

# Die Quantenphysik und ihr Weltbild

Roderich Tumulka

EBERHARD KARLS  
UNIVERSITÄT  
TÜBINGEN



20. Februar 2026

Die Quantenphysik gibt es seit 100 Jahren, aber was ihre Rechenregeln uns eigentlich über die Abläufe in der Natur sagen, wird von Experten noch heute kontrovers diskutiert. Im Vortrag gebe ich in allgemeinverständlicher Weise einen Überblick über die hauptsächlichen Sichtweisen, die vor allem auf Niels Bohr (1885–1962) und Albert Einstein (1879–1955) zurück gehen. Dabei kommen Themen zur Sprache wie Determinismus und freier Wille, das Wesen des Zufalls und die Grenzen des Messbaren.

# Was ist überhaupt Quantenphysik?

- Quantenmechanik: die Gesetze für die Bewegung von Elektronen (z.B. innerhalb von Atomen)
- wurde hauptsächlich in den 1920er Jahren entwickelt
- ersetzte die “klassische Mechanik”
- hat erfolgreich verschiedenste Beobachtungsdaten theoretisch vorhergesagt: Energien chemischer Bindungen, Halbleiter, die Farbe der Sonne, die Farbe des Himmelblau, Existenz von Neutronensternen, ...
- stellt mathematische Regeln zur Verfügung, die es erlauben, für eine Vielzahl von Experimenten die Ergebnisse vorherzusagen
- Dabei ist bis heute umstritten, was sich wirklich im Innern von Atomen abspielt. (Später mehr.)
- Quantenelektrodynamik: die Gesetze für Licht und elektromagnetische Felder (in Grundzügen bekannt)
- Quantengravitation: nur ansatzweise bekannt

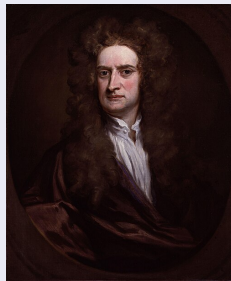
# Zum Vergleich: die klassische Mechanik

Die Newtonsche Mechanik ist eine Theorie, die folgendes besagt:

Das Universum besteht aus einem 3-dimensionalen (Euklidischen) Raum, in dem sich eine Anzahl (vielleicht ca.  $10^{80}$ ) von Materiepunkten (genannt Teilchen) im Laufe der Zeit bewegen gemäß der Bewegungsgleichung

$$m_k \frac{d^2 \mathbf{Q}_k}{dt^2} = - \sum_{j \neq k} \frac{e_j e_k}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_k}{|\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_k|^3} + \sum_{j \neq k} G m_j m_k \frac{\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_k}{|\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_k|^3} . \quad (1)$$

Jeder Punkt im Raum kann durch Angabe der cartesischen Koordinaten  $\mathbf{Q} = (x, y, z)$  beschrieben werden, ein Zeitpunkt durch Angabe einer Zahl  $t$ . Ein Teilchen hat zu jeder Zeit  $t$  einen Ort  $\mathbf{Q}(t) = (x(t), y(t), z(t))$ .



Isaac Newton

- Isaac Newton (1643–1727)
- Leonhard Euler (1707–1783)
- Daniel Bernoulli (1700–1782)
- Charles Augustin de Coulomb (1736–1806)



Leonhard Euler

nach Vorarbeiten von

- Demokritos von Abdera (460 v.Chr.–370 v.Chr.)
- Galileo Galilei (1564–1642)

# Newtonsche Mechanik ist empirisch falsch

Sie macht eine Reihe von richtigen Vorhersagen (z.B. die Planetenbewegung), aber eben auch falsche: keine Interferenzeffekte, keine schwarzen Löcher, ...

Wir unterrichten sie trotzdem, weil

- wir sie oft zum Vergleich heranziehen
- sie sich wegen ihrer Einfachheit zum Lernen eignet
- manche Funktionsweisen und Erklärungen in der klassischen Mechanik und Quantenmechanik gleich sind.

# Newtonsche Mechanik hat einige überraschende Züge:

- Die ganze Materie befindet sich nur in einzelnen Punkten, dazwischen ist leerer Raum. Das meiste in der Welt ist Leere. Die Teilchen kann man trotzdem nicht auf wenig Platz zusammenquetschen, weil sie sich laut (??) bei zu geringen Abständen abstoßen.
- Determinismus: Wie jede Differentialgleichung hat (??) die Eigenschaft, dass die Festlegung von Ort und Geschwindigkeit aller Teilchen zu *einem* Zeitpunkt bereits die Orte und Geschwindigkeiten aller Teilchen zu *jedem* Zeitpunkt festlegen—die gesamte Weltgeschichte!  
Das klingt verrückt, weil wir uns vorstellen, dass die Vergangenheit bereits feststeht, die Zukunft aber noch verändert werden kann.

# Mehr über Determinismus

- Tatsächlich würde ein hypothetisches Universum, das der Newtonschen Mechanik gehorcht, für seine Bewohner sehr ähnlich aussehen wie unseres (nur ohne schwarze Löcher etc.). Sie würden sich an die Vergangenheit erinnern, an die Zukunft aber nicht. Es würde ihnen erscheinen, dass die Zukunft noch nicht feststeht.
- Es scheint schwer, den Finger darauf zu legen, was genau an Determinismus unmöglich wäre.
- Wie steht es mit dem freien Willen? KI scheint zu demonstrieren: auch eine Intelligenz, die fundamental deterministisch funktioniert, kann Möglichkeiten abwägen und rationale Entscheidungen treffen, als hätte sie freien Willen.
- Vielleicht besteht gar kein Konflikt zwischen Determinismus und freiem Willen.

Die Hauptrolle spielt die **Wellenfunktion**

$$\begin{aligned}\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N) \\ = \psi(\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N)\end{aligned}$$

mit Werten in den komplexen Zahlen.

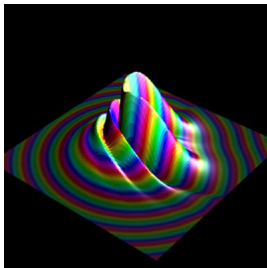


Bild: Bernd Thaller

Der zeitliche Verlauf von  $\psi$  ist beherrscht durch die **Schrödinger-Gleichung**

$$i\hbar \frac{\partial \psi_t}{\partial t} = - \sum_{k=1}^N \frac{\hbar^2}{2m_k} \left( \frac{\partial^2 \psi_t}{\partial x_k^2} + \frac{\partial^2 \psi_t}{\partial y_k^2} + \frac{\partial^2 \psi_t}{\partial z_k^2} \right) + V \psi_t$$

Deterministisch:  $\psi$  zu einer Zeit  $t_0$  legt  $\psi$  zu jeder anderen Zeit  $t$  fest (bis jemand von außen eingreift).

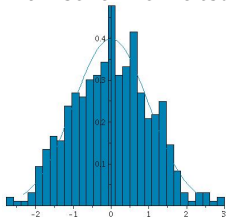
# Die Bornsche Regel

## Bornsche Regel

Messen wir zur Zeit  $t$  die Orte aller Teilchen eines Systems, so ist das Resultat zufällig mit Wahrscheinlichkeitsdichte

$$\rho(x_1, y_1, z_1, \dots, x_N, y_N, z_N) \\ = |\psi(t, x_1, y_1, z_1, \dots, x_N, y_N, z_N)|^2$$

Zum Vergleich: die Gauß'sche Wahrscheinlichkeitsdichte

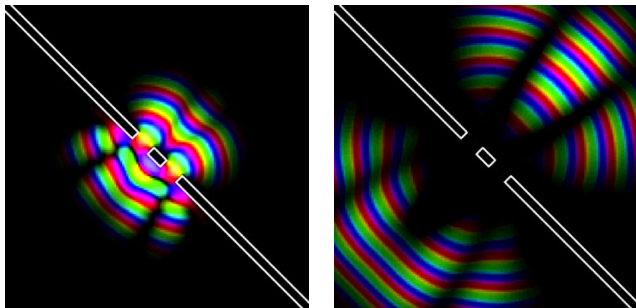


Max Born  
(1882–1970)

Wenn es einen Konflikt zwischen freiem Willen und Determinismus gibt, dann auch zwischen freiem Willen und Wahrscheinlichkeiten.

Denn wenn die Schrödinger-Gleichung die Wahrscheinlichkeitsdichte  $\rho$  für ein menschliches Gehirn festlegt, dann muss jede Entscheidung des Gehirns eben *zufällig* und mit festen Wahrscheinlichkeiten erfolgen.

# Beispiel: das Doppelspalt-Experiment (1)



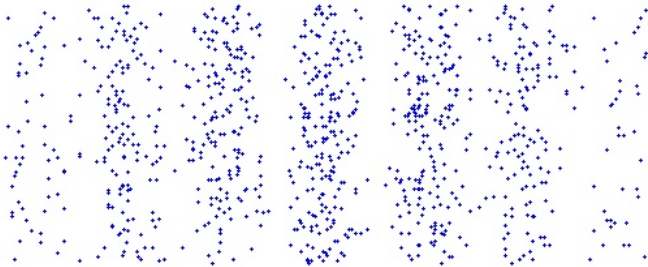
Bilder: Bernd Thaller

Eine Welle ( $\psi$  für 1 Teilchen) tritt durch 2 Öffnungen einer Trennwand (mit Abstand  $\approx$  Wellenlänge). Durch teilweise Auslöschung von Wellen entsteht ein “Interferenzmuster” (helle und dunkle Streifen).

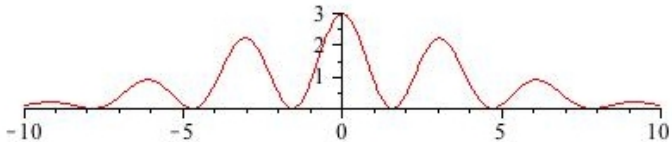
Hinter dem Doppelspalt: ein Teilchendetektor (nicht im Bild) registriert das Teilchen an einem zufälligen Ort mit Wahrscheinlichkeitsdichte  $|\psi|^2$ .

# Beispiel: das Doppelspalt-Experiment (2)

Nach häufiger Wiederholung beobachten wir:



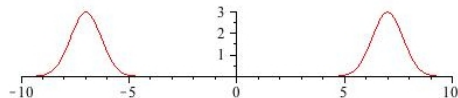
$$\rho(x) =$$



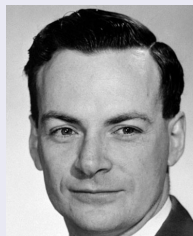
Der Regeln der Quantenmechanik (der “Quantenformalismus”) beschreiben die beobachtbaren Messergebnisse—aber wie macht die Natur es? Was passiert eigentlich in diesem im Experiment?

Keine einfache Frage, denn:

Wenn ein Elektron wie ein Kügelchen wäre, sollte es nur **einen** Spalt passieren. Aber das Streifenmuster entsteht nur, wenn **beide** Spalte offen sind.



War das Elektron an zwei Orten gleichzeitig?



Richard Feynman (1918–1988):  
“Ein Rätsel!”

# Die einflussreiche “Kopenhagener Deutung”:

Man solle die Frage “**Was passiert in Wirklichkeit?**” nicht stellen! Es gebe eben das Teilchenbild und das Wellenbild, die beiden seien unvereinbar, und man müsse mal das eine und mal das andere verwenden. Die beiden seien “komplementär” zu einander. Widersprüche seien nicht schlimm, so lange sie unbeobachtbar sind.



Niels Bohr  
(1885–1962)

# Noch ein Vertreter der “Kopenhagener Deutung”:

Werner Heisenberg schrieb 1958:

“Die Vorstellung einer objektiven realen Welt, deren kleinste Teile objektiv existieren in derselben Weise wie Steine oder Bäume, unabhängig ob wir sie beobachten, ist unmöglich.”

“Wir können nicht länger vom Verhalten des Teilchens unabhängig vom Beobachtungsprozess sprechen.”

(Wie wir sehen werden, ist sie keineswegs unmöglich.)



W. Heisenberg  
(1901–1976)

# Die Meinungen gehen auseinander:

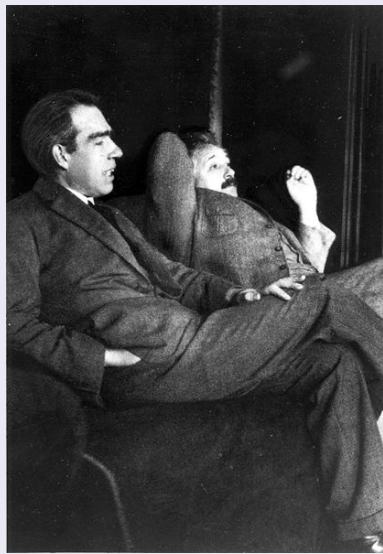
Richard Feynman schrieb 1959:

“Soll das etwa heißen, dass Beobachtungen erst dann Wirklichkeit werden, wenn ich einen Beobachter beim Beobachten beobachte? Das ist eine furchtbare Auffassung. Glauben Sie im Ernst, dass es ohne Beobachter keine Wirklichkeit gibt? Welcher Beobachter? Irgendein Beobachter? Ist eine Fliege ein Beobachter? Ein Stern? Gab es keine Wirklichkeit vor 1 Milliarde Jahren, bevor es die ersten Lebewesen auf der Erde gab? Oder sind Sie der Beobachter? Gibt es dann keine Wirklichkeit mehr nach Ihrem Tod? Ich kenne eine Reihe von respektablen Physikern, die eine Lebensversicherung haben.”

Albert Einstein  
(1879–1955) in 1949:

“Obwohl ich große Anstrengung darauf verwendet habe, ist es mir nicht gelungen, eine klare Formulierung von Bohrs Prinzip der Komplementarität zu gewinnen.”

Einstein argumentierte, dass die Wellenfunktion eine **unvollständige** Beschreibung des Teilchensystems ist: dass es **Teilchen und Welle** gibt.



# Nicht alle mochten "Komplementarität"

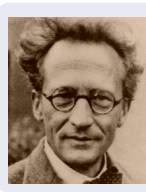
Imre Lakatos (1922–1974) in 1965:

"Nach 1925 führten Bohr und seine Mitarbeiter eine neue, noch nie dagewesene Absenkung kritischer Standards für wissenschaftliche Theorien ein. Dies führte zu einer Absage an die Vernunft in der modernen Physik."



Erwin Schrödinger (1887–1961) in einem Brief 1959:

"Bis auf sehr wenige Ausnahmen (wie [Albert] Einstein und [Max von] Laue) waren der ganze Rest der theoretischen Physiker lupenreine Esel, und ich war der letzte nicht Verrückte."



## Schrodinger's Cat

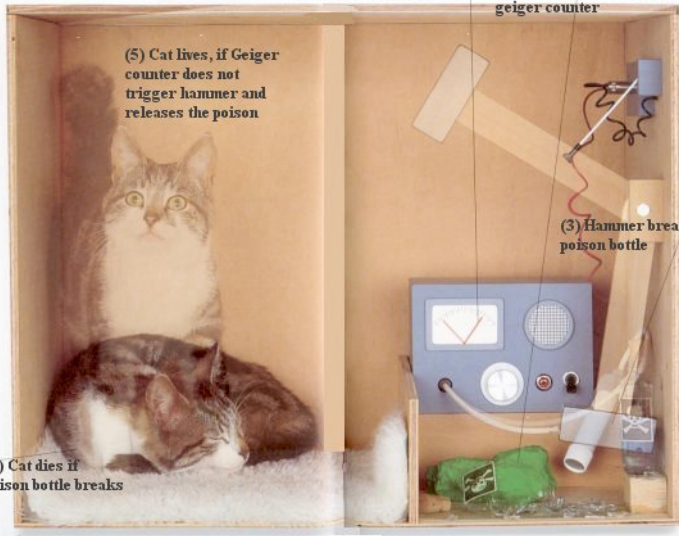
(2) If geiger counter is triggered, hammer falls

(1) Radioactive material has a 50:50 chance of triggering geiger counter

(5) Cat lives, if Geiger counter does not trigger hammer and releases the poison

(3) Hammer breaks poison bottle

(4) Cat dies if poison bottle breaks



## Schrödinger in 1935:

“Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muss): in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, dass im Laufe einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, dass die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die Psi-Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, dass in ihr die lebende und die tote Katze (*sit venia verbo*) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.”

# Was das Katzen-Beispiel bedeutet

- Es wird oft als Paradoxon bezeichnet, aber das klingt, als müsse man sich nur daran gewöhnen.
- Es macht die Kopenhagener Deutung lächerlich.
- Aber im Grunde ist es ein **Argument**: Katze und Atom bilden ein System aus  $10^{25}$  Elektronen und Quarks mit einer Wellenfunktion  $\psi$ , die der Schrödinger-Gleichung unterliegt.  
Aus deren Eigenschaften folgt, dass nach 1 Stunde die Wellenfunktion eine "Superposition" der Wellenfunktion einer toten Katze und der einer lebenden Katze ist:

$$\psi = \psi_{\text{tot}} + \psi_{\text{lebendig}} .$$

Aber in Wirklichkeit ist die Katze entweder tot **oder** lebendig.

John S. Bell: "Das Problem ist: **UND** ist nicht **ODER**."

## Schlussfolgerung:

Entweder ist  $\psi$  nicht die vollständige Beschreibung des Systems, oder die Schrödinger-Gleichung gilt nicht für  $N > 10^{20}$  Teilchen, oder es gibt viele Welten.

# Gibt es einen Ausweg?

# Gibt es einen Ausweg?

Ja, sogar mehrere.

## John S. Bell:

“1952 sah ich das Unmögliche geschehen. Das war in Arbeiten von David Bohm. Bohm zeigte explizit, wie Parameter eingeführt werden können, [...] so dass die Subjektivität der orthodoxen Quantenmechanik, der nötige Bezug auf den Beobachter, eliminiert werden konnten.”

### Bohmsche Mechanik:

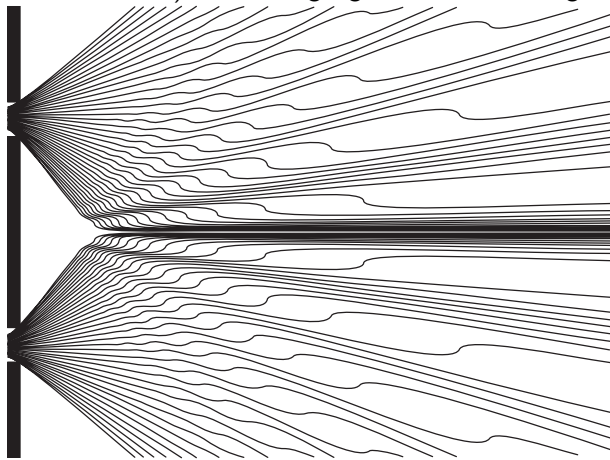
- nimmt “Teilchen” wörtlich und führt ihre Orte  $\mathbf{Q}_k(t) \in \mathbb{R}^3$  zur Zeit  $t$  ein.
- Die vollständige Beschreibung des Zustandes ist  $(\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_N, \psi)$ .
- Bewegungsgleichung

$$\frac{d\mathbf{Q}_k}{dt} = \frac{\hbar \operatorname{Im} \psi^* \nabla_k \psi}{m_k |\psi|^2}$$



David Bohm  
(1917–1992)

Laut der Bohmschen Mechanik gibt es Teilchen *und* Wellen (ganz im Sinne Einsteins). Die Bewegung des Teilchens hängt von der Welle ab.



Zu sehen: Ein Doppelspalt und 80 mögliche Bahnen von Bohms Teilchen. Die Welle passiert beide Spalte, das Teilchen nur einen. Das Teilchen ist nie an 2 Orten zugleich.

# Grenzen des Wissbaren

In der Bohmschen Mechanik haben die Teilchen-Orte ( $Q_1, \dots, Q_N$ ) die Wahrscheinlichkeitsdichte  $|\psi|^2$ . Der Zufall kommt am Anfang des Universums (Urknall) ins Spiel, danach verläuft alles deterministisch.

Aus den Gleichungen folgt:

- Wenn Bewohner eines Bohmschen Universums die Teilchen-Orte messen, dann ändert sich die Wellenfunktion  $\psi$  (wird "schmal").
- Die Bewohner finden alle Regeln des Quantenformalismus bestätigt.
- Für die Bewohner ist es unmöglich, den Ort eines Teilchens genauer als mit Wahrscheinlichkeitsdichte  $|\psi|^2$  zu kennen. Die Natur weiß  $Q_k$ , die Bewohner nicht.

John Bell in 1987:

"Zuzugeben, dass manche Dinge für uns grobe Wesen nicht sichtbar sind, ist meiner Meinung ein Zeichen von anständiger Demut und nicht eine beklagenswerte Sucht nach Metaphysik."

# Anderer Ansatz: die Viele-Welten-Theorie

## Idee:

Bei Wellenfunktionen wie bei Schrödingers Katze,

$$\psi = \psi_{\text{tot}} + \psi_{\text{lebendig}},$$

gibt es sowohl eine tote als auch eine lebende Katze, aber sie merken nichts von einander. Als existierten sie in parallelen Welten.



Hugh Everett  
(1930–1982)

Auch diese Theorie lässt sich in Gleichungen formulieren. Sie hat aber Schwierigkeiten damit, die beobachteten Wahrscheinlichkeiten zu erklären.

# Andere Lösung: spontaner Zerfall von Superpositionen

## Idee:

Die Schrödinger-Gleichung gilt nur näherungsweise, gut für Systeme mit wenigen Teilchen ( $N < 10^4$ ), schlecht für solche mit vielen ( $N > 10^{23}$ ). Der wahre zeitliche Verlauf der Wellenfunktion ist zufällig und verhindert Superpositionen wie Schrödingers Katze.

## Die Ghirardi–Rimini–Weber-Theorie (1986)

Schrödinger-Gleichung wird unterbrochen durch Sprünge

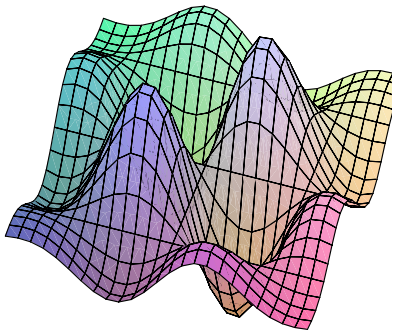
$$\psi_{\text{nachher}}(\mathbf{q}_1 \dots \mathbf{q}_N) = e^{-(\mathbf{q}_k - \mathbf{q})^2} \psi_{\text{vorher}}(\mathbf{q}_1 \dots \mathbf{q}_N)$$

zu zufälligen Zeiten ("stochastisch"), und die Materie hat Dichte in 3 Dimensionen, die der  $|\psi|^2$ -Verteilung in  $3N$  Dimensionen entspricht.

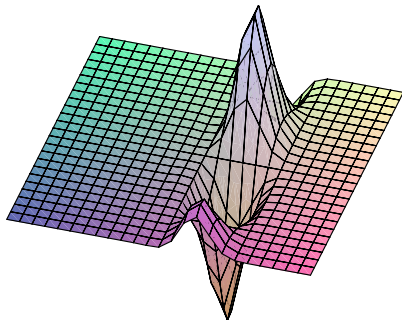


GianCarlo  
Ghirardi  
(1935–2018)

vorher:



nachher:



Die Vorhersagen der GRW-Theorie für Beobachtungen in Experimenten weichen **sehr sehr** leicht von denen des Quantenformalismus ab. Gegenwärtig ist ein experimenteller Test nicht möglich.

## Grenzen des Wissbaren

Aus den Gleichungen der GRW-Theorie folgt, dass Bewohner eines GRW-Universums nicht exakt messen können, wann und wo die  $\psi$ -Sprünge stattfinden. Die Natur weiß es, die Bewohner nicht.

- In der Quantenphysik dominiert seit den Anfängen die Kopenhagener Deutung von Niels Bohr.
- Sie lehnt es ab, zu erklären, was in Wirklichkeit passiert, und erhebt Widersprüchlichkeit zur Tugend. Sie stößt daher auf viel Unmut.
- Gegenvorschläge zur Kopenhagener Deutung:
  - Bohmsche Mechanik (mit Teilchenbahnen wie von Einstein erhofft)
  - Viele-Welten-Theorie (hat aber Probleme mit Wahrscheinlichkeiten)
  - GRW-Theorie (mit Sprüngen in der Wellenfunktion)
- Bohm und viele-Welten sind deterministisch, GRW ist stochastisch.
- Alle Gegenvorschläge sind sich einig, dass es Grenzen des Wissbaren gibt.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!