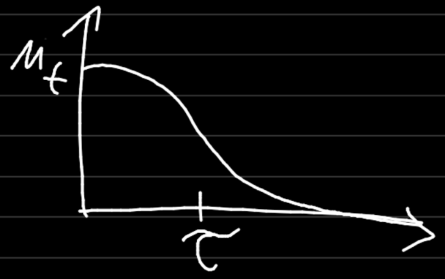
Wdhlg: Dekohärenz

Spin-Modell:

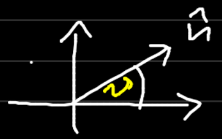
$$\underbrace{\uparrow\ \downarrow\ \uparrow\ \downarrow\ \cdots\ \underset{j}{\uparrow}\ \cdots\ \downarrow}_{n}$$

$$V = \sigma_3 \otimes \underbrace{\sum_j g_j\,\sigma_3^{(j)}}_{A}$$

$$|\varphi_0\rangle = \sum_{\vec{s}} c_{\vec{s}}\,|\vec{s}\rangle$$



$$\frac{|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}}\,|\varphi_0\rangle \xrightarrow{e^{-iVt/\hbar}} |\Psi(t)\rangle$$



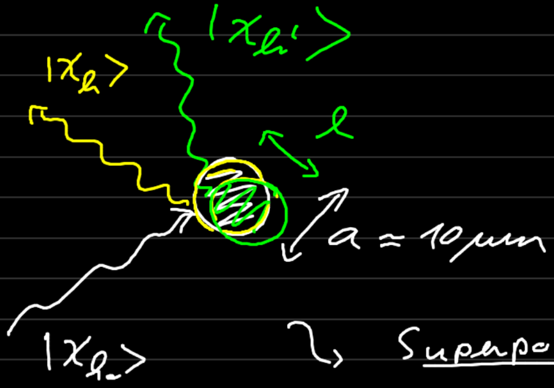
$$\rightarrow\ P(\vartheta) = \langle\, |\hat{n}+\rangle\langle\hat{n}+| \otimes \mathbb{1}_u \,\rangle$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\,\mathrm{Re}\; e^{-i\vartheta} M_t$$

$$M_t = \langle\varphi_0|\, e^{2iAt/\hbar}\,|\varphi_0\rangle = \cdots = e^{-t^2/2\tau^2}$$

$$\rightarrow\ P_t(\vartheta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\vartheta \cdot e^{-t^2/2\tau^2}, \qquad \tau = \frac{\sqrt{3}}{2}\,\frac{\hbar}{g}\cdot\frac{1}{\sqrt{n}}$$

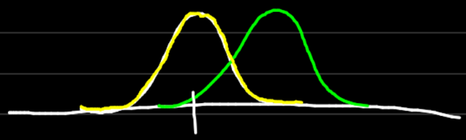
• „Staubkorn" (Joos, Zeh ~1985)



Dekohärenz durch W.W
mit
• Photonen
• Teilchen

↳ Superposition:

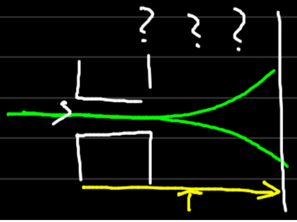
↔ $\ell = a = 10\,\mu m$



Temp.	τ
2,7 K	1 s
300 K	10^{-18} s
Hochvakuum	10^{-14} s
Luft, 1bar	10^{-31} s

Stern-Gerlach-Exp.

D. Kruti



W.W Ag – Photonen (300K)
– Teilchen

$\tau_{ph} \gg T$, $\tau_{Teil.} \simeq T$!

Zusammenfassung:

- Superposit. (stabiler) Pointer-states zerfallen aufgr. W.W mit Umgebung (→ Verschränkung Syst.-Umgb.) innerhalb System-spezifischer Dekohärenzzeit $\underline{\underline{\tau}}$.
- für makroskopische Systeme τ extrem klein
  ⇒ makr. Superposit.en praktisch unbeobachtbar!
- Dekohärenz lokal (System), nicht global (System + Umwelt + ...)

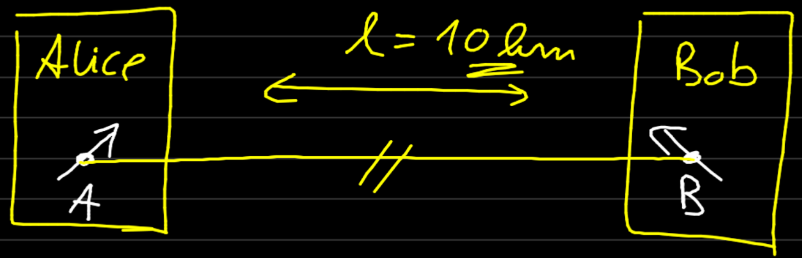
- Dekohärenz eliminiert nicht Messpostulat!

QM akzeptable Theorie?

→ "klassisches Verhalten" lokal, nicht global !?!

Kontra: Einstein, Podolsky, Rosen 1935 (EPR)

Idee (Bohm): λ



Spin-Zustand: $|\psi\rangle_{AB} = \dfrac{|\uparrow\rangle_A|\uparrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A|\downarrow\rangle}{\sqrt{2}}$

verschränkten Zustand!

Alice misst: $A = \sigma_3^A \otimes \mathbb{1}_B \rightsquigarrow \pm 1$ mit Wkt $1/2$

Bob misst: $B = \mathbb{1}_A \otimes \sigma_3^B \to \pm 1$ mit Wkt $1/2$

gemeinsam: $AB = (\sigma_3^A \otimes \mathbb{1}_B)(\mathbb{1}_A \otimes \sigma_3^B)$

$[A,B] = 0$ $\qquad = \sigma_3^A \otimes \sigma_3^B = BA$

EWe

⤷ gemeins. EZe	A	B	AB	Wkt. im Zust. $|\psi\rangle_{AB}$
$|\uparrow\uparrow\rangle$	1	1	1	1/2
$|\uparrow\downarrow\rangle$	1	-1	-1	0
$|\downarrow\uparrow\rangle$	-1	1	-1	0
$|\downarrow\downarrow\rangle$	-1	-1	1	1/2

$\boxed{\text{QM}}$: Messergebnisse vor Messung prinzipiell unbestimmt.

$\boxed{\text{EPR}}$: Bob messe kurze Zeit vor Alice: $\Delta t < l/c$

A Bobs Messergebnis determiniert das von Alice

B $\Delta t > l/c \rightarrow$ Bobs Messung beinflusst nicht die von Messung.

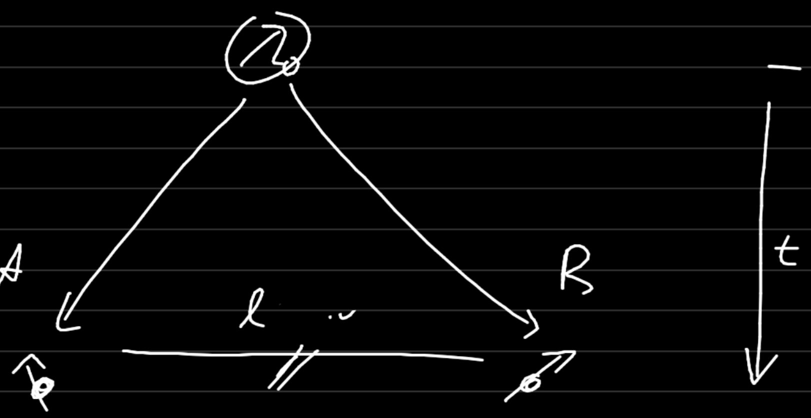
A B $\Longrightarrow$ Messergebnis von Alices Messung muss schon vor Messung festgestanden haben.

im Widerspruch zu $\boxed{\text{QM}}$

J. S. Bell "On the EPR Paradoxon" (~1964)

"vernünftige" Theorie (lokal, ...) enthält verborgene Parameter λ (= $(\lambda_1, \lambda_2 \ldots)$), die insbesondere den Ausgang von Messungen determinieren.

z.B. im EPR-Experiment:



Observablen Q, R mit Werten +1 oder −1

S, T

→ ±1.

Wert λ_0 durch Präparation festgelegt determiniert Messergebnisse

$\rightarrow \exists$ Fkten (1)

$Q : \lambda \longmapsto Q(\lambda)$

$R : \lambda \longmapsto R(\lambda)$

$S : \lambda \longmapsto S(\lambda)$

$T : \lambda \longmapsto T(\lambda)$

$\lightning$ QM sagt „nein" !!!

- Anfangswert λ bei Präparation genüge einer Wahrscheinlichkeitsdichte $\varrho(\lambda)$ (2)

ϱ : positiv, normiert: $\int_\Gamma d\lambda \, \varrho(\lambda) = 1$

$\rightarrow$ Erwartungswerte

z.B. $\overline{Q} = \int_\Gamma d\lambda \, Q(\lambda) \, \varrho(\lambda)$

$\overline{QS} = \int_\Gamma d\lambda \, Q(\lambda) \, S(\lambda) \cdot \varrho(\lambda)$

$\vdots$

Bell: (1) und (2)

$\Longrightarrow$ nicht-triviale, experimentell überprüfbare Aussagen ("Bell'sche Ungleichungen")

z. B. in EPR Situation:

$$\boxed{\left|\overline{QS} + \overline{RS} + \overline{QT} - \overline{RT}\right| \leq 2}$$

← Clauser, Horne, Shimony, Holt: CHSH-Ungl.

l.s.

$$= \int_\Gamma d\lambda\, \rho(\lambda) \underbrace{\Big| \underbrace{(Q(\lambda)+R(\lambda))}_{2,\,-2,\,0,\,0} \overset{\pm 1}{\overset{\shortparallel}{S(\lambda)}} + \underbrace{(Q(\lambda)-R(\lambda))}_{0,\,0,\,2,\,-2} \overset{\pm 1}{\overset{\shortparallel}{T(\lambda)}} \Big|}_{=2}$$

$$= \int d\lambda\, \rho(\lambda)\, 2 = 2$$

$$\boxed{\text{QM verletzt CHSH-Ugl.!!}}$$

im EPR Experiment:

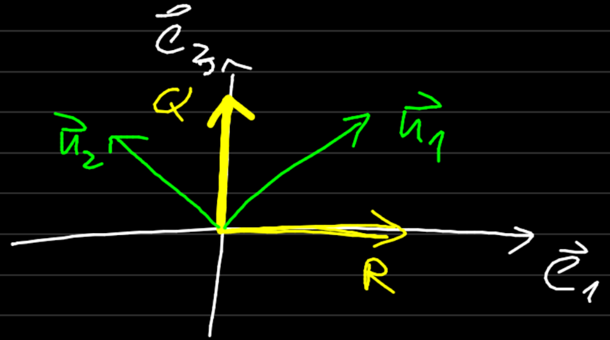
$$|\psi\rangle_{AB} = (|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$$

Obs.: $Q = \sigma_3^A = \sigma_3^A \otimes \mathbb{1}_B$

$R = \sigma_1^A$

$S = (\sigma_1^B + \sigma_3^B)/\sqrt{2}$

$T = (\sigma_3^B - \sigma_1^B)/\sqrt{2}$



$S_3^A = \frac{\hbar}{2} Q$

$S_1^A = \frac{\hbar}{2} R$

$\frac{\hbar}{2} S = \vec{n}_1 \cdot \vec{S}$

QM

$\longrightarrow \langle QS \rangle_{\psi_{AB}} = 1/\sqrt{2}$

$\langle RS \rangle_{\psi_{AB}} = 1/\sqrt{2}$

$\langle QT \rangle_{\psi_{AB}} = 1/\sqrt{2}$

$\langle RT \rangle_{\psi_{AB}} = -1/\sqrt{2}$

$K := $

$\longrightarrow \langle QS \rangle + \langle RS \rangle + \langle QT \rangle - \langle RT \rangle = 4 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$

$= 2 \cdot \sqrt{2} = 2{,}82\ldots$

$\not\leq 2$

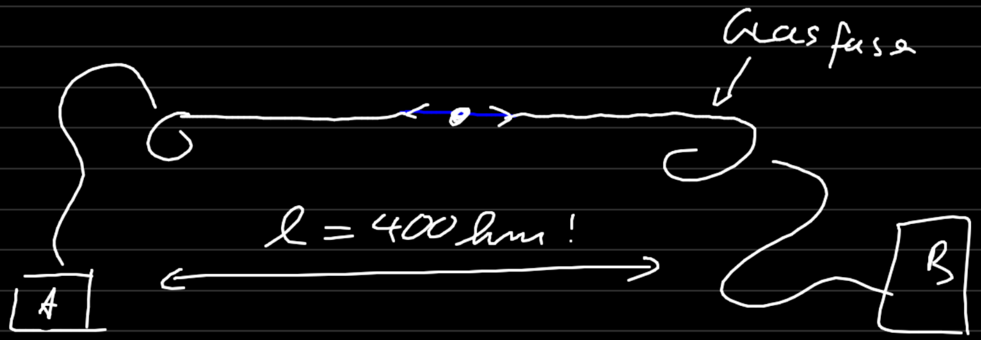
PRO QM !

KONTRA Bell !

Experimente!!!

$\xleftrightarrow{1{,}5\,m!}$

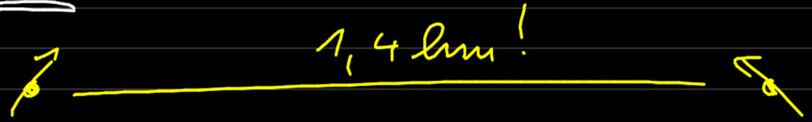
Aspect, ~1975 , Zeilinger, ... 1999 ~1970



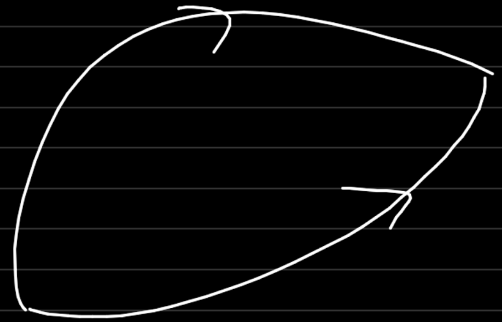
K = 2,7... !

von Ramsdonk

2015 :



2,4... t



Foundations of QM

David Gross