

# Quantenverschränkung - Warum unsere Welt nicht deterministisch ist

ktrask

March 14, 2014

# Table of contents

## Licht

Polarisation

Fluoreszenz

Verschränkung

## Bellsche Ungleichung

Polarisationsstrahlteiler

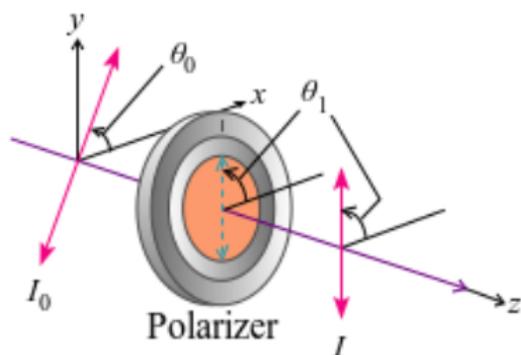
Bellsche Ungleichung

## Experimentelle Tests

# Licht

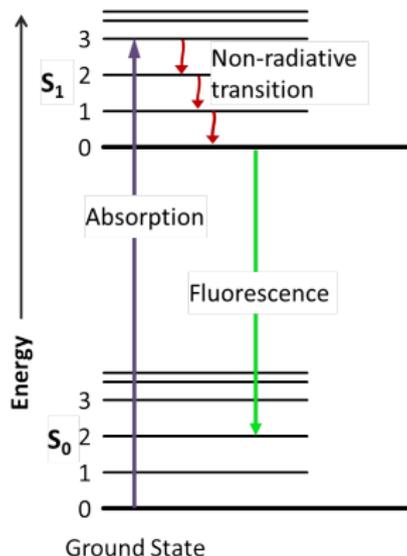
- ▶ Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist die maximale Geschwindigkeit im Universum
- ▶ Wenn ein bewegtes Objekt Licht aussendet, ist es genauso schnell wie Licht von einem unbewegten Objekt
- ▶ Licht ist eine elektromagnetische Welle
- ▶ Licht besitzt eine Eigenschaft namens Polarisation; Richtung des elektrischen Feldes
- ▶ Teilchenbeschreibung von Licht: Photonen  $E = h\nu$

# Polarisation



- ▶  $\theta_0$ : Polarisationswinkel des einfallenden Strahls
- ▶  $\theta_1$ : Polarisationswinkel des ausfallenden Strahls
- ▶  $\theta_1$ : Polarisationsfilter Winkel
- ▶ Änderung der Intensität:  $I = I_0 \cdot \cos^2 \theta_i$
- ▶ Für einzelne Photonen: Wahrscheinlichkeitsverteilung das es absorbiert wird oder mit neuer Polarisation herauskommt
- ▶ Polarisationsstrahlteiler: Eine polarisationsrichtung wird durchgelassen, die orthogonale Richtung wird abgelenkt

# Fluoreszenz



- ▶ Atome/Kristalle besitzen Energiezustände
- ▶ Energiezustände können mit Photonen passender Energie aufgeladen werden
- ▶ Fluoreszenz ist, wenn die Abgabe der Energie über andere Energiezustände passiert als die Aufladung

# Verschränkung

- ▶ Es gibt nichtlineare Kristalle, die bei Fluoreszenz immer zwei Photonen abgeben, die exakt orthogonal zueinander polarisiert sind
- ▶ Beispiele: Beta-Bariumborat/Kaliumdihydrogenphosphat
- ▶ Gründe: Energieerhaltung

# Polarisationsstrahlteiler

- ▶ Wenn ein einzelnes Photon auf einen Polarisationsstrahlteiler trifft, wird es entweder abgelenkt oder durchgelassen, je nach Polarisation.
- ▶ Ist das Photon  $45^\circ$  polarisiert, wird es mit 50% Wahrscheinlichkeit durchgelassen, ansonsten abgelenkt, dieser Prozess ist komplett zufällig

# Messung von verschränkten Photonen

- ▶ Schickt man nun zwei Verschränkte Photonen auf verschiedene Strahlteiler mit  $45^\circ$ , dann Verhalten sich beide unabhängig voneinander betrachtet vollständig zufällig, wenn man die Ergebnisse vergleicht, und beide Photonen waren vorher orthogonal polarisiert, dann sind sie es auch hinterher noch.
- ▶ Wenn man nun die Photonen über viele km Entfernung transportiert, und *gleichzeitig* misst, verläuft das Experiment genauso
- ▶ zwei Mögliche Erklärungen:
  1. Es gibt verborgene Variablen in den Photonen
  2. es gibt eine Wechselwirkung zwischen den Photonen mit Überlichtgeschwindigkeit

# Anschauliche Herleitung

- ▶ Man nehme drei Parameter
  1. Mietwohnung/keine Mietwohnung
  2. Laptop/kein Laptop
  3. Wasserkocher/kein Wasserkocher
- ▶ Man führe eine Umfrage unter zufällig ausgewählten Menschen durch, Einschränkung: man kann nur zwei der Parameter abfragen. Also macht man drei Umfragen:
  1. Frage 1 und 2
  2. Frage 1 und 3
  3. Frage 2 und 3

# Test der Ergebnisse auf Plausibilität

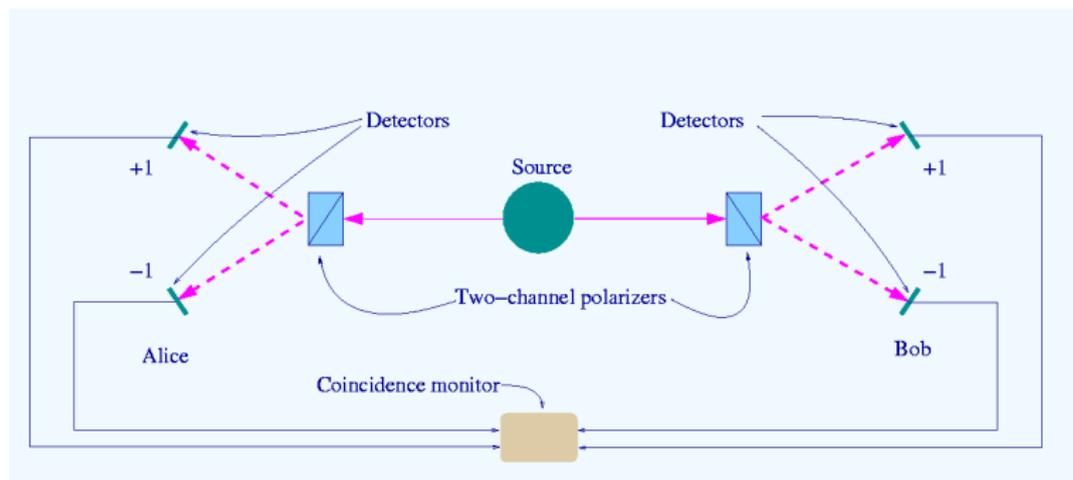
- ▶ Wie testet man nun die Ergebnisse auf Plausibilität?
- ▶ Man hat nur die summierten Ergebnisse, also welcher Anteil in einer Mietwohnung wohnen und einen Laptop haben, bzw. welcher Anteil nicht in einer Mietwohnung wohnen und keinen Laptop haben.
- ▶ Der Anteil der Leute die in einer Mietwohnung wohnen, ist also Identisch mit der Summe der Anteile von Leuten mit Laptop und Mietwohnung und der Leute ohne Laptop und Mietwohnung.
- ▶ ist die Statistik sinnvoll erstellt, dann ist der Anteil der Leute mit Mietwohnung auch bei der Befragung Mietwohnung&Wasserkocher + Mietwohnung&kein Wasserkocher genau gleich.

# Test der Ergebnisse auf Plausibilität

	$W$	$kW$
$M$	$M\&W$	$M\&kW$
$kM$	$kM\&W$	$kM\&kW$

- ▶ Der vorige Test reicht einem noch nicht, was gibts noch?
- ▶  $M\&kW + kM\&W + M\&kL + kM\&L + L\&kW + kL\&W \leq 2$
- ▶ Beispiel:
- ▶  $M\&kW = M\&kW\&L + M\&kW\&kL$
- ▶ → Auf Photonen angewandt:  $M$ ,  $W$  und  $L$  stellen die drei Raumrichtungen  $x, y, z$  dar. Der Status *kein* bzw. *ein* stellt eine Polarisationsrichtung dar.

# Experimentelle Tests



- ▶ Ergebnis: Bellsche Ungleichung ist verletzt
- ▶ → es gibt keine verborgenen Variablen

# Referenzen

- ▶ <http://en.wikipedia.org/wiki/File: Bell-test-photon-analyser.png>
- ▶ [http://en.wikipedia.org/wiki/File: Jablonski\\_Diagram\\_of\\_Fluorescence\\_Only.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File: Jablonski_Diagram_of_Fluorescence_Only.png)
- ▶ [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Malus\\_law.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Malus_law.svg)
- ▶ <http://theworld.com/~reinhold/bellsinequalities.html>
- ▶ [http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Quantum/bells\\_inequality.html](http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Quantum/bells_inequality.html)