

## Nochmal das Meßproblem

Warum beobachten wir keine „makroskopischen“ Superpositionen?

Messung am System

$$|S\rangle = a|S_1\rangle + b|S_2\rangle$$

mit Meßgerät  $M$ :

*vor* der Messung

$$|\psi_i\rangle = |S\rangle|M_0\rangle$$

*nach* der Messung

$$|\psi_f\rangle = a|S_1\rangle|M_1\rangle + b|S_2\rangle|M_2\rangle$$

## Nochmal das Meßproblem

Stattdessen wird beobachtet

$$|\psi_f\rangle = |S_1\rangle|M_1\rangle$$

*oder*

$$|\psi_f\rangle = |S_2\rangle|M_2\rangle$$

mit den jeweiligen Wahrscheinlichkeiten  $|a|^2$  bzw.  $|b|^2$ .

→ Die Wellenfunktion ist „kollabiert“.

# Kollaps der Wellenfunktion

- Was löst den Kollaps aus?
- Wann geschieht der Kollaps?
- Wo geschieht der Kollaps?

# Kollapstheorien

Allgemeiner Ansatz: **von Neumann**

Kollaps findet *irgendwo* zwischen Messung und Beobachter statt (Beweglichkeit des von-Neumann-Übergangs)

## Zwei grundsätzliche Richtungen:

**Wigner, London, Bauer:** Kollaps geschieht *im* Bewußtsein des Beobachters — außerhalb der physikalischen Welt

→ Cartesische Spaltung, Leib-Seele-Problem

**Ghirardi, Rimini, Weber:** Kollaps wird erreicht durch Modifikation der Theorie

→ Verlust der Linearität

# Spontane Lokalisierung

Ansatz von Ghirardi, Rimini und Weber (GRW-Theorie)

Idee: Ortsraum hat eine hervorgehobene Bedeutung  $\rightarrow$  Hervorhebung der Ortsraumes in der Theorie

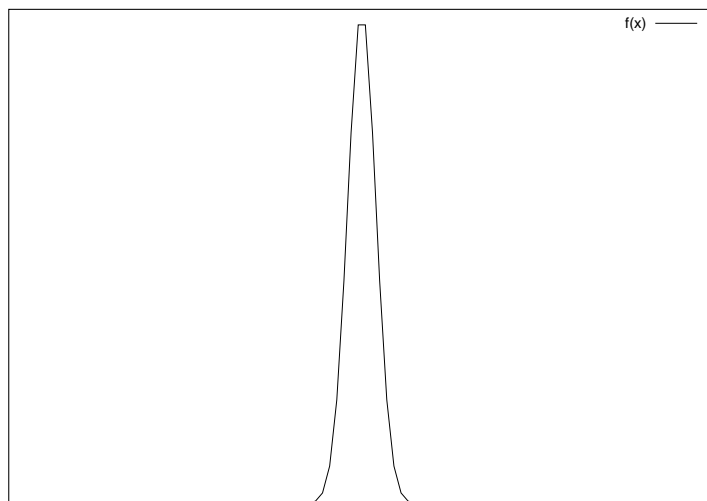
Betrachte N-Teilchen-System  $\psi(t, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N)$ :

**Spontane Lokalisierung** ersetzt  $\psi$  durch

$$\psi'(t, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N; \mathbf{x}) = \psi(t, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N) j(\mathbf{r}_i, \mathbf{x})$$

mit

$$j(\mathbf{r}_i, \mathbf{x}) = K \exp\left(-\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{x})^2}{2a^2}\right)$$



## Spontane Lokalisierung

Ort der Lokalisierung  $x$  wird zufällig ausgewählt. Wahrscheinlichkeitsverteilung ist durch  $\psi'$  gewichtet.

Mittlere Zeit zwischen zwei Lokalisierungen:

$$\tau \approx 10^{15} \text{s} \approx 10^8 \text{a}$$

für  $N$  Teilchen also  $\tau/N$ .

Im „makroskopischen“ Bereich mit  $N > \approx 10^{20}$  geschieht im Mittel alle  $10^{-5} \text{s}$  eine Lokalisierung.

Zeitkonstante  $\tau$  und Schärfe der Lokalisierung  $a \approx 10^{-7} \text{m}$  werden als Naturkonstanten angesehen.

# Spontane Lokalisierung

## Konsequenz für Superpositionen

$$\varphi_1(\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_L) \chi_1(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_M) + \varphi_2(\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_L) \chi_2(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_M)$$

$\chi_1$  und  $\chi_2$  haben einen räumlichen Abstand  $d \gg a$  (z.B. Zeigerpositionen).

Durch Lokalisierung (Multiplikation mit  $j(\mathbf{r}_i, \mathbf{x})$ ) wird einer der beiden Summanden gegenüber dem anderen vernachlässigbar.

# Spontane Lokalisierung

## Interpretation

Bislang ist die Masse der beteiligten Objekte nicht berücksichtigt.

Berücksichtigung der Masse ergibt, daß die Wahrscheinlichkeit der Lokalisierung von der Massendichteverteilung abhängt.

→ Interpretation der Wellenfunktion als Massendichteverteilung



# Zusammenfassung

## Vorzüge von GRW

- beschreibt die beobachtbaren Phänomene
- geschlossener Ansatz: keine Fallunterscheidung für verschiedene Größenordnungen
- benötigt keine vagen Begriffe von „Messung“ oder „Beobachter“

## Schwächen von GRW

- ist nicht relativistisch
- braucht neue Naturkonstanten
- hat *ad hoc*-Charakter