

Faszination Quantentheorie:

Die paradoxen Vorhersagen der Theorie und ihre Bestätigung durch neuere Experimente

Peter Schmüser, Universität Hamburg

*No one really understands
quantum physics*

*A paradox is the conflict
between reality and your feeling
of what reality ought to be*

Richard P. Feynman

DOI: 10.3204/PUBDB-2026-00737
© 2015 Peter Schmüser. CC-BY-4.0 license

Faszination Quantentheorie

Teilchen-Welle-Komplementarität

Doppelspaltexperimente

Welchen Weg nimmt das Teilchen?

Der gleitende Quanten-Klassik-Übergang

Werner Heisenberg's Unbestimmtheitsrelation

H-Atom: Schrödingerbild oder Bohr-Modell?

Fermion oder Boson: Individualist oder Konformist

Überraschungen der relativistischen Quantentheorie

Die komplexe Natur des physikalischen Vakuums

Elektronenwellen in magnetischen Feldern

Schrödingers Katze

Die nichtlokale Natur der Quantenmechanik

Drei Formeln, die das Weltbild der Physik verändert haben:

E = m c² Albert Einstein

Relativitätstheorie

Energie und Masse sind äquivalent

- Masse kann in Energie umgewandelt werden (Sonne, Kernreaktor)
- Energie kann in Masse umgewandelt werden (Elementarteilchen)

E = hν Max Planck

Die Energie einer Lichtwelle wird von Quanten getragen

Lichtquanten = Photonen

Quantentheorie

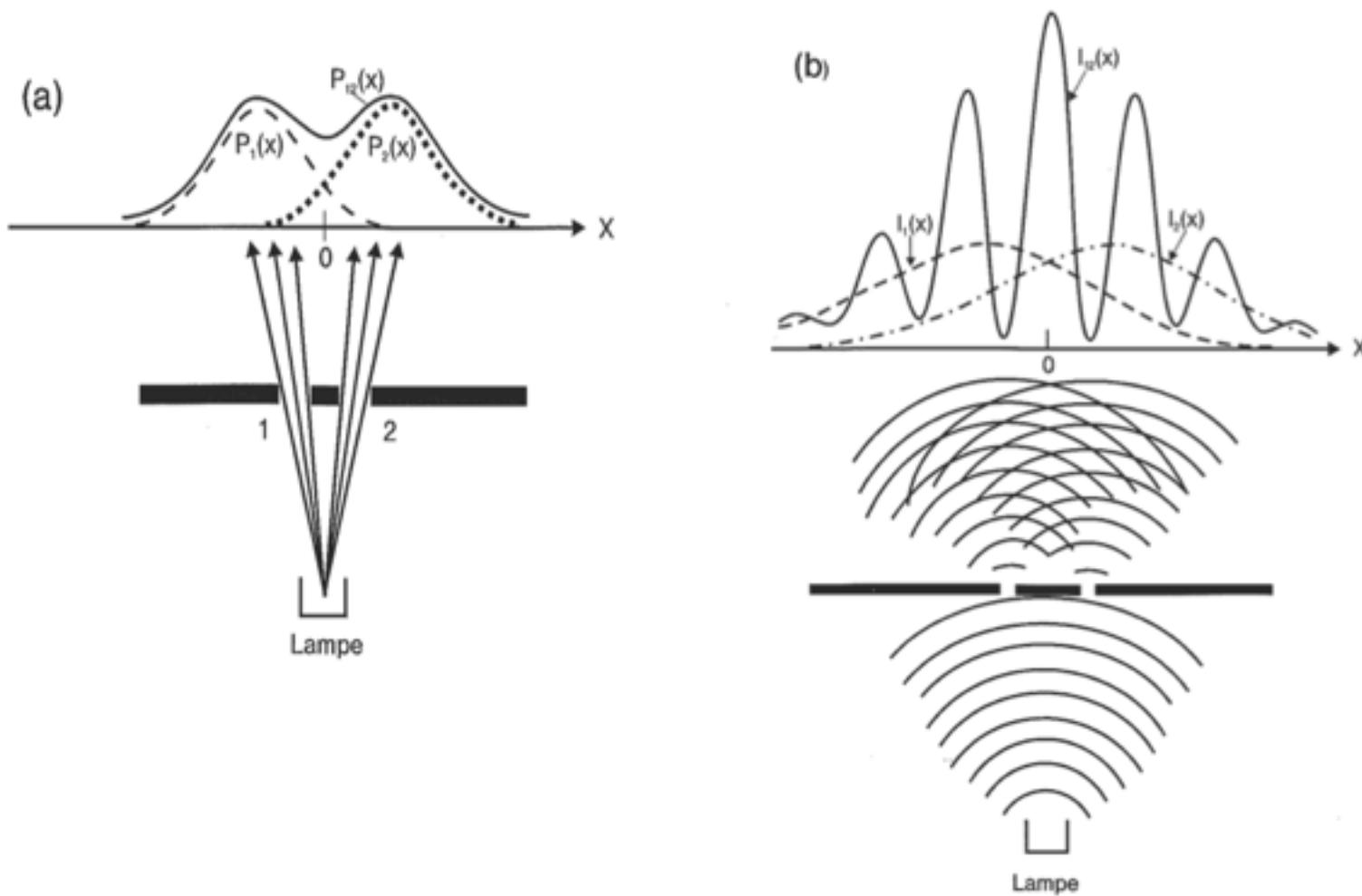
λ = h / m v Louis de Broglie

Teilchen (Elektronen, Neutronen, Atome) haben Welleneigenschaften

Wellenlänge = Planck-Konstante / Impuls

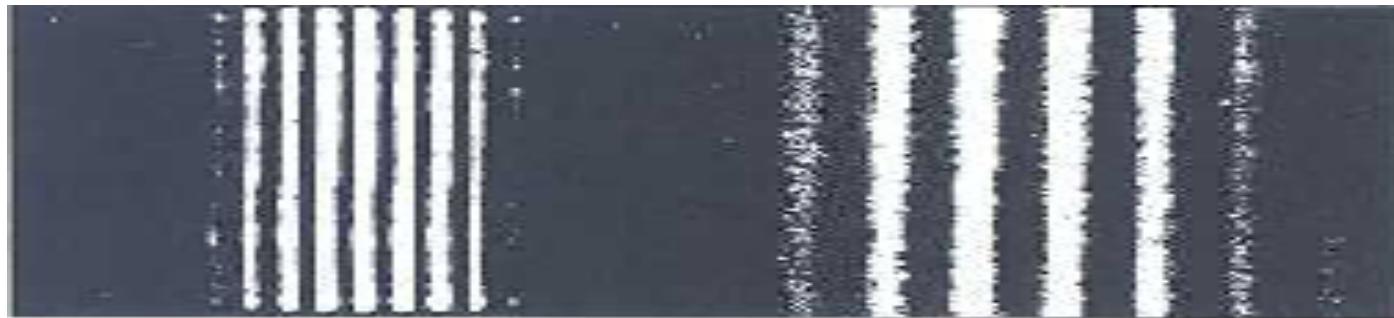
Zwei wichtige Naturkonstanten: Lichtgeschwindigkeit c: sehr gross
Planck-Konstante h: sehr klein

Doppelspaltexperiment mit Teilchen und Wellen



Für viele Jahrzehnte war dies ein **Gedankenexperiment der Quantentheorie**

Serge Haroche: "Gedankenexperimente werden Wirklichkeit"



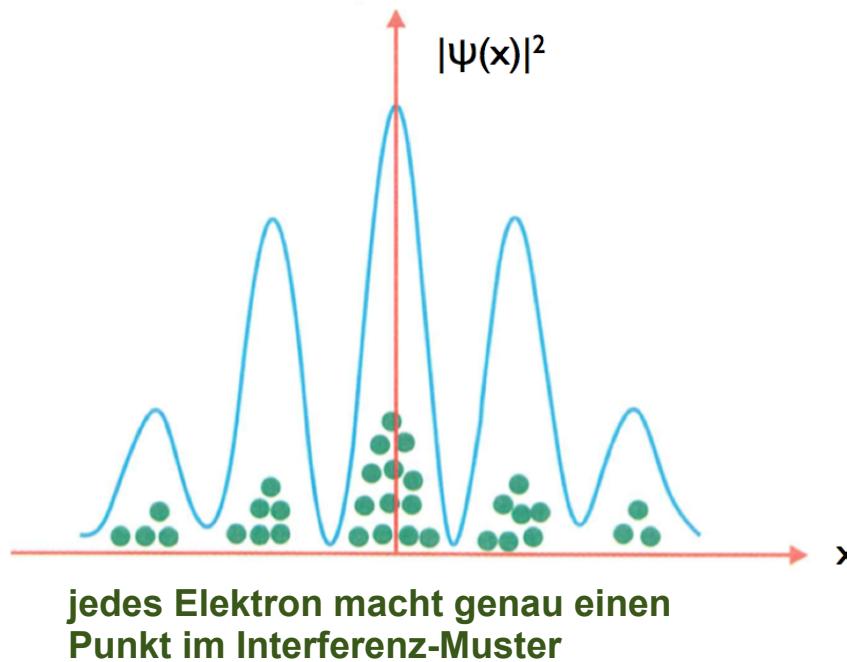
Doppelspalt-Interferenzen mit Licht und mit Elektronen
(Möllenstedt-Gruppe, Tübingen 1962)

Es folgt: Elektronen haben Welleneigenschaften

Aber wie zeigt sich ihre Teilchennatur?

Statistische Deutung der Quantenmechanik

- a) Berechne die Wellenfunktion durch Lösung der Schrödinger-Gleichung
- b) Quadrieren der Wellenfunktion ergibt die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen an einem bestimmten Ort zu finden



Niels Bohr war ein entschiedener Verfechter der statistischen Interpretation
"Kopenhagener Deutung" der Quantentheorie

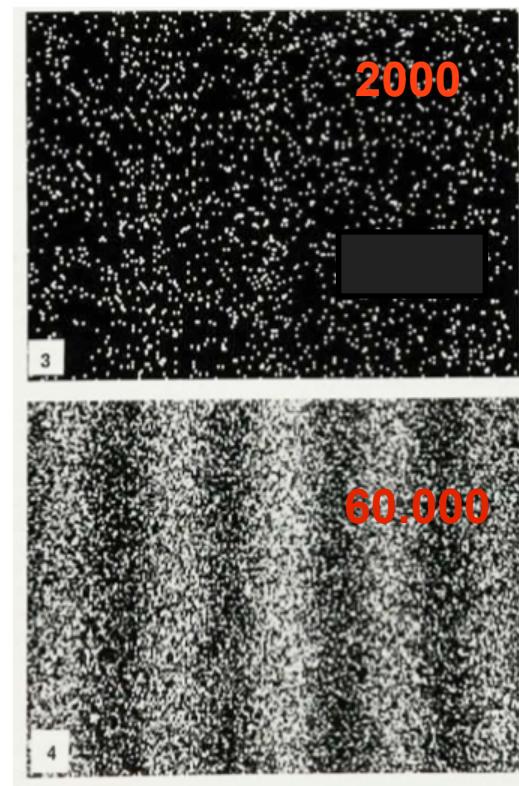
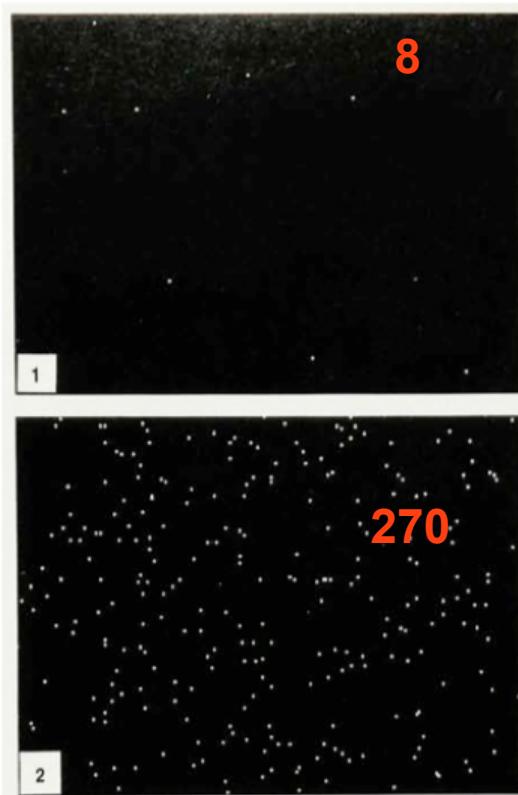
Albert Einstein lehnte sie ab: "Gott würfelt nicht"

Einstein sah natürlich ein, dass die Quantenmechanik außerordentlich erfolgreich war.
Er hielt sie jedoch nicht für die endgültige Theorie, sondern glaubte, dass mehr dahinter stecken müsste. Vermutlich dachte er an eine deterministische Theorie.

Ist die statistische Deutung korrekt?

Antwort: es sieht ganz so aus

Elektroneninterferenzen mit 8, 270, 2000 und 60.000 Elektronen



Akira Tonomura
Hitachi Research Labs

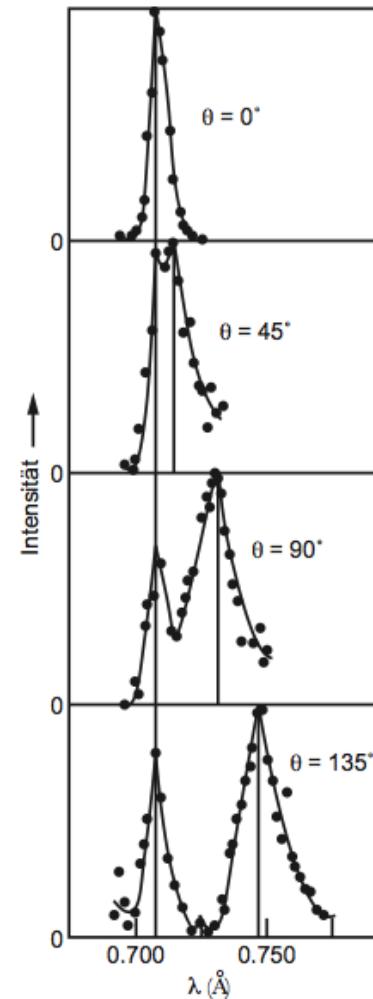
Abbildung 1.4 Beobachtung von Elektroneninterferenzen mit 8, 270, 2000 und 60 000 Elektronen [6]. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Dr. Akira Tonomura (Hitachi Research Laboratory) und des Springer-Verlags.

Was ist Licht, Welle oder Teilchen? Antwort: beides



Albert Rose, Vision: Human and Electronic

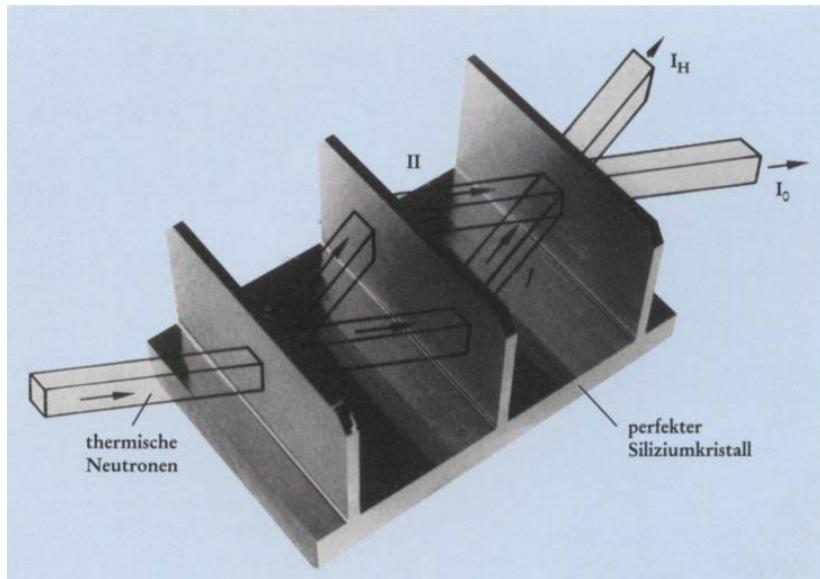
Wiedergabe mit Genehmigung des Springer-Verlags



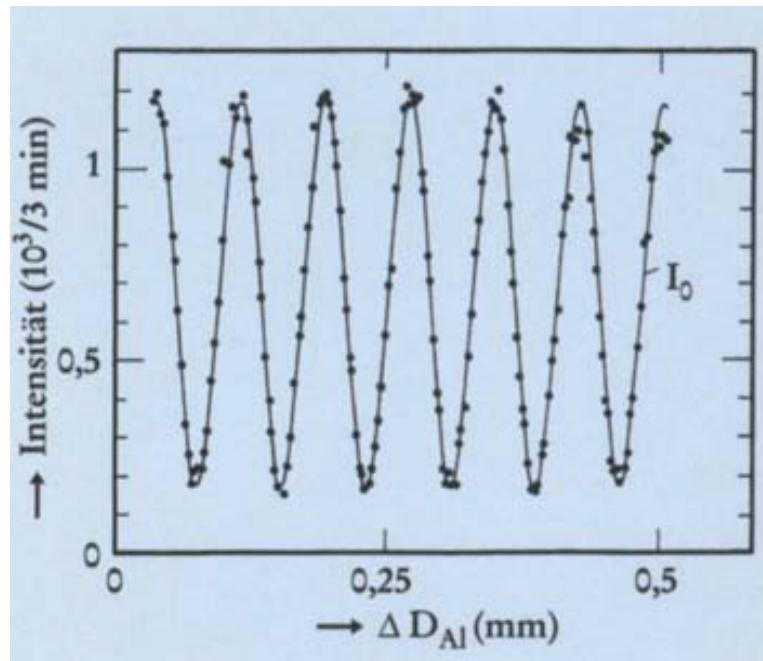
Compton-Streuung

$$\lambda' = \lambda + \frac{2\pi\hbar}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Perfektkristall-Interferometer für Neutronen



Helmut Rauch
Physik in unserer Zeit,
Nov. 1998



jedes Neutron interferiert mit sich selber,
nicht mit anderen Neutronen

Abbildung 1.6 Links: Perfektkristall-Neutroninterferometer. Rechts: Interferenzstreifen als Funktion der Dicke der Aluminiumplatte in einem Strahlweg [7]. Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Prof. Helmut Rauch. Copyright Wiley VHC-Verlag, reproduced with permission.

Welchen Weg wählt das Teilchen?

Gedankenexperiment von Heisenberg: Beobachtung des Elektrons durch Licht. Wellenlänge muss klein gegen Spaltabstand sein. Dann aber ist die Bahnstörung so gross, dass die Interferenz verschwindet. Aber heute weiss man dass die Interferenzen auch dann verschwinden, wenn die Information über den Weg keine Bahnstörung bewirkt (siehe Haroche-Experiment).

Die Interferenzen verschwinden sofort, wenn man den Weg kennt

Das Doppelspaltexperiment als Cartoon

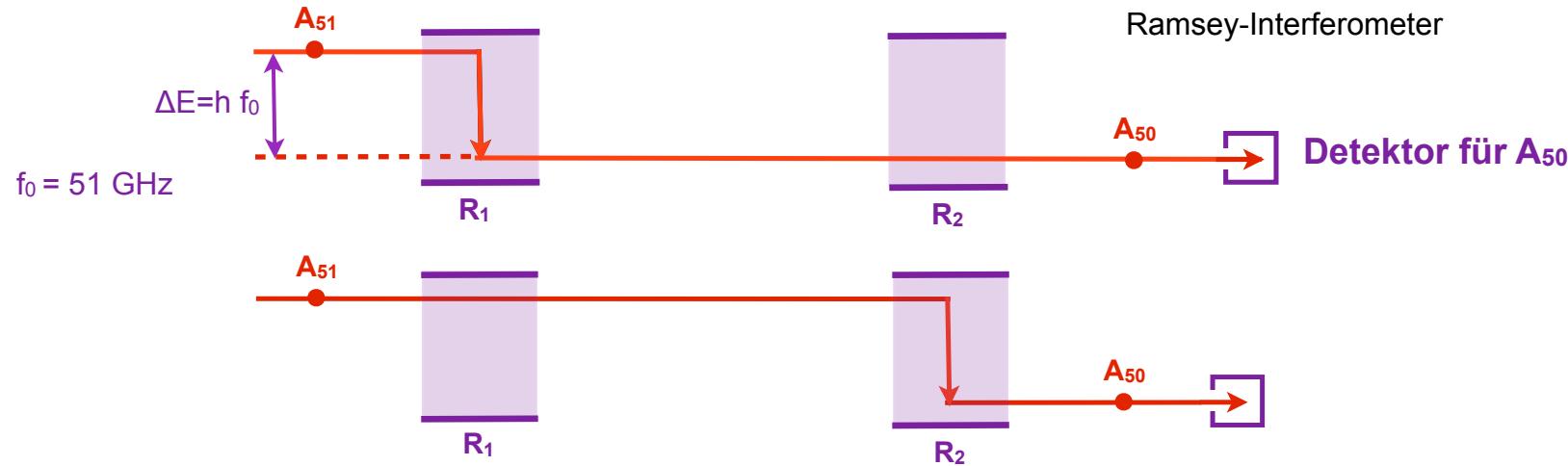


© R.J. Buchelt

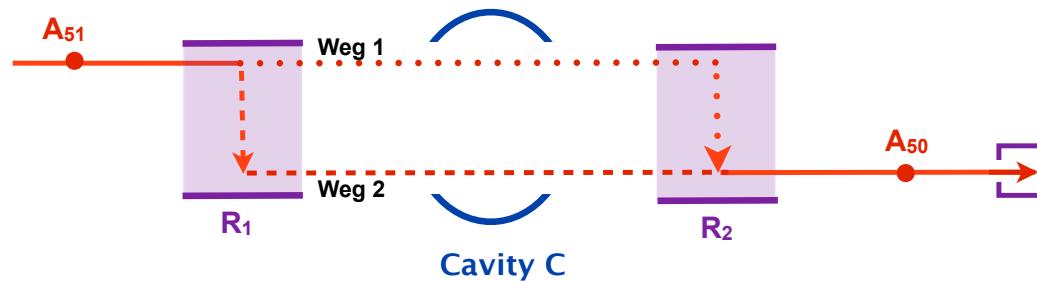
Helmut Rauch
Physik in unserer Zeit,
Nov. 1998
Wiedergabe mit Genehmigung
von H. Rauch

Schema des "Doppelspaltexperiments" von Haroche mit Weg-Information

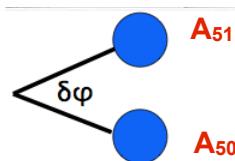
Die Teilchen sind hochangeregte Rubidiumatome mit $n=51$ oder $n=50$



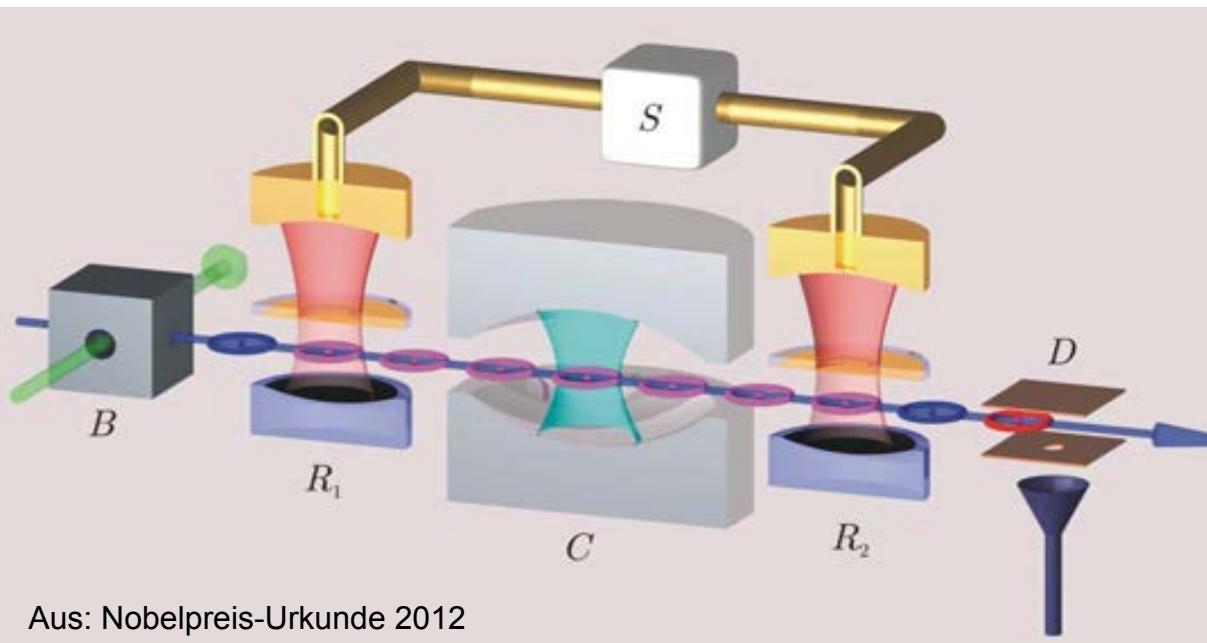
Variables Messgerät: Mikrowellenresonator C mit $n = 3 \dots 10$ Photonen



Cavity C kann zwischen A_{51} und A_{50} unterscheiden
Verschiedene Phasendrehungen des Mikrowellenfeldes



Der gleitende Übergang vom Quantenverhalten (Interferenzen) zum klassischen Verhalten (keine Interferenzen)

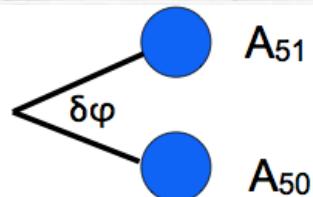


Aus: Nobelpreis-Urkunde 2012

Rubidium-Atome mit $n=51$ oder $n=50$

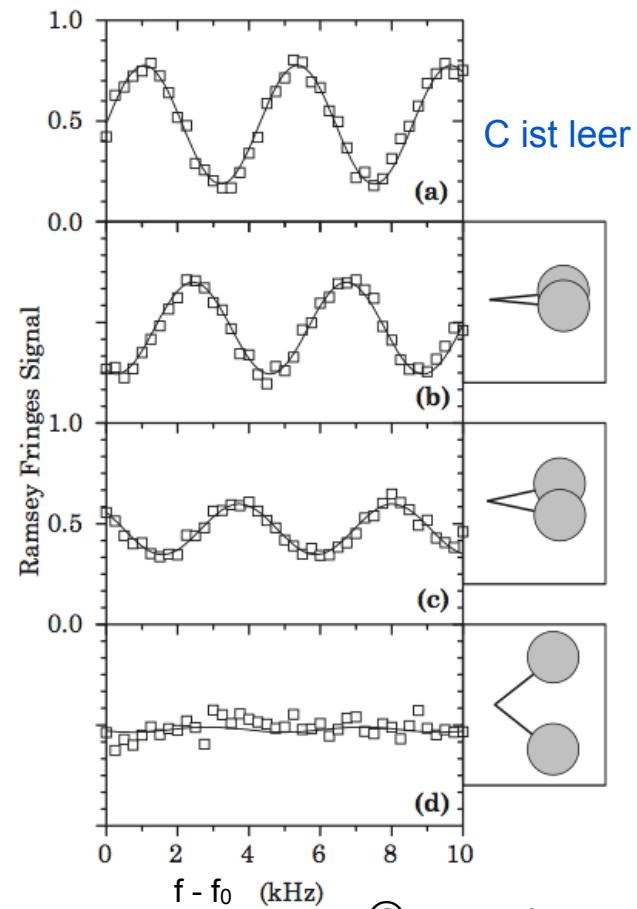
Übergang von A_{51} nach A_{50} in R_1 oder R_2 ($f_0=51$ GHz)

verschiedene Phasenverschiebungen des Mikrowellenfeldes in C durch A_{51} und A_{50}



Welcher-Weg-Information ohne Störung der Bahn

Serge Haroche u. Mitarbeiter

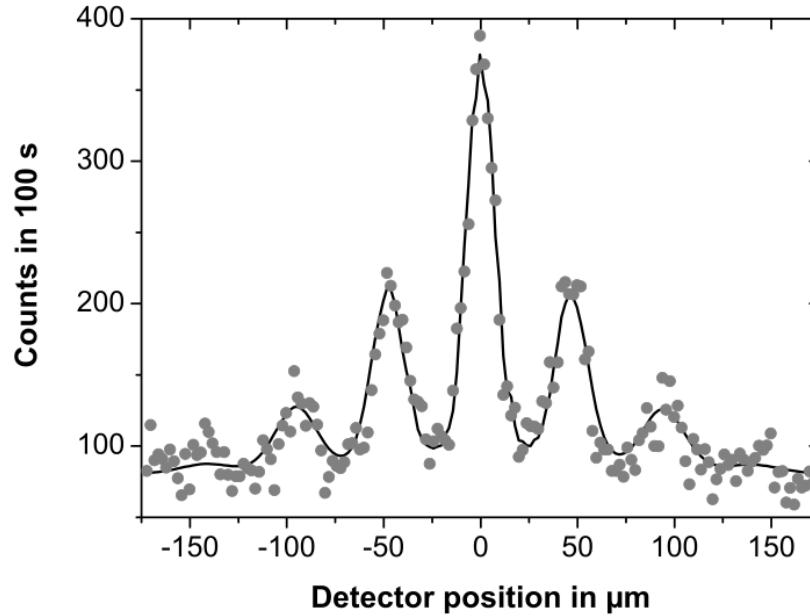


© Amer. Phys. Soc.

S. Haroche in a colloquium in Hamburg, Jan. 1997:

It is not necessary to actually observe the trajectory in order to suppress the interference. The mere fact that a "trace" of the trajectory is left in the environment and "could be observed" is sufficient.

Wie groß dürfen Objekte werden, um noch Interferenzen zu machen? Sind Fußballer erlaubt? Ja, aber nur Mini-Fußbälle: C₆₀-Fullerene



Markus Arndt et al., Uni Wien

Abbildung 1.9 Links: das Fullerene C₆₀. Das C₆₀-Molekül ähnelt einem Fußball. Es ist innen hohl und hat einen Durchmesser von etwa 0,8 nm. Rechts: beobachtete Interferenzen mit C₆₀-Molekülen der mittleren Geschwindigkeit 136 ± 3 m/s [9]. Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Prof. M Arndt, Universität Wien. Copyright 2003 American Association of Physics Teachers, reproduced with permission.

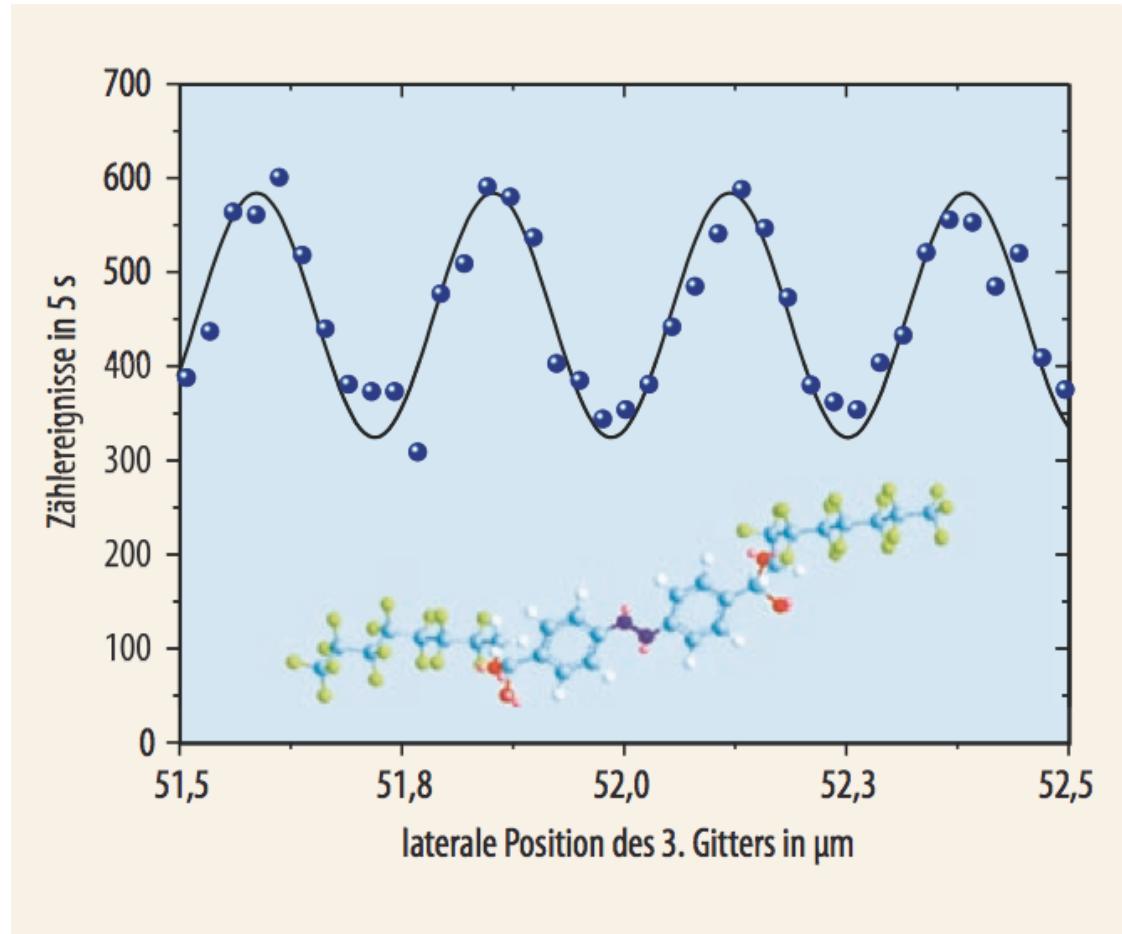


Abbildung 1.10 Gemessenes Interferogramm für das Makromolekül $C_{30}H_{12}F_{30}N_2O_4$ [10]. Die im unteren Teil des Bildes gezeigten Moleküle wurden von Prof. M. Mayor an der Univ. Basel synthetisiert. Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Prof. M Arndt, Universität Wien. Copyright Wiley VCH-Verlag, reproduced with permission.

Der Quantencorral

(Don Eigler, IBM)

Wellennatur der Elektronen direkt sichtbar
abgetastet mit Raster-Tunnelmikroskop

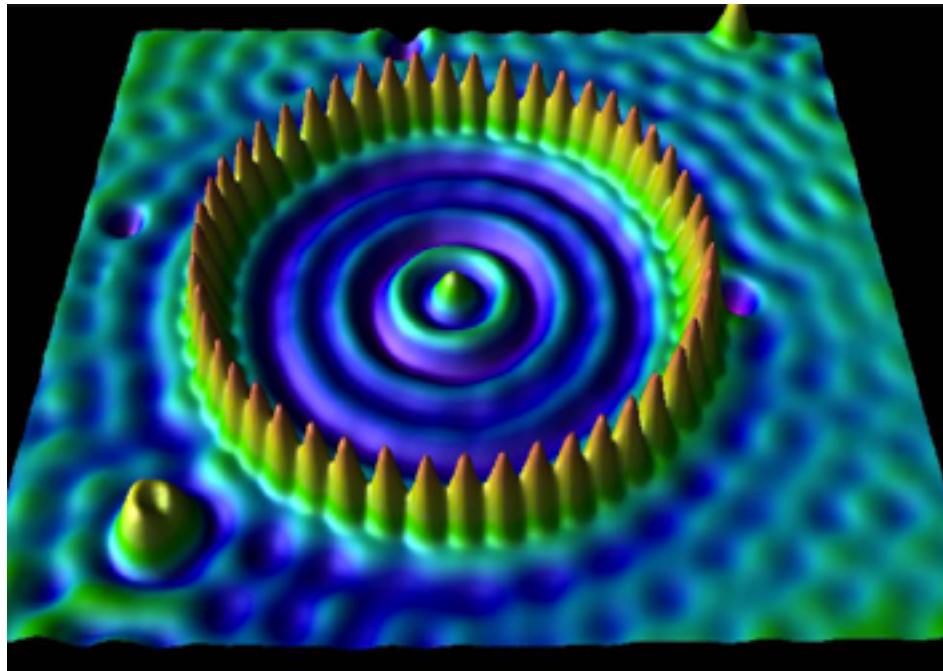
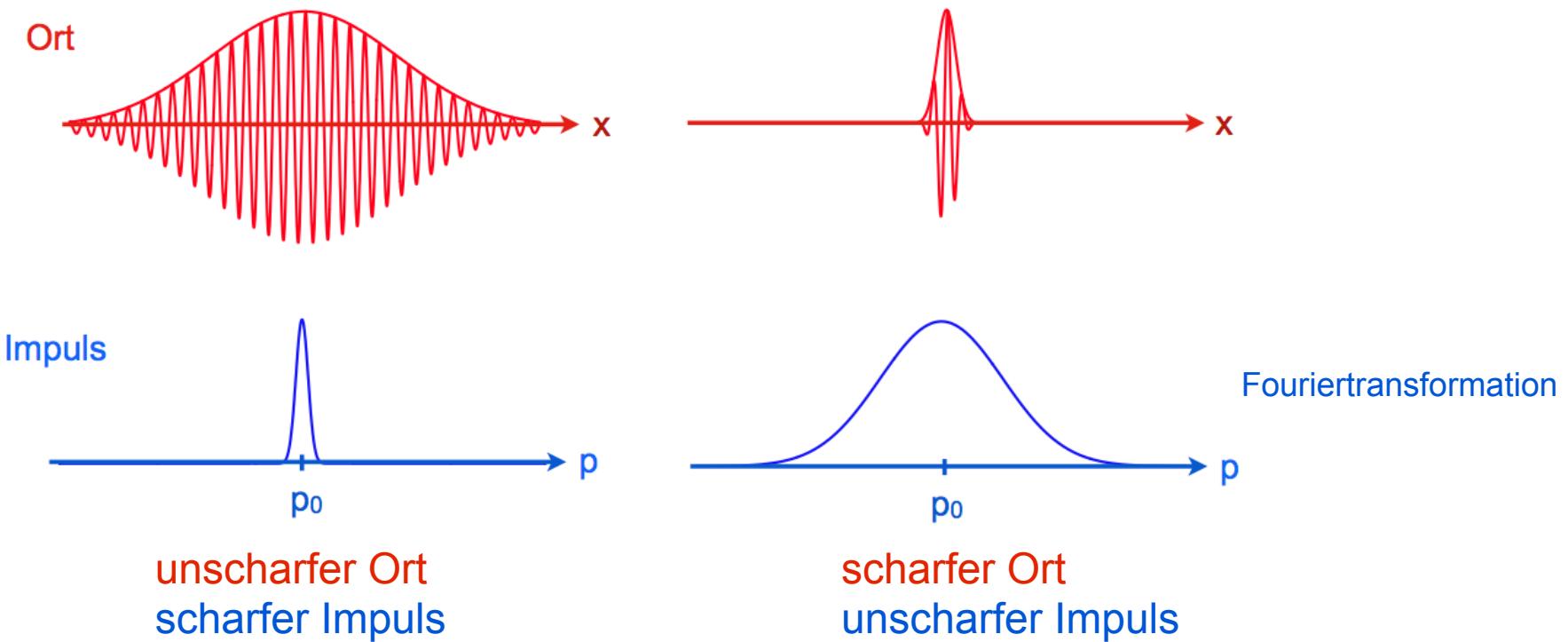


Abbildung 1.13 Eine stehende Elektronenwelle innerhalb eines Ringes von 48 Eisenatomen auf einer Kupferoberfläche. (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Dr. Don Eigler, IBM-Forschungslabor Almaden. Image originally created by IBM Corporation.) Zur theoretischen Beschreibung der stehenden Elektronenwelle siehe Anhang B.4.

Die Unbestimmtheitsrelation von Werner Heisenberg

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$



Der Tunneleffekt

Historisch wichtig: Erklärung des α -Zerfalls

Neue Anwendung: Raster-Tunnelmikroskop

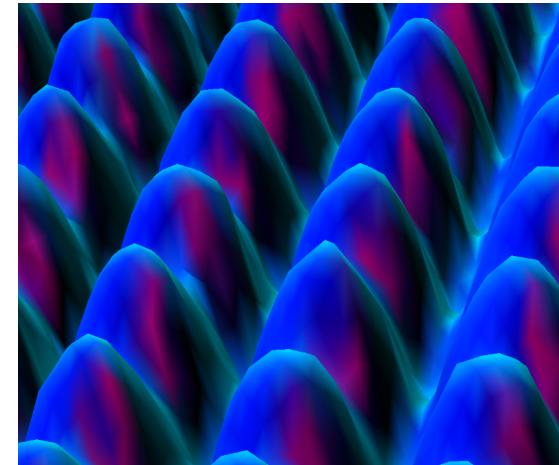
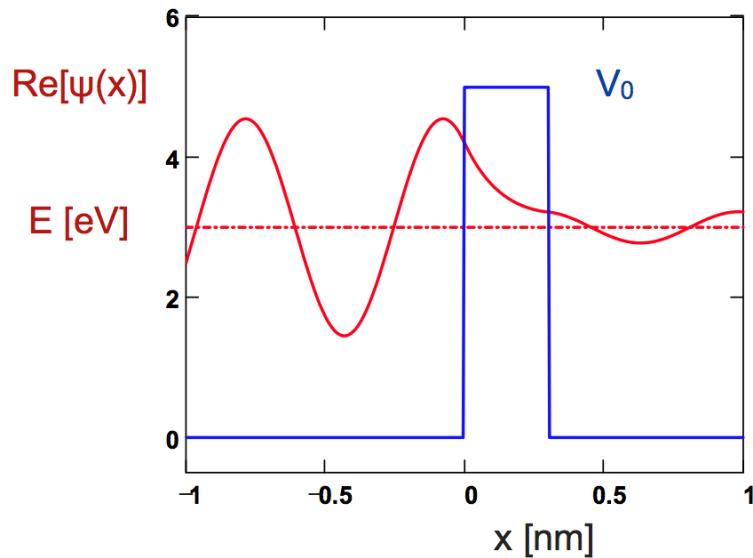
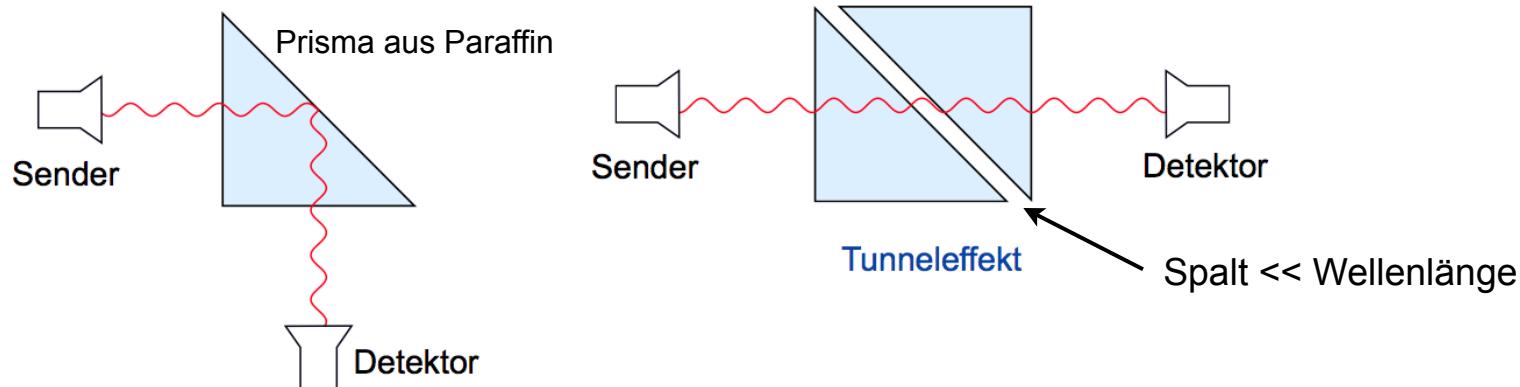


Abbildung 3.9 Die Oberfläche eines Nickel-Einkristalls, abgetastet mit einem Rastertunnelmikroskop. (Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung von Don Eigler, IBM-Forschungslabor Almaden. Image originally created by IBM Corporation.)

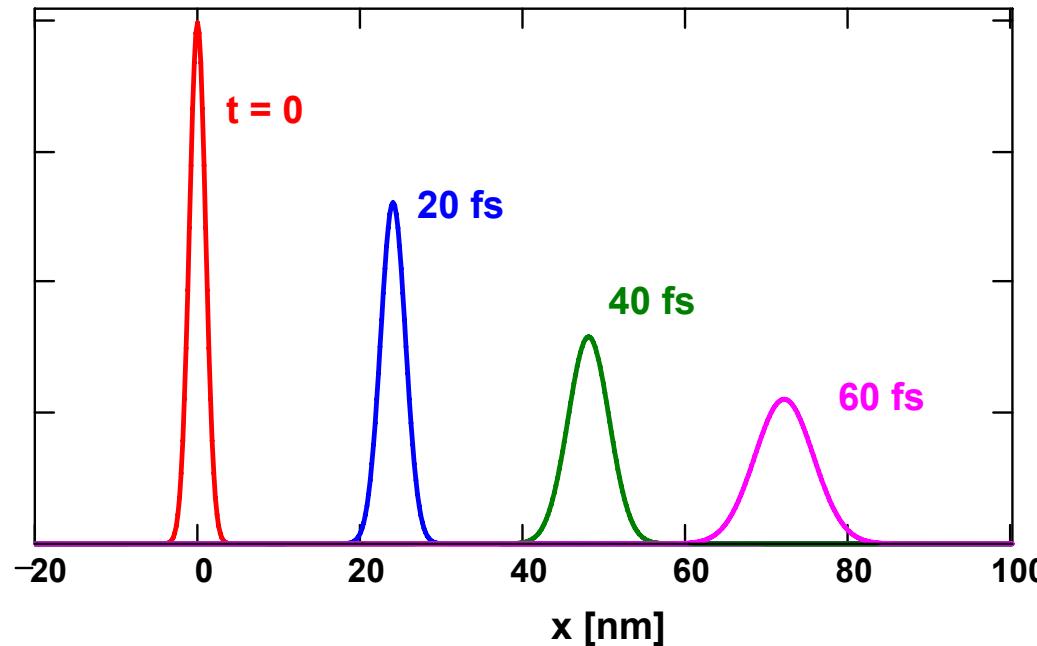
Schulversuch zum Tunneleffekt mit Mikrowellen



Beschreibung eines freien Elektrons durch ein Wellenpaket

Anfangsbreite 1 Nanometer

$$\sigma_0 = 1 \text{ nm}, E = 4 \text{ eV}$$



Das "Zerfließen" des Wellenpakets ist ein ernsthaftes Problem, vor dem Schrödinger kapitulierte.
Bei kritikloser Anwendung der Quantenmechanik hätte das Wellenpaket nach 1 Sekunde eine Breite von 58 Kilometern!

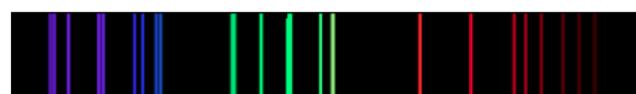
Lösung des Problems (ca 1980 gefunden, Joos, Zeh, Zurek und andere):

Dekohärenz infolge ständiger "Beobachtung" des Teilchens durch die Umgebung
Das Wellenpaket wird immer wieder neu geformt und zerfließt viel weniger

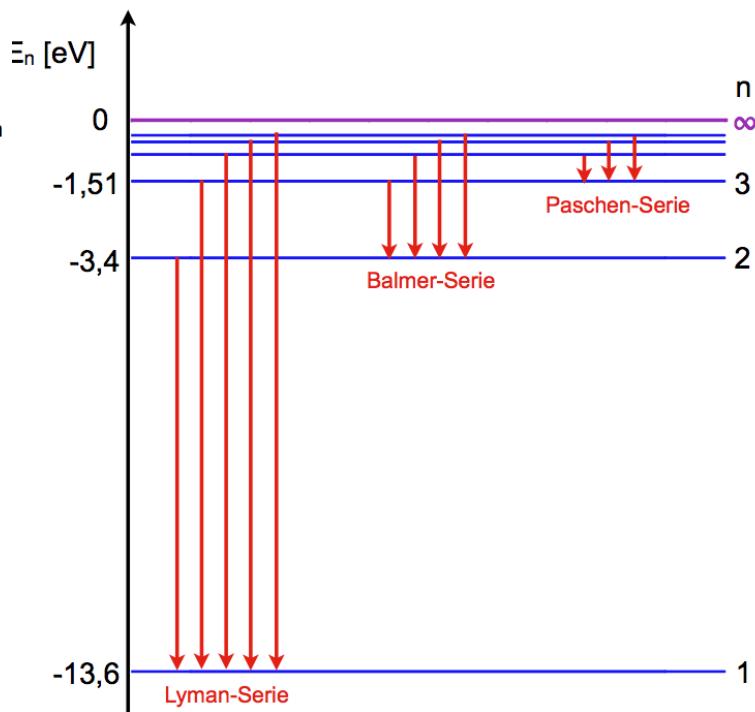
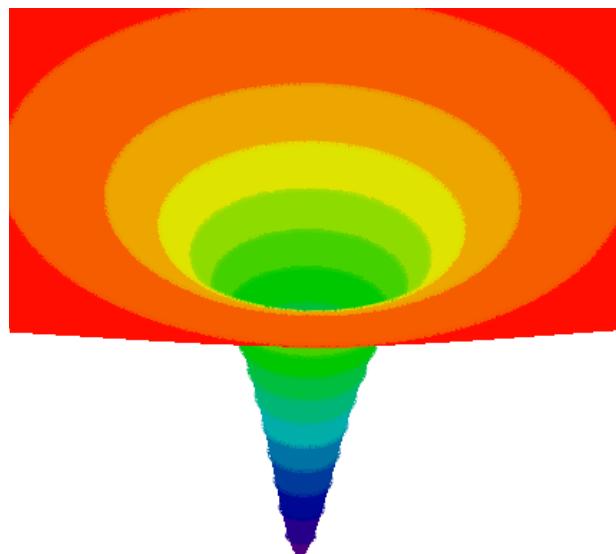
Atombau und Spektrallinien



Sonnenlicht



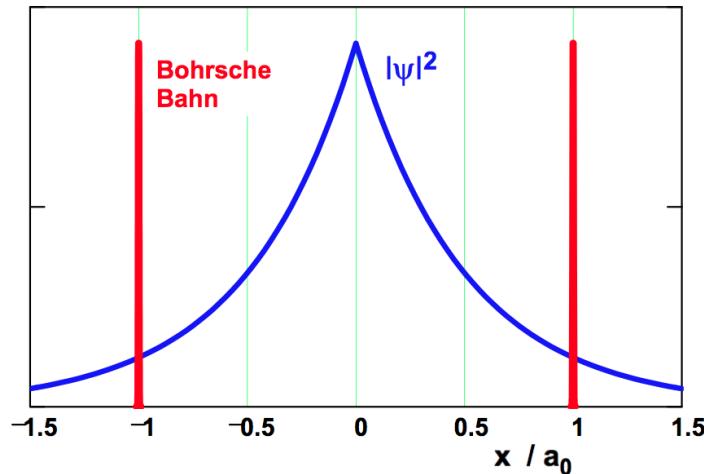
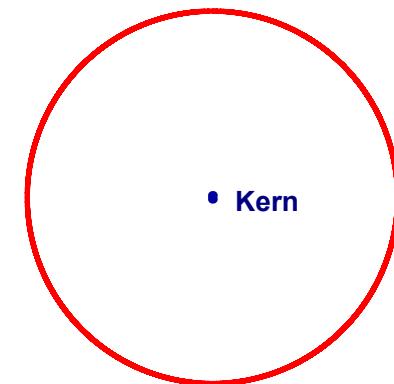
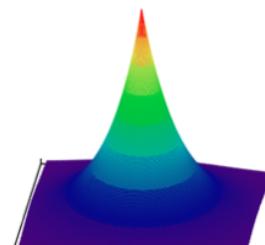
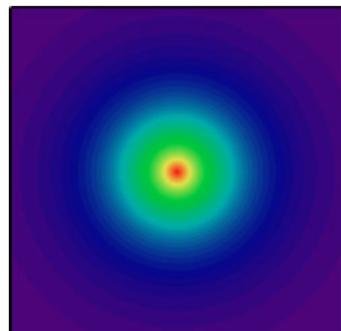
$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a_0} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$



Schrödinger-Bild des H-Atoms

oder

Bohrsches Atom-Modell?

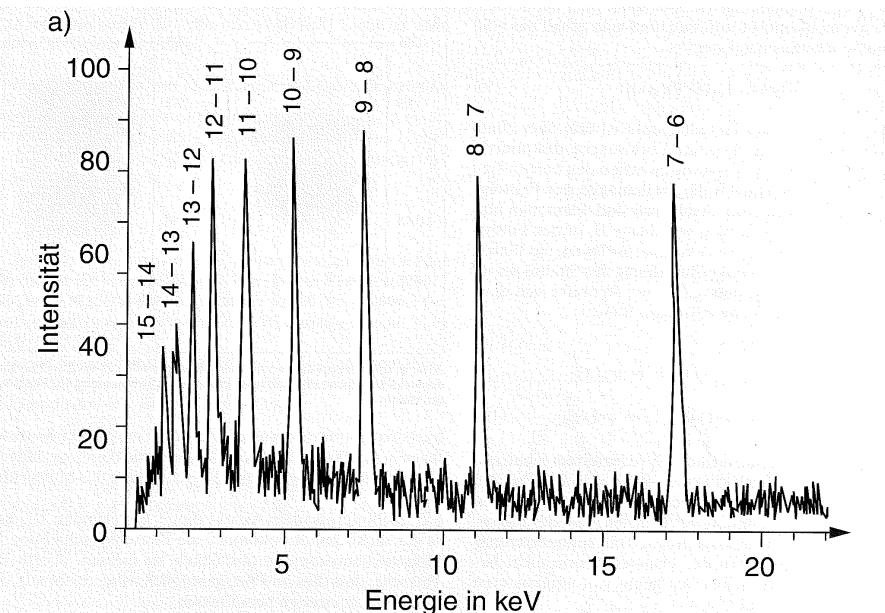


wasserstoffähnliche "Atome"

Positronium (Positron-Elektron-Atom),
Antiprotonium (Proton-Antiproton-Atom)

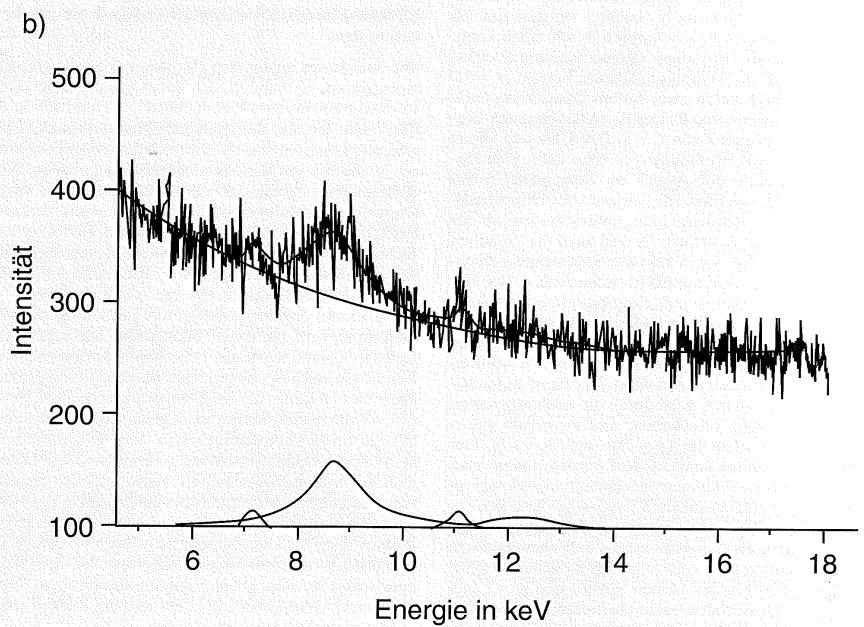
Man beobachtet Annihilation im Grundzustand

Unmöglich im Bohr-Atom, aber hohe Wahrscheinlichkeit im Schrödinger-Atom, da $\psi(0)$ nicht null ist



Spektrallinien des antiprotonischen Neonatoms

Übereinstimmung mit Bohr-Modell und mit Schrödinger-Gleichung



Verbreiterung der Spektrallinie für den Übergang
 $2p \rightarrow 1s$
im antiprotonischen Wasserstoff

L. M. Simons, Phys. Blätter 48 (1992), S. 261

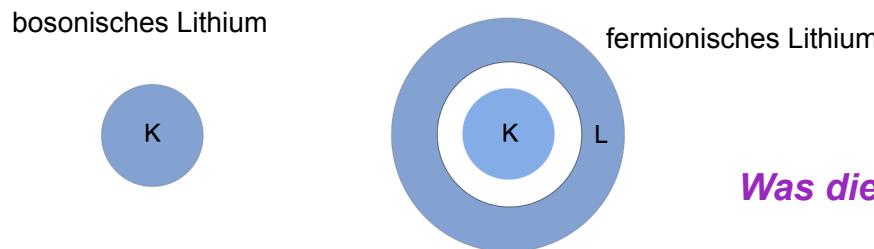
Fermionen (Spin 1/2, 3/2,..) maximal ein Fermion pro Quantenzustand

Antisymmetrische Gesamtwellenfunktion $\psi_A(2, 1) = -\psi_A(1, 2)$

Fermionen sind extreme Individualisten

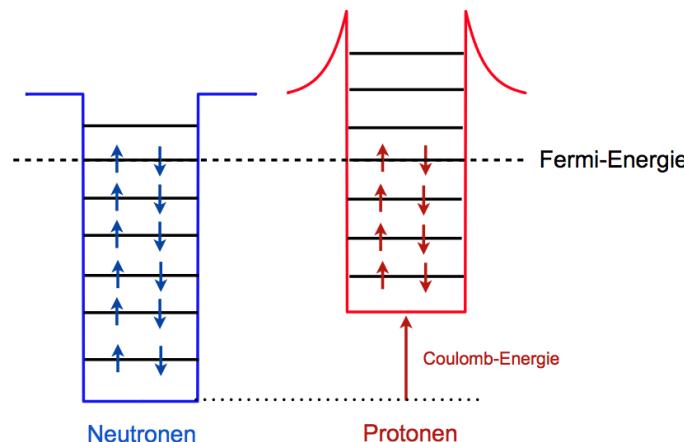
Eine Welt ohne Pauli-Prinzip? Lieber nicht!

- 1) Alle Elektronen würden in die K-Schale gehen,
schwere Atome wären sehr klein, Materie wäre extrem dicht



Was die Welt im Innersten auseinander hält

- 2) Noch viel schlimmer: in schweren Atomkernen würden sich alle Protonen durch Beta-Zerfall in Neutronen umwandeln: es gäbe gar keine schweren Atome



Bosonen (Spin 0, 1,..) gehen bevorzugt in den exakt den gleichen Quantenzustand

Symmetrische Gesamtwellenfunktion $\psi_S(2, 1) = +\psi_S(1, 2)$

Bosonen sind extreme Konformisten

Wichtige Beispiele:

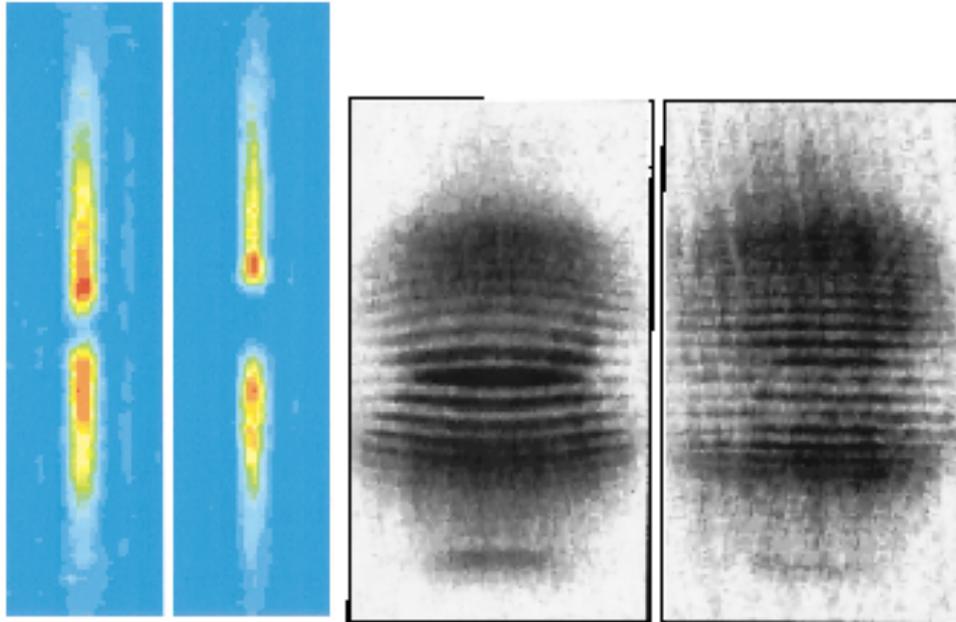
Photonen

Bose-Statistik ist Grundlage der stimulierten Emission und des Lasers

Cooperpaare bilden eine makroskopische Wellenfunktion im Supraleiter

Bose-Einstein-Kondensation

Makroskopische Interferenz von Materiewellen



Wolfgang Ketterle

Abbildung 1.11 Linke Seite: Phasenkontrast-Aufnahmen von zwei getrennten Bose-Einstein-Kondensaten, bestehend aus Natrium-Atomen [11]. Die Breite der Kondensate beträgt etwa 20 μm . Rechte Seite: beobachtete Interferenzen bei der Überlappung der beiden Kondensate. Bildwiedergabe mit freundlicher Erlaubnis von Prof. Wolfgang Ketterle und Science. Copyright 1997 AAAS.

Die Überraschungen der relativistischen Quantentheorie und der Quantenfeldtheorie

Existenz der Antiteilchen

Spin 1/2 des Elektrons und der Quarks

**"anomales" magnetisches Moment des Elektrons
Erklärung des Permanentmagnetismus**

Vakuumfluktuationen, Higgs-Teilchen

Relativistische Verallgemeinerung der Schrödingergleichung

$$\hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}, \quad \hat{p} = -i\hbar \nabla$$

Energie- und Impulsoperator

(a) nichtrelativistisches freies Teilchen

$$E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m_e}, \quad i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 \psi \quad \text{Schrödingergleichung}$$

(b) relativistisches freies Teilchen

$$E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad -\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -\hbar^2 c^2 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + m_0^2 c^4 \psi \quad \text{Klein-Gordon-Gleichung}$$

$$\psi_p(\mathbf{r}, t) = A \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \exp(-i\omega t), \quad \psi_n(\mathbf{r}, t) = A \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \exp(+i\omega t)$$

$$\hat{E} \psi_p = +\sqrt{c^2 \mathbf{p}^2 + m_0^2 c^4} \psi_p$$

positive Energie

$$\hat{E} \psi_n = -\sqrt{c^2 \mathbf{p}^2 + m_0^2 c^4} \psi_n$$

negative Energie

Paul Dirac: Konstruktion einer relativistischen Wellengleichung, die von erster Ordnung in der Zeit ist

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -i\hbar c \left(\alpha_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial \psi}{\partial y} + \alpha_3 \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \beta m_e c^2 \psi$$

Die **Dirac-Gleichung** hat vier Lösungen:

Die Koeffizienten α_i und β sind 4x4-Matrizen

positive Energie

$$\psi_1 = \exp(-i\omega_0 t) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \psi_2 = \exp(-i\omega_0 t) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

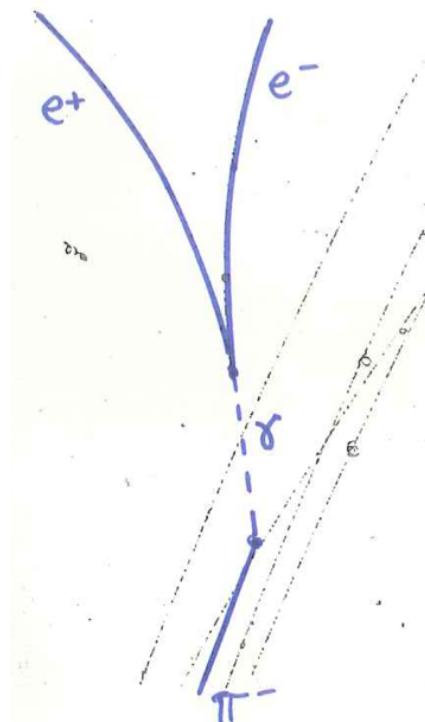
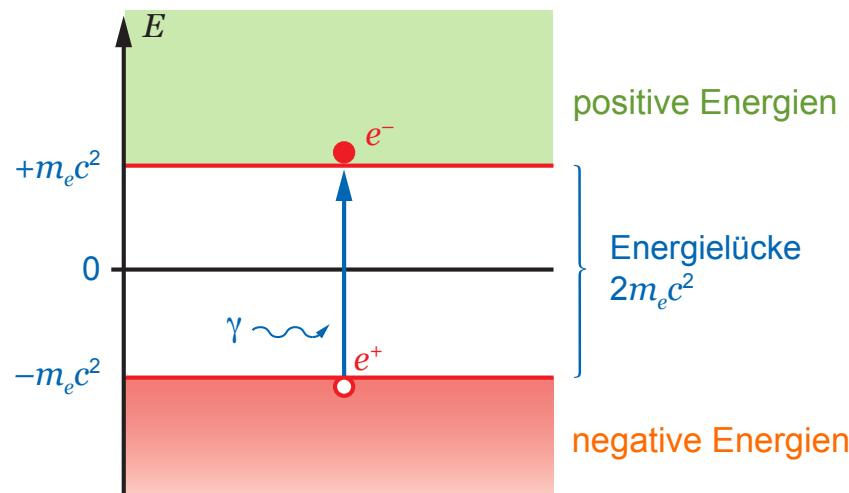
negative Energie

$$\psi_3 = \exp(+i\omega_0 t) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \psi_4 = \exp(+i\omega_0 t) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

It was found that this equation gave the particle a spin of half a quantum. And also gave it a magnetic moment. It gave us the properties that one needed for an electron. That was really an unexpected bonus for me, completely unexpected.

Wellenfunktionen mit negativer Energie? Umdeutung als Antiteilchen

Dirac-Bild des Positrons



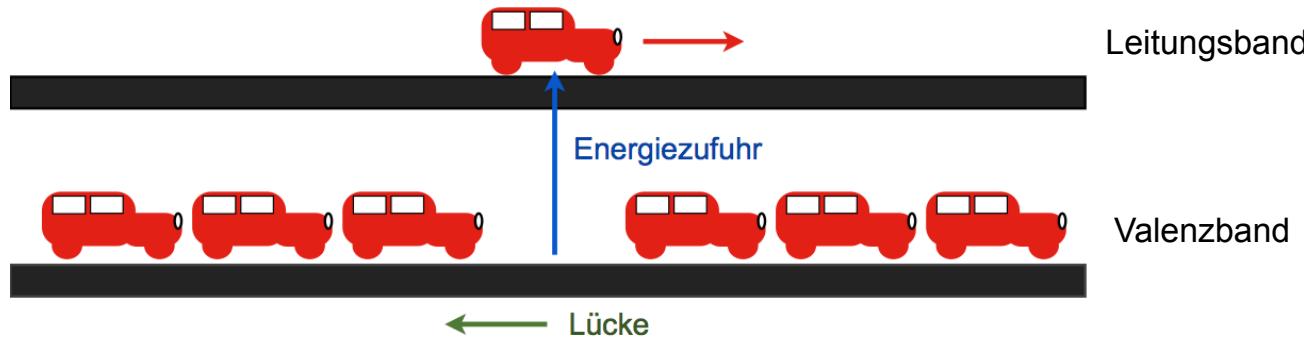
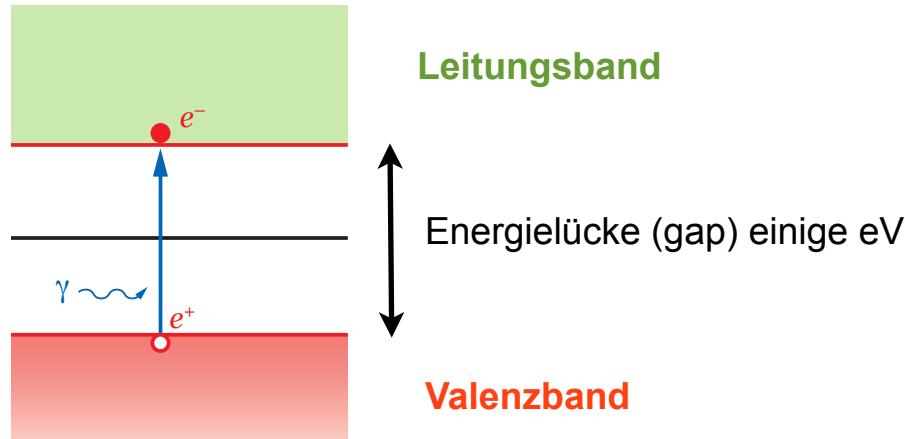
Elektron-Positron-Paarerzeugung
in einer Blasenkammer

Feynman-Interpretation der Wellenfunktionen negativer Energie.
Die Wellenfunktionen ψ_3 und ψ_4 haben keine direkte physikalische Relevanz. Sie gewinnen sie durch den Übergang zum konjugiert Komplexen.
Die Funktionen ψ_3^* und ψ_4^* kann man im wesentlichen als Wellenfunktionen der Positronen interpretieren. Anwendung des Energieoperators ergibt positive Energiewerte.
Die Dirac-Gleichung beschreibt sowohl Elektronen wie Positronen und auch Elektron-Positron-Paarerzeugung und -Paarvernichtung.

Für Details siehe P. Schmüser, Feynman-Graphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker, Springer 1995

Dirac-Bild für Halbleiter

Warum verhält sich ein Loch im Valenzband wie eine positive Ladung?



Das anomale magnetische Moment des Elektrons

$$\mu_e = -\frac{e\hbar}{2m_e} \equiv -\mu_B$$

$$\mu_e = -g \cdot \frac{e}{2m_e} \cdot \frac{\hbar}{2}$$

Vorhersage der Dirac-Gleichung

eine rotierende geladene Kugel mit Spin 1/2 hätte $\mu_e = -\mu_B/2$

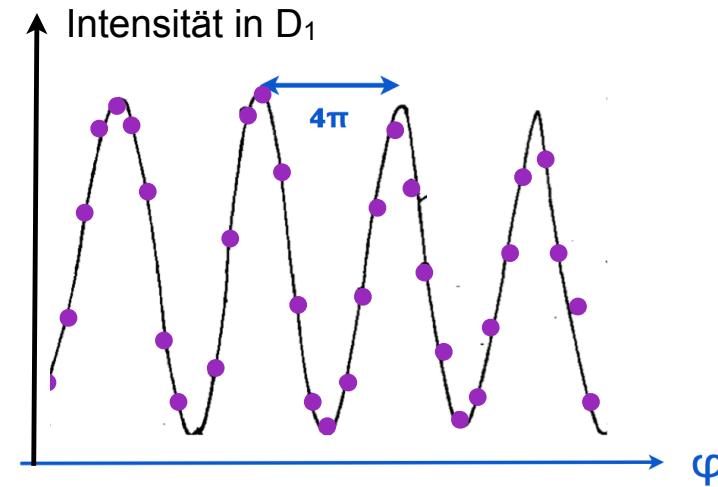
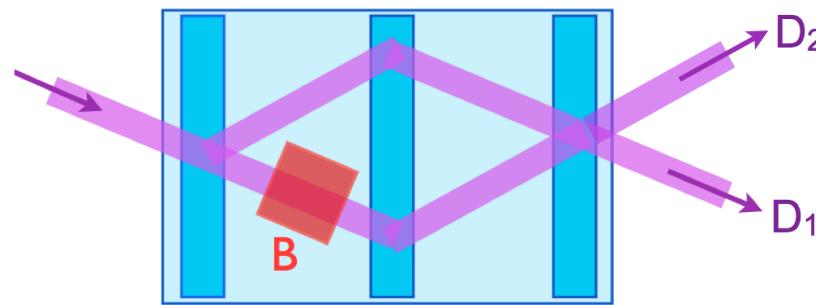
Die unglaubliche Präzision der QED-Rechnung und der Experimente:

$$(g - 2)/2 = (1159,65218076 \pm 0,00000027) \cdot 10^{-6}$$

Die skurrile 2π -Rotations-Antisymmetrie der Dirac-Spinoren

Gemessen mit Neutroneninterferenzen (H. Rauch et al.)

Gezeichnet mit Genehmigung nach einer Abbildung von H. Rauch



Elektronenwellen in magnetischen Feldern

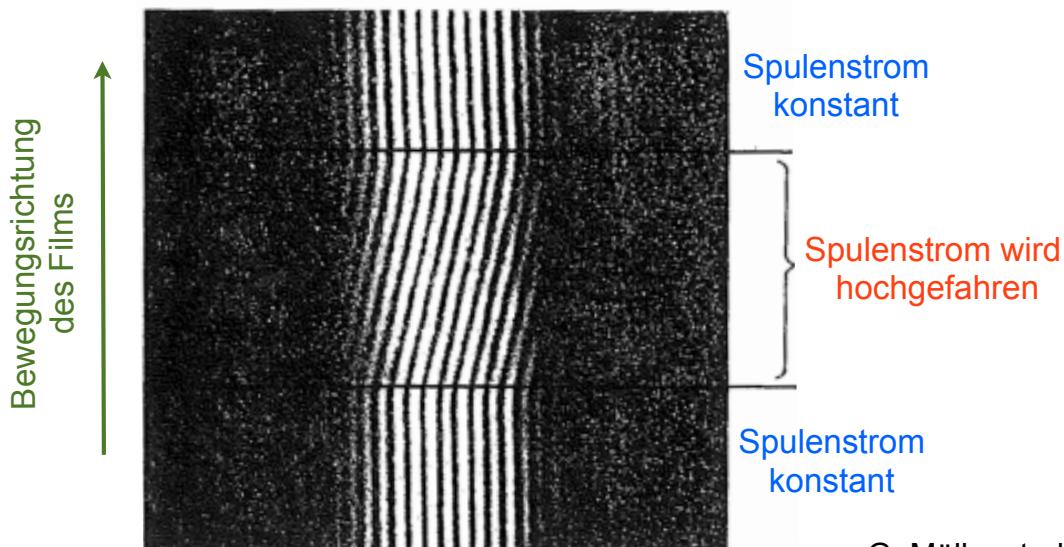
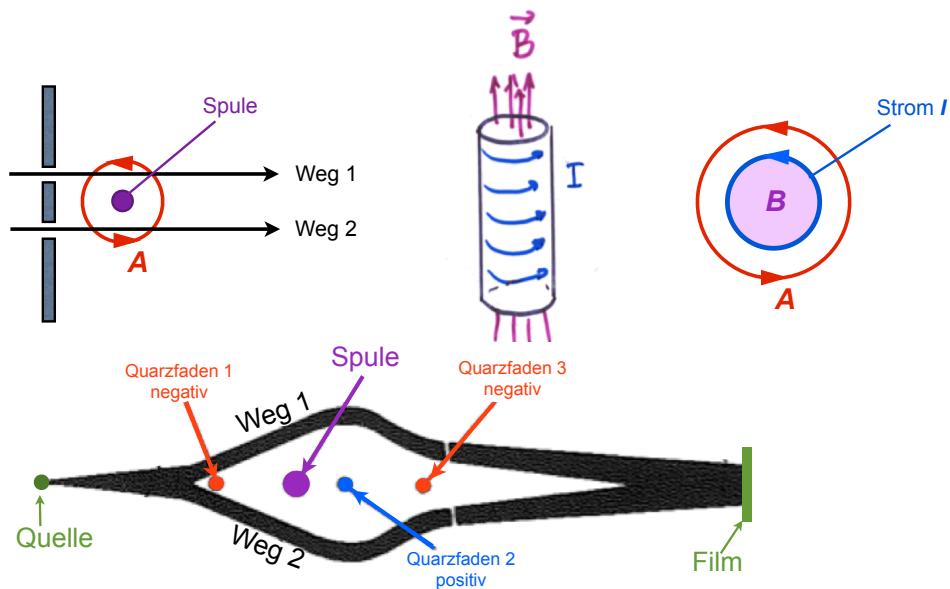
Aharonov-Bohm-Effekt (schon früher entdeckt durch Ehrenberg, Siday)

Ein Magnetfeld (genauer das magnetische Vektorpotential \mathbf{A}) ändert die de-Broglie-Wellenlänge von Elektronen

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{m_e v - e A}$$

Fundamentale Bedeutung in der Quantenelektrodynamik QED und der Eichtheorie der elektro-schwachen Wechselwirkung

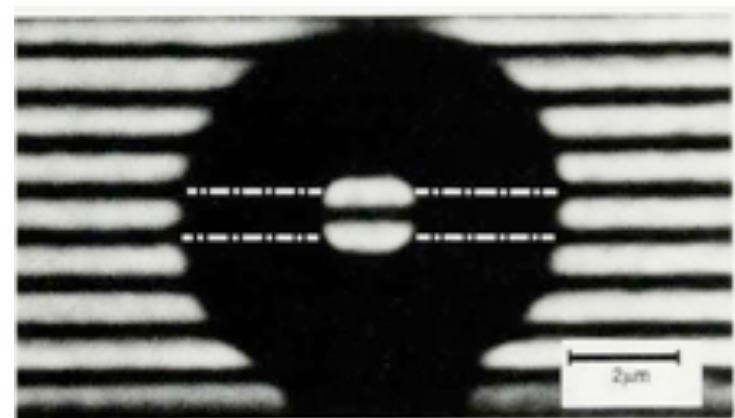
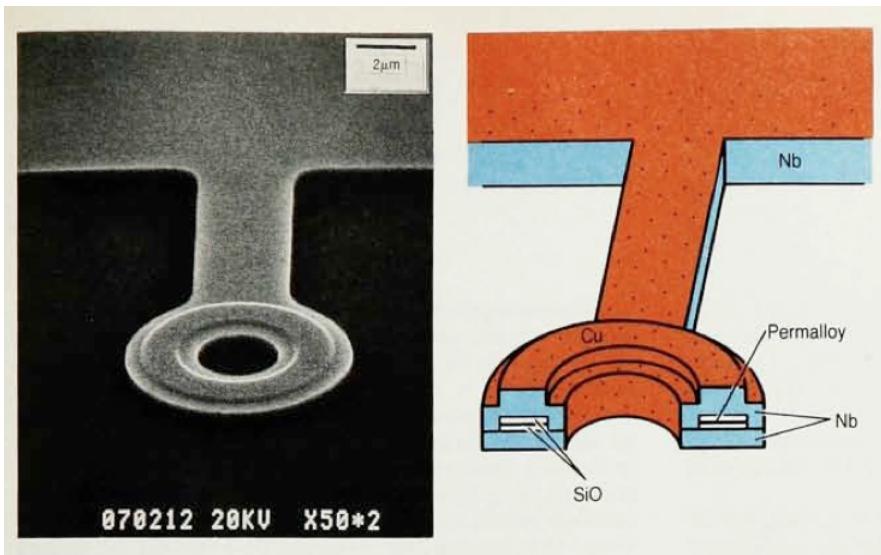
Experimenteller Nachweis des Aharonov-Bohm-Effekts



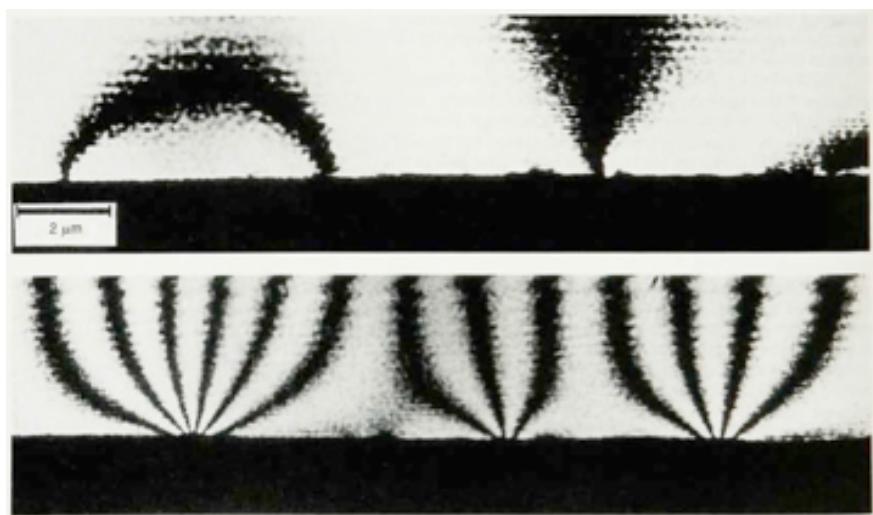
G. Mollenstedt, W. Bayh, Phys. Blätter 18 (1962), S. 299

Experimente zum Aharonov-Bohm-Effekt mit Elektronen holografie

Akira Tonomura



beachten: Verschiebung des Interferenzstreifens in der Ringöffnung

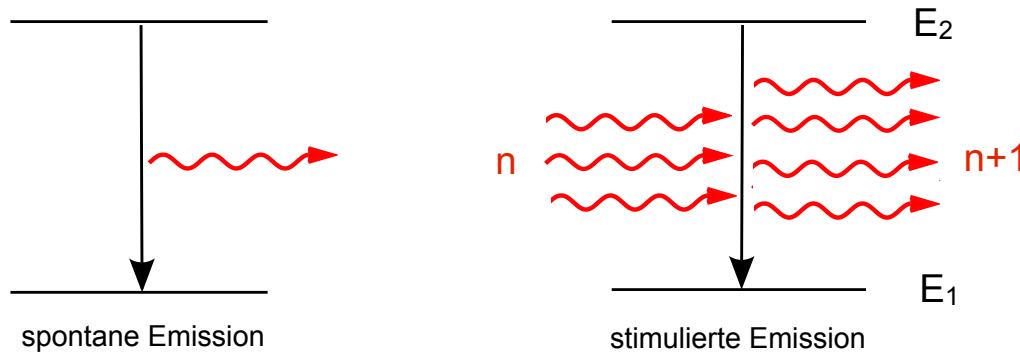


magnetic field lines emerging from a superconductor

Die komplexe Natur des Vakuums

- (a) **Vakuumfluktuationen** "triggern" spontane Quantenübergänge
- (b) **Higgsfeld** schirmt schwache Wechselwirkungen ab und gibt den Feldquanten W und Z eine grosse Masse (und auch den Elementarteilchen)
- (c) Casimir-Kraft und weitere Effekte

(a) Spontane und stimulierte Emission von Strahlung durch Atome



Die stimulierte Emission von Strahlung durch Atome kann mit der Schrödinger- oder Dirac-Gleichung unter Benutzung der Störungstheorie berechnet werden.

**Es gibt keine spontane Emission in der Quantenmechanik
Man braucht dafür die Quantenfeldtheorie**

Quantentheorie des elektromagn. Strahlungsfeldes (QED)

Das elektromagnetische Strahlungsfeld wird als Ensemble von unendlich vielen harmonischen Oszillatoren behandelt.

Grundzustand (Vakuum): Zustand der niedrigsten Energie des Feldes.

Die **Nullpunktsschwingungen** sind immer vorhanden und lassen sich nicht abschalten.

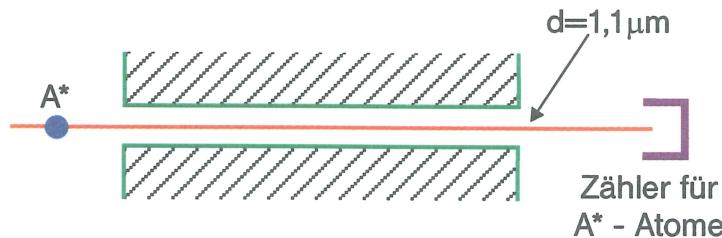
Die "spontane" Emission ist in Wahrheit eine durch Vakuumfluktuationen erzwungene Emission

Experimentell beweisbar mithilfe der Cavity-QED

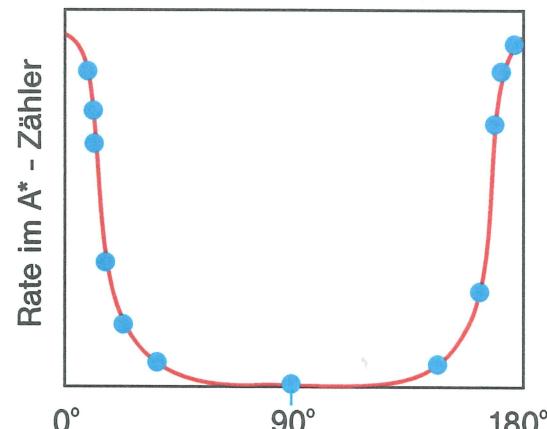
Haroche-Gruppe: Abschirmung der Vakuumfluktuationen verlängert Lebensdauer angeregter Atome A*

Cäsium-Atomstrahl, Übergang 5d \longrightarrow 6s

$\lambda = 3,5 \mu\text{m}$



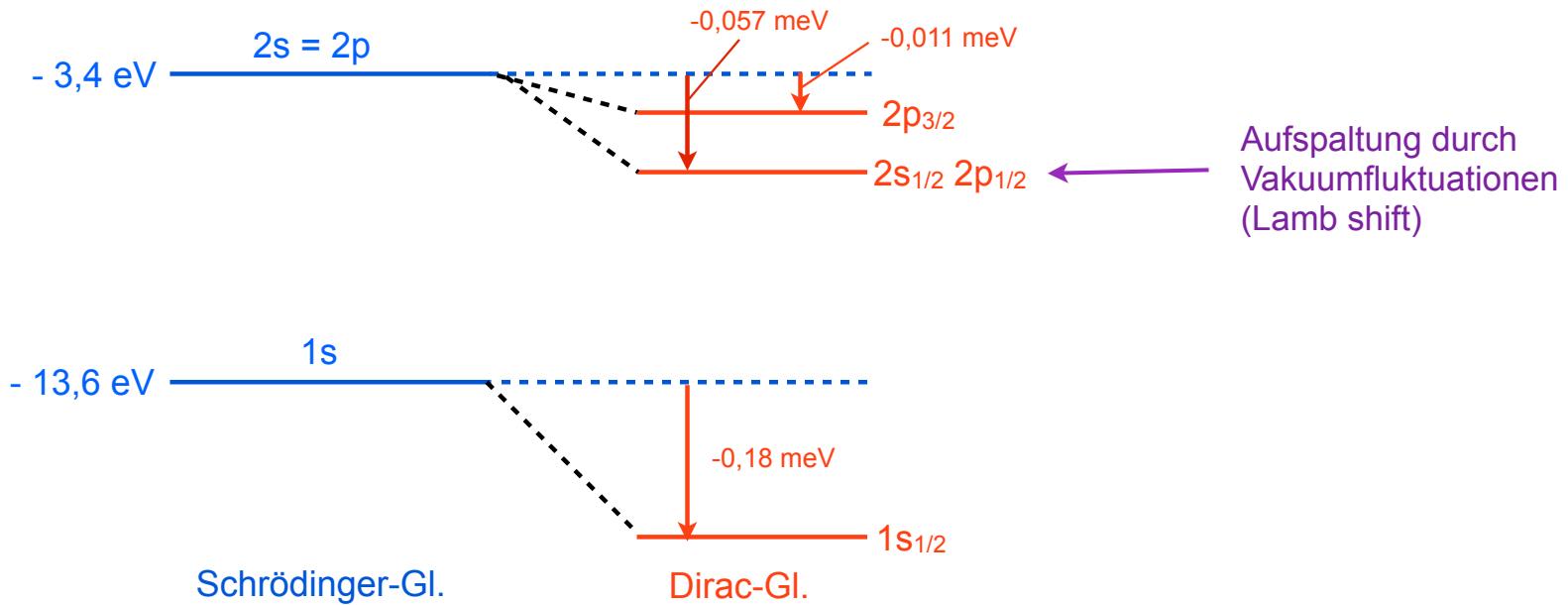
gemessen: 13-fache Verlängerung der Lebensdauer



Winkel zwischen \vec{E} und Metallplatten

Gezeichnet mit Genehmigung nach einem Bild von S. Haroche

Feinstruktur im H-Atom



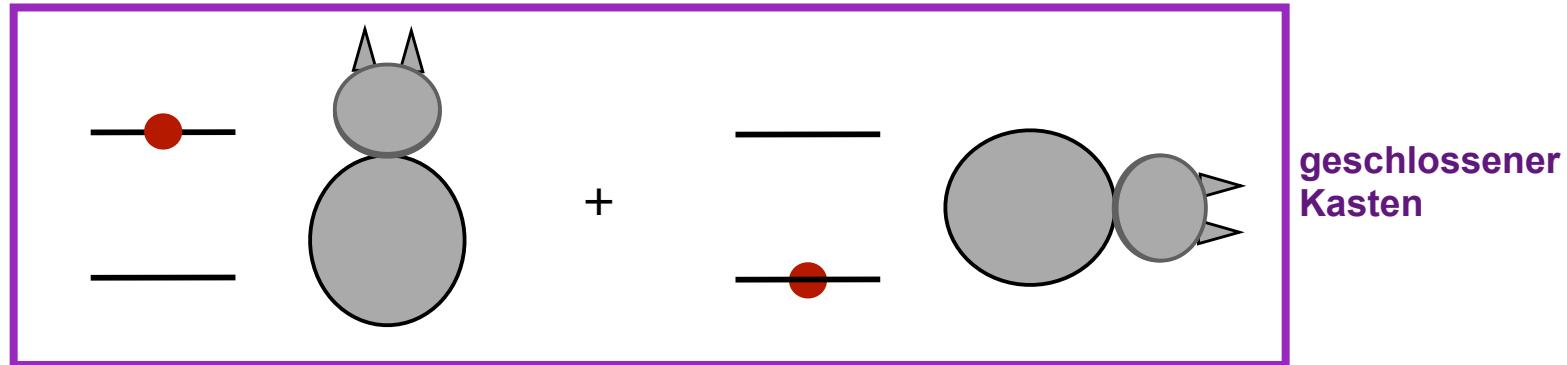
Die Dirac-Gleichung berücksichtigt nicht die Quantenfeldtheorie
Effekt der Vakuumfluktuationen:

die Energien von $2s_{1/2}$ und $2p_{1/2}$ sind geringfügig verschieden (Lamb shift)

Hinweis: Abbildung 10.1 in dem Buch "Theoretische Physik für Studierende des Lehramts", Band1, enthält einen Fehler und sollte durch obiges Bild ersetzt werden

Schrödingers Katze

Um die Absurdität der Quantenmechanik zu illustrieren, schlug Schrödinger 1935 ein Gedankenexperiment vor, in dem ein **makroskopisches Objekt (die Katze)** mit einem **mikroskopischen System (angeregtes Atom)** verschränkt ist.



$$\Psi = [\text{(angeregtes Atom / Katze lebend)} + \text{(Atom im Grundzustand / Katze tot)}]$$

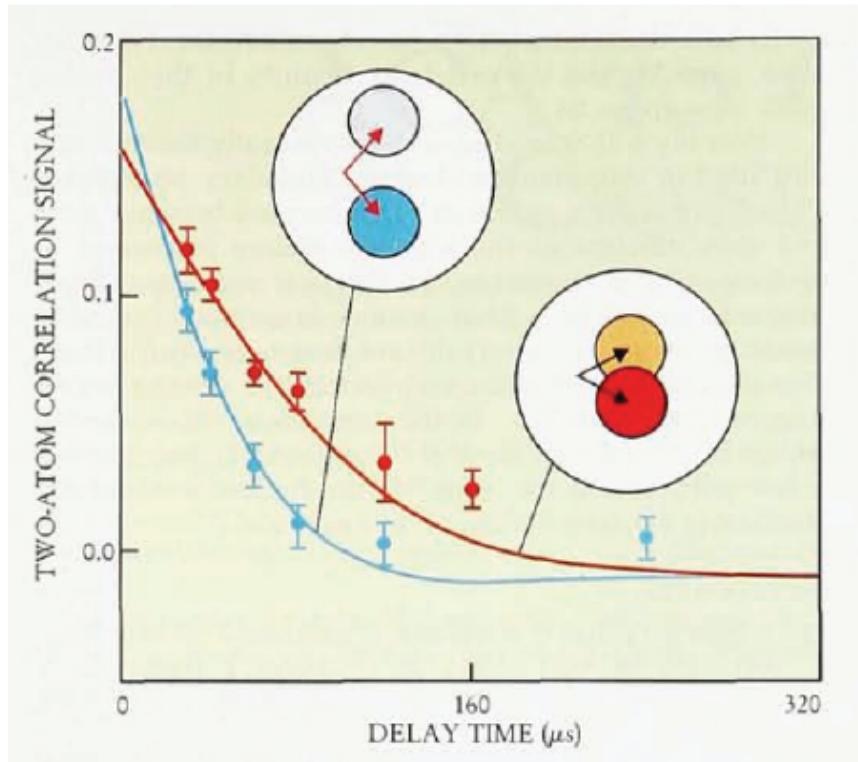
Das Atom befindet sich in einer Superposition von Anregungs- und Grundzustand, also sollte sich die Katze in einer Superposition von lebendig und tot befinden. Eine Entscheidung über das Schicksal der Katze würde erst im Augenblick der Messung erfolgen.

Diese absurde Situation wird nie beobachtet

Serge Haroche et al.: experiments with „mini-cats“

mini-cat: microwave photons in a superconducting cavity

decoherence time = τ / n



Physics Today July 1998

Abbildung 9.6 Gemessene zeitliche Abnahme der Kohärenz in dem „Schrödinger-Kätzchen-Experiment“ von Brune et al. [8]. Die Dekohärenzzeit beträgt etwa 50 μs . Die Abbildung wird in dem oben genannten Physics-Today-Artikel von S. Haroche [23] diskutiert. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung von Prof. J.-M. Raimond und Prof. S. Haroche. Figure adapted with permission from [8]. Copyright 1996 by the American Physical Society.

τ =time constant of cavity=160 μs
n number of photons ($n=3 - 10$)

decoherence time of a cat is unmeasurably short because n is huge

The cat is always a classical object, it is never a quantum object

Remark: with an improved cavity C much longer time constants τ have been achieved recently
Schrödinger kittens have grown

Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon

Nichtlokalität der Quantenmechanik

M A Y 15, 1935

P H Y S I C A L R E V I E W

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

Schlussfolgerung von EPR: Nein

Antwort von Niels Bohr: Ja

Sichtweise von Einstein: die Quantenmechanik ist nicht die endgültige Theorie, es muss eine **tiefer liegende deterministische Theorie** geben. Dies wäre eine Theorie mit **verborgenen Variablen** (hidden variables).

EPR betrachteten Korrelationen zwischen zwei weit voneinander entfernten Objekten, die durch eine **verschränkte** Wellenfunktion beschrieben werden.

Eine Messung an Objekt 1 hat eine **instantane** Auswirkung auf die Messung an Objekt 2. Die Relativitätstheorie scheint außer Kraft gesetzt (**ist sie aber nicht**). Albert Einstein hielt diese "**spukhafte Fernwirkung**" für absurd.

Er glaubte deshalb an die Existenz einer uns verborgenen deterministischen Theorie, welche die Korrelation erklären kann.

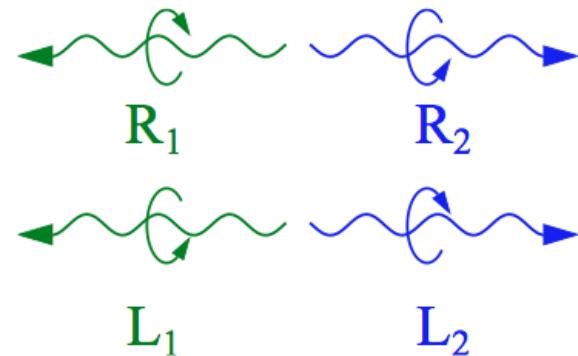
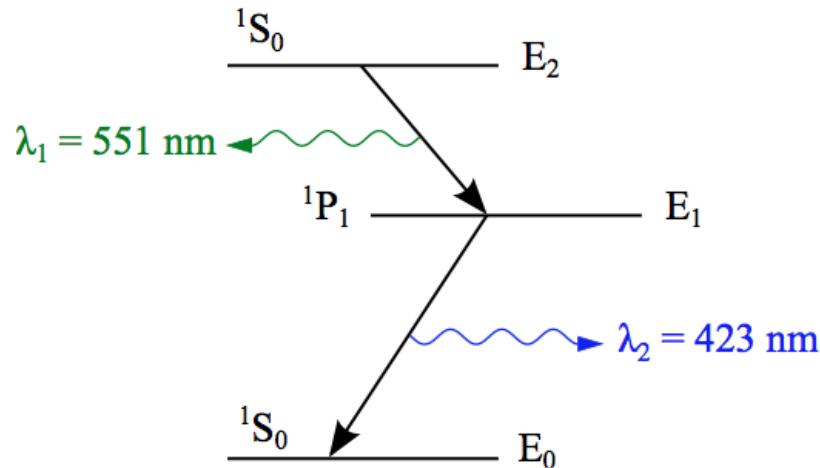
Niels Bohr hingegen war von der Richtigkeit der Quantentheorie überzeugt.

Die Kontroverse zwischen Einstein und Bohr war letztlich philosophischer Natur und konnte durch theoretische Argumente nicht geklärt werden.

Es ist das Verdienst von John Bell, die Entscheidung zwischen den zwei Denkmöglichkeiten aus dem Bereich der Philosophie in den Bereich der Experimentalphysik verlegt zu haben.

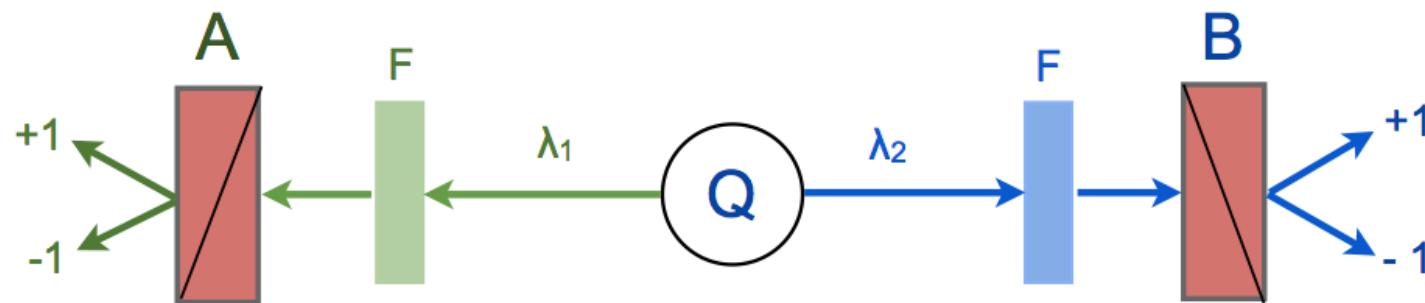
Wenn es eine tiefer liegende deterministische Theorie gibt, muss die **Bell'sche Ungleichung** erfüllt sein (siehe z.B. Ref. [1], Anhang E.2).

Korrelation der Photonen aus dem Zweistufenzerfall des Calcium-Atoms



Die verschränkte Wellenfunktion: $|\psi(1,2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|R_1\rangle|R_2\rangle + |L_1\rangle|L_2\rangle)$.

Schema der Apparatur von Alain Aspect



Bell's inequality test: more ideal than ever

Alain Aspect

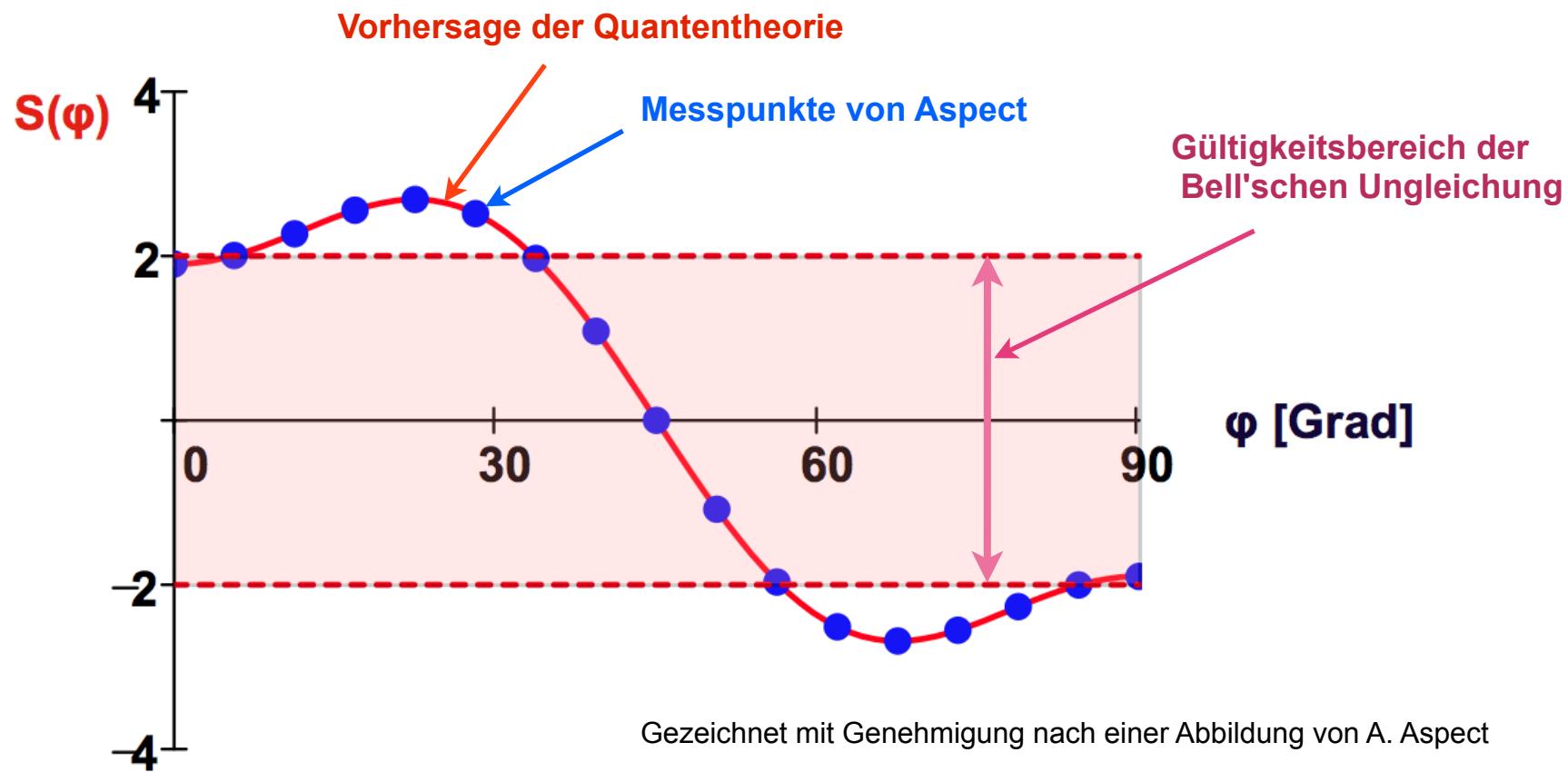
The experimental violation of Bell's inequalities confirms that a pair of entangled photons separated by hundreds of metres must be considered a single non-separable object – it is impossible to assign local physical reality to each photon.

Alain Aspect
experimentalist

John Bell
theoretician

It is the great achievement of John Bell that the discussion about the physical reality of quantum systems has been transferred from philosophy to experimental physics

Gemessene Korrelationsfunktion von Alain Aspect



**Ergebnis: die Bell'sche Ungleichung ist verletzt,
d.h. es gibt keine tiefer liegende deterministische Theorie**

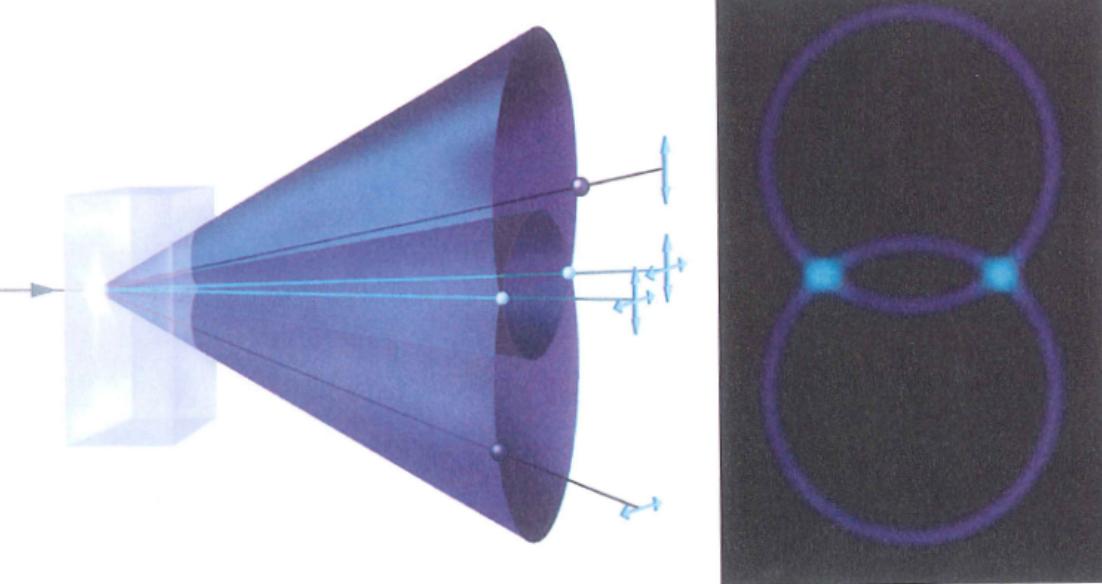
**Konsequenz: die Quantenmechanik gilt, aber sie ist nichtlokal
Eine verschränkte Wellenfunktion kann mehr als 100 km lang sein**

Aspect's experiment shows strong violation of Bell's inequality. There remains one final loophole for protagonists of the idea of hidden variables: if the setting of the detectors A and B is static they could communicate by some mysterious mechanism

Can be excluded by changing the angles of detectors A and B during the flight of the photons so rapidly that information transfer from A to B would require signal speed much larger than speed of light

Experiments with entangled laser photons and time-varying detectors violate Bell's inequality as well

Anton Zeilinger



1 UV photon is converted into 2 infrared photons in BBO crystal
The IR photons are in an entangled polarization state

Literatur

Die meisten Bilder stammen aus meinen Lehrbüchern:
Theoretische Physik für Studierende des Lehramts
Band 1 Quantenmechanik, Band 2 Elektrodynamik und Spezielle Relativitätstheorie
Springer Verlag
Dort gibt es auch ausführliche Erklärungen.

Weitere Literatur:

Serge Haroche and Jean-Michel Raimond, *Exploring the Quantum*, Oxford University Press 2006

David J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics*, Pearson Prentice Hall 2005

Richard. P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley 1965. Deutsche Ausgabe: *Vorlesungen über Physik*, Oldenbourg 1991

Akira Tonomura, *Electron Holography*, Springer 1994

Helmut Rauch, *Neutronen-Interferometrie: Schlüssel zur Quantenmechanik*, Physik in unserer Zeit, 29. Jahrg. 1998, Nr. 2

M. Brune et al., *Observing the Progressive Decoherence of the “Meter” in a Quantum Measurement*, Phys. Rev. Lett. **77**, 4887 (1996)

Olaf Nairz, Markus Arndt, and Anton Zeilinger, *Quantum interference experiments with large molecules*, Amer. Journ. of Physics, **71** (4) 319 (2003)

. M. Arndt, S. Gerlich, K. Hornberger und M. Mayor, *Interferometrie mit komplexen Molekülen*, Physik Journal 9 (2010) Nr. 10, S. 37

. M. R. Andrews, C. G. Townsend, H.-J. Miesner, D. S. Durfee, D. M. Kurn, W. Ketterle, *Observation of Interference Between Two Bose Condensates*, SCIENCE Vol. 275, 637 (1997)

Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, Phys. Rev. **47**, 777 (1935)

Niels Bohr, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, Phys. Rev. **48**, 696 (1935)

John S. Bell, *On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics*, Rev. Mod. Phys. **38**, 447 (1966)

D. Bohm and Y. Aharonov, *Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky*, Phys. Rev. **108**, 1070 (1957)

Alain Aspect, *Bell's theorem: the naive view of an experimentalist*, Vortrag bei einer Konferenz zum Gedenken an John Bell, Wien 2000

Alain Aspect, *Bell's inequality test: more ideal than ever*, NATURE Vol. 398, 18 March 1999

Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, *Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions*, Phys. Rev. Lett. **81**, 5039 (1998)

Serge Haroche, *Entanglement, Decoherence and the Quantum/Classical Boundary*, Physics Today, July 1998

Peter Schmüser, *Feynman-Graphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker*, Springer 1995

Victor F. Weisskopf, *The development of field theory in the last 50 years*, Physics Today November 1981, p. 69