

# Manipulation isolierter Quantensysteme

Andreas Brakowski

Universität Bielefeld

19.06.2012

# Inhaltsverzeichnis

## 1 Motivation

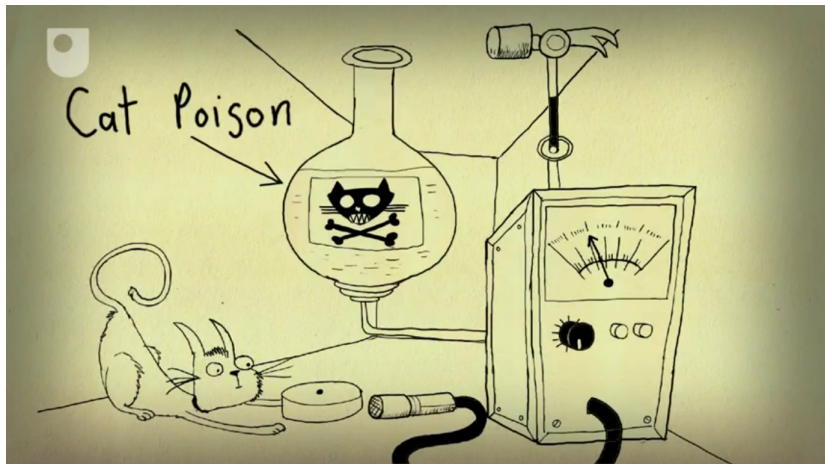
- Gedankenexperiment: Schrödingers Katze
- Messen in der Quantenmechanik

## 2 Experiment

- Ionenfalle
- Photonenresonator

## 3 Anwendungen

# Schrödingers Katze



# Schrödingers Katze

Was passiert in der Box?

- Zählrohr registriert Zerfall des Atomkerns
- Gift wird dadurch freigesetzt
- Katze stirbt

# Schrödingers Katze

Was hat das mit Quantenmechanik zu tun?

- Der Zerfall des Atomkerns ist "zufällig"
- Können nur statistische Vorhersage für viele Atomkerne treffen
- Wissen nicht, ob Katze tot oder lebendig ist, solange wir nicht nachschauen
- Quantenmechanik gibt uns die Antwort

# SCHRÖDINGER'S CAT IS A LEAVE

# Schrödingers Katze

## Interpretation

- Der Zustand der Katze ist an den des Atomkerns gebunden
- Es existieren zwei Zustände in Superposition

$$|\Psi\rangle = |\textit{lebend}\rangle + |\textit{tot}\rangle$$

- Messen des Zustands  $\hat{=}$  Zerstören desselbigen

# Schrödingers Katze

## Dekohärenz

- Grundzüge der Dekohärenztheorie gehen auf Dieter Zeh zurück (1970)
- Bei Wechselwirkung eines q.m. Systems mit der Umgebung
  - Überlagerte Zustände tendieren zum Zerfallen
  - Wellenfunktion kollabiert



# Schrödingers Katze

## Dekohärenz

- Grundzüge der Dekohärenztheorie gehen auf Dieter Zeh zurück (1970)
- Bei Wechselwirkung eines q.m. Systems mit der Umgebung
  - Überlagerte Zustände tendieren zum Zerfallen
  - Wellenfunktion kollabiert
- Ursache: Verschränkung ("entanglement")
  - nicht-physische Verbindung zweier oder mehrerer Teilchen
  - Teilchen haben immer dieselben physikalischen Eigenschaften

# Schrödingers Katze

## Bemerkungen

- **Sehr** umstritten
  - Katze ist makroskopisches System
  - Messung in QM viel diskutiertes Feld

# Schrödingers Katze

## Bemerkungen

- **Sehr** umstritten
  - Katze ist makroskopisches System
  - Messung in QM viel diskutiertes Feld
- Verschiedene Deutungen
  - hier: Kopenhagener Deutung
  - Viele-Welten-Interpretation
  - Ensembletheorie
  - Bohmsche Mechanik

# Messen in der QM

## Lineare Algebra

- Observablen durch Eigenwerte hermitescher Operatoren darstellbar
- Eigenvektoren  $\{|\phi_n\rangle\}$  bilden Basis des Hilbertraumes
- Jeder Zustand in diesem Hilbertraum eindeutig darstellbar

# Messen in der QM

## Der Messprozess nach John von Neumann

- Zustände sowohl der Messgröße, als auch des Messgeräts leben in eigenem Hilbertraum
- Basis des Messgerät-Hilbertraums:  $\{|M_n\rangle\}$
- $n$  sind die Zeigerstellungen des Messgeräts und werden durch die  $|M_n\rangle$  angezeigt

$$|\phi_n\rangle \otimes |M_0\rangle \xrightarrow{t} |\phi_n\rangle \otimes |M_n\rangle$$

- Eindeutige Zuordnung der Zustände

# Messen in der QM

## Der Messprozess nach John von Neumann

- Zustände sowohl der Messgröße, als auch des Messgeräts leben in eigenem Hilbertraum
- Basis des Messgerät-Hilbertraums:  $\{|M_n\rangle\}$
- $n$  sind die Zeigerstellungen des Messgeräts und werden durch die  $|M_n\rangle$  angezeigt
- Zeitentwicklung nach Schrödinger gibt Wechselwirkung von System mit Messgerät an

$$|\phi_n\rangle \otimes |M_0\rangle \xrightarrow{t} |\phi_n\rangle \otimes |M_n\rangle$$

- Eindeutige Zuordnung der Zustände

# Messen in der QM

## Das Messproblem

- Kein Problem bei Eigenzuständen, wie z.B.

$$|\phi_1\rangle \otimes |M_0\rangle \xrightarrow{t} |\phi_1\rangle \otimes |M_1\rangle$$

# Messen in der QM

## Das Messproblem

- Kein Problem bei Eigenzuständen, wie z.B.

$$|\phi_1\rangle \otimes |M_0\rangle \xrightarrow{t} |\phi_1\rangle \otimes |M_1\rangle$$

- Mit überlagertem Anfangszustand:

$$(\alpha |\phi_1\rangle + \beta |\phi_2\rangle) \otimes |M_0\rangle \xrightarrow{t} \alpha |\phi_1\rangle \otimes |M_1\rangle + \beta |\phi_2\rangle \otimes |M_2\rangle$$



# Messen in der QM

## Das Messproblem

- Kein Problem bei Eigenzuständen, wie z.B.

$$|\phi_1\rangle \otimes |M_0\rangle \xrightarrow{t} |\phi_1\rangle \otimes |M_1\rangle$$

- Mit überlagertem Anfangszustand:

$$(\alpha |\phi_1\rangle + \beta |\phi_2\rangle) \otimes |M_0\rangle \xrightarrow{t} \alpha |\phi_1\rangle \otimes |M_1\rangle + \beta |\phi_2\rangle \otimes |M_2\rangle$$

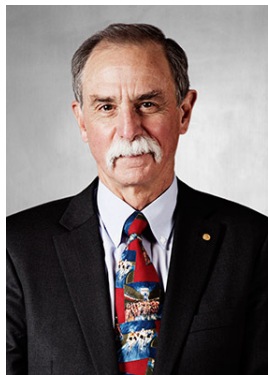
- Problem: Keine eindeutige Zeigerstellung
- nur Wahrscheinlichkeitsaussage möglich

# Messen in der QM

## Frage

Kann man Quantenzustände einzelner Teilchen messen oder sogar manipulieren?

# Physik Nobelpreis 2012

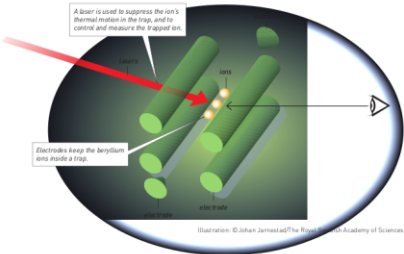
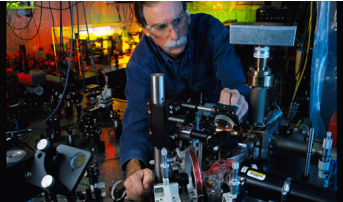


David Wineland  
National Institute of Standards and  
Technology, Boulder, Colorado



Serge Haroche  
Collège de France und École Normale  
Supérieure, Paris

# Ionenfalle



# Ionenfalle

## Versuchsaufbau

- Ultrahohes Vakuum
- Statisches und oszillierendes E-Feld
- Einzelnes Ion oder mehrere in einer Linie

# Ionenfalle

## Versuchsablauf

- Gefangenes Ion oszilliert
- Schwingung ist bei niedrigen Temperaturen quantisiert
- Zwei Quantisierungslevel
  - elektrischer Quantenzustand (intern)
  - Schwingungsmoden (extern)

# Ionenfalle

## Versuchsablauf

- Gefangenes Ion oszilliert
- Schwingung ist bei niedrigen Temperaturen quantisiert
- Zwei Quantisierungslevel
  - elektrischer Quantenzustand (intern)
  - Schwingungsmoden (extern)

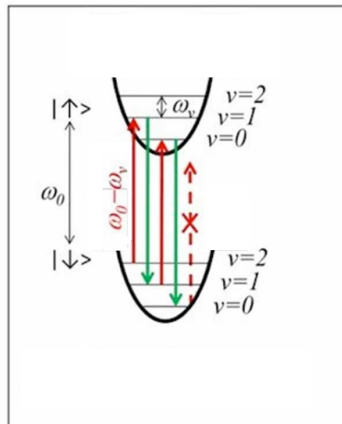
## Ziel

Kopplung der beiden Quantisierungslevel

# Ionenfalle

## Kühlung des Ions

- Anregung des Ions mittels Laser
  - Erhöhung der inneren Energie
  - Erniedrigung der externen Energie
- Ion fällt in Grundzustand zurück
  - Präferenz: Schwingungsmode bleibt gleich

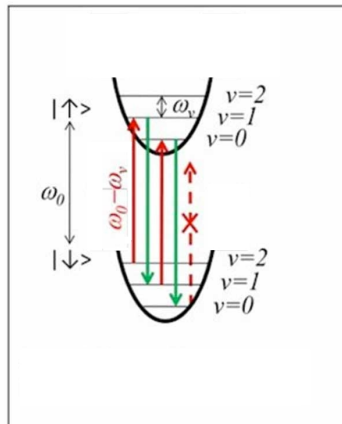




# Ionenfalle

## Kühlung des Ions

- Anregung des Ions mittels Laser
  - Erhöhung der inneren Energie
  - Erniedrigung der externen Energie
- Ion fällt in Grundzustand zurück
  - Präferenz: Schwingungsmodus bleibt gleich



- Kontrolle über elektrische und Schwingungsmoden
- Insbesondere Superpositionentausch

# Ionenfalle

## Was passiert quantenmechanisch?

- Elektrischer Grundzustand des Ions und der Falle

$$|\phi_0\rangle = |\downarrow\rangle |0\rangle$$

# Ionenfalle

## Was passiert quantenmechanisch?

- Elektrischer Grundzustand des Ions und der Falle

$$|\phi_0\rangle = |\downarrow\rangle |0\rangle$$

- Superposition durch Anregung eines Laserpulses

$$|\phi_0\rangle \rightarrow |\phi_1\rangle = (\alpha |\downarrow\rangle + \beta |\uparrow\rangle) |0\rangle$$

# Ionenfalle

## Was passiert quantenmechanisch?

- Elektrischer Grundzustand des Ions und der Falle

$$|\phi_0\rangle = |\downarrow\rangle |0\rangle$$

- Superposition durch Anregung eines Laserpulses

$$|\phi_0\rangle \rightarrow |\phi_1\rangle = (\alpha |\downarrow\rangle + \beta |\uparrow\rangle) |0\rangle$$

- Wechselwirkung mit Laser

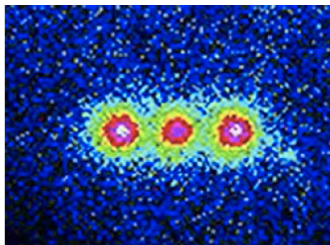
$$|\phi_1\rangle \rightarrow |\phi_2\rangle = \alpha |\downarrow\rangle |0\rangle + \beta |\downarrow\rangle |1\rangle = |\downarrow\rangle (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle)$$

# Ionenfalle

## Ergebnisse

- Mehrere Ionen haben gleiche Schwingungsmoden

- Schwingungsmoden messbar!

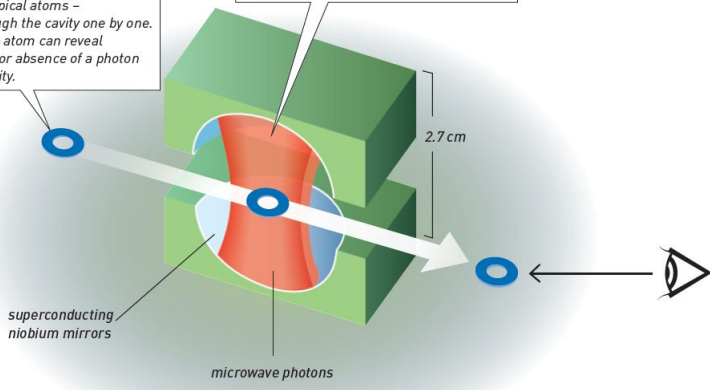


Fluoreszenz von drei  $Be^+$  Ionen

# Photonenresonator

Rydberg atoms – roughly 1,000 times larger than typical atoms – are sent through the cavity one by one. At the exit the atom can reveal the presence or absence of a photon inside the cavity.

Photons bounce back and forth inside a small cavity between two mirrors for more than a tenth of a second. Before it disappears the photon will have travelled a distance of one trip around the Earth.



# Photonenresonator

## Vorraussetzungen

- Mikrowellenresonator mit einem oder mehreren Photonen
    - Spiegel aus superkonduktivem Material (Nb)
    - bis auf  $T \approx 0,8K$  gekühlt
- Lebensdauer  $\approx 130ms$
- Strecke  $\approx 40.000km$

# Photonenresonator

## Was passiert?

- Rydberg-Atome werden durch Resonator geschickt
- Wechselwirkung nicht destruktiv
  - Energieniveau des Atoms springt (Stark-Effekt)
  - Induziert Phasenänderung des Photons je nach Superposition des Atoms



# Photonenresonator

## Ergebnisse

- Zählbarkeit der Photonen im Resonator
- Kollaps der Wellenfunktion messbar

# Anwendungen

- Quantencomputer
- Optische Uhren

# Quellennachweis

| J. Schnack, Vorlesungsscript Theoretische Physik II, Universität Bielefeld, Sommersemester 2013

| F. Schwabl, Quantenmechanik, 7. Auflage, Springer, Berlin 2007

| H. Rollnik, Quantentheorie 1, 2. Auflage, Springer, Berlin 2002

| [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org) (abgerufen am 08.06.2013 11:30)

- [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/popular-physicsprize2012.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/popular-physicsprize2012.pdf)
- [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/advanced-physicsprize2012.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/advanced-physicsprize2012.pdf)
- [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/haroche-lecture\\_slides.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/haroche-lecture_slides.pdf)
- [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/wineland-lecture.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/wineland-lecture.html)

# Abbildungsnachweis

- | Folie 3: <http://webschnorcheln.blogspot.de/2011/11/beruhmte-gedankenexperimente-kompakt.html> (abgerufen am 17.06.2013)
- | Folie 6:  
<http://www.supernature-forum.de/allgemeine-computerfragen/54042-wie-sieht-euer-desktop-aus-239.html> (abgerufen am 17.06.2013)
- | Folie 14: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/wineland-facts.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/wineland-facts.html) (abgerufen am) 17.06.2013
- | Folie 15: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/wineland-photo.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/wineland-photo.html) (abgerufen am) 17.06.2013
- | Folie 18,20:  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/advanced-physicsprize2012.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/advanced-physicsprize2012.pdf) (abgerufen am 17.06.2013)
- | Folie 21: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2012/popular-physicsprize2012.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/popular-physicsprize2012.pdf) (abgerufen am 17.06.2013)