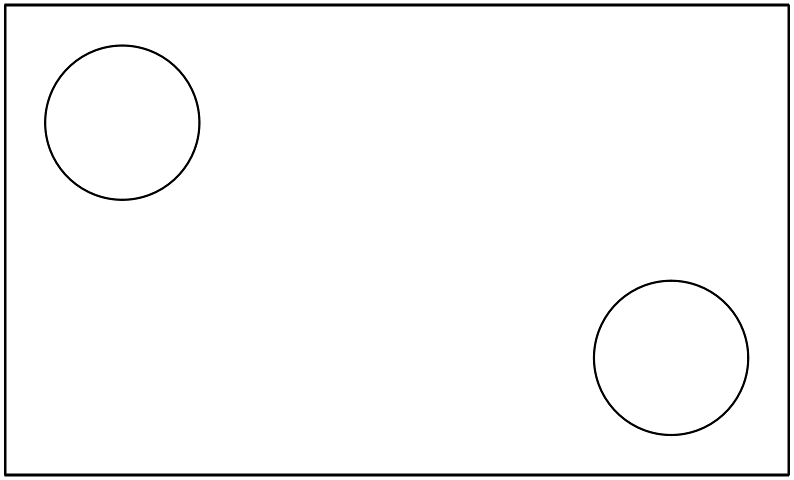
Interpretationen der Quantenmechanik

Dekohärenz

Marie-Therese Horstmann

Torwandschießen mit Elektronen



- Elektronen: $|\Psi>_e = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi>_{links} + |\Psi>_{rechts})$
- Fußbälle: $|\Psi>_f = (|\Psi>_{links}\ oder |\Psi>_{rechts})$

  Beobachtung: keine Superposition

Was ist der Unterschied zwischen Fußbällen und Elektronen?

Einbeziehung der Umgebung: ”Messung”

Wechselwirkung z.B. mit Photon (oder auch dem ganzen Universum)

Wellenfunktion vor der Wechselwirkung:

$$|\Psi>_{ges} = |\Psi>_f \, |\Psi>_{ph} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi>_{f_{links}} + |\Psi>_{f_{rechts}})|\Psi>_{ph}$$

Wellenfunktion nach der Wechselwirkung (Verschränkung)

$$|\Psi>_{ges} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi>_{f_{links}} \, |\Psi>_{ph_{links}} + |\Psi>_{f_{rechts}} \, |\Psi>_{ph_{rechts}})$$

Annahmen:

- $< \Psi_{ph_{links}}|\Psi>_{ph_{rechts}} = 0$ Dies ist in der Realität nur näherungsweise erfüllt.
- Die Wechselwirkung stört das ursprüngliche System nicht.

Aber: Messung bezieht sich nur auf den Fußball.

$\Rightarrow$ Nur Aussagen über Zustände $|\Psi>_{f_{links}}$ und $|\Psi>_{f_{rechts}}$ nachprüfbar.

Berechnung der Zustände des Teilsystems

Hilfsmittel: Dichtematrizen

- Dichtematrix des Gesamtsystems:

$$\rho_{vor} = |\Psi_{ges_{vor}} >< \Psi_{ges_{vor}}|$$
$$\rho_{nach} = |\Psi_{ges_{nach}} >< \Psi_{ges_{nach}}|$$

- Berechnung der Dichtematrix des Teilsystems (Fußball)

$$\rho_{Fvor} = Sp_{Ph}(\rho_{vor}) \rho_{Fnach} = Sp_{Ph}(\rho_{nach})$$

- Ergebnis (hier geht explizit mit ein, das $< \Psi_{ph_{links}}|\Psi >_{ph_{rechts}} = 0$!)

$$\rho_{Fvor} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi_{f_{links}} >< \Psi_{f_{links}}| + |\Psi_{f_{rechts}} >< \Psi_{f_{rechts}}| + |\Psi_{f_{links}} >< \Psi_{f_{rechts}}| + |\Psi_{ges_{rechts}} >< \Psi_{f_{links}}|)$$
$$\rho_{Fnach} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi_{f_{links}} >< \Psi_{f_{links}}| + |\Psi_{f_{rechts}} >< \Psi_{f_{rechts}}|)$$

Berechnung der reduzierten Dichtematrizen

Da die beiden Zustände $|\Psi_{ph_{links}} >$ und $|\Psi >_{ph_{rechts}}$ eine Basis für die Umgebung bilden, gilt für jeden Operator A

$$Sp_{Ph}(A) =< \Psi_{ph_{links}}|A|\Psi >_{ph_{links}} + < \Psi_{ph_{rechts}}|A|\Psi >_{ph_{rechts}}$$

Hier setzen wir nun für den Operator A die Dichtematrix $\rho_{vor} = |\Psi_{ges_{vor}} >< \Psi_{ges_{vor}}|$ bzw. $\rho_{nach} = |\Psi_{ges_{nach}} >< \Psi_{ges_{nach}}|$ ein. Dann setzen wir alle Skalarprodukte $< \Psi_{ph_{links}}|\Psi >_{ph_{rechts}}$ Null (das war die Annahme, das die Umgebungszustände eine Orthogonalbasis bilden) und dann setzen wir noch die Normierung

$$< \Psi_{ph_{rechts}}|\Psi >_{ph_{rechts}} =< \Psi_{ph_{links}}|\Psi >_{ph_{links}} = 1$$

ein und erhalten das Ergebnis der vorherigen Folie.

Betrachte Tüte mit rosa und weißen Schokolinsen:

- eigentliches Gemisch (”proper mixture”) - ”subjektiver Zufall”

$$\begin{pmatrix} 0.7|rosa><rosa| & 0 \\ 0 & 0.3|weiss><weiss| \end{pmatrix}$$

$$\rho \begin{pmatrix} |rosa> \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.7|rosa> \\ 0 \end{pmatrix}$$

- uneigentliches Gemisch (”improper mixture”) - ”objektiver Zufall”

$$\begin{pmatrix} 0.7|rosa><rosa| & 0.001|rosa><weiss| \\ 0.0004|weiss><rosa| & 0.3|weiss><weiss| \end{pmatrix}$$

$$\rho \begin{pmatrix} |rosa> \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.7|rosa> \\ 0.0004|weiss> \end{pmatrix}$$

Zusammenfassung:

1. Gesamtzustand vor der Messung

   Gesamtzustand nach der Messung

2. Nur ein Teilsystem wird gemessen

   $\Rightarrow$ Dichtematrix des Gesamtsystems

   $\Rightarrow$ reduzierte Dichtematrix

$$\begin{pmatrix} \left|\Psi_{f_{links}} >< \Psi_{f_{links}}\right| & \text{kleine Zahl} \cdot \left|\Psi_{f_{links}} >< \Psi_{f_{rechts}}\right| \\ \text{kleine Zahl} \cdot \left|\Psi_{f_{rechts}} >< \Psi_{f_{links}}\right| & \left|\Psi_{f_{rechts}} >< \Psi_{f_{rechts}}\right| \end{pmatrix}$$

Bis jetzt: Nur stures Anwenden des Formalismus, keine Interpretation!

offene Fragen

Bis jetzt: Nur stures Anwenden des Formalismus, keine Interpretation!

- Erklärung, warum wir ”makroskopische ” Zustände messen
- Aber:
  - zwar kleine Interferenzterme, aber vorhanden - Bedeutung?
  - immer noch kein subjektiver Zufall, sondern ein objektiver.
  - selbst wenn man die Nicht-Diagonalelemente vernachlässigt, gibt es immer noch 2 mögliche Zustände, von denen aber nur einer realiesiert ist.
  - Was bedeutet die Interferenz des Gesamtsystems (des gesamten Universums?)

  $\Rightarrow$ Entweder ”Wegerklären” (Kollapstheorien) oder Interpretation der Interferenzen (z.B. Many-Worlds-Interpretation)

Löst Dekohärenz das Messproblem?

- ja, weil sie erklärt, warum die makroskopische Welt anders aussieht als die mikroskopische
- nein, weil das grundsätzliche Problem nicht gelöst ist.

Literatur

Ich möchte hier nur einige Internetressourcen, welche meiner Meinung nach zum Nachlesen geeignet sind angeben. Insbesondere die ersten beiden, sind für ein prinzipielles Verständnis zu empfehlen.

Einen sehr guten, allgemeinverständlichen Zugang zur Dekohärenz als ”physikalisches Phänomen” gibt es unter http://www.ap.univie.ac.at/users/fe/Quantentheorie/Dekohaerenz/ von Franz Embacher, Universität Wien

Einen guten Überblick ber das Thema aus philosophischer Sicht mit jeder Menge Literaturhinweisen, ergibt die Datenbank Plato unter http://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence/ - Guido Bacciagaluppi University of California/ Berkeley

Im übrigen gibt es auch eine Homepage von E. Joos zu diesem Thema, die schön bunt ist und weiterführende Links zu aktueller Forschung enthält. http://www.decoherence.de/