# Vorlesung 1 20.10.2021

### Wahlpflichtmodul 08.128.050 Experimentalphysik 5a

Atom- und Quantenphysik

Vorlesungszeiten

Mi. 16-17 Uhr

Do. 12 c.t. - 14 Uhr

jeweils Lorentz-Raum

Prof. Dr. Randolf Pohl Staudingerweg 7, Raum 5-619 pohl@uni-mainz.de

### Language

English ok?

### Covid:

3G: vaccinated, recovered, or
 PCR tested by certified personnel (48 hrs)
 masks mandatory (FFP2)

### Stuff I

Webseite: <a href="https://www.agpohl.physik.uni-mainz.de/">https://www.agpohl.physik.uni-mainz.de/</a>

→ Teaching

 $\rightarrow$  WiSe 21/22 Ex-5a

You'll find here:

- Zoom links
- Exercises
- PDFs of the Lectures

### Stuff II

I will write on my tablet and display it here on the wall.

Simultaneoulsy: Zoom: I plan to broadcast all lectures on Zoom (Links -> my website)

All lectures will hence be recorded: Mainly my tablet The movies will be uploaded to Panopto (1-2 days later)

The PDFs of my writing will be uploaded to my website.

### Übungen - Beginn nächste Woche

Geplant: 4 Gruppen

- Tue. 12-14, Sem. room A
- Tue. 14-16, Sem. room A
- (Wed. 8-10), Sem. room A

-> list

#### Plan:

- Exercises are 2 hours (2<sup>nd</sup> hour voluntary)
- You have to attend during the 1<sup>st</sup> hour (max. 2x not there without excise)
- Exercise sheets: on the web site (Tuesday, probably)
  - Will be presented the next week
  - Active Participation: min. 2x at the blackboard
- No need to hand in the solutions
  - Mark the problems you have seriously worked on
  - Must be >= 50% over the semester
  - If need be: hand in to the tutor and get it corrected

You have to sign in for the lecture by THIS FRIDAY

### Written Exam

Klausur

10. Feb 2022

### Noch Fragen?

Dann geht's los!

Was stellen Sie sich unter Atomphysik vor?

## Atomphysik!? – ein alter Hut aus dem letzten Jahrtausend?

#### **Atomphysik heute: Experimentelle Quantenmechanik**

Vollständige Kontrolle aller Freiheitsgrade von Atomen/Molekülen, d.h. der internen Freiheitsgrade und der externen Freiheitsgrade!

Einige wichtige Methoden dafür:

Anregung und Kontrolle der inneren Freiheitsgrade

über hochpräzise Laserstrahlung, z.B. auch gepulste fs-Laser zur Erzeugung nahezu beliebiger Elektronen-Wellenpakete

Genaueste spektroskopische Methoden in Kombination mit ausgefeilter Theorie zum Verständnis der Anregungszustände in Atomen und Molekülen

Fallen für Atome/Ionen und Moleküle, die es erlauben, die Bewegung der Teilchen fast vollständig einzufrieren, bzw. präzise kontrolliert zu steuern, bis hin zu Bose-Einstein Kondensaten

## Atome sind die wohl am besten kontrollierbaren und verstandenen Quantensysteme

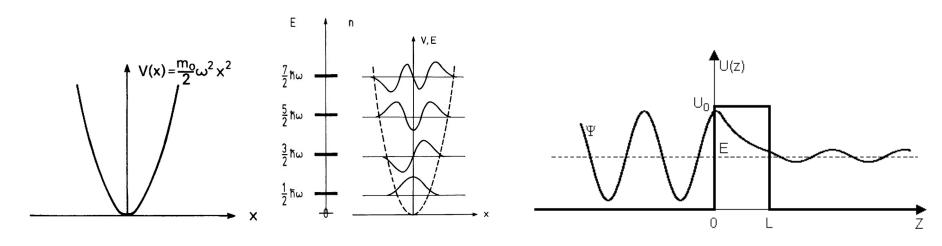
Der Erfolg der Quantenmechanik wurde quasi durch die Atomphysik und deren heutige Weiterentwicklung in Richtung Quantenoptik, Quantenmetrologie etc. zementiert

Experimentelle Atomphysik ist heute in weiten Teilen angewandte Quantenmechanik

→ VL schließt direkt an QM 1 an

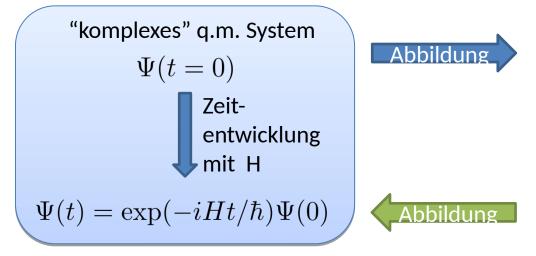
### Experimentelle Quantenmechanik!?

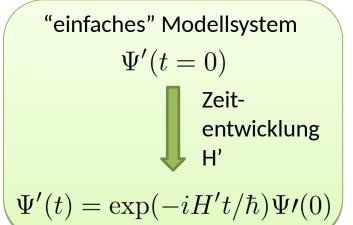
Für viele war QM wahrscheinlich eher ein abstraktes, mathematisches Konzept:



... zB diese Prozesse wollen wir kontrollieren!

Um damit dann evtl. auch etwas Sinnvolles zu machen wie zB Quantensimulation

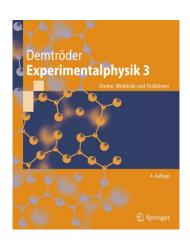




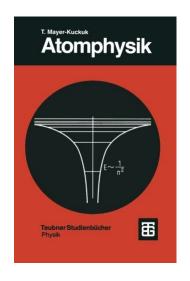
### Rough Plan (open to ideas!)

- I. Organization / Intro: How large is the proton?
- II. Structure of atoms: Beyond Schrödinger
  - a. Dirac Equation
  - b. Fine structure, Relativistic corrections, nuclear effects
  - c. Lamb shift, QED, Feynman diagrams
  - d. Hyperfine structure
  - e. Alkali atoms
  - f. Helium atom
  - g. Zeeman- and Stark-Effects
- III. Light-Atom Interaction
  - a. Two-level systems Bloch Vector, Density matrix
  - b. Application: Spektroskopic methods & optical traps
  - c. Spontaneous emission Optical Bloch Equations
  - d. Application: Absorption and Laser cooling
  - e. Application: Laser
  - f. Dipol matrix elements and selection rules
  - g. Higher order radiation
- IV. Molecules
  - a. Molecular physics

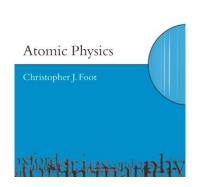
### Literatur zur Atomphysik

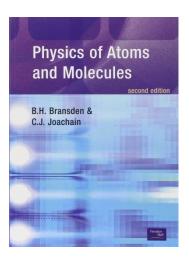


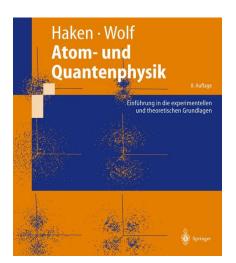
Guter, knapper Überblick, allerdings nicht ganz das Niveau, das wir hier anstreben



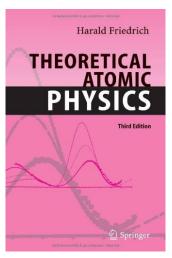








#### Theorie:



Insbesondere gut für die relativistische Behandlung

## Atomphysik!? – ein alter Hut aus dem letzten Jahrtausend?

#### **Atomphysik heute: Experimentelle Quantenmechanik**

Vollständige Kontrolle aller Freiheitsgrade von Atomen/Molekülen, d.h. der internen Freiheitsgrade und der externen Freiheitsgrade!

Einige wichtige Methoden dafür:

Anregung und Kontrolle der inneren Freiheitsgrade

über hochpräzise Laserstrahlung, z.B. auch gepulste fs-Laser zur Erzeugung nahezu beliebiger Elektronen-Wellenpakete

Genaueste spektroskopische Methoden in Kombination mit ausgefeilter Theorie zum Verständnis der Anregungszustände in Atomen und Molekülen

**Fallen für Atome/Ionen und Moleküle**, die es erlauben, die Bewegung de Teilchen fast vollständig einzufrieren, bzw. präzise kontrolliert zu steuern, bis hin zu Bose-Einstein Kondensaten

#### Beispiele:

#### Genaueste Atomuhren

für schnelle Datenkommunikation, GPS-System und fundamentale Tests physikalischer Gesetze, etwa der Relativitätstheorie

Messung der Drift von Naturkonstanten  $\rightarrow$  evtl. Ausschluss von "SUSY"-Theorien

Test fundamentaler Theorien, etwa der QED durch Spektroskopie an Atomen, insbesondere an Wasserstoff und Helium-Ionen → derzeit genaueste Messungen in der Physik

Genaueste Sensoren für Rotation und Gravitation (auch: g lokal) auf Basis von Atominterferometern

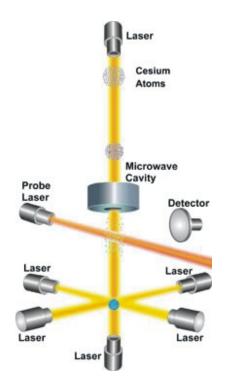
Quanteninformationsverarbeitung mit Atomen

last but not least...:

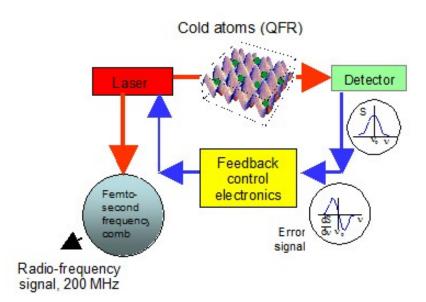
Fundamentales Verständnis der Quantenphysik als der 'Informationstheorie' der Physik

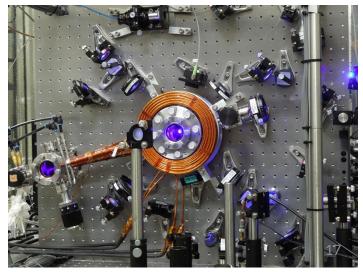
### **Atomuhren**

Präzisionsspektroskopie von atomaren Übergängen als Zeitstandard



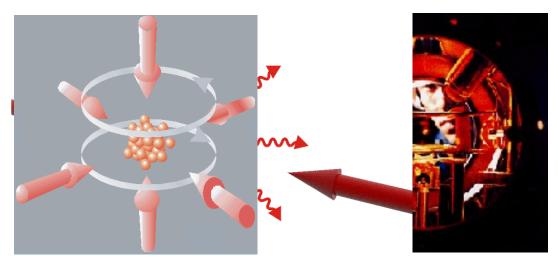






## Laserlicht-Fallen für Atome: atomare Gase bei µK-Temperaturen

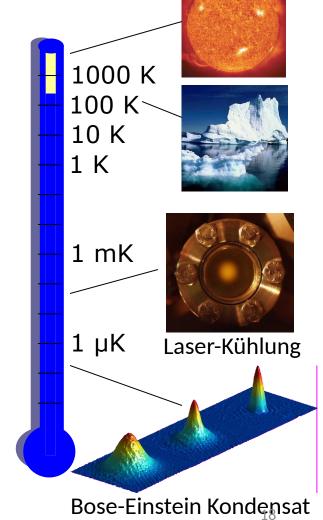
Laserlicht übt auf Atome einen Strahlungsdruck aus (typ. 10<sup>5</sup> g)



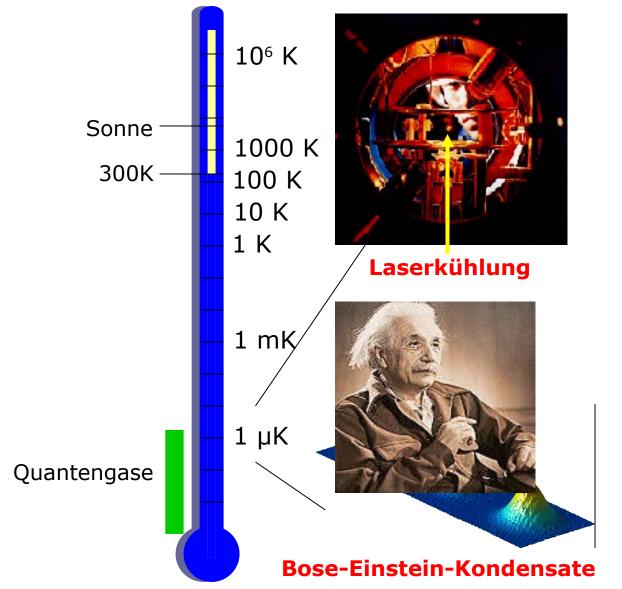
eobachtung

#### Fragestellungen:

- Wie fängt und speichert man neutrale Atome
- Detektion atomarer Wolken
- daraus: Temperaturbestimmung
- Anwendungen gespeicherter Atome: Atomuhren, Nano-Sensoren, Messung von g,...



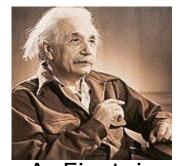
### Ultra tiefe Temperaturen



### BEC – Quantenphasenübergang

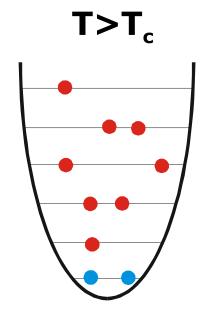


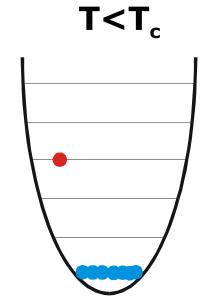
S. N. Bose Photonen 1924

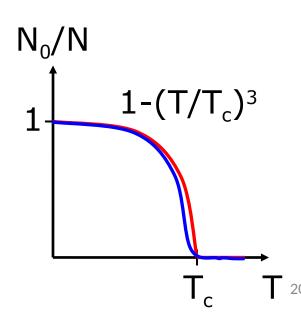


A. Einstein

Massenbehaftete
Teilchen, 1925



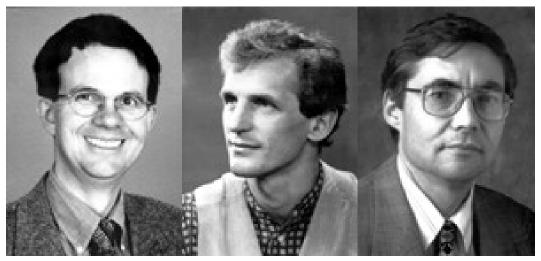






### Nobelpreis in Physik 2001

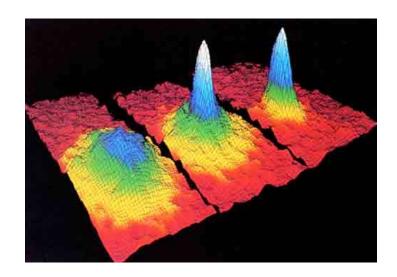
"for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates"

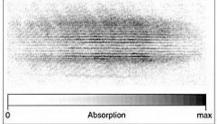


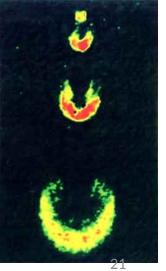
Eric A.
Cornell

Wolfgang Ketterle

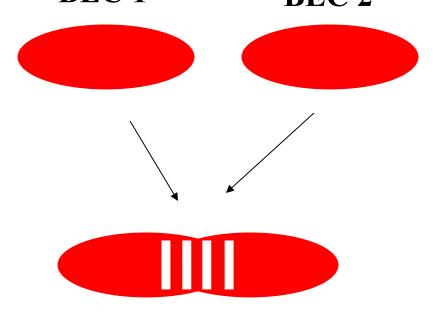
Carl E. Wieman



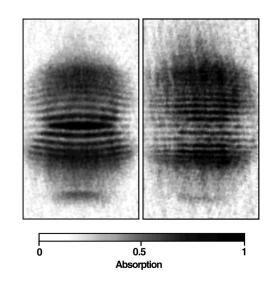




## Kohärente Materiewellenoptik BEC 1 BEC 2

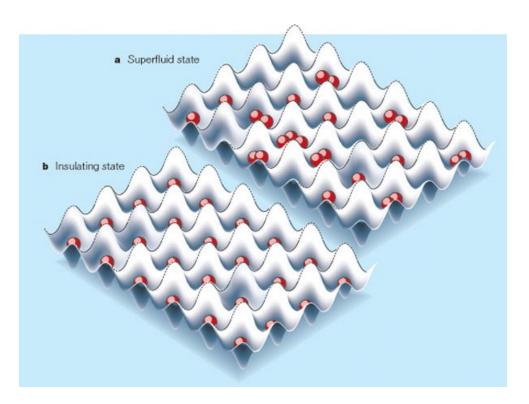


#### Ketterle et al. 1998



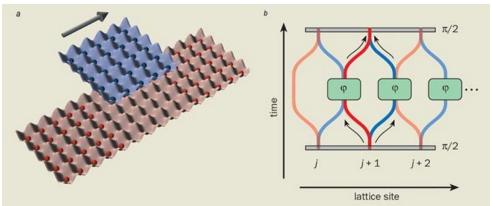
Zwei Materiewellen überlappen und interferieren zu einem stabilen Interferenzmuster!

### **Optische Gitter**



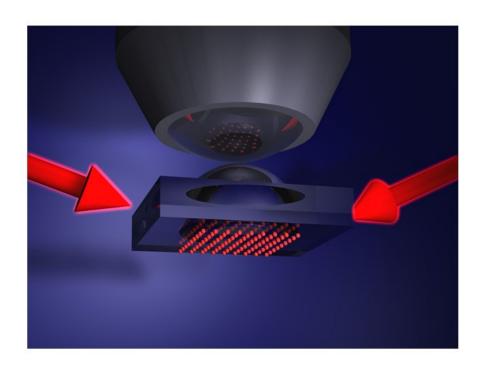
Magnetismus in Optischen Gittern

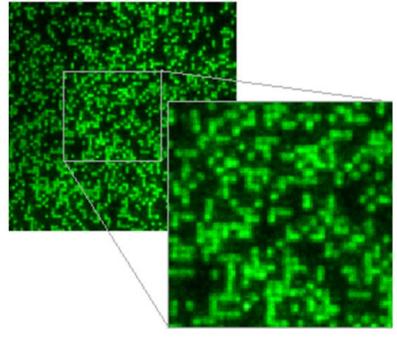
Fermionen und Bosonen in optischen Gittern

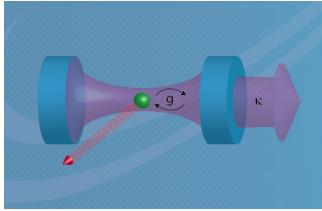


Quanteninformationsverarbeitung in opt. Gittern

### (Einzelne) Atome beobachten und kontrollieren:

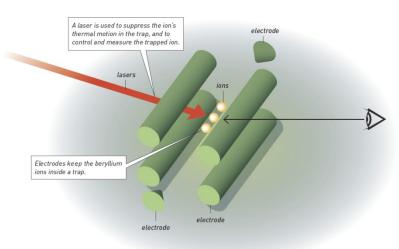


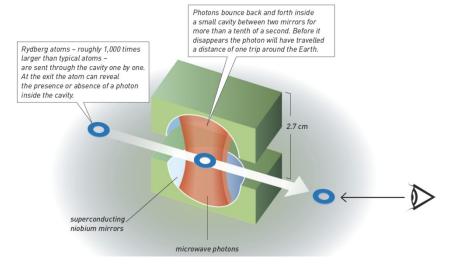


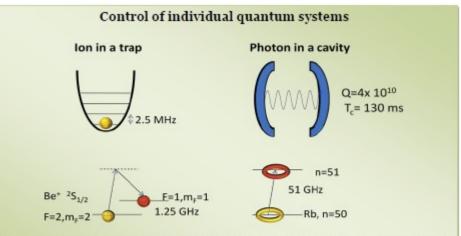


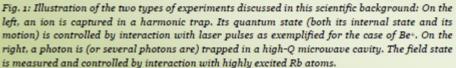


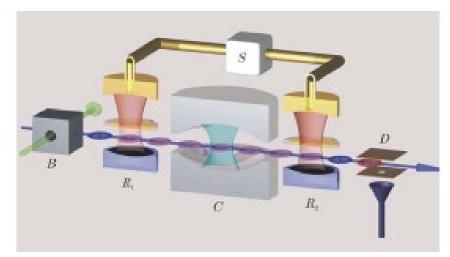
### Nobelpreis 2012











## The Nobel Prize in Physics 2012



Photo: U. Montan Serge Haroche Prize share: 1/2

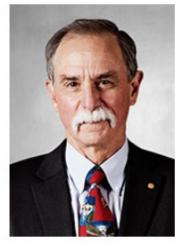


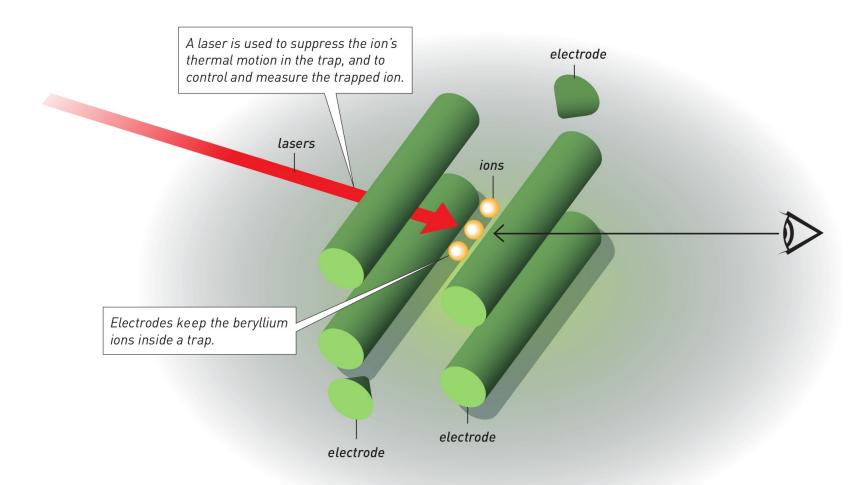
Photo: U. Montan

David J. Wineland

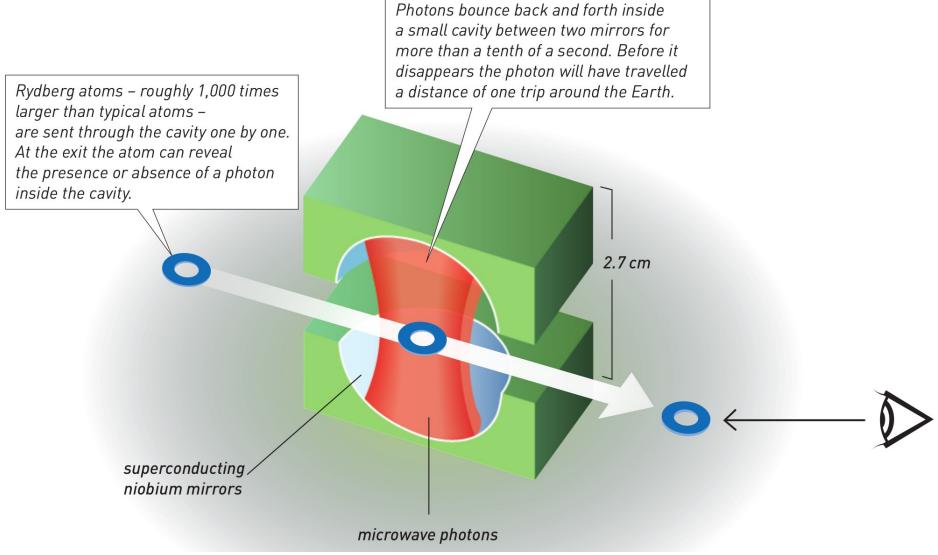
Prize share: 1/2

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"

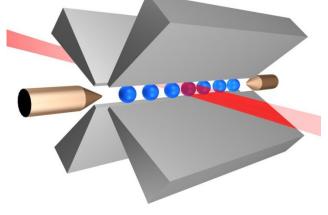
### Ion trap

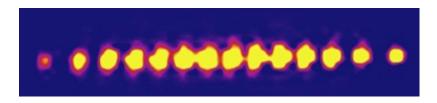


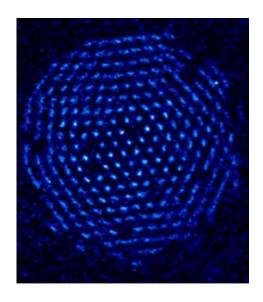
### **Cavity QED**



### Ionenfallen







- Als Quantensimulatoren
- Als Informationsspeicher
- Für die Massenspektroskopie
- Zum Studium von chemischer Rekationsdynamik

### Laser cooled ion crystall

