

Rätsel in der Welt der Quanten

Dirk K. Morr

Universität Leipzig

The University of Illinois at Chicago



Leipziger Gespräche zur Mathematik
Sächsische Akademie der Wissenschaften

1. Februar 2012

Die Klassische Physik

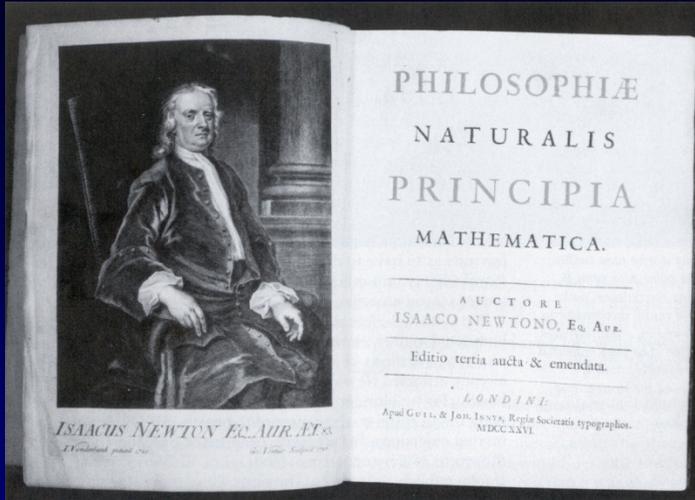


Bewegung von
Objekten



Lichtwellen

Bewegung von Objekten



Sir Isaac Newton (1687)

Newton's 2. Gesetz

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$$

Newton'sche Gesetze beschreiben die Bewegung von Objekten



weniger Kraft



mehr Kraft

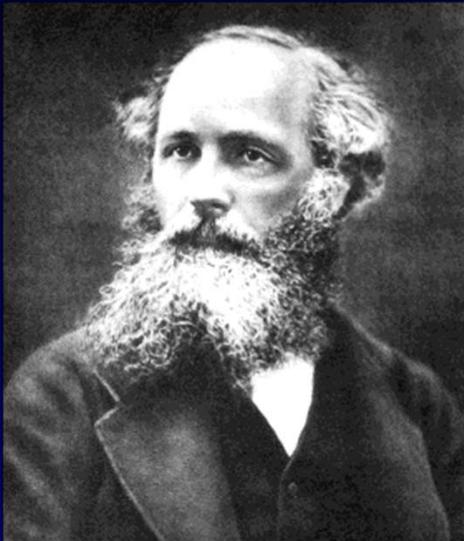


Lichtwellen

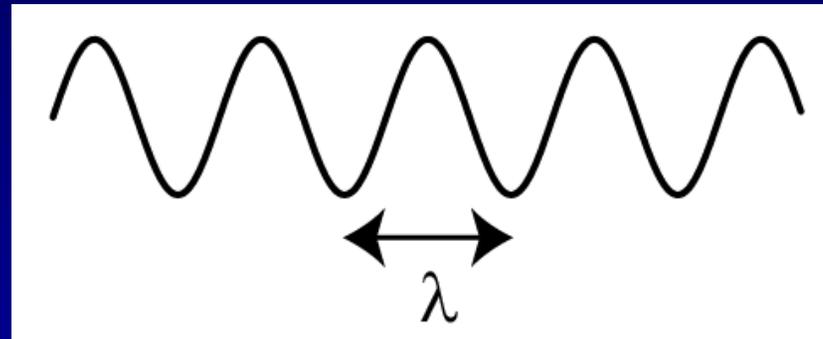
Maxwellschen Gleichungen (1865)



“Licht ist eine elektromagnetische Welle”



James Clerk Maxwell

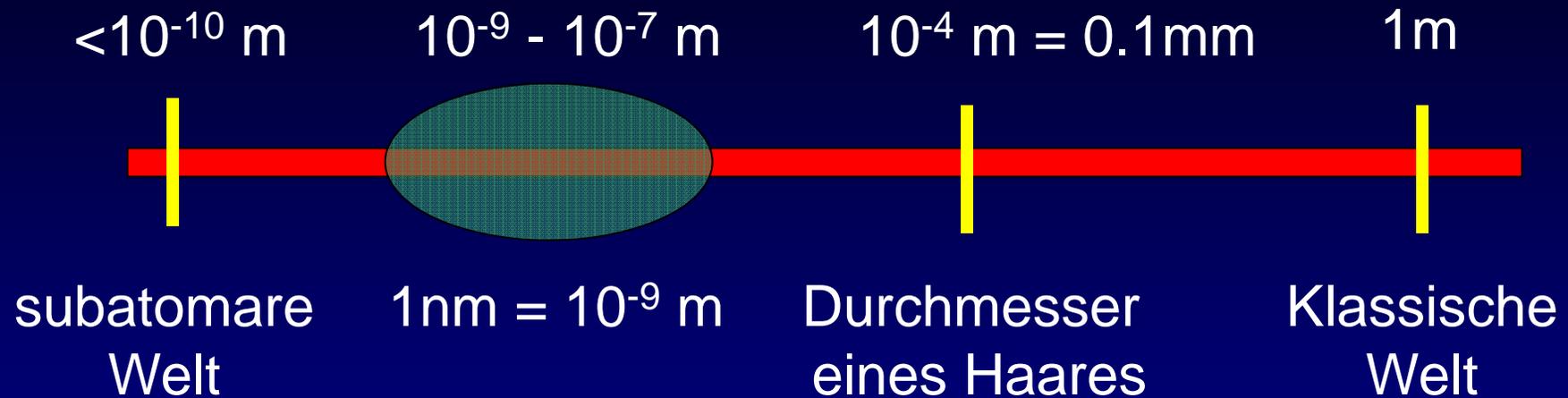


unterschiedliche Farbe
=
unterschiedliche Wellenlänge

$$\lambda_{\text{rot}} = 700 \text{ Nanometer}$$

$$\lambda_{\text{blau}} = 500 \text{ Nanometer}$$

1 Nanometer: klein oder kleiner?

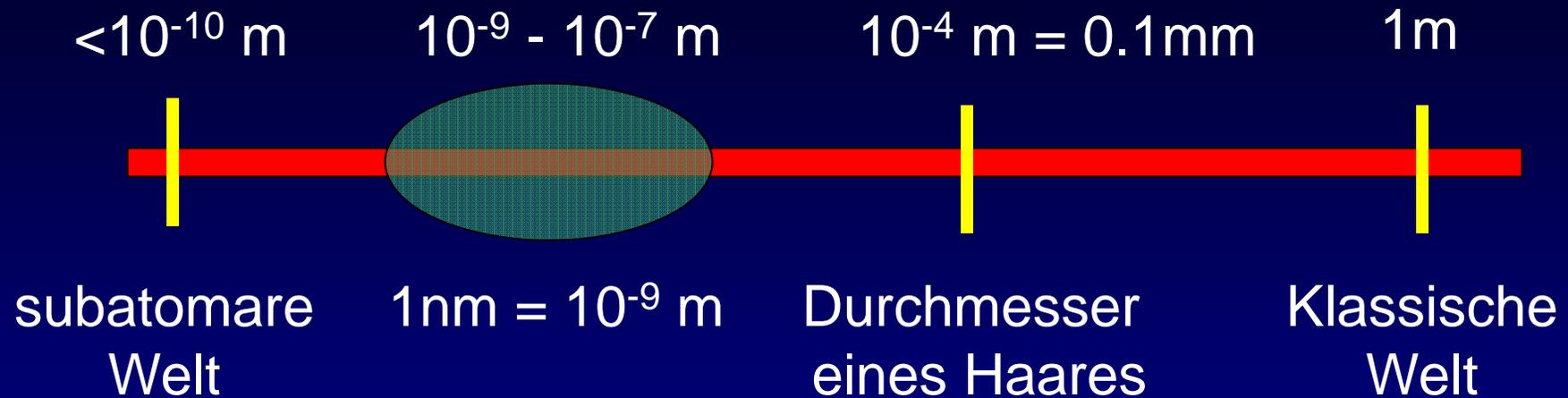


Wenn der Durchmesser eines Cents ein Nanometer wäre



Würde ein Meter gleich der Entfernung zwischen Leipzig und ? sein

1 Nanometer: klein oder kleiner?



Wenn der Durchmesser eines Cents ein Nanometer wäre



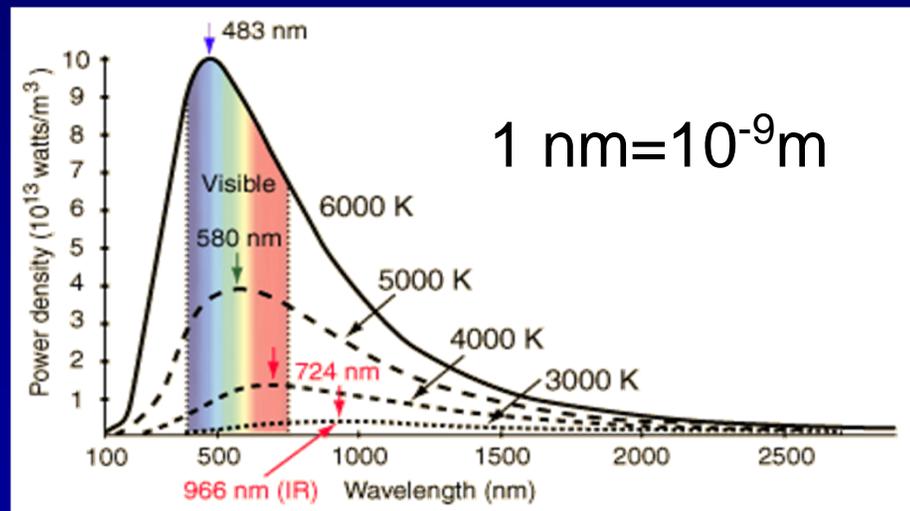
Würde ein Meter gleich der Entfernung zwischen Leipzig und Sydney sein

Das erste Anzeichen für Ärger (für die klassische Physik)

Heisse Dinge glühen



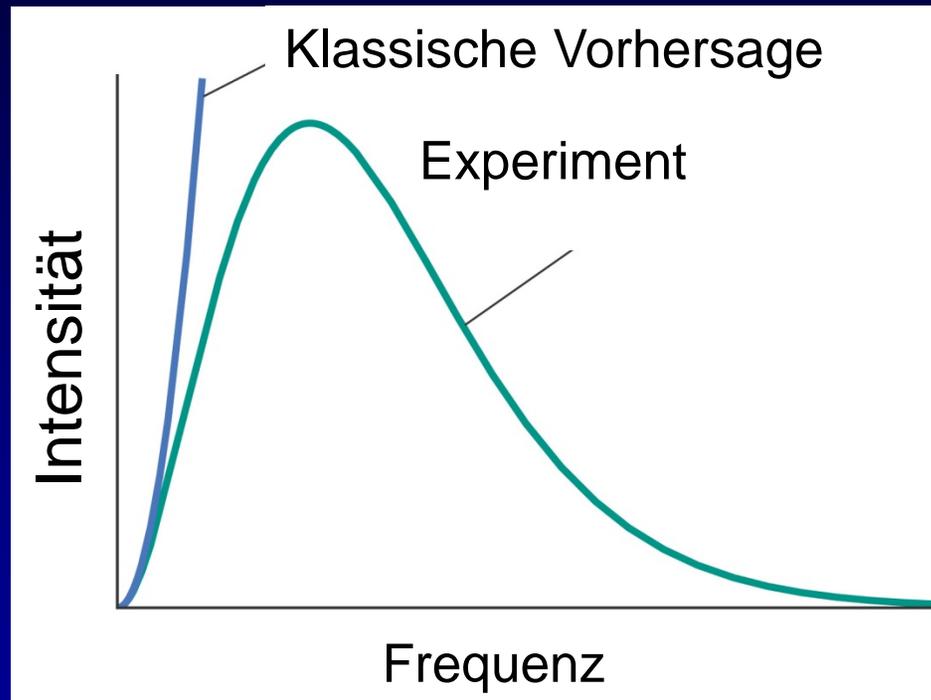
unterschiedliche Farben
=
unterschiedliche Temperaturen

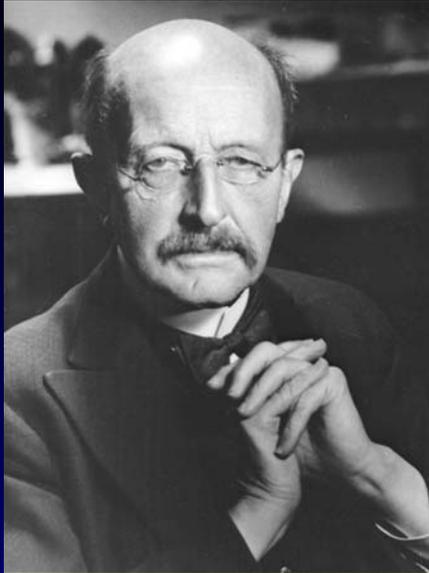


Schwarzer Strahler

Das Problem:

Maxwells klassische Theorie des Elektromagnetismus versagt

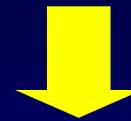




Max Planck
Nobelpreis 1918

Planck hatte eine revolutionäre Idee
“ ... die Energie des Lichts ist quantisiert.”

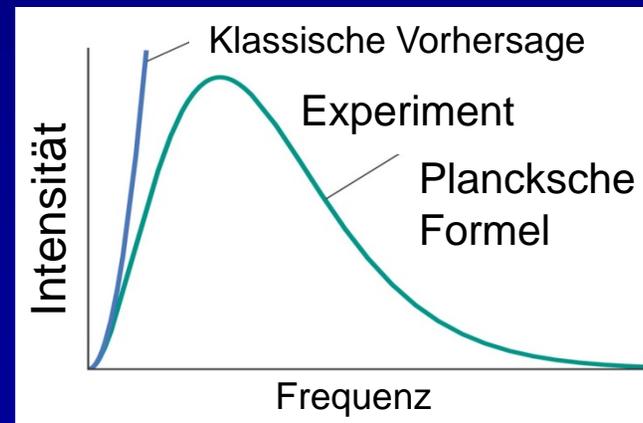
(1900)



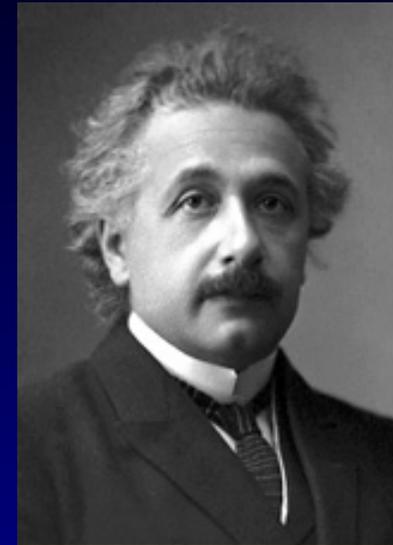
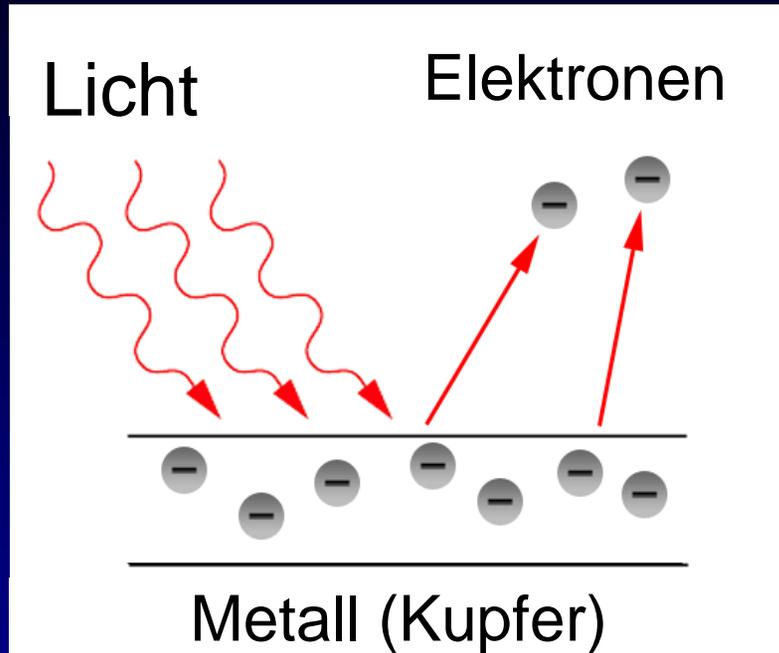
Energie kommt in kleinen Paketen

$h =$ Plancksche Konstante

Der Anfang der
Quantenmechanik



Lichtwellen = Teilchen



Albert Einstein
Nobelpreis 1921

Photoelektrischer Effekt

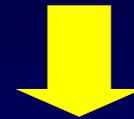
Einsteins bahnbrechende Idee

“...Lichtwellen besitzen die Eigenschaften von Teilchen ...”

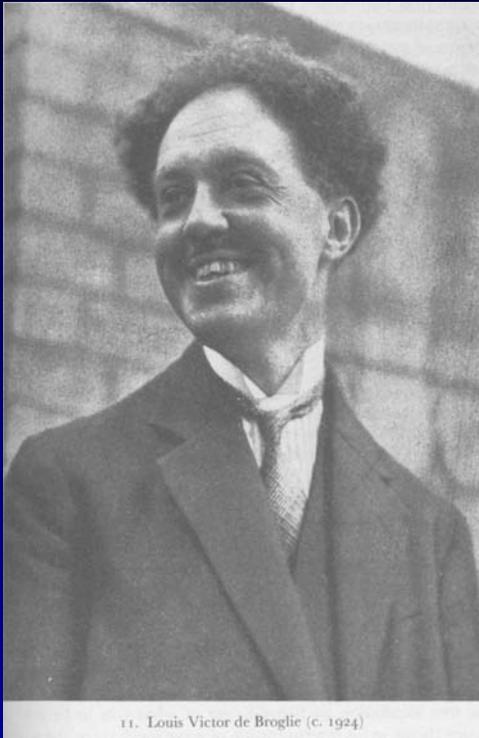
Lichtteilchen = Photon $E = h \frac{c}{\lambda}$ (1905)

Welle-Teilchen-Dualismus

Die Natur ist symmetrisch



“...materielle Teilchen besitzen die Eigenschaften von Wellen und Teilchen ...” (1924)

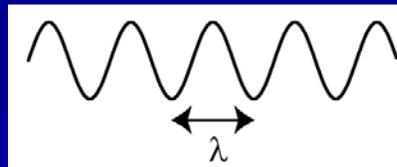


11. Louis Victor de Broglie (c. 1924)

Louis de Broglie
Nobelpreis 1929

Können wir Materiewellen sehen?

Problem: sehr kleine Wellenlänge



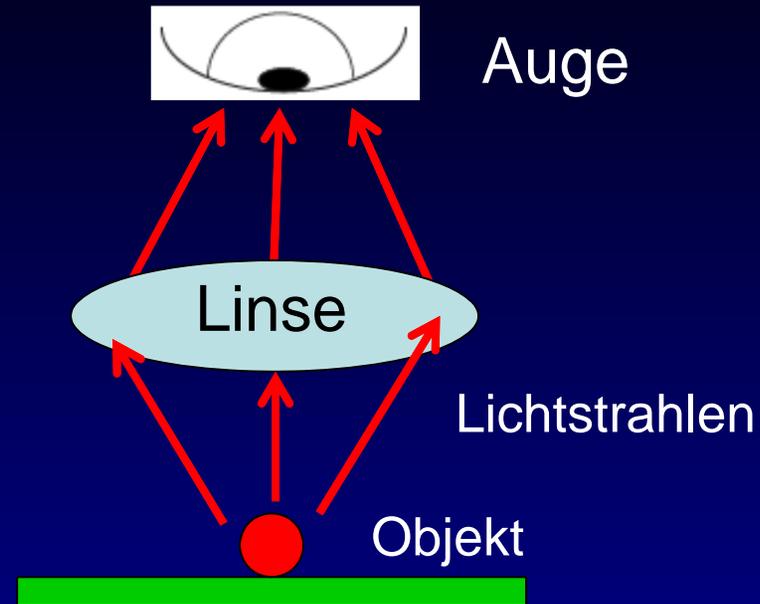
$$\lambda_{\text{Mat}} = 1 - 2\text{nm}$$

Wie sehen wir klein(st)e Dinge?

optisches
Mikroskop

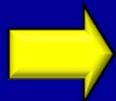


benutzt Licht und Linsen um
Objekte zu vergrössern



Wir können nur Objekte sehen die grösser sind
als die Wellenlänge des Lichtes

Aber: $\lambda_{\text{Licht}} = 450 \text{ nm} \gg \lambda_{\text{Mat}} = 1 - 2 \text{ nm}$



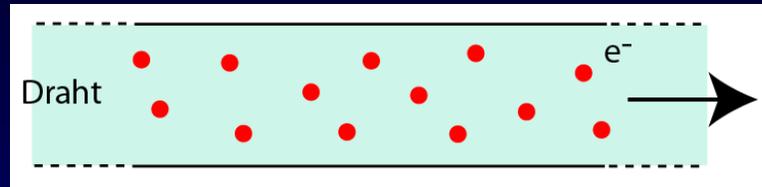
Wir brauchen ein besseres Mikroskop

Rastertunnelmikroskop



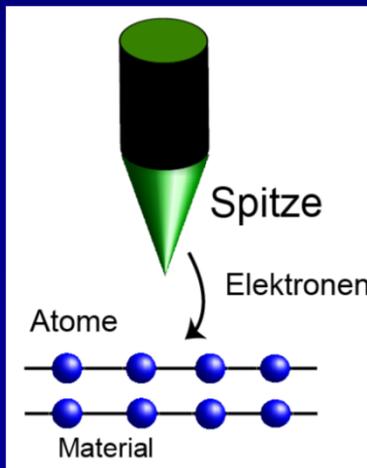
G. Binning, H. Rohrer
Nobelpreis 1986

Bilder machen mit einem elektrischen Strom

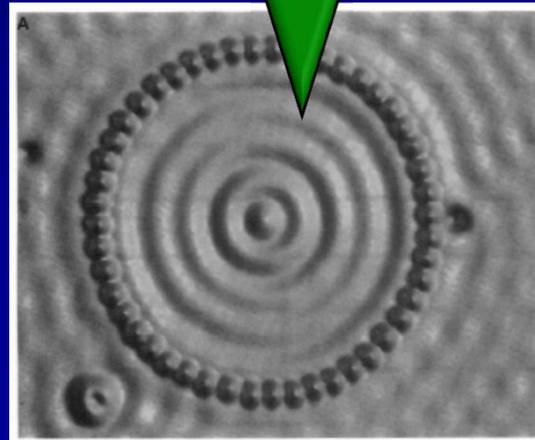


Elektrischer Strom = Fluss von Elektronen

Rastertunnelmikroskop



Kobalt Atome
auf einer
Kupfer
Oberfläche

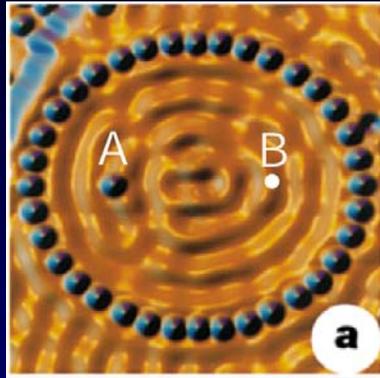


Stehende
Materiewellen
von Elektronen

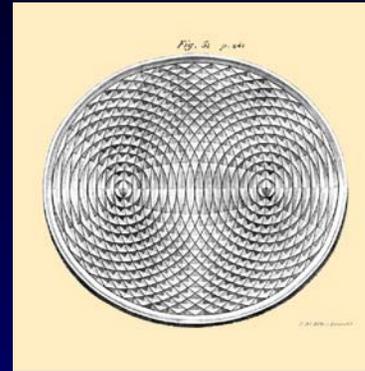
D. Eigler *et al.*, Science 262, 218 (1993)

Bilder aus Materiewellen

elliptischer
Quanten
Pferch

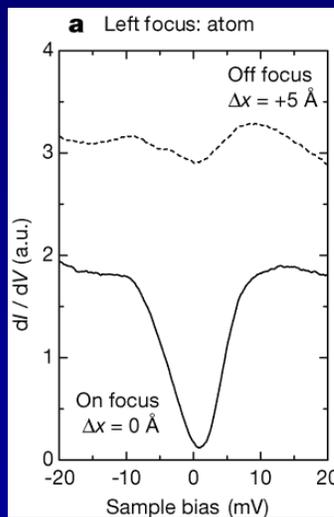


Manoharan *et al.*, *Nature* **403**,
512 (2000)



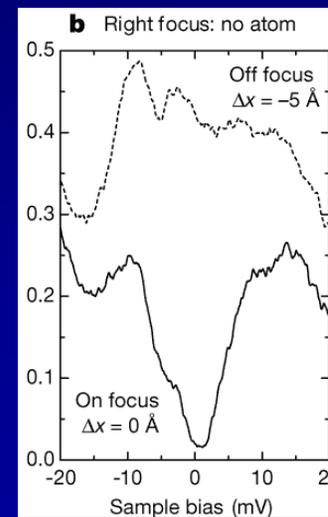
Weber and Weber,
Wellenlehre, 1825

Elliptischer Behälter
gefüllt
mit Quecksilber



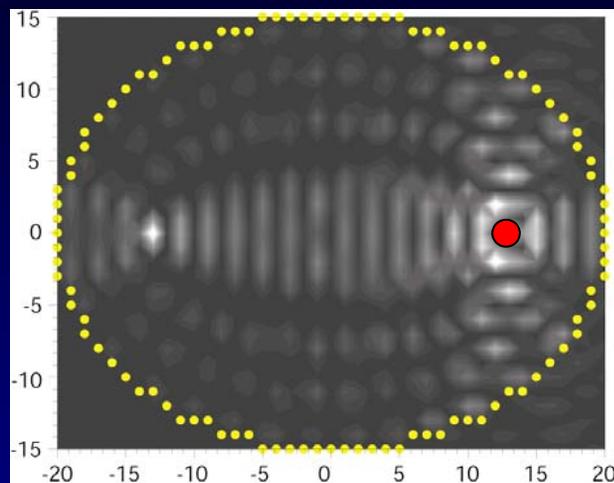
Brennpunkt A

Quanten Bild



Leerer Brennpunkt B

Von Quanten Pferchen zur St. Paul's Cathedral



D.K.M. and N.A. Stavropoulos,
PRL **92**, 107006 (2004)

Quanten Pferche
besitzen
Flüstergalerie-Moden



Flüstergalerie-Moden
in der Kuppel der
St. Paul's Cathedral
(London)



Kann man die Form einer Trommel hören?

M. Kac, Am. Math. Mon. **73**, 1 (1966)

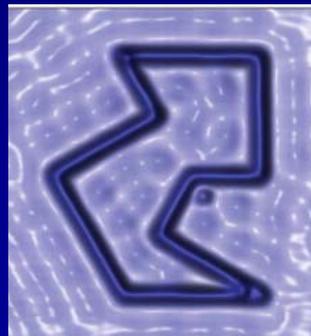


Trommeln hören sich unterschiedlich an

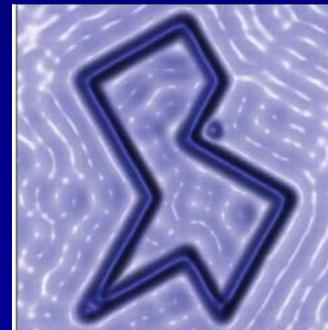
Aber: es gibt gleichlautende Trommeln in 2 Dimensionen

Gordon, Webb, Wolpert, Invent. Math. **110**, 1 (1992)

Und wie ist es mit der Quanten-Trommel ?



Bilby



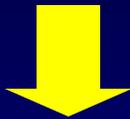
Hawk

C. Moon, *et al.*,
Science **319**, 782 (2008)

Die Schallspektren von Bilby und Hawk sind identisch

Die Heisenbergsche Unschärferelation

Teilchen besitzen Wellen Eigenschaften



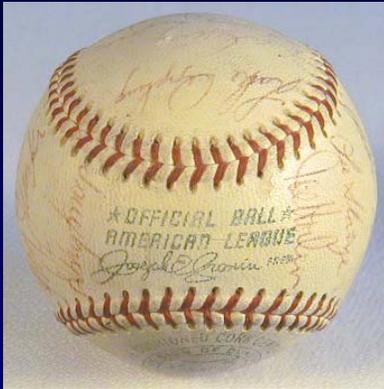
“ ... die Geschwindigkeit und Position eines Teilchens kann niemals gleichzeitig mit absoluter Genauigkeit bestimmt werden...”
(1927)



Werner Heisenberg
Nobelpreis 1932

Masse \circ Ungenauigkeit in der Position
 \circ Ungenauigkeit in der Geschwindigkeit $\geq h$

Masse ◦ Ungenauigkeit in der Position
◦ Ungenauigkeit in der Geschwindigkeit $\geq h$

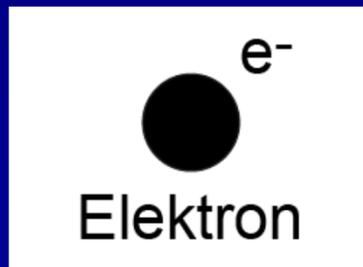


Ungenauigkeit in der Position – 10^{-17} m

Grösse eines Atom Kernes = 10^{-15} m

Ungenauigkeit in der Geschwindigkeit – 10^{-17} m/s

Geschwindigkeit einer Schnecke = 10^{-3} m/s



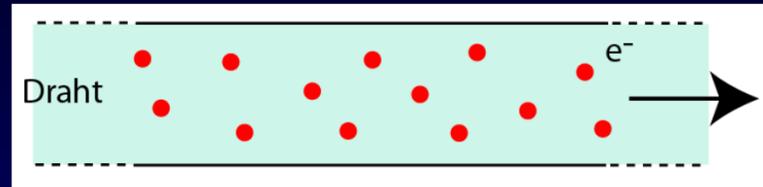
Ungenauigkeit in der Position – 1 cm

Ungenauigkeit in der Geschwindigkeit – 1 cm/s

Quantenmechanik in unserer Welt

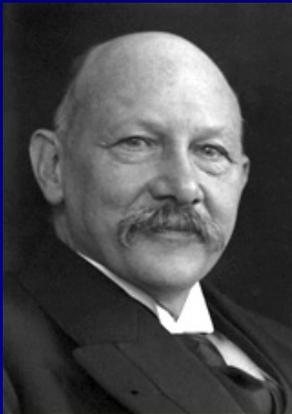
Die Entdeckung der Supraleitung

wenn ein Strom fließt,
erwärmt sich der Draht
(Widerstand)



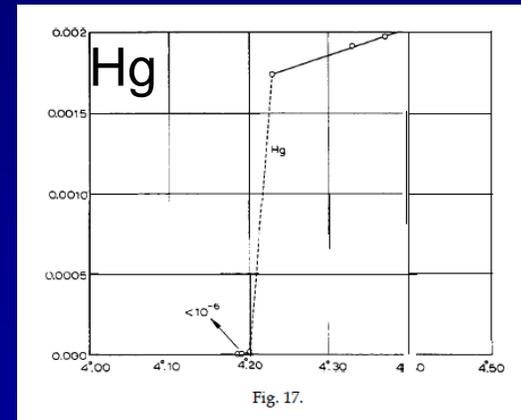
Verlust von Energie (schlecht!)

aber



Heike Kamerlingh
Onnes
Nobelpreis 1913

8 April 1911
in Leiden



Widerstand verschwindet
unterhalb von $T_c=4.2\text{K} = -269\text{C}$

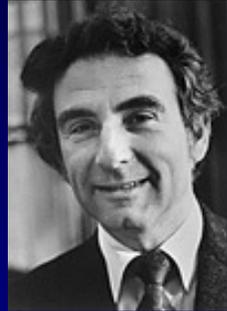
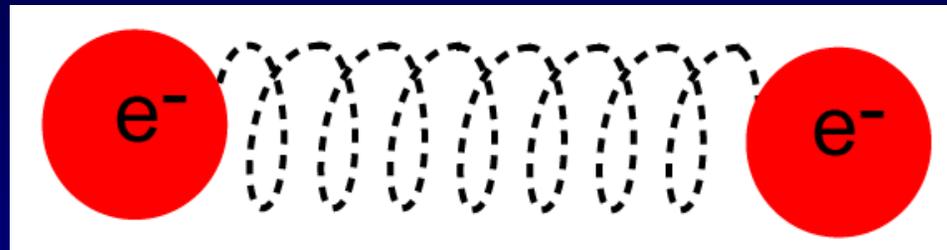
Die Lösung des Rätsels



J. Bardeen

“ ... Supraleitung entsteht durch die Paarung von Elektronen ... ” (1957)

Cooper Paar



L. N. Cooper

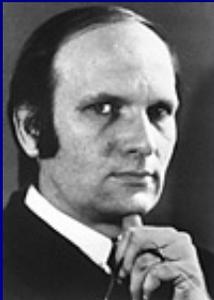
Elektrons werden durch eine Quanten-Feder gebunden



Die Elektronen bewegen sich im Gleichklang



Verschwinden des Widerstandes



J. R. Schrieffer

Nobelpreis 1972

Der Meissner-Ochsenfeld Effekt



W. Meissner



R. Ochsenfeld

“... magnetische Felder können nicht in den Supraleiter eindringen...”
(1933)



magnetische Levitation



TOSANOUMI
(Sumo Wrestler)
Height of Tosanoumi 186cm
Weight of Tosanoumi 142kg
Weight of disk 60kg
Total weight 202kg

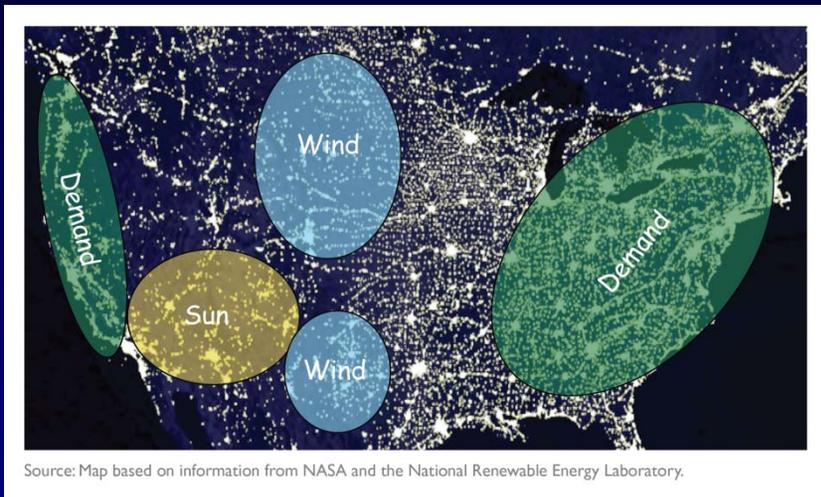
浮いた
土佐ノ海



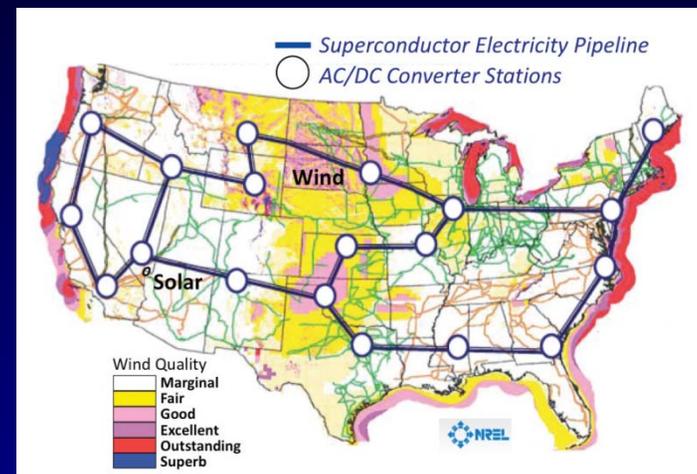
MagLev Zug in Shanghai

Die Lösung unserer Energieprobleme?

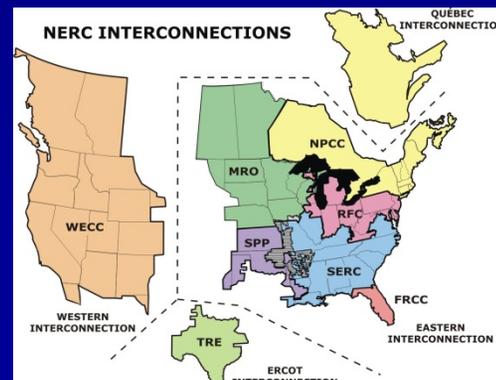
Energie könnte über grosse Distanzen übermittelt werden



Einbindung alternativer
Energiequellen



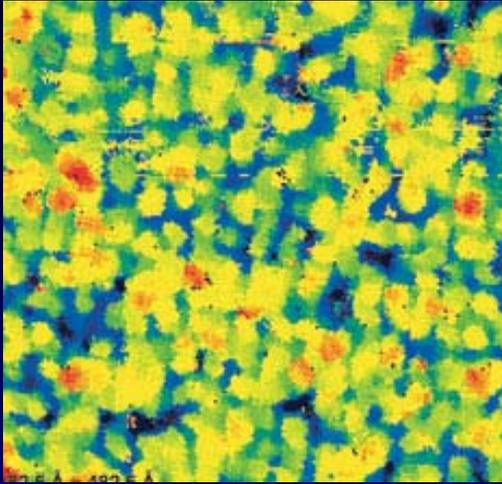
Energie-Super-Autobahnen



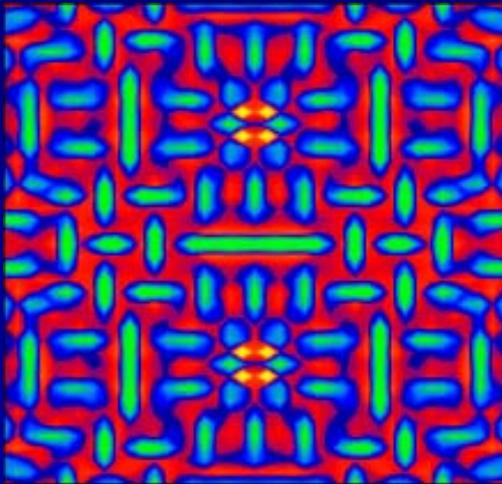
Verbesserung ineffizienter
Stromnetze

IREG Report
APS

Wissenschaft und Kunst



J.C. Davis



D.K.M.

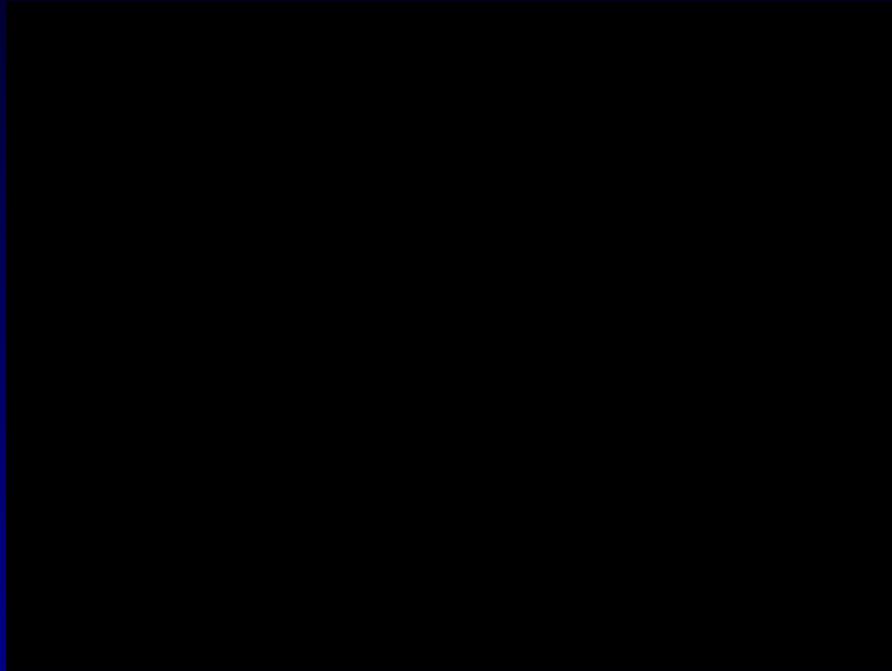


J.B. Spector (MSI)



Die Musik des Quants

von
Jaz Coleman



“Quantum Criticality”
Columbia University, New York, 22. März 2003

<http://musicofthequantum.rutgers.edu/>