Was ist Dekohärenz?

Michael Hofmann

Institut für Physik der Humboldt-Universität zu Berlin

Seminar „Grundlagen der Quantenphysik“

Gliederung

Übergang vom Klassischen zur Quantenwelt

- Quantenmechanik eine der erfolgreichsten Theorien der Physik
- In Experimenten bisher keinen Widerspruch gefunden
- Warum sich darüber also den Kopf zerbrechen?

Übergang vom Klassischen zur Quantenwelt

- Quantenmechanik eine der erfolgreichsten Theorien der Physik
- In Experimenten bisher keinen Widerspruch gefunden
- Warum sich darüber also den Kopf zerbrechen?

Übergang vom Klassischen zur Quantenwelt

- Quantenmechanik eine der erfolgreichsten Theorien der Physik
- In Experimenten bisher keinen Widerspruch gefunden
- Warum sich darüber also den Kopf zerbrechen?

Problem unserer Erfahrung

1. Zeitliche Entwicklung der Schrödingergleichung führt durch Kohärenz zur Überlagerung verschiedener Realitäten
2. Theorie liefert keinen Grund zur Annahme, dass die Schrödingergleichung im Makroskopischen ungültig wird.

$\Rightarrow$ Widerspruch zu unserer Wahrnehmung!

Problem unserer Erfahrung

1. Zeitliche Entwicklung der Schrödingergleichung führt durch Kohärenz zur Überlagerung verschiedener Realitäten
2. Theorie liefert keinen Grund zur Annahme, dass die Schrödingergleichung im Makroskopischen ungültig wird.

$\Rightarrow$ Widerspruch zu unserer Wahrnehmung!

Problem unserer Erfahrung

1. Zeitliche Entwicklung der Schrödingergleichung führt durch Kohärenz zur Überlagerung verschiedener Realitäten
2. Theorie liefert keinen Grund zur Annahme, dass die Schrödingergleichung im Makroskopischen ungültig wird.

$\Rightarrow$ Widerspruch zu unserer Wahrnehmung!

Oder anders formuliert:

Warum liefert uns die quantenmechanische Messung keine Superposition?

Schrödinger (1935)

„Die abrupte Veränderung durch die Messung ist der interessanteste Punkt der ganzen Theorie. Es ist genau der Punkt, der den Bruch mit dem naiven Realismus verlangt.“[1]

[1] Quelle: Schrödinger, Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik. In: Naturwissenschaften 23:807-812

Oder anders formuliert:
Warum liefert uns die quantenmechanische Messung keine Superposition?

Schrödinger (1935)

„Die abrupte Veränderung durch die Messung ist der interessanteste Punkt der ganzen Theorie. Es ist genau der Punkt, der den Bruch mit dem naiven Realismus verlangt.“[1]

[1] Quelle: Schrödinger, Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik. In: Naturwissenschaften 23:807-812

Kopenhagener Deutung (Bohr 1927)

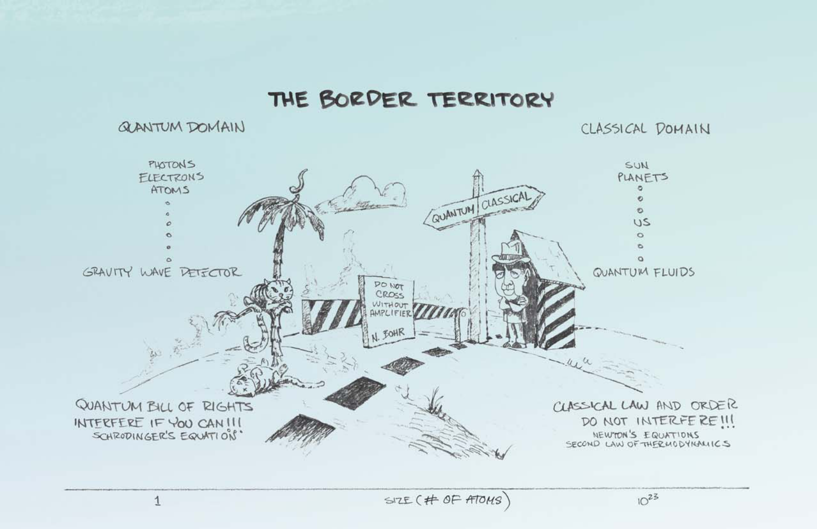
- klassischer Apperat führt Messung durch
- Quantenmechanik hat keinen universellen Anspruch
- postuliert Grenze zwischen klassischer und quantenmechnischer Welt
- kein Anhaltspunkt einer solchen Grenze

Kopenhagener Deutung (Bohr 1927)

- klassischer Apperat führt Messung durch
- Quantenmechanik hat keinen universellen Anspruch
- postuliert Grenze zwischen klassischer und quantenmechnischer Welt
- kein Anhaltspunkt einer solchen Grenze

Kopenhagener Deutung (Bohr 1927)

- klassischer Apperat führt Messung durch
- Quantenmechanik hat keinen universellen Anspruch
- postuliert Grenze zwischen klassischer und quantenmechnischer Welt
- kein Anhaltspunkt einer solchen Grenze


THE BORDER TERRITORY
QUANTUM DOMAIN
CLASSICAL DOMAIN
PHOTONS
ELECTRONS
ATOMS
GRAVITY WAVE DETECTOR
SUN
PLANETS
US
QUANTUM FLUIDS
QUANTUM
CLASSICAL
DO NOT CROSS WITHOUT AMPLIFIER
N. BOHR
QUANTUM BILL OF RIGHTS
INTERFERE IF YOU CAN!!!
SCHRODINGER'S EQUATION
CLASSICAL LAW AND ORDER
DO NOT INTERFERE!!!
NEWTON'S EQUATIONS
SECOND LAW OF THERMODYNAMICS
1
SIZE (# OF ATOMS)
10^23

Kopenhagener Deutung (Bohr 1927)

- klassischer Apperat führt Messung durch
- Quantenmechanik hat keinen universellen Anspruch
- postuliert Grenze zwischen klassischer und quantenmechnischer Welt
- kein Anhaltspunkt einer solchen Grenze

von Neumannsche Messtheorie (1932)

- Messapparat als quantenmechanisches Objekt
- Folge: Superposition von Zeigerstellung
- Postulat der Zustandsreduktion bei Messung

von Neumannsche Messtheorie (1932)

- Messapparat als quantenmechanisches Objekt
- Folge: Superposition von Zeigerstellung
- Postulat der Zustandsreduktion bei Messung

von Neumannsche Messtheorie (1932)

- Messapparat als quantenmechanisches Objekt
- Folge: Superposition von Zeigerstellung
- Postulat der Zustandsreduktion bei Messung

Viel-Welten-Theorie (1957)

- statt Zustandsreduktion Aufspaltung der Wellenfunktion in verschiedene Zweige
- jede Möglichkeit wird dabei in einem anderen Paralleluniversum realisiert

Viel-Welten-Theorie (1957)

- statt Zustandsreduktion Aufspaltung der Wellenfunktion in verschiedene Zweige
- jede Möglichkeit wird dabei in einem anderen Paralleluniversum realisiert

Grundgedanken zur Dekohärenztheorie

- Schrödingergleichung gilt nur für isolierte Systeme
- Objekt und Messapparat unter Einfluss der Umgebung, also offenes System
- Wechselwirkung zerstört die quantenmechanische Interferenzfähigkeit

Grundgedanken zur Dekohärenztheorie

- Schrödingergleichung gilt nur für isolierte Systeme
- Objekt und Messapparat unter Einfluss der Umgebung, also offenes System
- Wechselwirkung zerstört die quantenmechanische Interferenzfähigkeit

Grundgedanken zur Dekohärenztheorie

- Schrödingergleichung gilt nur für isolierte Systeme
- Objekt und Messapparat unter Einfluss der Umgebung, also offenes System
- Wechselwirkung zerstört die quantenmechanische Interferenzfähigkeit

Grundgedanken zur Dekohärenztheorie

- Schrödingergleichung gilt nur für isolierte Systeme
- Objekt und Messapparat unter Einfluss der Umgebung, also offenes System
- Wechselwirkung zerstört die quantenmechanische Interferenzfähigkeit
  $\Rightarrow$**Dekohärenz**

Messtheorie am einfachen Beispiel

- Observable mit Zuständen $|-\rangle$ und $|+\rangle$
- Messgerät entsprechend $|M_-\rangle$ und $|M_+\rangle$
- Zustandsmessung ist definiert über

$$|+\rangle|M_-\rangle \longrightarrow |+\rangle|M_+\rangle \quad , \quad |-\rangle|M_-\rangle \longrightarrow |-\rangle|M_-\rangle$$

und wird durch die Schrödingergleichung beschrieben.

Messtheorie am einfachen Beispiel

- Observable mit Zuständen $|-\rangle$ und $|+\rangle$
- Messgerät entsprechend $|M_-\rangle$ und $|M_+\rangle$
- Zustandsmessung ist definiert über

$$|+\rangle|M_-\rangle \longrightarrow |+\rangle|M_+\rangle \quad , \quad |-\rangle|M_-\rangle \longrightarrow |-\rangle|M_-\rangle$$

und wird durch die Schrödingergleichung beschrieben.

Messtheorie am einfachen Beispiel

- Observable mit Zuständen $|-\rangle$ und $|+\rangle$
- Messgerät entsprechend $|M_-\rangle$ und $|M_+\rangle$
- Zustandsmessung ist definiert über

$$|+\rangle|M_-\rangle \longrightarrow |+\rangle|M_+\rangle \quad , \quad |-\rangle|M_-\rangle \longrightarrow |-\rangle|M_-\rangle$$

und wird durch die Schrödingergleichung beschrieben.

Was passiert bei der Messung von Superpositionen?

- vor der Messung: $|\Psi_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle$
- nach der Messung: $|\Psi_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle$

Problem

- dem Messapparat ist kein eigener Zustand zuschreibbar
- Zustandsreduktion nötig → **aus reinem Zustand wird statistisches Gemisch**

Was passiert bei der Messung von Superpositionen?

- vor der Messung: $|\Psi_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle$
- nach der Messung: $|\Psi_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle$

Problem

- dem Messapparat ist kein eigener Zustand zuschreibbar
- Zustandsreduktion nötig $\rightarrow$ aus reinem Zustand wird statistisches Gemisch

Was passiert bei der Messung von Superpositionen?

- vor der Messung: $|\Psi_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle$
- nach der Messung: $|\Psi_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle$

Problem

- dem Messapparat ist kein eigener Zustand zuschreibbar
- Zustandsreduktion nötig $\rightarrow$ **aus reinem Zustand wird statistisches Gemisch**

Was passiert bei der Messung von Superpositionen?

- vor der Messung: $|\Psi_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle$
- nach der Messung: $|\Psi_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle$

Problem

- dem Messapparat ist kein eigener Zustand zuschreibbar
- Zustandsreduktion nötig $\rightarrow$ **aus reinem Zustand wird statistisches Gemisch**

Darstellung über Dichtematrizen

- reiner Zustand:

$$\rho = |\Psi\rangle\langle\Psi| \quad , \quad \langle A\rangle = \mathrm{Sp}(\rho A) \quad , \quad \rho^2 = \rho$$

- gemischter Zustand:

$$\rho' = \sum_i |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i| \quad , \quad \langle A\rangle = \mathrm{Sp}(\rho' A) \quad , \quad \rho'^2 \neq \rho'$$

- für $|\Psi_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle$ folgt daher

$$\rho = |\Psi_1\rangle\langle\Psi_1| = \begin{pmatrix} |a|^2 & ab^* \\ a^*b & |b|^2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Darstellung über Dichtematrizen

- reiner Zustand:

$$\rho = |\Psi\rangle\langle\Psi| \quad , \quad \langle A\rangle = \mathrm{Sp}(\rho A) \quad , \quad \rho^2 = \rho$$

- gemischter Zustand:

$$\rho' = \sum_i |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i| \quad , \quad \langle A\rangle = \mathrm{Sp}(\rho' A) \quad , \quad \rho'^2 \neq \rho'$$

- für $|\Psi_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle$ folgt daher

$$\rho = |\Psi_1\rangle\langle\Psi_1| = \begin{pmatrix} |a|^2 & ab^* \\ a^*b & |b|^2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Darstellung über Dichtematrizen

- reiner Zustand:

$$\rho = |\Psi\rangle\langle\Psi| \quad , \quad \langle A\rangle = \mathrm{Sp}(\rho A) \quad , \quad \rho^2 = \rho$$

- gemischter Zustand:

$$\rho' = \sum_i |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i| \quad , \quad \langle A\rangle = \mathrm{Sp}(\rho' A) \quad , \quad \rho'^2 \neq \rho'$$

- für $|\Psi_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle$ folgt daher

$$\rho = |\Psi_1\rangle\langle\Psi_1| = \begin{pmatrix} |a|^2 & ab^* \\ a^*b & |b|^2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Einfluss der Umgebung

- Zustand $|U_0\rangle$ der Umgebung muss in die Betrachtung mit einbezogen werden
- vor Messung: $|\tilde{\Psi}_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle|U_0\rangle$
- nach Messung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

Annahme

Operatoren unserer Messgröße wirken nur im Teilsystem Objekt-Messgerät.

$$\Rightarrow \langle A\rangle = \mathrm{Sp}_{OM}\mathrm{Sp}_U(\rho A) = \mathrm{Sp}_{OM}[(\mathrm{Sp}_U(\rho))A]$$

Sinnvoll, die reduzierte Dichtematrix $\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho)$ zu definieren.

Einfluss der Umgebung

- Zustand $|U_0\rangle$ der Umgebung muss in die Betrachtung mit einbezogen werden
- vor Messung: $|\tilde{\Psi}_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle|U_0\rangle$
- nach Messung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

Annahme

Operatoren unserer Messgröße wirken nur im Teilsystem Objekt-Messgerät.

$$\Rightarrow \langle A\rangle = \mathrm{Sp}_{OM}\mathrm{Sp}_U(\rho A) = \mathrm{Sp}_{OM}[(\mathrm{Sp}_U(\rho))A]$$

Sinnvoll, die reduzierte Dichtematrix $\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho)$ zu definieren.

Einfluss der Umgebung

- Zustand $|U_0\rangle$ der Umgebung muss in die Betrachtung mit einbezogen werden
- vor Messung: $|\tilde{\Psi}_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle|U_0\rangle$
- nach Messung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

Annahme

Operatoren unserer Messgröße wirken nur im Teilsystem Objekt-Messgerät.

$$\Rightarrow \langle A\rangle = \mathrm{Sp}_{OM}\mathrm{Sp}_U(\rho A) = \mathrm{Sp}_{OM}[(\mathrm{Sp}_U(\rho))A]$$

Sinnvoll, die reduzierte Dichtematrix $\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho)$ zu definieren.

Einfluss der Umgebung

- Zustand $|U_0\rangle$ der Umgebung muss in die Betrachtung mit einbezogen werden
- vor Messung: $|\tilde{\Psi}_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle|U_0\rangle$
- nach Messung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

Annahme

Operatoren unserer Messgröße wirken nur im Teilsystem Objekt-Messgerät.

$$\Rightarrow \langle A\rangle = \mathrm{Sp}_{OM}\mathrm{Sp}_U(\rho A) = \mathrm{Sp}_{OM}[(\mathrm{Sp}_U(\rho))A]$$

Sinnvoll, die reduzierte Dichtematrix $\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho)$ zu definieren.

Einfluss der Umgebung

- Zustand $|U_0\rangle$ der Umgebung muss in die Betrachtung mit einbezogen werden
- vor Messung: $|\tilde{\Psi}_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle|U_0\rangle$
- nach Messung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

Annahme

Operatoren unserer Messgröße wirken nur im Teilsystem Objekt-Messgerät.

$$\Rightarrow \langle A\rangle = \mathrm{Sp}_{OM}\mathrm{Sp}_U(\rho A) = \mathrm{Sp}_{OM}[(\mathrm{Sp}_U(\rho))A]$$

Sinnvoll, die reduzierte Dichtematrix $\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho)$ zu definieren.

Einfluss der Umgebung

- Zustand $|U_0\rangle$ der Umgebung muss in die Betrachtung mit einbezogen werden
- vor Messung: $|\tilde{\Psi}_0\rangle = [a|+\rangle + b|-\rangle]|M_-\rangle|U_0\rangle$
- nach Messung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

Annahme

Operatoren unserer Messgröße wirken nur im Teilsystem Objekt-Messgerät.

$$\Rightarrow \langle A\rangle = \mathrm{Sp}_{OM}\mathrm{Sp}_U(\rho A) = \mathrm{Sp}_{OM}[(\mathrm{Sp}_U(\rho))A]$$

Sinnvoll, die reduzierte Dichtematrix $\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho)$ zu definieren.

reduzierte Dichtematrix

Erinnerung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

$$\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho) = \langle U_+|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_+\rangle + \langle U_-|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_-\rangle =$$

$$= |a|^2|+, M_+\rangle\langle +, M_+| + |b|^2|-, M_-\rangle\langle -, M_-| = \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Folgerungen

- $\hat{\rho}$ stellt Dichtematrix eines scheinbar gemischten Ensembles dar, obwohl das Gesamtsystem ein reiner Zustand ist.
- Teilsystem verliert seine Kohärenz an die Umgebung, es wird dekohärent.

reduzierte Dichtematrix

Erinnerung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

$$\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho) = \langle U_+|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_+\rangle + \langle U_-|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_-\rangle =$$

$$= |a|^2|+, M_+\rangle\langle+, M_+| + |b|^2|-, M_-\rangle\langle-, M_-| = \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Folgerungen

- $\hat{\rho}$ stellt Dichtematrix eines scheinbar gemischten Ensembles dar, obwohl das Gesamtsystem ein reiner Zustand ist.
- Teilsystem verliert seine Kohärenz an die Umgebung, es wird dekohärent.

reduzierte Dichtematrix

Erinnerung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

$$\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho) = \langle U_+|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_+\rangle + \langle U_-|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_-\rangle =$$

$$= |a|^2|+, M_+\rangle\langle +, M_+| + |b|^2|-, M_-\rangle\langle -, M_-| = \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Folgerungen

- $\hat{\rho}$ stellt Dichtematrix eines scheinbar gemischten Ensembles dar, obwohl das Gesamtsystem ein reiner Zustand ist.
- Teilsystem verliert seine Kohärenz an die Umgebung, es wird dekohärent.

reduzierte Dichtematrix

Erinnerung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

$$\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho) = \langle U_+|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_+\rangle + \langle U_-|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_-\rangle =$$

$$= |a|^2|+, M_+\rangle\langle +, M_+| + |b|^2|-, M_-\rangle\langle -, M_-| = \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Folgerungen

- $\hat{\rho}$ stellt Dichtematrix eines scheinbar gemischten Ensembles dar, obwohl das Gesamtsystem ein reiner Zustand ist.
- Teilsystem verliert seine Kohärenz an die Umgebung, es wird dekohärent.

reduzierte Dichtematrix

Erinnerung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

$$\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho) = \langle U_+|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_+\rangle + \langle U_-|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_-\rangle =$$

$$= |a|^2|+, M_+\rangle\langle +, M_+| + |b|^2|-, M_-\rangle\langle -, M_-| = \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Folgerungen

- $\hat{\rho}$ stellt Dichtematrix eines scheinbar gemischten Ensembles dar, obwohl das Gesamtsystem ein reiner Zustand ist.
- Teilsystem verliert seine Kohärenz an die Umgebung, es wird dekohärent.

reduzierte Dichtematrix

Erinnerung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

$$\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho) = \langle U_+|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_+\rangle + \langle U_-|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_-\rangle =$$

$$= |a|^2|+, M_+\rangle\langle +, M_+| + |b|^2|-, M_-\rangle\langle -, M_-| = \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Folgerungen

- $\hat{\rho}$ stellt Dichtematrix eines scheinbar gemischten Ensembles dar, obwohl das Gesamtsystem ein reiner Zustand ist.
- Teilsystem verliert seine Kohärenz an die Umgebung, es wird dekohärent.

reduzierte Dichtematrix

Erinnerung: $|\tilde{\Psi}_1\rangle = a|+\rangle|M_+\rangle|U_+\rangle + b|-\rangle|M_-\rangle|U_-\rangle$

$$\hat{\rho} = \mathrm{Sp}_U(\rho) = \langle U_+|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_+\rangle + \langle U_-|\tilde{\Psi}_1\rangle\langle\tilde{\Psi}_1|U_-\rangle =$$

$$= |a|^2|+,M_+\rangle\langle +,M_+| + |b|^2|-,M_-\rangle\langle -,M_-| = \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

Folgerungen

- $\hat{\rho}$ stellt Dichtematrix eines scheinbar gemischten Ensembles dar, obwohl das Gesamtsystem ein reiner Zustand ist.
- Teilsystem verliert seine Kohärenz an die Umgebung, es wird dekohärent.

Zeitskala der Dekohärenz

- Dekohärenz folgt der Schrödingergleichung und ist daher ein dynamischer Prozess.
- Abschätzung der Dekohärenzzeiten erfordert Wissen über die Umgebung und deren Wechselwirkung.
- Aufgabe der theoretischen Physiker anhand von Modellsystemen Dekohärenzzeiten zu berechnen.

Zeitskala der Dekohärenz

- Dekohärenz folgt der Schrödingergleichung und ist daher ein dynamischer Prozess.
- Abschätzung der Dekohärenzzeiten erfordert Wissen über die Umgebung und deren Wechselwirkung.
- Aufgabe der theoretischen Physiker anhand von Modellsystemen Dekohärenzzeiten zu berechnen.

Zeitskala der Dekohärenz

- Dekohärenz folgt der Schrödingergleichung und ist daher ein dynamischer Prozess.
- Abschätzung der Dekohärenzzeiten erfordert Wissen über die Umgebung und deren Wechselwirkung.
- Aufgabe der theoretischen Physiker anhand von Modellsystemen Dekohärenzzeiten zu berechnen.

Beispiel: „Schrödinger-Kätzchen“ eines Teilchens im Skalarfeld ϕ

- Superposition zweier Gaußkurven

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\chi^{+}(x) + \chi^{-}(x)\right)$$

- Außerdiagonalelemente zerfallen nach

$$\frac{d}{dt}(\rho^{+-}) \propto \frac{2\gamma m k_B T}{\hbar^2} (\Delta x)^2 \rho^{+-} = \tau_D^{-1} \rho^{+-}$$

- Dekohärenzzeit: $\tau_D \approx \tau_R \frac{\hbar^2}{(\Delta x)^2 2 m k_B T}$

Beispiel: „Schrödinger-Kätzchen" eines Teilchens im Skalarfeld ϕ

- Superposition zweier Gaußkurven

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\chi^{+}(x) + \chi^{-}(x)\right)$$

- Außerdiagonalelemente zerfallen nach

$$\frac{d}{dt}(\rho^{+-}) \propto \frac{2\gamma m k_B T}{\hbar^2}(\Delta x)^2 \rho^{+-} = \tau_D^{-1} \rho^{+-}$$

- Dekohärenzzeit: $\tau_D \approx \tau_R \frac{\hbar^2}{(\Delta x)^2 2 m k_B T}$

Beispiel: „Schrödinger-Kätzchen“ eines Teilchens im Skalarfeld ϕ

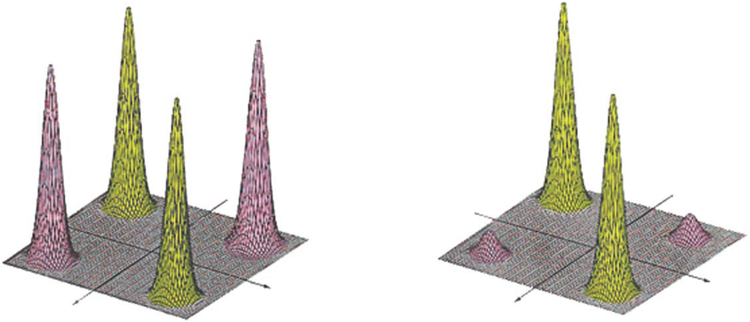
- Superposition zweier Gaußkurven

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\chi^+(x) + \chi^-(x) \right)$$

- Außerdiagonalelemente zerfallen nach

$$\frac{d}{dt}(\rho^{+-}) \propto \frac{2\gamma m k_B T}{\hbar^2} (\Delta x)^2 \rho^{+-} = \tau_D^{-1} \rho^{+-}$$

- Dekohärenzzeit: $\tau_D \approx \tau_R \dfrac{\hbar^2}{(\Delta x)^2 2 m k_B T}$


[2]

[2] Quelle: W. H. Zurek, Decoherence and the transition from quantum to classical - REVISITED, Los Alamos Science 27, 86 (2002). http://xxx.arxiv.org/abs/quant-ph/0306072

Folgerungen

- Dekohärenzzeit klein für makroskopische Objekte (z.B. $T = 300\,\mathrm{K},\ m = 1\,\mathrm{g},\ \Delta x = 1\,\mathrm{cm} \rightarrow \frac{\tau_D}{\tau_R} \propto 10^{-40}\,\mathrm{s}!$)
- kann für praktische Zwecke als instantan angesehen werden
- aber: Quanteneffekte bei tiefen Temperaturen nicht ausgeschlossen (z.B. Bose-Einstein-Kondensate, Josephson-Effekt)

Folgerungen

- Dekohärenzzeit klein für makroskopische Objekte (z.B. $T = 300\,\mathrm{K}$, $m = 1\,\mathrm{g}$, $\Delta x = 1\,\mathrm{cm} \longrightarrow \frac{\tau_D}{\tau_R} \propto 10^{-40}\,\mathrm{s}$!)
- kann für praktische Zwecke als instantan angesehen werden
- aber: Quanteneffekte bei tiefen Temperaturen nicht ausgeschlossen (z.B. Bose-Einstein-Kondensate, Josephson-Effekt)

Folgerungen

- Dekohärenzzeit klein für makroskopische Objekte (z.B. $T = 300\,\mathrm{K},\ m = 1\,\mathrm{g},\ \Delta x = 1\,\mathrm{cm} \longrightarrow \frac{\tau_D}{\tau_R} \propto 10^{-40}\,\mathrm{s!}$)
- kann für praktische Zwecke als instantan angesehen werden
- aber: Quanteneffekte bei tiefen Temperaturen nicht ausgeschlossen (z.B. Bose-Einstein-Kondensate, Josephson-Effekt)

Zusammenfassung

- Quantensysteme sind selten als vollkommen isoliert zu betrachten. **Wechselwirkung mit der Umgebung zerstört die Kohärenz.**
- Die Theorie der Dekohärenz genügt einer unitären Entwicklung der Wellenfunktion. **Auf das Postulat einer Zustandsreduktion kann verzichtet werden.**
- **Abschätzung von Dekohärenzzeiten ist aufwendig, aber möglich.** Dekohärenz ist somit visualisierbar.

Zusammenfassung

- Quantensysteme sind selten als vollkommen isoliert zu betrachten. **Wechselwirkung mit der Umgebung zerstört die Kohärenz**.
- Die Theorie der Dekohärenz genügt einer unitären Entwicklung der Wellenfunktion. **Auf das Postulat einer Zustandsreduktion kann verzichtet werden.**
- **Abschätzung von Dekohärenzzeiten ist aufwendig, aber möglich.** Dekohärenz ist somit visualisierbar.

Zusammenfassung

- Quantensysteme sind selten als vollkommen isoliert zu betrachten. **Wechselwirkung mit der Umgebung zerstört die Kohärenz**.
- Die Theorie der Dekohärenz genügt einer unitären Entwicklung der Wellenfunktion. **Auf das Postulat einer Zustandsreduktion kann verzichtet werden.**
- **Abschätzung von Dekohärenzzeiten ist aufwendig, aber möglich.** Dekohärenz ist somit visualisierbar.

Ausblick

- Messvorgang immernoch nicht geklärt. Wie kommt man von Wahrscheinlichkeiten zum Messwert?
- Erforschung der Dekohärenz zukunftsweisend für neue Quantentechnologien

Ausblick

- Messvorgang immernoch nicht geklärt. Wie kommt man von Wahrscheinlichkeiten zum Messwert?
- Erforschung der Dekohärenz zukunftsweisend für neue Quantentechnologien

Vielen Dank für Eure/Ihre Aufmerksamkeit!