*Institut für Quantenphysik and Center for Integrated Quantum Science and Technology (IQST),
Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, D-89081 Ulm, Germany*

³*Texas A&M University Institute for Advanced Study (TIAS), Institute for Quantum Science and Engineering (IQSE)
and Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station, Texas 77843-4242, USA*

(Received 1 April 2014; published 22 May 2014)

We simultaneously measure the gravitationally induced phase shift in two Raman-type matter-wave interferometers operated with laser-cooled ensembles of ⁸⁷Rb and ³⁹K atoms. Our measurement yields an Eötvös ratio of $\eta_{\text{Rb,K}} = (0.3 \pm 5.4) \times 10^{-7}$. We briefly estimate possible bias effects and present strategies for future improvements.

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP

- Bose-Einstein
- ZARM

RESEARCH ARTICLE

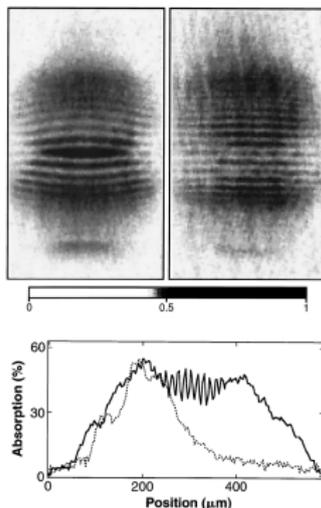
Observation of Interference Between Two Bose Condensates

M. R. Andrews, C. G. Townsend, H.-J. Miesner, D. S. Durfee, D. M. Kurn, W. Ketterle

Interference between two freely expanding Bose-Einstein condensates has been observed. Two condensates separated by ~ 40 micrometers were created by evaporatively cooling sodium atoms in a double-well potential formed by magnetic and optical forces. High-contrast matter-wave interference fringes with a period of ~ 15 micrometers were observed after switching off the potential and letting the condensates expand for 40 milliseconds and overlap. This demonstrates that Bose condensed atoms are "laser-like"; that is, they are coherent and show long-range correlations. These results have direct implications for the atom laser and the Josephson effect for atoms.

Science 1997 (NP 2001)

- Kann man daraus einen genauen Test des ÄP bekommen?



- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Bose-Einstein Condensation in Microgravity

T. van Zoest,¹ N. Gaaloul,¹ Y. Singh,¹ H. Ahlers,¹ W. Herr,¹ S. T. Seidel,¹ W. Ertmer,¹ E. Rasel,^{1*} M. Eckart,² E. Kajari,² S. Arnold,² G. Nandi,² W. P. Schleich,² R. Walsler,³ A. Vogel,⁴ K. Sengstock,⁴ K. Bongs,⁵ W. Lewoczko-Adamczyk,⁶ M. Schiemang,⁶ T. Schuldt,⁶ A. Peters,⁶ T. Könemann,⁷ H. Müntinga,⁷ C. Lämmerzahl,⁷ H. Dittus,⁷ T. Steinmetz,⁸ T. W. Hänsch,⁸ J. Reichel⁹

Albert Einstein's insight that it is impossible to distinguish a local experiment in a "freely falling elevator" from one in free space led to the development of the theory of general relativity. The wave nature of matter manifests itself in a striking way in Bose-Einstein condensates, where millions of atoms lose their identity and can be described by a single macroscopic wave function. We combine these two topics and report the preparation and observation of a Bose-Einstein condensate during free fall in a 146-meter-tall evacuated drop tower. During the expansion over 1 second, the atoms form a giant coherent matter wave that is delocalized on a millimeter scale, which represents a promising source for matter-wave interferometry to test the universality of free fall with quantum matter.

¹Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany. ²Institut für Quantenphysik, Universität Ulm, Albert Einstein Allee 11, 89081 Ulm, Germany.

³Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Darmstadt, Hochschulstrasse 4A, 64289 Darmstadt, Germany. ⁴Institut für Laser-Physik, Universität Hamburg, 22761 Hamburg, Germany.

⁵Midlands Ultracold Atom Research Centre, Birmingham B15 2TT, UK. ⁶Humboldt-Universität zu Berlin, Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin, Germany. ⁷Center of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM), Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen, Germany. ⁸Max-Planck-Institut für Quantenoptik and

Sektion Physik der Ludwig-Maximilians-Universität, Schellingstrasse 4, 80799 München, Germany. ⁹Laboratoire Kastler-Brossel de l'École Normale Supérieure, 24 rue Lhomond, 75231 Paris, France.

*To whom correspondence should be addressed. E-mail: rasel@iqo.uni-hannover.de

Science 18. Juni 2010

2. Schritt: Laufende Missionen mit ZARM-Beteiligung (u.a.)

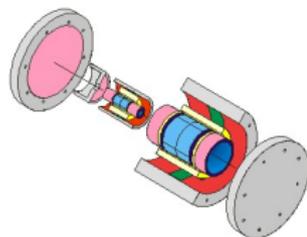


- ▶ **MICROSCOPE:** Kleinsatellit (300 kg) umkreist Erde seit April 2016 in 720 km Höhe. Testet mit Hilfe zylinderförmiger Testmassen aus Titan und Platin-Rhodium die (klassische) Universalität des freien Falls auf – hoffentlich – 10^{-15} oder genauer! Laufzeit bis Ende 1918. Erste Ergebnisse Juni 2017 erwartet.
- ▶ **MAIUS:** (Materiewelleninterferometrie unter Schwerelosigkeit). Erfolgreicher Flug der MAIUS-1 Mission am 23. Januar 2017 nahe Kiruna (Schweden); Höhe 240 km. Erstes Bose-Einstein-Kondensat mit Rubidium ($< 10^{-6}$ K) auf Trägersystem im All. MAIUS-2 und MAIUS-3 sollen 2018-9 folgen.

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Impressionen MICROSCOPE



Q & G

D. Giulini

Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

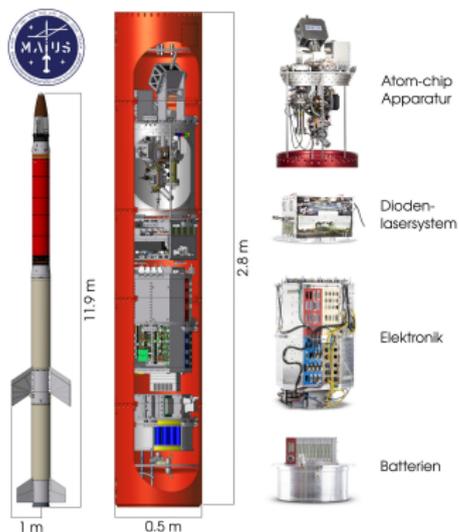
Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

Impressionen MAIUS-1: Aufbau und Crew



Q & G

D. Giulini

Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

Impressionen MAIUS-1: „Krachen lassen“



Q & G

D. Giulini

Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

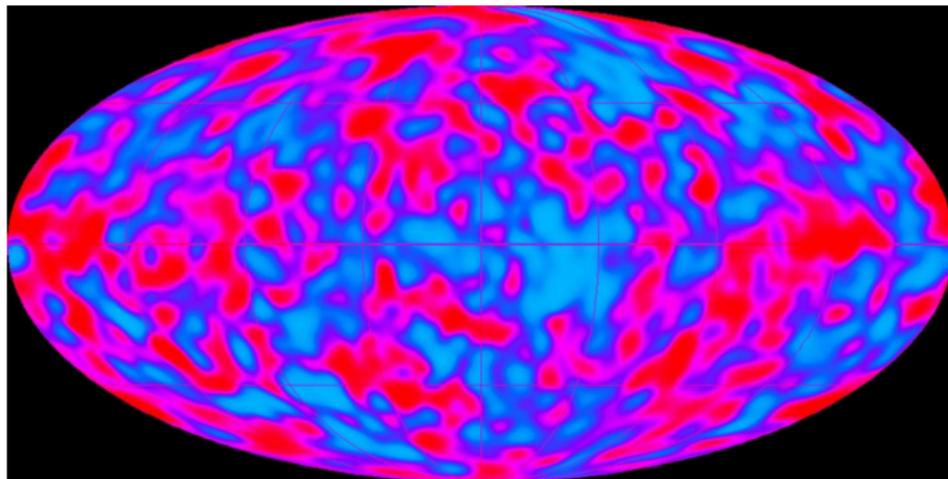
Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

Ausblick Kosmologie: Mikrowellenhintergrund 1989-93 (COBE)

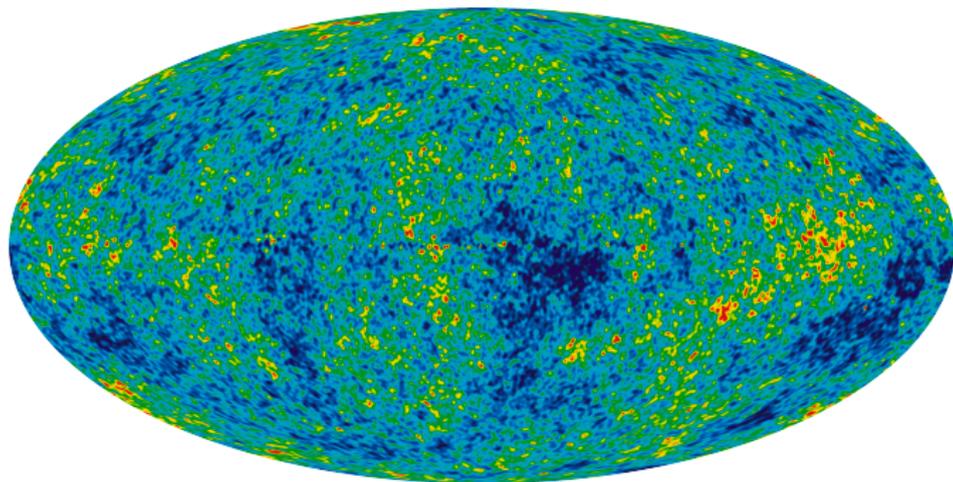


Nobelpreis (George Smoot and John Mather) 2006

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie: Mikrowellenhintergrund 2001-10 (WMAP)



Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

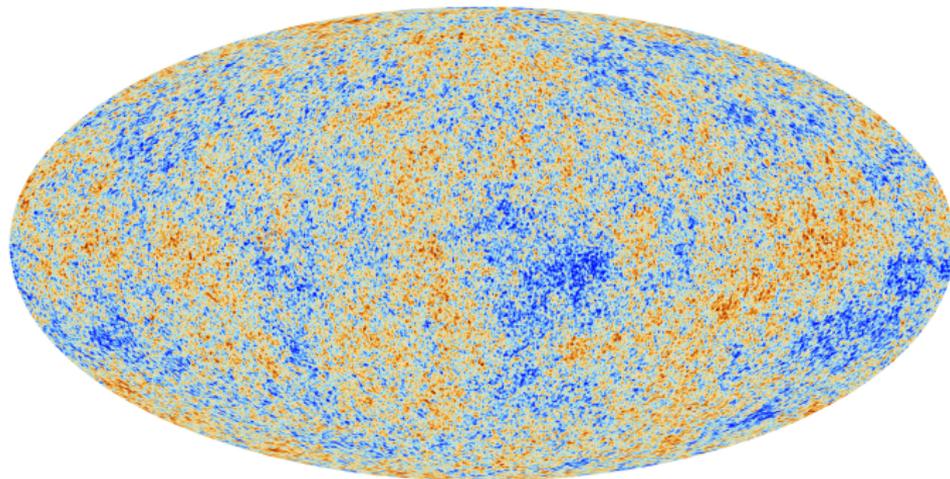
Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

Ausblick Kosmologie: Mikrowellenhintergrund 2009-13 (Planck)



Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

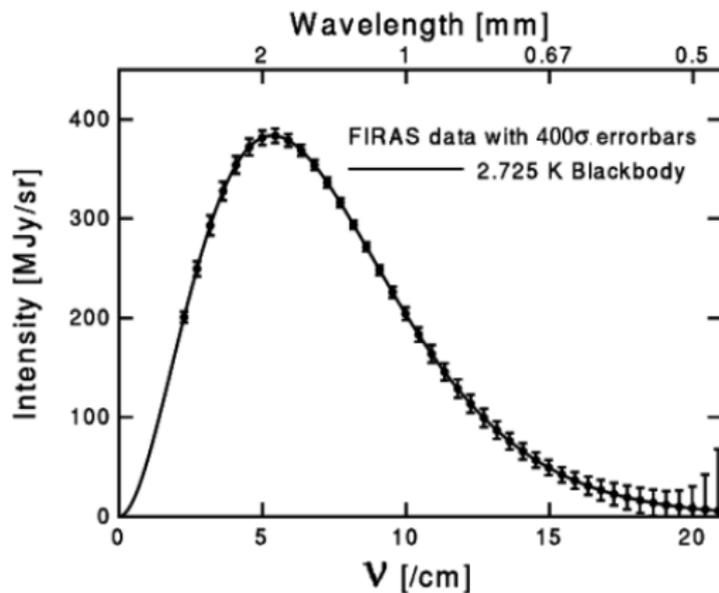
Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

Die beste Planck-Kurve (COBE)

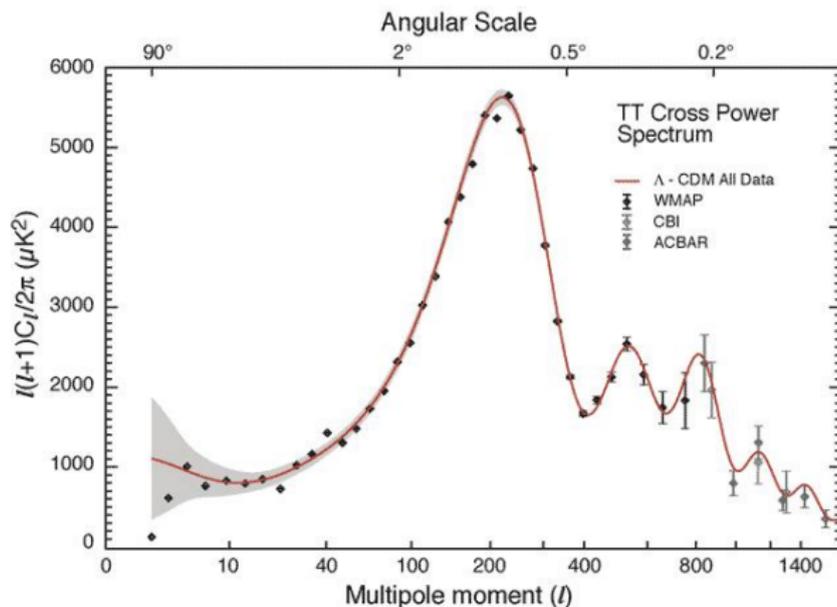


(FIRAS = Far Infrared Absolute Spectrophotometer)

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Fluktuationen der Temperatur



- ▶ Eine Art „Stein von Rosette“ der modernen Kosmologie
- mit weitreichenden Folgerungen.

Doch das ist eine andere Geschichte ...

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM



Heinrich Hertz 1857-1894

„Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, dass die denotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. [...] Die Bilder, von welchen wir reden, sind unsere Vorstellungen von den Dingen; sie haben mit den Dingen die eine wesentliche Übereinstimmung, welche in der Erfüllung der genannten Forderung liegt, aber es ist für ihren Zweck nicht nötig, dass sie irgend eine weitere Übereinstimmung mit den Dingen haben. In der Tat wissen wir auch nicht, und haben auch kein Mittel zu erfahren, ob unsere Vorstellungen von den Dingen mit jenen in irgend etwas anderem übereinstimmen, als allein in eben jener einen fundamentalen Beziehung.“

Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

VIELEN DANK FÜR IHRE GEDULD!



Heinrich Hertz 1857-1894

„Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, dass die denotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. [...] Die Bilder, von welchen wir reden, sind unsere Vorstellungen von den Dingen; sie haben mit den Dingen die eine wesentliche Übereinstimmung, welche in der Erfüllung der genannten Forderung liegt, aber es ist für ihren Zweck nicht nötig, dass sie irgend eine weitere Übereinstimmung mit den Dingen haben. In der Tat wissen wir auch nicht, und haben auch kein Mittel zu erfahren, ob unsere Vorstellungen von den Dingen mit jenen in irgend etwas anderem übereinstimmen, als allein in eben jener einen fundamentalen Beziehung.“

Größendimensionen

Quantenmechanik

- Herkunft
- Materie als Welle
- Interpretation?

Gravitation

- Äquivalenzprinzip
- Materiewellen
- QM Tests des ÄP
- Bose-Einstein
- ZARM

Ausblick Kosmologie

Schlusswort

VIELEN DANK FÜR IHRE GEDULD!