

Moderne Optik

Schwerpunkt Quantenoptik

Vorlesung im Wintersemester 2019/2020

Prof. Dr. Gerhard Birkl

ATOME - PHOTONEN - QUANTEN

Institut für Angewandte Physik

Raum: S2/15-125 - Telefon: 16-20410 - email: gerhard.birkl@physik.tu-darmstadt.de
<http://www.iap.tu-darmstadt.de/apq/>

Diese Zusammenstellung ist ausschließlich für die Studierenden der Vorlesung MODERNE OPTIK im Wintersemester 2019 / 2020 zur Nacharbeitung der Vorlesungsinhalte gedacht und darf weder vervielfältigt noch veröffentlicht werden. **Copyright: Gerhard Birkl**

Inhalt

Grundlagen, Techniken und
physikalische Fragestellungen
der Quantenoptik

Übersicht

- Wechselwirkung von Strahlung und Atomen
 - Kohärente Anregung von Atomen
 - Ramsey-Experimente
 - Atomuhren
 - Atominterferometer
- Resonanzfluoreszenz
 - Beschreibung der Wechselwirkung von Licht mit Atomen unter spontanem Zerfall

Übersicht

- **Laserkühlung**
 - Wechselwirkung von Licht mit Atomen unter Änderung des Bewegungszustandes
 - Laserkühlung von Atomen und Ionen (Doppler-Kühlung)
 - Sub-Doppler-Kühlung
 - Erreichbare Temperaturen und Limitierungen

Übersicht

- Fallen für Atome
 - Magneto-optische Falle
 - Dipolfallen
 - Optische Gitter
 - Magnetische Fallen
 - Ionenfallen

Übersicht

- Bose-Einstein-Kondensation
 - Grundlagen der Bose-Einstein-Kondensation
 - Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten
 - Nachweis von Bose-Einstein-Kondensaten
 - Grundlegende Experimente

Übersicht

- Quanteninformationsverarbeitung
 - Grundlagen der Quanteninformationsverarbeitung
 - Experimentelle Ansätze
 - Quanteninformationsverarbeitung mit Ionen
 - Quanteninformationsverarbeitung mit Atomen

Literatur

Ausgewählte Kapitel aus:

- L. Allen, J. Eberly
„Optical Resonance and Two-Level Atoms“
Dover Publications, 1988, ca. € 15,-
- J. Weiner, P.-T. Ho
„Light-Matter Interaction (vol. 1)“
Wiley, 2003, ca. € 61,-
- H. Metcalf, P. van der Straten
„Laser Cooling and Trapping“
Springer, 2001, ca. € 43,-

Literatur

Ausgewählte Kapitel aus:

- C.J. Pethik, H. Smith
„Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases“
Cambridge, 2002, ca. € 66,-
- J. Stolze, D. Suter
„Quantum Computing“
Wiley-VCH, 2008, ca. € 55,-
- D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger
„The Physics of Quantum Information“
Springer, 2000, ca. € 75,-

Aktuelle Forschung in der Quantenoptik

- Ramsey-Spektroskopie und Ionenfallen
- Laserkühlung und optische Fallen
- Optische Pinzette
- Bose-Einstein-Kondensation
- (Theorie der) Quantenoptik und Präzisionsspektroskopie mit Lasern
- Messung und Manipulation von individuellen Quantensystemen

Aktuelle Forschung in der Quantenoptik

- Ramsey-Spektroskopie und Ionenfallen **NP**
1989
- Laserkühlung und optische Fallen **1997**
- Optische Pinzette **2018**
- Bose-Einstein-Kondensation **2001**
- (Theorie der) Quantenoptik und
Präzisionsspektroskopie mit Lasern **2005**
- Messung und Manipulation von
individuellen Quantensystemen **2012**

Ramsey – Spektroskopie und Ionenfallen



The Nobel Prize in Physics 1989

"for the invention of the separated oscillatory fields method and its use in the hydrogen maser and other atomic clocks"

"for the development of the ion trap technique"



Norman F. Ramsey

🏆 1/2 of the prize

USA

Harvard University
Cambridge, MA, USA

b. 1915



Hans G. Dehmelt

🏆 1/4 of the prize

USA

University of Washington
Seattle, WA, USA

b. 1922
(in Görlitz, Germany)



Wolfgang Paul

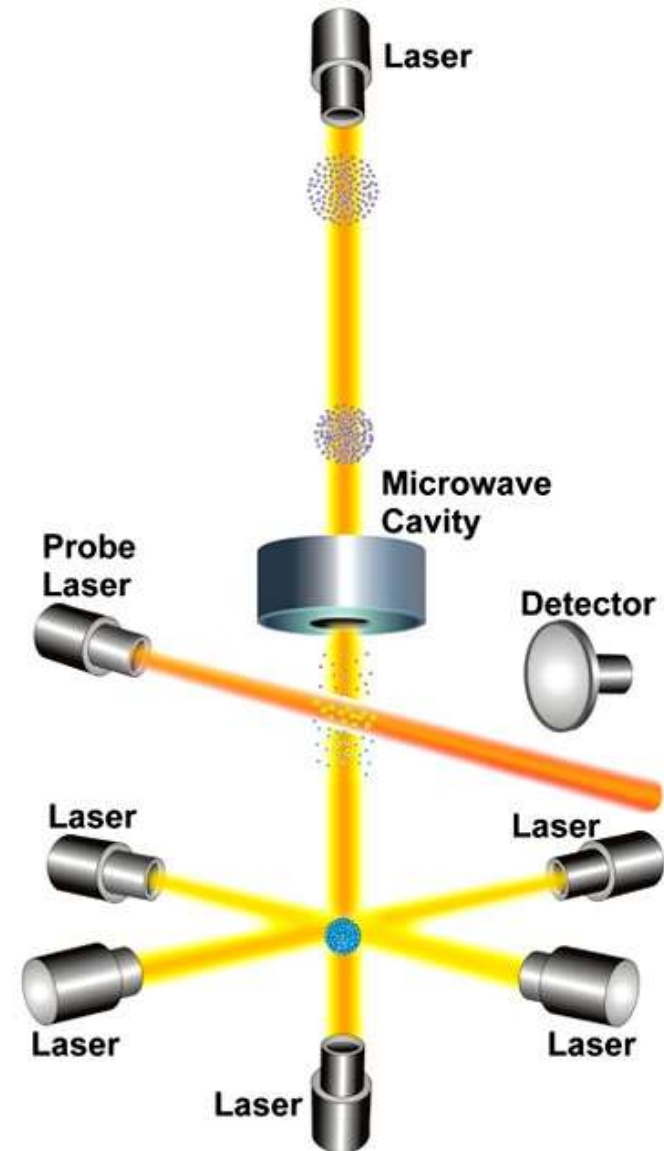
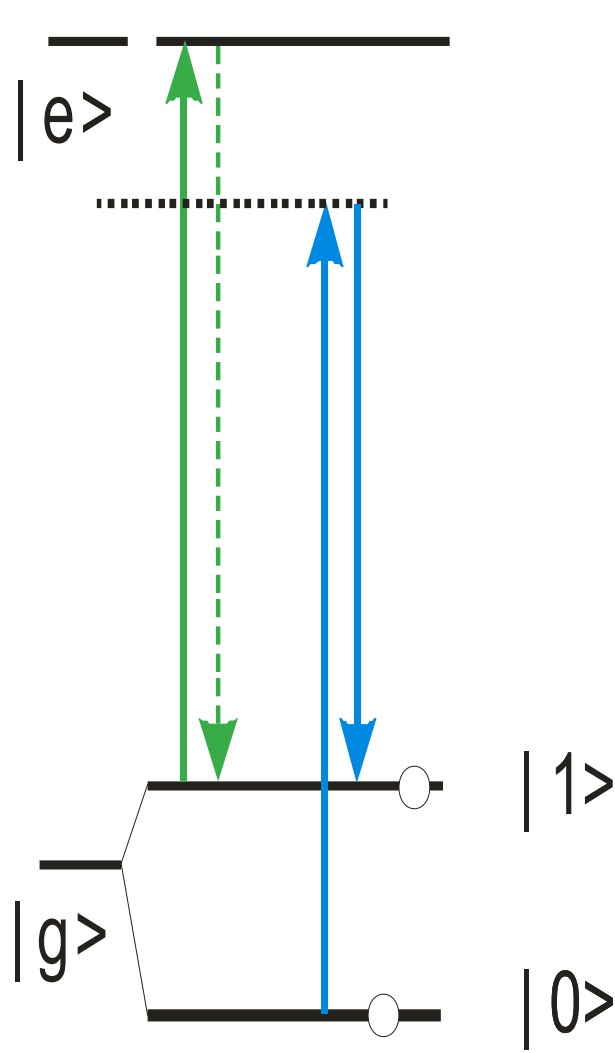
🏆 1/4 of the prize

Federal Republic of
Germany

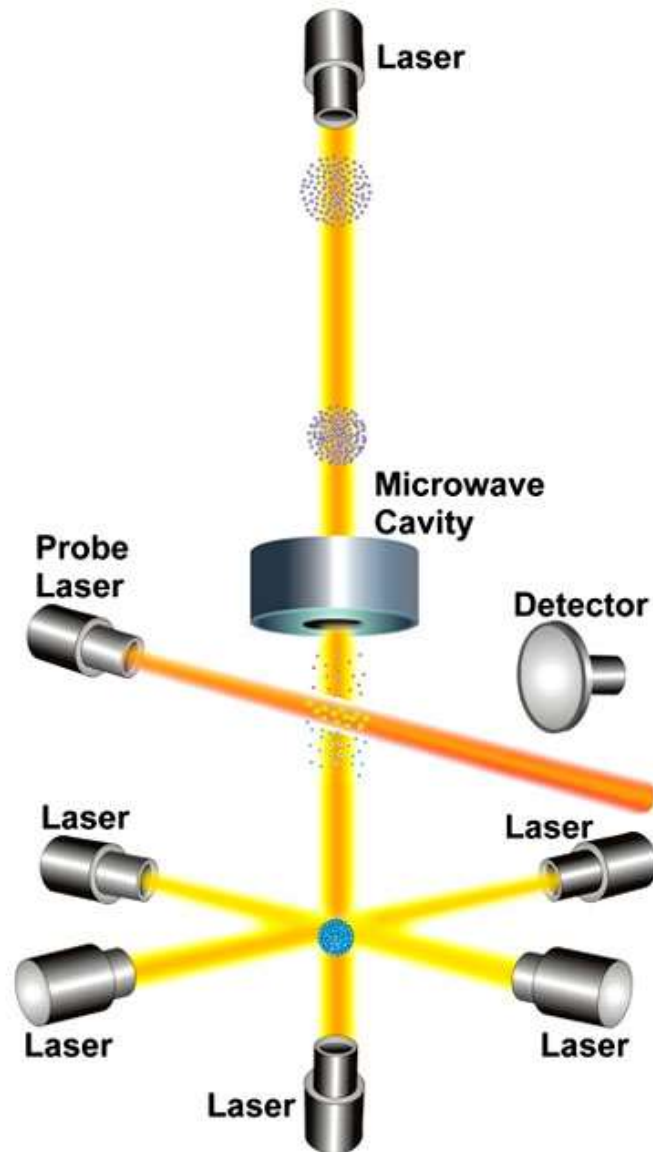
University of Bonn
Bonn, Federal Republic of
Germany

b. 1913
d. 1993

Ramsey-Spektroskopie/Atomuhren

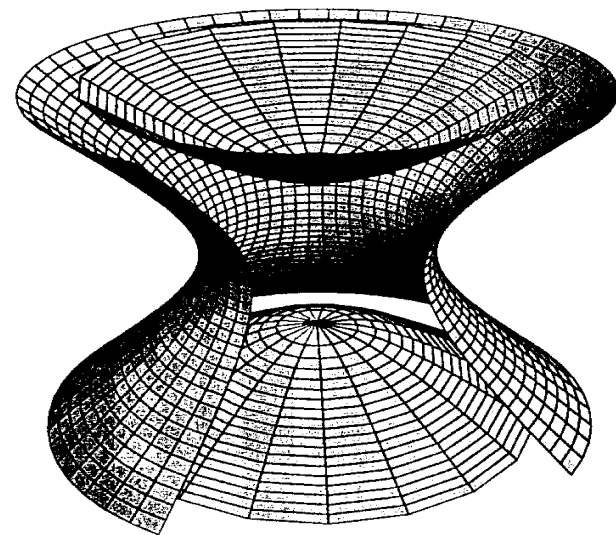
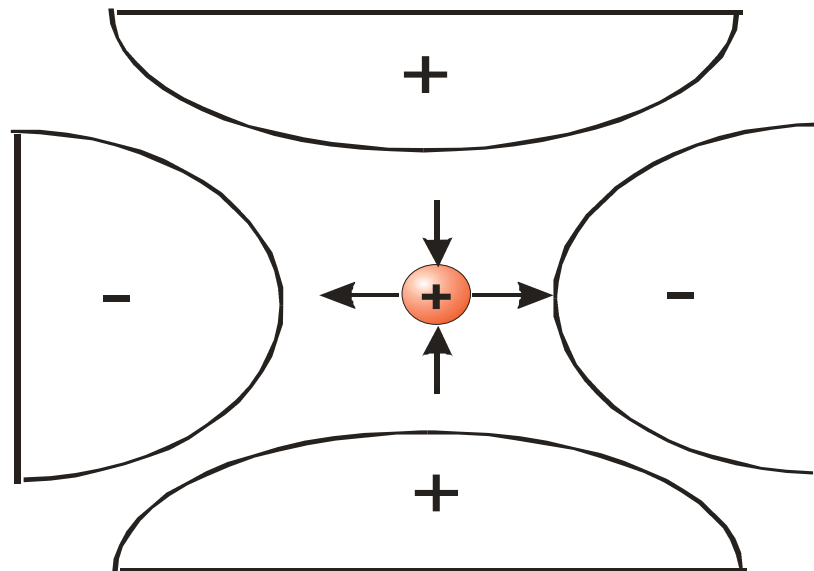
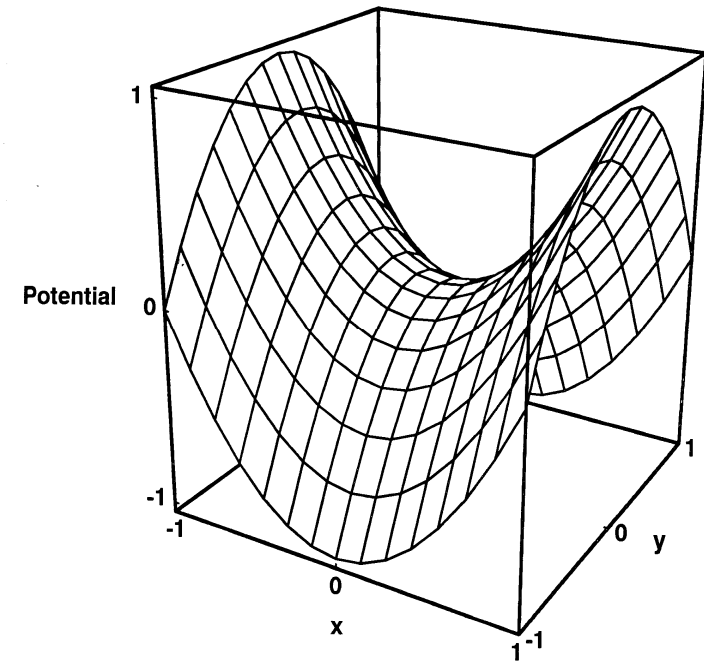
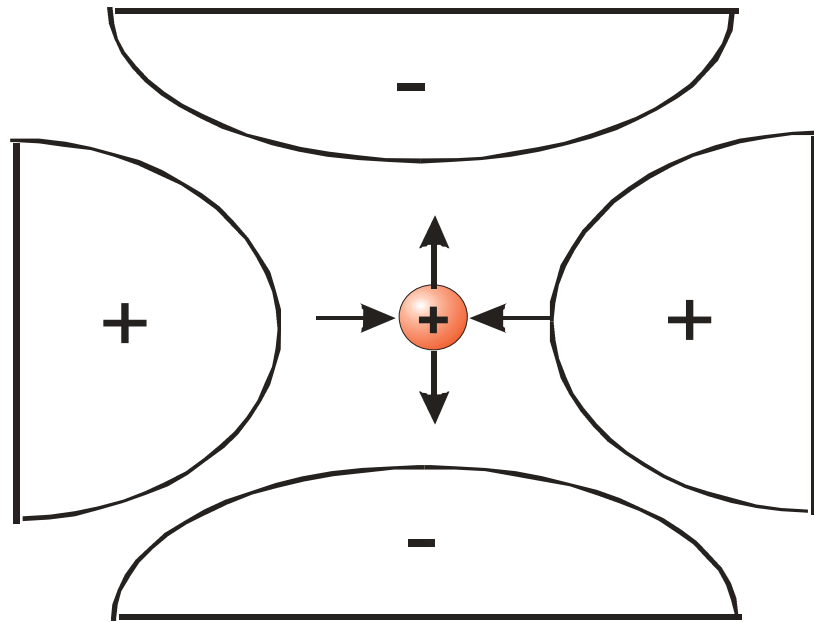


Ramsey-Spektroskopie/Atomuhren

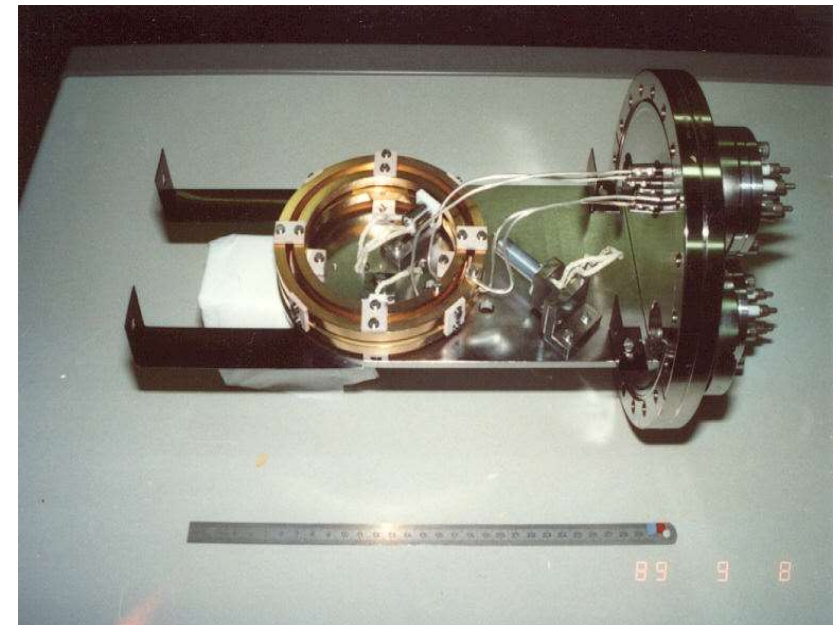
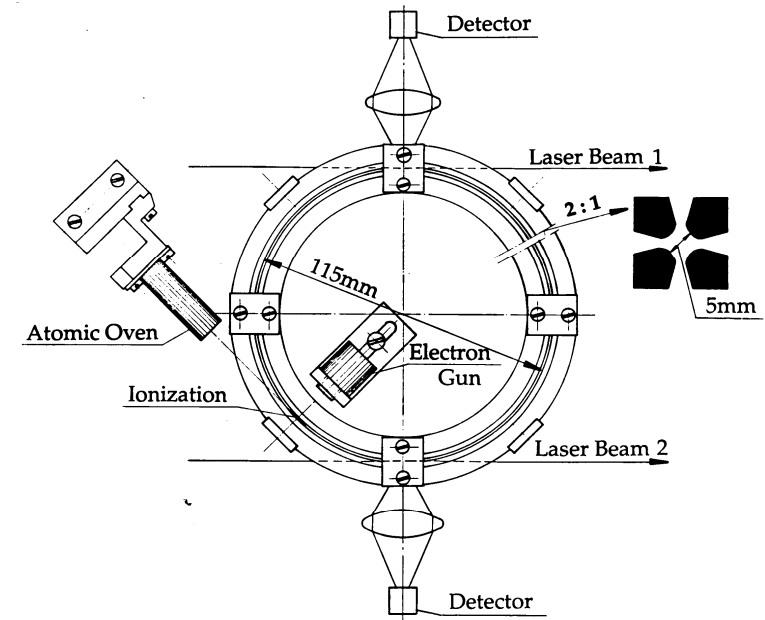
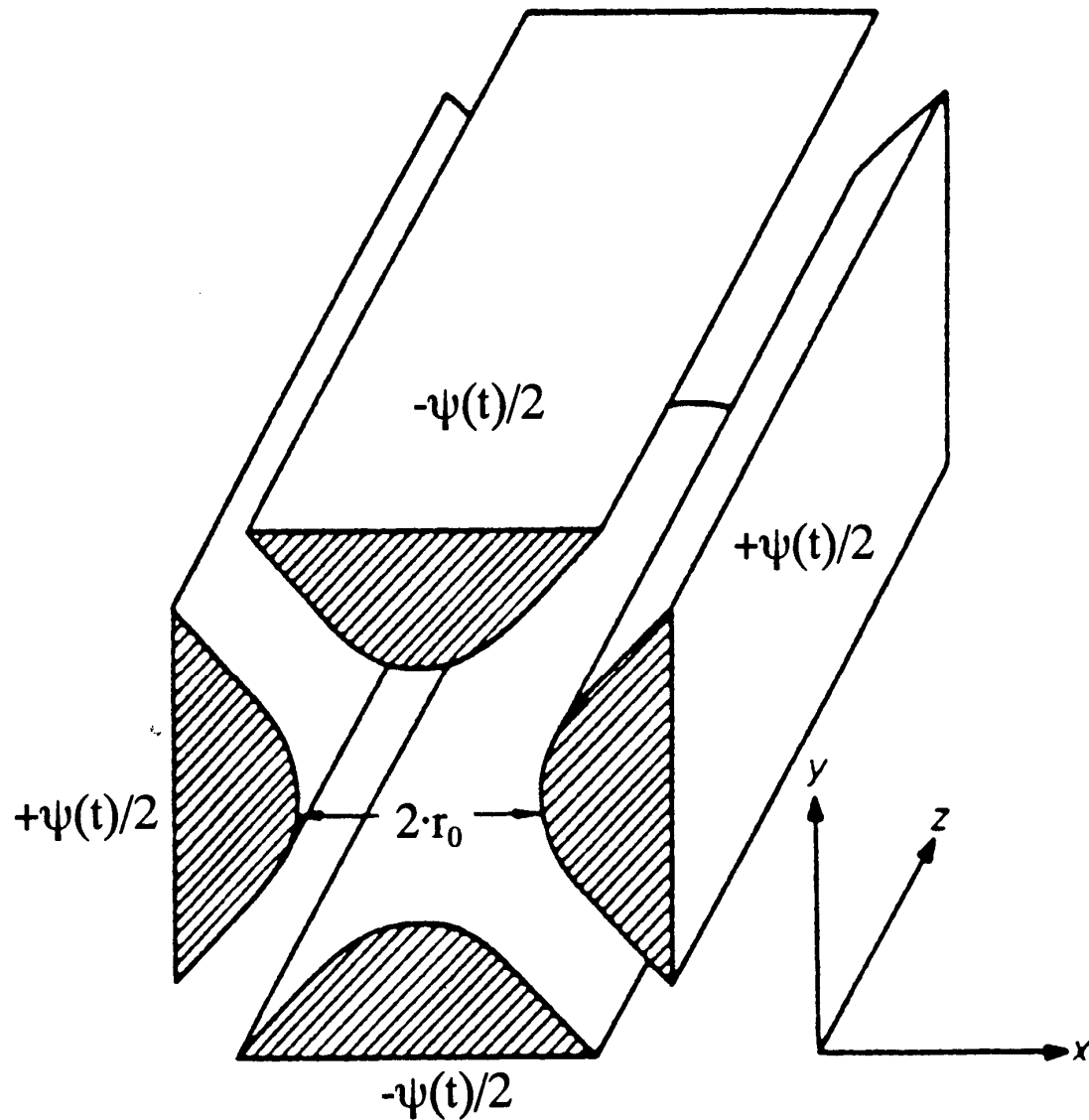


**Cäsium Atomuhr
PTB Braunschweig**

Speicherung von Ionen in Paul Fallen



Linear Ionenfalle und Quadrupol-Speicherring



Laserkühlung und optische Fallen



The Nobel Prize in Physics 1997

"for development of methods to cool and trap atoms with laser light"



Steven Chu

🏆 1/3 of the prize

USA

Stanford University
Stanford, CA, USA

b. 1948



**Claude
Cohen-Tannoudji**

🏆 1/3 of the prize

France

Collège de France; École
Normale Supérieure
Paris, France

b. 1933
(in Constantina, Algeria)



William D. Phillips

🏆 1/3 of the prize

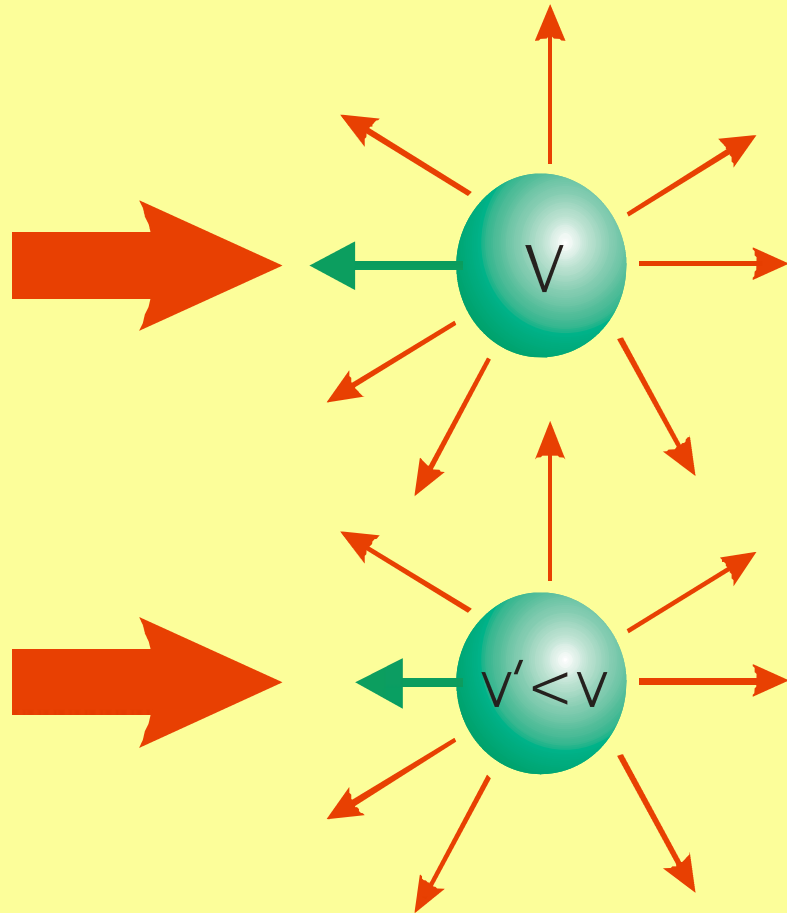
USA

National Institute of
Standards and Technology
Gaithersburg, MD, USA

b. 1948

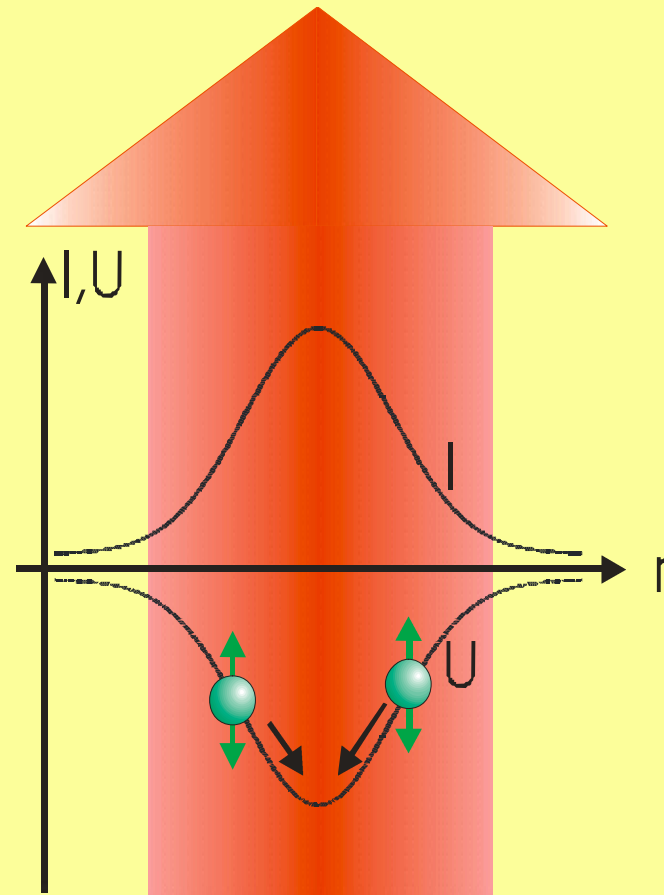
Licht kann Kräfte auf Atome ausüben:

Dissipativ: Strahlungsdruck



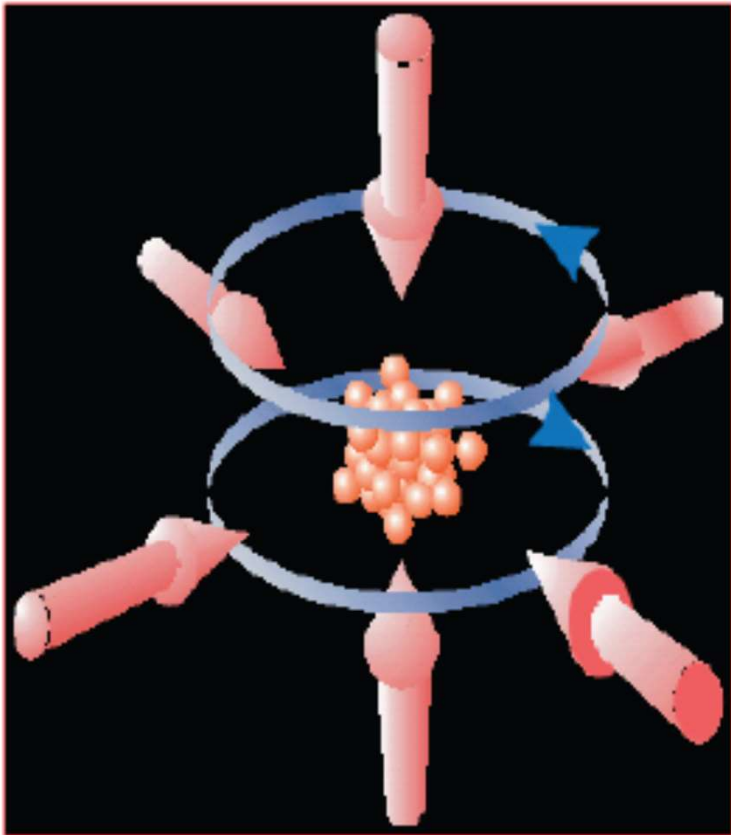
Laserkühlung

Konservativ: Dipolkraft



Dipolkraft

“Standard-Methode“ des Laserkühlens



Typische Größen

Dichte $n = 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

Temperatur $T = 10 - 100 \text{ } \mu\text{K}$

Größe $x = 0.1 \dots 10 \text{ mm}$

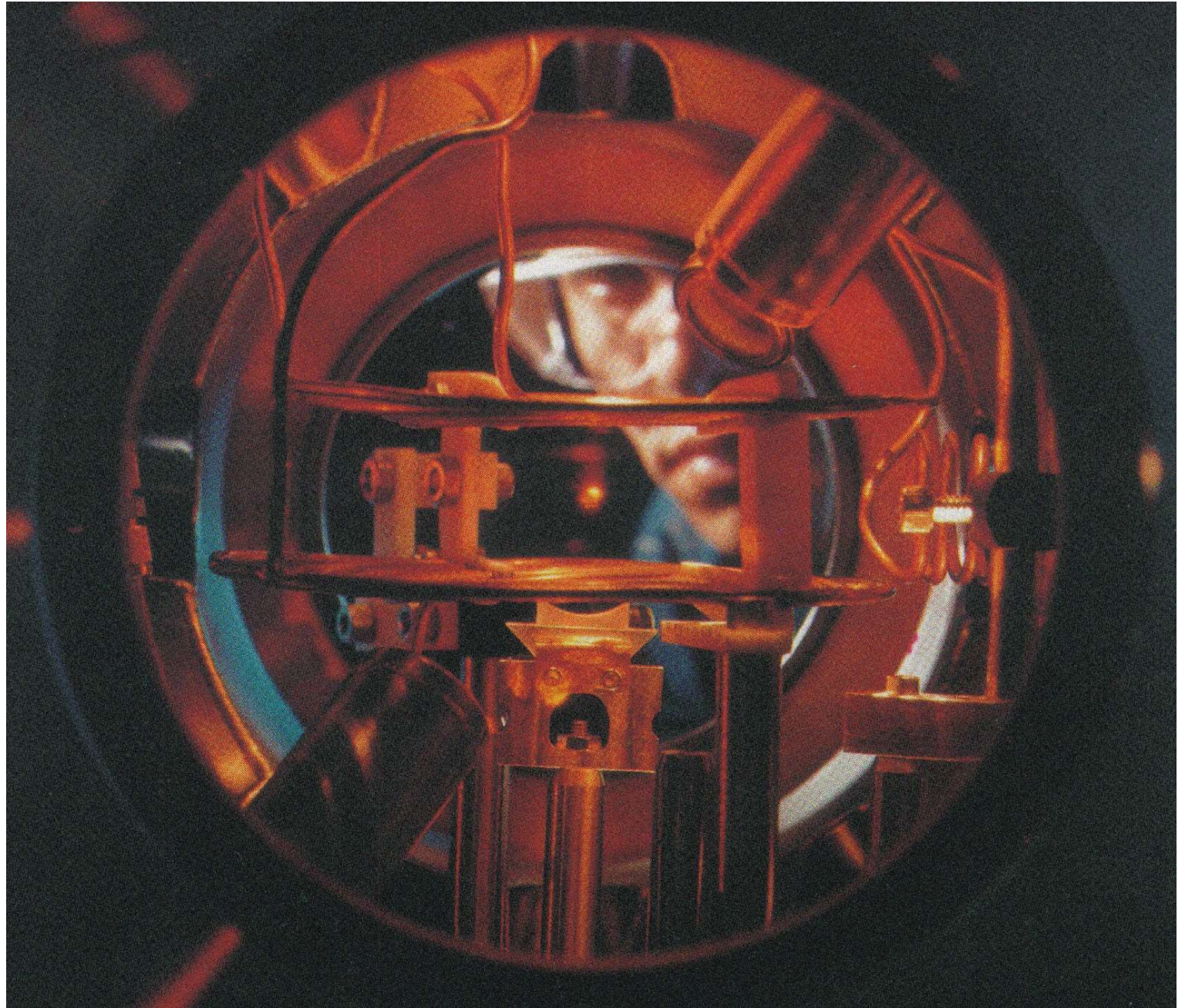
Typische Parameter

Atomspezies:
Alkaliatome,
metastabile
Edelgase
(Li, Na, Rb, Cs,
He, Ne, ...)

Atomzahl: 10^8

Temperatur:
 $10 \mu\text{K}$

Dichte:
 10^{10} cm^{-3}



Optische Pinzette

The Nobel Prize in Physics 2018



Ill. Niklas Elmehed. © Nobel
Media

Arthur Ashkin

Prize share: 1/2



Ill. Niklas Elmehed. © Nobel
Media

Gérard Mourou

Prize share: 1/4



Ill. Niklas Elmehed. © Nobel
Media

Donna Strickland

Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2018 was awarded "for groundbreaking inventions in the field of laser physics" with one half to Arthur Ashkin "for the optical tweezers and...

Im Fokus eines rot-verstimmten Laserstrahls ($\omega_0 - \omega_L > 0$) können Atome gefangen werden

⇒ Dipolfalle

Typische Parameter

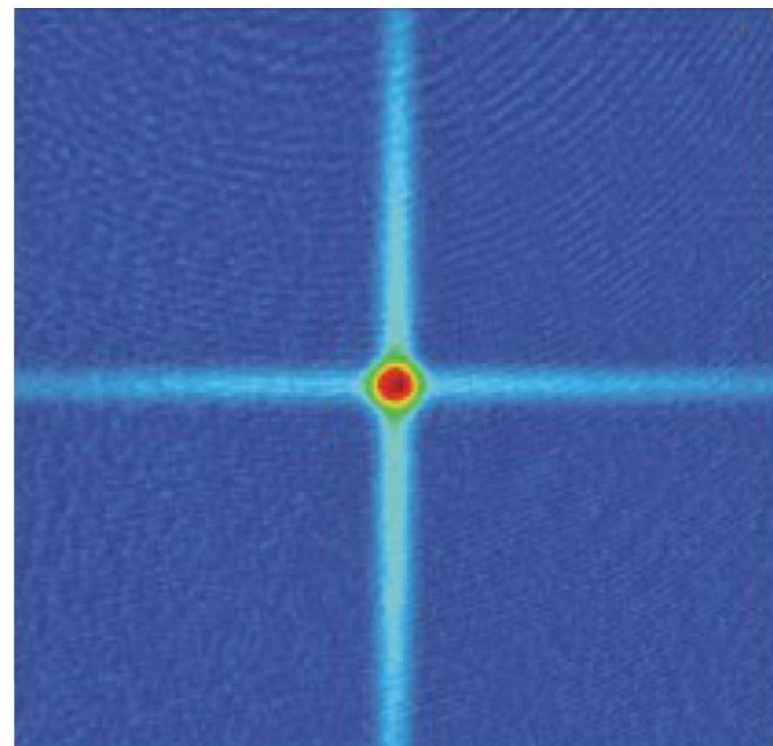
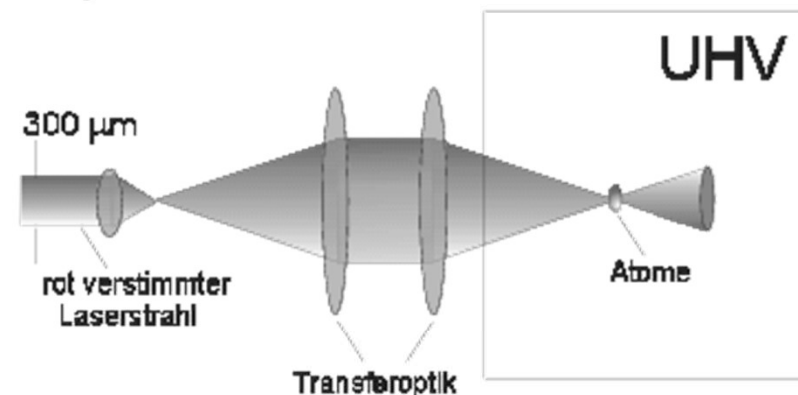
Fallentiefe $U_0 = 1/2 k_B T$
mit $T \cong 1 \text{ mK}$

$$U_0 \cong 1000 E_R$$

mit Rückstoßenergie $E_R = \frac{(\hbar k)^2}{2m}$

Lebensdauer $\cong 100 \text{ ms}$

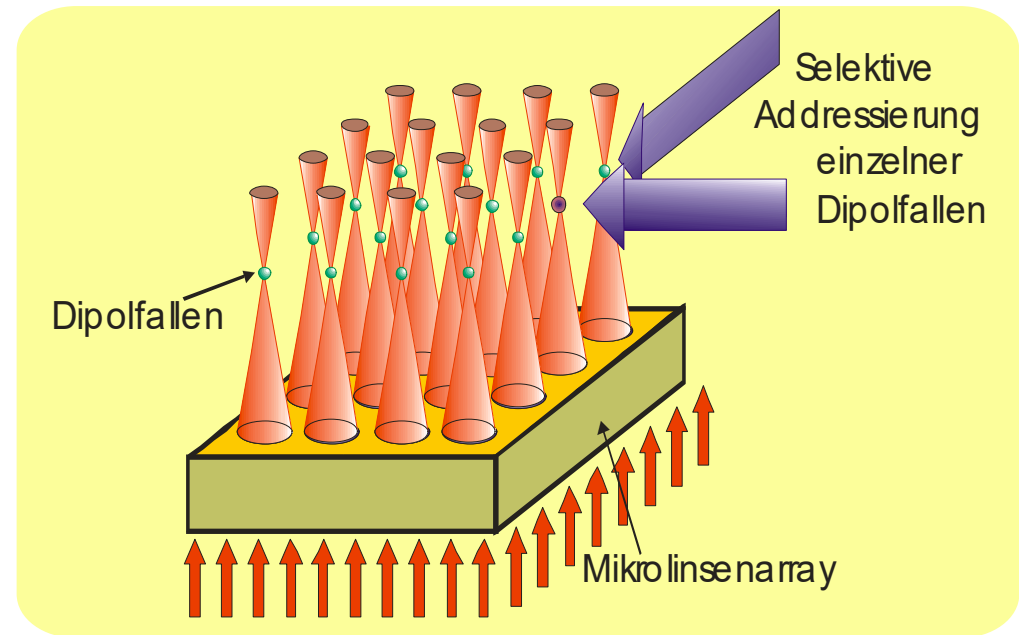
Experimenteller Aufbau:



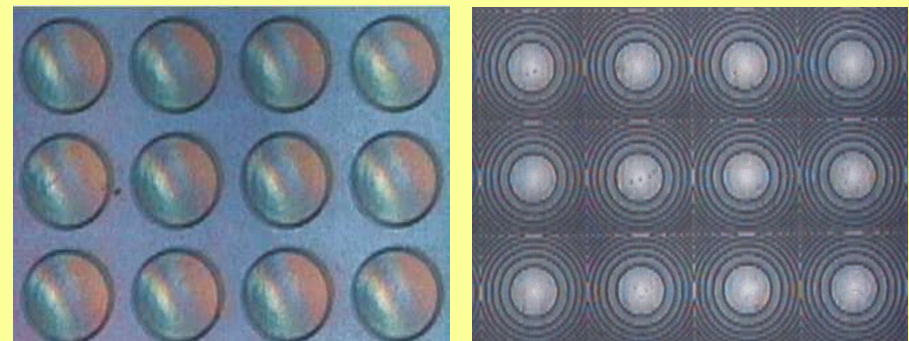
Vielfachrealisierung von Dipolfallen durch Fokussieren eines (weit) rot-verstimmten Laserstrahls mit einem Mikrolinsenarray

Kleine Foki durch hohe Numerische Apertur

Großer Abstand der Mikrolinsen (typisch $100\mu\text{m}$) ermöglicht getrennte räumliche Adressierung der Einzelfallen



Refraktives und diffraktives Mikrolinsenarray



Vielfachrealisierung von individuell kontrollierbaren Quantensystemen in optischen Mikropotentialen

Anzahl der Fallen > 50

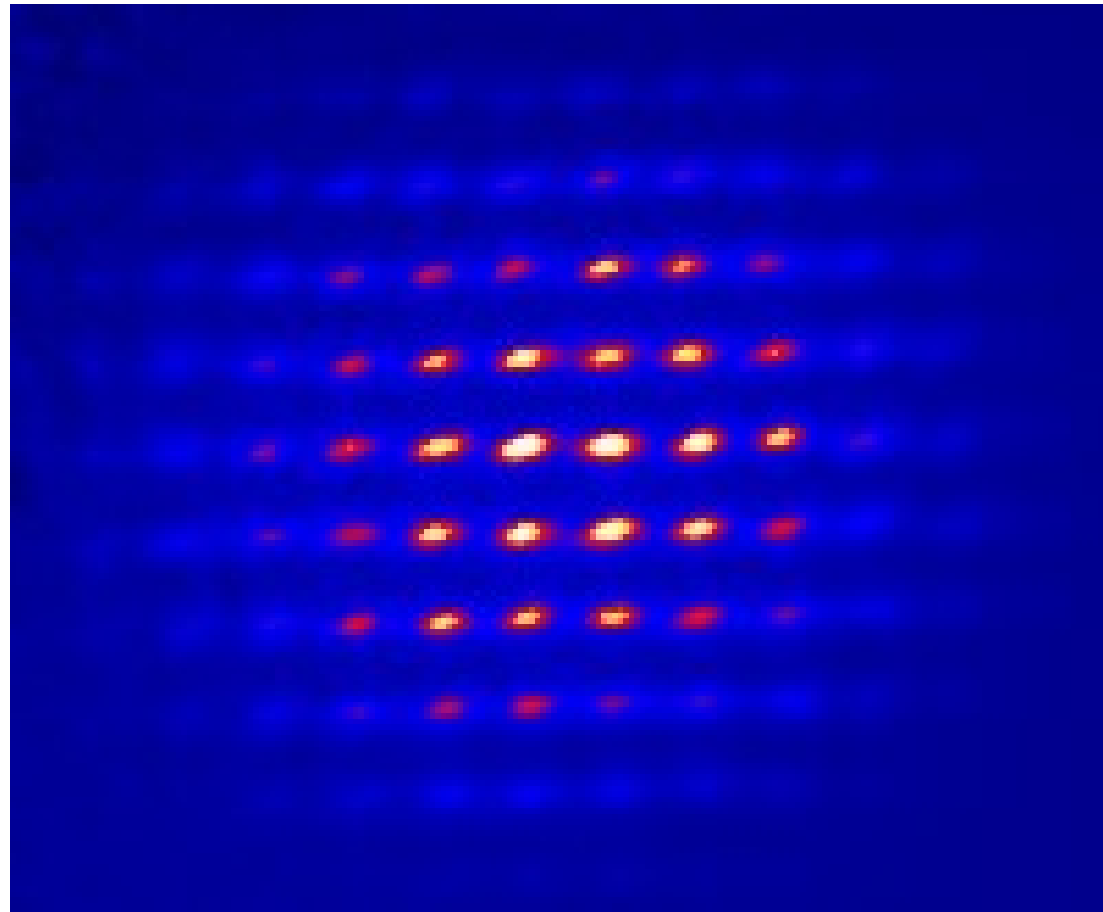
Fallenparameter für das
Dipolfallenarray:

$P = 10$ mW pro Falle

Fallengröße $w_0 = 6$ μm

Fallentiefe $= 16$ mK

Atome pro Falle $= 2 \cdot 10^3$



R. Dumke, M. Volk, T. Mütter, F.B.J. Buchkremer, G. Birkl, and W. Ertmer,
Phys. Rev. Lett. **89**, 097903 (2002).

Bose- Einstein- Kondensation



The Nobel Prize in Physics 2001

"for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates"



Eric A. Cornell

🏆 1/3 of the prize

USA

University of Colorado,
JILA
Boulder, CO, USA

b. 1961



Wolfgang Ketterle

🏆 1/3 of the prize

Federal Republic of
Germany

Massachusetts Institute of
Technology (MIT)
Cambridge, MA, USA

b. 1957



Carl E. Wieman

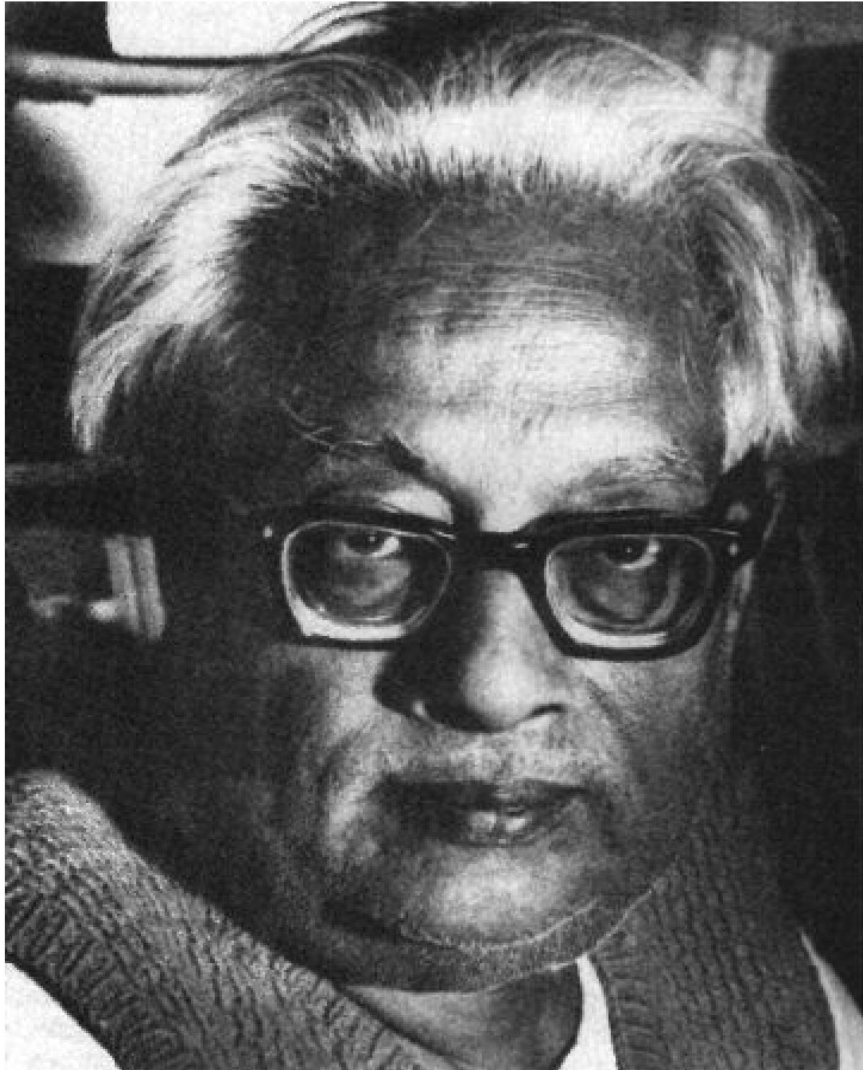
🏆 1/3 of the prize

USA

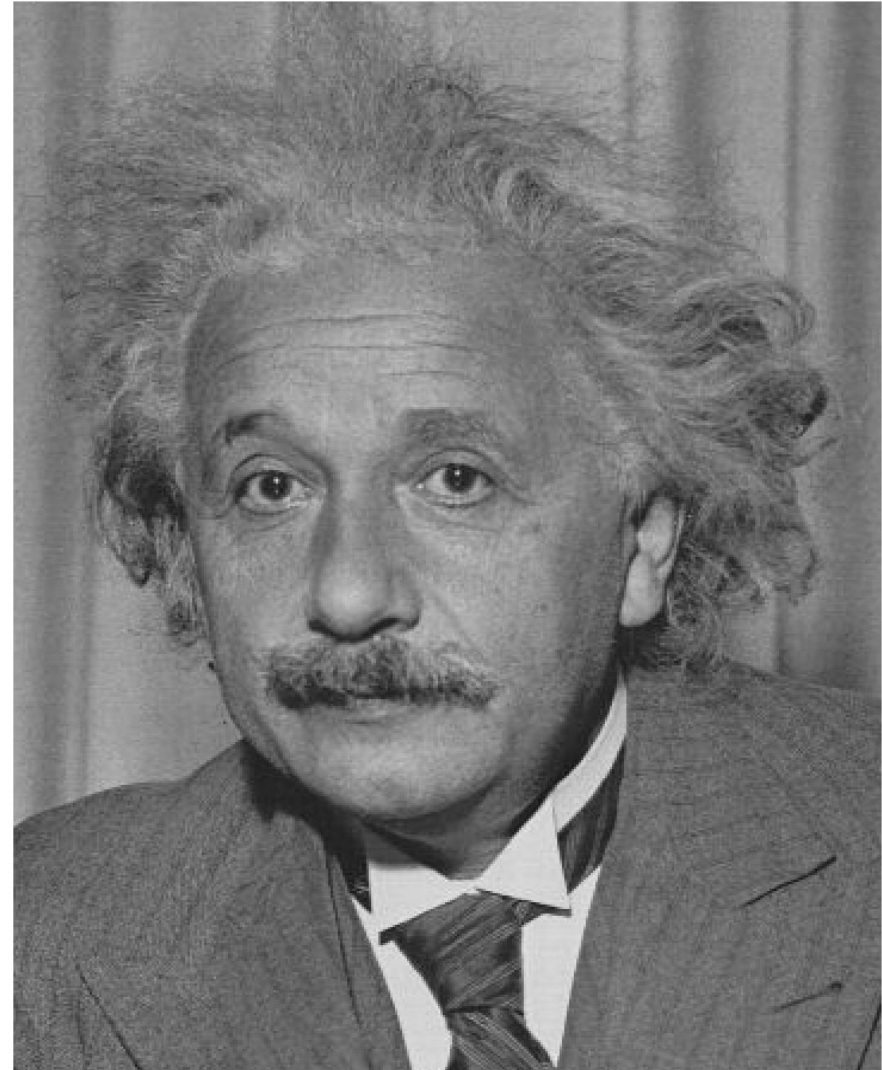
University of Colorado,
JILA
Boulder, CO, USA

b. 1951

Bose-Einstein condensation *1924



Satyendra Nath Bose



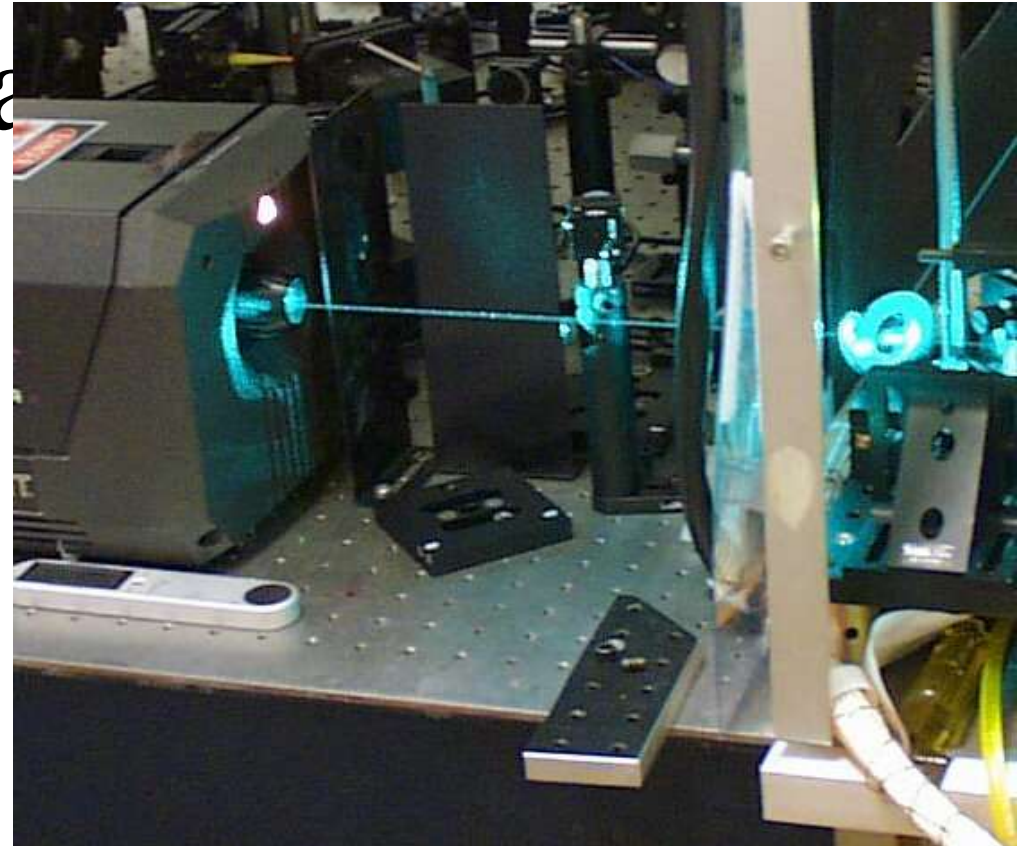
Albert Einstein

Ordinary light



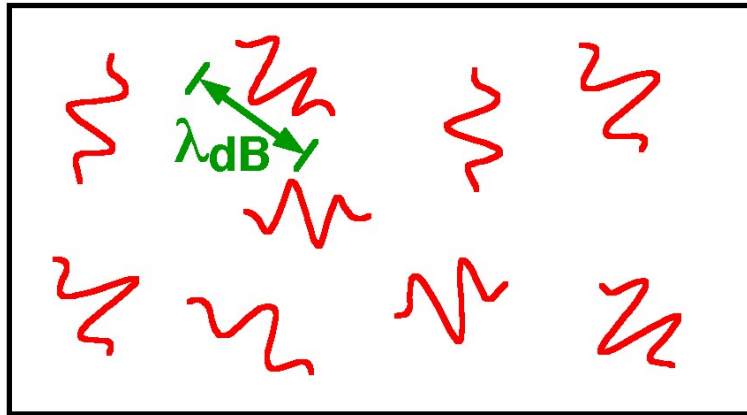
divergent
incoherent
many small waves
many modes

Laser light



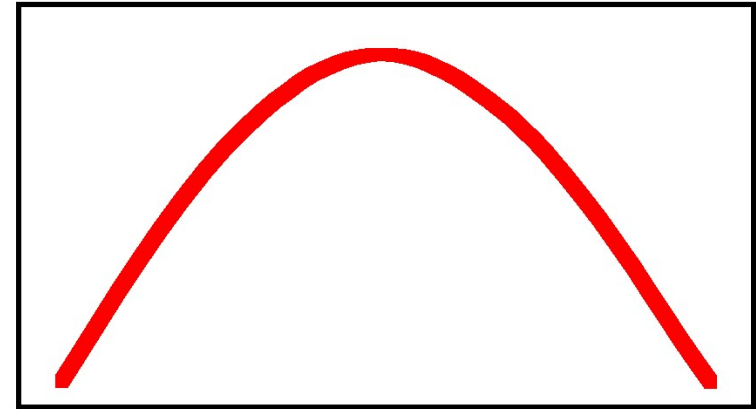
diffraction limited (directional)
coherent
one big wave
single mode (monochromatic)

Ordinary gas

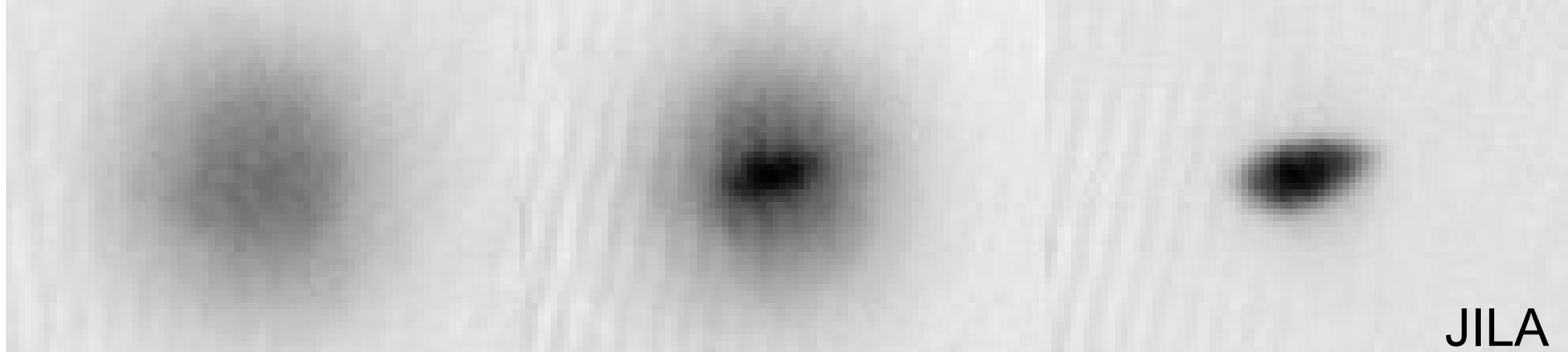


divergent
incoherent
many small waves
many modes

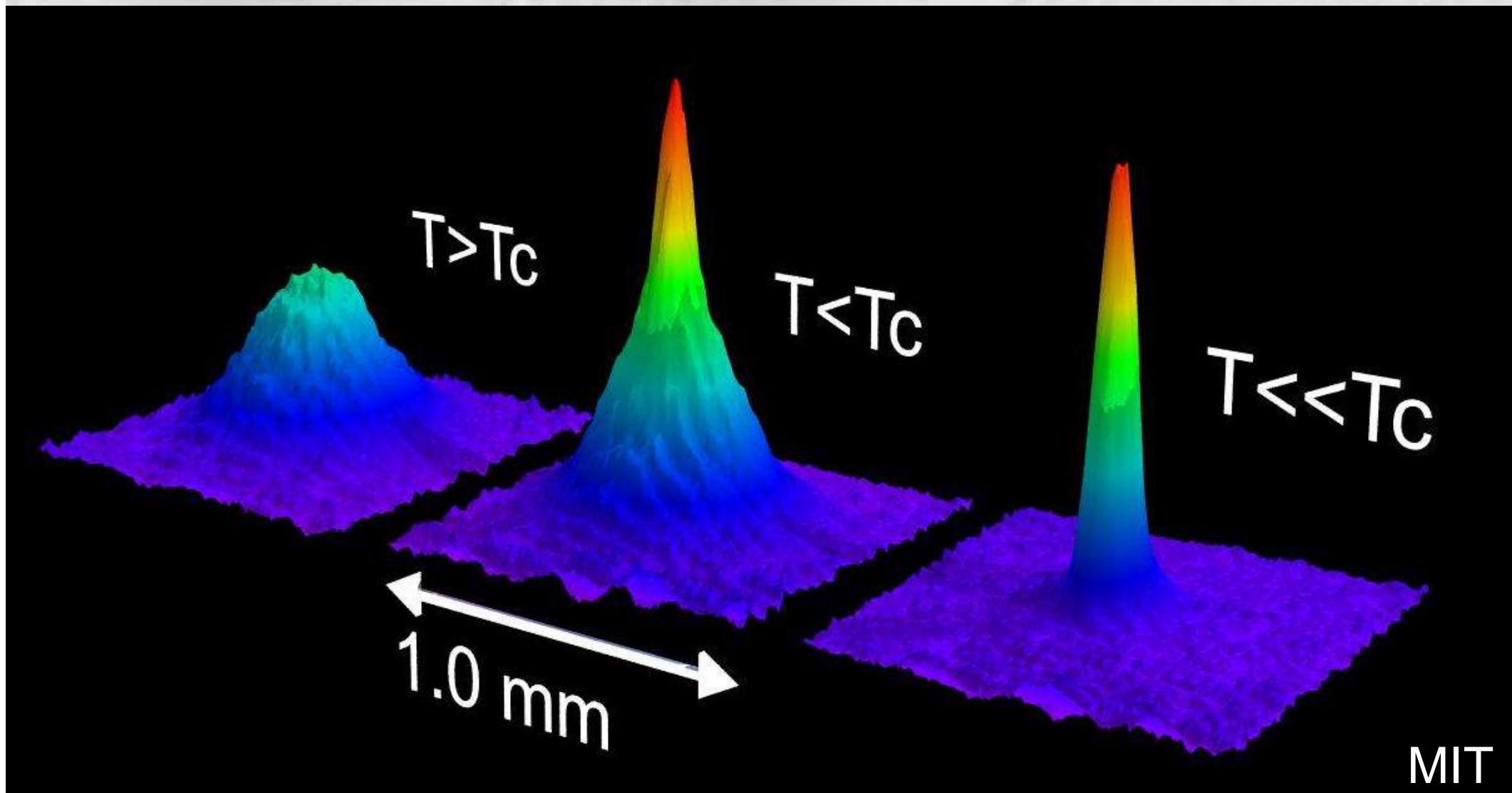
Bose-Einstein condensate



diffraction limited (directional)
coherent
one big wave
single mode (monochromatic)

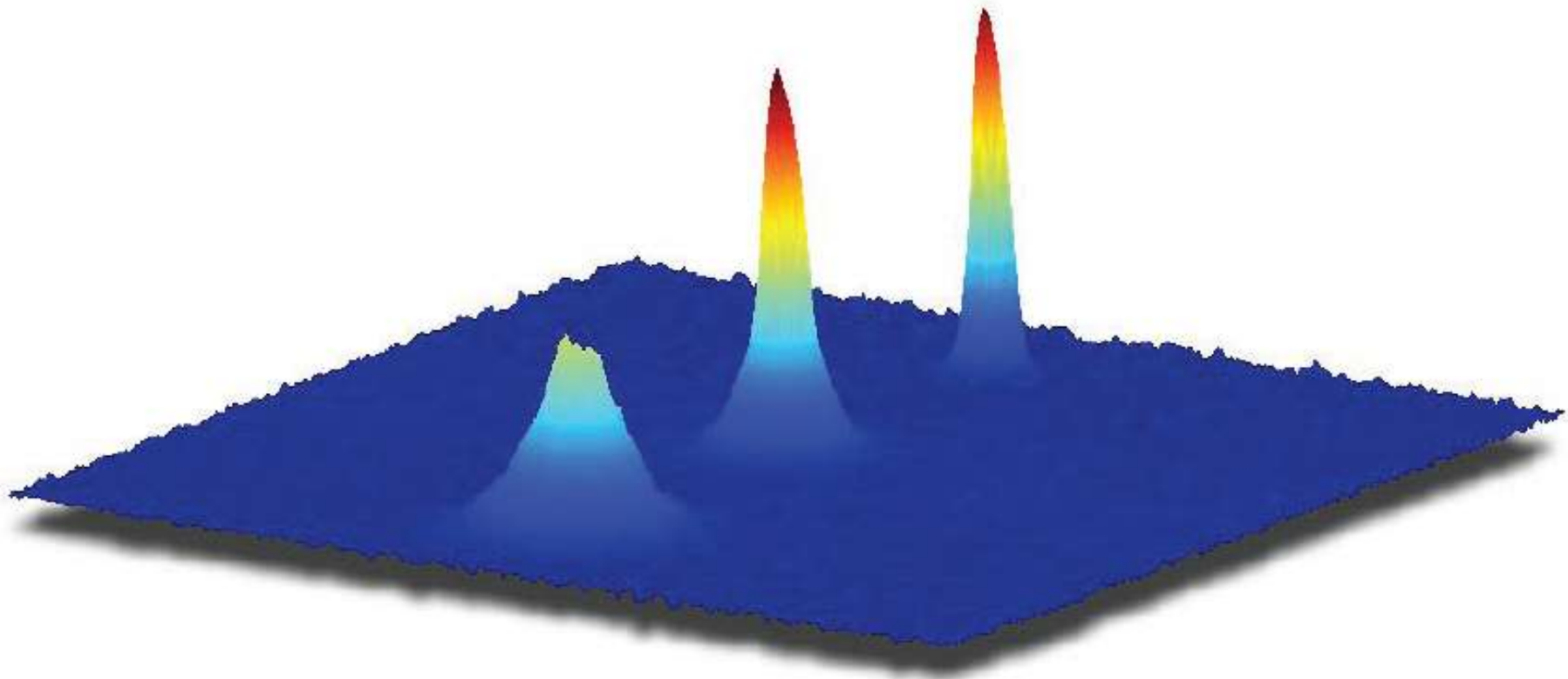


JILA

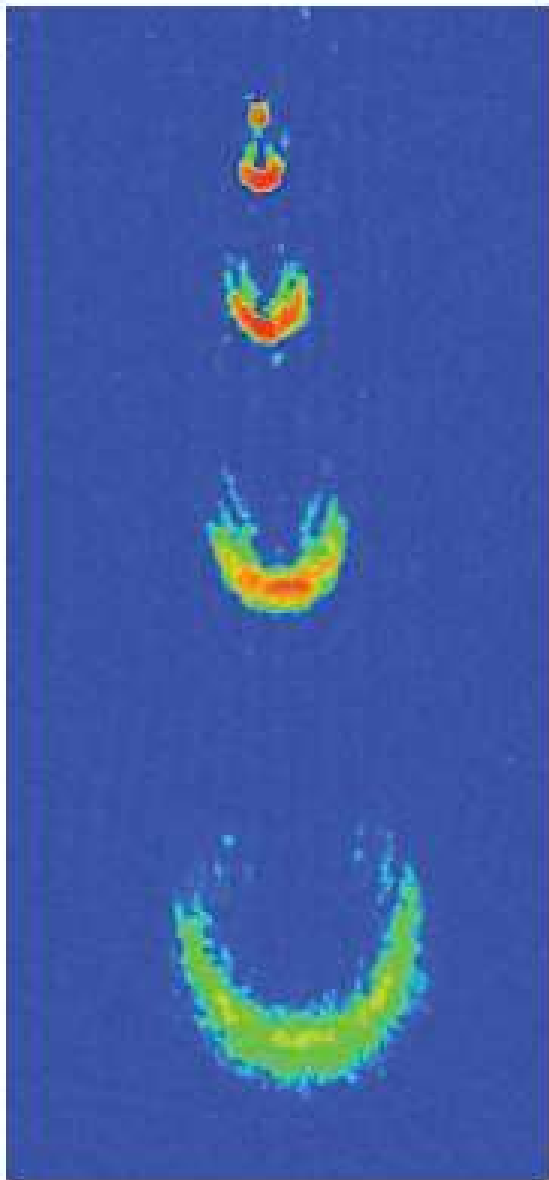


MIT

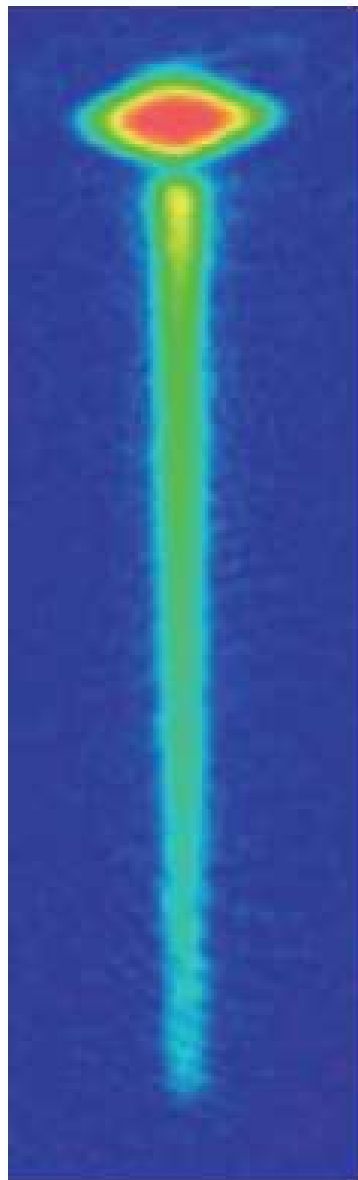
3D-Bild von drei kalten Atomwolken @ 139nK, 62nK und 30 nK



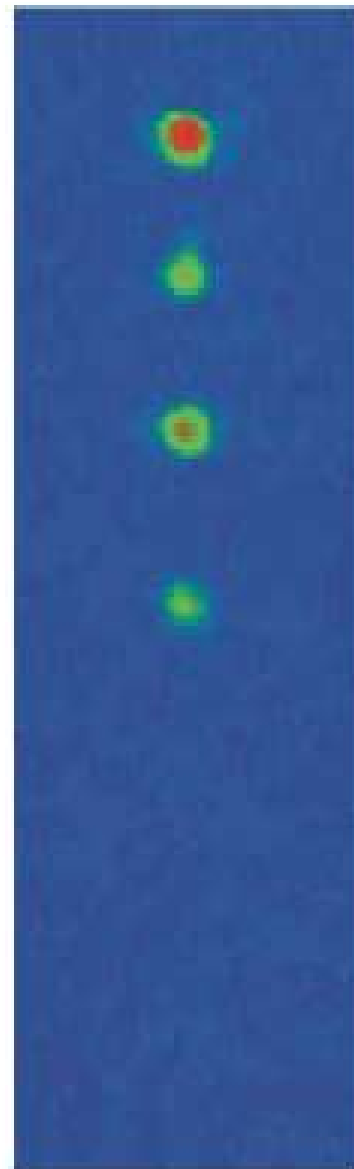
Atom Laser



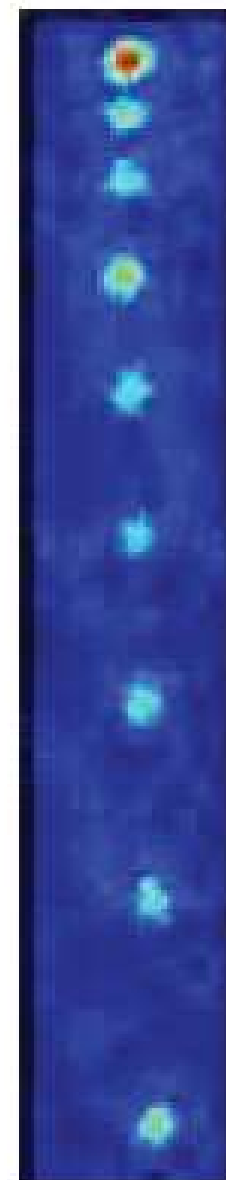
MIT, Boston



MPI, Munich



NIST,
Gaithersburg



Yale,
New Haven

(Theorie der) Quantenoptik und Präzisions- spektroskopie



The Nobel Prize in Physics 2005

"for his contribution to the quantum theory of optical coherence"

"for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"

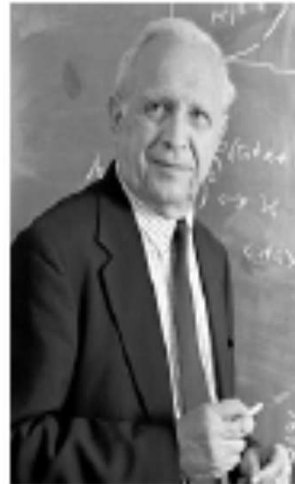


Photo: J.Reed

Roy J. Glauber

🏆 1/2 of the prize

USA

Harvard University
Cambridge, MA, USA

b. 1925



Photo: Sears.P.Studio

John L. Hall

🏆 1/4 of the prize

USA

University of Colorado,
JILA; National Institute of
Standards and Technology
Boulder, CO, USA

b. 1934



Photo: F.M. Schmidt

Theodor W. Hänsch

🏆 1/4 of the prize

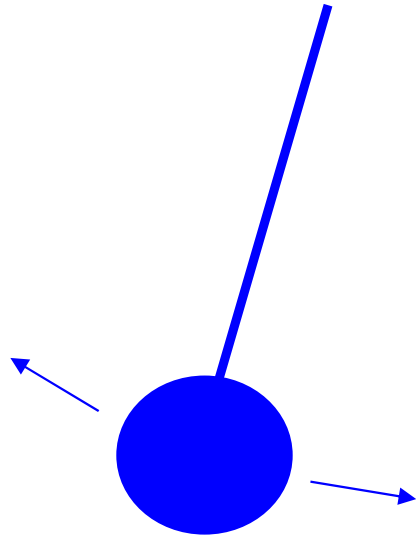
Germany

Max-Planck-Institut für
Quantenoptik
Garching, Germany;
Ludwig-Maximilians-Universität
Munich, Germany

b. 1941

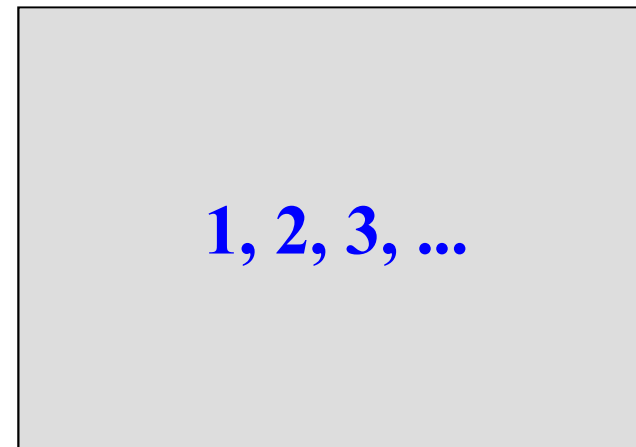
Oszillator

- Pendel
- Quarzoszillator
- optischer Oszillator



Zählwerk

- mechanische Zähler
- elektronische Zähler
- optisches Zählwerk

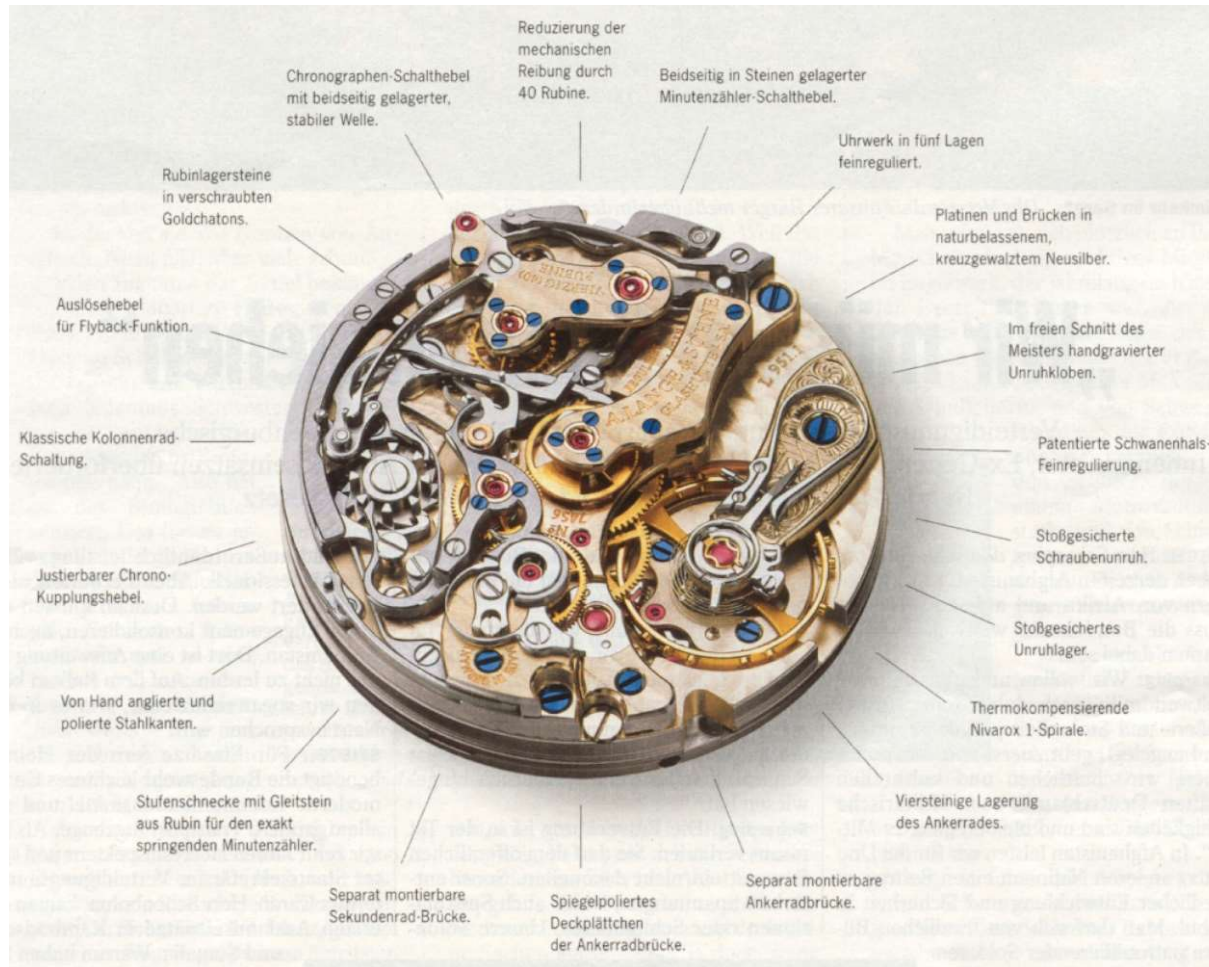


**Ziel bei der Entwicklung von Oszillatoren:
Erreichen möglichst hohe Güte: $Q = f / \Delta f$**

Hohe Frequenz f und geringe Linienbreite Δf

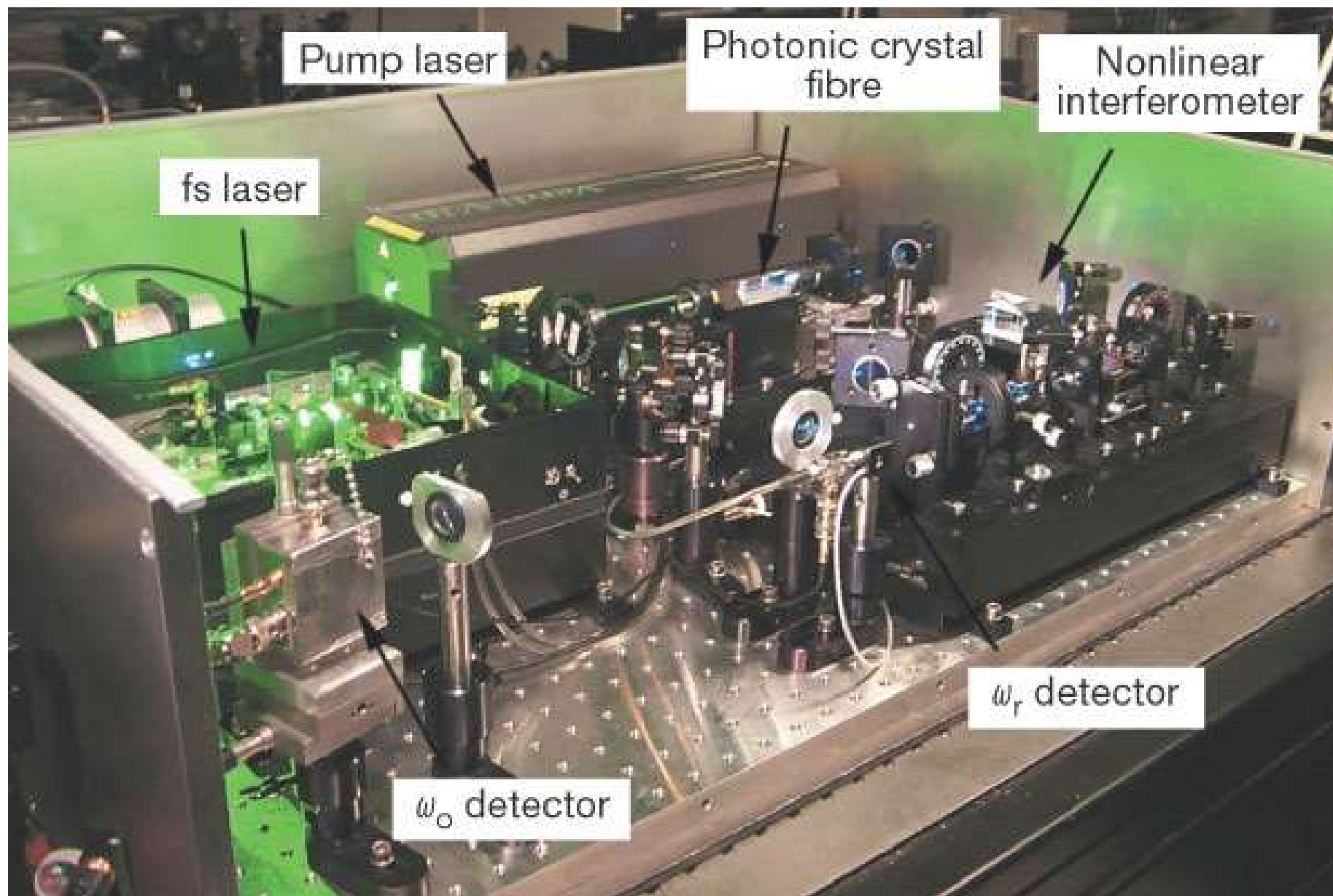
Zum Vergleich: Mechanische Oszillatoren

Wichtig sind immer:
Oszillator und Zählwerk



Quantenoptik: Atom = Oszillator; Frequenzkamm = Zählwerk

Aufbau eines optischen Frequenzkammgenerators



Garching Frequency Comb (T. Hänsch et al.)

Messung und Manipulation individueller Quantensysteme



The Nobel Prize in Physics

The Nobel Prize in Physics 2012 was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland *"for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"*

The Nobel Prize in Physics 2012
Serge Haroche, David J. Wineland

The Nobel Prize in Physics 2012

Serge Haroche

David J. Wineland



Photo: © CNRS
Photothèque/Christophe Lebedinsky

Serge Haroche

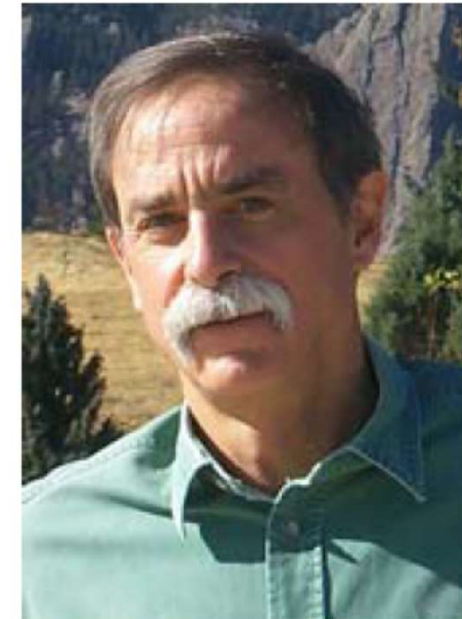


Photo: © NIST

David J. Wineland

Control of individual quantum systems

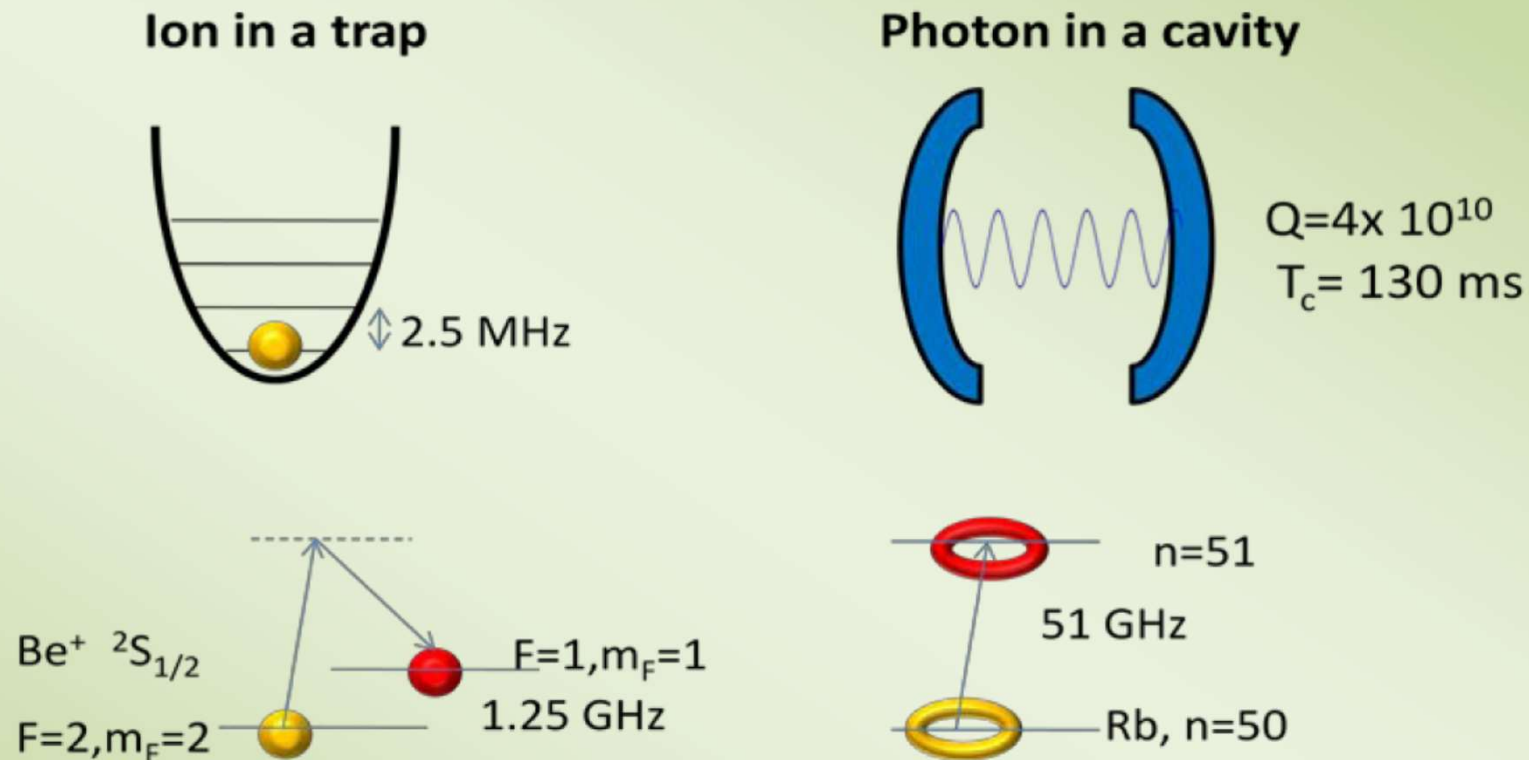


Fig. 1: Illustration of the two types of experiments discussed in this scientific background: On the left, an ion is captured in a harmonic trap. Its quantum state (both its internal state and its motion) is controlled by interaction with laser pulses as exemplified for the case of Be^+ . On the right, a photon is (or several photons are) trapped in a high-Q microwave cavity. The field state is measured and controlled by interaction with highly excited Rb atoms.

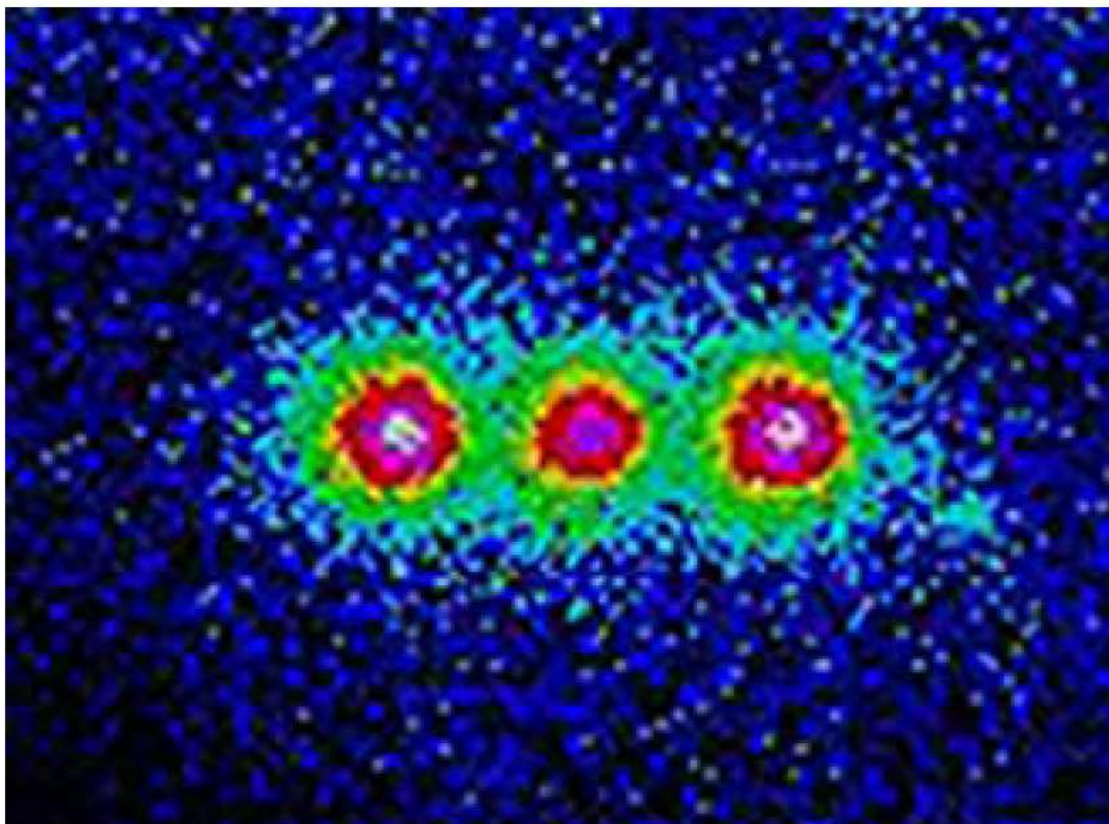
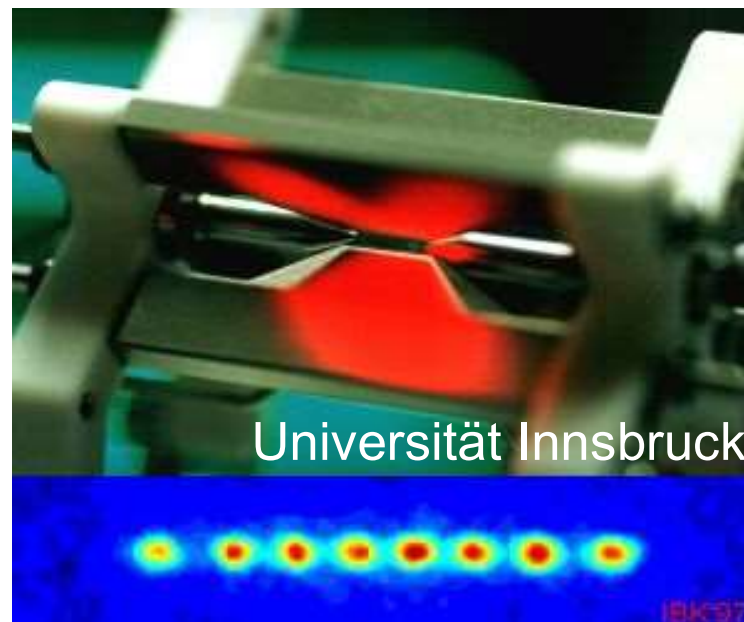
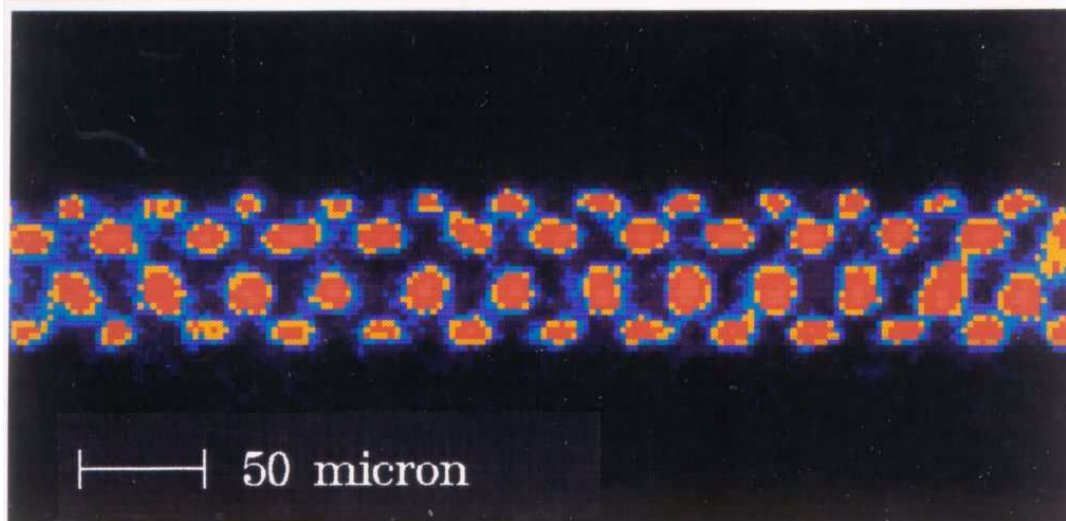
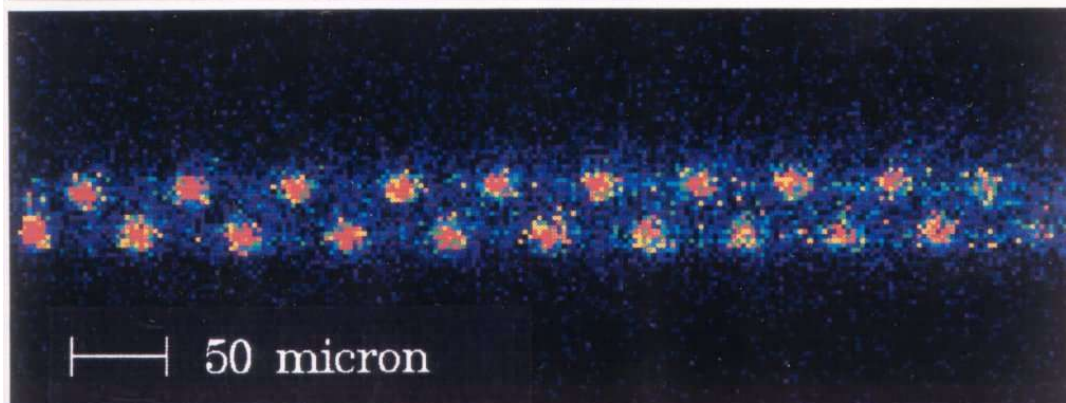
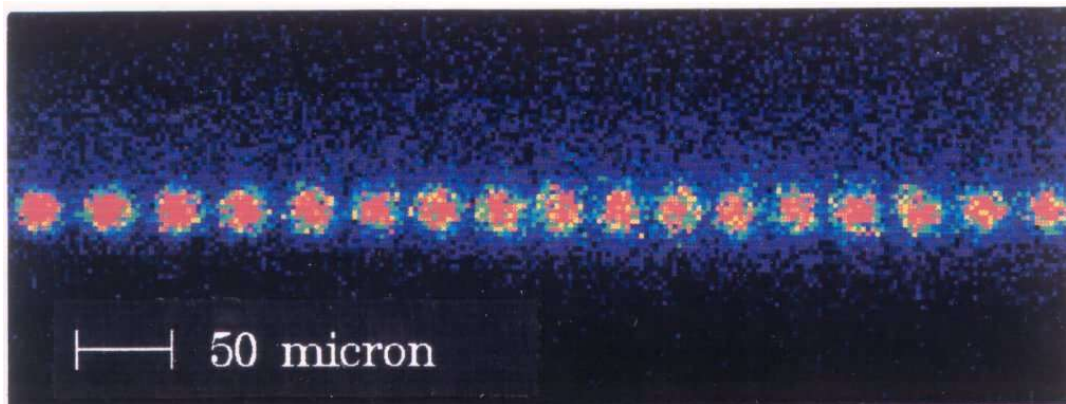


Fig. 2: Image of the fluorescence emitted by three trapped Be^+ ions (National Institute of Standards and Technology image gallery).

Lineare Ionenkristalle

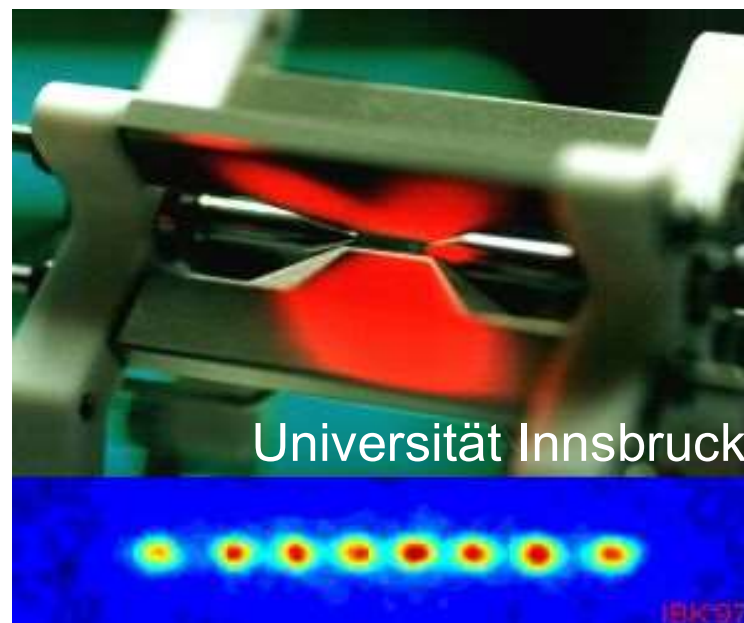
Zentrales Element für quantenphysikalische Experimente mit Ionen





Lineare Ionenkristalle

Zentrales Element für quantenphysikalische Experimente mit Ionen



G. Birkl, S. Kassner, and H. Walther, Nature **357**, 310 (1992).