

Ionen in Einzelhaft – Präzisionsexperimente mit individuellen Teilchen

Wolfgang Quint, w.quint@gsi.de

.....Fragen über Fragen.....



Kann man ein einzelnes Atom mit dem eigenen Auge sehen?

Kann man Quantensprünge an einem einzelnen Atom beobachten?

Was sagt Albert Einstein, wenn Sie eine Woche in die Berge fahren?

Was ist ein Kilogramm?

Was ist Antimaterie?

Verstehen wir die Quantenmechanik schwerer Ionen?

Warum besteht meine Briefmarkensammlung aus nur einer Briefmarke?

Frage: Kann man ein einzelnes Atom mit dem eigenen Auge sehen?

Antwort:

„Ein Atom ist so klein,
dass man es nicht sehen kann.“

Richtig!

Aber:

Man kann das Licht sehen,
das ein einzelnes Atom aussendet.

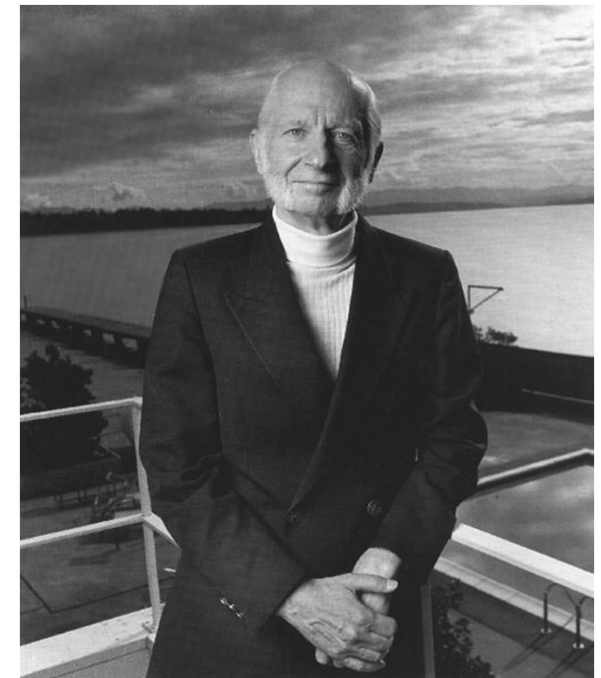
Experiment:

Universität Heidelberg, 1978

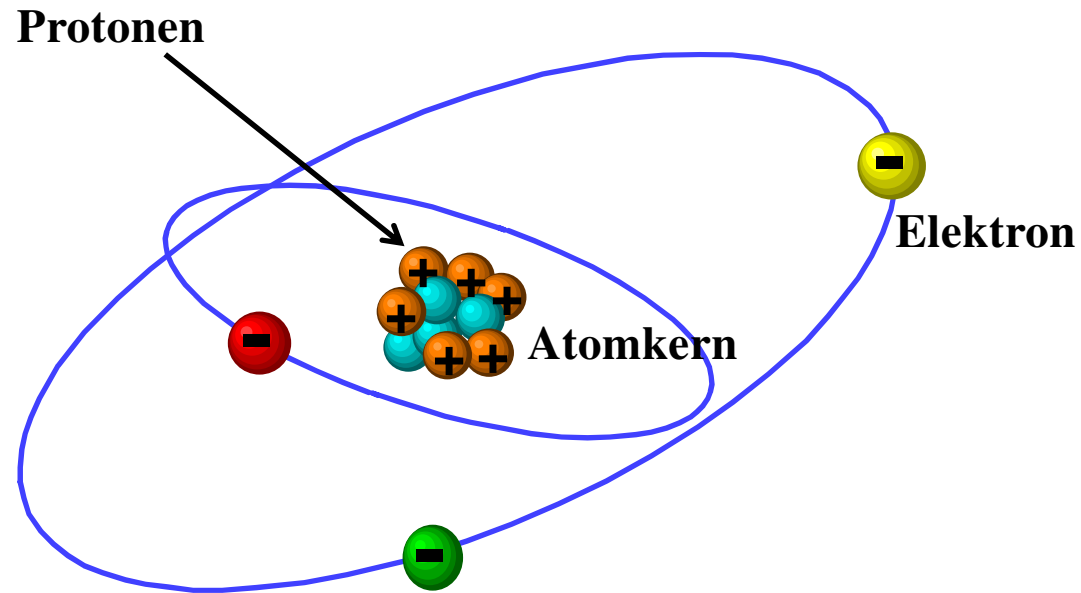
H. Dehmelt, Seattle, Nobelpreis 1989

W. Neuhauser, Hamburg

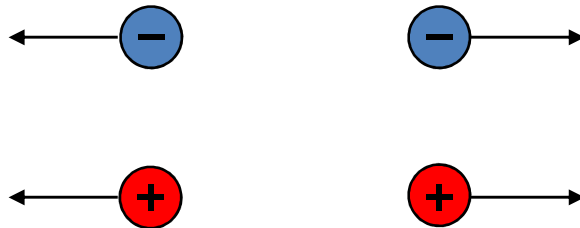
P. Toschek, Hamburg



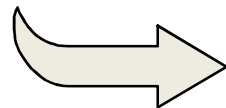
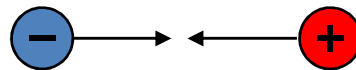
Ion = elektrisch geladenes Atom



- **Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab.**



- **Ungleichnamige Ladungen ziehen sich an.**

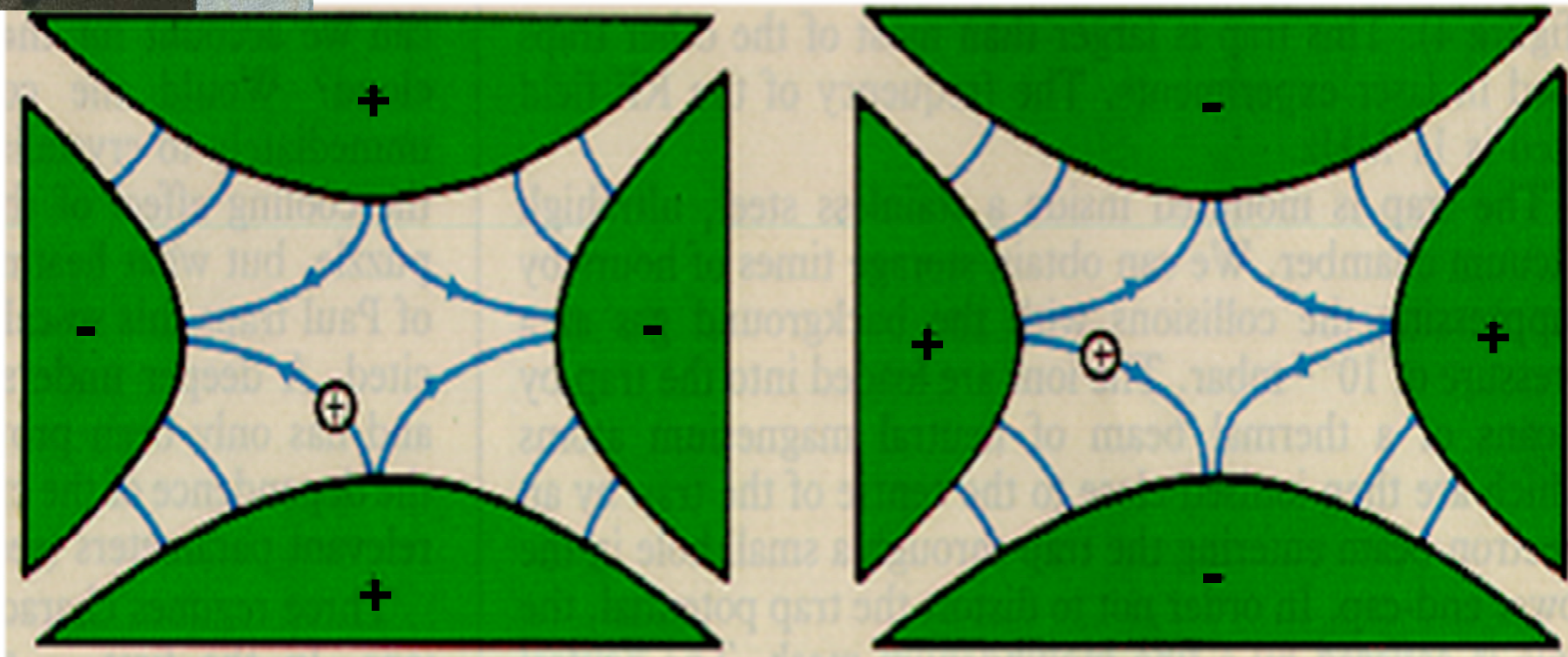


Paul-Falle

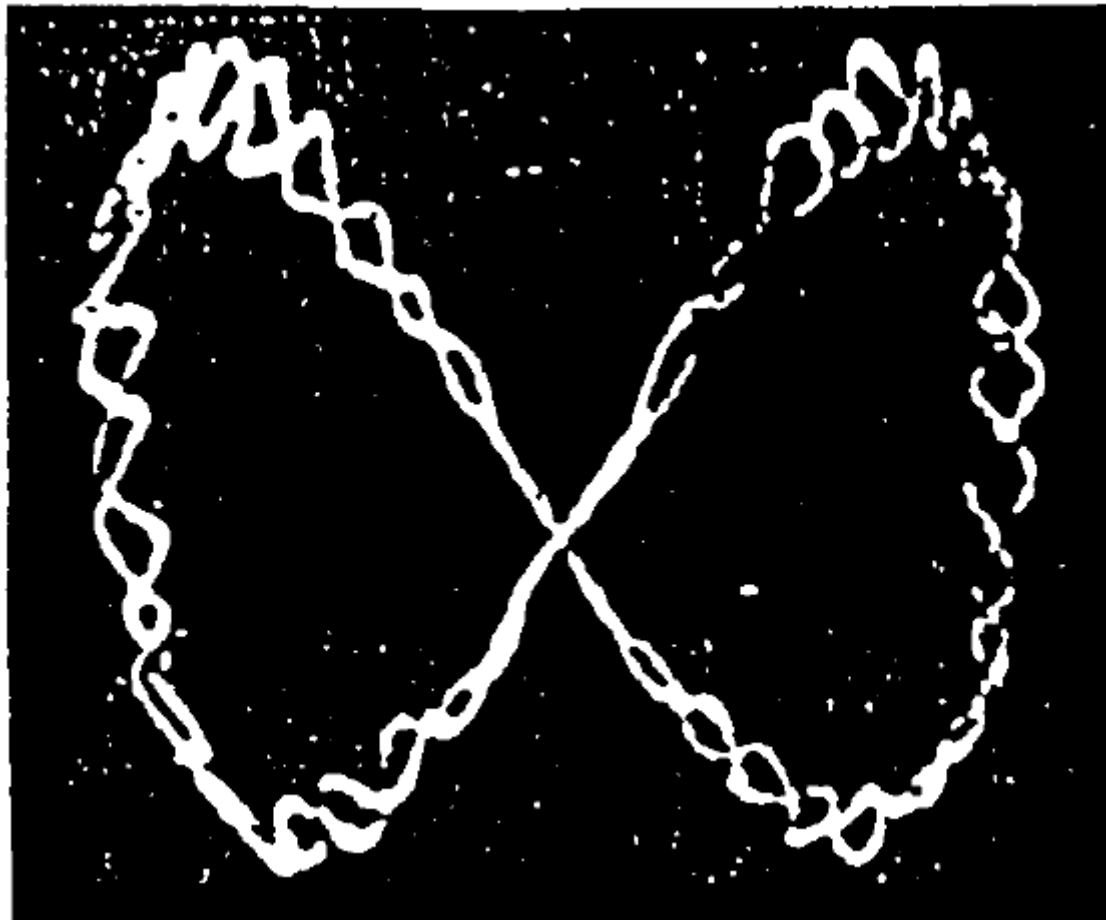
*(Prof. Wolfgang Paul, Univ. Bonn,
Nobelpreis 1989)*

Prinzip der Paul-Falle:

- **Schnelles Umpolen des elektrischen Feldes**
- **Schwingungsbewegung des Teilchens in der Falle**

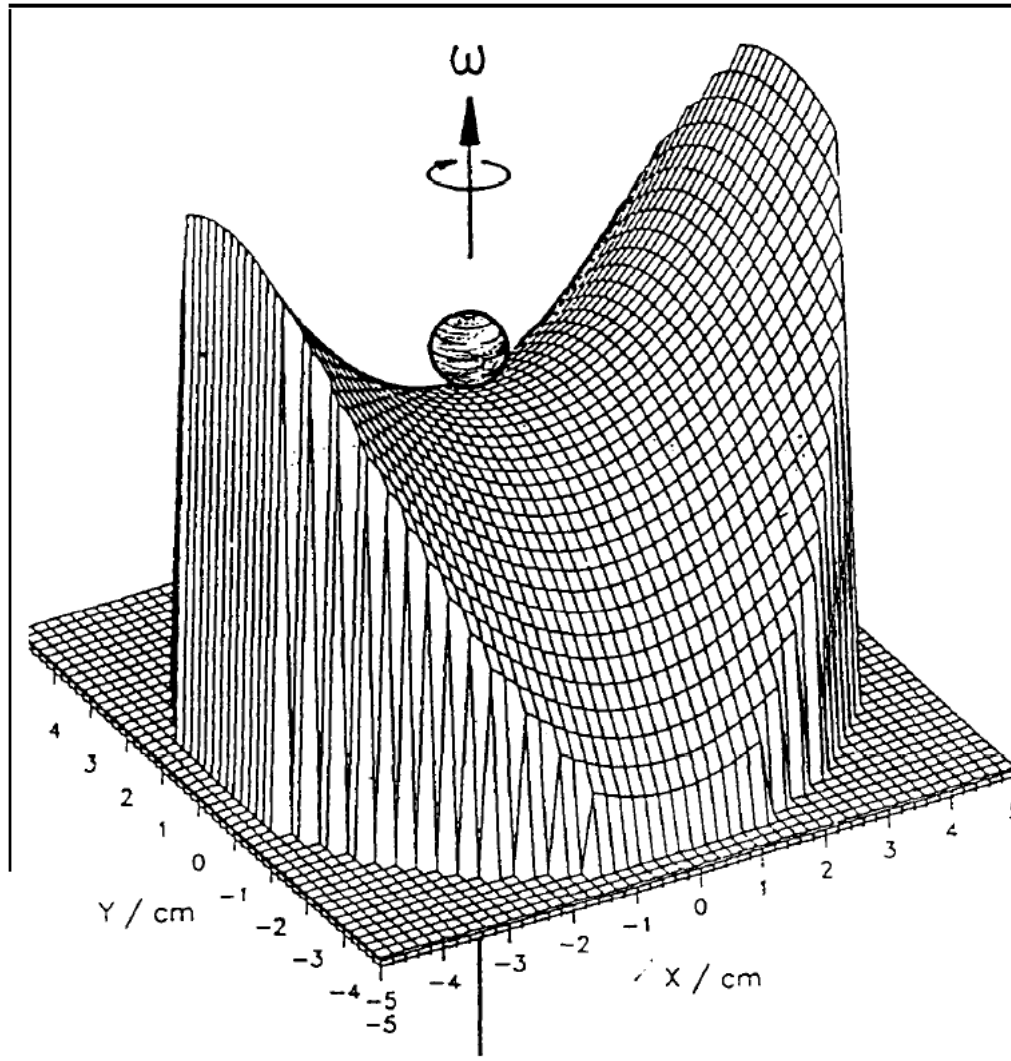


Bewegung eines Staubteilchens in der Paul-Falle



Lit.: W. Paul, Nobel-Vortrag 1989

Speicherung von Teilchen in der Paul-Falle: Mechanisches Analogon



**Rotation einer
Sattelfläche**

Lit.: W. Paul, Nobel-Vortrag 1989

Erstes Photo eines einzelnen Atoms

H. Dehmelt et al., Belichtungszeit: 10 Min.

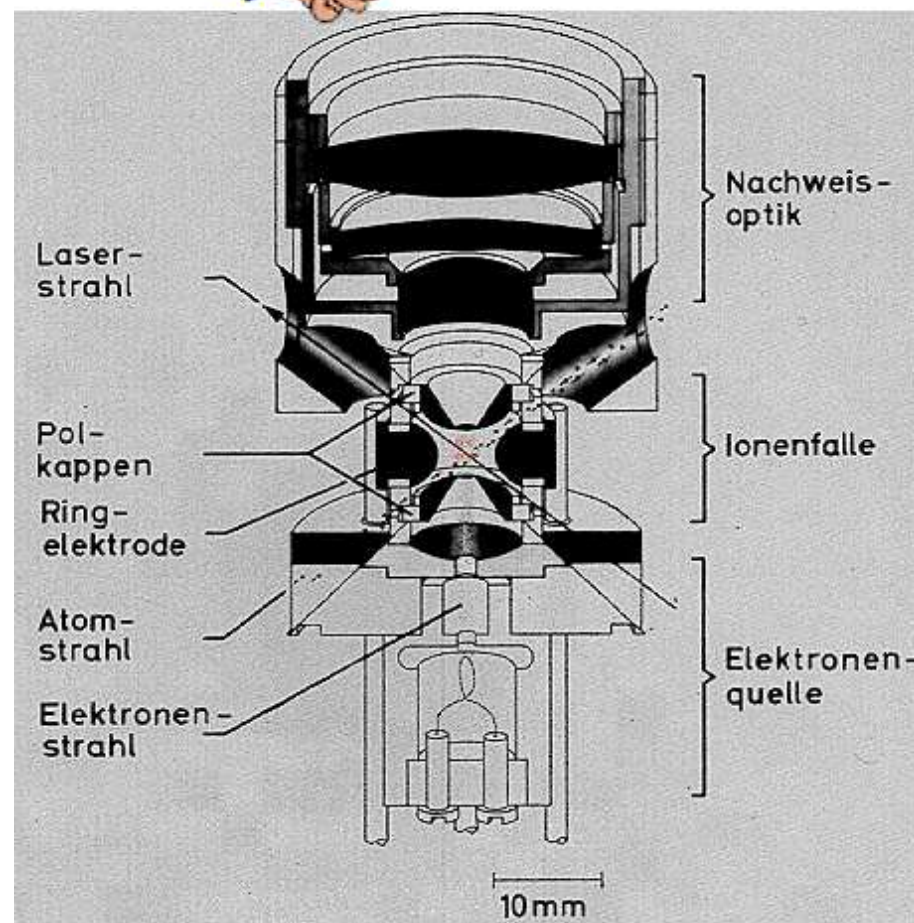


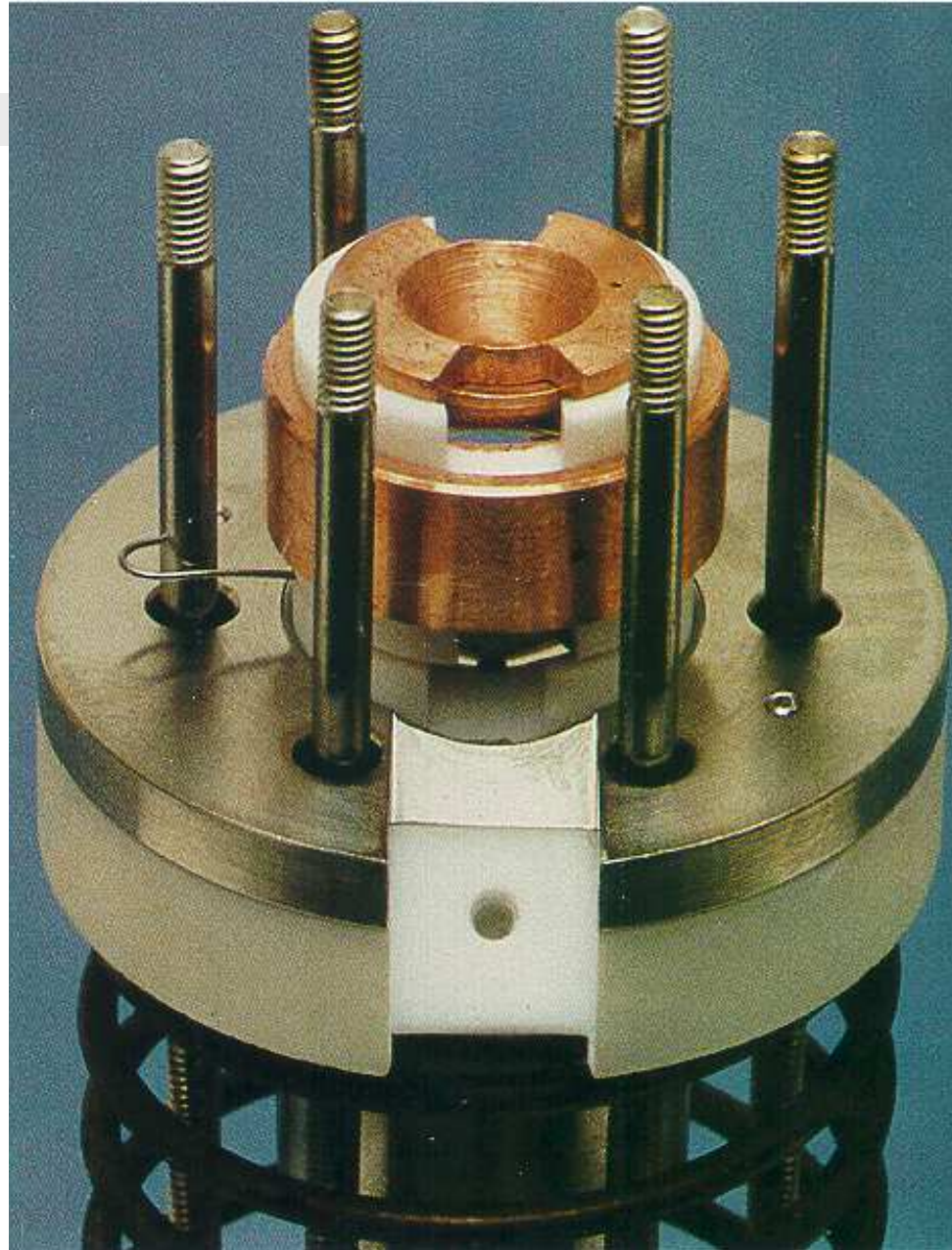
einfach geladenes Barium-Ion

Astrid

Heidelberg 1978
Inst. f. Angew. Physik
Albert-Überle-Str.

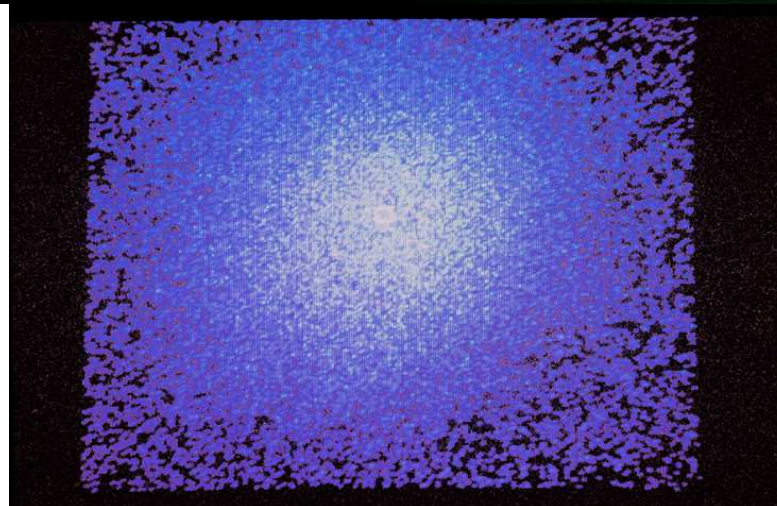
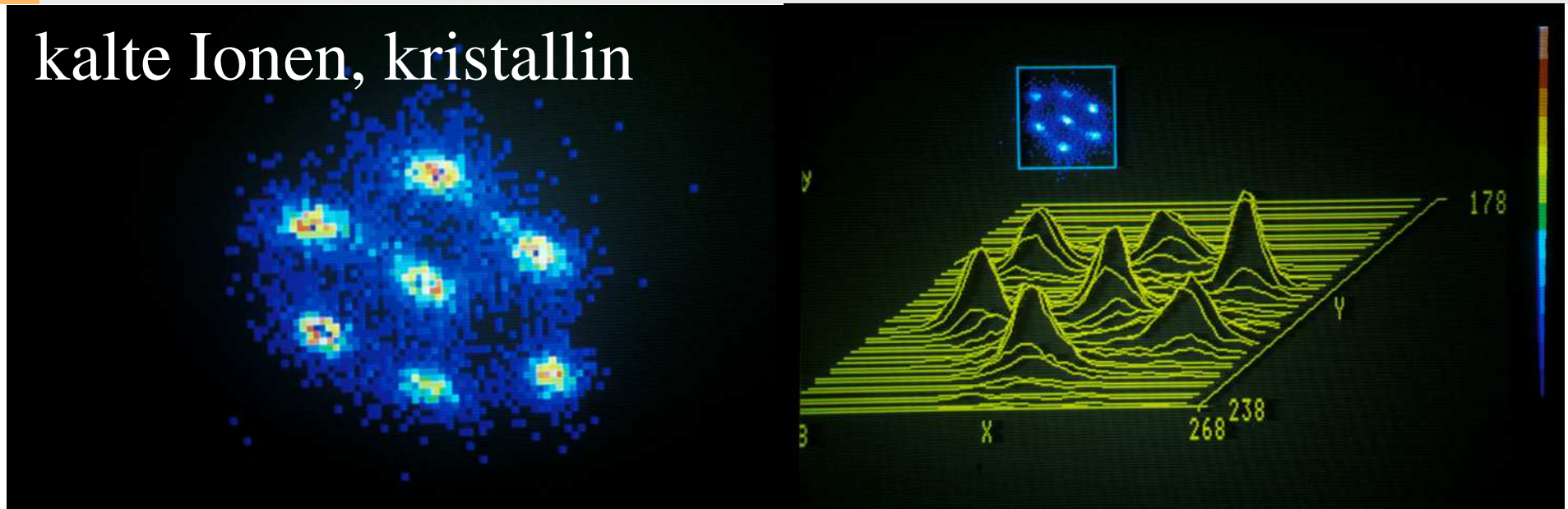
Erste Beobachtung von Ionenkristallen in einer Paul-Falle (MPI für Quantenoptik)





Flacher Ionenkristall in einer Paul-Falle (Abstand zwischen Ionen: 25 Mikrometer)

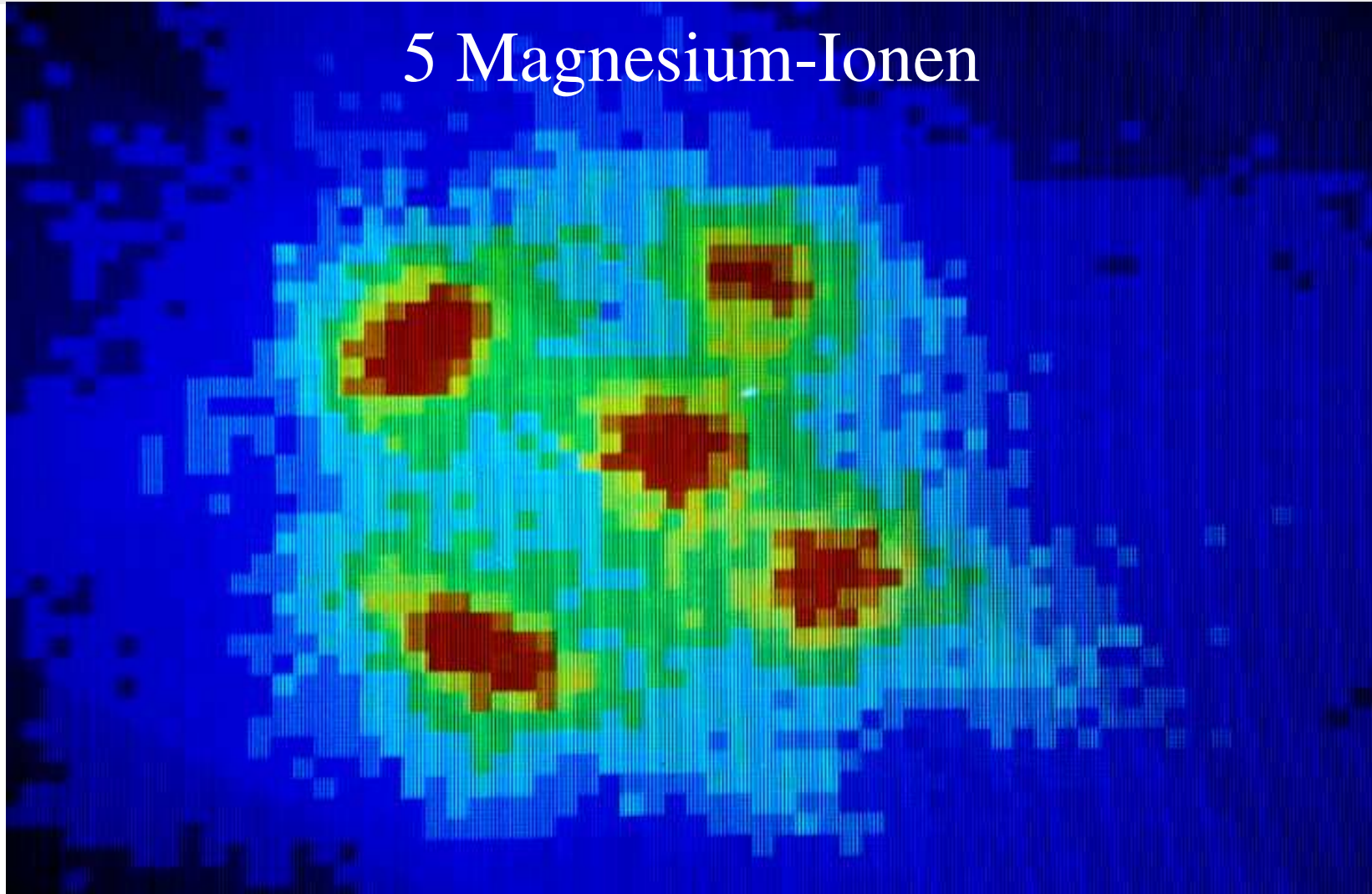
kalte Ionen, kristallin



heiße Ionen
in der Gasphase

Pyramidenförmiger Ionenkristall in einer Paul-Falle (Abstand zwischen Ionen: 25 Mikrometer)

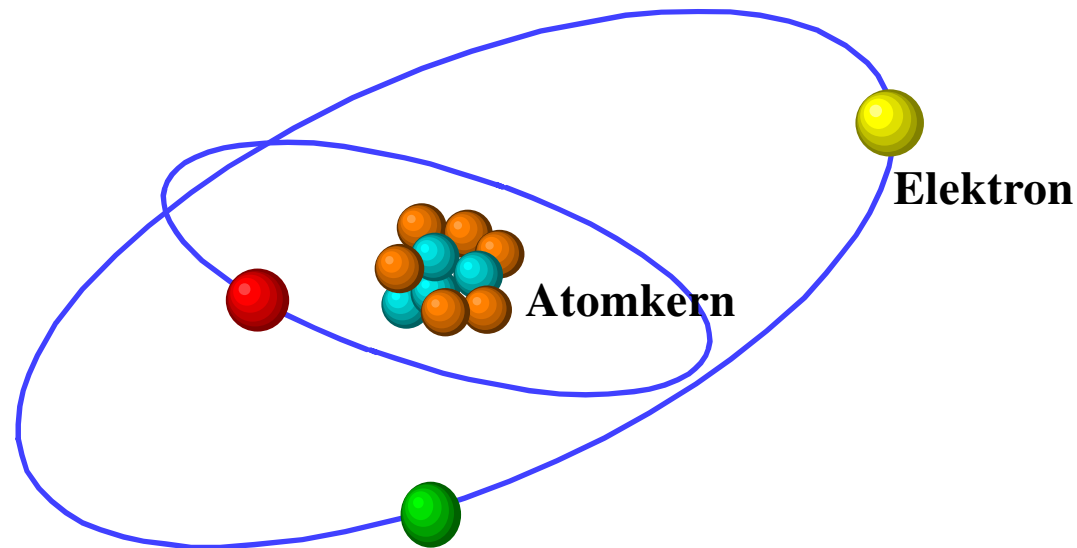
5 Magnesium-Ionen



50. Jahrestag der Gründung der Max-Planck-Gesellschaft



- **Quant = Energiepaket**



- **nur bestimmte Bahnen erlaubt**
- **Quantensprung: Übergang zwischen zwei Bahnen**

Quantenmechanik (1925-1928)

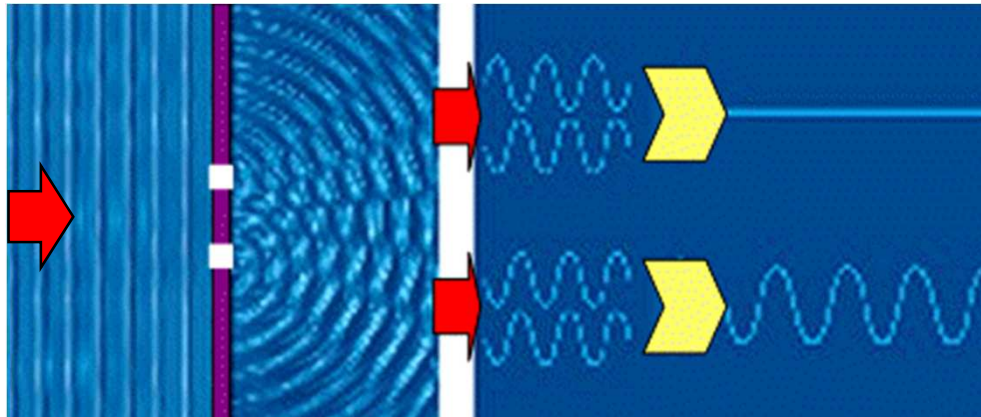


Werner
Heisenberg



Paul Dirac

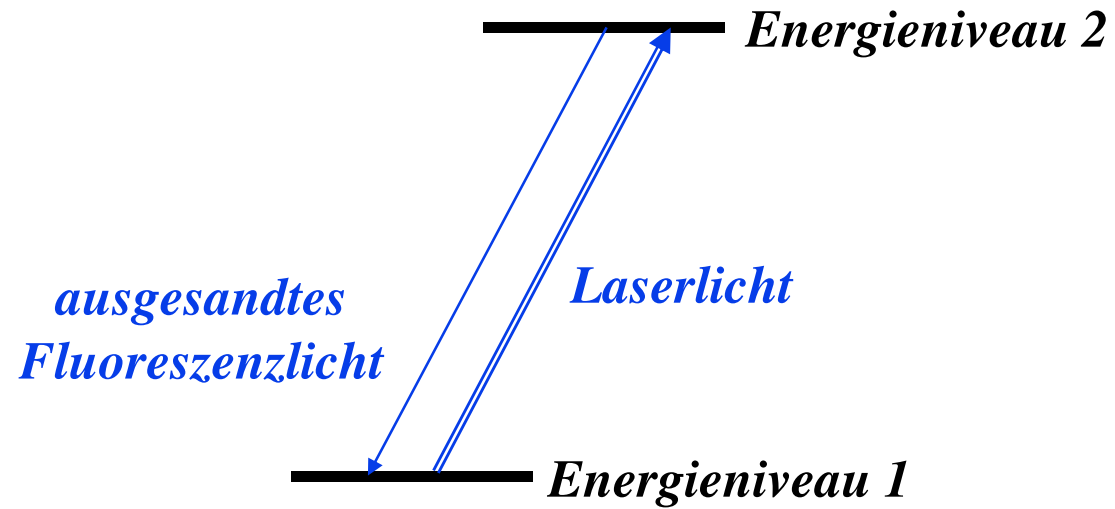
**Jedes Teilchen ist
auch eine Welle.**

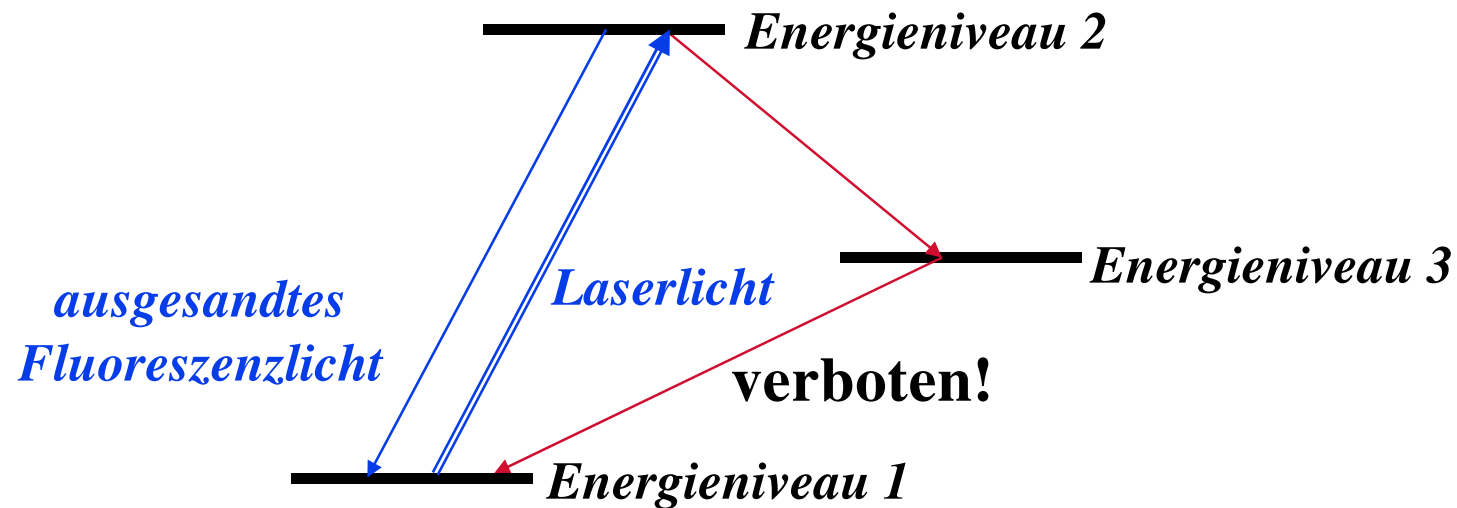


**Eine Welle kann nicht wie ein
Teilchen lokalisiert werden.**



Quantensprünge eines Atoms in der Paul-Falle



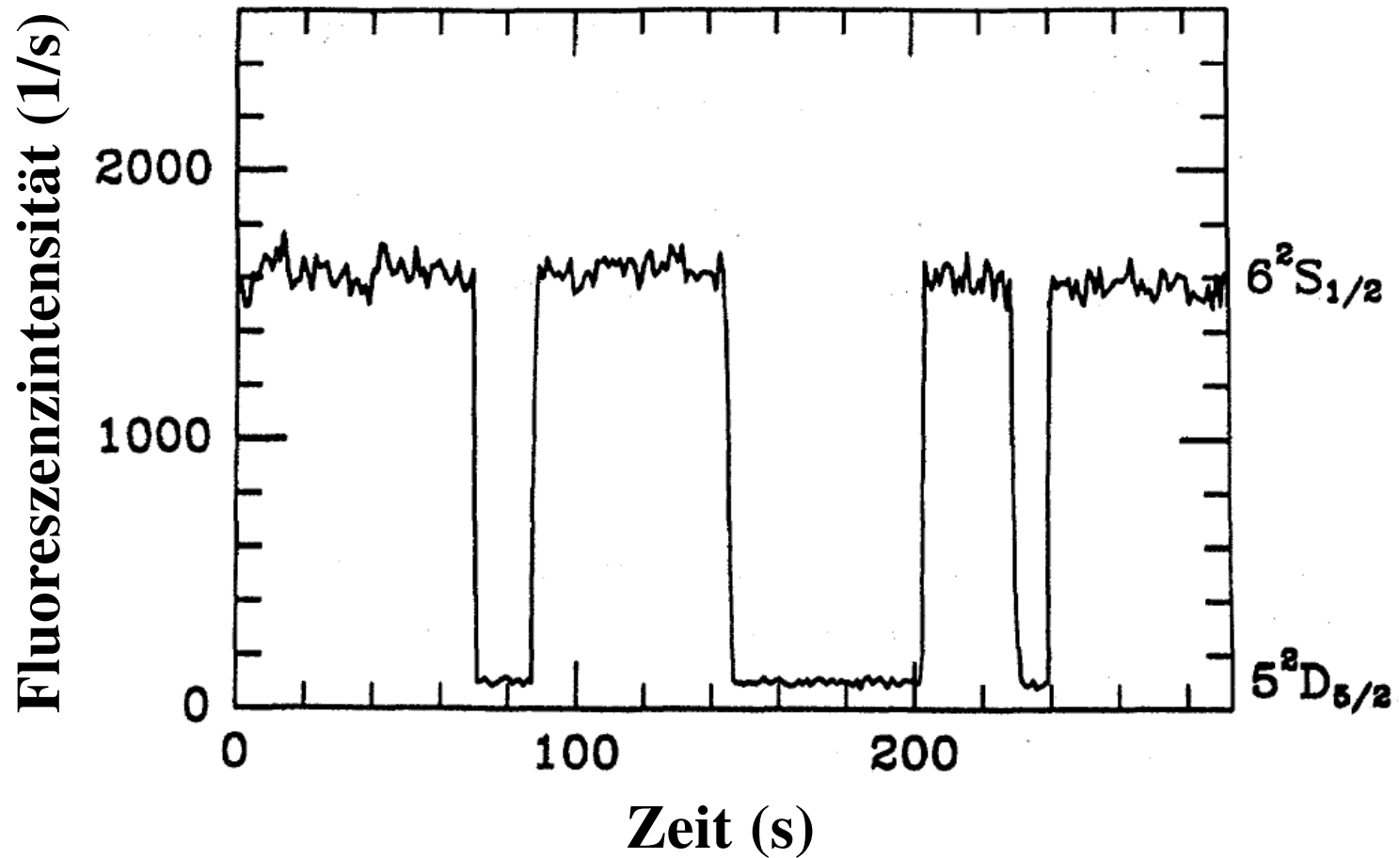


Das Fluoreszenzlicht hört auf, wenn sich das Atom im Energieniveau 3 befindet.

Anwendung: optische Uhr

Ungenauigkeit: 1 s seit dem Urknall vor 14 Mrd. Jahren

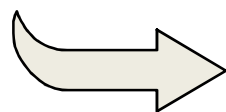
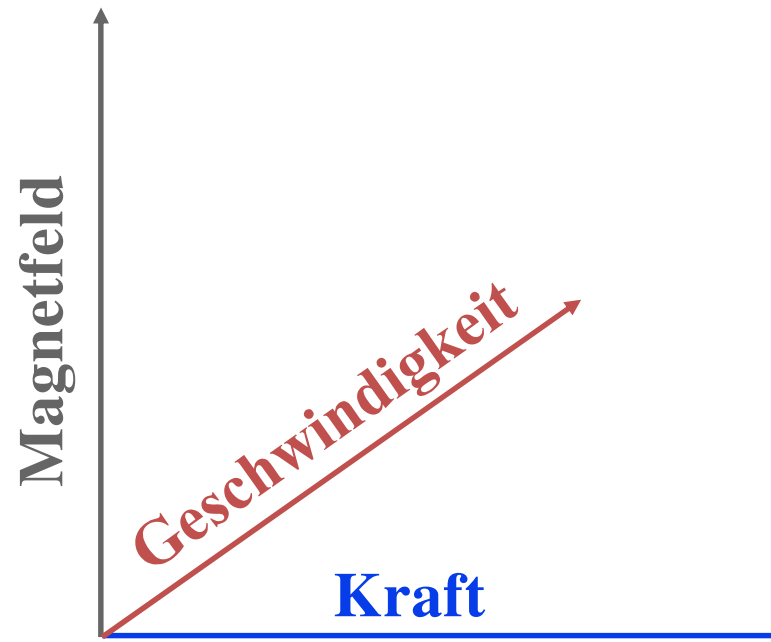
Beobachtung von Quantensprüngen eines Barium-Ions in der Paul-Falle



Lit.: H. Dehmelt et al., Phys. Rev. Lett. 1986

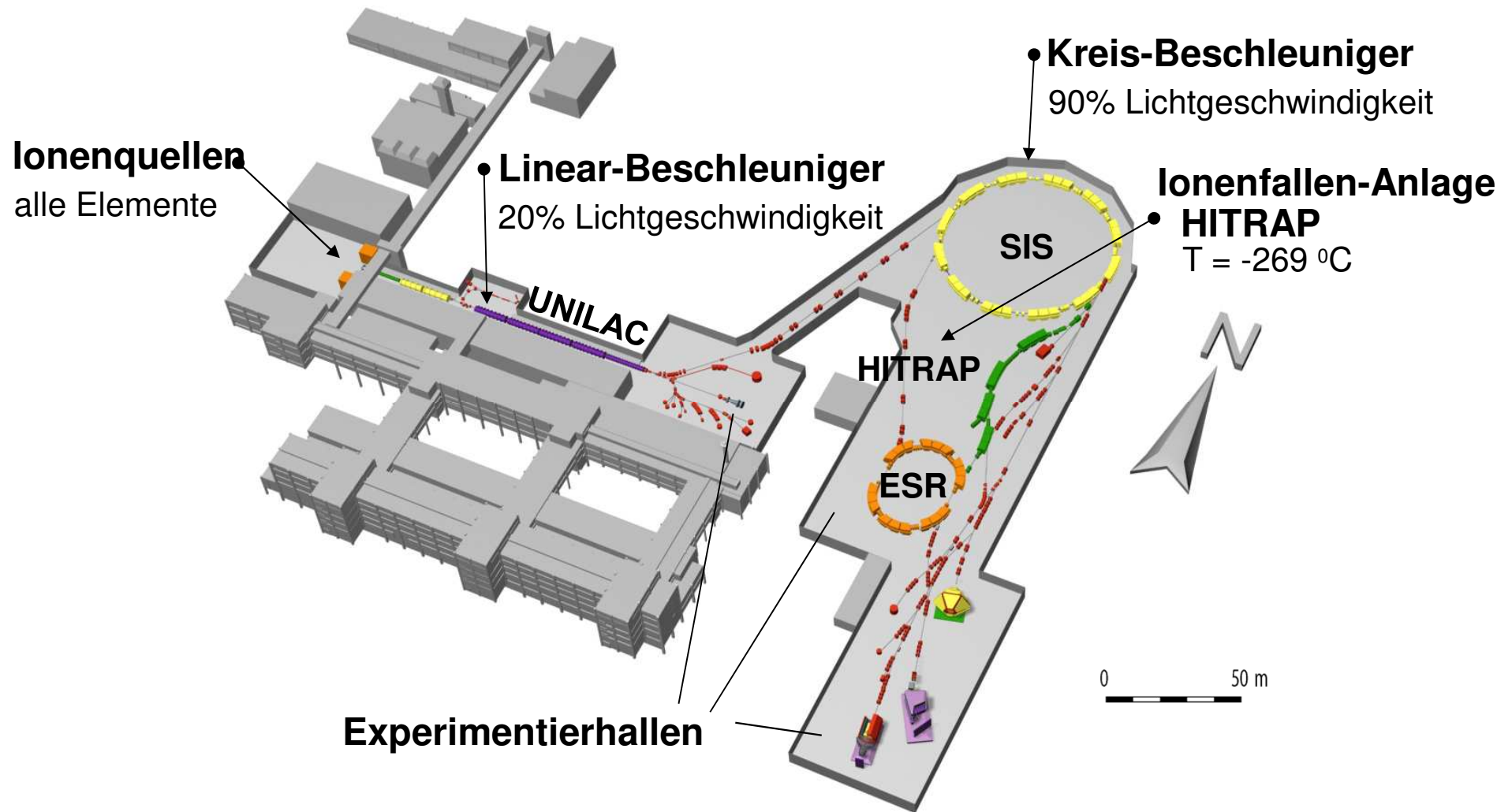
$$\text{Kraft} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Magnetfeld}$$

Dreifingerregel:



Penning-Falle
(*Hans Dehmelt*)

Beschleunigeranlagen der GSI





Large Hadron Collider (LHC)

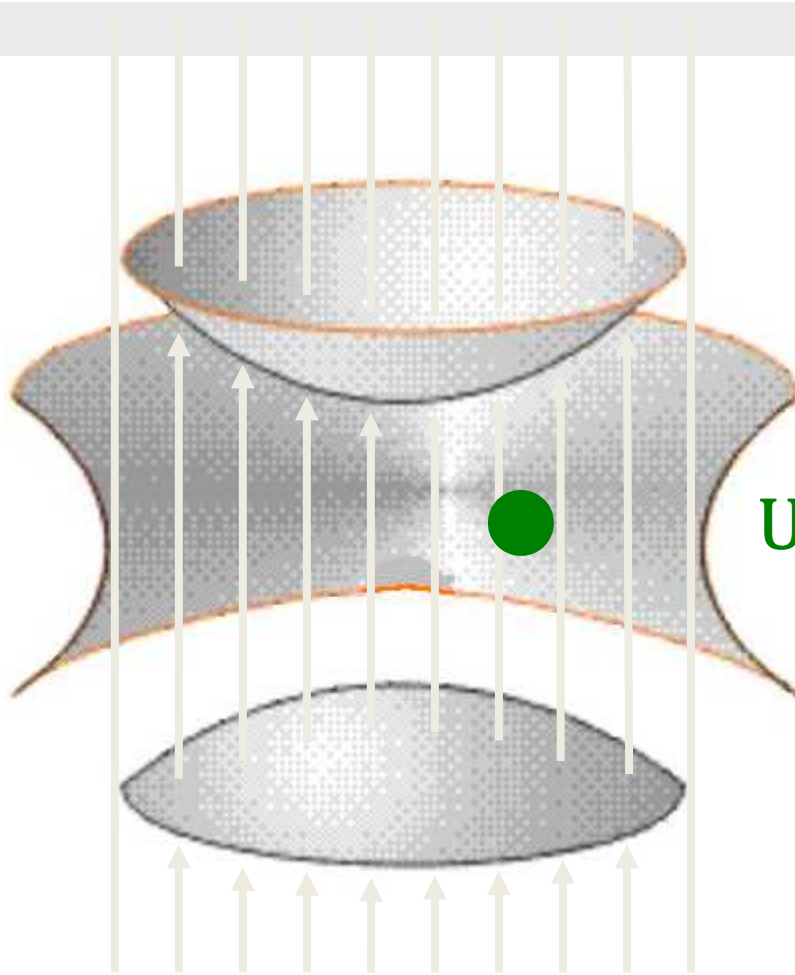
CERN, Genf, Umfang 27 km



Large Hadron Collider (LHC) 1232 supraleitende Magnete



Penning-Falle

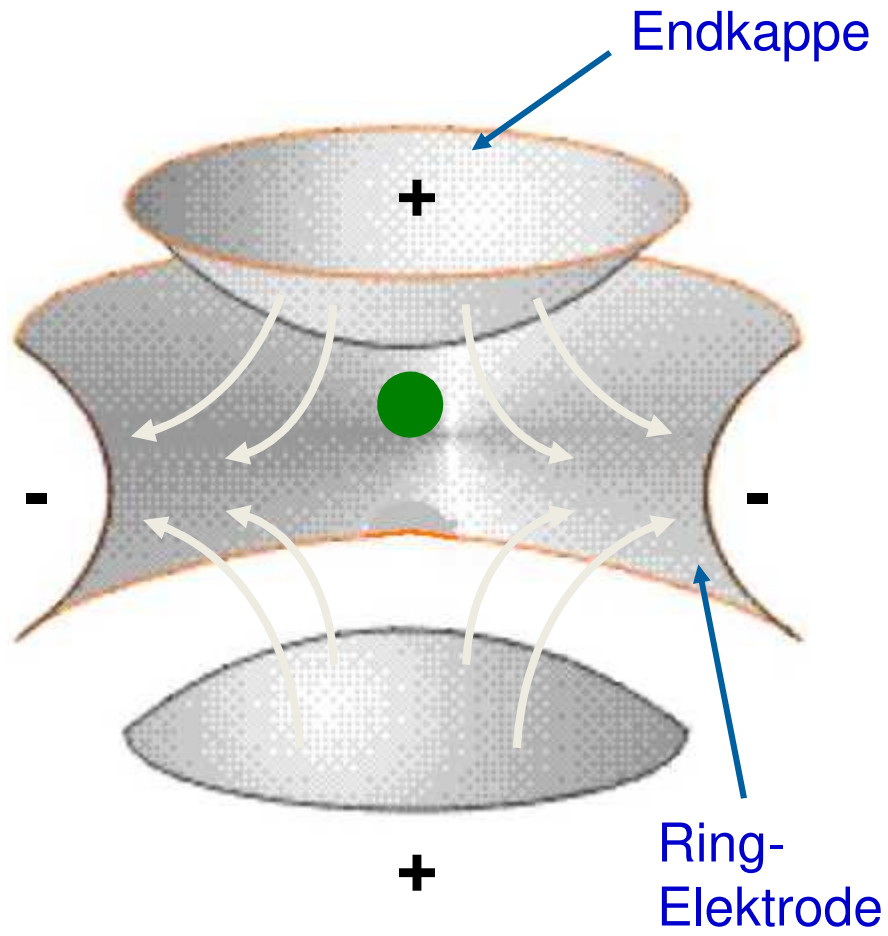


Magnetfeld

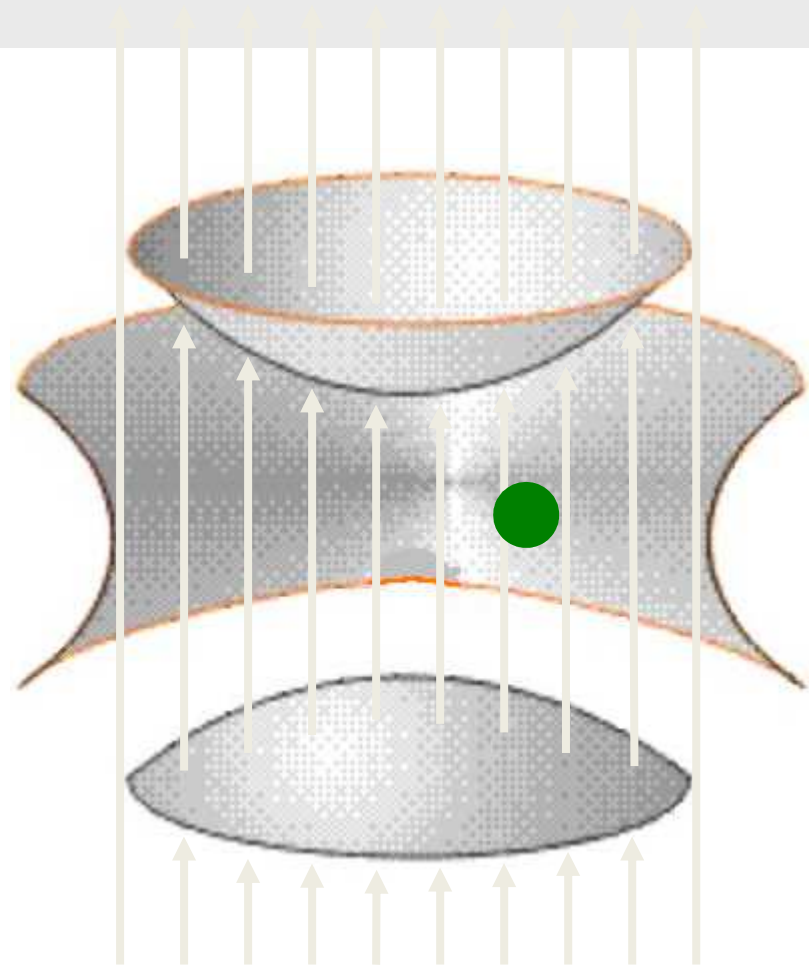
$$\text{Umlaufszeit} = \frac{\text{Masse des Ions}}{\text{el.Ladung} \times \text{Magnetfeld}}$$

- **Penning-Falle ist Massenspektrometer**
- **häufiger Einsatz in der Chemie zur Analyse**

Penning-Falle

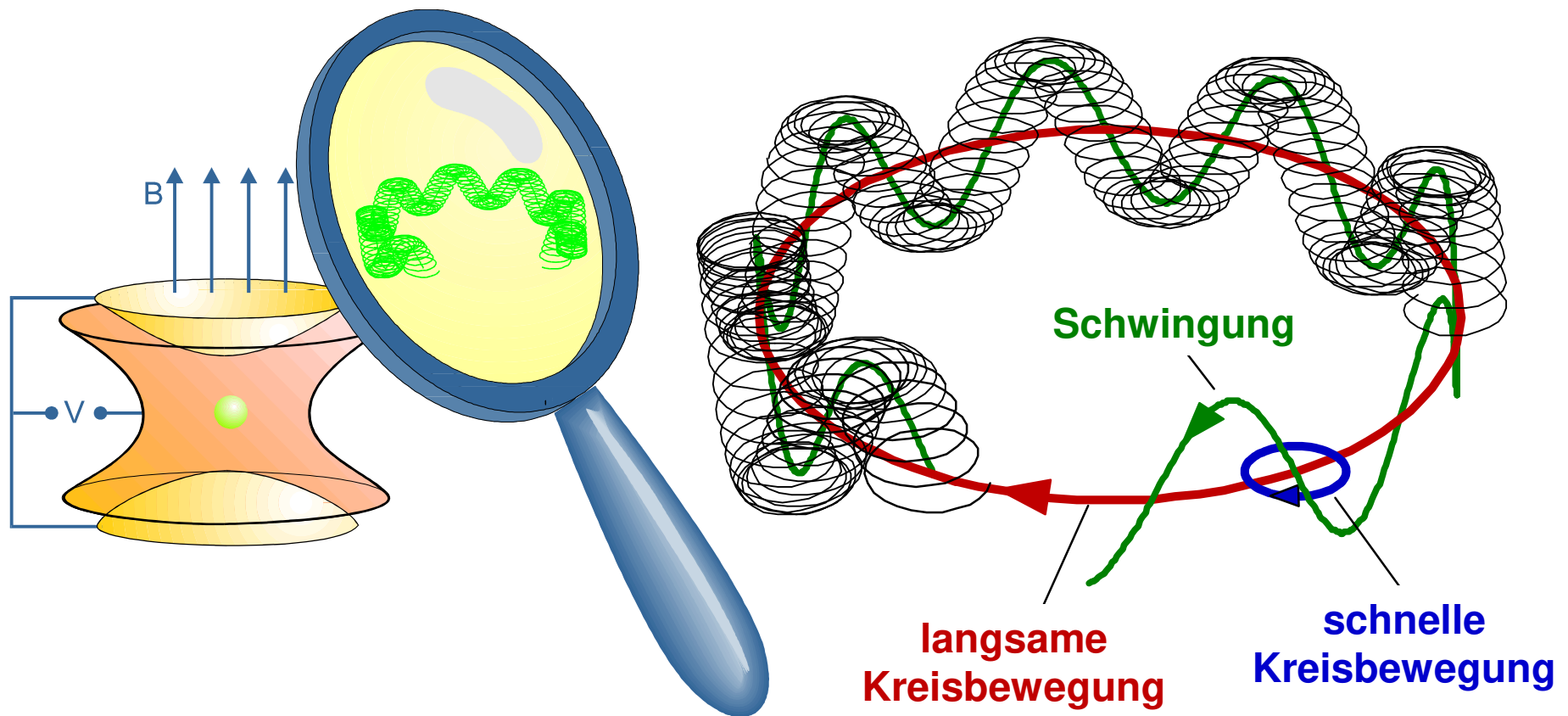


elektrisches Feld

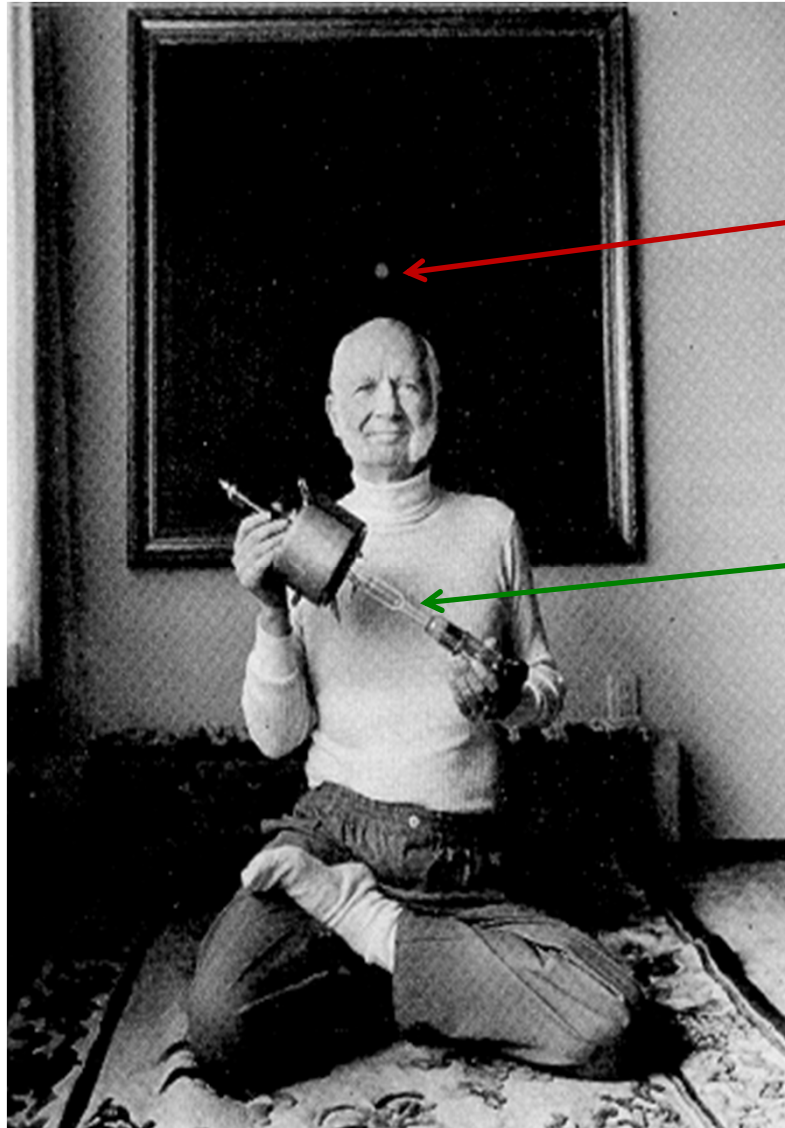


Magnetfeld

Bewegung in der Penning-Falle

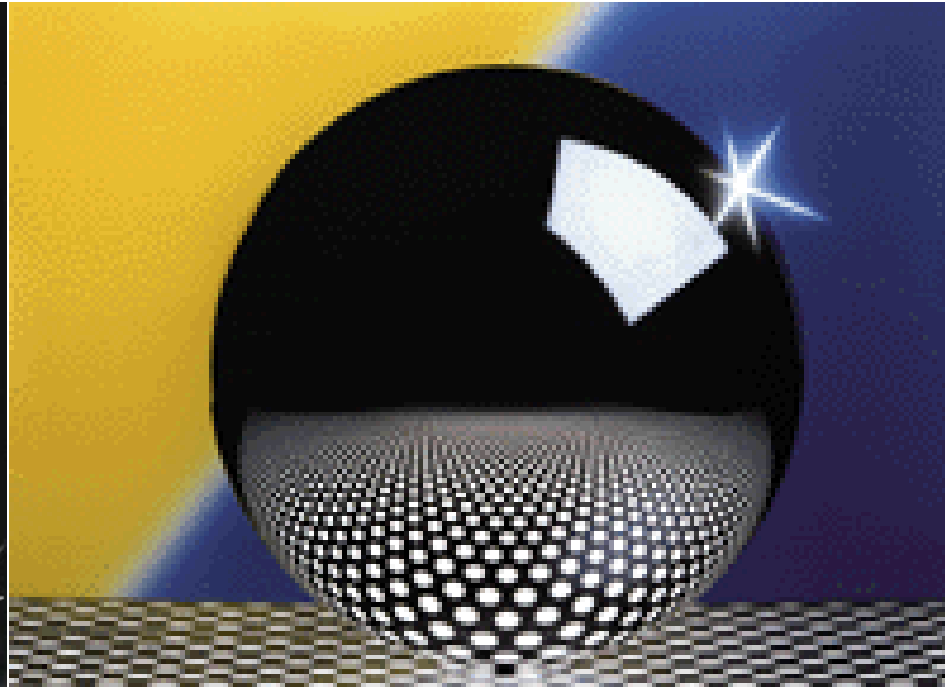


Hans Dehmelt, Penning-Falle und Astrid



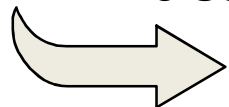
Astrid, das Barium-Ion

Penning-Falle



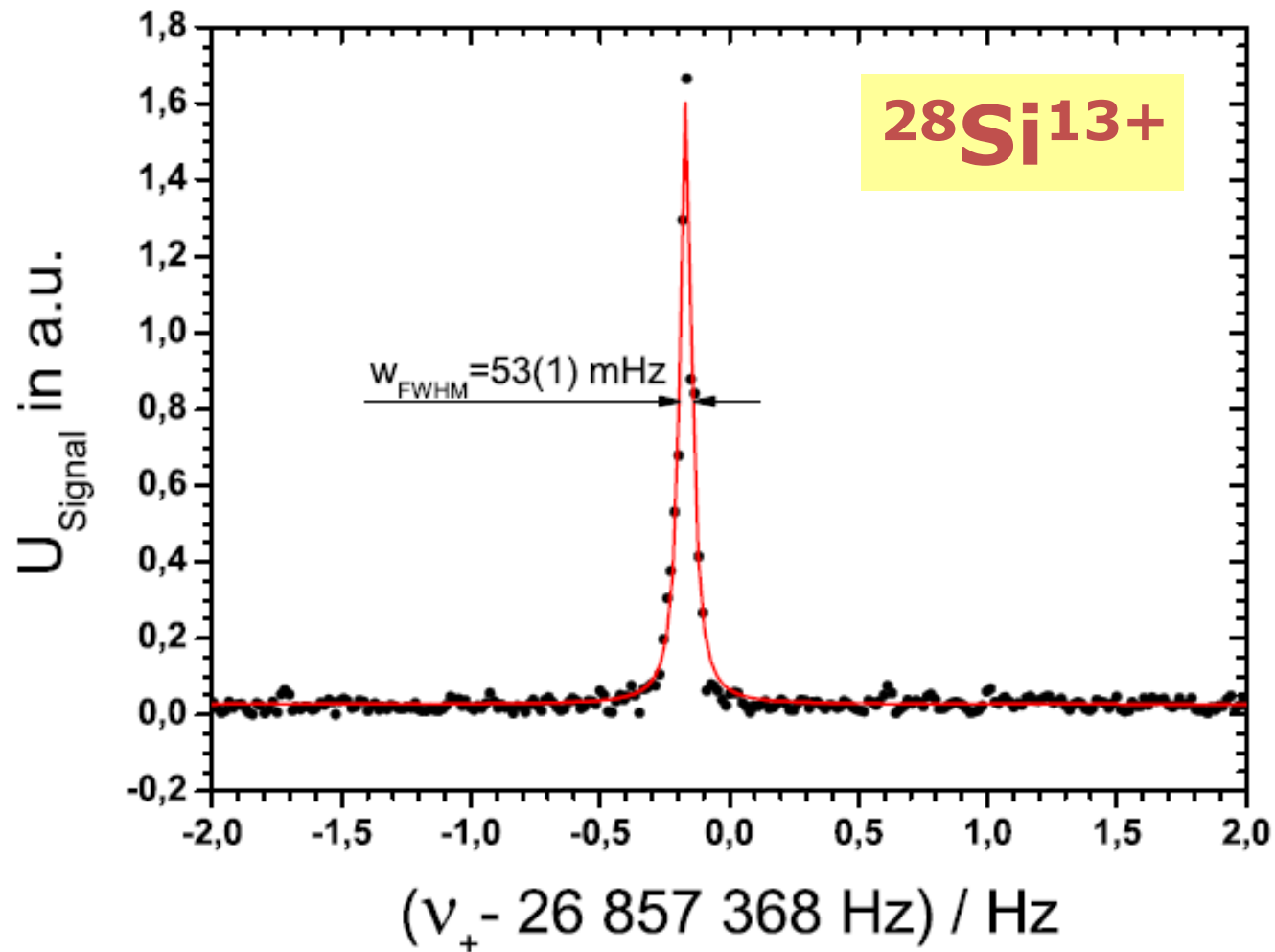
Rezeptur:

- perfekter kugelförmiger Siliziumkristall
- reproduzierbar
- **Wie schwer ist ein Silizium-Atom?**

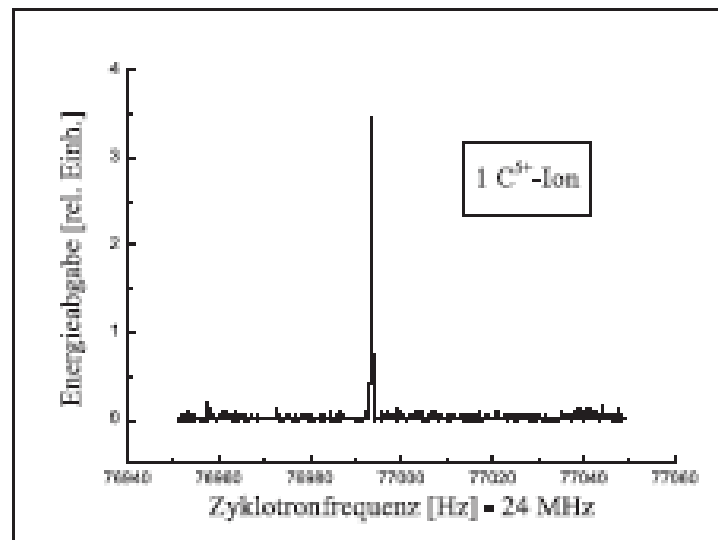
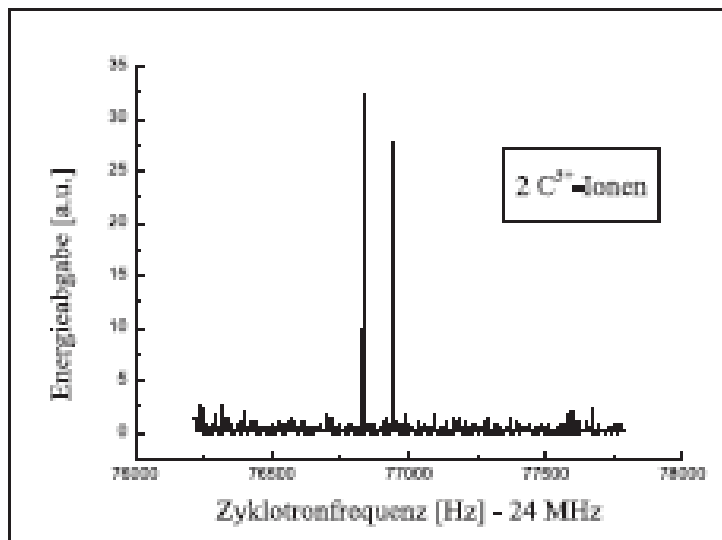
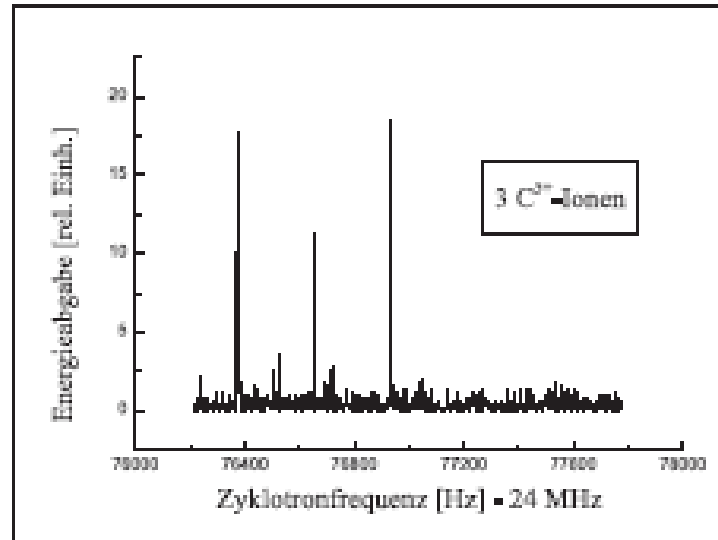
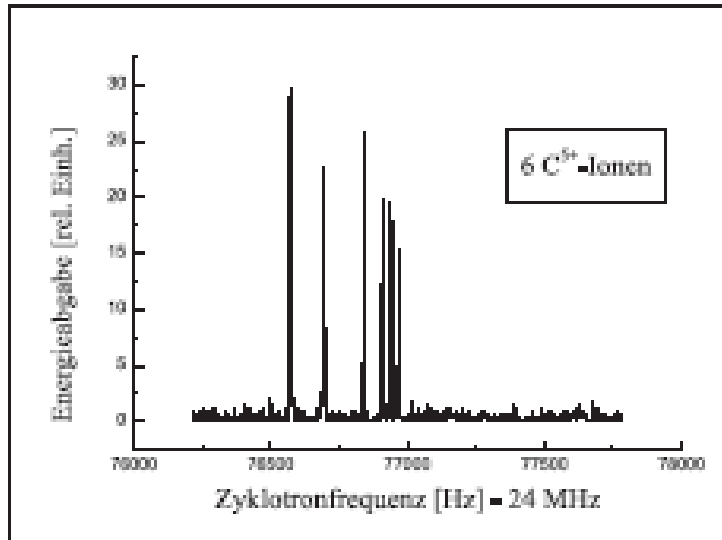


Massenmessung in der Penning-Falle

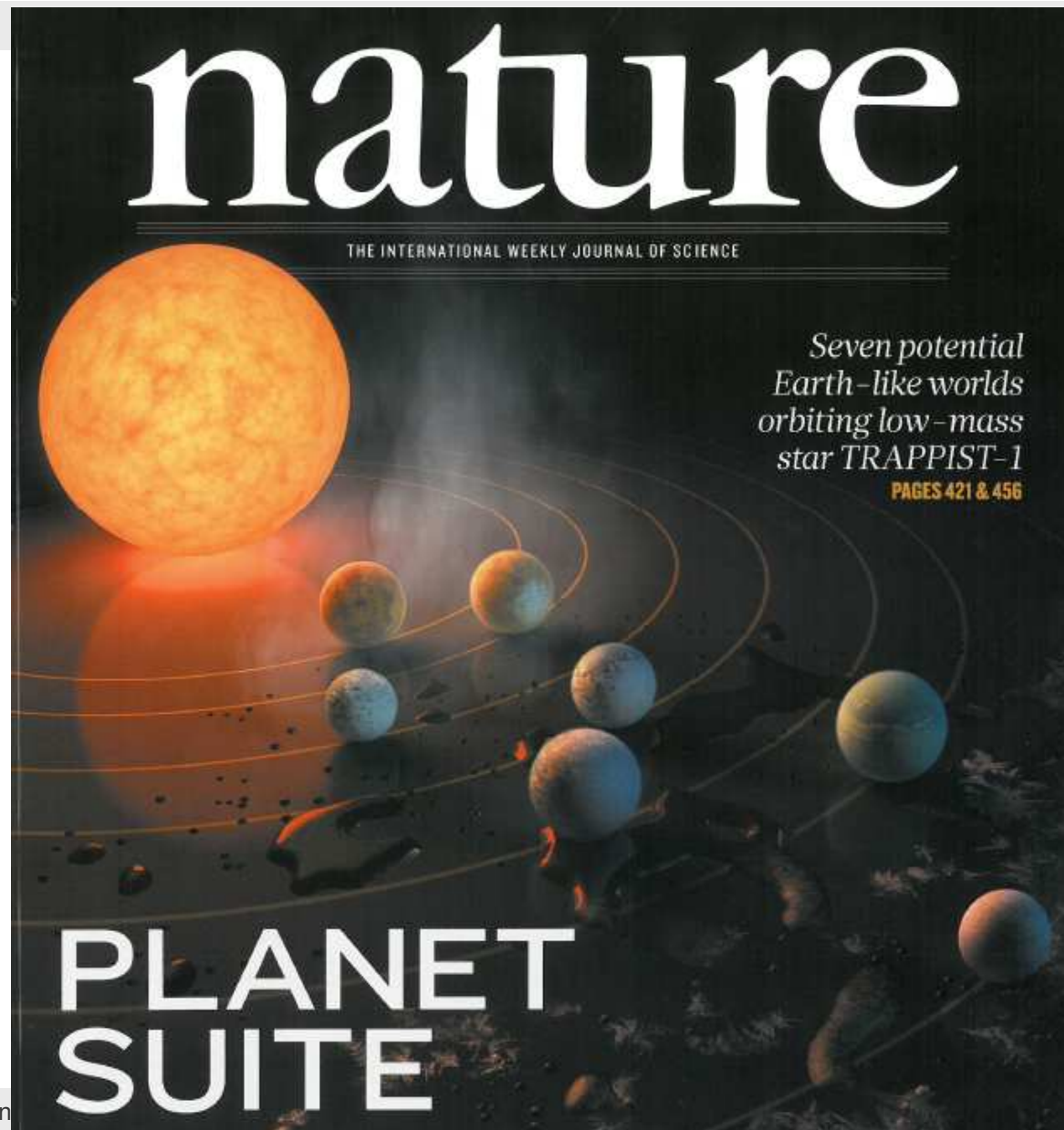
Präzisionsexperimente an einem einzelnen Silizium-Ion



“Wenige” Kohlenstoff-Ionen in einer Penning-Falle



Ionen in einer Penning-Falle sind wie ein Planetensystem

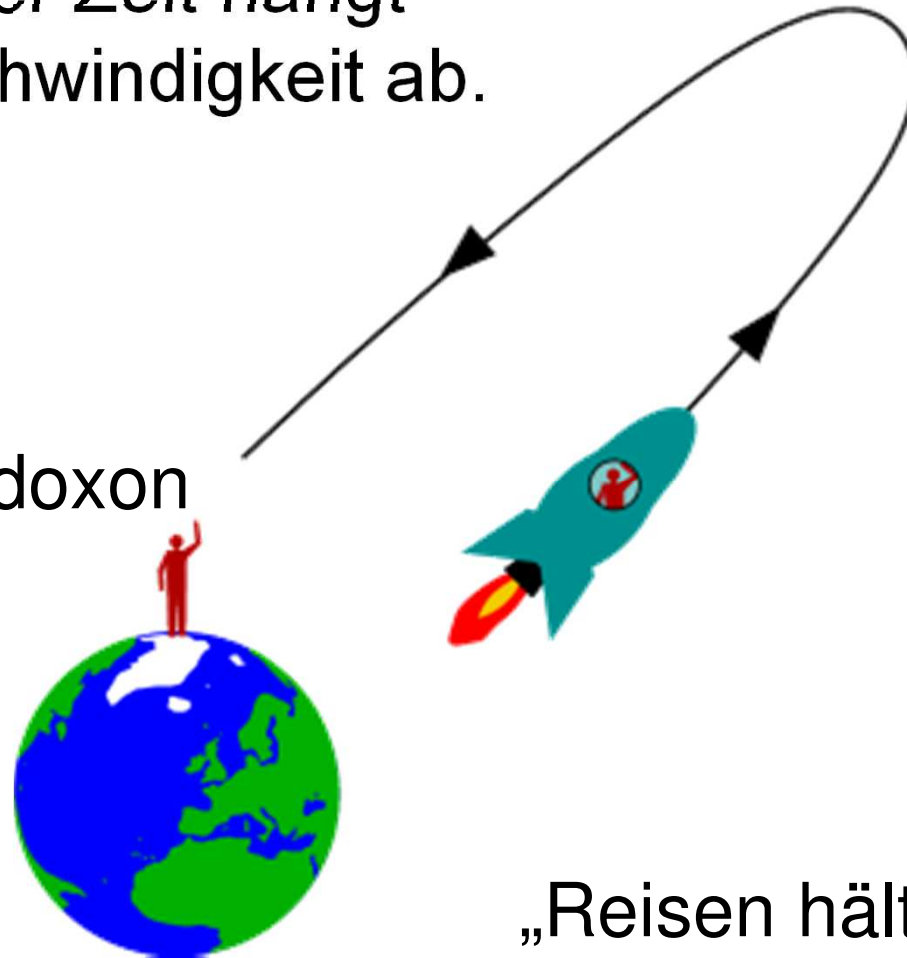


Aufbaukurs Physik II: Spezielle Relativitätstheorie (Albert Einstein, 1905)



Der Verlauf der Zeit hängt von der Geschwindigkeit ab.

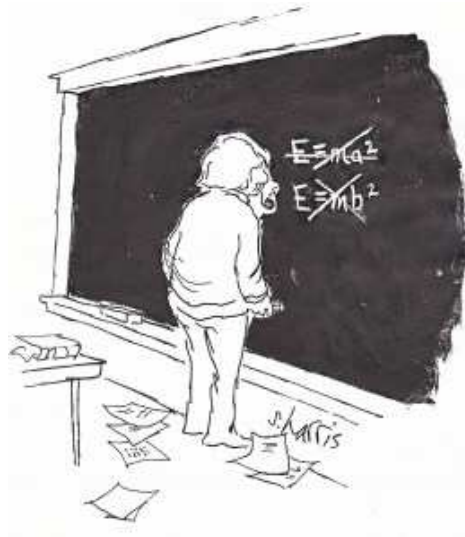
Zwillingsparadoxon



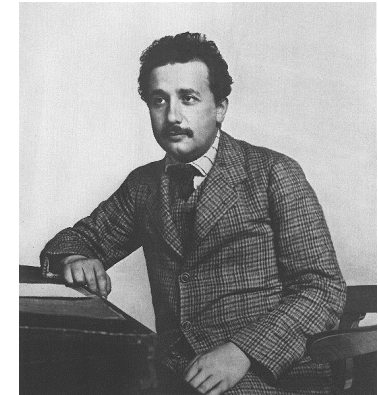
„Reisen hält jung.“

Quelle: <http://www.einstein-online.info>

Spezielle Relativitätstheorie (1905)



$$E = m \cdot c^2$$



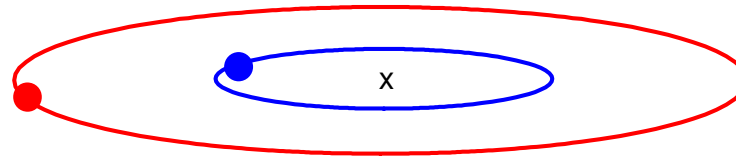
Energie = Masse mal Lichtgeschwindigkeit²

$c \approx 300\,000 \text{ km / s} = 1080 \text{ Millionen km pro Stunde}$

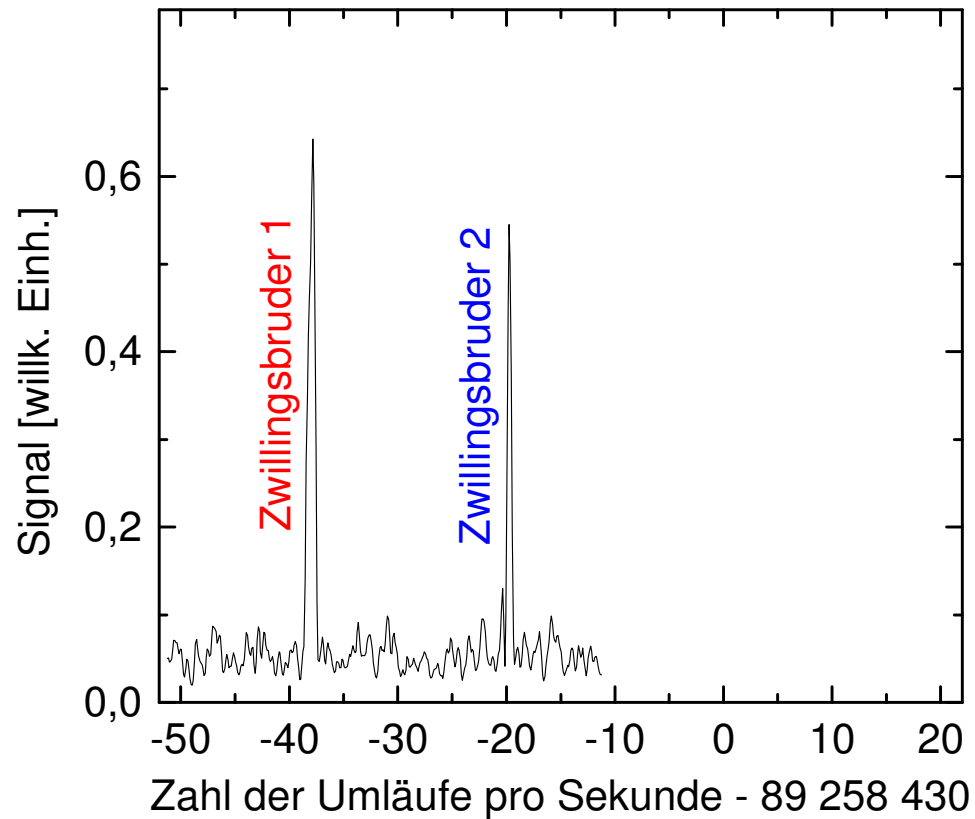
Energie und Masse können ineinander umgewandelt werden.

Zwillingsparadoxon mit zwei Antiprotonen in einer Penning-Falle

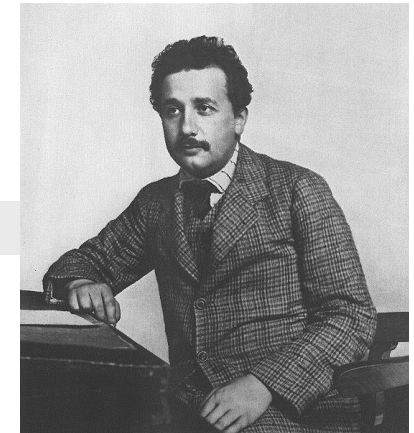
*Diese beiden Antiprotonen waren 60 Tage lang
in der Falle*



x : Zentrum der Falle

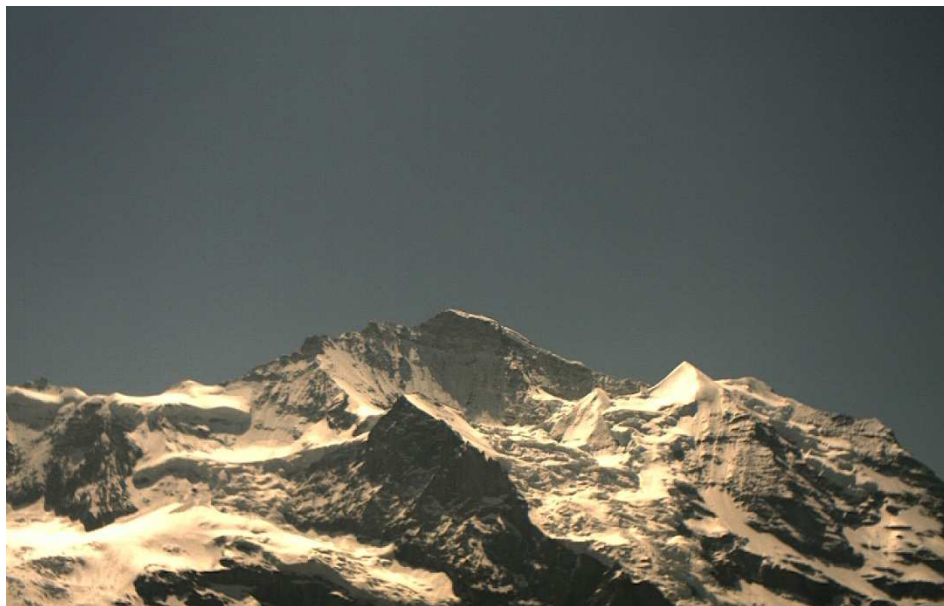


Allgemeine Relativitätstheorie (1915)



- **Raum und Zeit hängen von der Schwerkraft ab.**
- **Die Schwerkraft krümmt den Raum.**

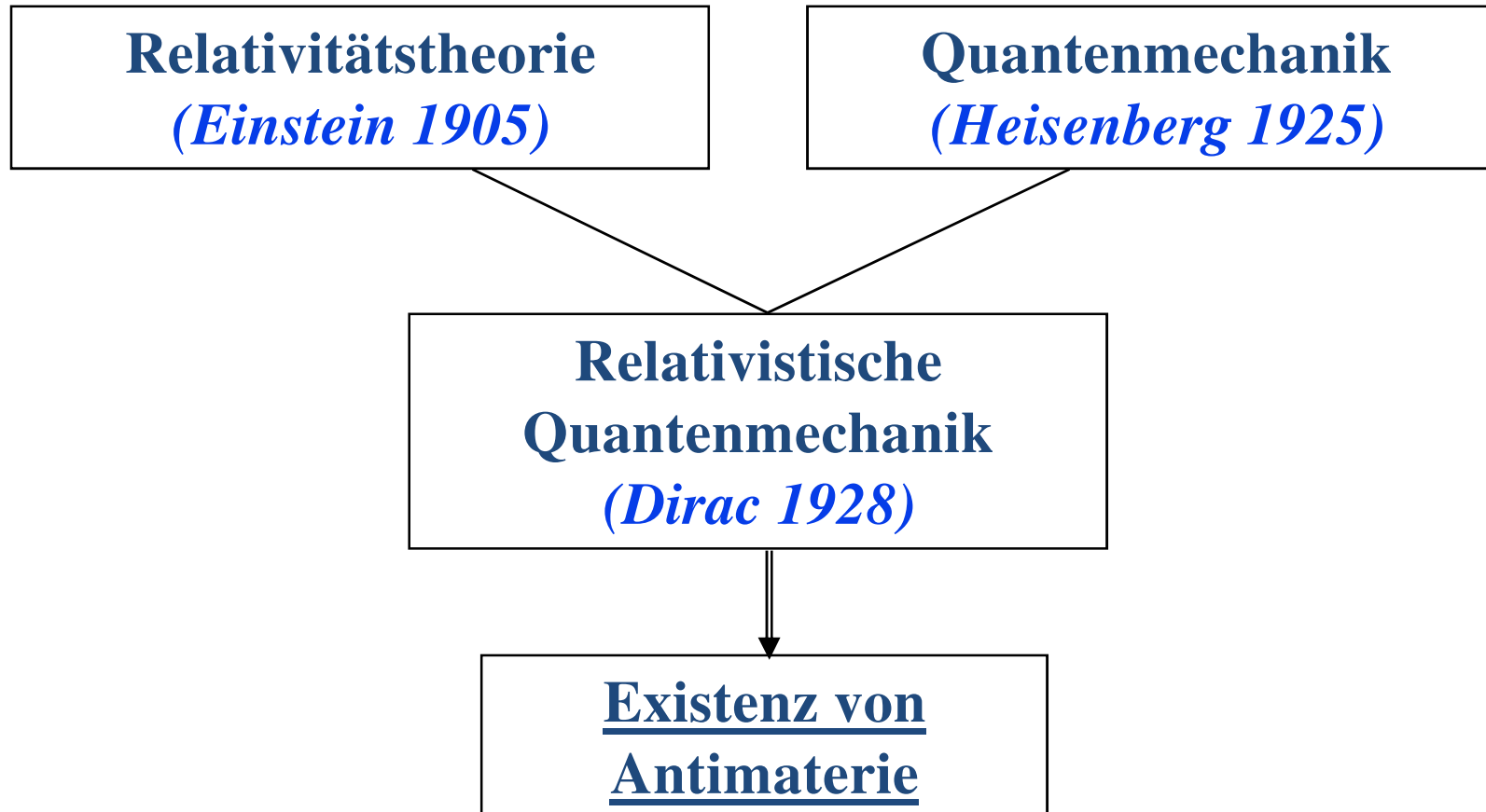
In den Bergen vergeht die Zeit schneller als im Tal.



(Jungfrau-Massiv, Berner Oberland)



Physik für Fortgeschrittene: Relativistische Quantenmechanik



Physik für Fortgeschrittene: Relativistische Quantenmechanik



*“God used beautiful mathematics
in creating the world.”*

*“Gott verwendete wunderschöne,
Mathematik, als er die Welt
erschuf.”*

Paul Dirac

Dies ist keine Antimaterie!



Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie



Welt

Antiwelt

Masse

=

Masse

Ladung

=

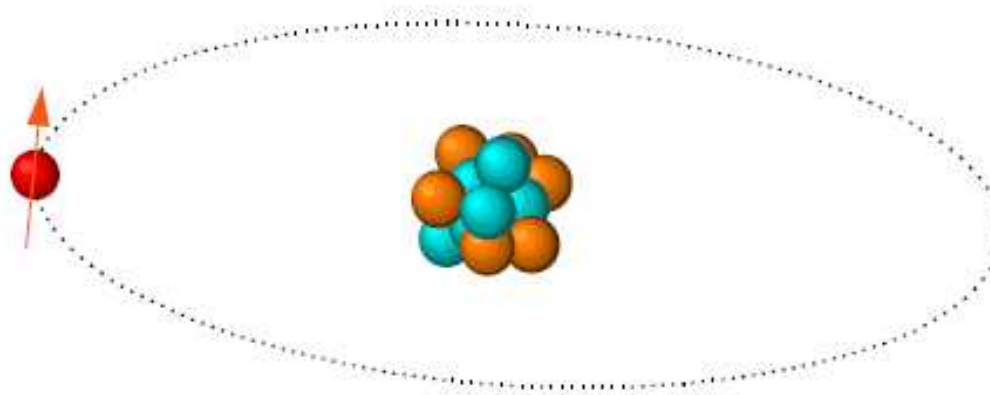
- Ladung

Lebensdauer

=

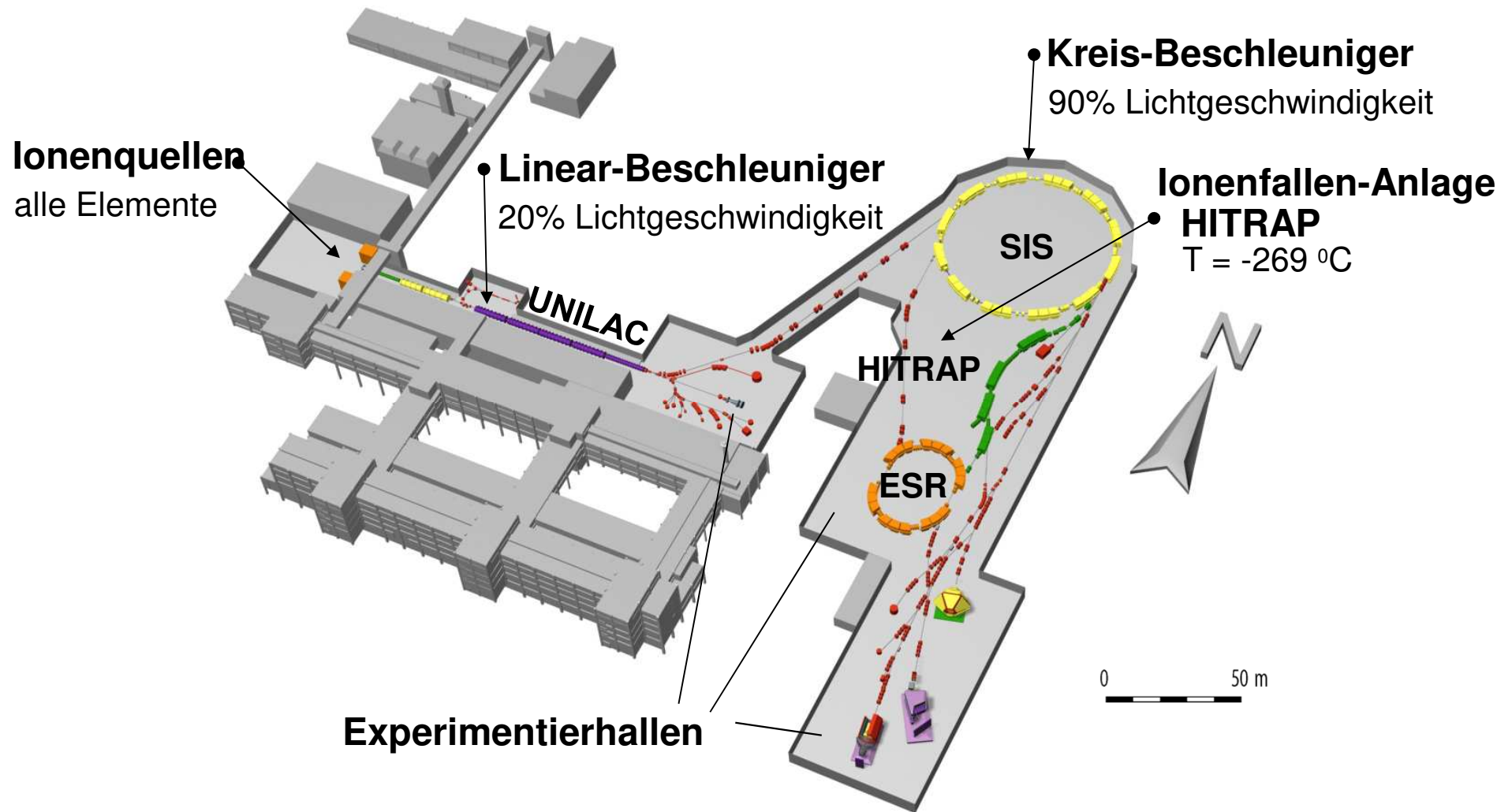
Lebensdauer

Relativitätstheorie und hochgeladene schwere Ionen



- *relativistische Zeitdehnung (Zwillingsparadoxon)*
- *Aufschluß über Geschwindigkeit des Elektrons*
- *Erforschung der Quantenmechanik
in schweren Ionen*

Beschleunigeranlagen der GSI

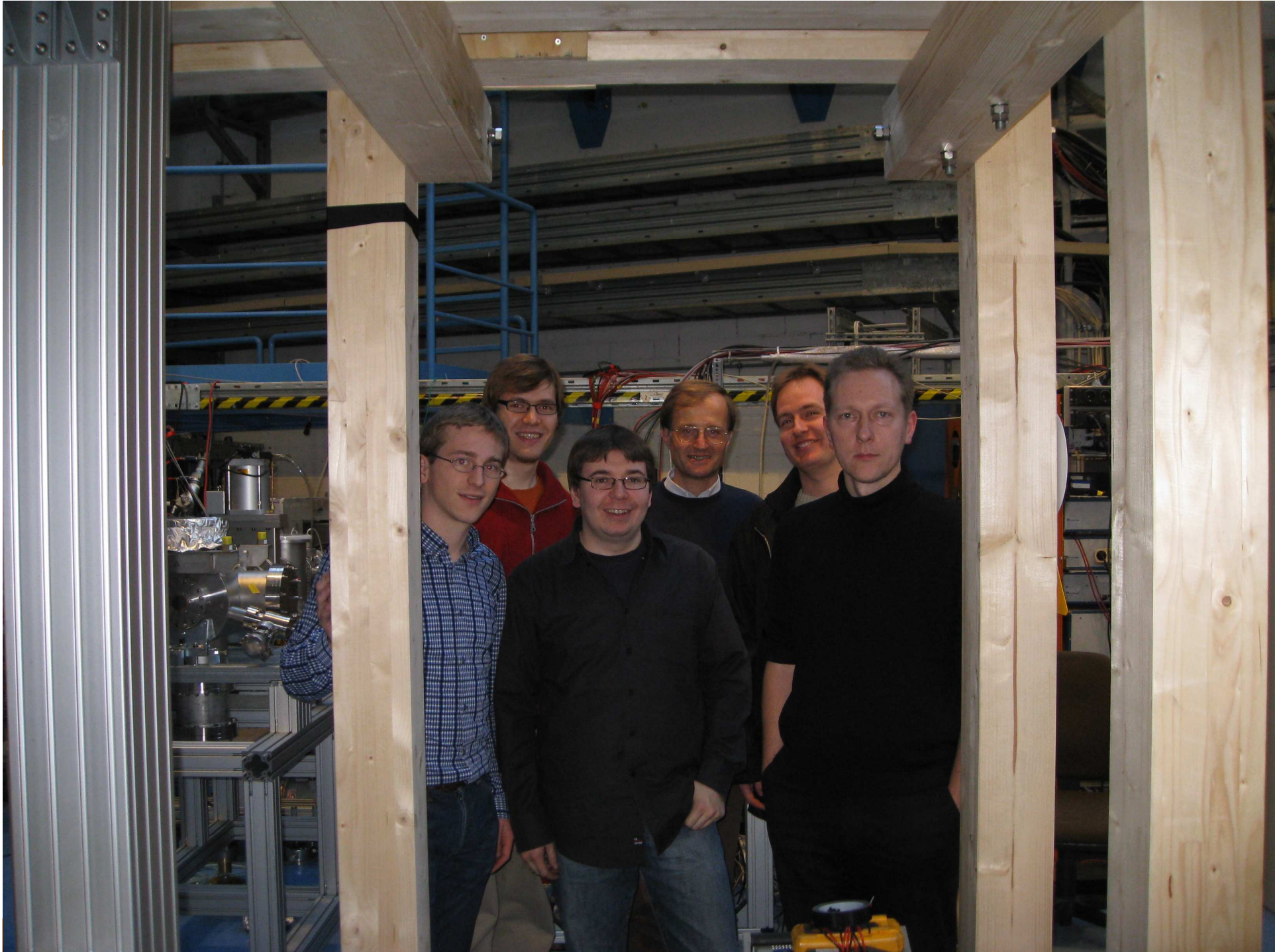


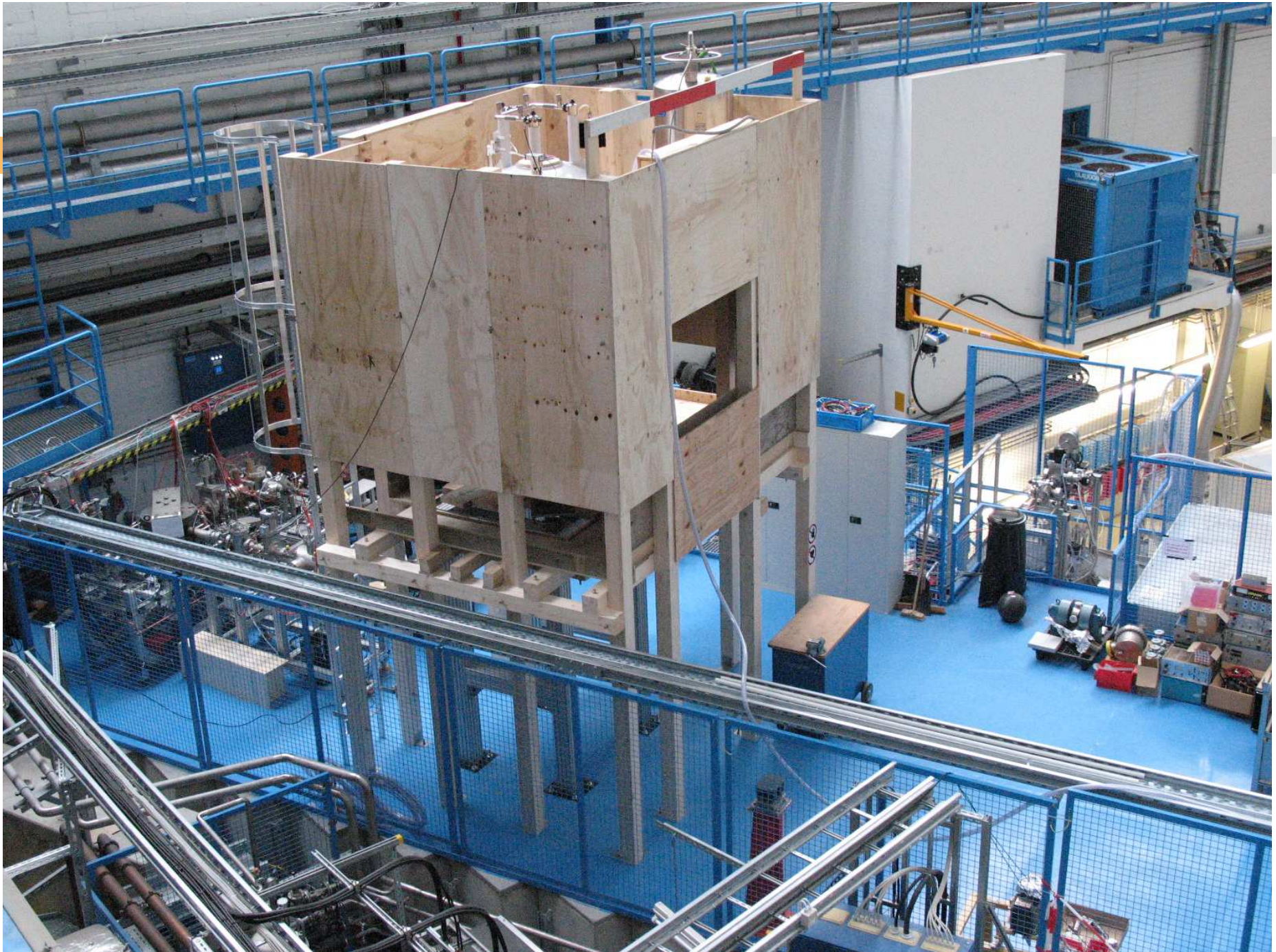


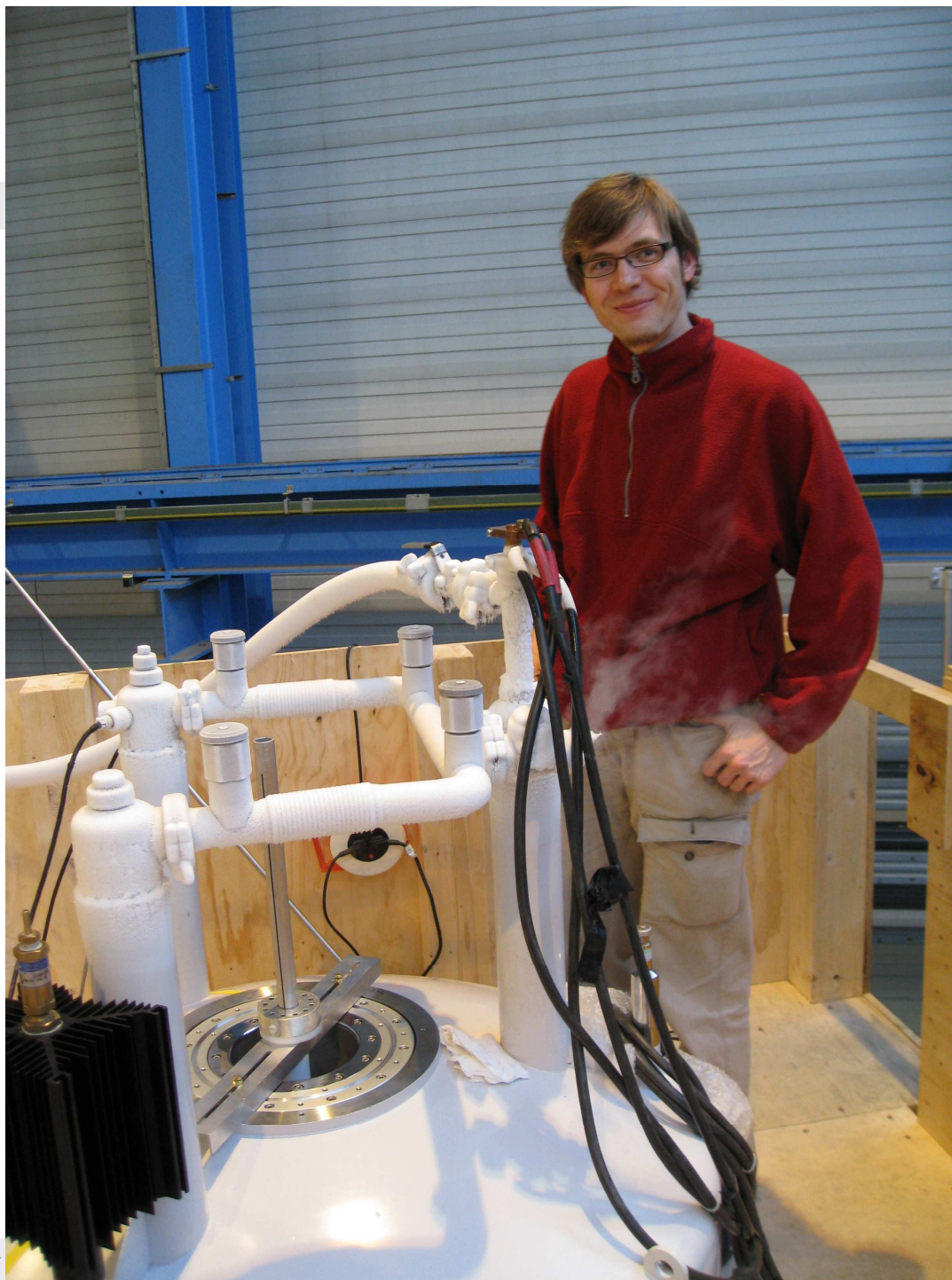








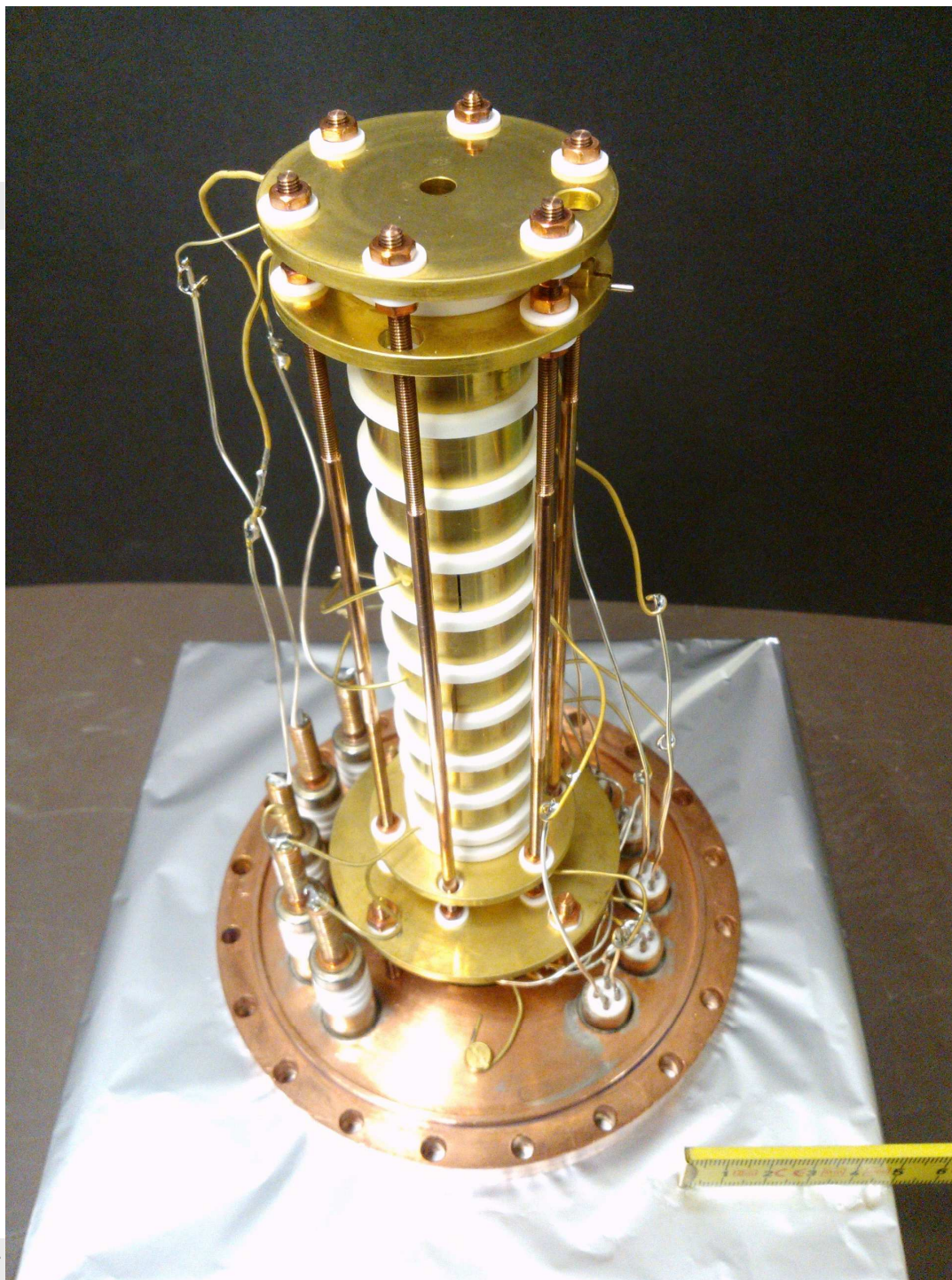




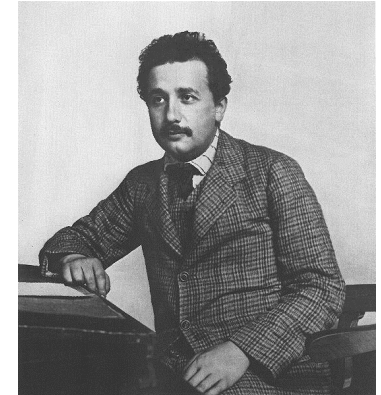
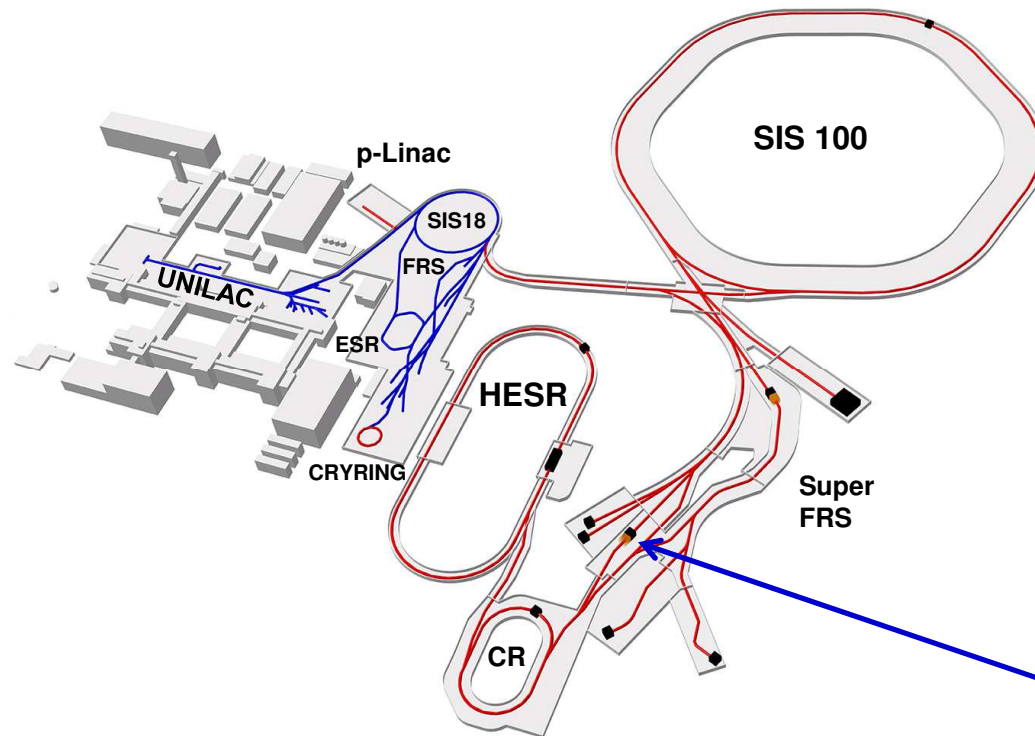








FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research



$$E = m \cdot c^2$$

**Erzeugung
von Antiprotonen**

FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research



A horizontal bar spans the width of the slide, starting with a small orange square on the left and transitioning to a light gray bar.

**Ich danke Ihnen
für Ihre Aufmerksamkeit**