

Die Rückkehr der Vernunft in die Quantenmechanik und die Aufhebung des intrinsischen Zufalls

Detlef Dürr

Mathematisches Institut
LMU München

Magliaso 2018

Der Anblick so vieler vortrefflichen junger Männer (und Frauen)¹, die eine edle Wißbegierde um mich her versammelt, und in deren Mitte schon manches wirksame Genie für das kommende Zeitalter aufblüht, macht mir meine Pflicht zum Vergnügen, läßt mich aber auch die Strenge und Wichtigkeit derselben in ihrem ganzen Umfang empfinden. Je größer das Geschenk ist, das ich Ihnen zu übergeben habe - und was hat der Mensch dem Menschen Größeres zu geben als Wahrheit? - desto mehr muß ich Sorge tragen, daß sich der Werth desselben unter meiner Hand nicht verringere. Je lebendiger und reiner Ihr Geist in dieser glücklichsten Epoche seines Wirkens empfängt, und je rascher sich Ihre jugendlichen Gefühle entflammen, desto mehr Aufforderung für mich, zu verhüten, daß sich dieser Enthusiasmus, den die Wahrheit allein das Recht hat zu erwecken, an Betrug und Täuschung nicht unwürdig verschwende.

¹mein Zusatz

Was über Quantenmechanik gesagt wird

Was über Quantenmechanik gesagt wird

- Die Quantenmechanik revolutioniert unser Verständnis vom Kosmos:
Er ist unbegreifbar.

Was über Quantenmechanik gesagt wird

- Die Quantenmechanik revolutioniert unser Verständnis vom Kosmos: Er ist unbegreifbar.
- In der Quantenmechanik herrscht ein intrinsischer Zufall, d.h. ein nicht klassischer, nicht weiter erklärbarer Zufall.

Was über Quantenmechanik gesagt wird

- Die Quantenmechanik revolutioniert unser Verständnis vom Kosmos: Er ist unbegreifbar.
- In der Quantenmechanik herrscht ein intrinsischer Zufall, d.h. ein nicht klassischer, nicht weiter erklärbarer Zufall.
- In der Quantenmechanik spielt ein „Observer“ eine seinsgebende Rolle.

Was über Quantenmechanik gesagt wird

- Die Quantenmechanik revolutioniert unser Verständnis vom Kosmos: Er ist unbegreifbar.
- In der Quantenmechanik herrscht ein intrinsischer Zufall, d.h. ein nicht klassischer, nicht weiter erklärbarer Zufall.
- In der Quantenmechanik spielt ein „Observer“ eine seinsgebende Rolle.
- An die Quantenmechanik mit ihrer abstrakten Mathematik kann man sich nur gewöhnen, verstehen geht gar nicht. Verstehen ist eine überholte Kategorie der klassischen Vorstellungen.

Was über Quantenmechanik gesagt wird

- Die Quantenmechanik revolutioniert unser Verständnis vom Kosmos: Er ist unbegreifbar.
- In der Quantenmechanik herrscht ein intrinsischer Zufall, d.h. ein nicht klassischer, nicht weiter erklärbarer Zufall.
- In der Quantenmechanik spielt ein „Observer“ eine seinsgebende Rolle.
- An die Quantenmechanik mit ihrer abstrakten Mathematik kann man sich nur gewöhnen, verstehen geht gar nicht. Verstehen ist eine überholte Kategorie der klassischen Vorstellungen.
- Die Vorstellungen der klassischen Physik vom Sein (Ontologie) sind durch die Quantenmechanik als unmöglich erwiesen.

Was darüber zu sagen ist

Was darüber zu sagen ist

das ist alles gehobener Unsinn

Wie konnte es zu einem solchen Unsinn kommen?

Aus Imre Lakatos in Criticism and the Growth of Knowledge:

In the new, post-1925 quantum theory the 'anarchist' position became dominant and modern quantum physics, in its 'Copenhagen interpretation', became one of the main standard bearers of philosophical obscurantism. In the new theory Bohr's notorious 'complementarity' principle enthroned [weak] inconsistency as a basic ultimate feature of nature, and merged subjectivist positivism and antilogical dialectic and even ordinary language philosophy into one unholy alliance. After 1925 Bohr and his associates introduced a new and unprecedented lowering of critical standards for scientific theories. This led to a defeat of reason within modern physics and to an anarchist cult of incomprehensible chaos.

Was ist das Problem mit der Quantenmechanik?

Was ist das Problem mit der Quantenmechanik?

Es wird nicht gesagt, worüber Quantenmechanik ist. Es fehlt die „Ontologie“.

Was ist das Problem mit der Quantenmechanik?

Es wird nicht gesagt, worüber Quantenmechanik ist. Es fehlt die „Ontologie“.

Das wird nun geklärt. Zuerst Erinnerungen an Schule und anderes Halbwissen, dann ein paar Spitzen gegen Nobel und andere Laureaten und dann der Aufstieg zum Olymp

Das Quantum=in der Naturbeschreibung vorkommende Diskretheit

Das Quantum=in der Naturbeschreibung vorkommende Diskretheit

Wer hat das erfunden?

Das Quantum=in der Naturbeschreibung vorkommende Diskretheit

Wer hat das erfunden?

Die Natur natürlich

Das Quantum=in der Naturbeschreibung vorkommende Diskretheit

Wer hat das erfunden?

Die Natur natürlich

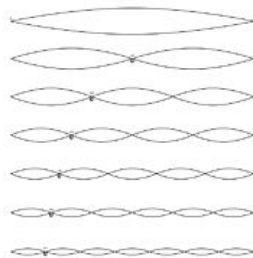
Die Obertöne einer schwingenden Seite sind quantisiert; Musik in unseren
Ohren

Das Quantum=in der Naturbeschreibung vorkommende Diskretheit

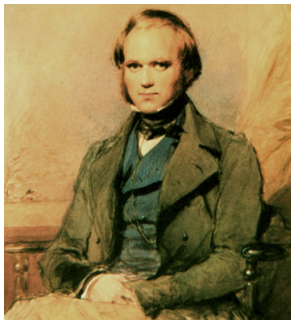
Wer hat das erfunden?

Die Natur natürlich

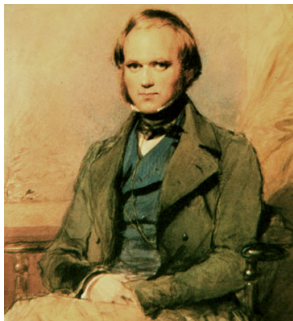
Die Obertöne einer schwingenden Seite sind quantisiert; Musik in unseren
Ohren



NATURA NON FACIT SALTUM



NATURA NON FACIT SALTUM



Charles Darwin (1809-1882), *On the Origin of Species*, Chapter 6

Die fundamentalen Gesetze der Natur beschreiben kontinuierliche Abläufe

Die fundamentalen Gesetze der Natur beschreiben kontinuierliche Abläufe
Materie, seien es Punktteilchen oder Felder oder strings, bewegt sich kontinuierlich

Die fundamentalen Gesetze der Natur beschreiben kontinuierliche Abläufe
Materie, seien es Punktteilchen oder Felder oder strings, bewegt sich kontinuierlich

Wirklich?

Der Revolutionär



Der Revolutionär



Max Planck 1858 - 1947; Planck 1900: Energieaustausch zwischen Materie und Strahlung der Frequenz ν kann nur in Quanten der Größe $h\nu$; h Plancks Wirkungsquantum geschehen

Albert Einstein 1905: nicht nur $E = mc^2$, nicht nur Brownsche Bewegung sondern auch



$E = h\nu$: Lichtwelle mit Frequenz ν hat Energie $E = h\nu$ \Rightarrow
Photo Effekt

Die Lichtenergiequanten $h\nu$ heißen Photonen

Die Lichtenergiequanten $h\nu$ heißen Photonen

Nebenbei: Wissen wir was Photonen wirklich sind?

Die Lichtenergiequanten $h\nu$ heißen Photonen

Nebenbei: Wissen wir was Photonen wirklich sind?

Nein!

Der Quantenphilosoph



Der Quantenphilosoph



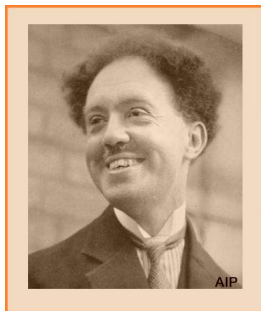
Niels Bohr 1885-1962

Das Bohrsche Atommodell 1913

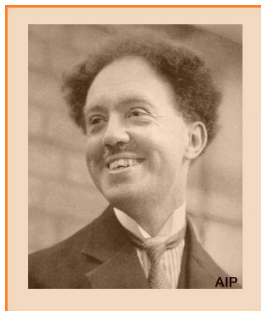
Elektronen laufen (ähnlich wie Planeten um die Sonne) auf festen Kreisen (oder Ellipsen) um den Atomkern, die gewissen Energiewerten entsprechen und springen von einer Energie-Bahn auf eine andere, wobei sie ein Quantum der Energiedifferenz $\Delta E = h\nu$ als Lichtwelle entweder absorbieren oder aussenden.

Elektronen springen? Wirklich?

Der Harmonisierer

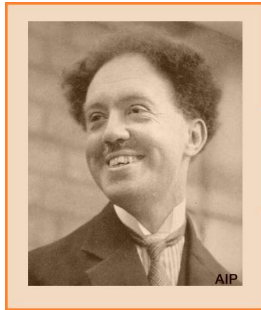


Der Harmonisierer



- de Broglie 1892- 1987: Jede Bahn ist eine harmonische Schwingung, eine stehende Welle, je höher die Energie, je kürzer die Wellenlänge und damit je größer die Frequenz

Der Harmonisierer



- de Broglie 1892- 1987: Jede Bahn ist eine harmonische Schwingung, eine stehende Welle, je höher die Energie, je kürzer die Wellenlänge und damit je größer die Frequenz
- aber wie verändert sich eine stehende Welle zu einer anderen?

Ψ die Wellenfunktion



Ψ die Wellenfunktion



Erwin Schrödinger 1887-1961

Die wirkliche Revolution: Die schwingende Seite Ψ in $3n$ Dimensionen

$3n$ Dimensionen ist die Ausdehnung eines Raumes, der durch $3n$ Achsen aufgespannt wird, z.B. kann $n = 10^{24}$ sein. Der anschauliche physikalische Raum ist 3-dimensional.

Schrödinger findet eine Gleichung für Wellen in einem solchen unanschaulichen Raum. Mit der bekommt man

Die wirkliche Revolution: Die schwingende Seite Ψ in $3n$ Dimensionen

$3n$ Dimensionen ist die Ausdehnung eines Raumes, der durch $3n$ Achsen aufgespannt wird, z.B. kann $n = 10^{24}$ sein. Der anschauliche physikalische Raum ist 3-dimensional.

Schrödinger findet eine Gleichung für Wellen in einem solchen unanschaulichen Raum. Mit der bekommt man

Die wirkliche Revolution: Die schwingende Seite Ψ in $3n$ Dimensionen

$3n$ Dimensionen ist die Ausdehnung eines Raumes, der durch $3n$ Achsen aufgespannt wird, z.B. kann $n = 10^{24}$ sein. Der anschauliche physikalische Raum ist 3-dimensional.

Schrödinger findet eine Gleichung für Wellen in einem solchen unanschaulichen Raum. Mit der bekommt man

1. eine quantisierte Wellenformen (stehende Welle), wenn die Welle an den Enden eingeklemmt ist (z.B. durch ein Potential)

Die wirkliche Revolution: Die schwingende Seite Ψ in $3n$ Dimensionen

$3n$ Dimensionen ist die Ausdehnung eines Raumes, der durch $3n$ Achsen aufgespannt wird, z.B. kann $n = 10^{24}$ sein. Der anschauliche physikalische Raum ist 3-dimensional.

Schrödinger findet eine Gleichung für Wellen in einem solchen unanschaulichen Raum. Mit der bekommt man

1. eine quantisierte Wellenformen (stehende Welle), wenn die Welle an den Enden eingeklemmt ist (z.B. durch ein Potential)
2. eine kontinuierliche Bewegung

Die wirkliche Revolution: Die schwingende Seite Ψ in $3n$ Dimensionen

$3n$ Dimensionen ist die Ausdehnung eines Raumes, der durch $3n$ Achsen aufgespannt wird, z.B. kann $n = 10^{24}$ sein. Der anschauliche physikalische Raum ist 3-dimensional.

Schrödinger findet eine Gleichung für Wellen in einem solchen unanschaulichen Raum. Mit der bekommt man

1. eine quantisierte Wellenformen (stehende Welle), wenn die Welle an den Enden eingeklemmt ist (z.B. durch ein Potential)
2. eine kontinuierliche Bewegung
3. eine irgendwie in Grenzbereichen Übereinstimmung mit der klassischen Physik

Die mathematische kompliziert aussehende Schrödinger-Gleichung

Für ein System von “ n Teilchen“ im Raum (mathematisch vertreten durch \mathbb{R}^3 , drei Achsen, die den Raum aufspannen), die mit einem “Potential“ V wechselwirken

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = - \sum_{k=1}^n \frac{\hbar^2}{2m_k} \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} \psi(x, t) + V(x) \psi(x, t)$$

Konfigurations-Raum Variable $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{3n}$, $x_i \in \mathbb{R}^3$

Die mathematische kompliziert aussehende Schrödinger-Gleichung

Für ein System von “ n Teilchen“ im Raum (mathematisch vertreten durch \mathbb{R}^3 , drei Achsen, die den Raum aufspannen), die mit einem “Potential“ V wechselwirken

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = - \sum_{k=1}^n \frac{\hbar^2}{2m_k} \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} \psi(x, t) + V(x) \psi(x, t)$$

Konfigurations-Raum Variable $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{3n}$, $x_i \in \mathbb{R}^3$

- ψ ist eine Funktion auf dem unanschaulichen Konfigurations-Raum von n Orten!

Es ist *keine* Funktion auf dem anschaulichen physikalischen Raum!
Schrödinger nannte das Verschränkung

Die mathematische kompliziert aussehende Schrödinger-Gleichung

Für ein System von “ n Teilchen“ im Raum (mathematisch vertreten durch \mathbb{R}^3 , drei Achsen, die den Raum aufspannen), die mit einem “Potential“ V wechselwirken

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = - \sum_{k=1}^n \frac{\hbar^2}{2m_k} \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} \psi(x, t) + V(x) \psi(x, t)$$

Konfigurations-Raum Variable $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{3n}$, $x_i \in \mathbb{R}^3$

- ψ ist eine Funktion auf dem unanschaulichen Konfigurations-Raum von n Orten!
Es ist *keine* Funktion auf dem anschaulichen physikalischen Raum!
Schrödinger nannte das Verschränkung
- Was ist die Bedeutung von ψ ?

Die mathematische kompliziert aussehende Schrödinger-Gleichung

Für ein System von " n Teilchen" im Raum (mathematisch vertreten durch \mathbb{R}^3 , drei Achsen, die den Raum aufspannen), die mit einem "Potential" V wechselwirken

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = - \sum_{k=1}^n \frac{\hbar^2}{2m_k} \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} \psi(x, t) + V(x) \psi(x, t)$$

Konfigurations-Raum Variable $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{3n}$, $x_i \in \mathbb{R}^3$

- ψ ist eine Funktion auf dem unanschaulichen Konfigurations-Raum von n Orten!
Es ist *keine* Funktion auf dem anschaulichen physikalischen Raum!
Schrödinger nannte das Verschränkung
- Was ist die Bedeutung von ψ ?
- Wie ist der Bezug zu unserer physikalischen Welt?

Die mathematische kompliziert aussehende Schrödinger-Gleichung

Für ein System von “ n Teilchen“ im Raum (mathematisch vertreten durch \mathbb{R}^3 , drei Achsen, die den Raum aufspannen), die mit einem “Potential“ V wechselwirken

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = - \sum_{k=1}^n \frac{\hbar^2}{2m_k} \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} \psi(x, t) + V(x) \psi(x, t)$$

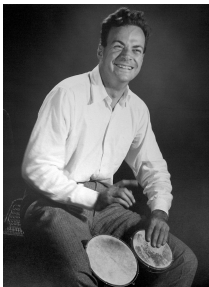
Konfigurations-Raum Variable $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{3n}$, $x_i \in \mathbb{R}^3$

- ψ ist eine Funktion auf dem unanschaulichen Konfigurations-Raum von n Orten!
Es ist *keine* Funktion auf dem anschaulichen physikalischen Raum!
Schrödinger nannte das Verschränkung
- Was ist die Bedeutung von ψ ?
- Wie ist der Bezug zu unserer physikalischen Welt?
- Aber egal was, die Welle springt nicht!

Schrödinger schrieb 1952 den Artikel: Gibt es Quantensprünge?

Was hat all das mit Quantensprüngen zu tun? Ich wollte eine Stimmung erzeugen, die einen neugierig macht, was von der gegenwärtigen Wissenschaft in 2000 Jahren außer für Historiker noch interessant sein wird. Es gab erfinderische Konstrukte des menschlichen Geistes, die eine sehr genaue Beschreibung der beobachteten Fakten lieferten und trotzdem nur noch von historischem Interesse sind. Ich denke dabei an die Theorie der Epizyklen. Und ich bekenne mich zu dem ketzerischen Standpunkt, dass ihr modernes Entsprechungsstück in der theoretischen Physik die Quantensprünge sind. Sie entsprechen den gedachten Kreisen, die die Sonne, der Mond und die Sterne täglich um die Erde beschreiben nachdem man früheres und besseres Wissen verdammt hatte. Es erinnert mich an Epizyklen verschiedener Ordnung, wenn man mir von gedachten Quantenübergängen erzählt.

Nobody understands QM



Richard P. Feynman (1965) The Character of Physical Law

There was a time when the newspapers said that only twelve men understood the theory of relativity. I do not believe there ever was such a time. There might have been a time when only one man did, because he was the **only guy who caught on** before he wrote his paper. **But after people read the paper, a lot of people understood** the theory of relativity in some way or other, certainly more than twelve. On the other hand, I think I can safely say that **nobody** understands quantum mechanics.

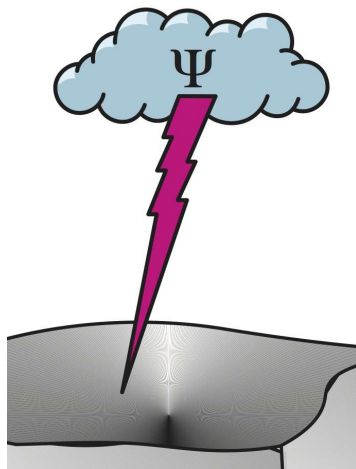
Warum?

Warum?

- Nicht wegen der Mathematik, die lernt man schon fast in der Schule

Warum?

- Nicht wegen der Mathematik, die lernt man schon fast in der Schule
- sondern wegen Ψ , was bedeutet diese Welle physikalisch?



Was ist der graue Zeug? Hirn? Materie?

Nochmal zur Eingewöhnung

Die Wellenfunktion ψ ist eine Funktion auf einem hochdimensionalen Raum, ein Raum mit $3n$ Achsen, z.B. für $n \approx 10^{24}$ also ungefähr die Anzahl der Atome in ein paar Gramm eines Stoffes, sind das $3 \cdot 10^{24}$ Achsen. Zusätzlich taucht in der Schrödinger Gleichung die Zahl i auf, die imaginäre Einheit: $i^2 = -1$, d.h. die Wellenfunktion nimmt Werte in den komplexen Zahlen \mathbb{C} an, und dann ist sie noch eine Funktion der Zeit. In mathematischer Symbolik

$$\Psi : \mathbb{R}^{3n} \times \mathbb{R} \mapsto \mathbb{C}$$

Warum so lächerlich viele Achsen, d.h. warum so lächerlich hohe Dimension?

Die Debatte um die Quantentheorie geht letztlich nur über diese Frage!

\mathbb{R}^{3n} = Konfigurationsraum von n Teichen

\mathbb{R}^{3n} = Konfigurationsraum von n Teilchen

ABER

\mathbb{R}^{3n} = Konfigurationsraum von n Teilchen

ABER

In der QM kann es keine Teilchen geben

warum nicht?

warum nicht?

weil Werner Heisenberg, sagt, dass es keine reale Welt im Kleinen gibt

...the idea of an objective real world whose smallest parts exist objectively in the same sense as stones or trees exist, independently of whether or not we observe them... is impossible....

Wenn nur die Wellenfunktion IST, gibt es richtig Ärger

Wenn nur die Wellenfunktion IST, gibt es richtig Ärger

- Die Schrödinger Gleichung ist linear, d.h. wenn φ und ψ Lösungen sind, dann ist auch jede Summe $a\varphi + b\psi$ eine Lösung: Superposition.

Wenn nur die Wellenfunktion IST, gibt es richtig Ärger

- Die Schrödinger Gleichung ist linear, d.h. wenn φ und ψ Lösungen sind, dann ist auch jede Summe $a\varphi + b\psi$ eine Lösung: Superposition.
- Man nehme: Ein System, welches durch zwei verschiedene Wellenfunktionen beschrieben werden kann φ_L, φ_R

Wenn nur die Wellenfunktion IST, gibt es richtig Ärger

- Die Schrödinger Gleichung ist linear, d.h. wenn φ und ψ Lösungen sind, dann ist auch jede Summe $a\varphi + b\psi$ eine Lösung: Superposition.
- Man nehme: Ein System, welches durch zwei verschiedene Wellenfunktionen beschrieben werden kann φ_L, φ_R

Wenn nur die Wellenfunktion IST, gibt es richtig Ärger

- Die Schrödinger Gleichung ist linear, d.h. wenn φ und ψ Lösungen sind, dann ist auch jede Summe $a\varphi + b\psi$ eine Lösung: Superposition.
- Man nehme: Ein System, welches durch zwei verschiedene Wellenfunktionen beschrieben werden kann φ_L, φ_R
- Einen Apparat der an das System gekoppelt wird und in seiner Zeiger Nullstellung mit der Wellenfunktion Φ_0 assoziiert wird und zwei Zeigerstellungen Φ_L, Φ_R annehmen kann, und folgendes macht:

$$\varphi_L \Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger Entwicklung}} \varphi_L \Phi_L \quad \text{L wird angezeigt}$$

$$\varphi_R \Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger evolution}} \varphi_R \Phi_R \quad \text{R wird angezeigt}$$

Das bedeutet, der Apparat funktioniert so, wie er soll: Wenn das System mit der Wellenfunktion φ_L assoziiert zeigt der Zeiger im Meßprozess auf L oder im Fall von φ_R auf R

Alice and the nasty cat: The measurement problem

Alice and the nasty cat: The measurement problem

- "In THAT direction," the Cat said, waving its right paw round, "lives a Hatter: and in THAT direction," waving the other paw, "lives a March Hare. Visit either you like: they're both mad" "But I don't want to go among mad people," Alice remarked. "Oh, you can't help that," said the Cat

Alice and the nasty cat: The measurement problem

- "In THAT direction," the Cat said, waving its right paw round, "lives a Hatter: and in THAT direction," waving the other paw, "lives a March Hare. Visit either you like: they're both mad" "But I don't want to go among mad people," Alice remarked. "Oh, you can't help that," said the Cat
- Alice prepares the system with wave function $\varphi_L + \varphi_R$. Then by trivial math (Schrödinger equation is linear!)

$$(\varphi_L + \varphi_R)\Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger evolution}} \varphi_L\Phi_L + \varphi_R\Phi_R$$

Alice and the nasty cat: The measurement problem

- "In THAT direction," the Cat said, waving its right paw round, "lives a Hatter: and in THAT direction," waving the other paw, "lives a March Hare. Visit either you like: they're both mad" "But I don't want to go among mad people," Alice remarked. "Oh, you can't help that," said the Cat
- Alice prepares the system with wave function $\varphi_L + \varphi_R$. Then by trivial math (Schrödinger equation is linear!)

$$(\varphi_L + \varphi_R)\Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger evolution}} \varphi_L\Phi_L + \varphi_R\Phi_R$$

- what does the apparatus point to? left **and** right!

Alice and the nasty cat: The measurement problem

- "In THAT direction," the Cat said, waving its right paw round, "lives a Hatter: and in THAT direction," waving the other paw, "lives a March Hare. Visit either you like: they're both mad" "But I don't want to go among mad people," Alice remarked. "Oh, you can't help that," said the Cat
- Alice prepares the system with wave function $\varphi_L + \varphi_R$. Then by trivial math (Schrödinger equation is linear!)

$$(\varphi_L + \varphi_R)\Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger evolution}} \varphi_L\Phi_L + \varphi_R\Phi_R$$

- what does the apparatus point to? left **and** right!
- **That's mad!** → **Schrödinger's cat**

Der Bezug zur realen Welt, der intrinsische Zufall der QM

Die Bornsche statistische Hypothese: Das Absolutquadrat der Wellenfunktion $|\psi|^2$ ist eine Wahrscheinlichkeit (eigentlich eine Dichte).
→nachprüfen



Max Born: 1882 –1970

Der Bezug zur realen Welt, der intrinsische Zufall der QM

Die Bornsche statistische Hypothese: Das Absolutquadrat der Wellenfunktion $|\psi|^2$ ist eine Wahrscheinlichkeit (eigentlich eine Dichte).
→nachprüfen



Max Born: 1882 –1970

Was für eine Wahrscheinlichkeit denn und überhaupt wovon?

Quanten Philosophie: Copenhagener Interpretation der Quantum Mechanik

Niels Bohr entwickelte mit Werner Heisenberg eine Sprechweise (die unverständlich genug war, um als philosophisch tiefgehend betrachtet zu werden) in der „the observer“ – ein Objekt außerhalb der mathematischen Theorie – eine gewichtige Rolle spielt: „The observer“ schafft einen Realzustand, indem er zufällig – gemäß Bornscher Hypothese – die Wellenfunktion kollabiert. Mit Wahrscheinlichkeit $|\varphi_R|^2$ auf Φ_R und mit Wahrscheinlichkeit $|\varphi_L|^2$ auf Φ_L . Erst durch die Beobachtung werden die Fakten R oder L geschaffen.

Quanten Philosophie: Copenhagener Interpretation der Quantum Mechanik

Niels Bohr entwickelte mit Werner Heisenberg eine Sprechweise (die unverständlich genug war, um als philosophisch tiefgehend betrachtet zu werden) in der „the observer“ – ein Objekt außerhalb der mathematischen Theorie – eine gewichtige Rolle spielt: „The observer“ schafft einen Realzustand, indem er zufällig – gemäß Bornscher Hypothese – die Wellenfunktion kollabiert. Mit Wahrscheinlichkeit $|\varphi_R|^2$ auf Φ_R und mit Wahrscheinlichkeit $|\varphi_L|^2$ auf Φ_L . Erst durch die Beobachtung werden die Fakten R oder L geschaffen.

- Wie kommt der Observer dazu, das zu tun? Warum sagt man nicht einfach: Wahrscheinlichkeit von Teilchenkonfiguration?

Quanten Philosophie: Copenhagener Interpretation der Quantum Mechanik

Niels Bohr entwickelte mit Werner Heisenberg eine Sprechweise (die unverständlich genug war, um als philosophisch tiefgehend betrachtet zu werden) in der „the observer“ – ein Objekt außerhalb der mathematischen Theorie – eine gewichtige Rolle spielt: „The observer“ schafft einen Realzustand, indem er zufällig – gemäß Bornscher Hypothese – die Wellenfunktion kollabiert. Mit Wahrscheinlichkeit $|\varphi_R|^2$ auf Φ_R und mit Wahrscheinlichkeit $|\varphi_L|^2$ auf Φ_L . Erst durch die Beobachtung werden die Fakten R oder L geschaffen.

- Wie kommt der Observer dazu, das zu tun? Warum sagt man nicht einfach: Wahrscheinlichkeit von Teilchenkonfiguration?
- Heisenberg: „The idea of an objective real world whose smallest parts exist objectively in the same sense as stones or trees exist, independently of whether or not we observe them [...], is impossible.“

Dagegen: What IS an observer?

What exactly qualifies some physical systems to play the role of "measurer"? Was the wave function of the world waiting to jump for thousands of years until a single-celled living creature appeared? Or did it have to wait a little longer, for some better qualified system...with a Ph.D.?

John Stuart Bell

Is he the collapser of the wave function?
He has certainly a PhD!

Can the cat be an
observer too?
Poor thing has no PhD



Richard Feynman

Does this mean that my observations become real only when I observe an observer observing something as it happens? This is a horrible viewpoint. Do you seriously entertain the thought that without observer there is no reality? Which observer? Any observer? Is a fly an observer? Is a star an observer? Was there no reality before 10⁹ B.C. before life began? Or are you the observer? Then there is no reality to the world after you are dead? I know a number of otherwise respectable physicists who have bought life insurance.

David Mermin („Commentary Quantum mechanics: Fixing the shifty split“ in Physics Today 2012) has the answer to that

Albert Einstein famously asked whether a wave function could be collapsed by the observations of a mouse. Bell expanded on that, asking whether the wave function of the world awaited the appearance of a physicist with a PhD before collapsing. The QBist answers both questions with “no.” A mouse lacks the mental facility to use quantum mechanics to update its state assignments on the basis of its subsequent experience, but these days even an undergraduate can easily learn enough quantum mechanics to do just that.

QB= Quantum Bayesianism (das graue Zeug ist Hirn)

und all dieser Unsinn wegen der ganz einfachen und ganz natürlichen Frage

und all dieser Unsinn wegen der ganz einfachen und ganz natürlichen Frage

Was ist die Ontologie, welche lokalen Größen beschreiben den faktischen Zustand eines Systems und was ist die Rolle der Wellenfunktion?

mit der ganz einfachen Antwort

mit der ganz einfachen Antwort

da sind Teilchen

mit der ganz einfachen Antwort

da sind Teilchen

und Ψ sagt wo es lang geht

mit der ganz einfachen Antwort

da sind Teilchen

und Ψ sagt wo es lang geht

in einfachster Form

Dieser Mann schrieb das Papier 1952: Quantentheorie ist über
(Q, ψ)

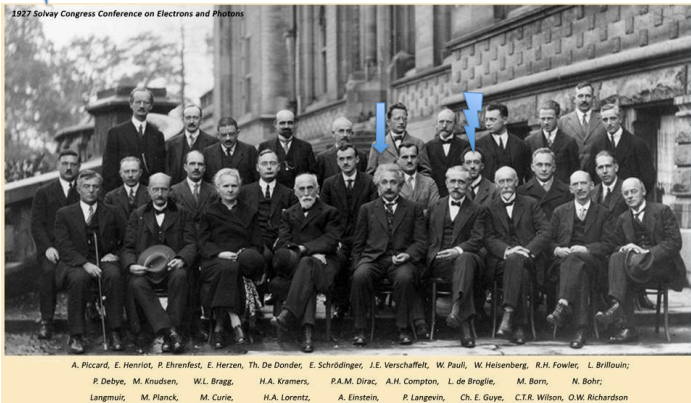


David Bohm (1917-1992)

schon von de Broglie auf der Solvay Konferenz 1927 vorgeschlagen, aber verlacht



de Broglie proposed that the wave function guides the particles $v = \text{grad } S$, $S = \text{Im} \ln \varphi$



De Broglie's idea was in spirit against Einstein's locality idea on which he based relativity
Because the wave function lives on **configuration space and not physical space**

Bohmsche Mechanik

Bohmsche Mechanik

- Materie wird durch Punktteilchen, die sich im physikalischen Raum bewegen, beschrieben. Ein N -Teilchen Universum durch die Orte

$$\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_N, \mathbf{Q}_i \in \mathbb{R}^3$$

Bohmsche Mechanik

- Materie wird durch Punktteilchen, die sich im physikalischen Raum bewegen, beschrieben. Ein N -Teilchen Universum durch die Orte

$$\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_N, \mathbf{Q}_i \in \mathbb{R}^3$$

- Teilchen bewegen sich

Bohmsche Mechanik

- Materie wird durch Punktteilchen, die sich im physikalischen Raum bewegen, beschrieben. Ein N -Teilchen Universum durch die Orte

$$\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_N, \mathbf{Q}_i \in \mathbb{R}^3$$

- Teilchen bewegen sich
- Diese Angaben reichen, um das Gesetz der Bewegung zu erdenken.

Das Gesetz der Bewegung

Das Gesetz der Bewegung

- Die Teilchenkonfiguration

$$Q(t) = (\mathbf{Q}_1(t), \dots, \mathbf{Q}_N(t)),$$

erfüllt die Gleichung (Führungsgleichung)

$$\frac{dQ}{dt} = v^\Psi(Q(t), t) = \alpha \operatorname{Im} \frac{\Psi^* \nabla \Psi}{\Psi^* \Psi}(Q(t), t)$$

wobei Ψ^* die zu Ψ komplex konjugierte Funktion ist, $\nabla = \frac{\partial}{\partial q}$ und α ein Parameter mit einer physikalischen Dimension ist. Das Führungsfeld ist

Das Gesetz der Bewegung

- Die Teilchenkonfiguration

$$Q(t) = (\mathbf{Q}_1(t), \dots, \mathbf{Q}_N(t)),$$

erfüllt die Gleichung (Führungsgleichung)

$$\frac{dQ}{dt} = v^\Psi(Q(t), t) = \alpha \operatorname{Im} \frac{\Psi^* \nabla \Psi}{\Psi^* \Psi}(Q(t), t)$$

wobei Ψ^* die zu Ψ komplex konjugierte Funktion ist, $\nabla = \frac{\partial}{\partial q}$ und α ein Parameter mit einer physikalischen Dimension ist. Das Führungsfeld ist

- die Wellenfunktion des Universums

$$\Psi : \mathbb{R}^{3N} \times \mathbb{R} \mapsto \mathbb{C}^{(n)} \quad (q = (\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N), t) \mapsto \Psi(q, t),$$

die der Schrödinger Gleichung gehorcht

Bohmsche Mechanik verallgemeinert Newtonsche Mechanik

Bohmsche Mechanik verallgemeinert Newtonsche Mechanik

- Man schreibe Ψ in der Eulerschen Form $\Psi(q, t) = R(q, t)e^{\frac{i}{\hbar}S(q,t)}$ mit R, S reell und \hbar einer Konstanten, die Dimension einer Wirkung hat.

Bohmsche Mechanik verallgemeinert Newtonsche Mechanik

- Man schreibe Ψ in der Eulerschen Form $\Psi(q, t) = R(q, t)e^{\frac{i}{\hbar}S(q,t)}$ mit R, S reell und \hbar einer Konstanten, die Dimension einer Wirkung hat.
- S sieht so aus wie die Wirkungsfunktion aus der klassischen Mechanik und man sieht leicht wie sich Newtonsche Mechanik einordnet.

Bohmsche Mechanik verallgemeinert Newtonsche Mechanik

- Man schreibe Ψ in der Eulerschen Form $\Psi(q, t) = R(q, t)e^{\frac{i}{\hbar}S(q,t)}$ mit R, S reell und \hbar einer Konstanten, die Dimension einer Wirkung hat.
- S sieht so aus wie die Wirkungsfunktion aus der klassischen Mechanik und man sieht leicht wie sich Newtonsche Mechanik einordnet.
- man findet insbesondere $\alpha = \frac{\hbar}{m}$ mit m als Newtonsche Trägheitsmasse

Damit nochmals in der Form der Lehrbücher

$$\frac{dQ}{dt} = v^\Psi(Q(t), t) = \hbar m^{-1} \text{Im} \frac{\Psi^* \nabla \Psi}{\Psi^* \Psi}(Q(t), t)$$

mit m als diagonale Massenmatrix mit Einträgen m_k

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}(q, t) = \left(- \sum_{k=1}^n \frac{\hbar^2}{2m_k} \frac{\partial^2}{\partial q_k^2} + V(q) \right) \Psi(q, t)$$

alle Wege führen zur Bohmschen Mechanik, selbst der einfachste

alle Wege führen zur Bohmschen Mechanik, selbst der einfachste

- Wenn Ψ die Schrödinger Gleichung erfüllt, dann erfüllt $R^2 = |\Psi|^2$ die *Kontinuitätsgleichung* $\partial_t |\Psi|^2 = -\nabla \cdot (v^\Psi |\Psi|^2) =: -\nabla \cdot j^\Psi \rightarrow$
Quantenfluss Gleichung

alle Wege führen zur Bohmschen Mechanik, selbst der einfachste

- Wenn Ψ die Schrödinger Gleichung erfüllt, dann erfüllt $R^2 = |\Psi|^2$ die *Kontinuitätsgleichung* $\partial_t |\Psi|^2 = -\nabla \cdot (v^\Psi |\Psi|^2) =: -\nabla \cdot j^\Psi \rightarrow$
Quantenfluss Gleichung
- Setze $v^\Psi = \frac{j^\Psi}{|\Psi|^2}$ als Geschwindigkeit der Flußlinien.

Wer beobachtet? Niemand!

Wer beobachtet? Niemand!

- Alice präpariert die Wellenfunktion $\varphi_L + \varphi_R$. Dann, weil die Schrödinger Gleichung linear ist, kommt

$$(\varphi_L + \varphi_R)\Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger Entwicklung}} \varphi_L\Phi_L + \varphi_R\Phi_R$$

Wer beobachtet? Niemand!

- Alice präpariert die Wellenfunktion $\varphi_L + \varphi_R$. Dann, weil die Schrödinger Gleichung linear ist, kommt

$$(\varphi_L + \varphi_R)\Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger Entwicklung}} \varphi_L\Phi_L + \varphi_R\Phi_R$$

- Wohin zeigt der Zeiger des Apparates? Links **und** Rechts zugleich

Wer beobachtet? Niemand!

- Alice präpariert die Wellenfunktion $\varphi_L + \varphi_R$. Dann, weil die Schrödinger Gleichung linear ist, kommt

$$(\varphi_L + \varphi_R)\Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger Entwicklung}} \varphi_L\Phi_L + \varphi_R\Phi_R$$

- Wohin zeigt der Zeiger des Apparates? Links **und** Rechts zugleich
- Nein! Der Zeiger besteht aus Teilchen, die sich gemäß der Führungsgleichung bewegen. Der Zeiger bewegt sich entweder nach links oder rechts. Deswegen ist Bohmsche Mechanik eine Quantentheorie ohne Beobachter (nach John Stewart Bell).

Wer beobachtet? Niemand!

- Alice präpariert die Wellenfunktion $\varphi_L + \varphi_R$. Dann, weil die Schrödinger Gleichung linear ist, kommt

$$(\varphi_L + \varphi_R)\Phi_0 \xrightarrow{\text{Schrödinger Entwicklung}} \varphi_L\Phi_L + \varphi_R\Phi_R$$

- Wohin zeigt der Zeiger des Apparates? Links **und** Rechts zugleich
- Nein! Der Zeiger besteht aus Teilchen, die sich gemäß der Führungsgleichung bewegen. Der Zeiger bewegt sich entweder nach links oder rechts. Deswegen ist Bohmsche Mechanik eine Quantentheorie ohne Beobachter (nach John Stewart Bell).
- Aber was ist mit Wahrscheinlichkeit? Dafür ist ja gar kein Platz!

Cool bleiben und an Boltzmann denken: Zufall in Bohrscher Mechanik

Cool bleiben und an Boltzmann denken: Zufall in Bohrscher Mechanik

- Fast nichts Neues gegenüber Zufall in der klassischen Mechanik.

Cool bleiben und an Boltzmann denken: Zufall in Bohrscher Mechanik

- Fast nichts Neues gegenüber Zufall in der klassischen Mechanik.
- Aufpassen und Mitdenken: Es gibt Ψ , die Wellenfunktion des Universums, und ψ die *bedingte* Wellenfunktion eines Teilsystems des Universums, z.B. die eines Elektrons im Wasserstoffatom. Gleiche Symbole aber völlig unterschiedlich: die bedingte Wellenfunktion ψ kann nur mit den Bohrschen Orten der Umgebung (Konfiguration Y) des Teilsystems (Konfiguration x) definiert werden

$$\psi(x) = \Psi(x, Y)$$

Cool bleiben und an Boltzmann denken: Zufall in Bohrscher Mechanik

- Fast nichts Neues gegenüber Zufall in der klassischen Mechanik.
- Aufpassen und Mitdenken: Es gibt Ψ , die Wellenfunktion des Universums, und ψ die *bedingte* Wellenfunktion eines Teilsystems des Universums, z.B. die eines Elektrons im Wasserstoffatom. Gleiche Symbole aber völlig unterschiedlich: die bedingte Wellenfunktion ψ kann nur mit den Bohrschen Orten der Umgebung (Konfiguration Y) des Teilsystems (Konfiguration x) definiert werden

$$\psi(x) = \Psi(x, Y)$$

- Die Quantenflußgleichung besagt: $|\Psi|^2$ ist als Dichte des Typizitätsmaßes ausgezeichnet.

Cool bleiben und an Boltzmann denken: Zufall in Bohrscher Mechanik

- Fast nichts Neues gegenüber Zufall in der klassischen Mechanik.
- Aufpassen und Mitdenken: Es gibt Ψ , die Wellenfunktion des Universums, und ψ die *bedingte* Wellenfunktion eines Teilsystems des Universums, z.B. die eines Elektrons im Wasserstoffatom. Gleiche Symbole aber völlig unterschiedlich: die bedingte Wellenfunktion ψ kann nur mit den Bohrschen Orten der Umgebung (Konfiguration Y) des Teilsystems (Konfiguration x) definiert werden

$$\psi(x) = \Psi(x, Y)$$

- Die Quantenflußgleichung besagt: $|\Psi|^2$ ist als Dichte des Typizitätsmaßes ausgezeichnet.
- Damit zeigt man (analog zum Galton Brett): In einem Ensemble von gleichartigen Teilsystemen, die alle die bedingte Wellenfunktion ψ haben gilt: In $|\Psi|^2$ -typischen Universen ist die empirische Verteilung ρ der Konfigurationen der Teilchen im Ensemble $\rho \approx |\psi|^2$. Das ist ein Beweis der Bornschen Hypothese, gemäß Boltzmann.

Der unromantische Quantenzufall

Fast nicht anders aber doch etwas anders, nämlich noch klarer, als der klassische Zufall:

Es gibt das Quantengleichgewicht und damit *Absolute Ungewissheit*:

Wenn die Wellenfunktion eines Teilchens ψ ist, (die bedingte!, andere gibt es nicht) dann ist der Ort des Teilchens nicht genauer bekannt, als durch die $|\psi|^2$ -Verteilung gegeben.

Der unromantische Quantenzufall

Fast nicht anders aber doch etwas anders, nämlich noch klarer, als der klassische Zufall:

Es gibt das Quantengleichgewicht und damit *Absolute Ungewissheit*:

Wenn die Wellenfunktion eines Teilchens ψ ist, (die bedingte!, andere gibt es nicht) dann ist der Ort des Teilchens nicht genauer bekannt, als durch die $|\psi|^2$ -Verteilung gegeben.

- Was heißt das?

Der unromantische Quantenzufall

Fast nicht anders aber doch etwas anders, nämlich noch klarer, als der klassische Zufall:

Es gibt das Quantengleichgewicht und damit *Absolute Ungewissheit*:

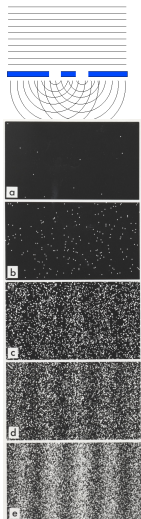
Wenn die Wellenfunktion eines Teilchens ψ ist, (die bedingte!, andere gibt es nicht) dann ist der Ort des Teilchens nicht genauer bekannt, als durch die $|\psi|^2$ -Verteilung gegeben.

- Was heißt das?
- Wenn vom quantenmechanischen Zufall $\rho = |\psi|^2$ die Rede ist, dann meint man die typische empirische Verteilung von Teilchenkonfigurationen in einem Ensemble von identischen Teilsystemen, die alle die bedingte Wellenfunktion ψ haben.

Das Zweispalt Experiment–das quantenmechanische Galton Brett

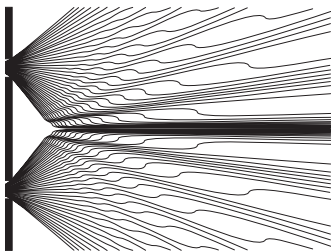
A phenomenon which is impossible to explain in any classical way and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality it contains the only mystery of quantum mechanics

Richard Feynman



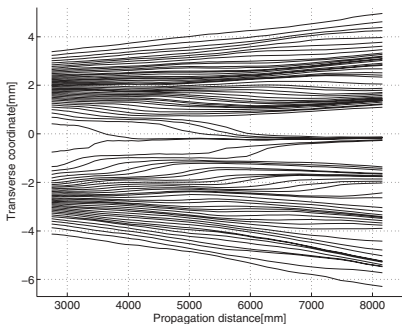
Mystery? BS! Es ist ganz einfach

Mystery? BS! Es ist ganz einfach



gerechnet

Mystery? BS! Es ist ganz einfach



Experiment: S.Kocsis et al: Observing the Average Trajectories of Single Photons in a Two-Slit Interferometer. Science 2011

Der gnadenlose Determinist und Wahrscheinlichkeitstheoriker



Pierre Simon de Laplace (1749-1827)

Auszug aus: De la Probabilité

Tous les événements, ceux même qui par leur petitesse semblent ne pas tenir aux grandes lois de la nature, en sont une suite aussi nécessaire que les révolutions du Soleil. Dans l'ignorance des liens qui les unissent au système entier de l'univers, on les a fait dépendre des causes finales ou du hasard, suivant qu'ils arrivaient et se succédaient avec régularité ou sans ordre apparent ; mais ces causes imaginaires ont été successivement reculées avec les bornes de nos connaissances, et disparaissent entièrement devant la saine philosophie, qui ne voit en elles que l'expression de l'ignorance où nous sommes des véritables causes.