

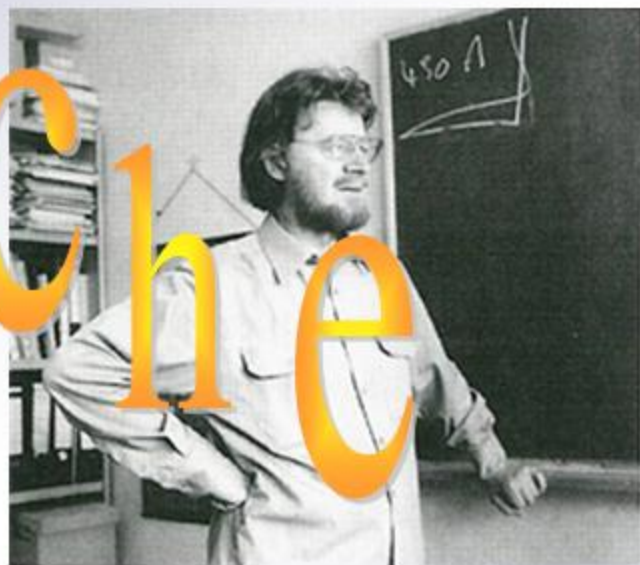
Tarlan

Vezirov

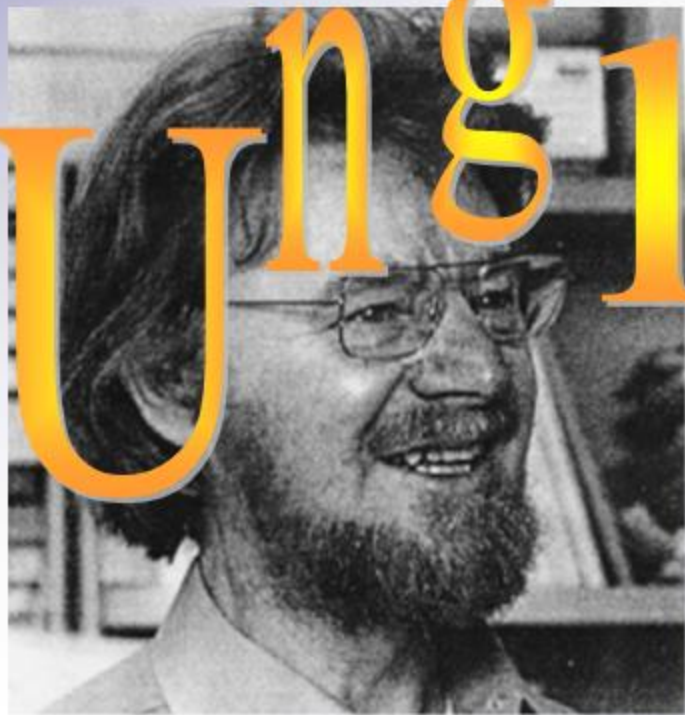


508246

Bellsche



Ungleichung



Verschränkung

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{AB} + |10\rangle_{AB})$$

$$|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{AB} - |10\rangle_{AB})$$

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB})$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle_{AB} - |11\rangle_{AB})$$

- Perfekte Korrelation der Zustände zweier Teilchen
- kein einfaches Zustandsprodukt

EPR-Theorie (1935)

- **Lokalität:** Keine Information und keine Wirkung kann sich schneller ausbreiten als mit der Lichtgeschwindigkeit.
- **Vollständigkeit:** In einer vollständigen Theorie muss jedes Element der physikalischen Realität eine Entsprechung haben.
- **Realität:** Kann man den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit vorhersagen, ohne ein System dabei in irgendeiner Weise zu stören, dann gibt es ein Element der physikalischen Realität, das dieser physikalischen Größe entspricht.

→ QM ist keine vollständige Theorie

John Bell (1964)

$$\begin{aligned} a(\alpha_1)b(\beta_1) + a(\alpha_2)b(\beta_1) + a(\alpha_1)b(\beta_2) - a(\alpha_2)b(\beta_2) = \\ (a(\alpha_1) + a(\alpha_2))b(\beta_1) + (a(\alpha_1) - a(\alpha_2))b(\beta_2) = \pm 2 \end{aligned}$$

$$\int |P(\lambda)\{(a(\lambda) + a(\lambda))b(\lambda) + (a(\lambda) - a(\lambda))b(\lambda)\}| \leq 2$$

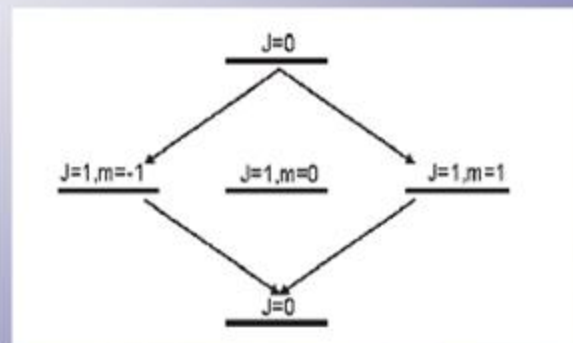
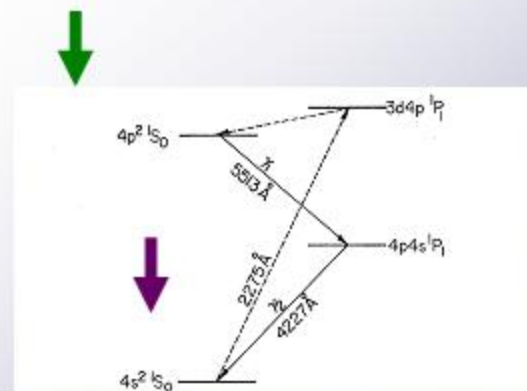
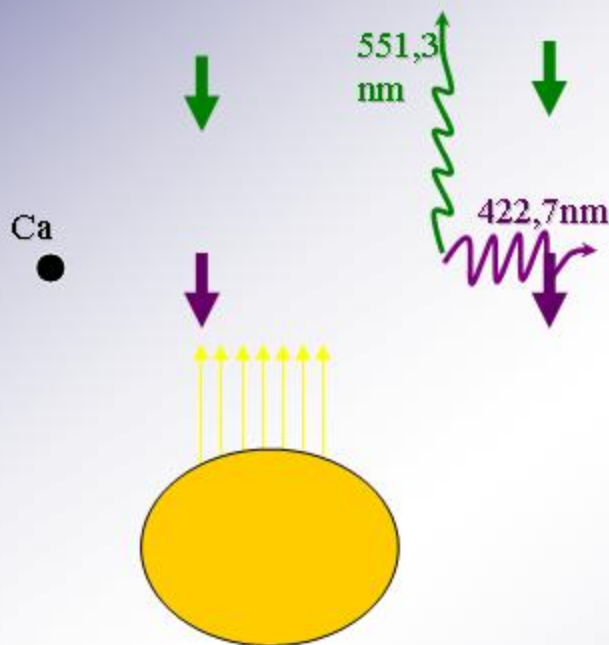
Technische Anforderungen

- Herstellung der verschränkten Zustände
- Messung der Zustände
- Präzise Apparatur

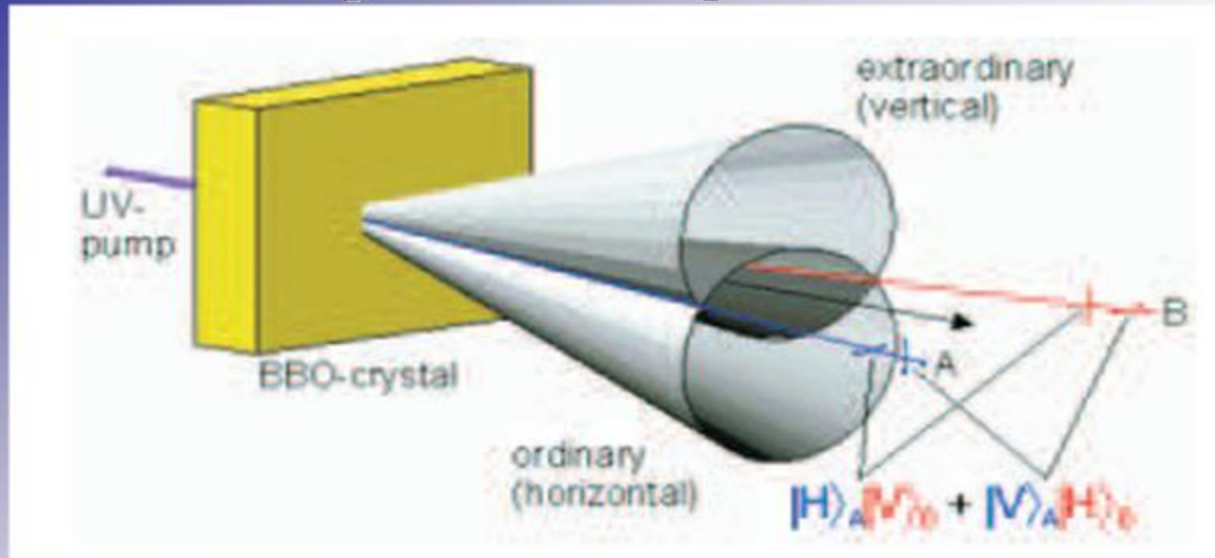
Realisierung verschränkter Zustände

1. Spontaneous cascade decay in single atom

ca. 7% 



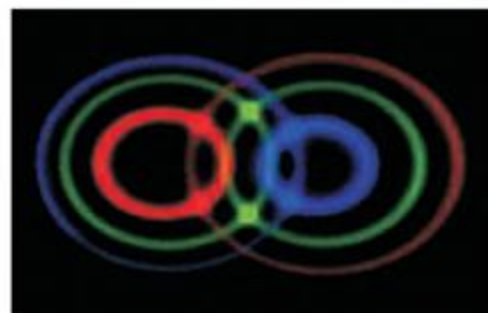
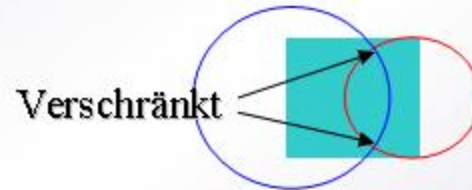
1. Spontaneous parametric down-conversion



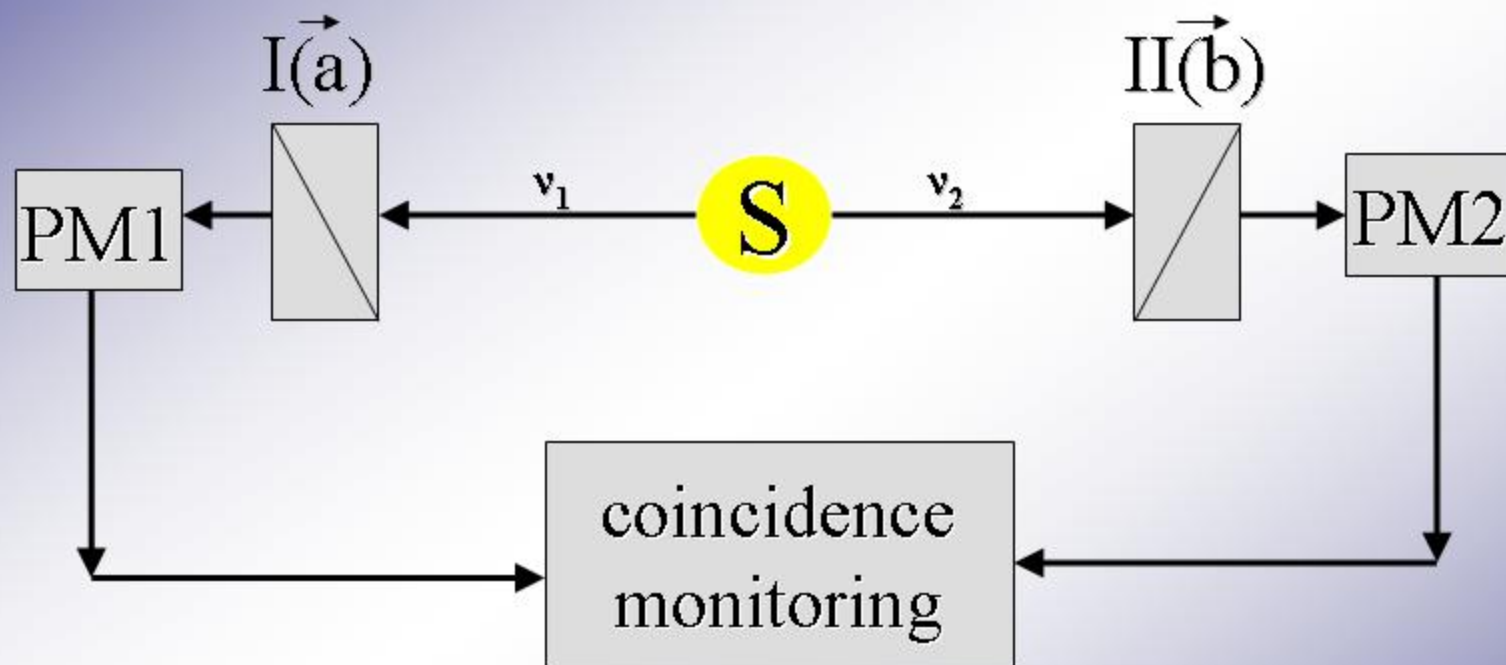
sym. Kristal



nicht sym. Kristal



1. Experiment



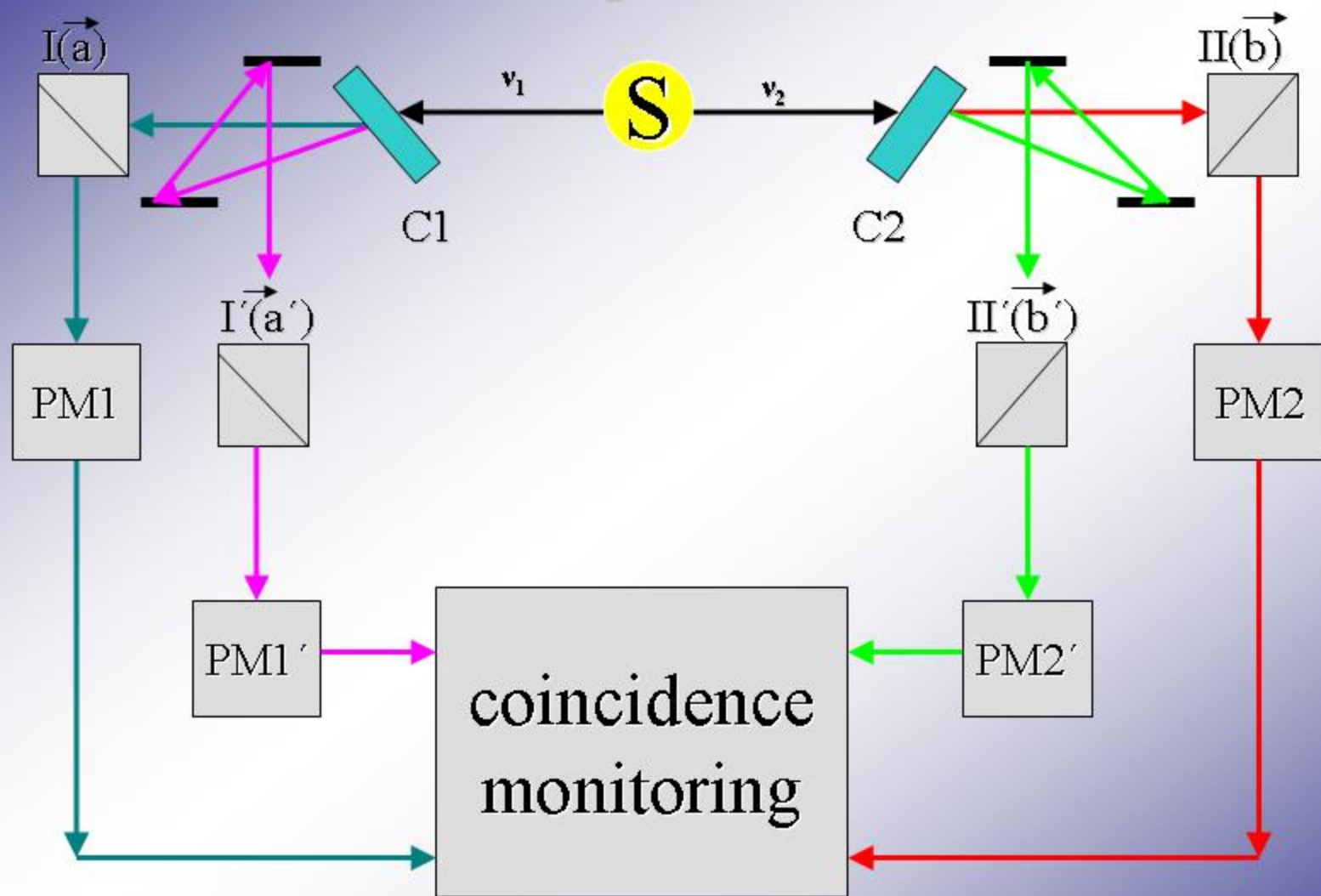
1972: Stuart J. Freedman, John F. Clauser

Kritikpunkte

1. Kommunikation

2. Messung

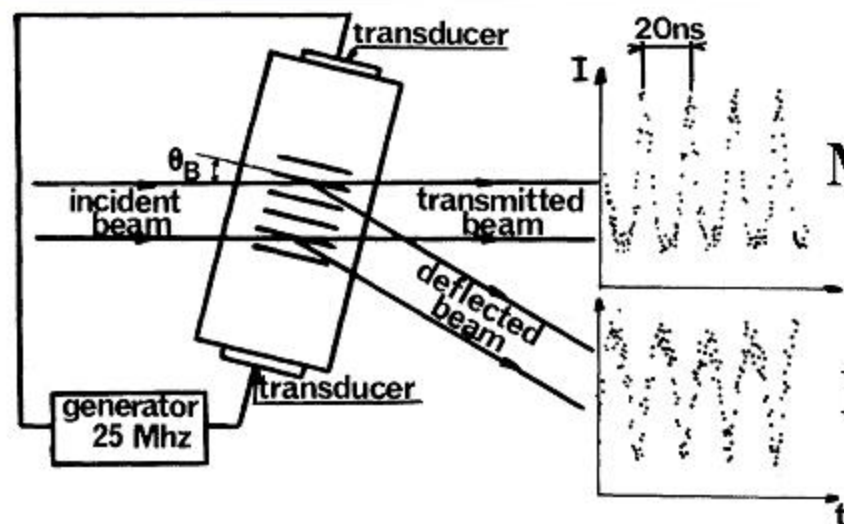
2. Experiment



1982: Alain Aspect, Jean Dalibard, Gerard Roger

ein Durchlauf: 12000s

4000s ohne Polarisationsorientierung



Minimum: 100% Transmission

Maximum: 100% Reflexion

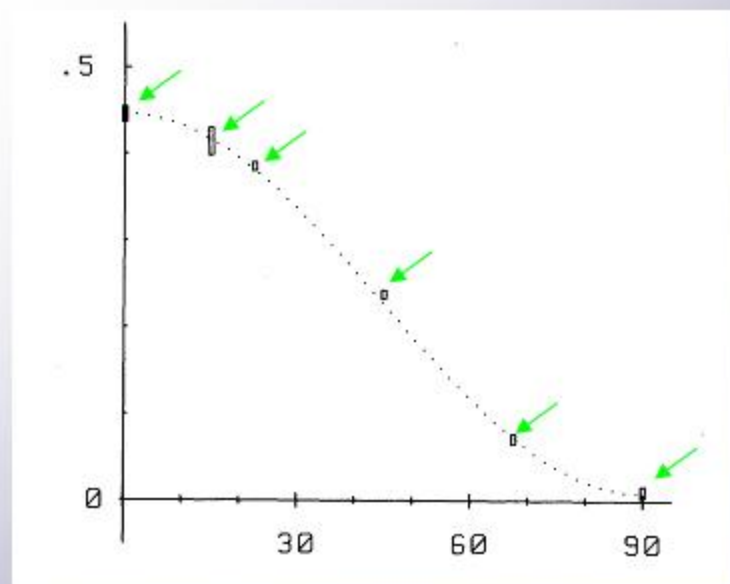
Clauser-Horne-Shimony-Holt: $-1 \leq S \leq 0$

$$S = \frac{N(\vec{a}, \vec{b})}{N(\infty, \infty)} - \frac{N(\vec{a}, \vec{b}')}{N(\infty, \infty')} + \frac{N(\vec{a}', \vec{b})}{N(\infty', \infty)} + \frac{N(\vec{a}', \vec{b}')}{N(\infty', \infty')} - \frac{N(\vec{a}', \infty)}{N(\infty', \infty)} - \frac{N(\infty, \vec{b})}{N(\infty, \infty)}$$

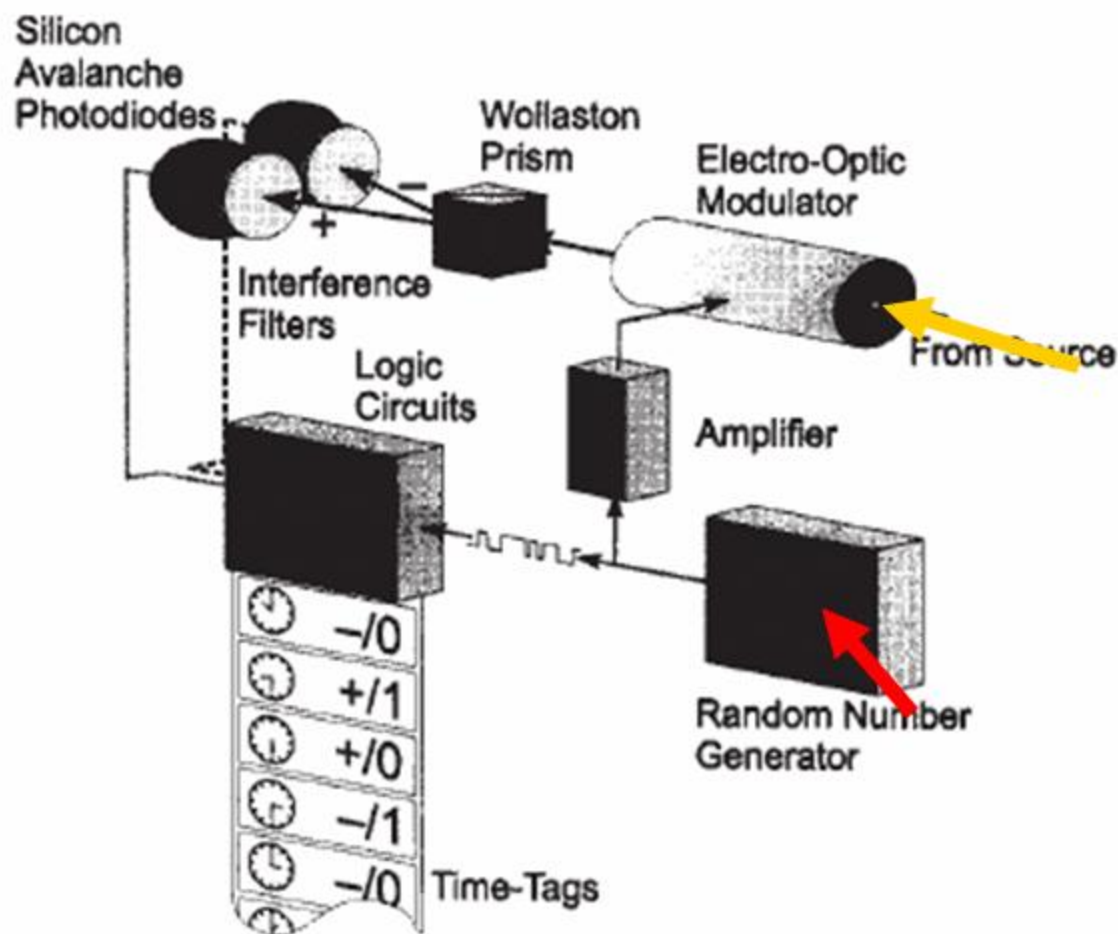
$$(\vec{a}, \vec{b}) = (\vec{b}, \vec{a}') = (\vec{a}', \vec{b}') = 22,5^\circ; (\vec{a}, \vec{b}') = 67,5^\circ$$

$$S_{Exp} = 0,101 \pm 0,020 > 0$$

$$S_{Qm} = 0,112$$



3. Experiment (Zeilinger)



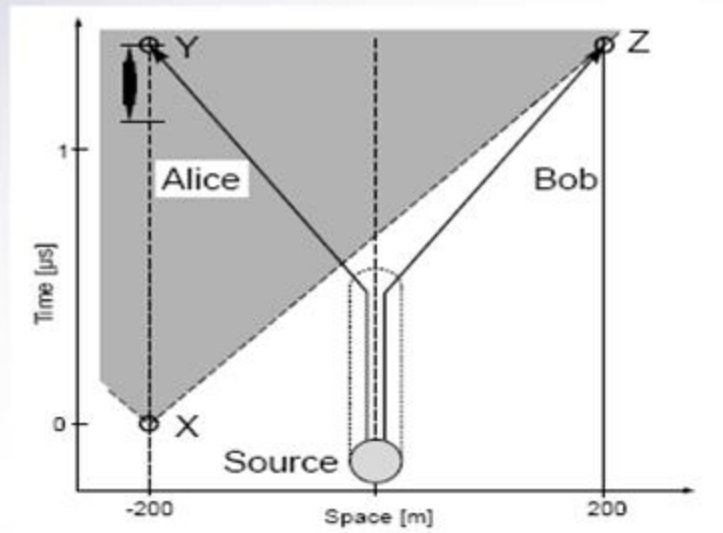
1997: Anton Zeilinger, Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon, Harald Weinfurter

Abstand zwischen Alice und Bob: 400m

$$\longrightarrow 1,3\mu s > 100ns$$

wenige 100counts/sec

Signale: 10000-15000counts/sec



Zufallsrate: $C_{ij}(\alpha, \beta) \quad i, j \in \{+, -\}$

Normierter Erwartungswert der Korrelation zwischen A und B:

$$E(\alpha, \beta) = [C_{++}(\alpha, \beta) + C_{--}(\alpha, \beta) - C_{+-}(\alpha, \beta) - C_{-+}(\alpha, \beta)] / N$$

Clauser-Horne-Shimony-Holt:

$$S(\alpha, \alpha', \beta, \beta') = |E(\alpha, \beta) - E(\alpha', \beta)| + |E(\alpha, \beta') + E(\alpha', \beta)| \leq 2$$

$$S_{\max}^{qm} = S^{qm}(0^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ, 67.5^\circ) = 2\sqrt{2} = 2,82 > 2$$

$$S^{Exp} 2,73 \pm 0.02 > 2 \quad \text{für 14700 Ereignisse in 10 s}$$

Quellen

PHYSICAL REVUE LETTERS:

- Volume 49, Number 25: Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers
- Volume 81, Number 23: Violation of Bell's Inequality under StrictEinstein Locality Conditions
- Volume 28, Number 14: Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories