

Der Quantenradierer als „Delayed-Choice-Experiment“

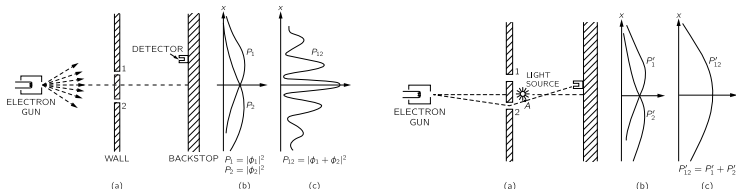
Hendrik van Hees

Goethe-Universität Frankfurt und FIAS

20. Dezember 2017

Welle-Teilchen-Dualismus

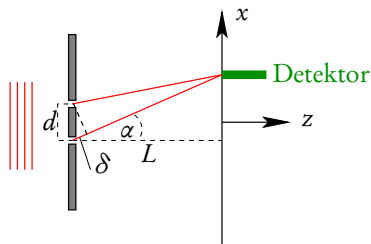
- Schrödinger (1926): **Wellenmechanik** für **Teilchen**
- Born (1926): **Ortswahrscheinlichkeitsverteilung** $|\psi(t, \vec{x})|^2$
- Heisenberg (1927): **Unschärferelation** $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$
- Bohr (1927) **Komplementarität**:
Experimentieranordnung \Leftrightarrow **Teilchen-** oder **Wellenaspekt**
- Doppelspaltexperiment mit Elektronen
Feynman, Leighton, Sands, The Feynman Lectures on Physics III



- keine Welcher-Weg-Information \Rightarrow Interferenz (**Wellenphänomen**)
- gewinne Welcher-Weg-Information (**Teilcheneigenschaft**) \Rightarrow keine Interferenz
- Wheeler (1978): Wahl zwischen **Teilchen-** oder **Wellenaspekt nachdem** Teilchen registriert wurde: „**delayed choice**“
- hier Experiment mit Photonen:

S. P. Walborn, M. O. Terra Cunha, S. Pádúa, and C. H. Monken, PRA **65** 033818 (2002)

Doppelspaltexperiment mit Photonen



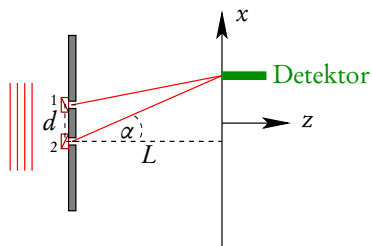
- $|\hat{x}\rangle$: in x -Richtung polarisiertes Photon
- $|\psi\rangle = |\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle = N_0/\sqrt{2} \{1 + \exp[i\varphi(x)]\} |\hat{x}\rangle$
- $P(x) = \langle \psi | \psi \rangle = N_0 (1 + \cos[\varphi(x)])$

- $\varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = k\delta = \frac{kxd}{L}$
- Berücksichtigung der endlichen Spaltbreite

$$\text{Zählrate: } P(x) = N_0 \frac{\sin^2\left(\frac{kxb}{2L}\right)}{\left(\frac{kxb}{2L}\right)^2} (1 + \cos[\varphi(x)]) = N_{\text{ES}}(x) (1 + \cos[\varphi(x)])$$

- keine **Welcher-Weg-Information**
- Amplituden addieren sich \Leftrightarrow Interferenz (**Wellenphänomen**)
- Einzelphoton \Rightarrow einzelner Punkt auf Photoplatte (**Teilcheneigenschaft**)
Ort zufällig (**Wahrscheinlichkeitsinterpretation** des Quantenzustands)
- viele Einzelphotonen \Rightarrow Interferenzmuster (**Welleneigenschaft**)

Gewinnung von Welcher-Weg-Information



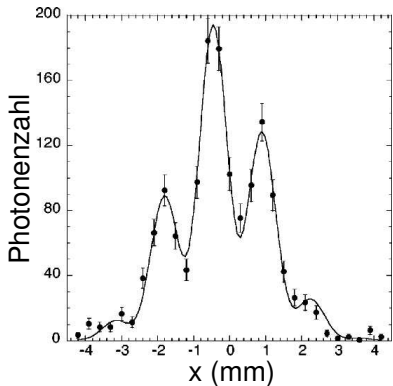
- $\lambda/4$ -Plättchen in Spalt 1 in $(+\pi/4)$ -Orientierung
- $\lambda/4$ -Plättchen in Spalt 2 in $(-\pi/4)$ -Orientierung
- $|\psi_1\rangle = \hat{Q}_+|\hat{x}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\hat{x}\rangle + i|\hat{y}\rangle) = |L\rangle$
- $|\psi_2\rangle = \hat{Q}_-|\hat{x}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\hat{x}\rangle - i|\hat{y}\rangle) = |R\rangle$
- $\langle\psi_1|\psi_2\rangle=0!$

Zählrate: $P(x) = N_{\text{ES}}(x)$

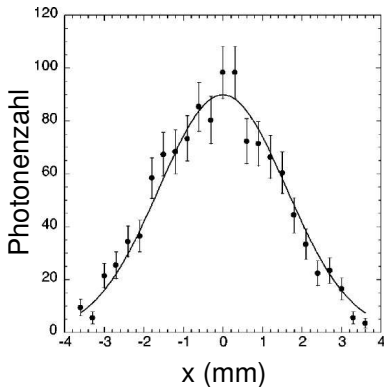
- **Welcher-Weg-Information:**
markiert durch Polarisationszustände der Photonen
- keine Doppelspaltinterferenz
Wahrscheinlichkeitsverteilungen addieren sich (**Teilcheneigenschaft**)
- **Teilcheneigenschaft** schließt Welleneigenschaft aus (**Komplementarität**)
- NB: $\hat{Q}_+|\hat{y}\rangle = i|R\rangle$, $\hat{Q}_-|\hat{y}\rangle = -i|L\rangle$

Experimenteller Nachweis

S. P. Walborn, M. O. Terra Cunha, S. Pádua, and C. H. Monken, PRA **65** 033818 (2002)



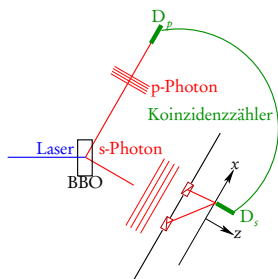
ohne $\lambda/4$ -Plättchen
(keine Welcher-Weg-Information)
⇒ Interferenz (**Welleneigenschaft**)



mit $\lambda/4$ -Plättchen
(Welcher-Weg-Information)
⇒ keine Interf. (**Teilcheneigenschaft**)

- Experimentaufbau \Leftrightarrow Photon als **Welle** oder **Teilchen**
- **Komplementarität**: **Teilchen-** oder **Welleneigenschaften**

Polarisationsverschränkte Photonenpaare



- vor Spalt: polarisations-verschränkte Photonenpaare

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\hat{x}\rangle \otimes |\hat{y}\rangle + |\hat{y}\rangle \otimes |\hat{x}\rangle)$$

- nach Spalt: welcher-Weg-markierte s-Photonen

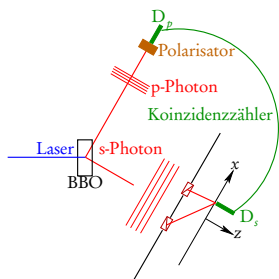
$$|\Psi'_1\rangle = (\hat{Q}_+ \otimes \mathbb{1}) |\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|L\rangle \otimes |\hat{y}\rangle + i |R\rangle \otimes |\hat{x}\rangle],$$

$$|\Psi'_2\rangle = (\hat{Q}_- \otimes \mathbb{1}) |\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|R\rangle \otimes |\hat{y}\rangle - i |L\rangle \otimes |\hat{x}\rangle],$$

$$|\Psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |\Psi'_1\rangle + \exp[i\varphi(x)] |\Psi'_2\rangle \}$$

- $\langle \Psi'_1 | \Psi'_2 \rangle = 0 \Rightarrow$ keine Doppelspaltinterferenz, Welcher-Weg-Information

Radiieren ohne Manipulation von s-Photon



- vor Spalt:
polarisations-verschränkte Photonenpaare

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\hat{x}\rangle \otimes |\hat{y}\rangle + |\hat{y}\rangle \otimes |\hat{x}\rangle)$$

- Markierung von WWI für γ_s mit $\lambda/4$ -Plättchen

$$|\Psi'_1\rangle = (\hat{Q}_+ \otimes \mathbb{1})|\Psi\rangle, \quad |\Psi'_2\rangle = (\hat{Q}_- \otimes \mathbb{1})|\Psi\rangle,$$

- **Polarisationsfilter** in $\pm\pi/4$ -Orientierung für γ_p
registriere nur γ_s , wenn γ_p registriert wird

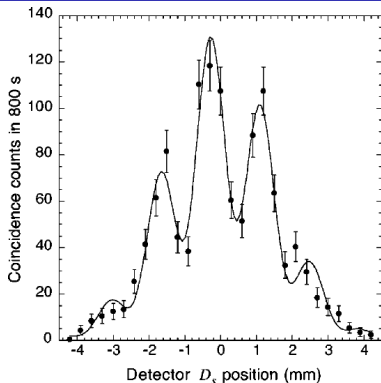
$$|\Psi''_{1\pm}\rangle = (\mathbb{1} \otimes \hat{P}_{\pm})|\Psi'_1\rangle = \frac{1}{2} (\pm|L\rangle + i|R\rangle) \otimes |\widehat{\pm\pi/4}\rangle$$

$$|\Psi''_{2\pm}\rangle = (\mathbb{1} \otimes \hat{P}_{\pm})|\Psi'_2\rangle = \frac{1}{2} [\pm|R\rangle - i|L\rangle] \otimes |\widehat{\pm\pi/4}\rangle = \mp i |\Psi''_{1\pm}\rangle,$$

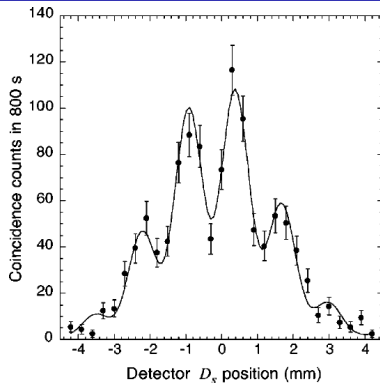
$$|\Psi''_{\pm}\rangle = \{1 \mp i \exp[i\varphi(x)]\} |\Psi''_{1\pm}\rangle$$

- $\langle \Psi''_{\pm} | \Psi''_{\pm} \rangle = \frac{1}{2} \{1 \pm \sin[\varphi(x)]\}$
 \Rightarrow **Doppelspaltinterferenz, Welcher-Weg-Information radiert!**

Wiederherstellung des Interferenzmusters



γ_p in $(+\pi/4)$ -Richtung polarisiert



γ_p in $(-\pi/4)$ -Richtung polarisiert

- Interferenzmuster wiederhergestellt
- Welcher-Weg-Information **radiert**
- kann Polarisationsfilter beliebig weit weg positionieren!
 - ⇒ WWI radiert **lange nachdem s-Photon registriert wurde**
 - ⇒ **Delayed-Choice-Experiment** a la Wheeler
- Radieren kann **vor oder nach** Messung des s-Photons erfolgen!

- Experimentelle Verifikation der Möglichkeit von **Delayed-Choice-Experimenten/Postselektion**
- Quantenverschränkung ermöglicht Wahl, ob **Wellen- oder Teilcheneigenschaften** für γ_s realisiert werden **nachdem** Messung erfolgt ist
- Retrokausale Beeinflussung?
gemäß QED **nein!**
⇒ Messungen von γ_s und Polarisationsfilterung von γ_p beeinflussen sich nicht wegen **Lokalität und Mikrokausalität**
- Grund für Möglichkeit von **Delayed Choice/Postselektion**
Korrelation aufgrund der **Verschränkung** von γ_s und γ_p
⇒ Präparation des verschränkten Zustands **vor** Messungen/Auswahl