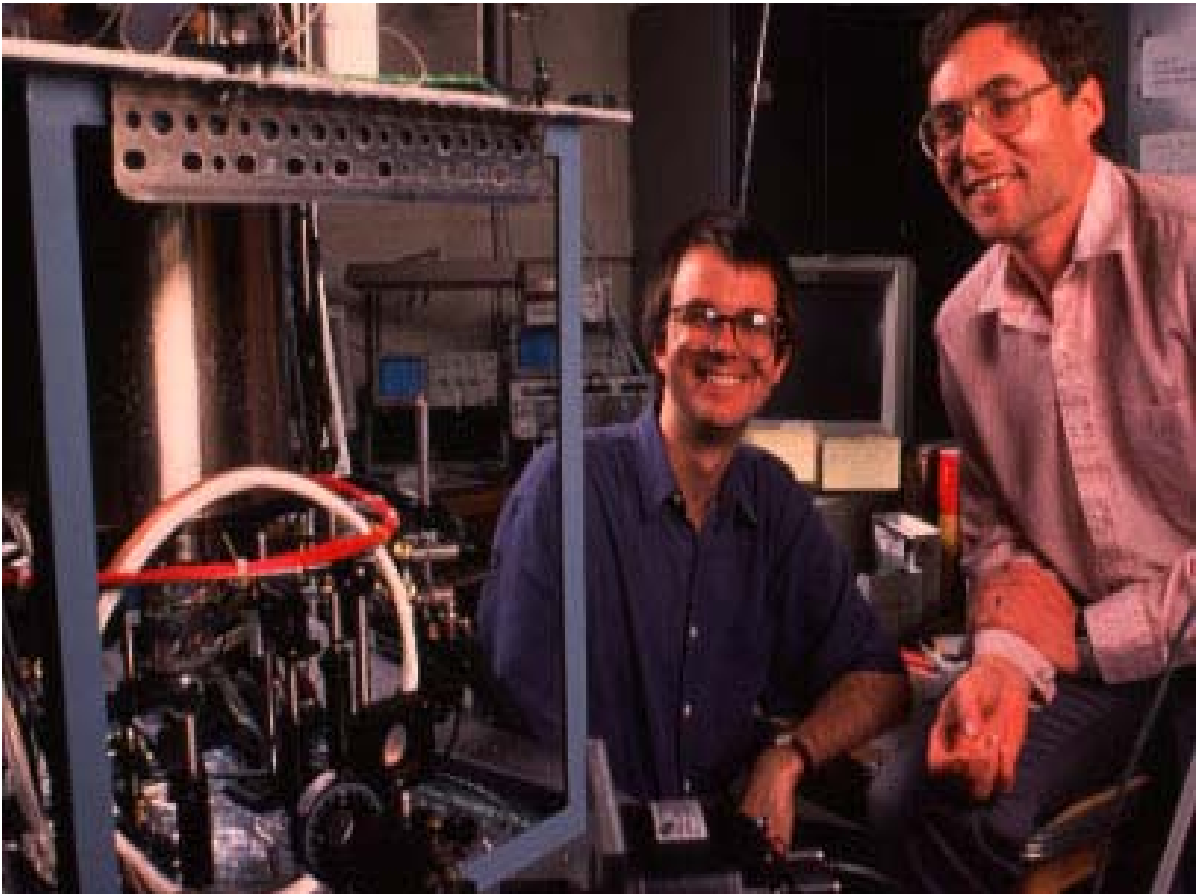
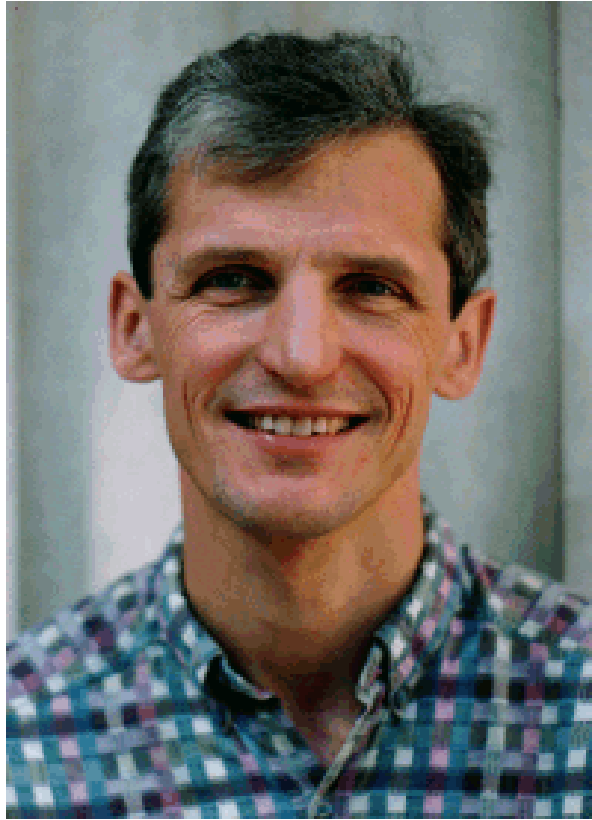


### 13. Cornell, Ketterle, Wieman und die 'Bose-Einstein-Kondensation'

Das Ende des 20. Jahrhunderts brachte den ersten experimentellen Nachweis eines schon lange vorhergesagten 'vierten Aggregatzustands' von Materie, die 'Bose-Einstein-Kondensation (BEC)'. Eric Cornell und Carl Wieman gelang es 1995 am Labor des NIST (National Institute of Standards) in Boulder, Colorado, ca. 2000 Atome von  $^{85}\text{Rb}$  in einer 'magneto-optischen Atomfalle MOT' auf eine Temperatur von etwa 20 nK abzukühlen und den vorhergesagten kohärenten Zustand aller dieser Atome nachzuweisen. Wolfgang Ketterle schaffte dasselbe kurze Zeit später am MIT (Massachusetts Institute of Technology) in Boston mit einer erheblich größeren Zahl von  $^{23}\text{Na}$ -Atomen und einer entsprechend höheren Temperatur im Mikrokkelvin-Bereich. Alle drei erhielten dafür 2001 den Nobelpreis.



Eric Cornell (\*1961), links, und Carl Wieman (\*1951) in Boulder, Colorado



Wolfgang Ketterle (\*1957)

Was ist die vorhergesagte 'Bose-Einstein-Kondensation'? Gelingt es, auf engem Raum konzentrierte **bosonenartige Atome** (mit einer **geraden Gesamtzahl aller Nukleonen und Elektronen** des Atoms) soweit abzukühlen, dass sich ihre de Broglie-Wellenlängen überlappen, dann sollte sich **eine gemeinsame, kohärente Wellenfunktion aller Atome** (alle Atome schwingen im 'Gleichtakt' und phasenstarr) herausbilden. Die quantenmechanischen Eigenschaften eines solchen Bose-Atom-Kondensats sind dann in vieler Hinsicht ähnlich zum Laser. Eine solche Atomkonfiguration wäre also ein **'Atomlaser'**, falls man damit etwas 'anfängt' (Streuung, Beugung...).

### 13.1 **'Kühlung'** von Atomen in einer **'Falle'** auf tiefste Temperaturen

Die Vorarbeit zur Entdeckung der Bose-Einstein-Kondensation erstreckte sich über viele Jahrzehnte. Sie bestand vor allem darin, **Techniken** zu entwickeln, um neutrale Atome in einer **'Atomfalle'** einzufangen, dort **festzuhalten** und auf **tiefste Temperaturen** (kleinste kinetische Energie) **'abzukühlen'**. Diese Techniken sind mit den Namen **Wolfgang Paul, Claude Cohen-Tannoudji, Steven Chu** und **William Phillips** engstens verbunden.



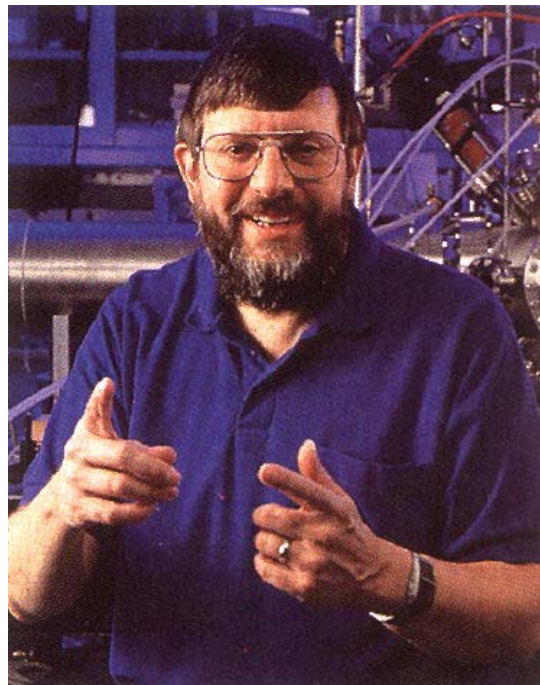
Wolfgang Paul, 1913 - 1993, Bonn, Nobelpreis 1989



Claude Cohen-Tannoudji, \*1933, Paris, Nobelpreis 1997

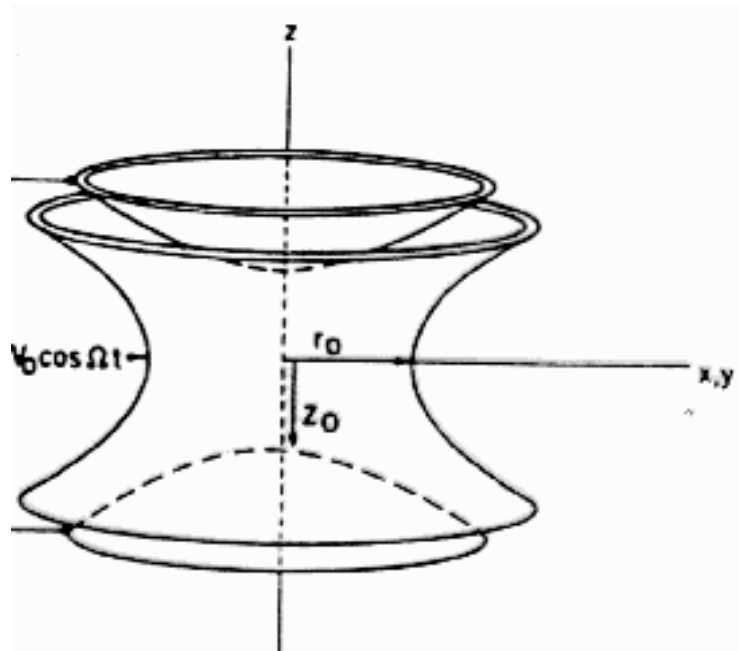


Steven Chu, \*1948, Nobelpreis 1997

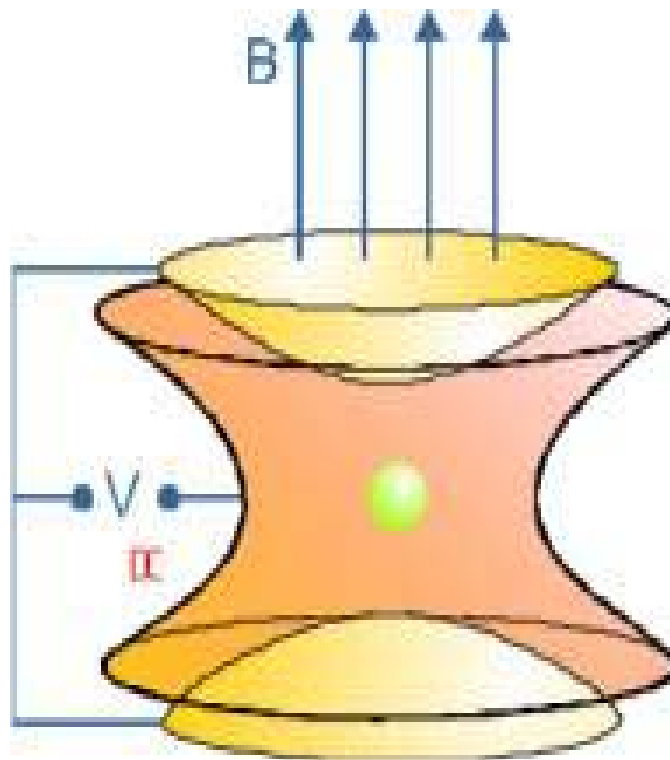


William Phillips, \*1948, Nobelpreis 1997

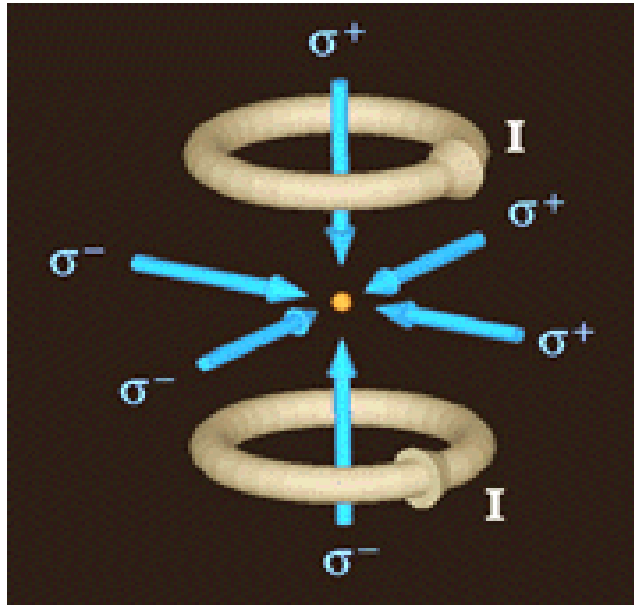
**Wolfgang Paul** hatte in Bonn viele Jahre seines Lebens damit verbracht, **'Fallen'** für **geladene und neutrale** Atome bzw. Elementarteilchen zu entwickeln. Die Grundidee dabei war, die Teilchen durch geschickt gewählte elektrische und magnetische Felder (konstant oder zeitabhängig) am 'Ausbrechen' zu hindern. Sein wichtigstes Ergebnis war die **'Paul-Falle'** für **Ionen** und **für Neutronen**.



'Paul-Falle' für Ionen (positiv geladen). An der oberen und unteren Elektrode (z-Richtung) sorgt eine **konstante positive Spannung** für Einschluss; an den hyperbolischen Seitenelektroden ein **hochfrequentes Wechselfeld**.



In der 'Penning-Falle' sorgt ein starkes **Magnetfeld B** für radialen Einschluss; obere und untere Elektrode haben **positive Gleichspannung** (für positiv geladene Teilchen).



Die '**magneto-optische Falle**' (MOT) für **neutrale Atome** wurde von Chu, Phillips und Cohen-Tannoudji entwickelt und erzielte immer neue 'Weltrekorde' in **tiefen Temperaturen**

Diese Falle beruht i.w. auf einem **inhomogenen Magnetfeld** (zur Zeeman-Aufspaltung atomarer Energieniveaus) und einer genialen Idee, der '**Laserkühlung**' (erstmalig von Ted Haensch vorgeschlagen).

Die Grundlage der Laserkühlung ist folgende Überlegung: Kann ein Photon eines Laserstrahls mit einer Energie  $E_0$  (in seinem Ruhesystem) von einem gebundenen Elektron **resonant absorbiert** werden, erhält das Elektron (bzw. das Atom) einen **Impulsübertrag  $\Delta p = \text{Energie}/c$  in Richtung des Laserstrahls**. Wenn das Atom aber mit der **Geschwindigkeit  $v$**  dem Laserstrahl entgegenläuft, ist die **Energie  $E'$  des Photons**, die das Elektron 'sieht', **dopplerverschoben** mit (in linearer Näherung):

$$E' = E_0 (1 + v/c) \quad (13.1)$$

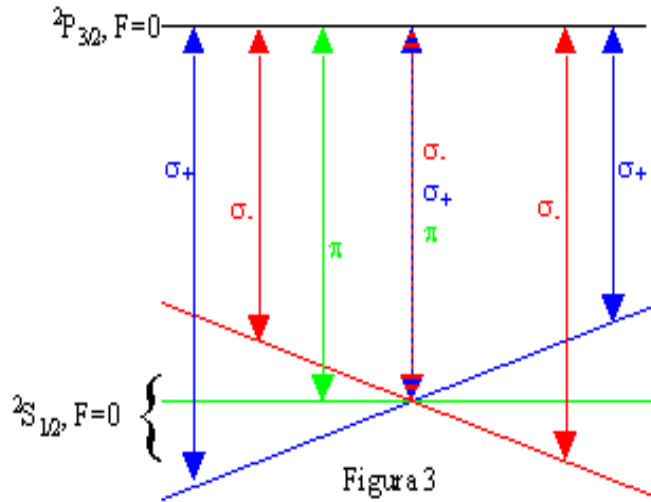
In einer Falle mit einem **inhomogenen Magnetfeld  $B(r)$** , das im Zentrum = 0 ist, ergibt sich durch die Zeemanaufspaltung die zusätzliche Energie  $E_z$ :

$$E_z = - m_J g_e \mu_B B(r) \quad (13.2)$$

( $m_J$  = magnetische Quantenzahl des Elektrons,  $\mu_B$  = 'Bohrsches Magneton'). Es gibt daher für einen breiten Bereich von Geschwindigkeiten  $v$  einen **ganz bestimmten Abstand**, an dem das Elektron ein Photon resonant absorbieren kann. Jetzt nimmt man 6 zirkular polarisierte Laserstrahlen ( $\sigma^{+, -}$ ); die gegen die Richtung der Laser laufenden Atome können dann im Abstand  $r$  resonant ein Photon absorbieren ( $\Delta m = +1$ ) und erhalten einen **Rückstoß zum Zentrum**, falls:

$$\Delta E \text{ (ohne Feld)} + g_e \mu_B B(r) = E_0 (1 + v/c) \quad (13.3)$$

Die **Re-emission** des absorbierten Photons erfolgt **isotrop**, sodass in der Gesamtbilanz ein **Impulsübertrag in Richtung des Laserstrahls** übrigbleibt!



Wir betrachten obiges Niveau-Schema zusammen mit dem vorletzten Bild; für ein Atom, das nach links läuft (= im vorletzten Bild nach 'oben'), nimmt die Übergangsenergie für die **Absorption eines  $\sigma^+$**  ('rechtszirkularen',  $m = +1$ ) Photons linear mit dem Abstand vom Zentrum zu; die **Absorption eines  $\sigma^+$ -Quants** kann Übergänge von

$${}^2S_{1/2}, m = -1/2 \rightarrow {}^2P_{3/2}, m = +1/2$$

bzw. 
$${}^2S_{1/2}, m = +1/2 \rightarrow {}^2P_{3/2}, m = +3/2 \quad (13.4)$$

erzeugen. **Je größer die Geschwindigkeit  $v$  des Atoms gegen die Richtung des  $\sigma^+$  Photons ist, desto weiter 'außen' erfolgt die Resonanzabsorption** (zunehmende Dopplerverschiebung!). Somit absorbieren die **schnellsten Atome weit außen** ein Photon, werden durch den nach 'innen' gerichteten Impulsübertrag abgebremst, können dadurch weiter innen das nächste Photon absorbieren...

Schießen sie dann über die Mitte hinaus nach 'rechts' (im vorletzten Bild nach 'unten'), sehen sie einen  **$\sigma^-$  Strahl mit linkszirkularen Photonen ( $m = -1$ )** auf sich zukommen; hier nimmt die Übergangsenergie für die **Absorption von  $\sigma^-$  Photonen** nach außen zu (rote Linie); sie erzeugen bei der Absorption Übergänge

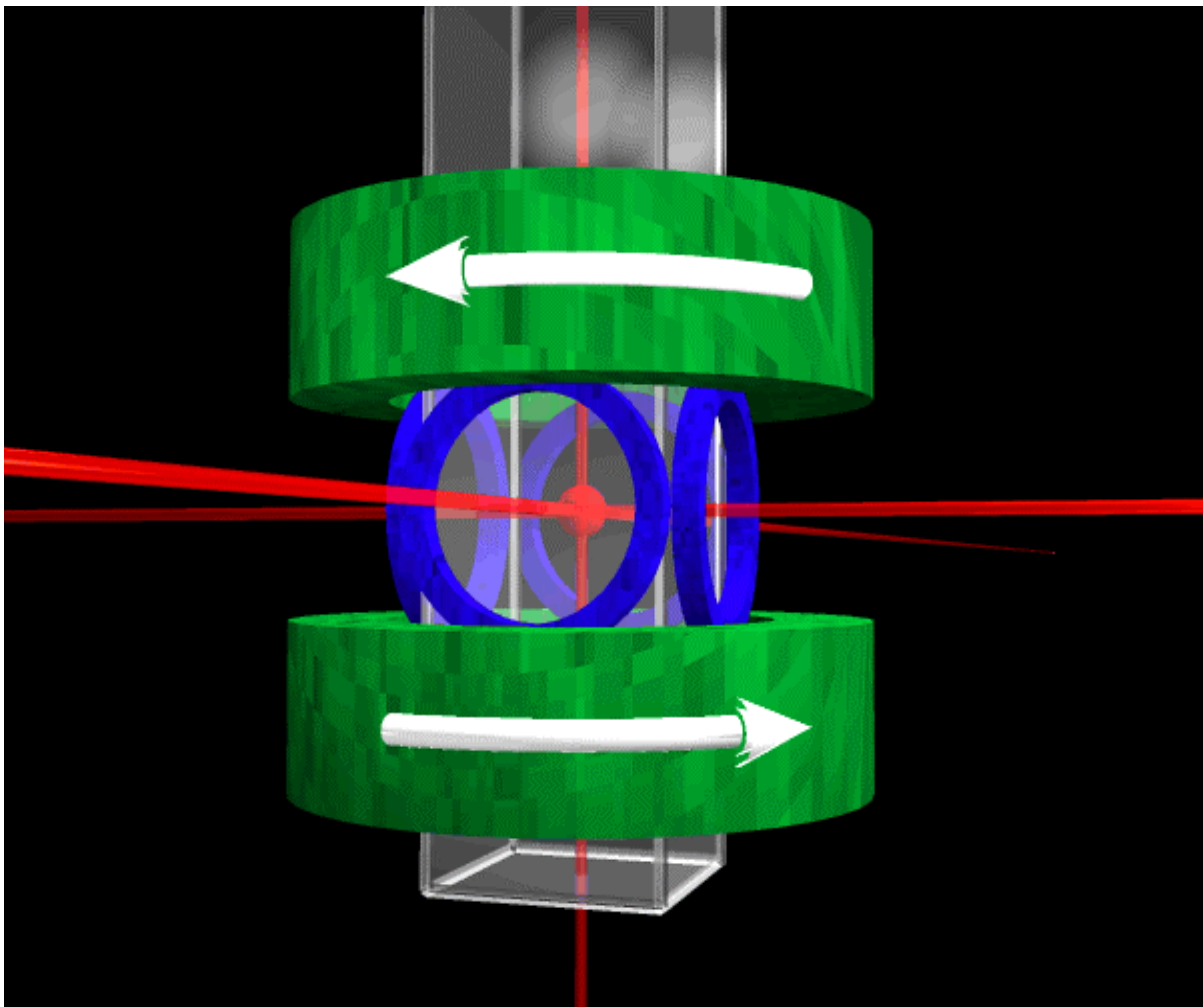
$${}^2S_{1/2}, m = -1/2 \rightarrow {}^2P_{3/2}, m = -3/2$$

bzw. 
$${}^2S_{1/2}, m = +1/2 \rightarrow {}^2P_{3/2}, m = -1/2 \quad (13.4a)$$



und erhalten wie zuvor jeweils einen **Rückstoß nach 'innen'**. Auf diese Weise werden, nach der Absorption vieler Photonen, die nach außen gerichteten Geschwindigkeitskomponenten immer kleiner und die **Atome sammeln sich in der Mitte**, mit nur noch winzigen Geschwindigkeiten, d.h. **kalt**.

Für die **endgültige Kühlung auf wenige nK** gibt es dann sehr knifflige **Tricks**, die über viele Jahre das Geheimnis der heftig miteinander konkurrierenden Gruppen in Boulder, am MIT und sonstwo, blieben (alternierende Magnetfelder; rotierende Radiofrequenzfelder; Evaporationskühlung = Abdampfen der jeweils heißesten Atome durch kurzzeitige Verkleinerung des Fallenpotentials, wobei natürlich auch immer mehr Atome verloren gehen; usw...).

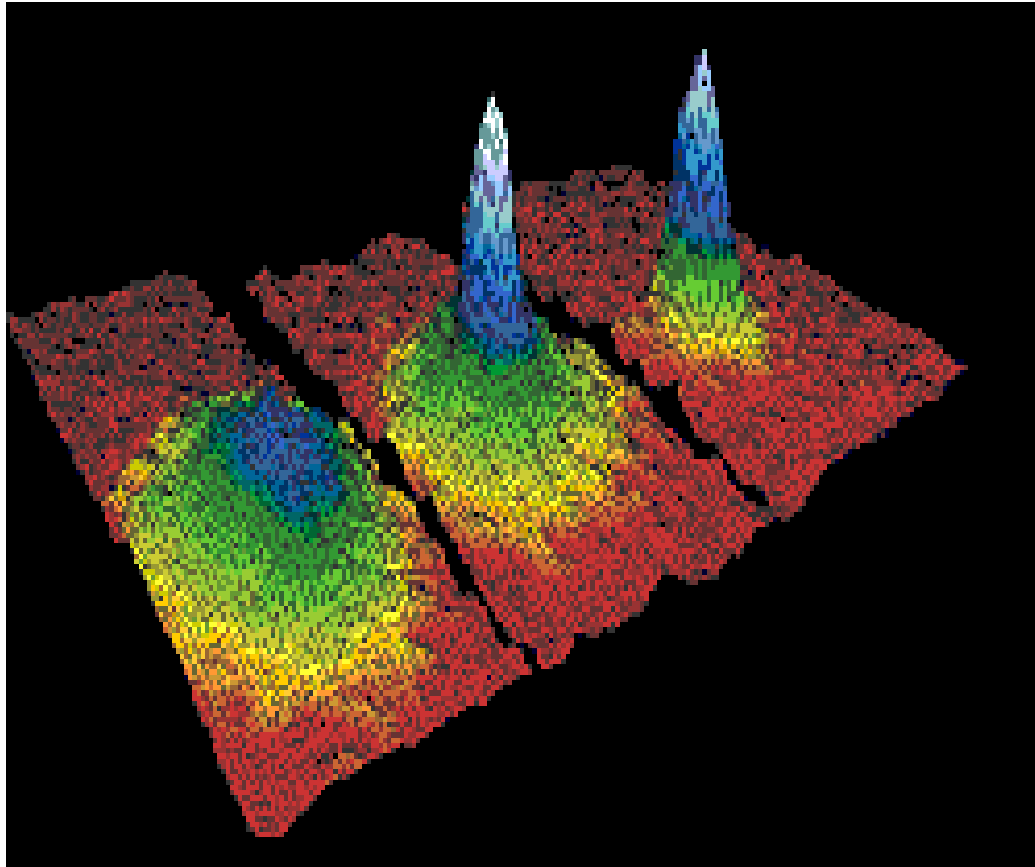


Erzeugung des 'richtigen' **inhomogenen Magnetfelds** durch zwei **im Gegensinn** durchflossene Spulen (grün) und vier **'Anti-Helmholtz'**-Spulen (blau)



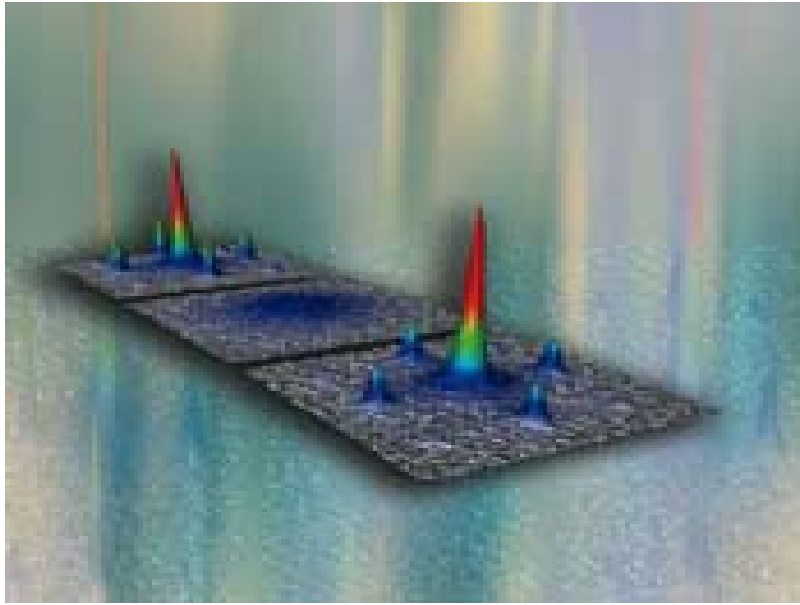
## 13.2 Eigenschaften eines Bose-Einstein-Kondensats

In der ersten Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats (BEC) konnten **Cornell** und **Wieman** mit ihren Mitarbeitern in Boulder **ca. 2000  $^{85}\text{Rb}$ -Atome auf eine Temperatur  $T \approx 20 \times 10^{-9} \text{ K}$**  abkühlen. Wie haben sie diese Zahlen bestimmt und, vor allem, wie haben sie den **'Phasenübergang' zum Kondensat** festgestellt?

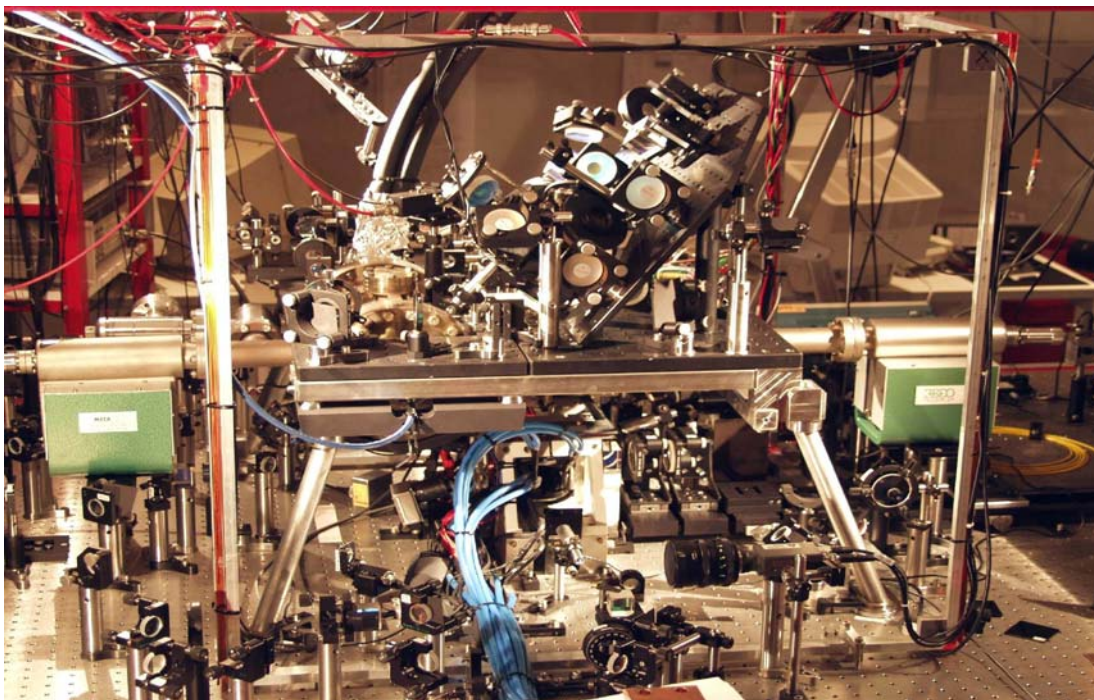


Fluoreszenzbilder der **Rb-Atome** in der Falle

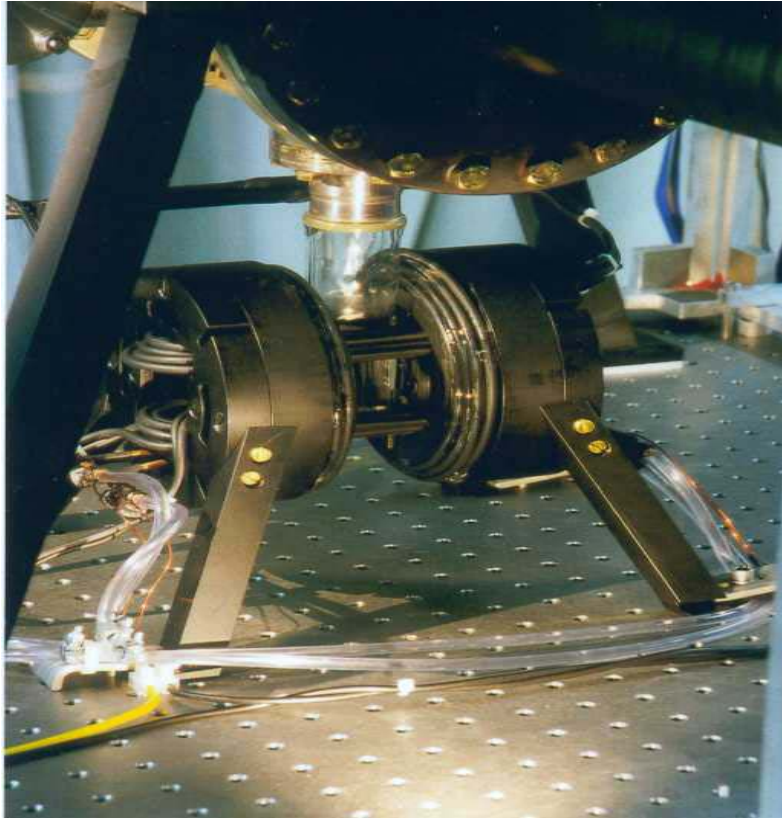
Die Methode der **'Laserkühlung'** in der magneto-optischen Falle (MOT) verschafft in jedem Augenblick ein **'Bild' der gespeicherten Atome**, indem man das nach jeder Resonanzabsorption emittierte **Fluoreszenzlicht** misst (das Elektron geht wieder in den Grundzustand unter isotroper Abstrahlung eines Photons). Aus der Stärke und Verteilung dieser Strahlung kann man daher die **Zahl und räumliche Lokalisierung der Atome** abschätzen. Im Bild oben sieht man von links nach rechts eindrucksvoll, wie die **Lokalisierung der Atome immer schärfer** wird.



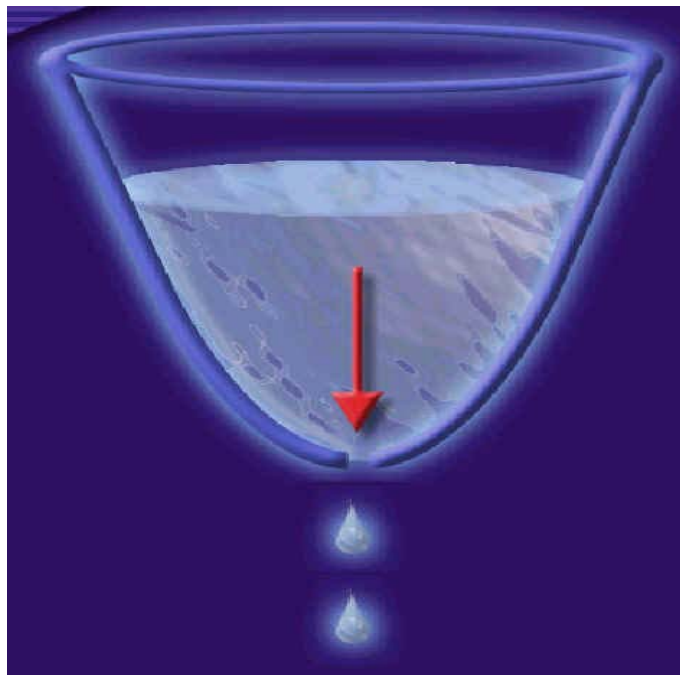
Wie aber misst man die **Temperatur** und wie 'beweist' man den Übergang zu dem **neuen Zustand, der gemeinsamen Wellenfunktion** für alle Atome? Dies ist erheblich schwieriger: die klassische Methode ist, dass man die Falle abrupt öffnet, das Kondensat austreten lässt und dann z.B. die Geschwindigkeit misst, mit der sich das Kondensat wieder ausdehnt. Oder man lässt das 'freie' Kondensat mit anderen Medien (z.B. optische Gitter aus **stehenden Laserfeldern**) wechselwirken, woraus man dann auf seine Eigenschaften (Temperatur, Kohärenz...) rückschließen kann.



**BEC-Falle** im Aufbau (Max Planck Institut für Quantenoptik, MPQ, München)



'Ioffe-Pritchard'- Magnetfalle am MPQ, Garching



Hier **öffnet** man die Falle abrupt und beobachtet **zeitaufgelöst** das Verhalten der herunterfallenden 'Atom-Tropfen'.

Die gespeicherten  $^{85}\text{Rb}$  -Atome haben bei **Zimmertemperatur** (300 K) eine **Geschwindigkeit  $v \approx 230$  m/s**; bei  **$2 \times 10^{-8}$  K** von **nur noch  $v \approx 0,6$  cm/s**. Sie vollführen **Vibrationsschwingungen um ihre Ruhelage** mit beschränkter Amplitude.

Wenn die Temperatur reduziert wird, **überlappen sich die de Broglie-Wellenlängen der einzelnen Atome immer mehr**. Schließlich geht das Kollektiv aller Atome **gemeinsam in den tiefsten quantenmechanisch erlaubten Vibrationszustand** mit starrer Relativphase der individuellen Atome -dies ist der **Phasenübergang zur Bose-Einstein-Kondensation**.

Wie groß ist nun die de Broglie Wellenlänge  $\lambda_B$  für  $^{85}\text{Rb}$  -Atome bei 20 nK?

Mit  $v = 0,6$  cm/s, d.h.  $\beta = v/c = 2 \times 10^{-11}$ , ergibt sich für  **$\lambda_B = hc / (pc)$**   
mit  $pc = M_{\text{Rb}} v c = M_{\text{Rb}} c^2 \times \beta$ ,  $hc = 4\pi \times 10^8$  [eV fm],  $M_{\text{Rb}} c^2 \approx 85 \times 10^9$  [eV]

$$\lambda_B (^{85}\text{Rb}, 20 \text{ nK}) = (4\pi \cdot 10^8) / (85 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-11}) \text{ [fm]}$$

$$\rightarrow \lambda_B \approx 0,7 \times 10^9 \text{ [fm]} = 0,7 \times 10^{-3} \text{ [mm]} \quad (13.5)$$

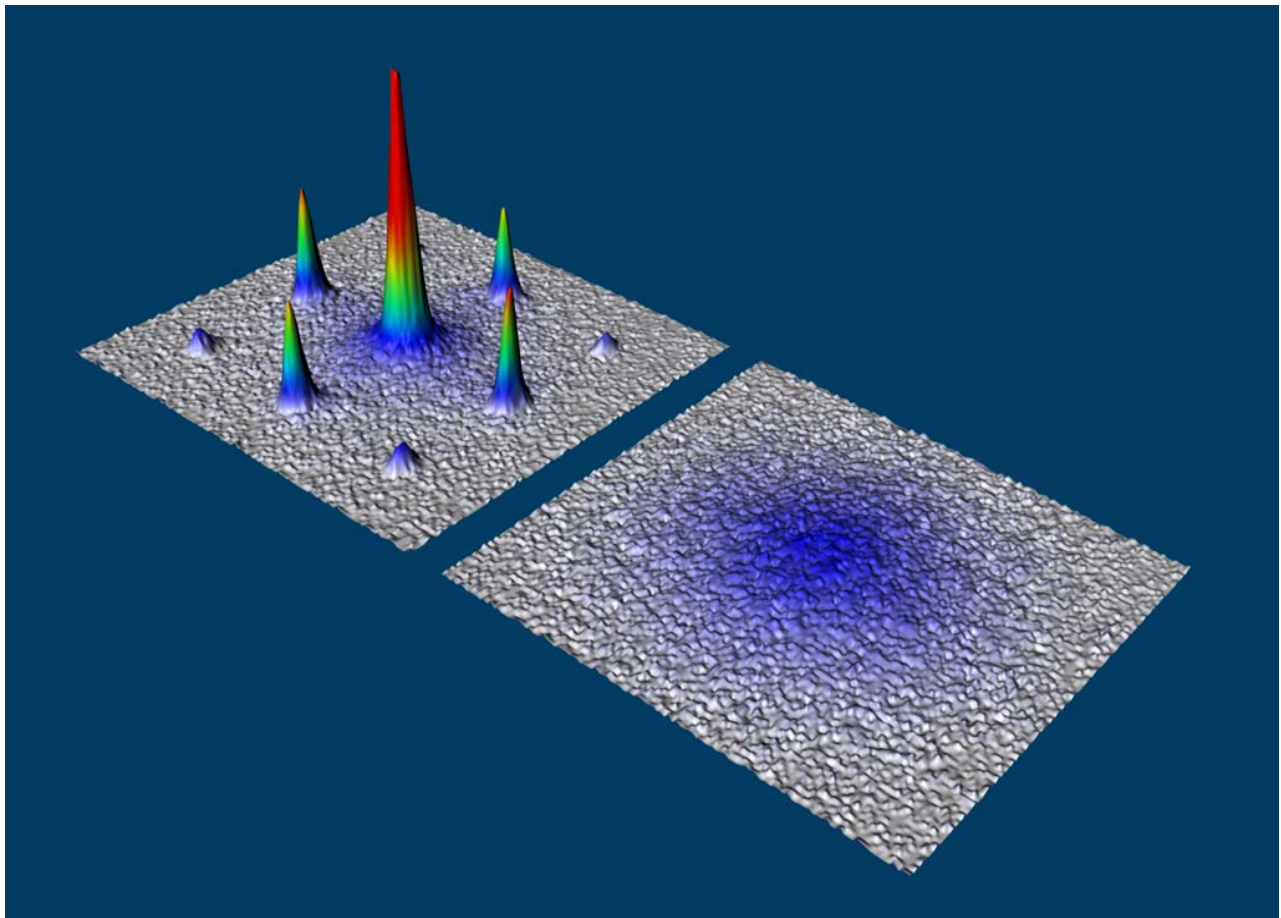
Nun hatte man beim ersten Kondensat etwa  **$2 \times 10^3$   $^{85}\text{Rb}$  -Atome** in einem **Volumen von ca.  $(0,05 \times 0,05 \times 0,05)$  [mm<sup>3</sup>]**. D.h., der **mittlere lineare Abstand** zweier Atome betrug ca.  **$4 \times 10^{-3}$  mm**. Man sieht also,

dass bei ca. **20 nK** und ca. **2000 Atomen** die **de Broglie - Wellenlänge und der mittlere Atomabstand in dieselbe Größenordnung gelangen**: dies ist der Startpunkt für eine **gemeinsame Wellenfunktion** und der Beginn des **kohärenten, 'phasenstarrten' Verhaltens aller Atome**.

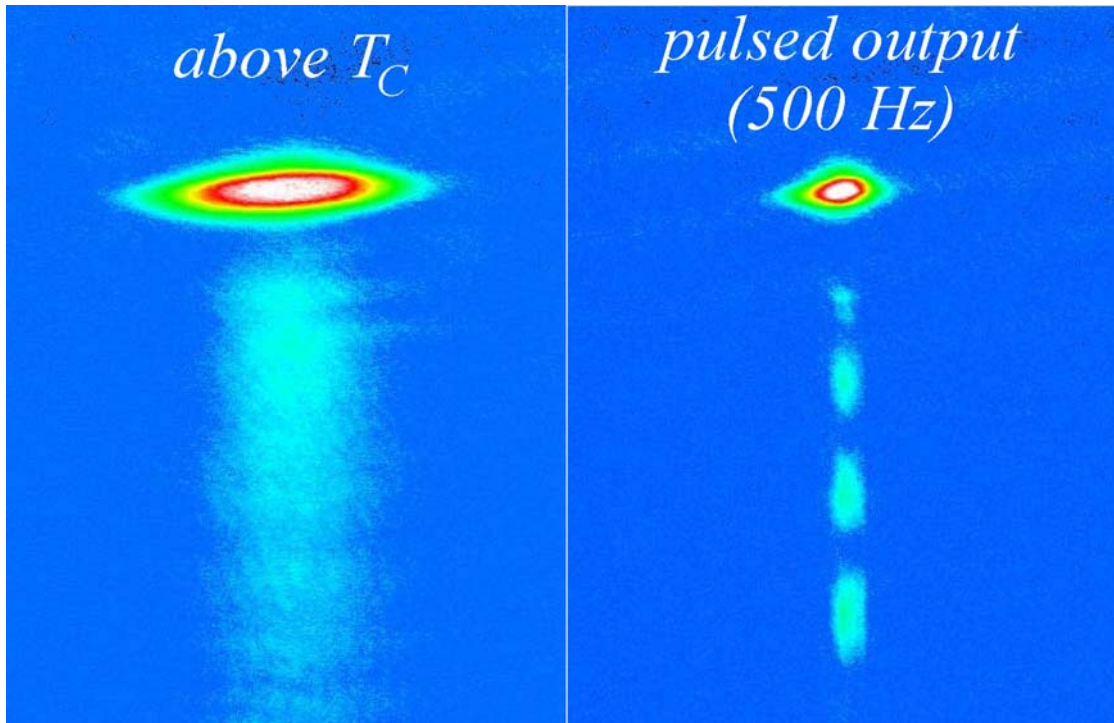


### 13.3 BEC: Grundlage von kohärenten Materiewellen und Atom-Interferometrie

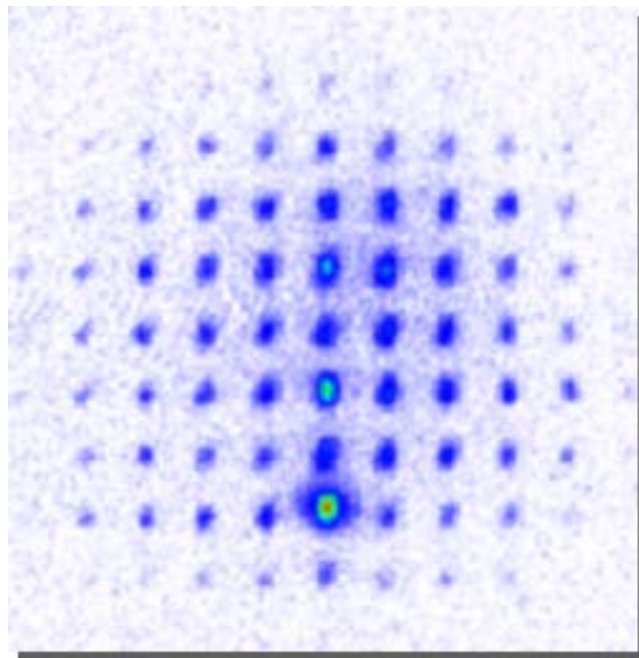
Durch vielfältige Manipulationen der Falle (schnelles Ein- und Ausschalten des bindenden Potentials...) gelang es den Gruppen in Boulder, am MIT und am MPQ in München, nachzuweisen, dass **BEC einen Zustand kohärenter Materiewellen** erzeugt, mit denen sich **Interferenzexperimente wie mit kohärenten Photonen** durchführen lassen. Diese **Atom-Interferometrie** stellt den ersten, wichtigen Schritt zum **'Atomlaser'** dar.



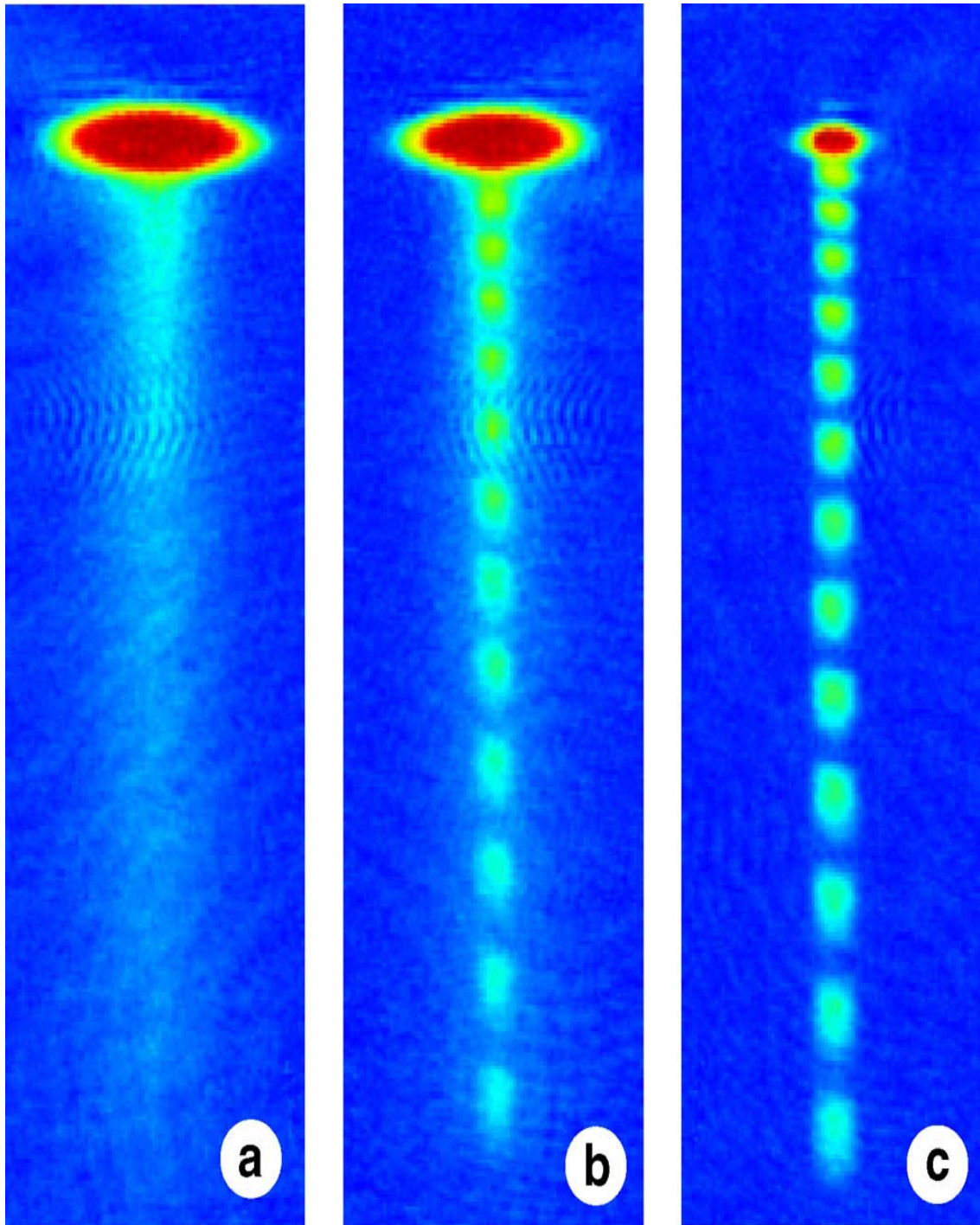
Ted Haensch gelang es mit seiner Gruppe am MPI für Quantenoptik (MPQ), sehr schnell zwischen dem **kohärenten** Zustand (links) und dem **inkohärenten** ('Mott Isolator') **'hin- und herzuschalten'**.



Die Atome in der Falle werden mit 500 Hz aus der Falle gelassen. Das linke Bild zeigt die Zeitspur oberhalb des Phasenübergangs bei einer Temperatur  $T_C$ . Das rechte Bild zeigt **vier diskrete, voll aufgelöste Impulskomponenten** der im Kondensat enthaltenen Atome (MPQ).



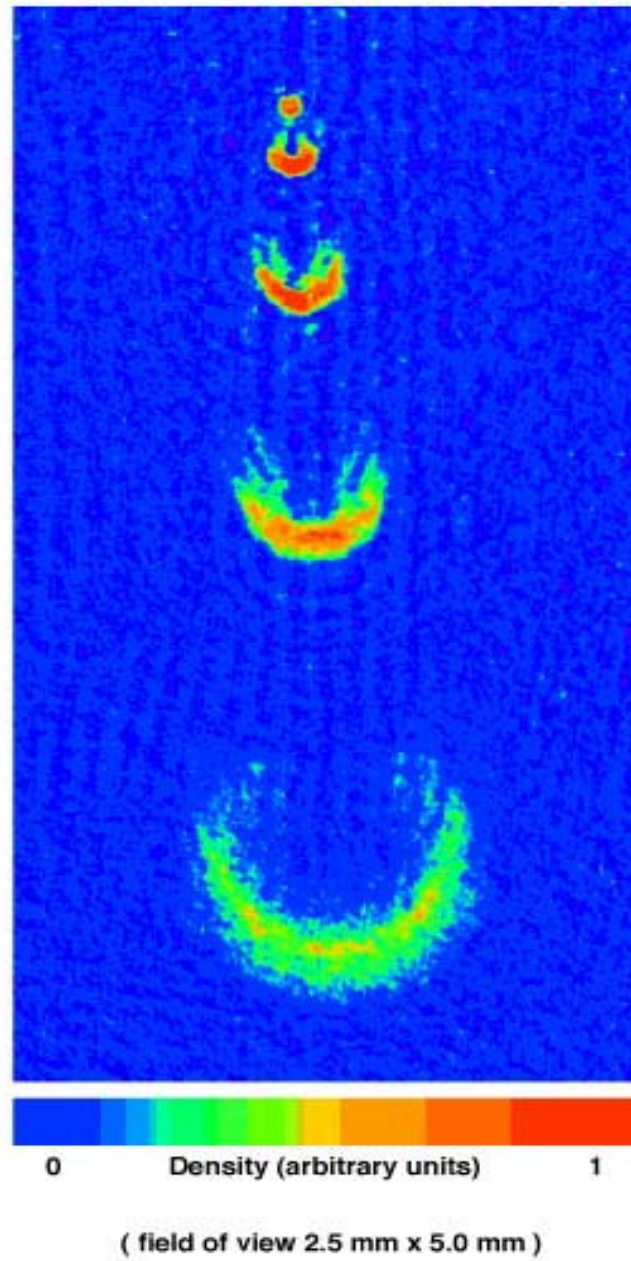
Schickt man das Kondensat auf ein **schnell gepulstes optisches Gitter** (stehende Laserwelle), sieht man **80 im Kondensat enthaltene Impulskomponenten** (MPQ)



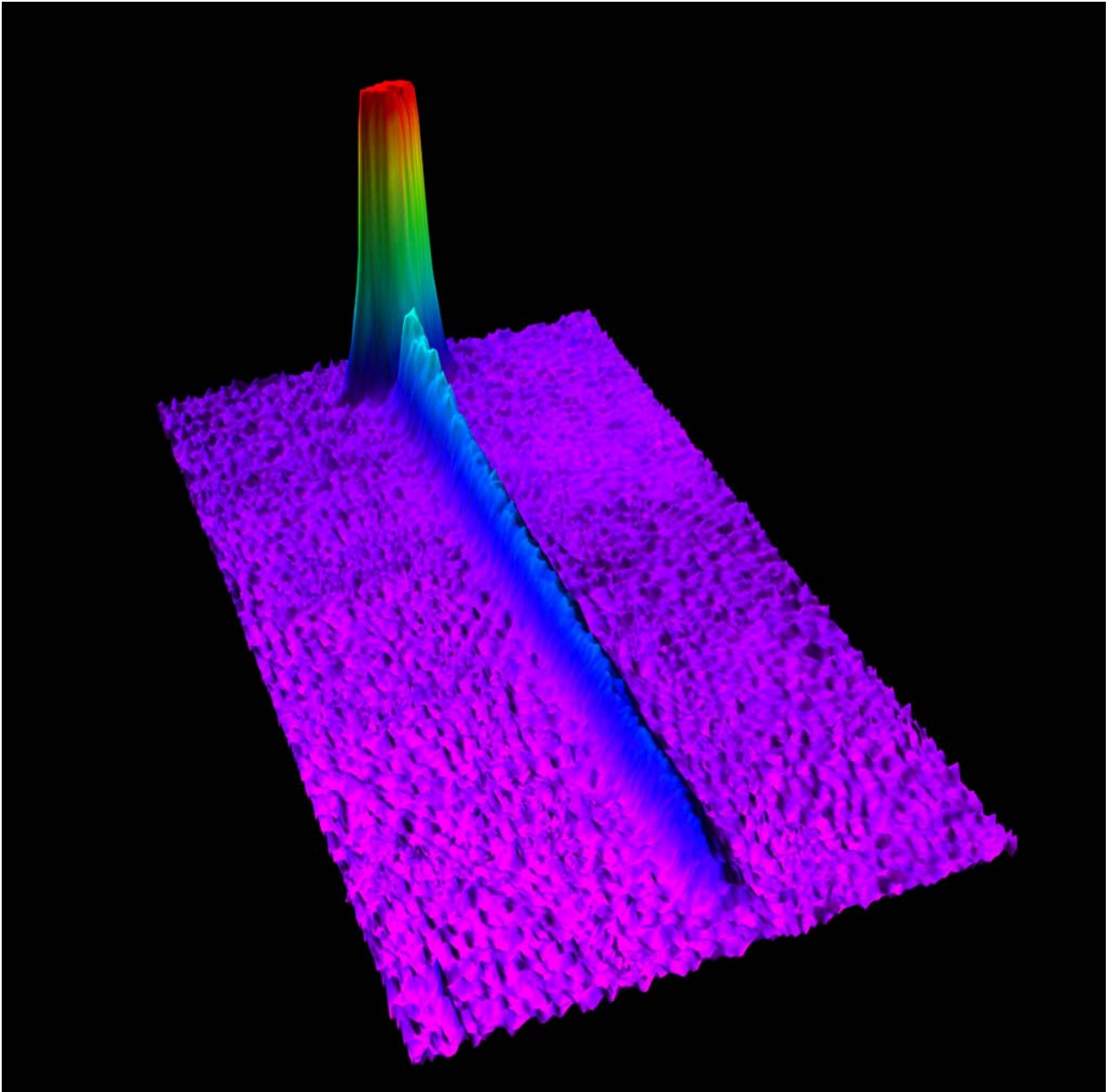
Impulskomponenten der Fallenatome oberhalb  $T_c$  (a), bei  $T_c$  (b) und deutlich unterhalb  $T_c$  (c) (MPQ).



The atom laser at 200 Hz repetition rate



Mit 200 Hz extrahiertes Kondensat (Univ. Stuttgart). Man sieht die als Funktion der Fallzeit **zunehmende Dekohärenz**.



Dichteverteilung eines **Materiestrahls** mit insgesamt ca.  $10^5$  Atomen (**blau**) aus einem **BEC** (regenbogenfarbige abgebrochene Spitze). Die **gesamte** oben gezeigte **Rechtecksfläche** beträgt nur **1,2 mm x 2 mm** (MPQ).

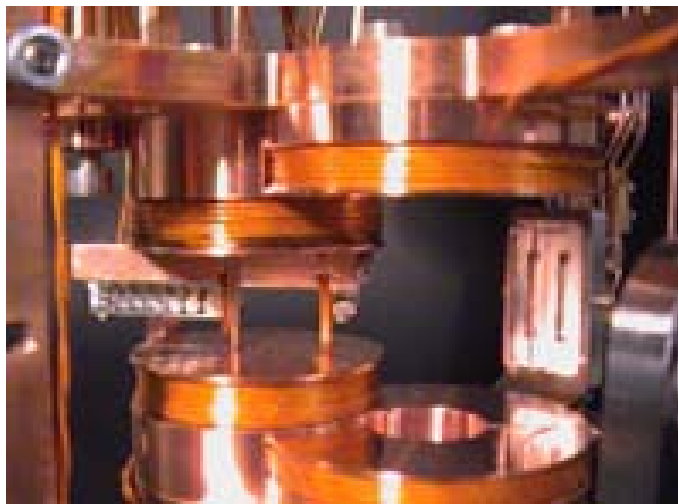
## 13.4 Gegenwärtige und künftige Entwicklungen

Mit den auf BEC beruhenden 'Atomlasern' bzw. kohärenten Materiewellen werden in Kürze bisher unvorstellbare Experimente zu den **Grundlagen der Quantenmechanik**, zur Herstellung von **Quantencomputern** und zu ganz **praktischen Anwendungen** der Mikrophysik möglich werden.

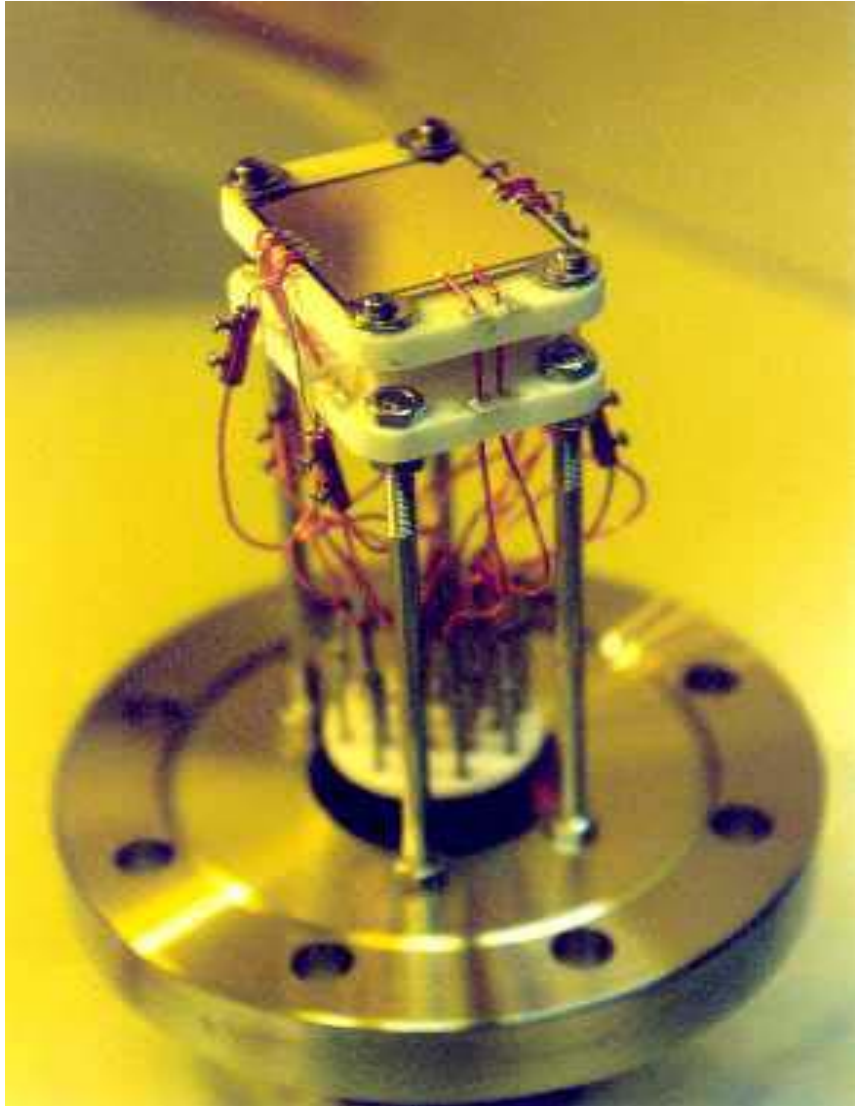
Der erste Schritt dazu wurde bereits durch die Herstellung eines **BEC in Mikrofallen** erreicht ('Atomchip', Ted Hänsch, München /Claus Zimmermann, Tübingen). Diese Mikrofalle beruht auf einem höchst einfachen Prinzip: fügt man dem um einen **elektrischen Leiter** vorhandenen **kreisförmigen Magnetfeld** ein **konstantes lineares Magnetfeld** hinzu, so addieren sich auf der einen Leiterseite (z.B. 'links' in Richtung des Stroms im Leiter) die beiden Felder, während sie auf der anderen Seite gegenläufig sind. Das **Magnetfeld B** des Leiters ist proportional zum Strom I und umgekehrt proportional zum Quadrat des Leiterradius r:

$$B \propto I/r^2 \quad (13.6)$$

Gelingt es nun, den Leiterradius in die Größenordnung von  $\mu\text{m}$  zu bringen, so erreicht man in unmittelbarer Nähe ( $\mu\text{m}$  Abstand) des Leiters ein **tiefes, inhomogenes, radial die Atome einschließendes Potential**, das bei einem gewissen Abstand vom Leiter (abhängig vom Strom I, vom Radius r des Leiters und von der Stärke des konstanten Feldes) = 0 wird. Axial (in Richtung des Leiters) hingegen sind die Atome nahezu frei beweglich. Gegenwärtig arbeiten viele Gruppen (Tübingen, Heidelberg, Stuttgart, Rochester...) daran, **einzelne Atome aus einem BEC in dieses 'Wellenleiter-Potential' zu transferieren**, um mit ihnen vielfältige Experimente der **Atominterferometrie** und/oder der Übertragung von Quanteninformation ('**Qubits**') durchzuführen. Ein Aufsatz darüber von Claus Zimmermann und Jozsef Fortagh ist im 'Physik Journal', Juni 2003, Seite 39 - 44 erschienen.



Tübinger Mikrofalle



Heidelberger 'Atomchip'

**FINIS**