Nobelpreise 1997, 2001 und 2005:
Frequenzkämme und Quantengase

Physik am Samstagmorgen, 29. April 2006

Jochen Walz

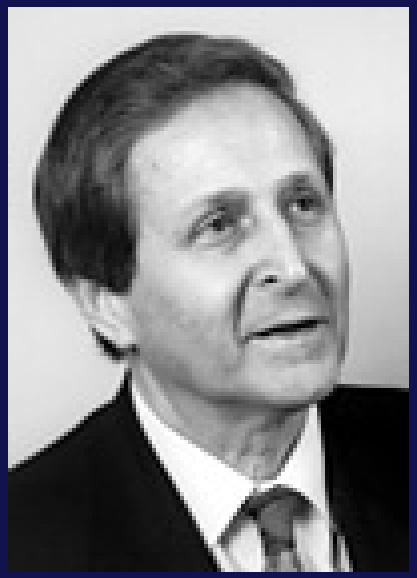
Institut für Physik

Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Der Physik-Nobelpreis 1997

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

Steven Chu
Stanford University
Stanford, CA, USA
geb. 1948

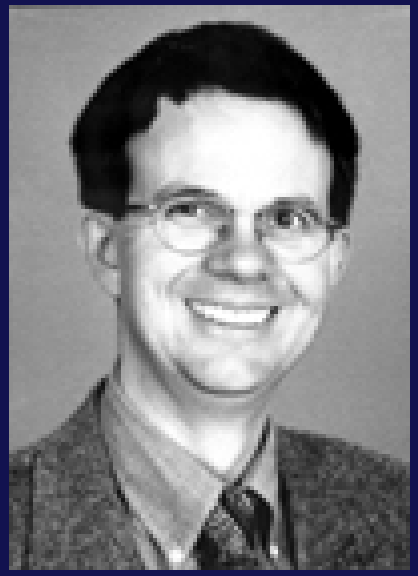


Claude Cohen-Tannoudji
Collège de France;
École Normale Supérieure
Paris, France
geb. 1933
(in Constantine, Algeria)

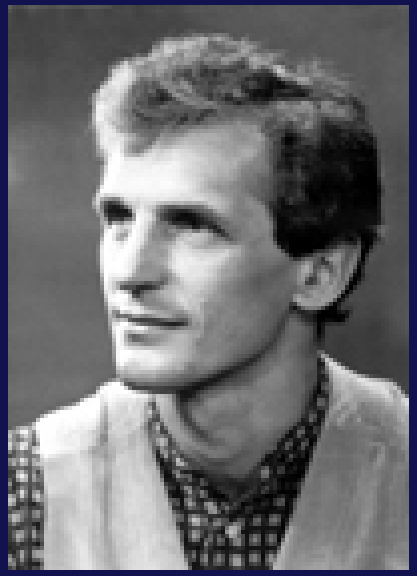
William D. Phillips
National Institute of
Standards and Technology
Gaithersburg, MD, USA
geb. 1948

Der Physik-Nobelpreis 2001

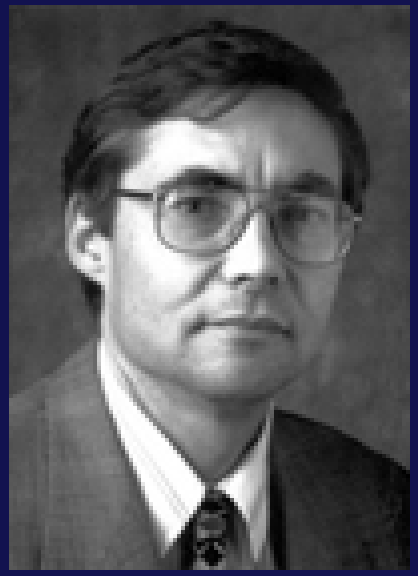
"for the achievement of Bose-Einstein condensation
in dilute gases of alkali atoms,
and for early fundamental studies of the properties of the condensates"



Eric A. Cornell
University of Colorado,
JILA Boulder, CO, USA
geb. 1961



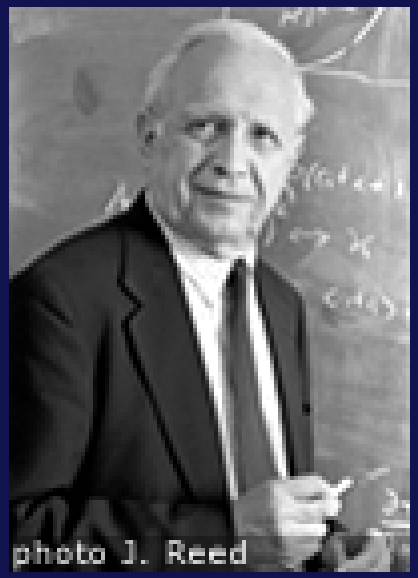
Wolfgang Ketterle
Massachusetts Institute of
Technology (MIT)
Cambridge, MA, USA
geb. 1957



Carl E. Wieman
University of Colorado,
JILA Boulder, CO, USA
geb. 1951

Der Physik-Nobelpreis 2005

“for his contribution to the quantum theory of optical coherence”

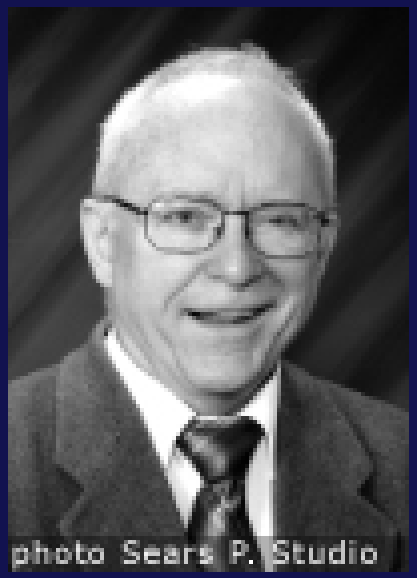


Roy J. Glauber

Harvard University
Cambridge, MA, USA

geb. 1925

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



John L. Hall

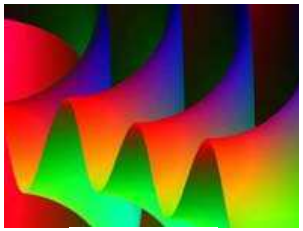
University of Colorado,
JILA; National Institute of Standards and Technology
Boulder, CO, USA

geb. 1934

Theodor W. Hänsch

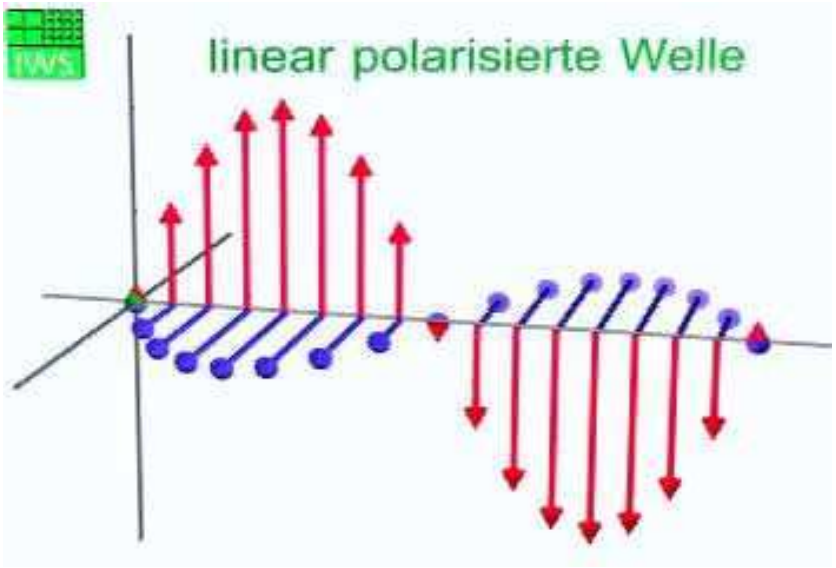
Max-Planck-Institut für Quantenoptik Garching;
Ludwig-Maximilians-Universität Munich,
Germany

geb. 1941



Elektromagnetische Wellen

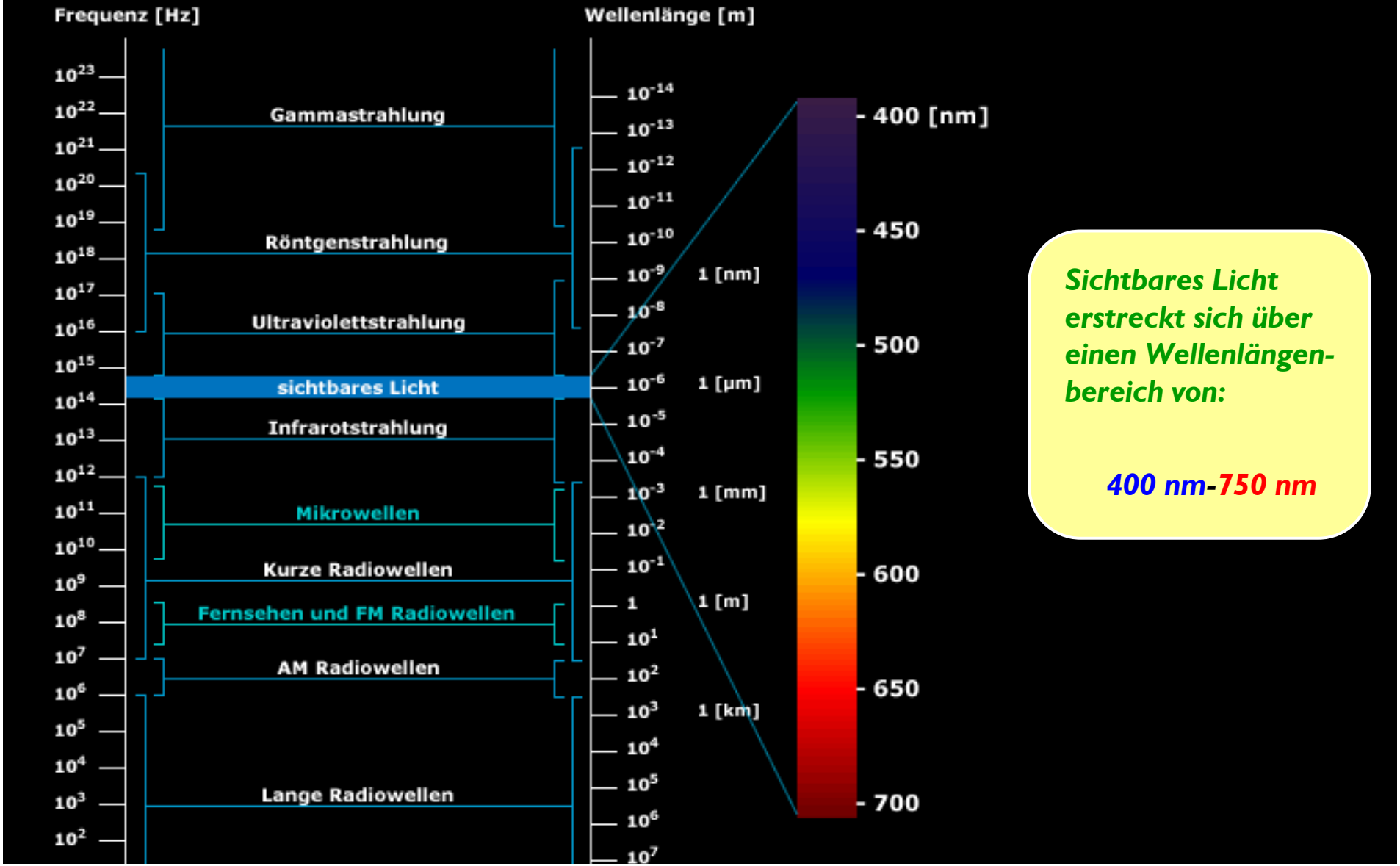
Elektromagnetische Wellen besitzen ein oszillierendes elektrisches und magnetisches Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle !



Abbildungen:
Laserlexikon,
Fraunhofer Institut
für Werkstoff- und
Strahltechnik,
Dresden, 2002

[Folie von I. Bloch]

Licht
– ein kleiner Teil des elektromagnetischen Spektrums -



Sichtbares Licht erstreckt sich über einen Wellenlängen-bereich von:

400 nm-750 nm

[Folie von I. Bloch]

Zerlegung von weißem Licht in Spektralfarben

Vorlesungs-Versuch:

Thermisches Licht einer Bogenlampe wird mit einem Prisma aus Quarzglas in seine Farbanteile zerlegt.

Zu sehen ist ein Spektrum, das sich vom tiefen Rot bis in das Ultraviolett erstreckt.

Absorption von Licht

Vorlesungs-Versuch:

Thermisches Licht einer Bogenlampe wird mit einem Prisma aus Quarzglas in seine Farbanteile zerlegt.
Der obere Teil des Lichtstrahls verläuft in Luft, der untere Teil geht durch eine Flüssigkeit in einer Küvette.
Durch den Vergleich erkennt man den absorbierten Wellenlängenbereich.

Flüssigkeit #1: Fluoreszein-Lösung

Flüssigkeit #2: Kaliumpermanganat-Lösung

Spontane und induzierte Strahlungsprozesse

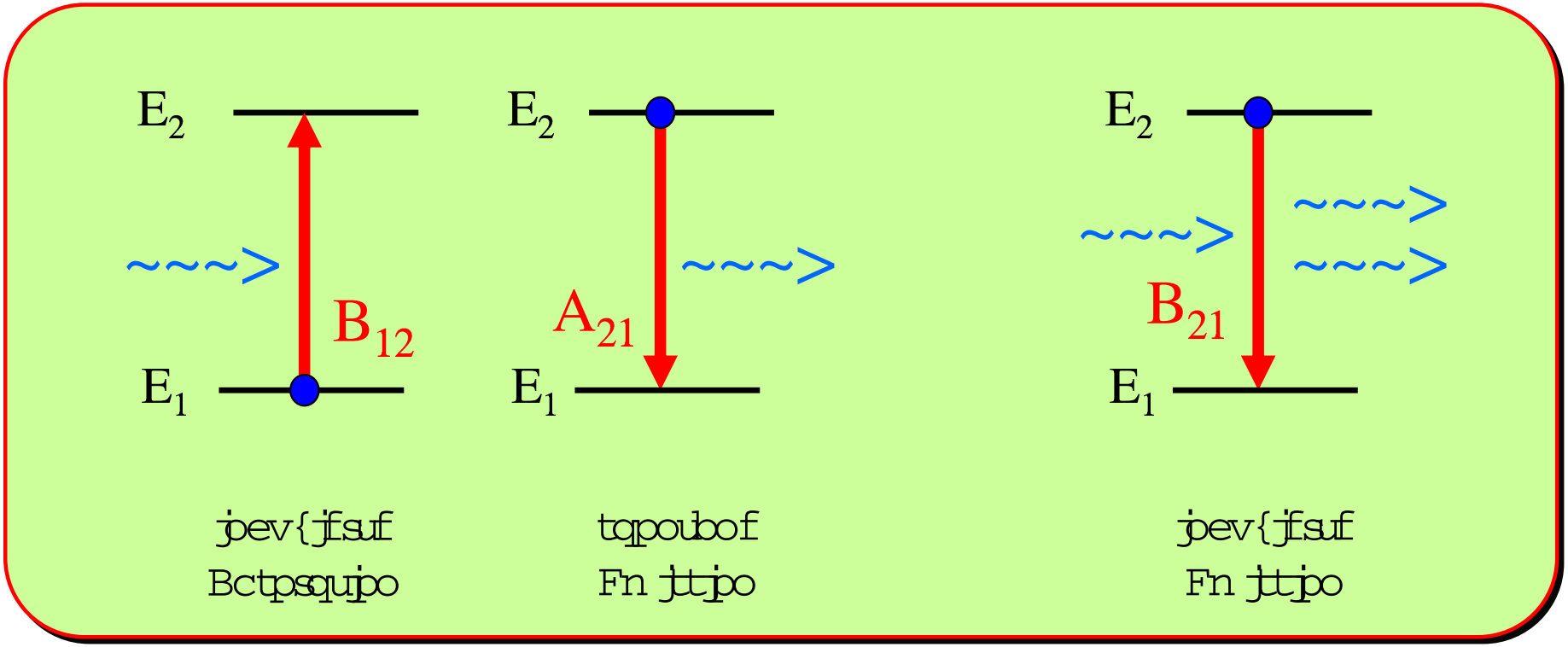
1917 ***Albert Einstein*** **beschreibt die Wechselwirkung von Strahlung und Atom**

Er sagt folgende Prozesse voraus:

(induzierte) Absorption

spontane Emission

und induzierte Emission



Schwächt Licht !!

Verstärkt Licht !!

[Folie von I. Bloch]

Emissions-Spektrum einer Quecksilberdampf-Lampe

Vorlesungs-Versuch:

In einer Lampe werden Atome in einem Quecksilberdampf durch eine elektrische Gasentladung zum angegegt.

Beim Zerfall von angeregten Zuständen in tieferliegende Zustände wird Licht bei charakteristischen Spektrallinien ausgesandt.

Die Spektrallinien werden durch ein Prisma aus Quarzglas getrennt

Spontane und induzierte Strahlungsprozesse

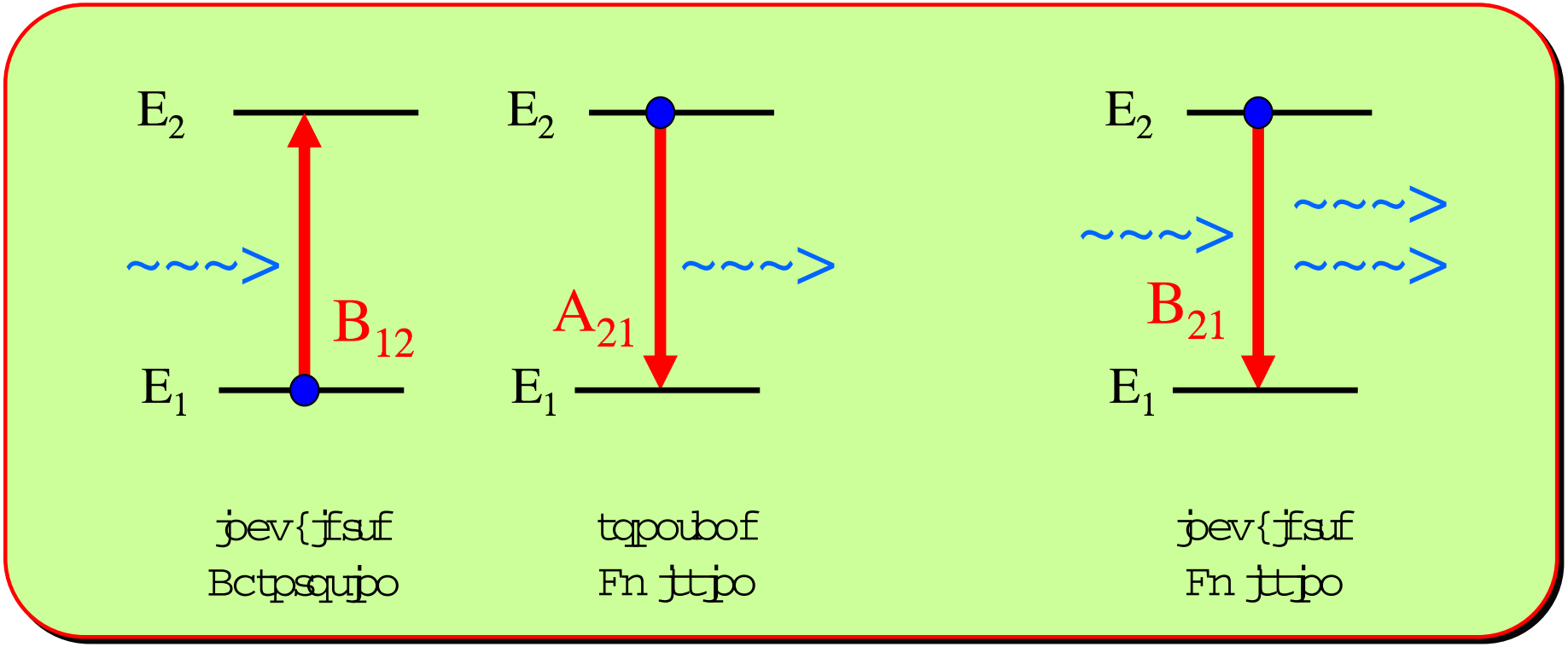
1917 ***Albert Einstein*** **beschreibt die Wechselwirkung von Strahlung und Atom**

Er sagt folgende Prozesse voraus:

(induzierte) Absorption

spontane Emission

und induzierte Emission

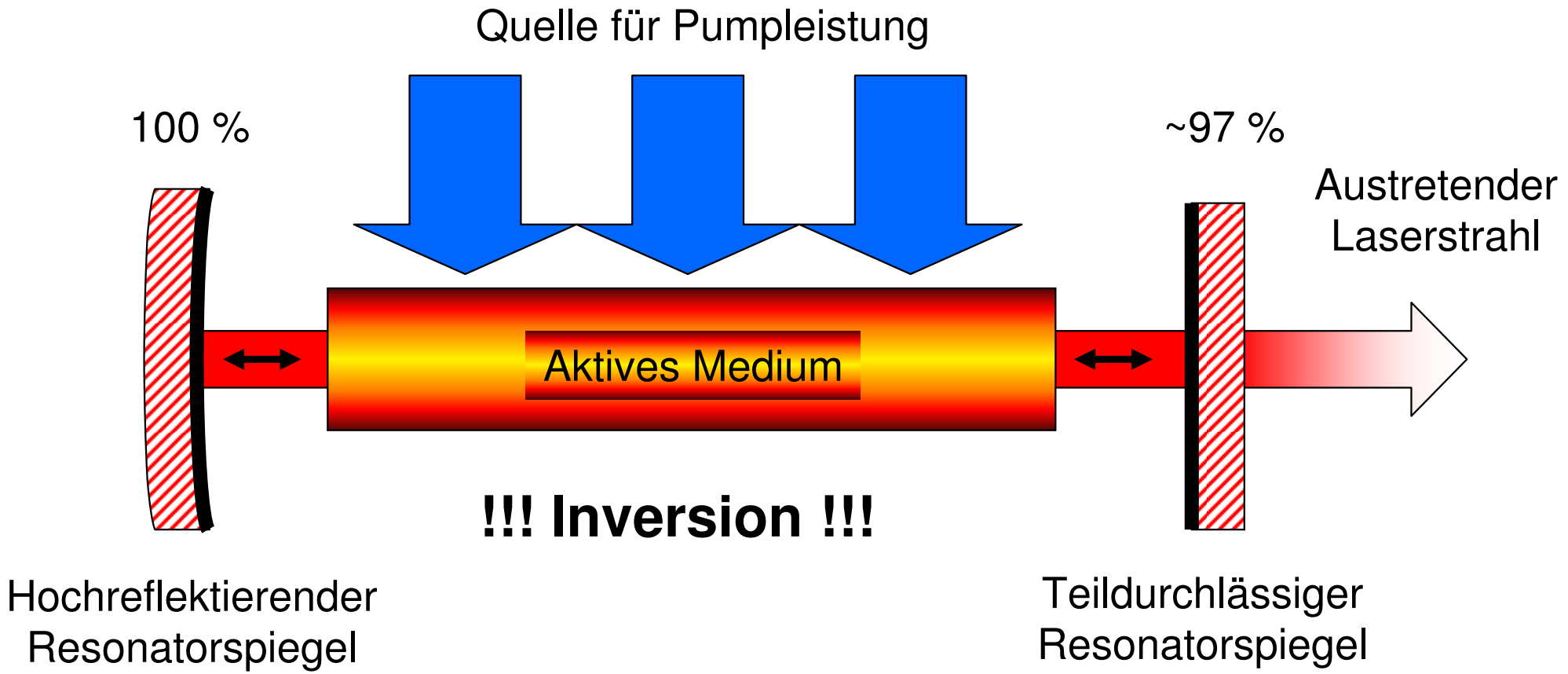


Schwächt Licht !!

Verstärkt Licht !!

[Folie von I. Bloch]

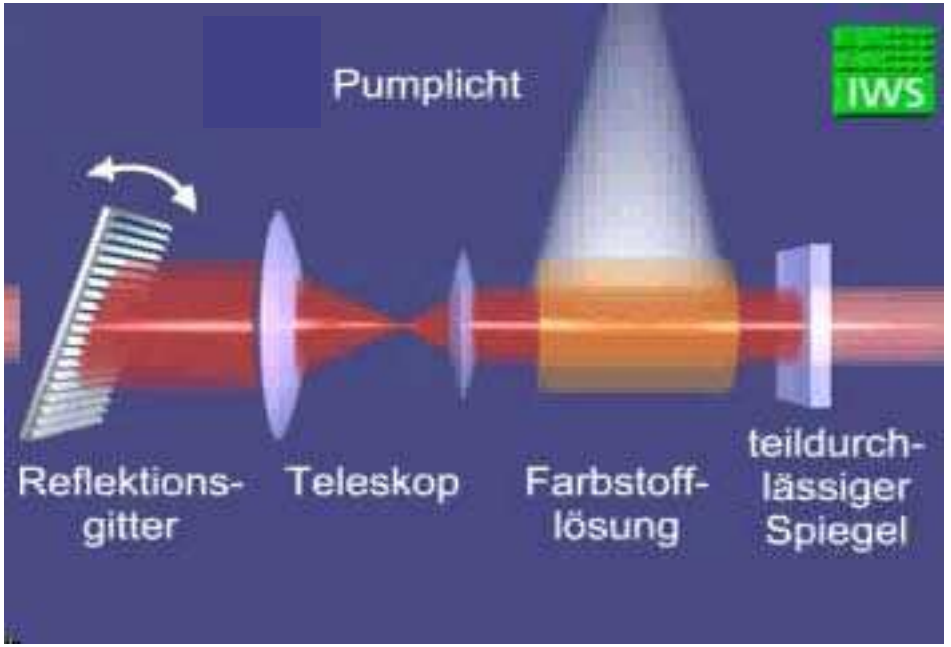
Wie funktioniert ein Laser - Prinzipaufbau eines Lasers



Licht wird zwischen den Spiegeln hin- und her-reflektiert und bei jedem Durchgang durch aktives Medium verstärkt!

[Folie von I. Bloch]

Abstimmbare Laser mit zusätzlichen optischen Elementen

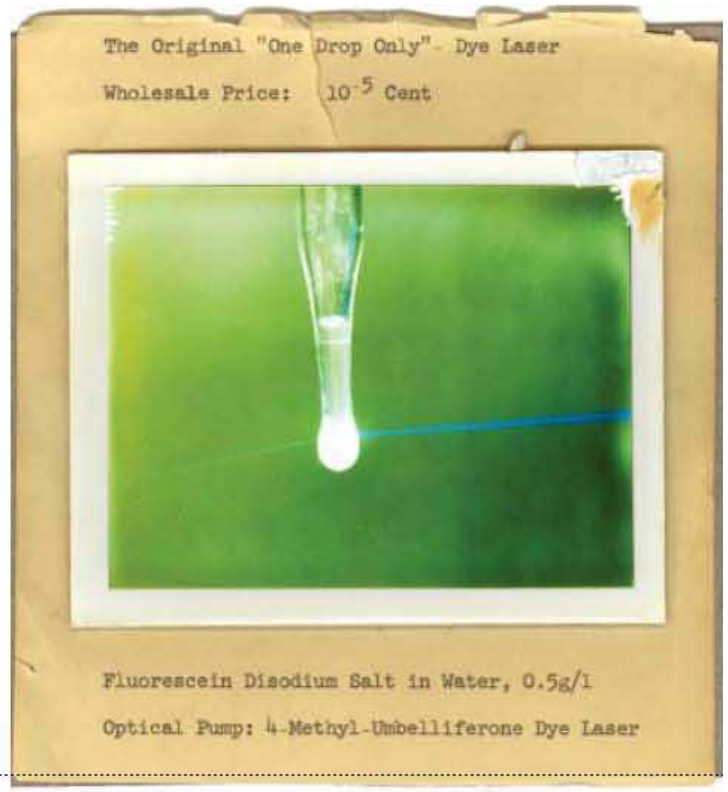


Farbstofflaser

Der Resonator wird durch
Verkippen des Gitters
auf eine Wellenlänge abgestimmt.

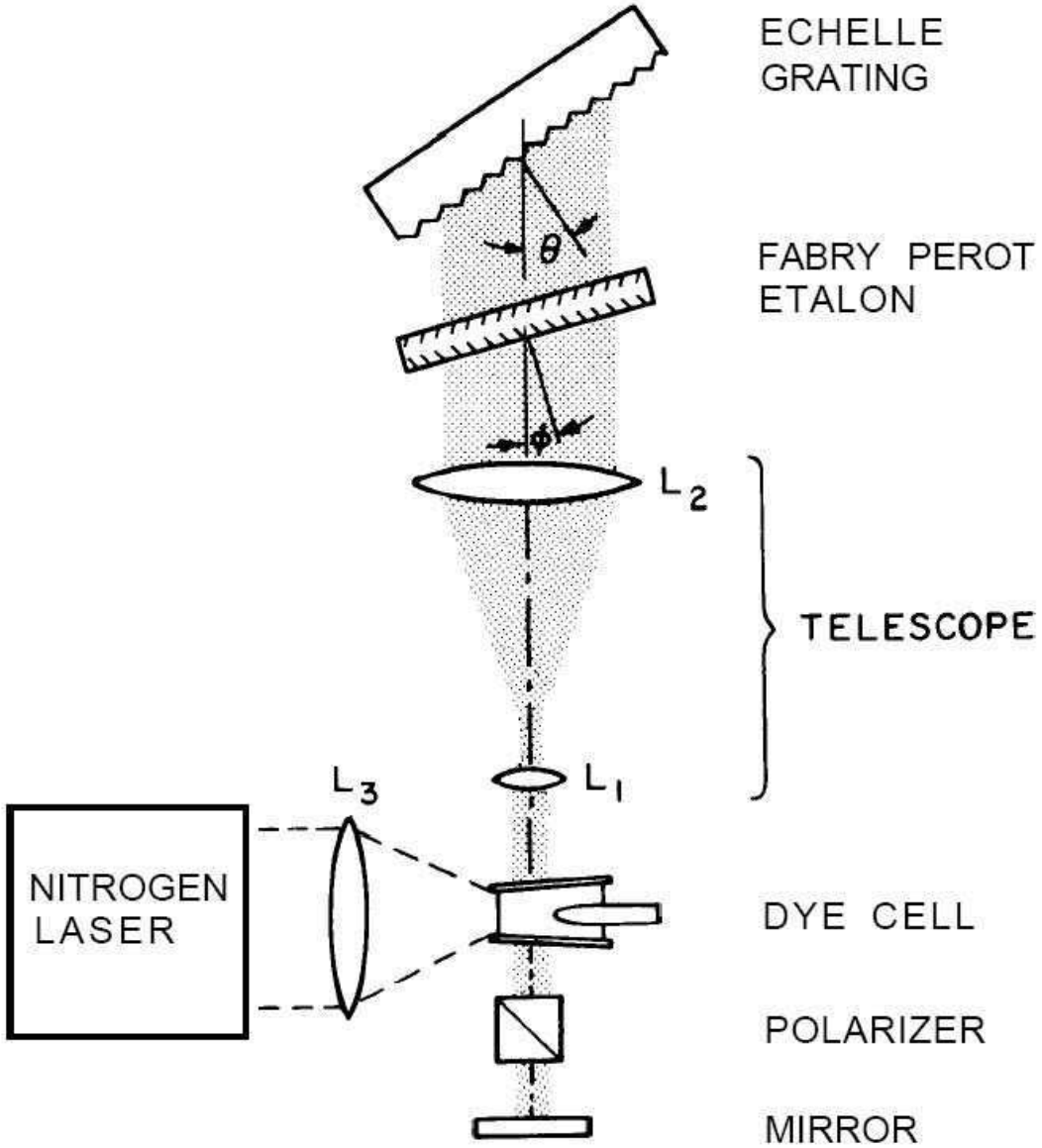
Abbildungen:
Laserlexikon, Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden, 2002

[Folie von I. Bloch]



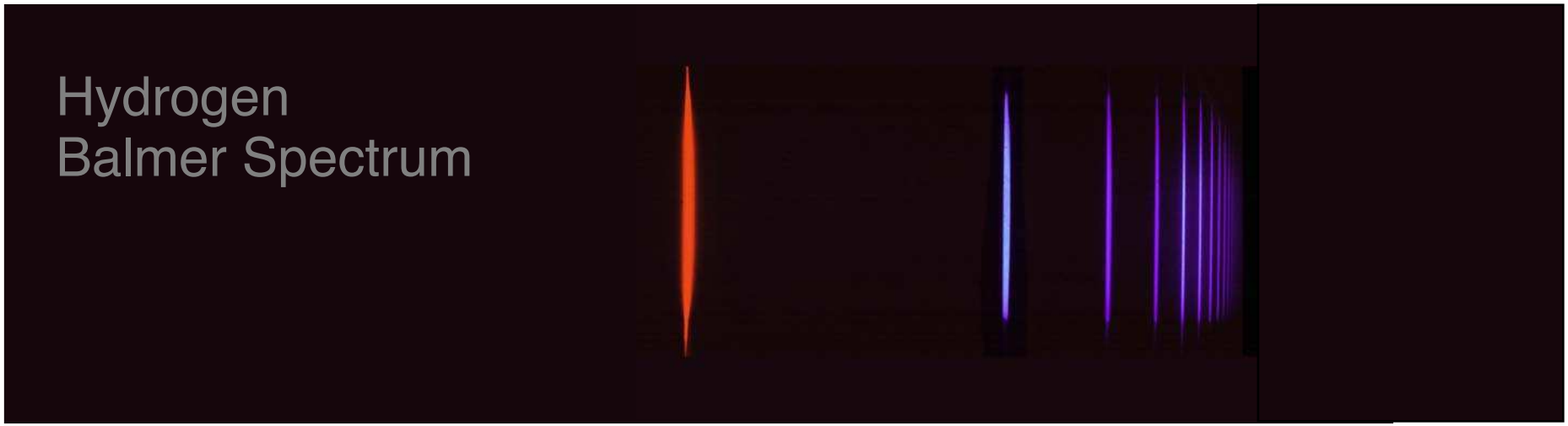
Edible Lasers and Other Delights of the 1970s

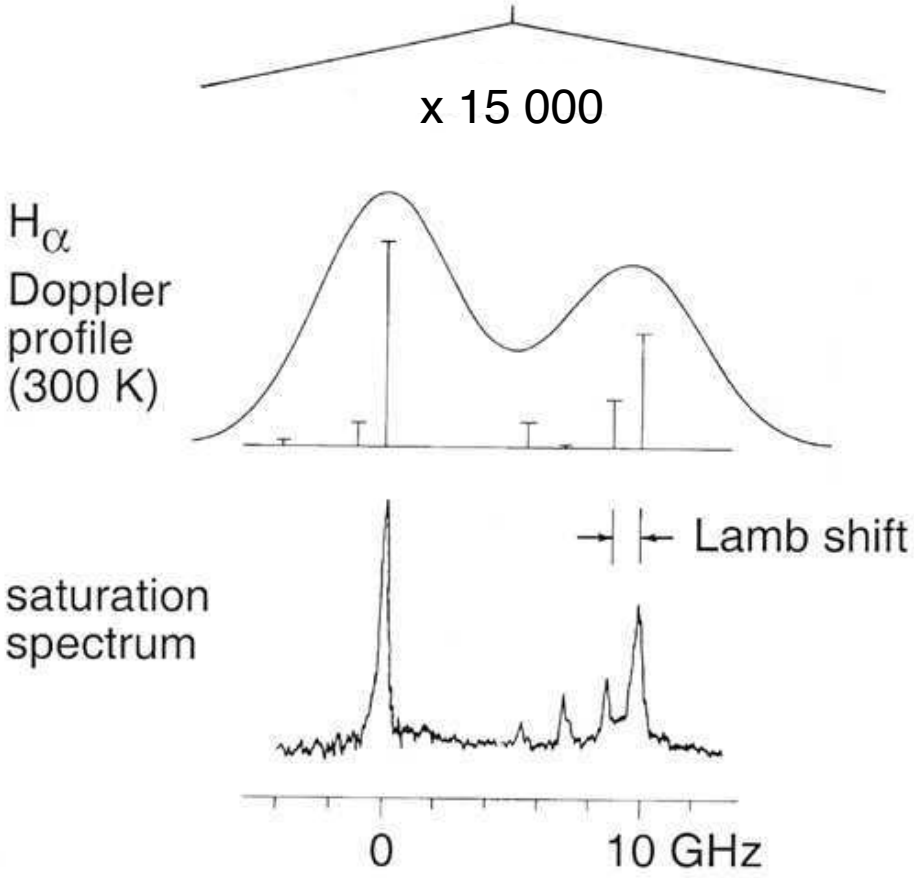
T.W.H.,
Optics and Photonics News
February 2005



[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Hydrogen Balmer Spectrum

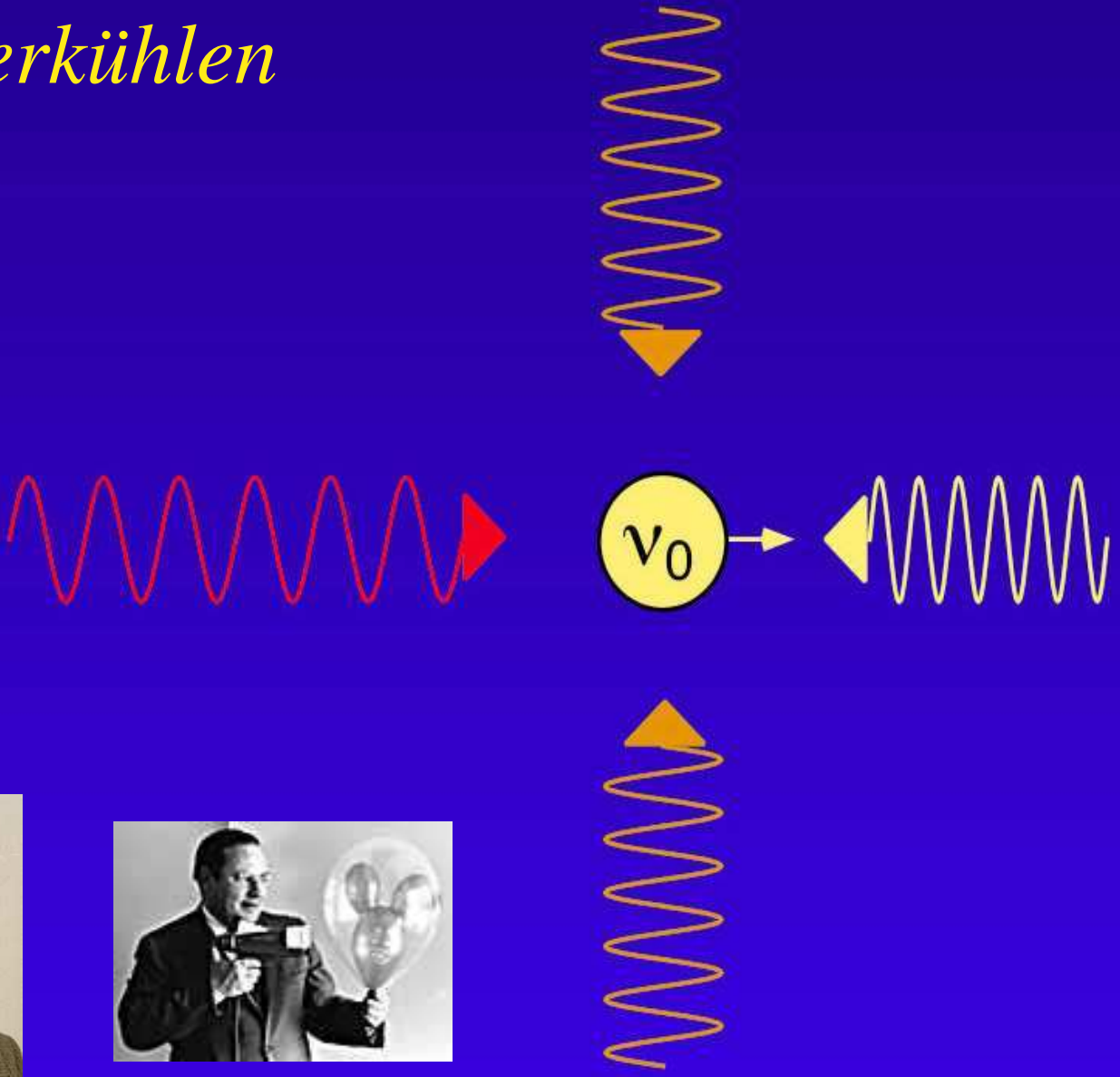




T.W. Hänsch, I.S. Shahin, and A.L. Schawlow, Nature **235**, 63 (1972)

[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

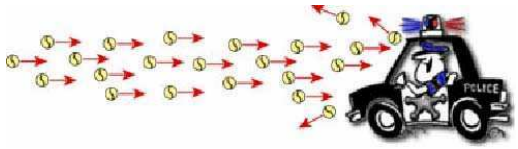
Laserkühlen



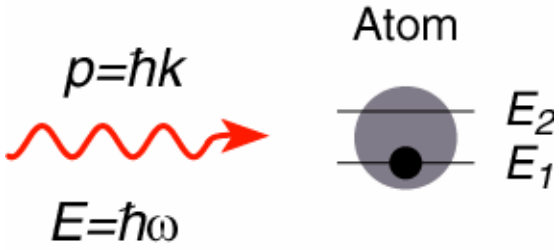
T.W. Hänsch and A.L. Schawlow, Opt. Comm. 13, 68 (1975)

[Folie von I. Bloch]

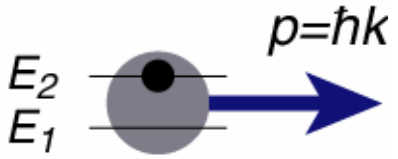
Laserkühlung



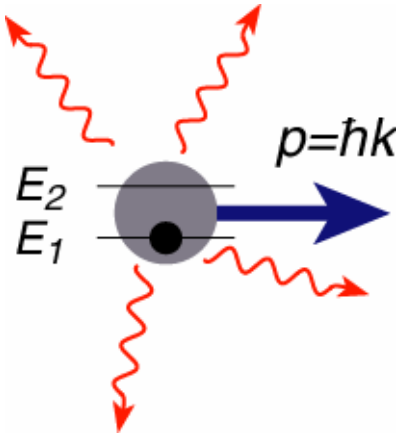
Bei der Absorption von Photonen aus einem Laserstrahl muß sowohl der Impuls als auch die Energie erhalten bleiben



Das Atom erfährt einen gerichteten Impulsübertrag bei der Absorption eines Photons



Die anschließende spontane Emission ist ungerichtet und führt im Mittel über viele Absorptions-Emissionszyklen zu keinem Impulsübertrag.



[Folie von I. Bloch]

Laserkühlung – einige Daten

Maximale Beschleunigung

$$a_{\max} = \frac{\hbar k}{m} \cdot \frac{\Gamma}{2}$$

{/C/bg/s!98Sc

$$a_{\max} = 100000\, m/s^2$$

10000 fache Erdbeschleunigung!

Minimale Temperatur

$$T_{\min} \approx 10 \mu K$$

[Folie von I. Bloch]

Materiewellen

Bei Photonen ist der Impuls und die Wellenlänge miteinander verknüpft:

$$p = \hbar k = \frac{h}{\lambda}$$

Auch für Materie kann eine solche Beziehung aufgestellt werden:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

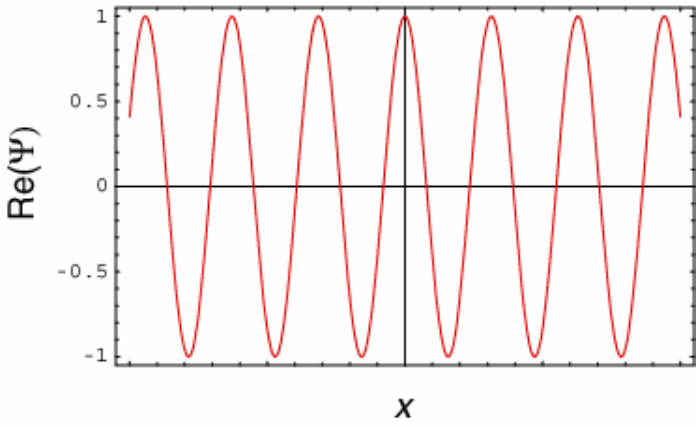
Louis-Victor de Broglie
Nobelpreis1929

[Folie von I. Bloch]

Die Schrödingergleichung

Wellengleichung für Materiewellen im freien Raum

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\Psi(\vec{r},t) = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi(\vec{r},t)$$



Einfache Lösung für Objekt mit Impuls *p*

$$\Psi(x,t) = e^{i(\omega t - kx)} = e^{i/\hbar(Et - px)}$$

$$|\Psi(x,t)|^2 = 1$$

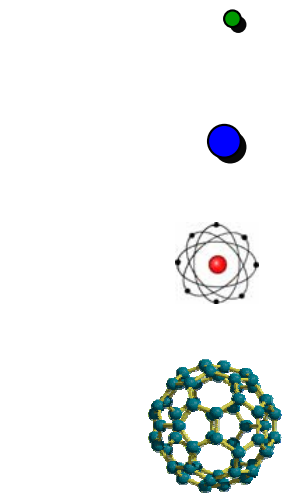
Dispersionsrelation für Materie und Photonen unterschiedlich !

$$E = \hbar\omega(k) = \frac{\hbar^2}{2m}\cdot k^2 \qquad \hbar\omega(k) = \hbar c \cdot k$$

$$v_p = \frac{1}{2}\frac{p}{m} = \frac{1}{2}v \qquad v_p = c$$

[Folie von I. Bloch]

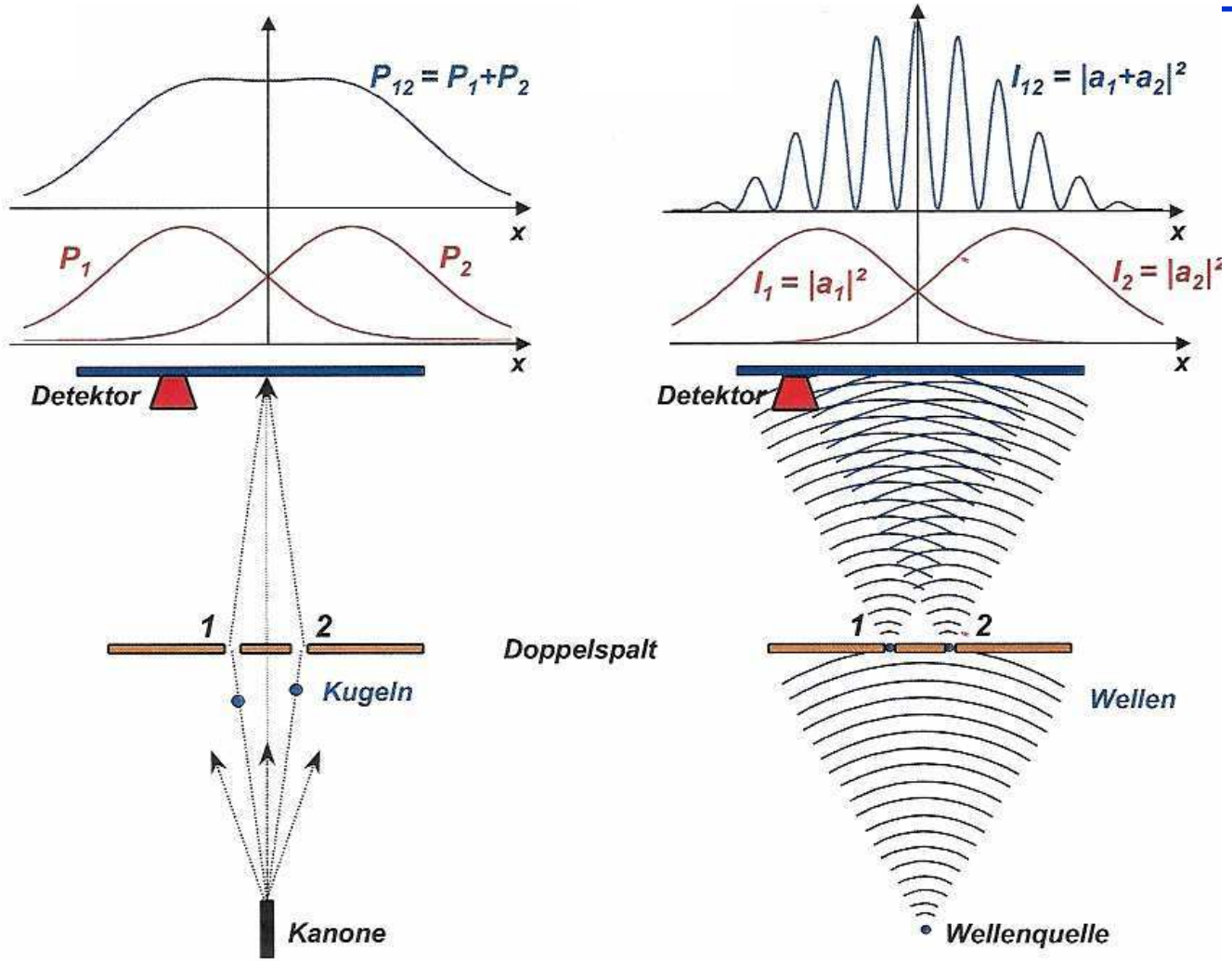
deBroglie Wellenlängen verschiedener Objekte



Objekt	m (kg)	v (m/s)	λ (mm)
Elektron	$9{,}1 \cdot 10^{-31}$	$2 \cdot 10^{6}$	$4 \cdot 10^{-7}$ (0,0000004)
Neutron	$1{,}7 \cdot 10^{-27}$	$4 \cdot 10^{3}$	$9 \cdot 10^{-8}$ (0,00000009)
^{87}Rb Atom	$1{,}5 \cdot 10^{-25}$	270	$2 \cdot 10^{-8}$ (0,00000002)
C_{60}	$1{,}2 \cdot 10^{-24}$	210	$3 \cdot 10^{-9}$ (0,000000003)
Fussball	0,5	20	$7 \cdot 10^{-32}$ (0,00000000000000000000000000007)

[Folie von I. Bloch]

Interferenz am Doppelspalt



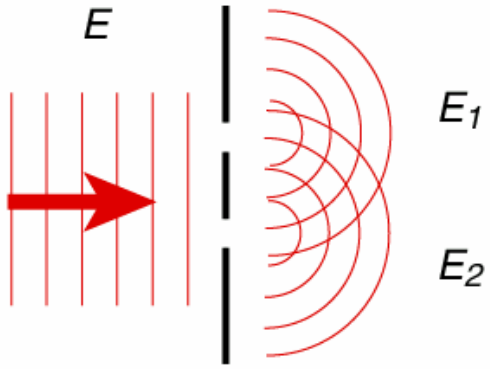
Klassische Teilchen

Wellen

[Folie von I. Bloch]

Was interferiert bei Materiewellen ?

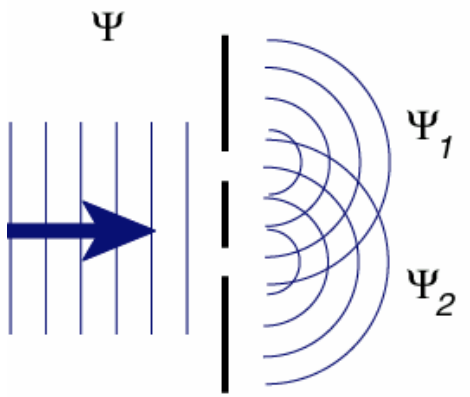
Elektromagnetische Felder



$$E_{det} = E_1 + E_2$$

$$I \propto |E_1 + E_2|^2$$

Quantenmechanische Wellenfunktionen

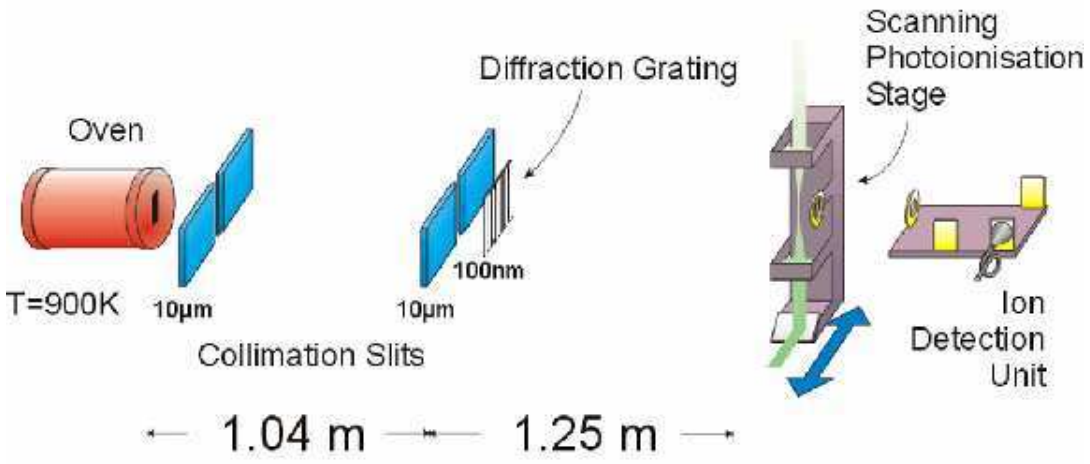


$$\Psi_{det} = \Psi_1 + \Psi_2$$

$$n \propto |\Psi_1 + \Psi_2|^2$$

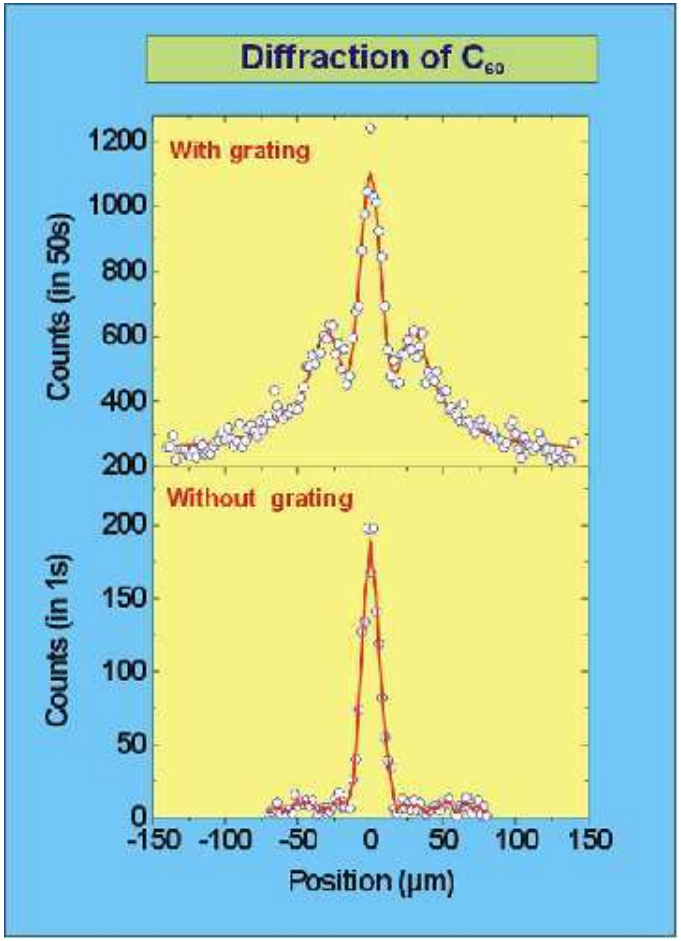
[Folie von I. Bloch]

Interferenz von C_{60} Materiewellen



Pressure ~5·10^{-7} mbar

C_{60} Parameter	Gitter
$v = 220$ m/s	Spaltbreite: 50 nm
$\lambda = 2{,}5$ pm	Spaltabstand: 100 nm



M. Arndt *et. al.*
Nature **401**, ff. 680, 1999
http://www.quantum.univie.ac.at/

[Folie von I. Bloch]

de Broglie Wellenlänge

Thermische deBroglie Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$

273 K (0°C)
Wasser gefriert

77K (-197°C)
Luft wird flüssig

4K (-269°C)
Helium wird flüssig

T (K)

10000
100
1
10^{-1}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}

deBroglie Wellenlänge eines typischen Atoms

0.01 nm
0.1 nm
1 nm
0.01 μm
0.1 μm
1 μm
10 μm

Hier müssen wir hin, um Wellencharakter auf einer makroskopischen Skala zu sehen !

[Folie von I. Bloch]

Materie verwandelt sich bei tiefen Temperaturen!

- ***Kältere Atome** und Moleküle sind **langsamer** und erzeugen daher einen **geringeren Druck** in einem Gefäß!*

- ***Materie kann einen **Phasenübergang** bei Temperaturabsenkung erfahren!***
  - Flüssigkeit ⇨ Festkörper
  - Gas ⇨ Flüssigkeit
  - Normalleiter ⇨ Supraleiter
  - Normale Flüssigkeit ⇨ Superflüssigkeit
  - Klassisches Gas ⇨ Quantengas (Bose-Einstein-Kondensat)

[Folie von I. Bloch]

Bosonen und Fermionen

In der Quantenmechanik unterscheidet man Teilchen nach ihrem Drehimpuls, der ein Maß dafür ist wie schnell sich das Teilchen um sich selbst dreht.

Dieser Drehimpuls kann aufgrund der Quantenmechanik keine kontinuierlichen Werte annehmen, sondern tritt immer nur in ganz- oder halbzahligen Einheiten des Planck'schen Wirkungsquantums h auf.

Teilchen deren Drehimpuls ein ganzzahliges Vielfaches von h ist bezeichnet man als Bosonen. Ist er ein halbzahlig Vielfaches von h so bezeichnet man sie als Fermionen.

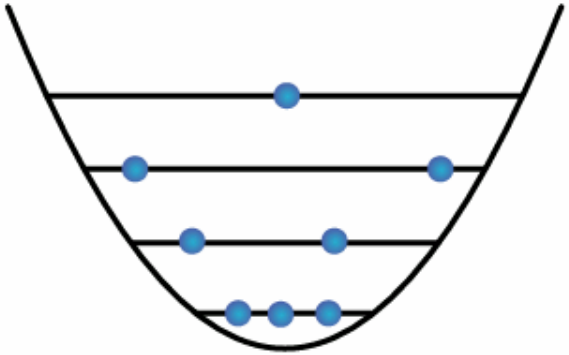
Der Drehimpuls L bestimmt, ob Teilchen Bosonen oder Fermionen sind.

Bosonen	Fermionen	
$L = n\,h$	$L = (n+1/2)\,h$	$n = 0,1,2,...$

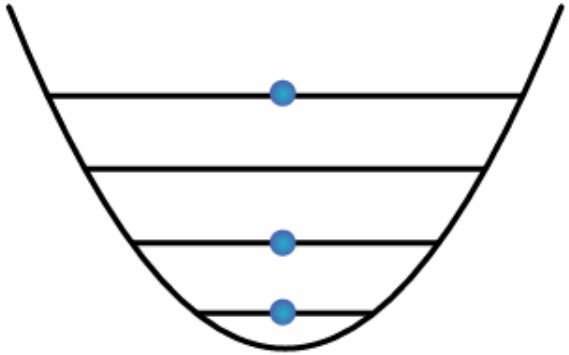
[Folie von I. Bloch]

Bosonische Liebe – Fermionisches Einzelleben

Besetzung von Quantenzuständen im Falle von



Bosonen



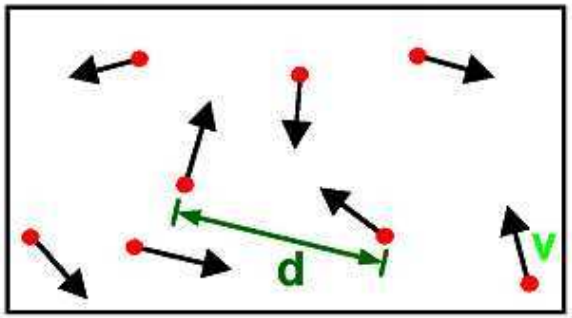
Fermionen

Je mehr Bosonen einen Zustand besetzt haben, desto mehr möchten in diesen Zustand gelangen.

Fermionen sind Einzelgänger ! Zwei Fermionen nehmen nie den gleichen Quantenzustand ein (Pauliverbot).

[Folie von I. Bloch]

What is Bose-Einstein condensation (BEC)?

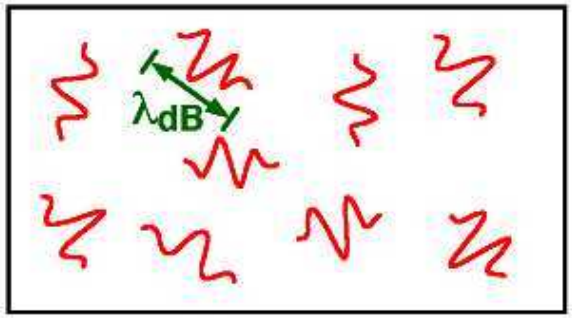


High Temperature T:

thermal velocity v

density d^{-3}

"Billiard balls"

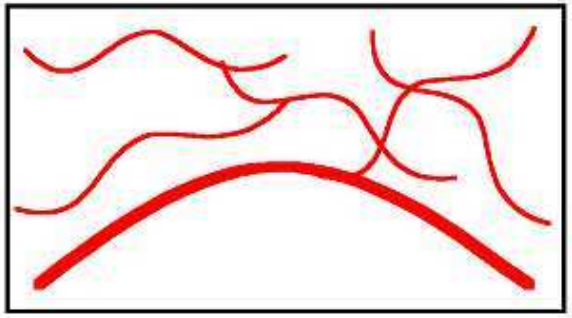


Low Temperature T:

De Broglie wavelength

$\lambda_{dB}=h/mv \propto T^{-1/2}$

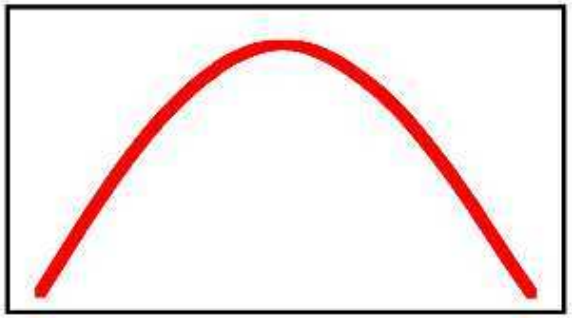
"Wave packets"



$T=T_{crit}$: Bose-Einstein Condensation

$\lambda_{dB} \approx d$

"Matter wave overlap"

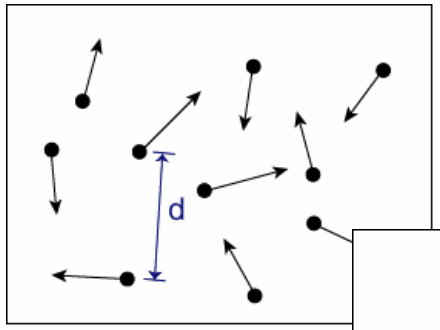


T=0: Pure Bose condensate

"Giant matter wave"

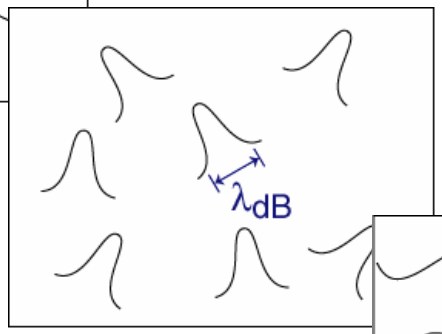
[Folie von W. Ketterle]

Vom klassischen Gas zum Bose-Einstein-Kondensat



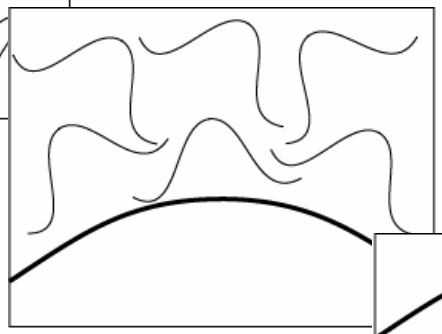
$T \gg T_c$

Klassisches Gas



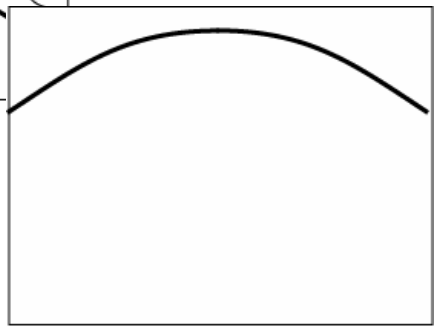
$T > T_c$

$\lambda_{dB} = h/mv \quad T^{-1/2}$



$T < T_c$

$\lambda_{dB} \approx d$

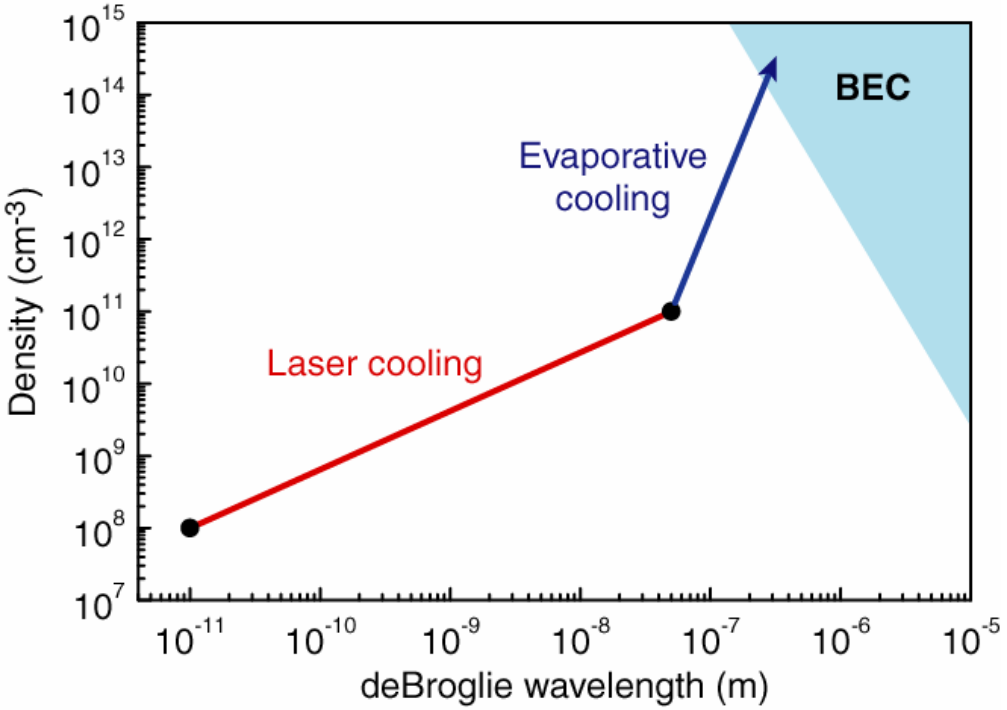


$T = 0$

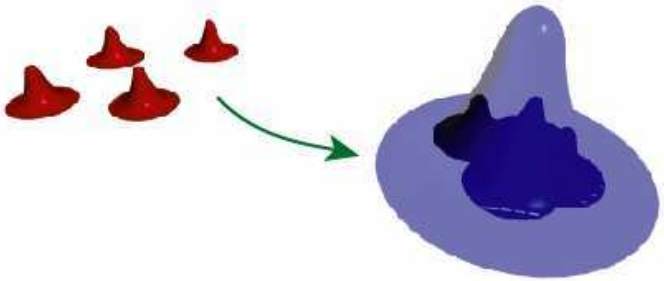
Kohärente Materiewelle

[Folie von I. Bloch]

Der Weg zur Bose-Einstein-Kondensation



$$n \cdot \lambda^3 \approx 1$$

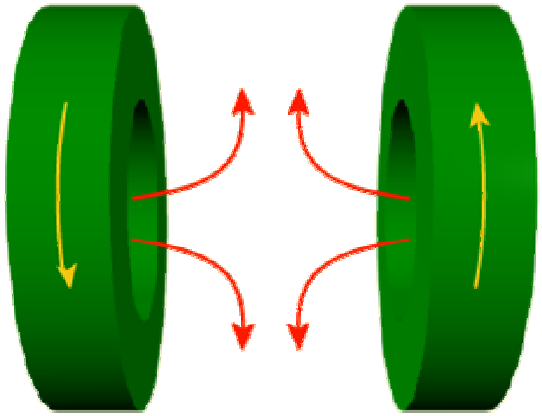


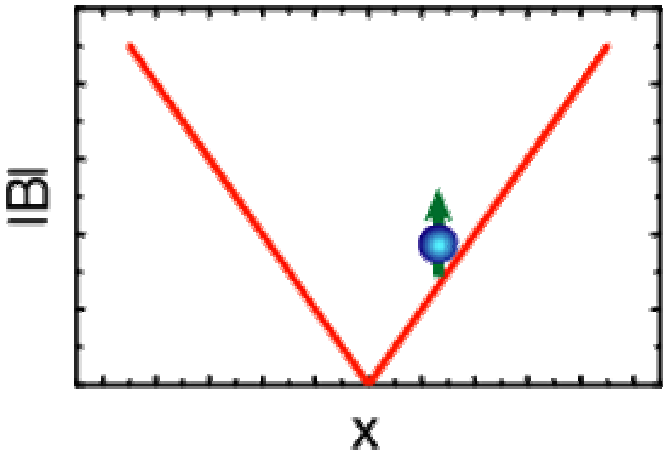
[Folie von I. Bloch]

Magnetische Fallen für Neutralatome

Energie eines Atoms in einem externen Magnetfeld $E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

Kraft auf ein Atom in einem inhomogenen Magnetfeld $\vec{F} = -\mu \cdot \nabla B$





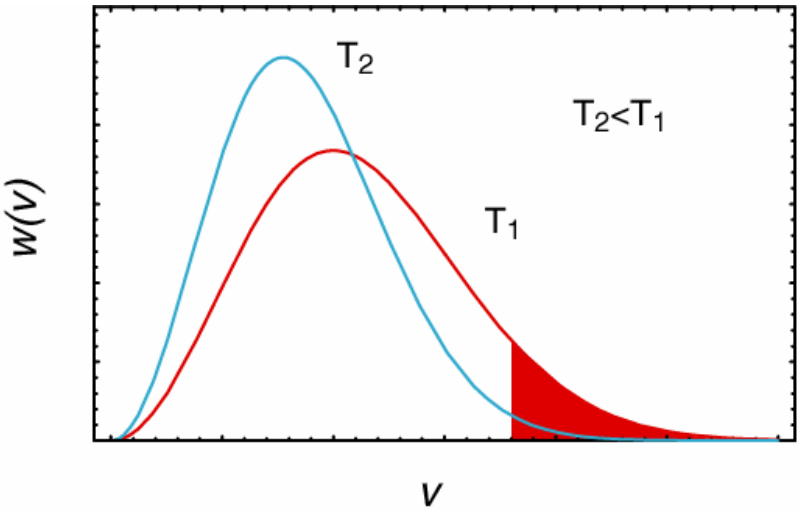
[Folie von I. Bloch]

Verdampfungskühlung

Verdampfe Atome, die mehr als die mittlere Energie des Systems besitzen.

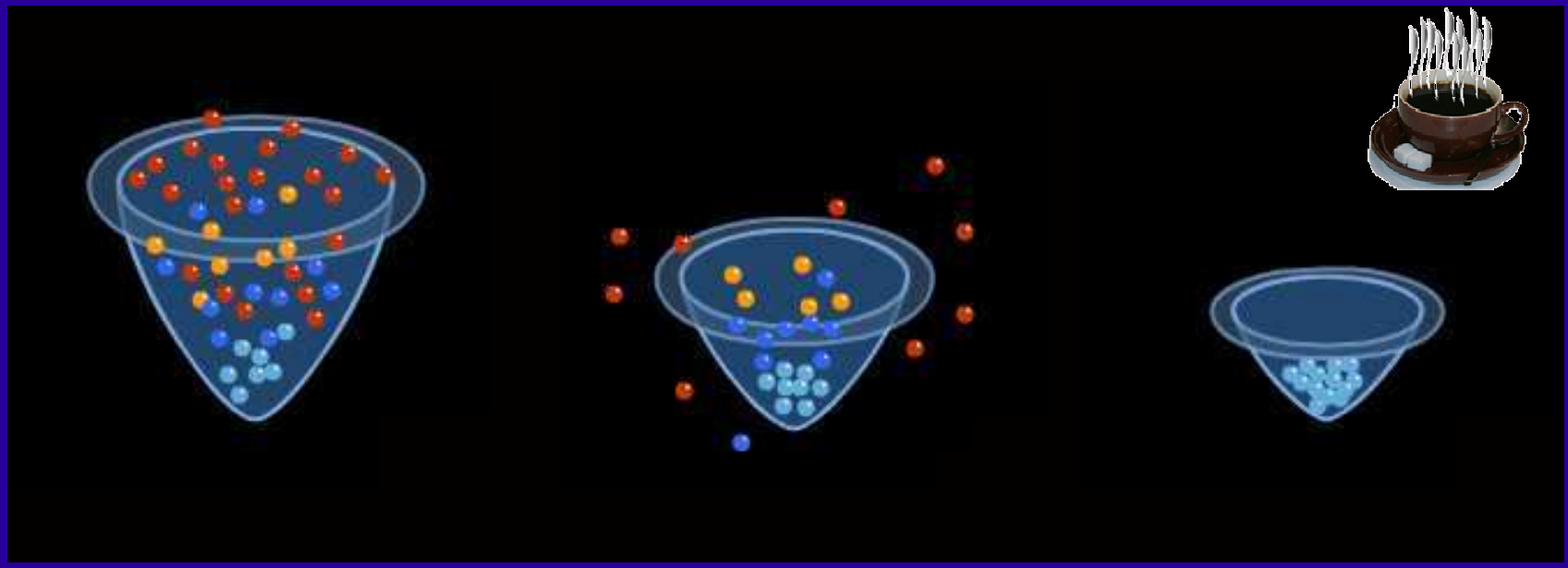
↓

Warte bis sich ein neues thermisches Gleichgewicht durch Stöße bei einer niedrigeren Temperatur eingestellt hat.



[Folie von I. Bloch]

Verdampfungskühlen

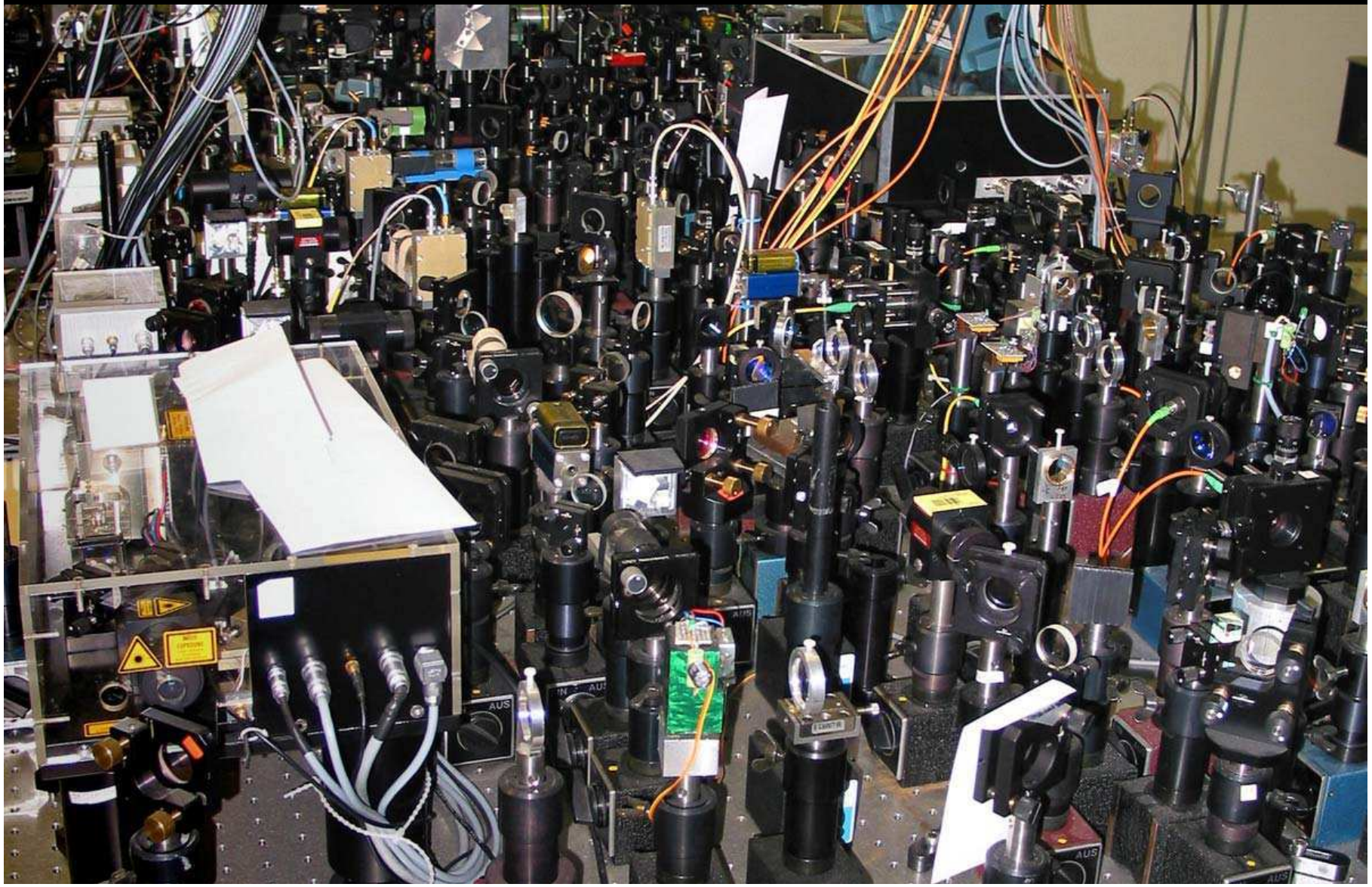


Tom Greytak

Daniel Kleppner

[Folie von I. Bloch]

Plus eine Menge Optik und Elektronik (Tisch 1) !!



[Folie von I. Bloch]

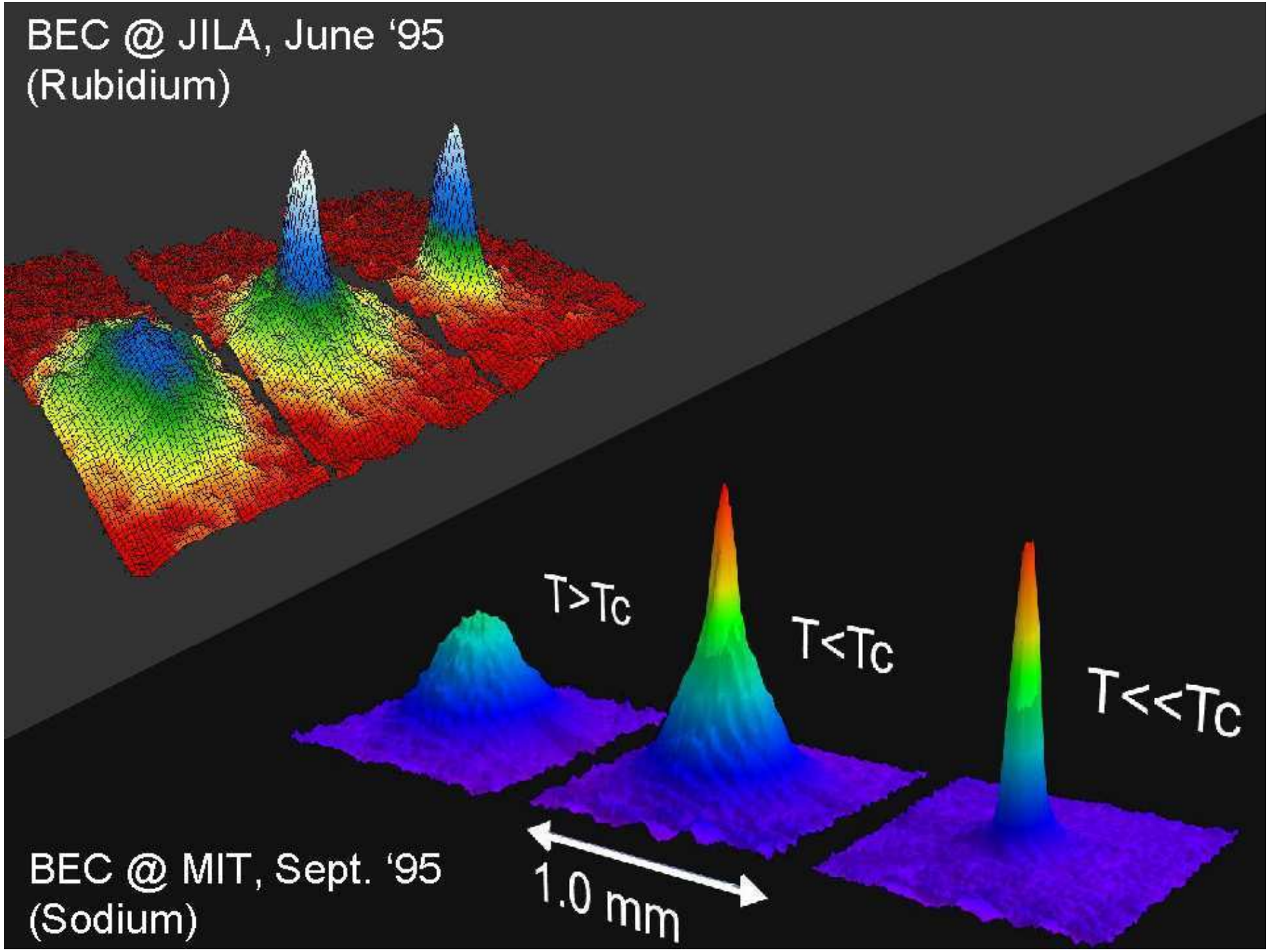
Anzeige mit Glückwunsch im Oktober 2001

Wir meinen: Aufräumen!

Stockholm meint: Nobelpreis!

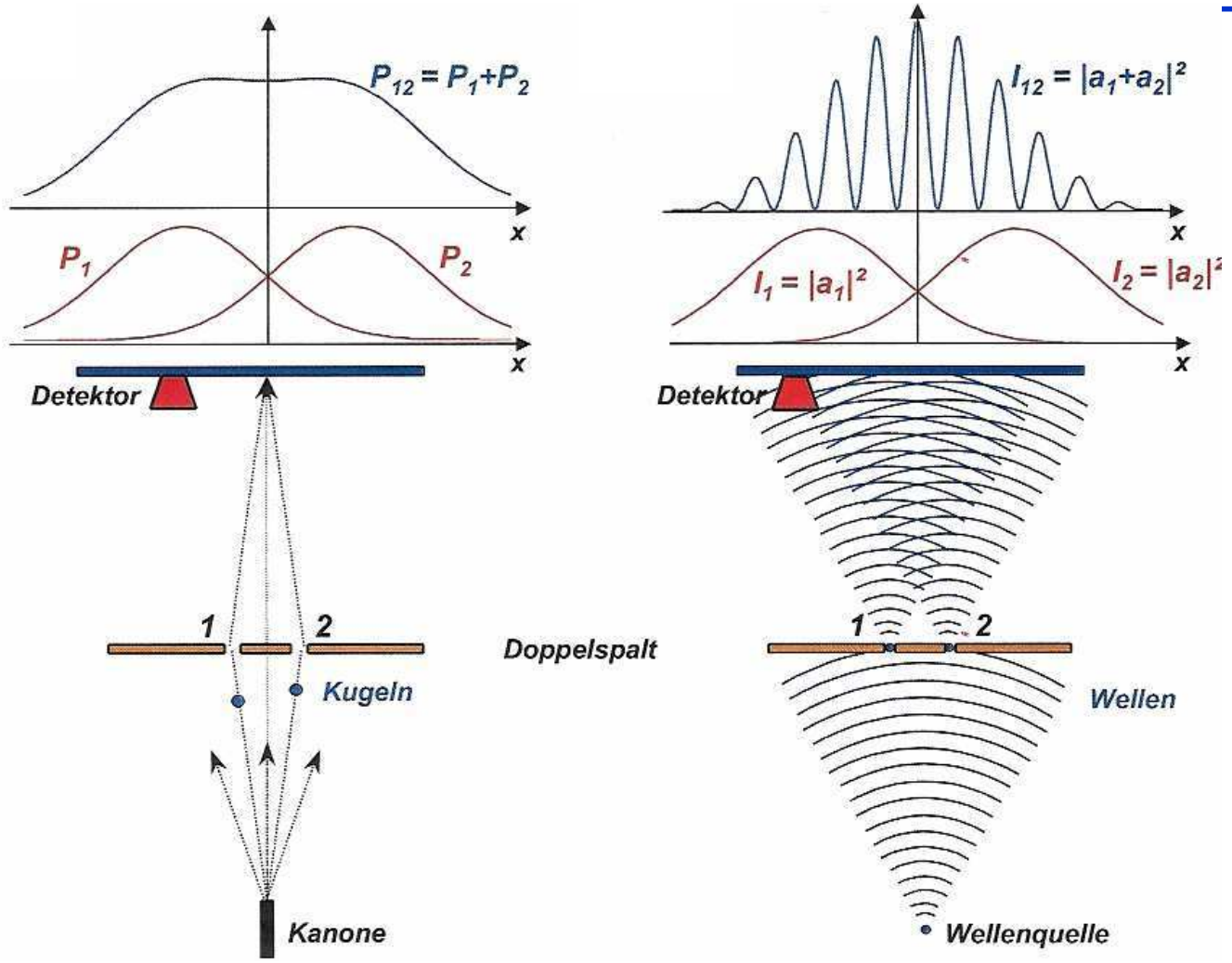
Egal. Lieber Wolfgang Ketterle, wir gratulieren herzlich zur Erzeugung der Bose-Einstein-Kondensation in verdünnten Gasen aus Alkaliatomen.

Baden-Württemberg
Wir können alles. Außer Hochdeutsch.



[Folie von W. Ketterle]

Interferenz am Doppelspalt



Klassische Teilchen

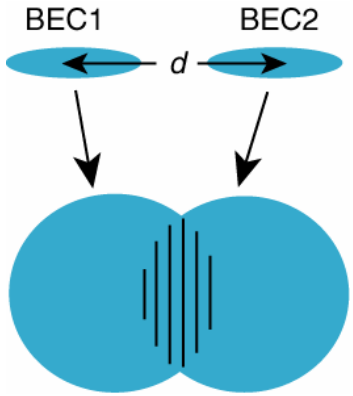
Wellen

[Folie von I. Bloch]

Interferenz zweier Bose-Einstein-Kondensate

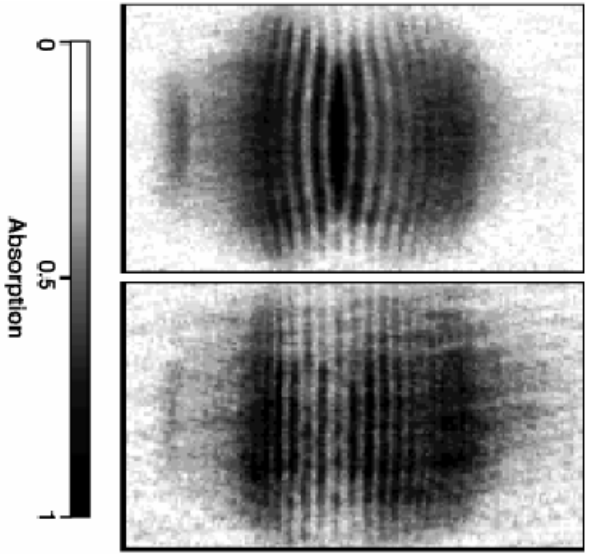
Gefangene BEC's

BEC's nach einer Expansionszeit t

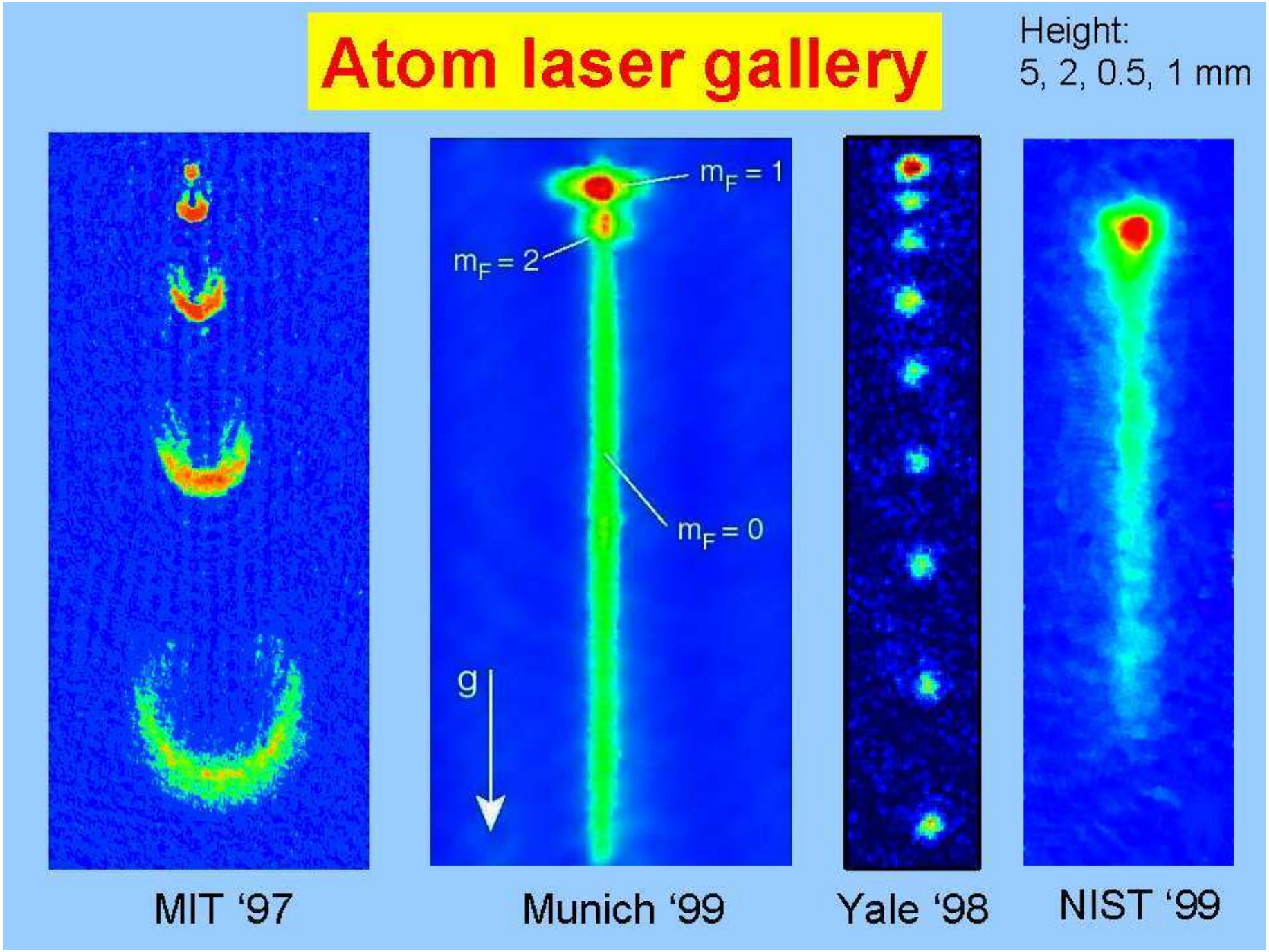


$$\lambda = \frac{h}{m\Delta v} = \frac{ht}{md}$$

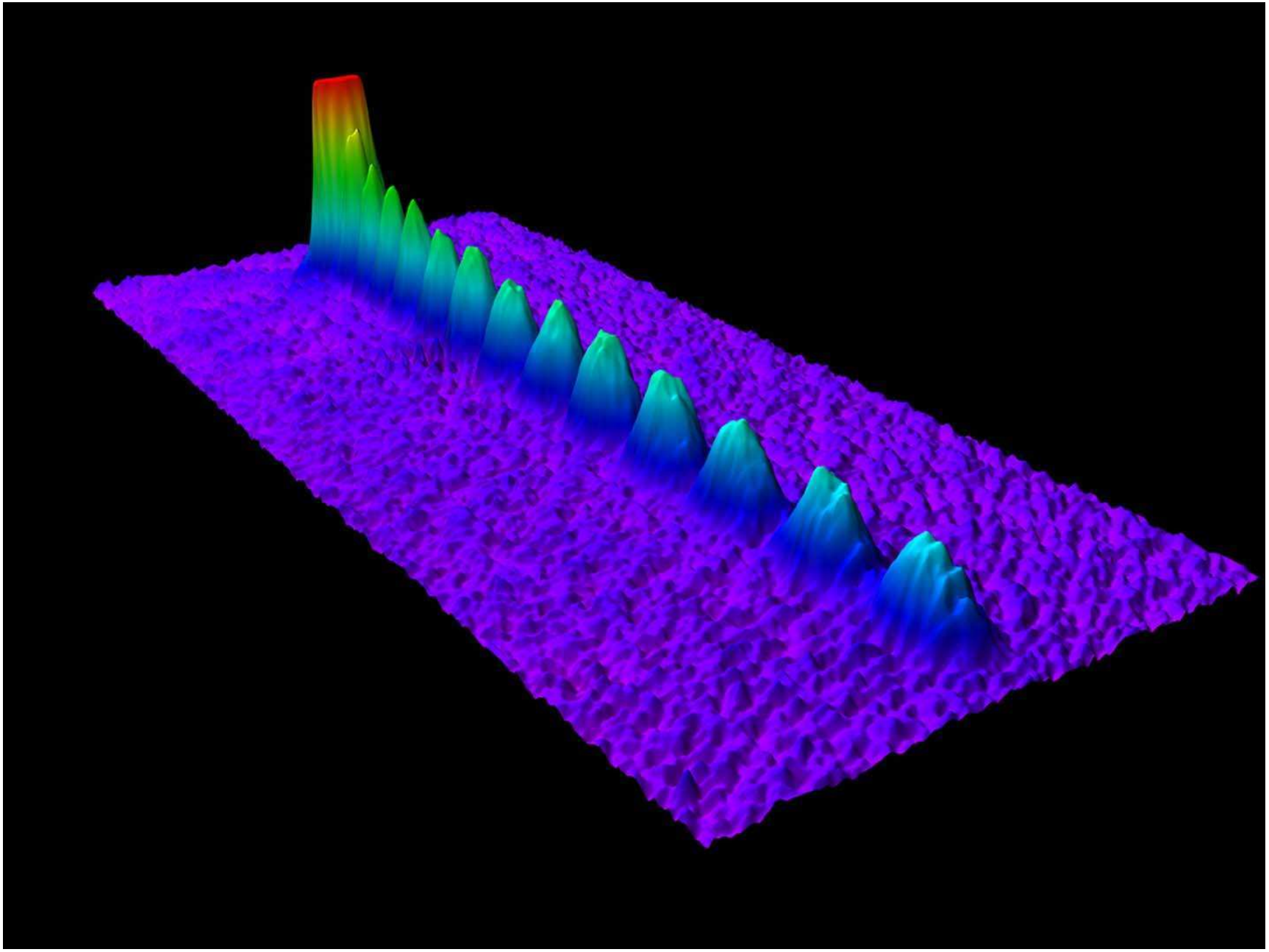
M. R. Andrews *et. al.*
Science 275, ff. 637, 1997



[Folie von I. Bloch]

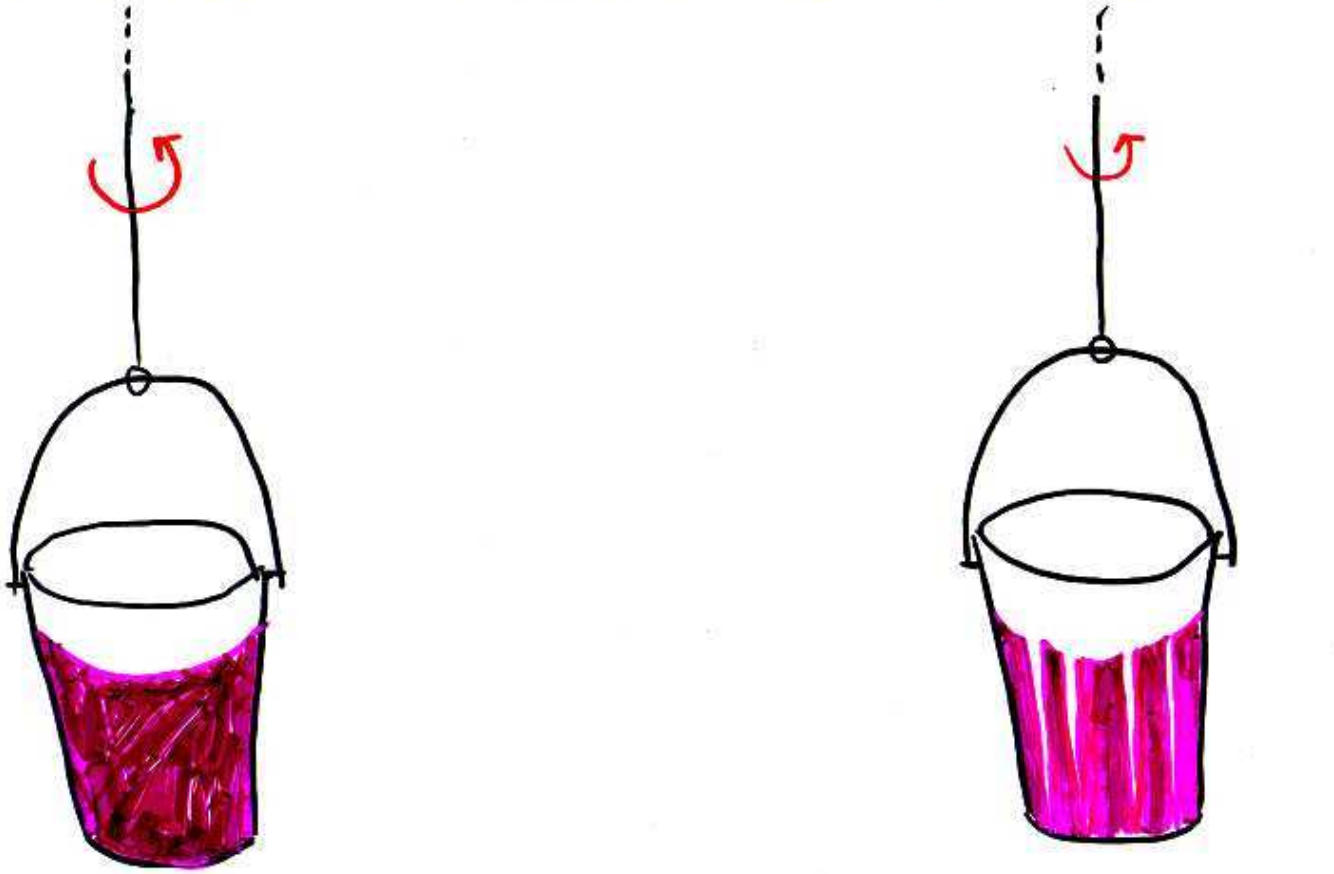


[Folie von W. Ketterle]



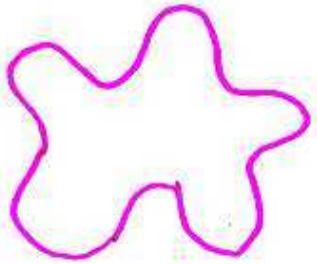
[Folie von I. Bloch]

Rotating Fluids



[Folie von W. Ketterle]

"Matter waves"



$\lambda = \frac{h}{mv}$ de Broglie relation

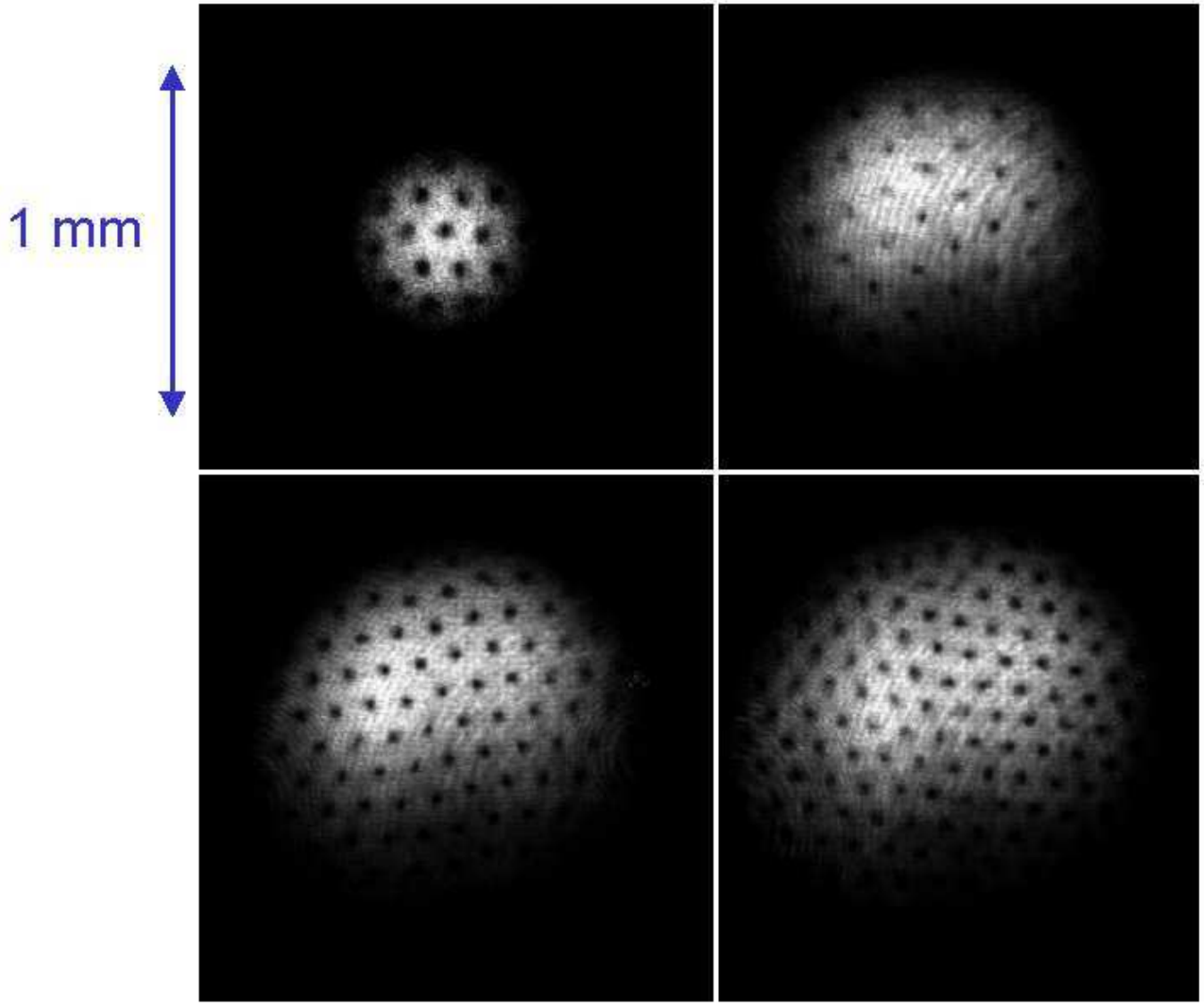
$$2\pi r = n\lambda = \frac{nh}{mv}$$

$$\Rightarrow v \cdot 2\pi r = \oint \vec{v} \cdot d\vec{s} = n\frac{h}{m}$$

Quantization: Integer number of matter waves on a circle

[Folie von W. Ketterle]

Magnification by ballistic expansion (x 20)



J. Abo-Shaeer, C. Raman, J.M. Vogels, W.Ketterle, Science, 4/20/2001

[Folie von W. Ketterle]

Die Messung optischer Frequenzen und Frequenzkämme

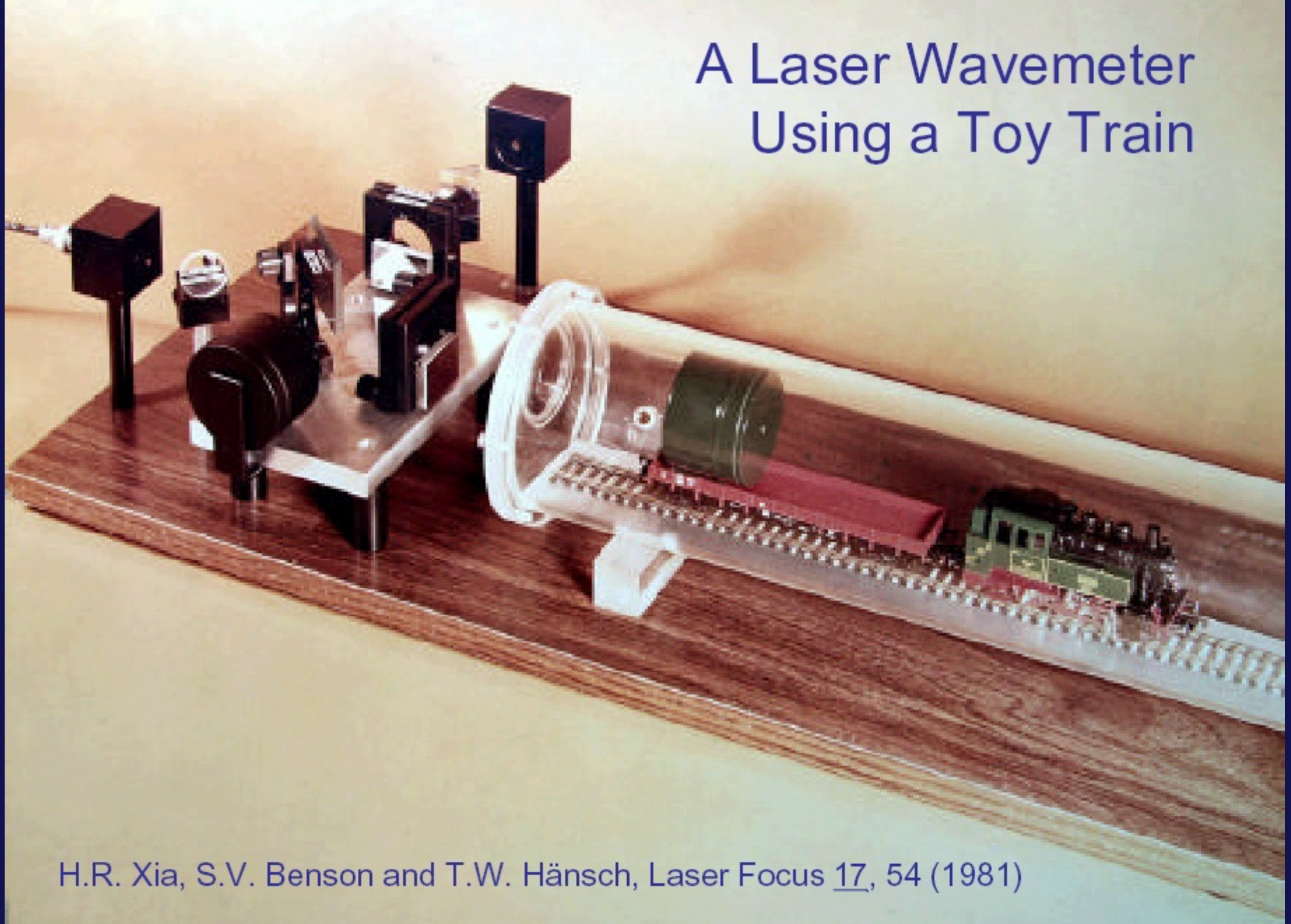
Die Wellenlänge eines Laserstrahls kann mit

Interferometern gemessen werden.

Die Genauigkeit einer solchen *Längenmessung* ist aber begrenzt.

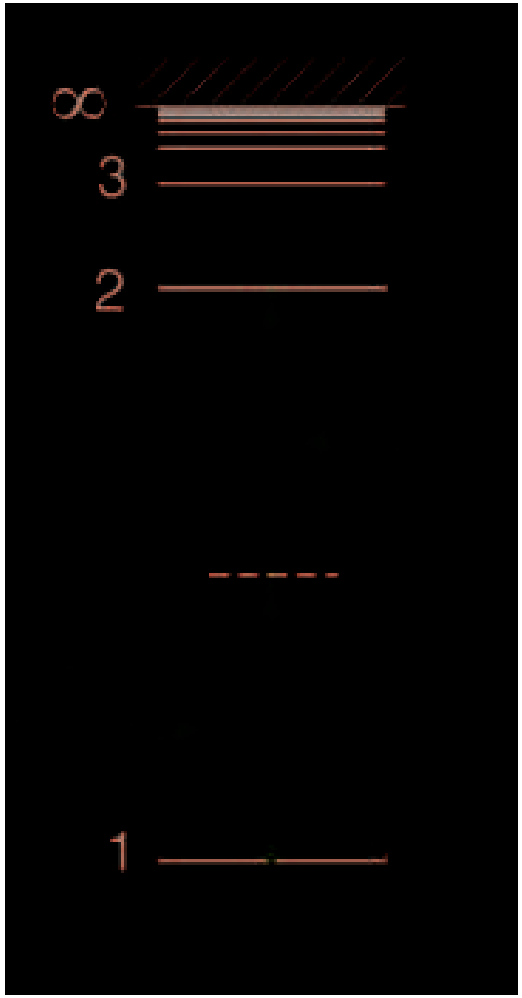
$\rightarrow$ enorme Genauigkeitssteigerung durch *Frequenzmessungen.*

A Laser Wavemeter Using a Toy Train



H.R. Xia, S.V. Benson and T.W. Hänsch, Laser Focus 17, 54 (1981)

Hydrogen 1S-2S two-photon transition

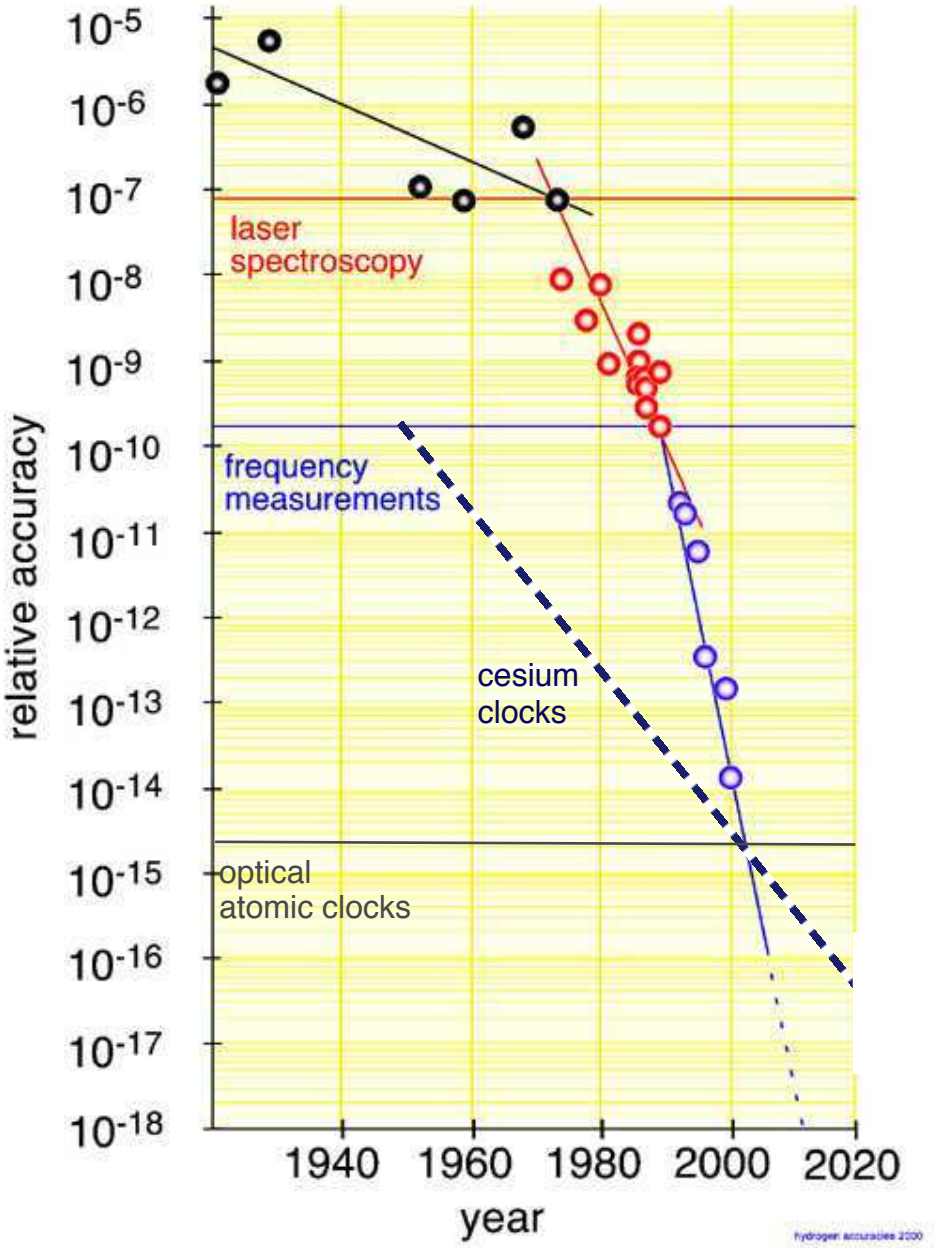


(natural line width: 1.3 Hz)

T.W. Hänsch, S.A. Lee, R. Wallenstein, and C. Wieman, Phys. Rev. Lett. **34**, 307 (1975), ...

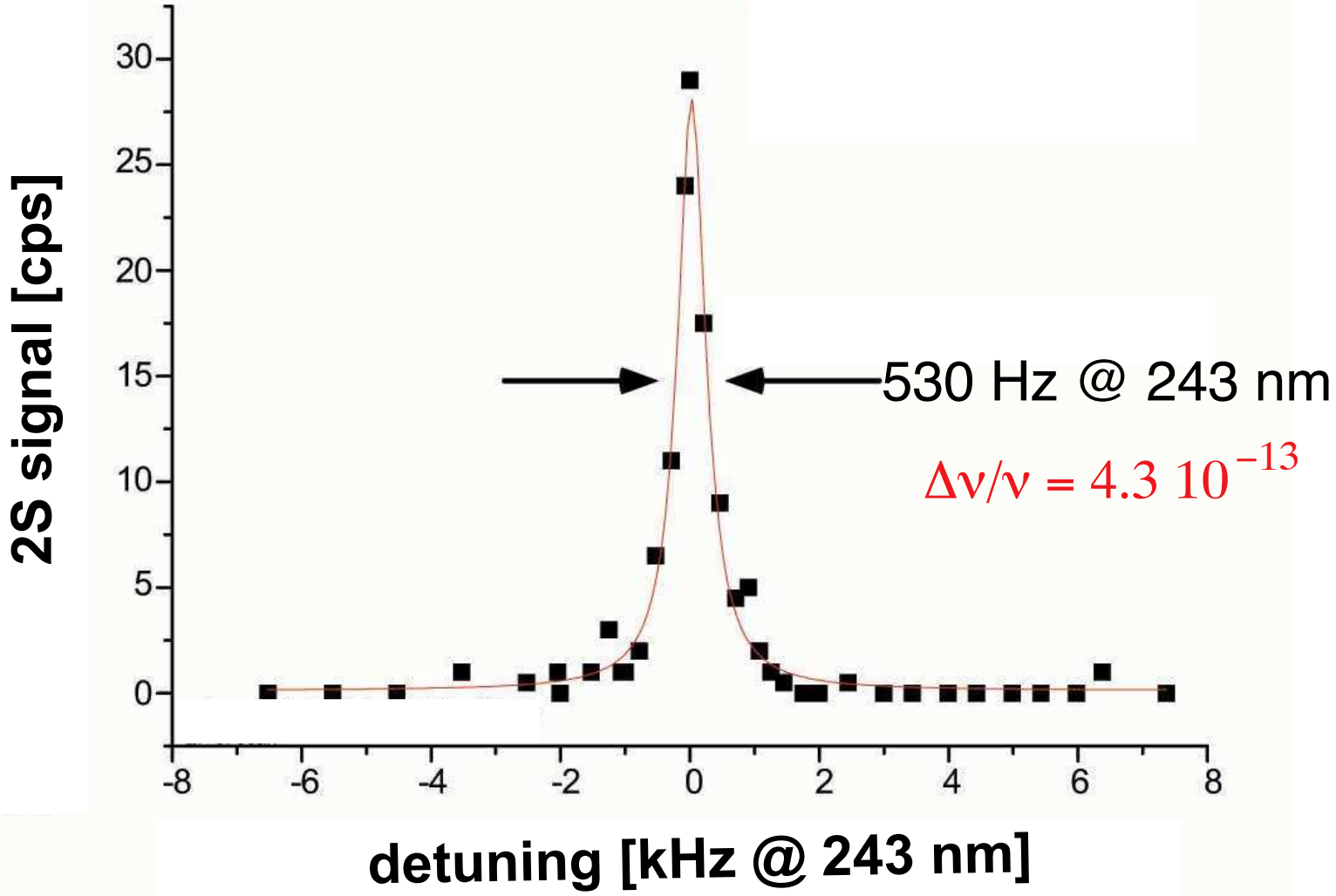
[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Optical Spectroscopy of Hydrogen



[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

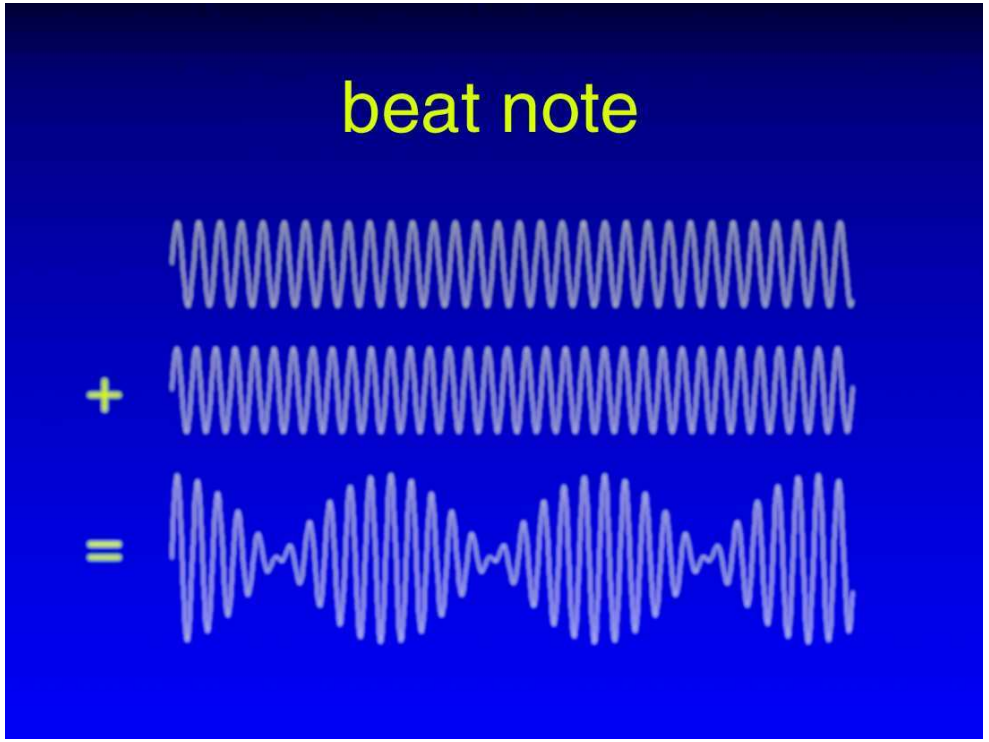
Hydrogen 1S-2S resonance



[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

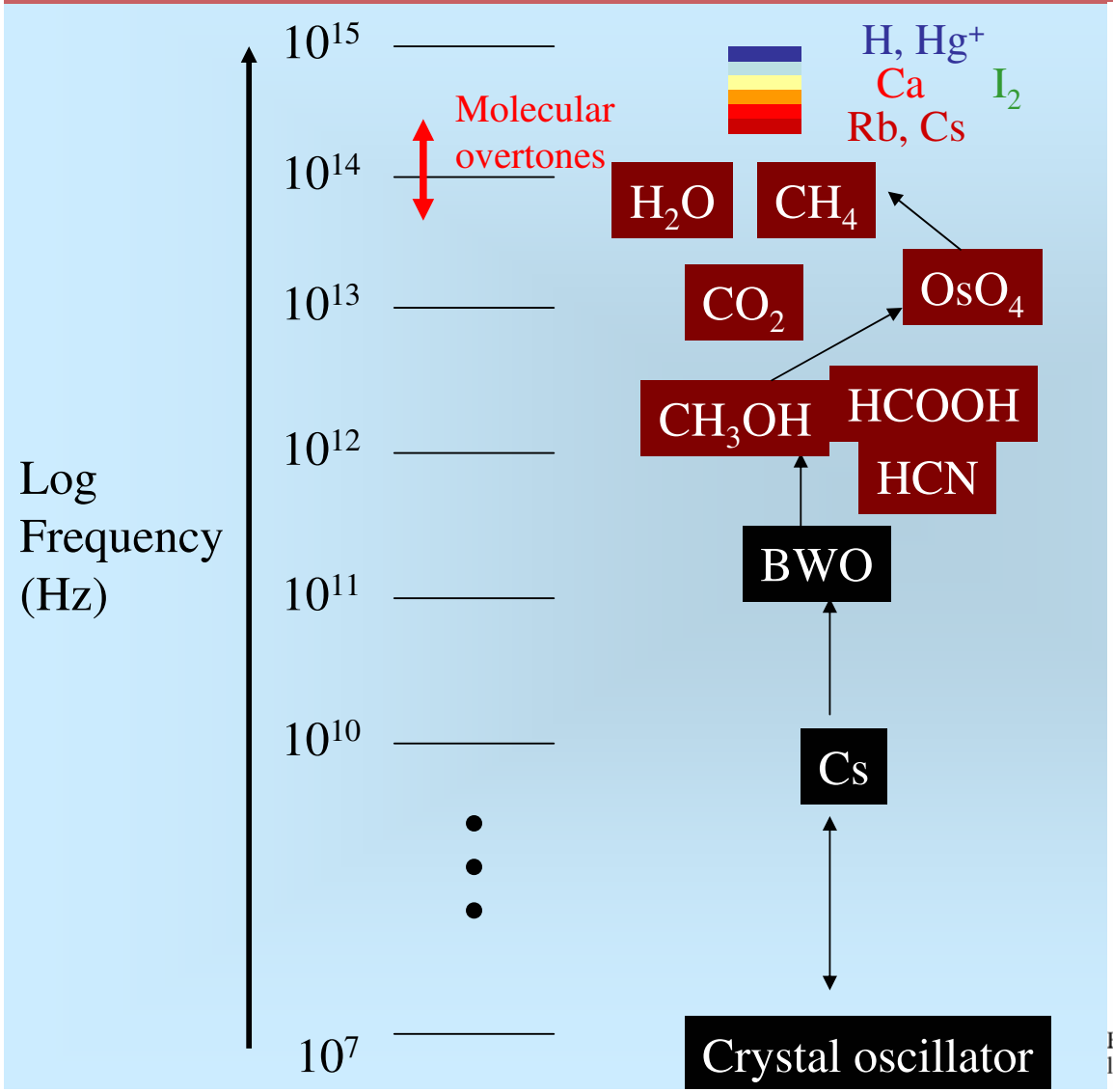
A dream... (Ali Javan, 1963)

Extend microwave
frequency counting
techniques into
the optical region.



[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Frequency spectrum in optical frequency synthesis



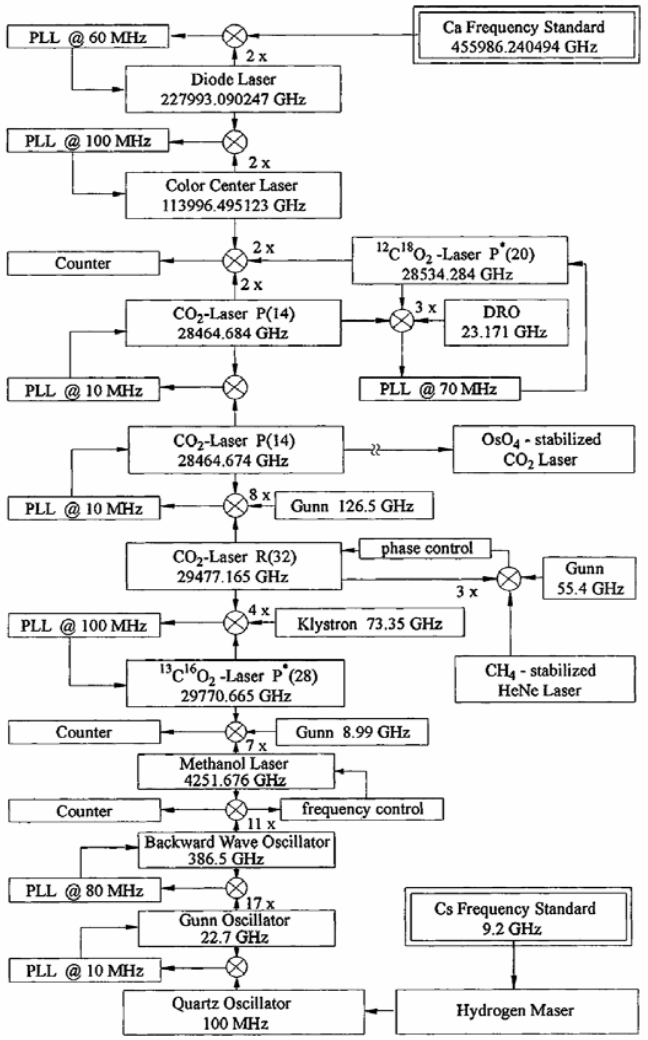


FIG. 1. PTB's frequency chain to the Ca intercombination line (PLL = phase locked loop, details are given in the text).

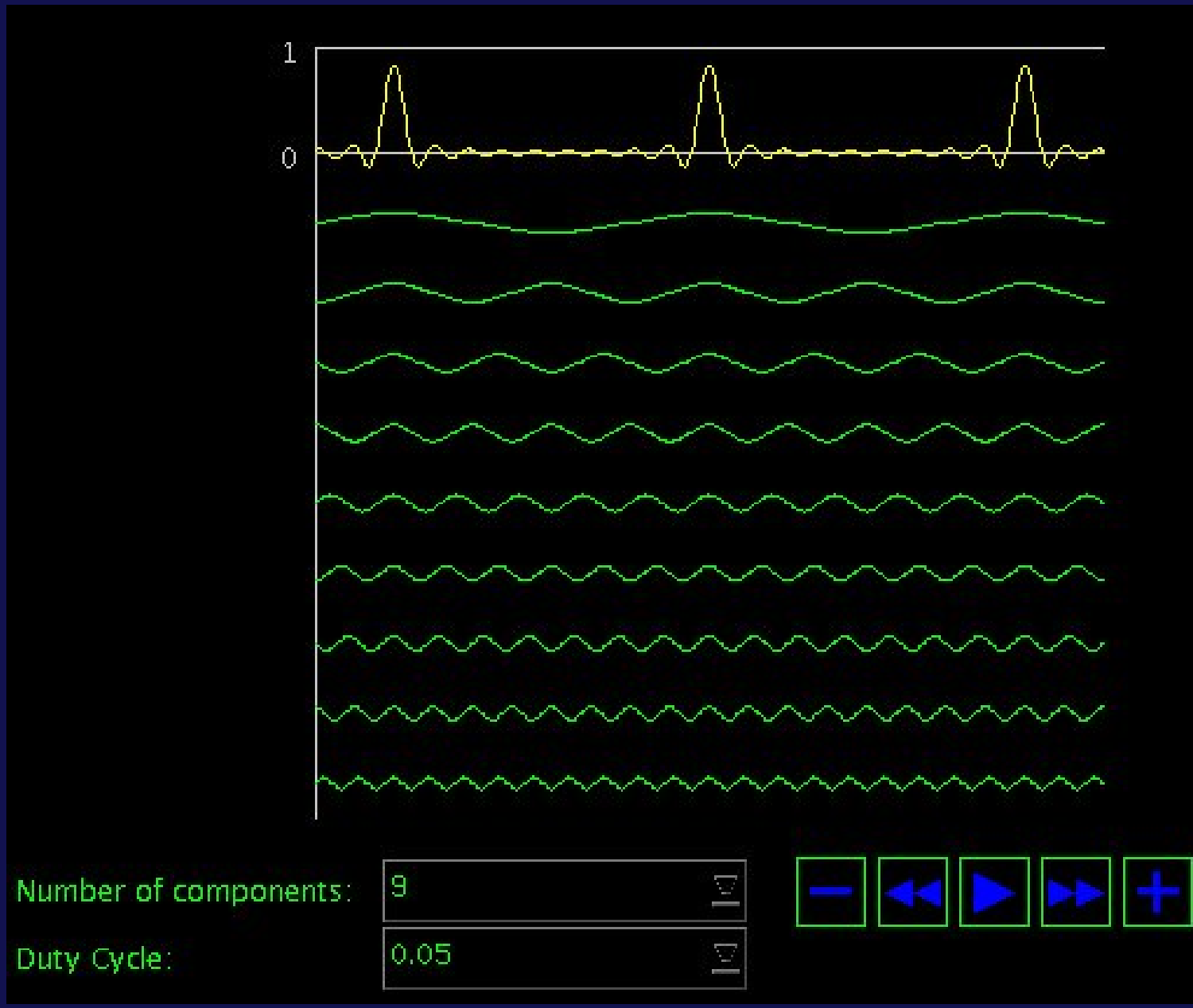
[Folie aus Nobel-Lecture von J. L. Hall]

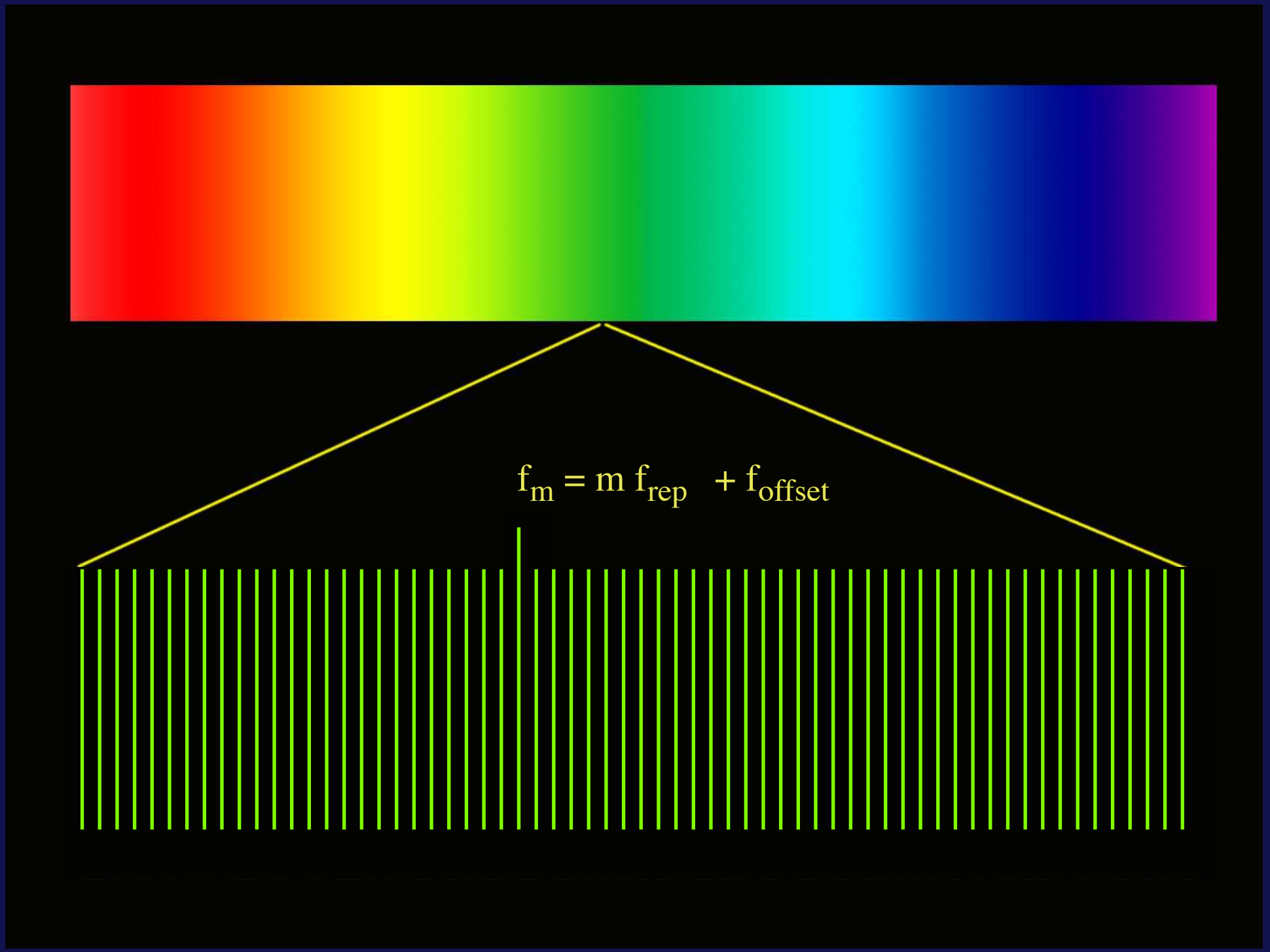
Garching frequency interval divider chain (1997)

[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

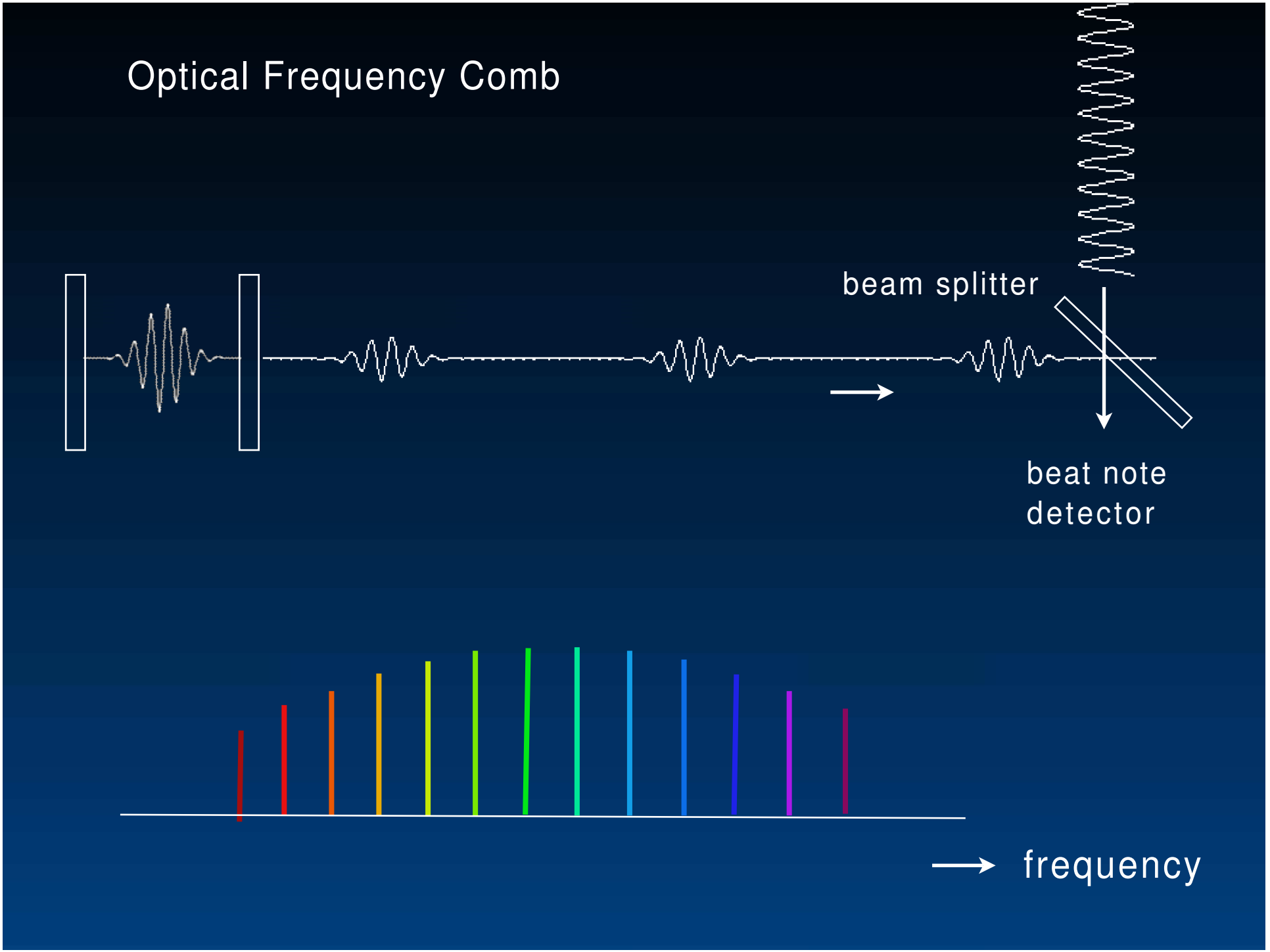
Spektrum eines Pulszugs

Das Spektrum eines Zugs aus Nadelimpulsen mit dem zeitlichem Abstand τ ist ein Frequenzkamm mit einem „Zinken-Abstand“ von $1/\tau$.





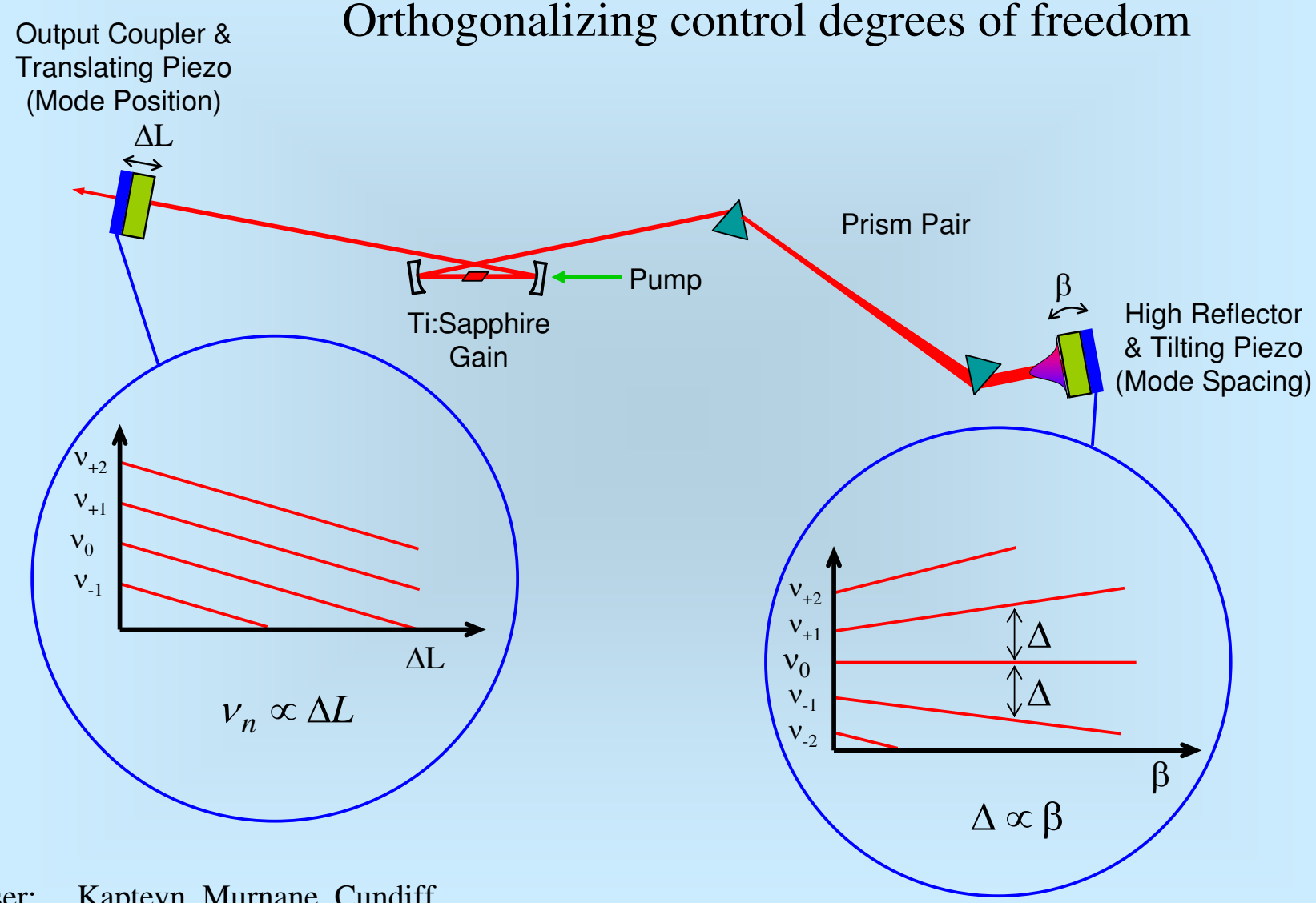
[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]



[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Phase-Controlled 10 fs Laser

Orthogonalizing control degrees of freedom

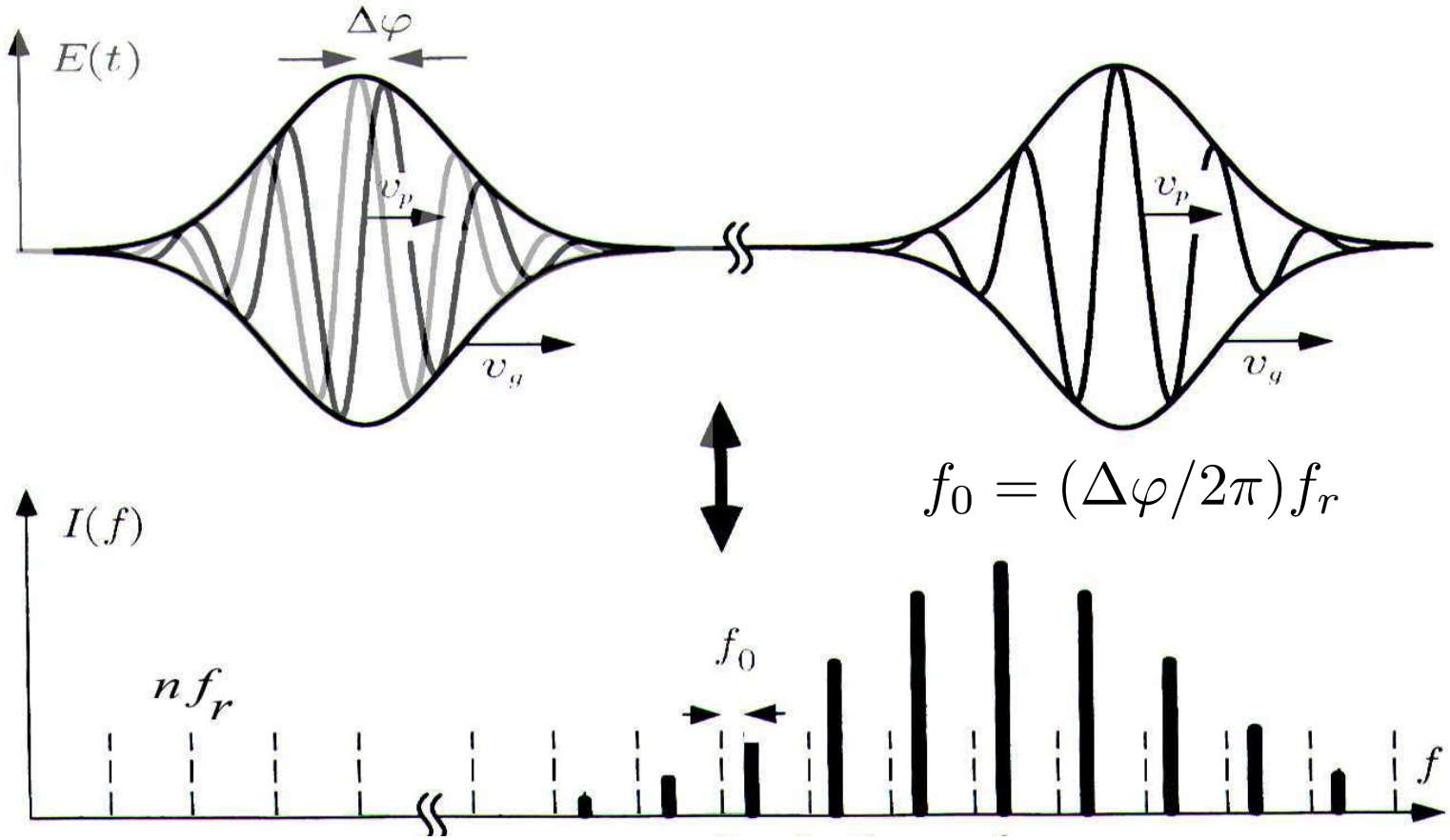


Laser: Kapteyn, Murnane, Cundiff
Control Ideas: Udem et. al., Hall, Ye

Th. Udem, et al, PRL **82**, 3568 (1999).

[Folie aus Nobel-Lecture von J. L. Hall]

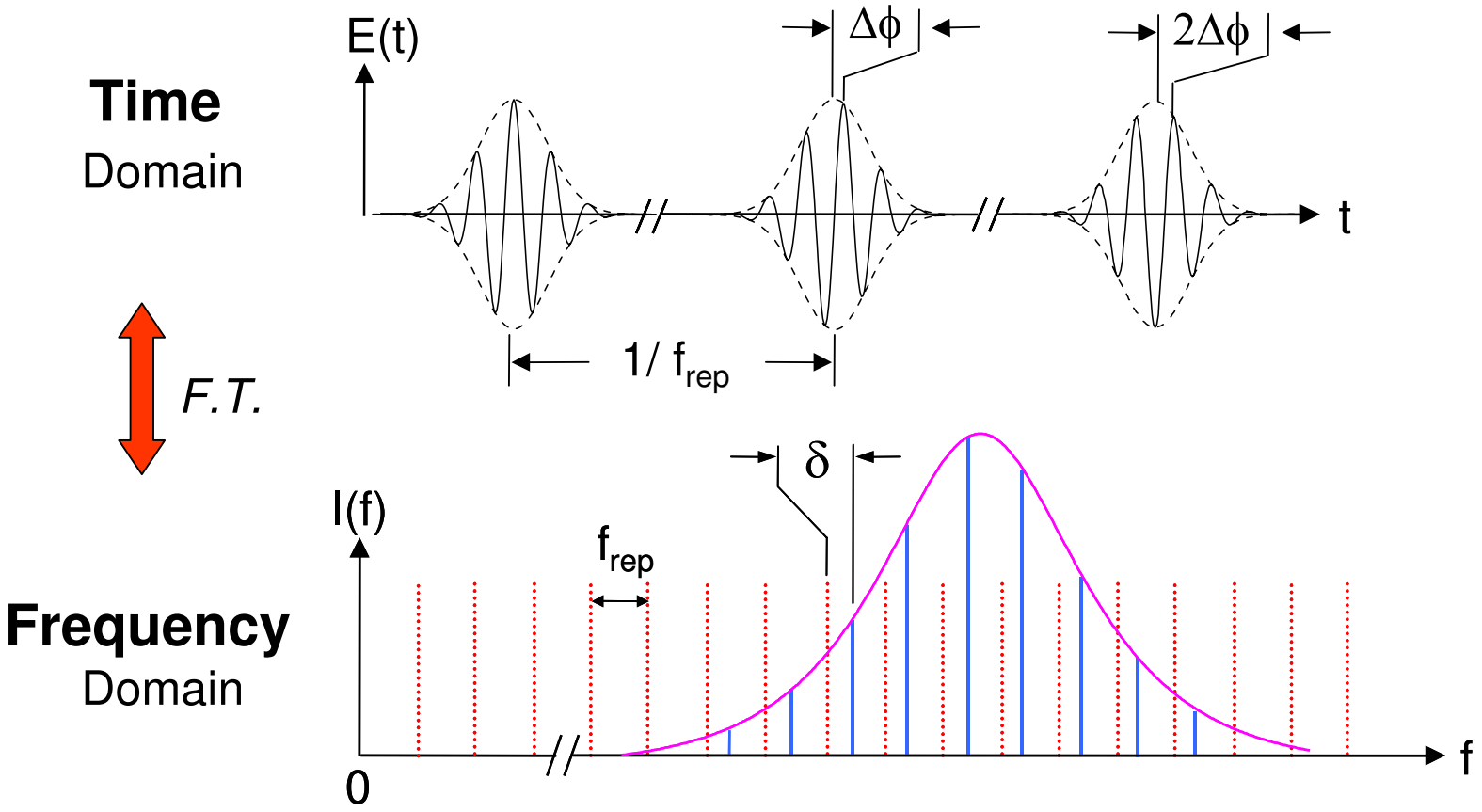
carrier-envelope phase slips and offset frequency



J.N. Eckstein, *Ph.D. Thesis*, Stanford University, 1978

[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Time Domain ⟷ Frequency Domain

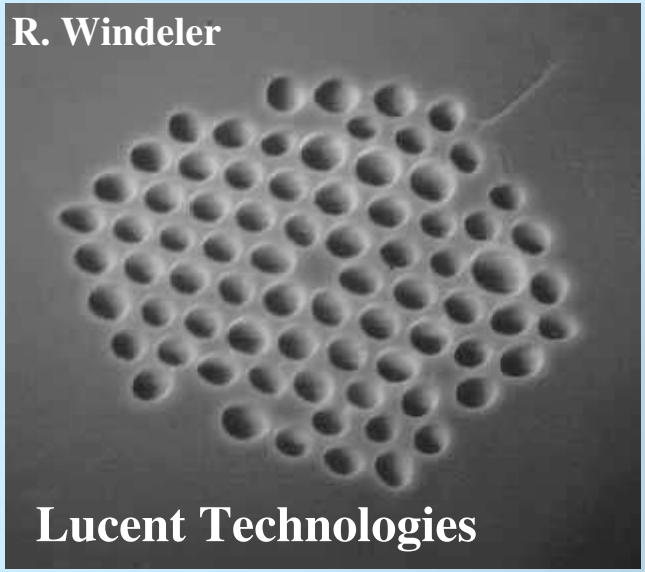


•Frequency modes of the fs pulse are offset from $f_{n=0}=0$ by δ

$$2\pi\delta = \Delta\phi \; f_{rep}$$

[Folie aus Nobel-Lecture von J. L. Hall]

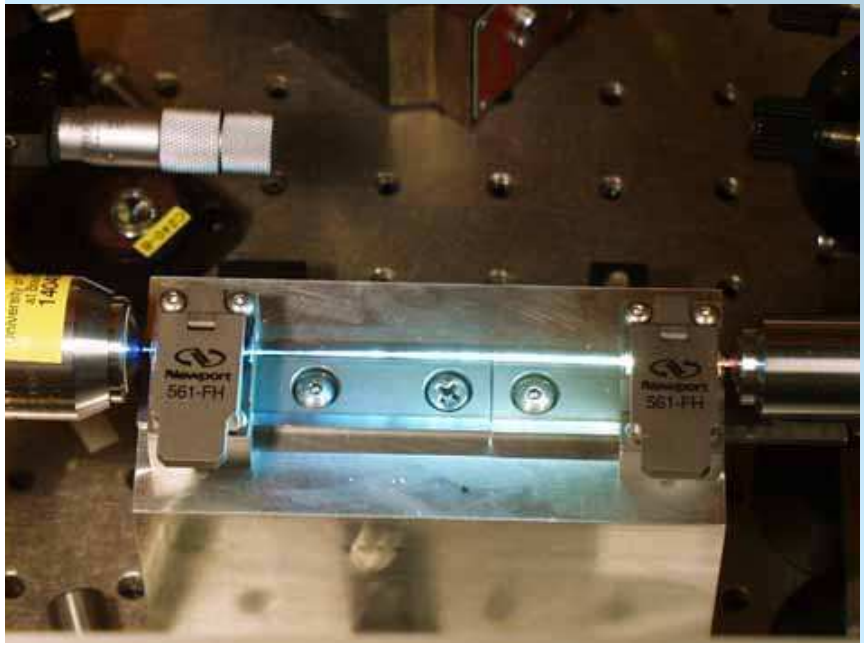
Seriously- nonlinear optics (O(20))

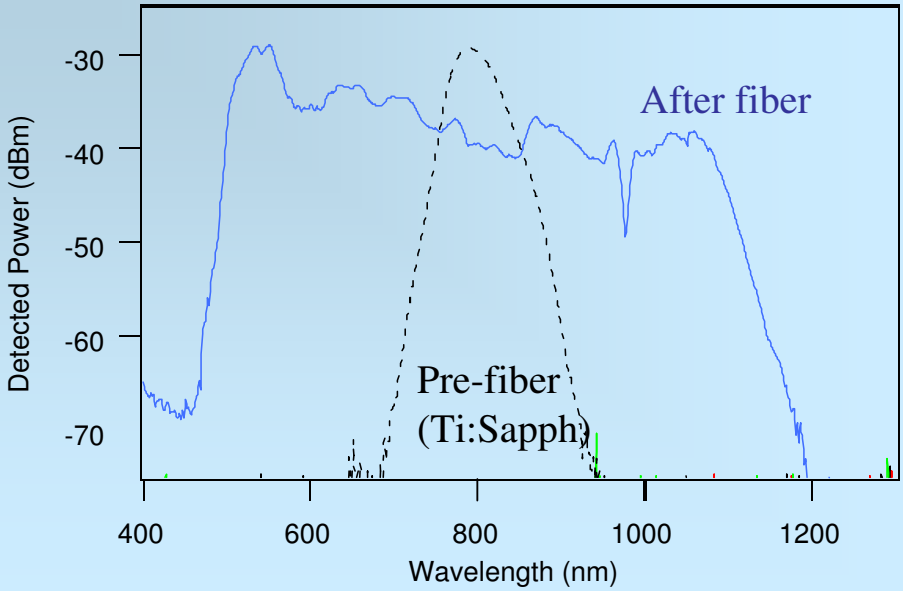


J.K Ranka, R. S. Windeler, A. Stenz, Opt. Lett. **25**, *25 (Jan. 2000)*

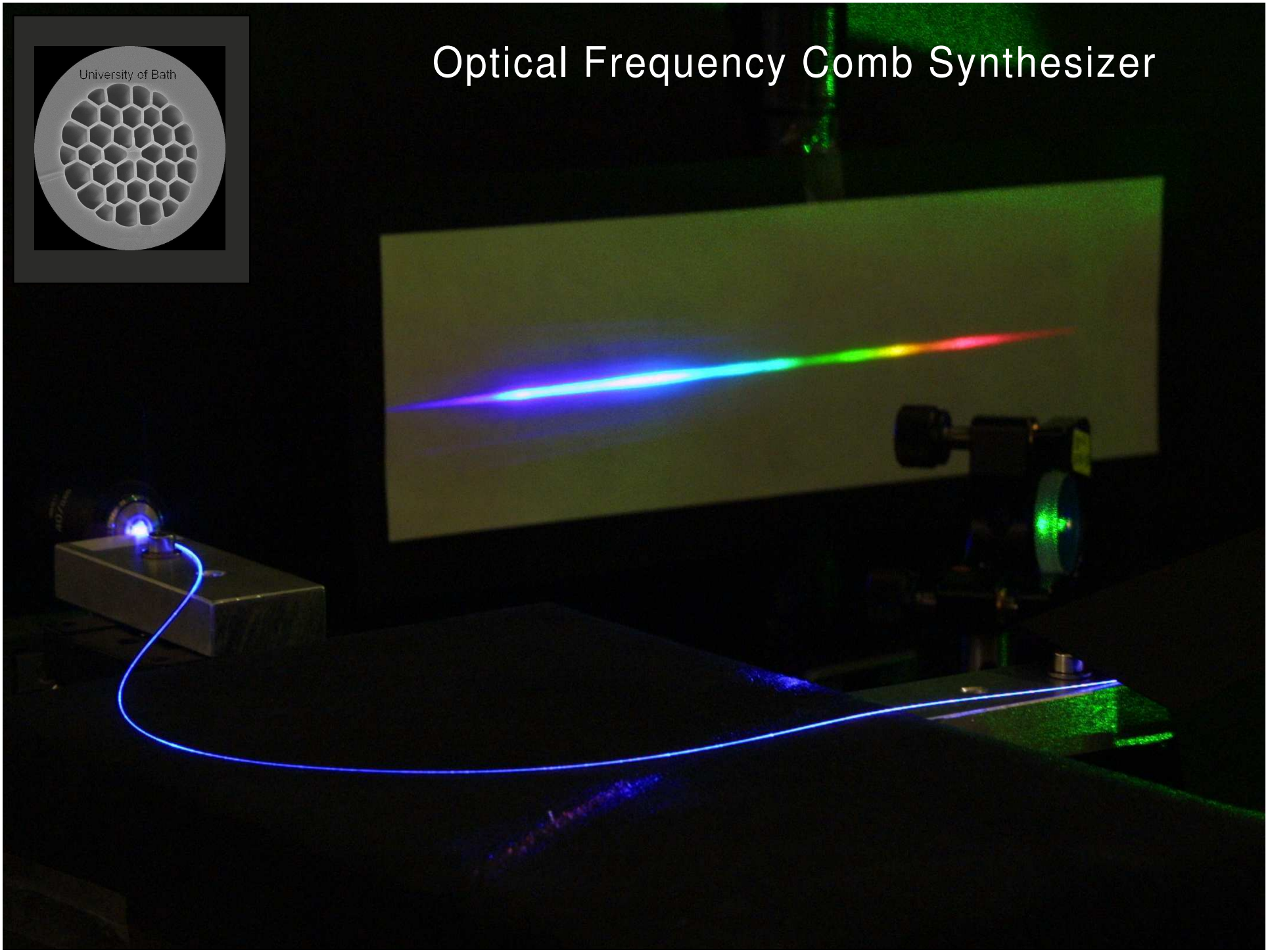
Microstructured fiber

- **dispersion zero at ~800 nm**
- **pulses do not spread**
- **continuum generation via self-phase modulation**



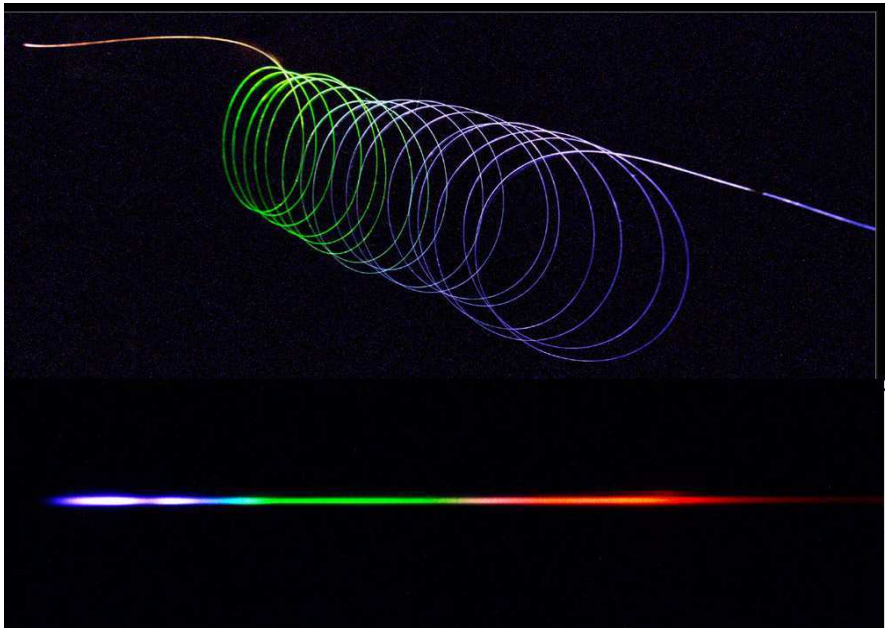


[Folie aus Nobel-Lecture von J. L. Hall]



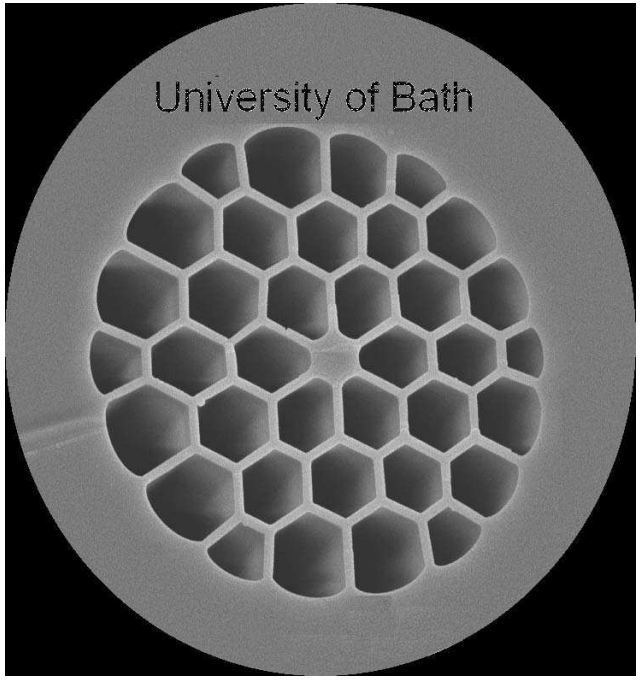
[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Octave-spanning frequency combs



„Rainbow Fiber“

(Lucent Technologies, 1999)



“Photonic Crystal Fiber”

J.C. Knight, W.J. Wadsworth, P. St. Russel
University of Bath, UK

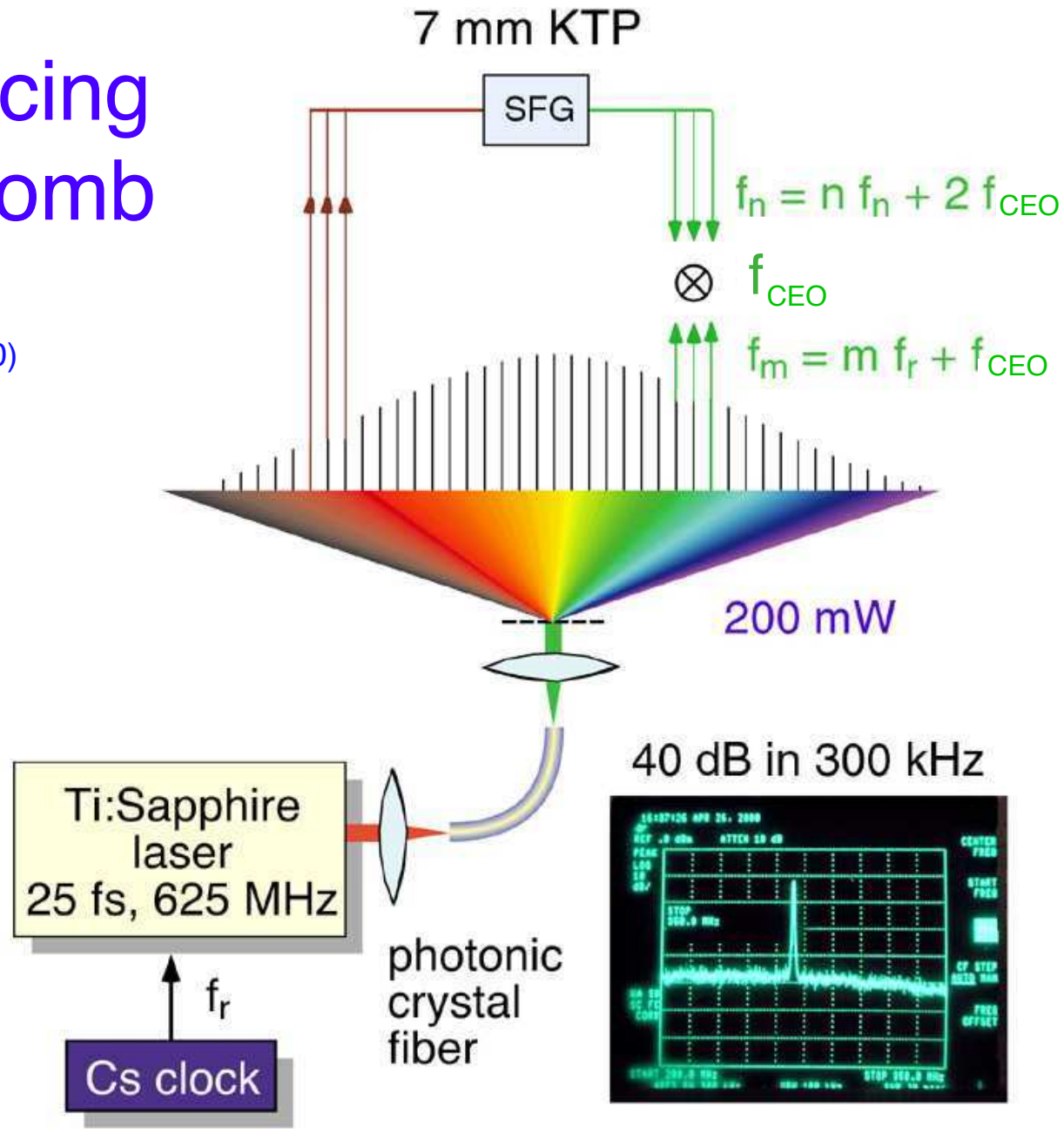
[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Self-referencing frequency comb

R. Holzwarth et al.,
Phys. Rev. Lett **85**, 2264 (2000)

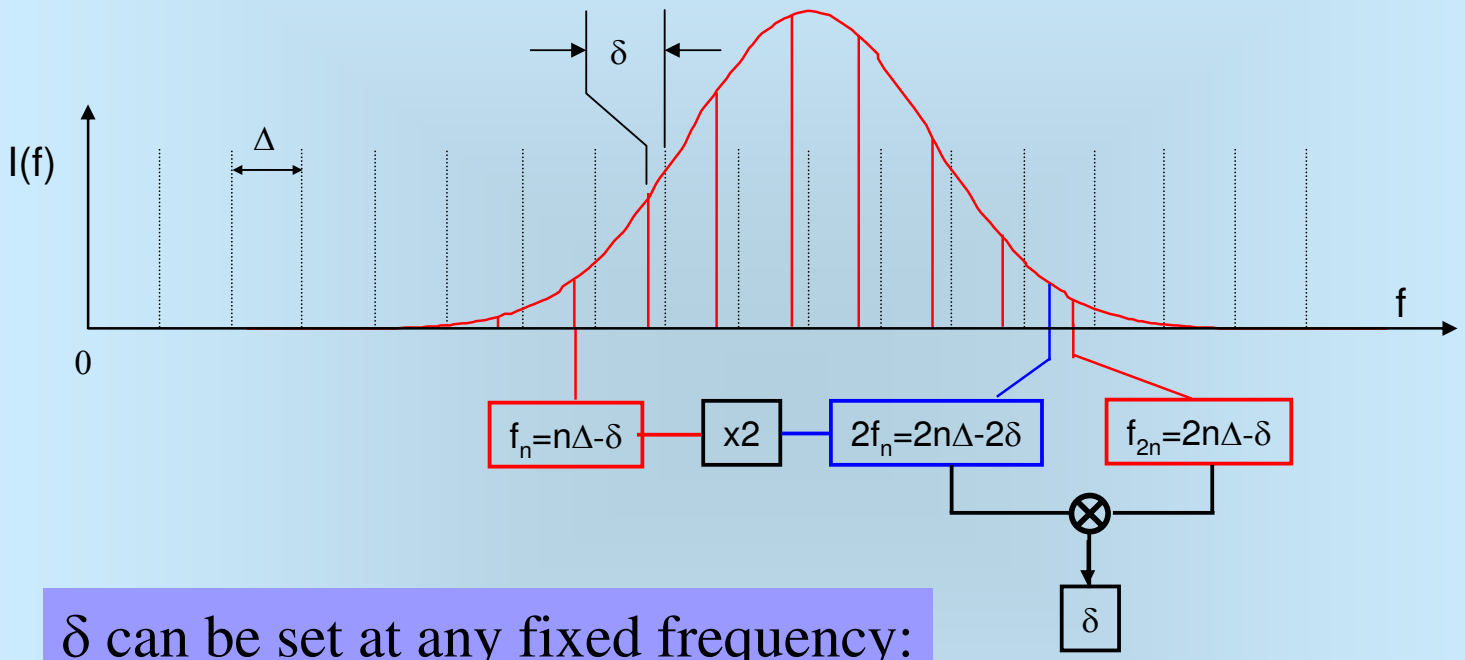
D. Jones et al.,
Science **288**, 635 (2000)

T.W. Hänsch,
Witnessed disclosure
(March 30, 1997)



[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Self-referenced Optical Frequency Synthesizer



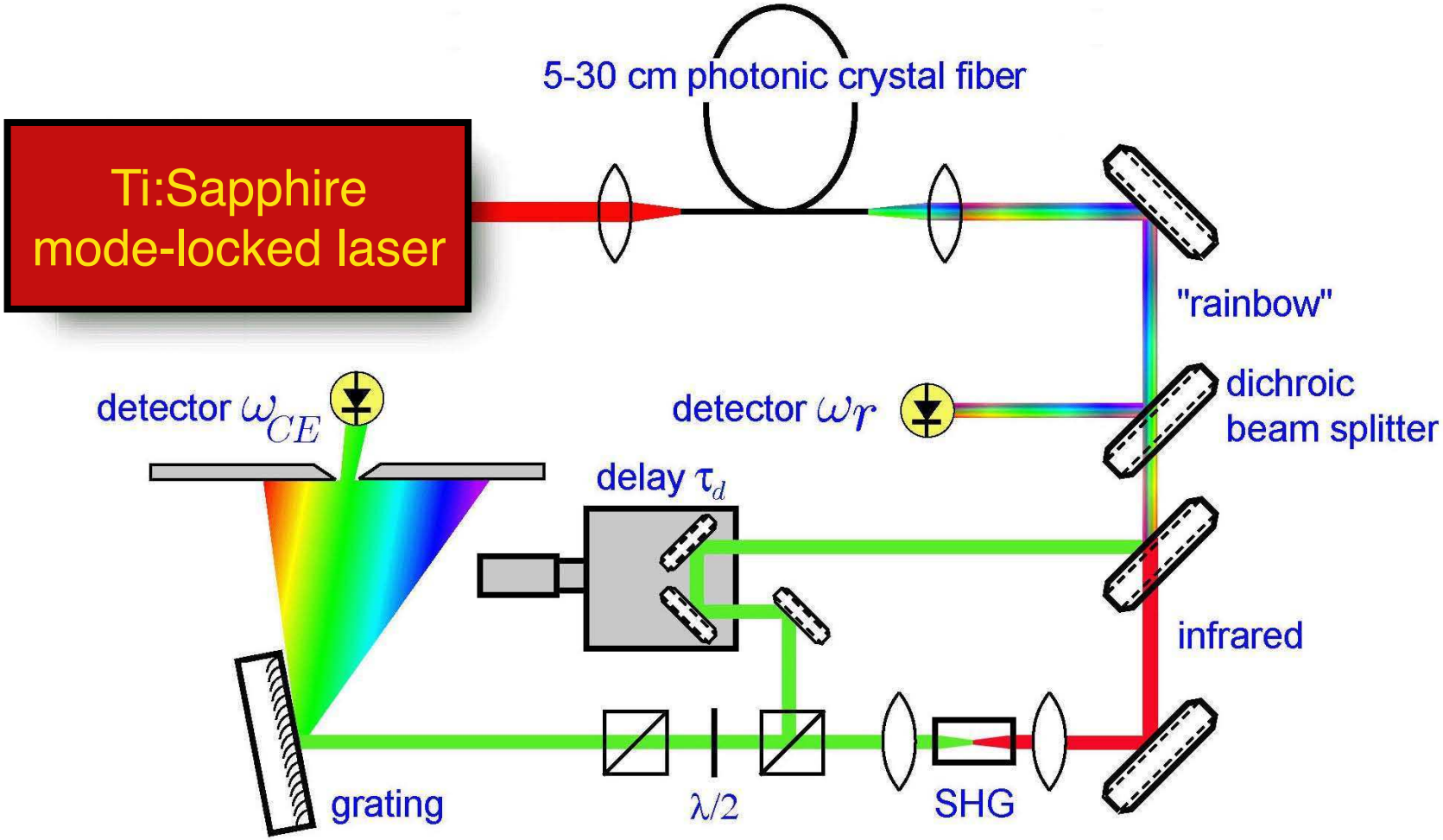
δ can be set at any fixed frequency:
For example, $\delta = 0$: $f_n = n\,\Delta$

Telle, Appl Phys B '99
Jones, Science '00

Absolute control of carrier-pulse phase: extreme nonlinear optics, precision optical waveforms

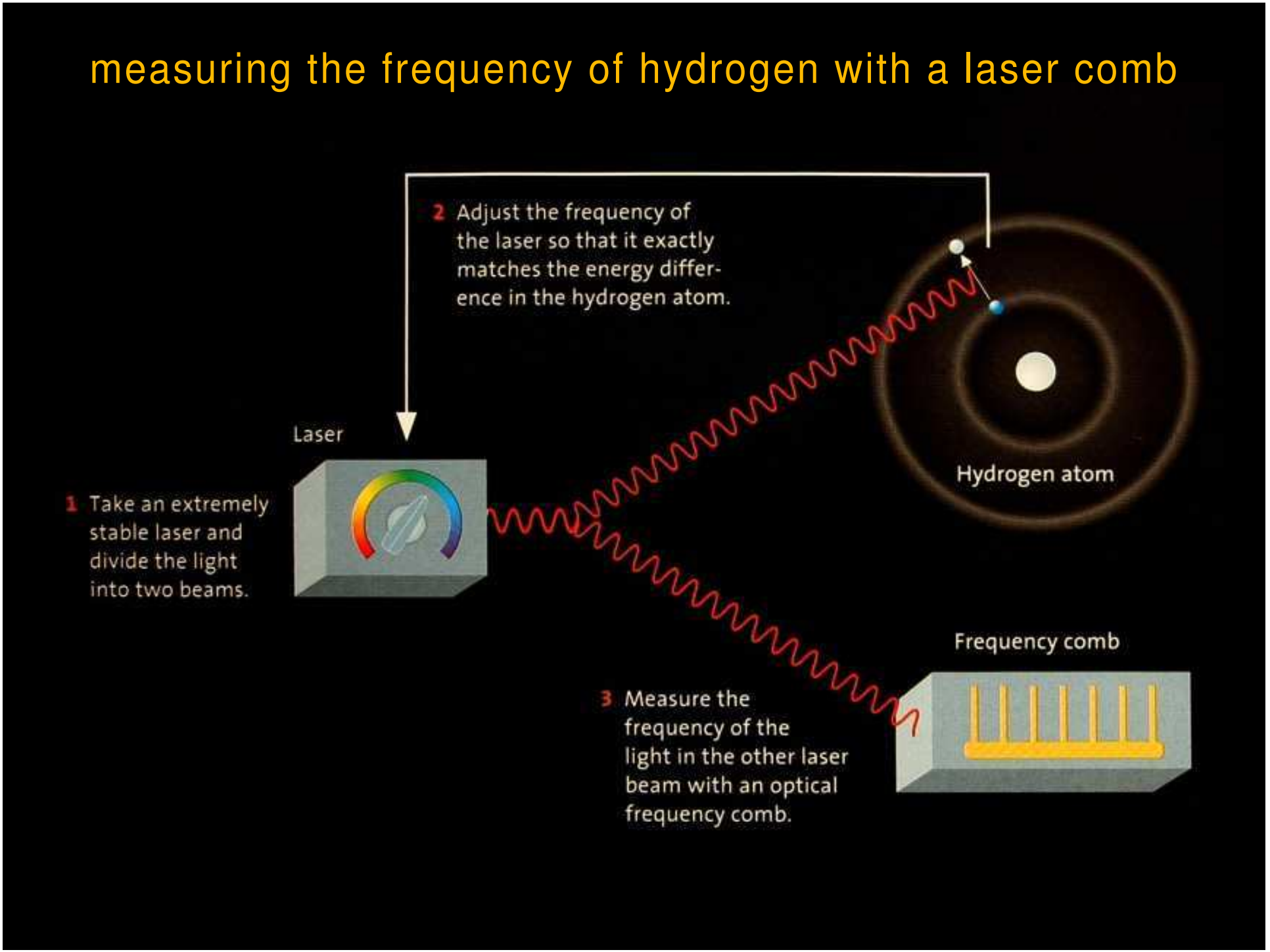
[Folie aus Nobel-Lecture von J. L. Hall]

Single-Laser Optical Frequency Comb Synthesizer



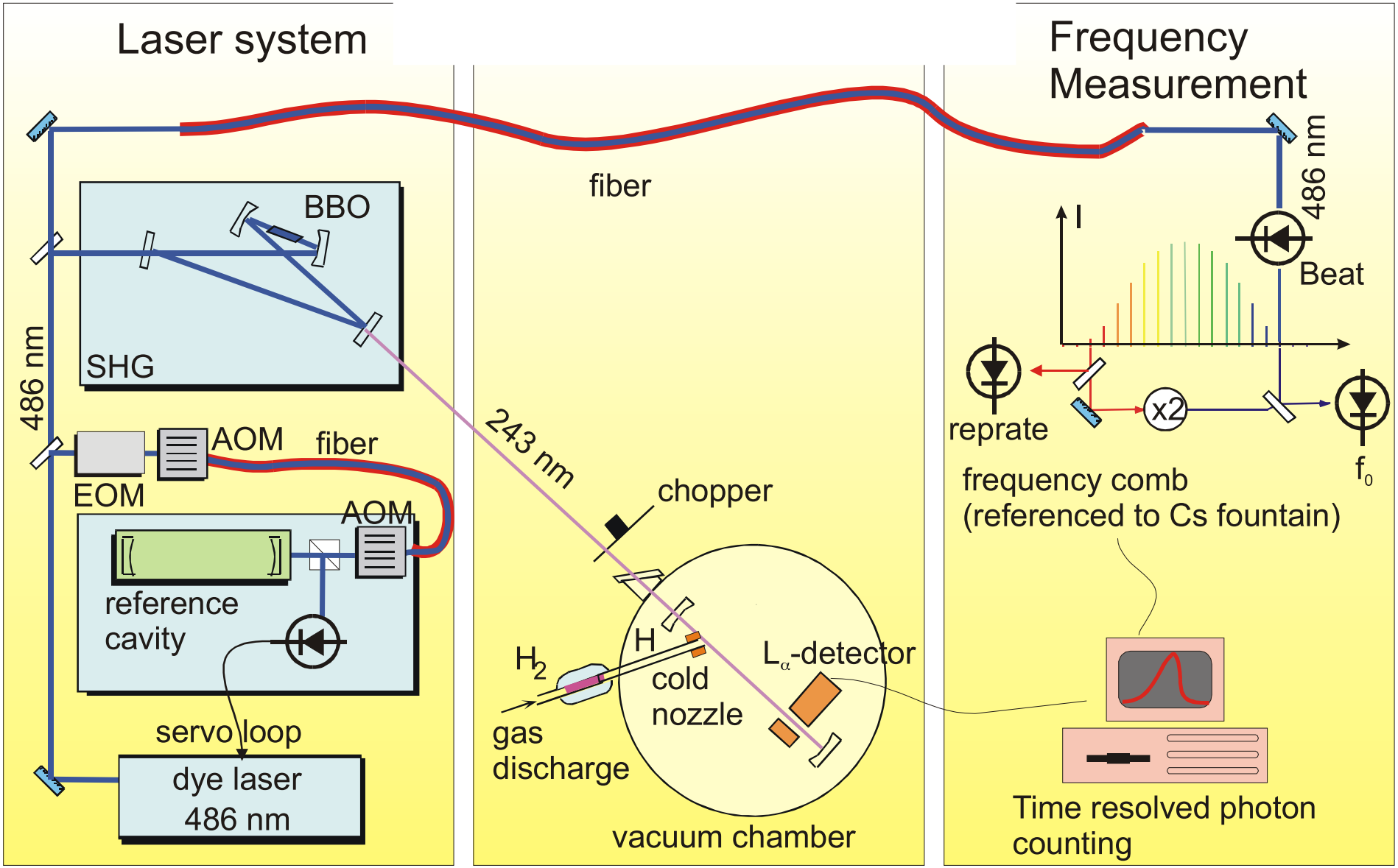
[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

measuring the frequency of hydrogen with a laser comb



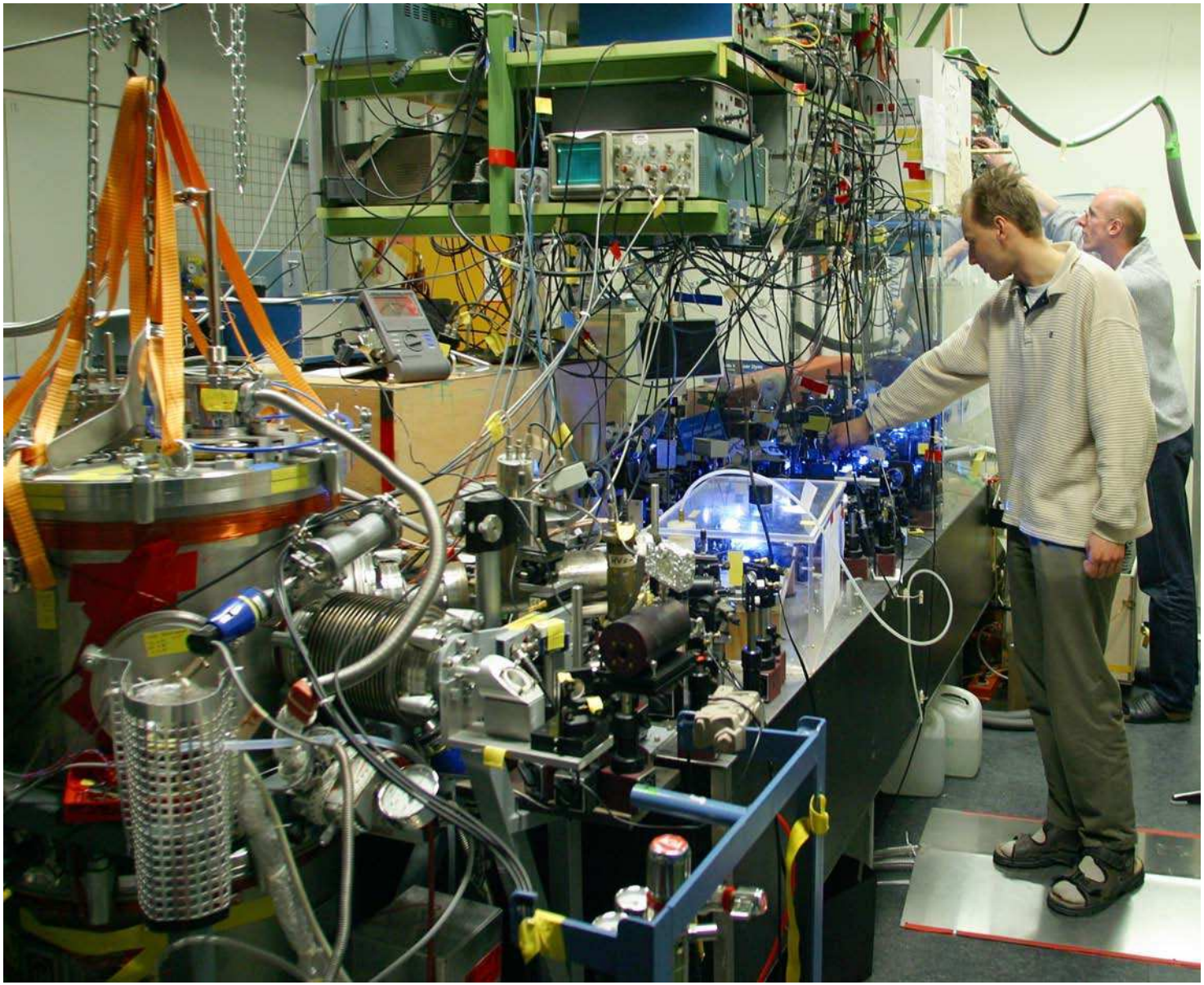
[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

2003: Hydrogen 1S-2S spectrometer



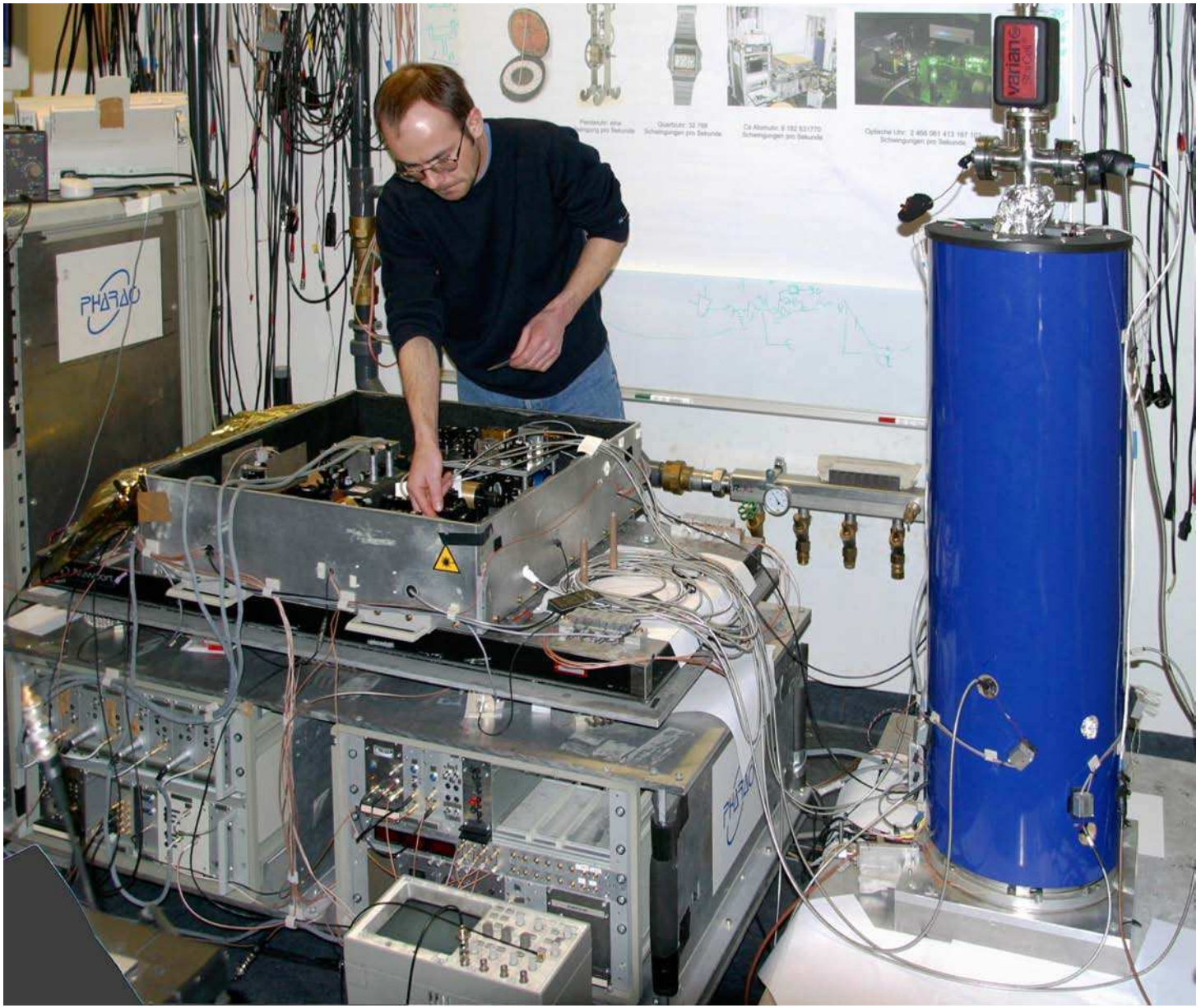
[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Hydrogen spectrometer, February 2003



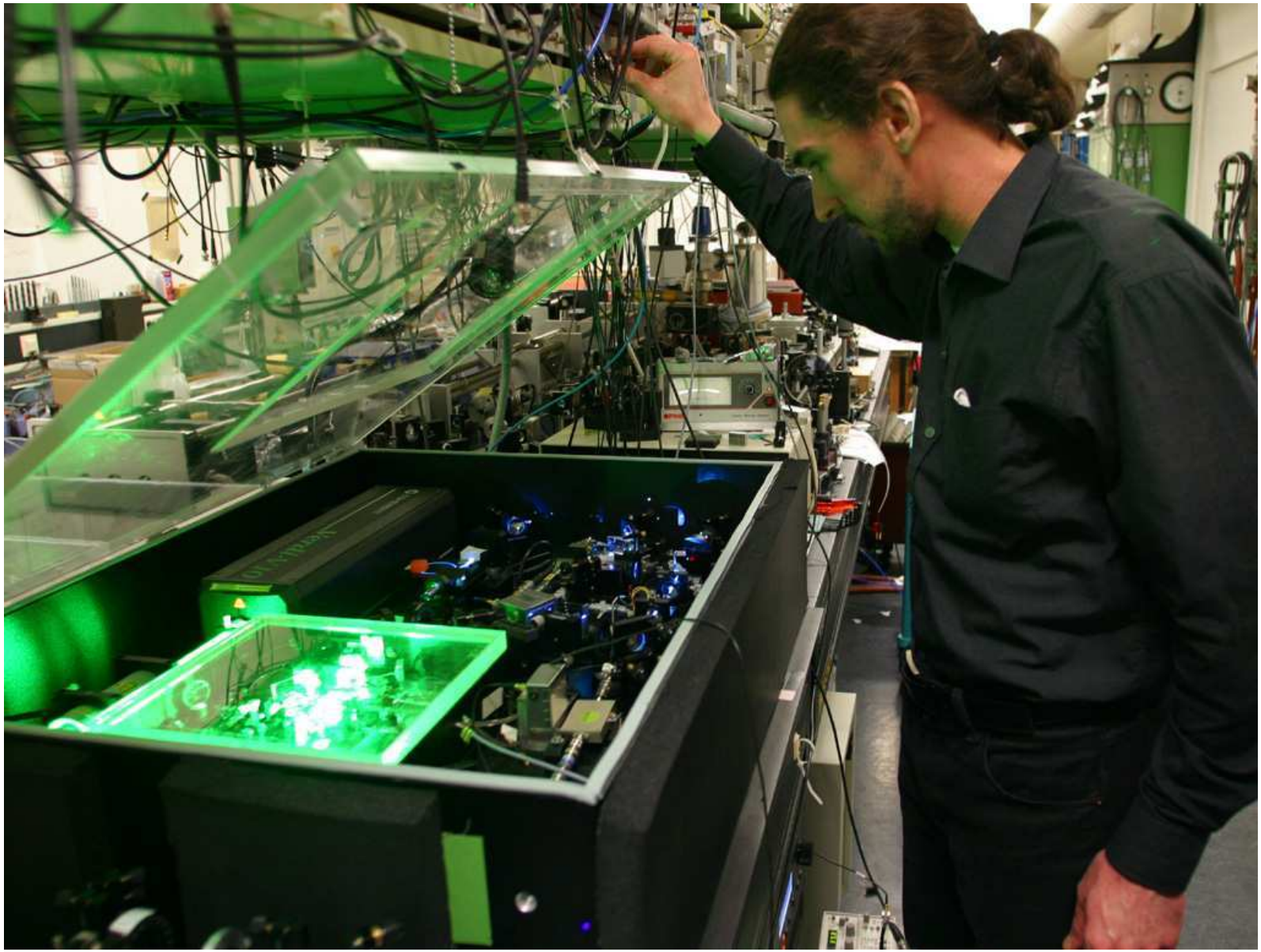
[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

PHARAO transportable cesium fountain clock



[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Frequency comb synthesizer



[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Hydrogen 1S-2S frequency

(F=1 to F'=1 hyperfine component)

Feb. 2003: f(1S-2S) = (2 466 061 102 474 851 $\pm$ 34) Hz

relative uncertainty: 1.4 x 10^{-14}

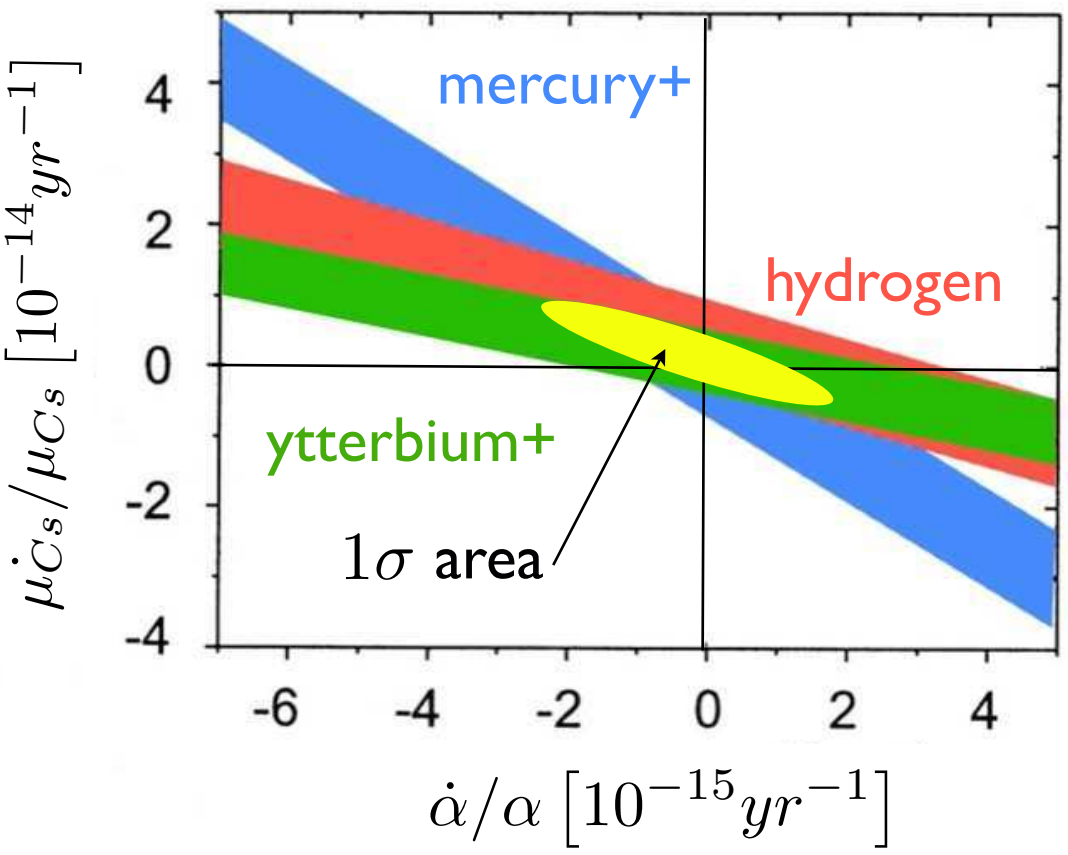
June 1999: f(1S-2S) = (2 466 061 102 474 870 $\pm$ 46) Hz

relative uncertainty: 1.9 x 10^{-14}

A difference of (-29 $\pm$ 57) Hz in 44 months equals a relative drift of the 1S-2S transition frequency of

(3.2 $\pm$ 6.3) x 10^{-15} per year

[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]



$$\dot{\alpha}/\alpha = (-0.3 \pm 2.0) \times 10^{-15} yr^{-1}$$
$$\dot{\mu_{Cs}}/\mu_{Cs} = (2.4 \pm 6.8) \times 10^{-15} yr^{-1}$$

[Folie aus Nobel-Lecture von T. W. Hänsch]

Zusammenfassung

Frequenzkämme und Quantengase:

Wechselwirkung zwischen Licht und Materie

Wie funktioniert ein Laser?

Wie können Atome mit Laserlicht gekühlt werden?

Welche Quanten-Eigenschaften haben ultrakalte Atomwolken?

Wie können optische Frequenzen gezählt werden?