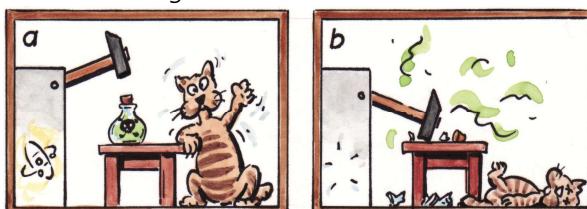


Kapitel 29 Fortgeschrittene Quantenmechanik

Frage 63 passt zu den Poolthemen 6 Information und Kommunikation, 9 Möglichkeiten und Grenzen der Physik, 12 Paradigmenwechsel in der Physik/Entwicklung der Weltbilder, 17 Physik vom Ende des 19. Jahrhunderts bis heute, 19 Physik und Philosophie, 28 Voraussagekraft von Theorien und 30 Zufall in der Physik

a Der Physiker Chad Orzel schreibt in seinem Buch *Schrödingers Hund*: „Die Interpretationen der Quantenphysik sind eine Art ‚Metaphysik‘, jede liefert einen anderen Blickwinkel auf das Ergebnis eines Experiments, ändert aber das Ergebnis selbst nicht.“ Diskutiere dieses Zitat am Beispiel von Schrödingers Katze. Welche gängigen Interpretationen gibt es? Welche Vor- und Nachteile haben diese?

(Quelle: Big Bang 7, ÖBV)



b Wenn man kleinen Kindern eine Überraschung schenkt, dann versteckt man diese oft in einer Faust, hält beide Fäuste hin und sagt „Rate, in welcher Hand!“. Erst wenn das Kind getippt hat und man die Fäuste geöffnet hat, wird ihm klar, in welcher Hand die Überraschung war. Ist es daher legitim zu sagen, dass sich die Überraschung in einem quantenmechanischen Überlagerungszustand zwischen links und rechts befindet bevor man nachsieht, ähnlich wie die Schrödinger'sche Katze sich in einem Überlagerungszustand zwischen lebend und tot befindet?

c Wieso verhält sich die normale Welt so „hartnäckig klassisch“? Warum kann man im normalen Alltag keine Überlagerungszustände finden? Wovon sind die Dekohärenzzeiten abhängig? Überlege mit Hilfe der Tabelle.

	freies Elektron	Staubteilchen 10 µm	Bowlingkugel 1,6 kg
Umweltbedingungen	Dekohärenzzeiten t_D in Sekunden		
300 K, Normaldruck	10^{-12}	10^{-18}	10^{-26}
300 K, Ultrahochvakuum	10	10^{-4}	10^{-12}
Sonnenlicht (auf der Erde)	10^9	10^{-10}	10^{-18}
Kosmische Hintergrundstrahlung (2,73 K)	10^9	10^{-7}	10^{-18}

Typische Dekohärenzzeiten (E. Joos et al.: Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory, Springer 2003)

W2 Informationen entnehmen

W3 Vorgänge darstellen, erläutern und kommunizieren

W3 Vorgänge darstellen, erläutern und kommunizieren

Kommentare

63a: Wir wissen aus Erfahrung, dass man niemals lebendtote Katzen sieht! Wir wissen auch, dass man Quanten durch Wellenfunktionen sehr gut beschreiben kann. Dieses mathematische Konzept ist experimentell extrem gut belegt. Mehr wissen wir nicht! Der Rest ist Interpretation und daher Geschmackssache! Jede der Interpretationen liefert einen anderen Blickwinkel auf das Gedankenexperiment, ändert aber am Ergebnis nichts. Nach der Kopenhagener Deutung ist die Katze tatsächlich in einem Mischzustand, solange man nicht in der Box nachsieht. Erst durch das Nachschauen „entscheidet“ sich, ob die Katze lebendig ist oder nicht. Nach der Viele-Welten-Interpretation sieht man beim Öffnen in einem Universum eine tote und in einem anderen Universum eine lebende Katze. Auch nach der Dekohärenz-Deutung wissen wir zwar erst beim Hineinschauen, ob die Katze tot ist oder nicht. Aber sie war schon vor dem Hineinschauen tot oder lebendig.

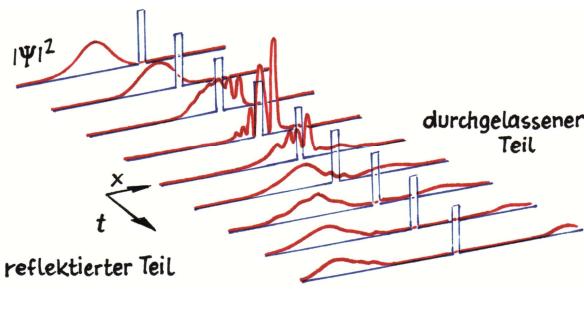
63b: Nein, es handelt sich hier um keinen quantenmechanischen Mischzustand. Die Person, die die Überraschung in einer der Fäuste verborgen hält, weiß ja, in welcher sie sich befindet. Man kann zwar in bestimmten Fällen darüber streiten, wer als Beobachter durchgeht, aber in diesem Fall ist es ganz klar, dass die Person, die die Überraschung in der Faust versteckt hat, als Beobachter gilt.

63c: In der Tabelle kann man sehen, dass die Dekohärenzzeit (t_D) von der Temperatur abhängt: Je niedriger die Temperaturen, desto länger dauern die Überlagerungszustände. Die Dekohärenzzeit hängt aber auch von der Umgebung ab, also etwa davon, ob der Druck hoch oder niedrig ist. Bei hohem Druck gibt es häufiger Störungen durch die Luftteilchen, und das führt schneller zum Kollaps der Wellenfunktion. Und schließlich hängt t_D von der Masse des Objekts ab. Bereits bei einem winzigen Staubteilchen sind die Dekohärenzzeiten auch unter idealsten Bedingungen so absurd winzig, dass man diese im Alltag niemals in einem Überlagerungszustand antreffen kann. Anders gesagt: Bereits Staubteilchen verhalten sich klassisch, und damit alles, was noch mehr Masse hat, natürlich ebenfalls. Das ist einer der Gründe, warum unsere Welt „hartnäckig klassisch“ ist.

Kapitel 29 Fortgeschrittene Quantenmechanik

Frage 64 passt zu den Poolthemen 6 Information und Kommunikation, 7 Modelle und Konzepte, 9 Möglichkeiten und Grenzen der Physik, 13 Physik als forschende Tätigkeit/Physik als Beruf, 17 Physik vom Ende des 19. Jahrhunderts bis heute, 21 Physik und Technik, 26 Vermessung des Mikro- und Makrokosmos

a Begründe den Tunneleffekt einerseits mit Hilfe der Unschärferelation und andererseits mit Hilfe der Wellenfunktion (siehe Abb.). Warum tritt der Tunneleffekt nur bei Quanten, aber nicht bei alltäglichen Objekten auf? Warum kann eine „Quantenmurmel“ durch eine Potenzialschwelle, aber eine echte Murmel nicht durch ein Buch?

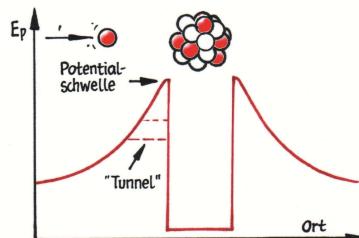


(Quelle: Big Bang 7, ÖBV)

W2 Informationen entnehmen
W3 Vorgänge darstellen, erläutern und kommunizieren

b Ohne Tunneleffekt gäbe es auf der Erde kein Leben! Erkläre diese Feststellung! Beziehe die Abbildung in deine Antwort mit ein. Diese zeigt exemplarisch den Potenzialverlauf, wenn man ein einzelnes Proton mit einem Kern fusioniert.

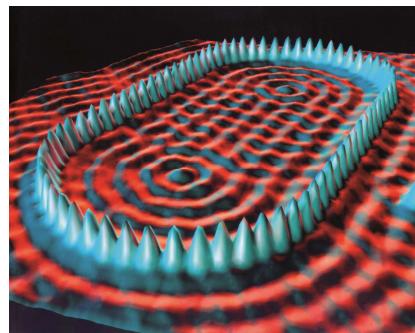
(Quelle: Big Bang 7, ÖBV)



W3 Vorgänge darstellen, erläutern und kommunizieren
W4 Auswirkungen erfassen und beschreiben

c Wie funktioniert ein Rastertunnelmikroskop? Erkläre in diesem Zusammenhang auch die Abbildung. Dort siehst du Eisenatome auf einer Kupferunterlage. Wie kommt es zu den eigenartigen Wellen innerhalb und außerhalb des „Stadions“? Welche Bedeutung hat in diesem Zusammenhang die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\psi|^2$?

(© IBM Zürich Research Laboratory)



E1 Beobachtungen machen und beschreiben
E4 Ergebnisse analysieren, interpretieren und durch Modelle abbilden

Kommentare

64a: Der Tunneleffekt ist eine direkte Folge der Energieunschärfe. Das Quant kann sich für einen kurzen Zeitraum Δt die fehlende Energie ΔE ausleihen, um über den Energieberg zu kommen. Letztlich wirkt es aber so, als hätte das Quant den Berg durchtunnelt. Eine andere Argumentation erfolgt mit Hilfe der Wellenfunktion. Diese sinkt beim Hindernis nicht sofort auf null ab und kann daher bis hinter das Hindernis reichen. Das bedeutet, dass es auch eine gewisse Wahrscheinlichkeit gibt, dass das Quant durch das Hindernis tunneln.

64b: Diese Strahlungsleistung der Sonne kommt durch Kernfusion zu Stande. Diese Prozesse sind sehr kompliziert, deshalb ist in der Abbildung exemplarisch dargestellt, was passiert, wenn man ein einzelnes Proton mit einem Kern fusioniert. Weil Proton und Kern positiv geladen sind, wächst mit der Annäherung die elektrische Abstoßung. Dadurch entsteht eine Potenzialschwelle. Erst wenn sich das Proton auf etwa 10^{-15} m genähert hat, überwiegt die starke Wechselwirkungskraft. Damit die Protonen durch die thermische Bewegung dermaßen nahe an die Kerne kommen, wären Temperaturen von etwa 1 Milliarde Grad notwendig. Im Sonneninneren hat es aber „nur“ 15 Millionen Grad! Klassisch gesehen dürfte es in der Sonne keine Fusion geben. Nur der Tunneleffekt ermöglicht die Fusion.

64c: Eine winzige Metallspitze, nur ein paar Atome dick, wird etwa einen Milliardstel Meter (1 nm) an das Untersuchungsobjekt herangeführt. Dann wird Spannung angelegt. Zwischen Oberfläche und Spitze bildet sich eine Potenzialschwelle. Hin und wieder können aber Elektronen den Zwischenraum durchtunneln und erzeugen einen Tunnelstrom. Je kleiner der Abstand, desto größer wird dieser Strom. Der Tunnelstrom „sieht“ nicht die Elektronen, sondern deren Wahrscheinlichkeitsdichte $|\psi|^2$. Mit der RTM wird also aufgezeichnet, wo sich die Elektronen mit größerer oder kleinerer Wahrscheinlichkeit aufhalten. Die Elektronen haben Welleneigenschaften, und es können sich nur solche stehenden Wahrscheinlichkeitswellen ausbilden, die zu den Abmessungen des Objekts passen. Mit dem RTM kann man also die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\psi|^2$ sichtbar machen, und diese sieht in diesem Fall wie Wasserwellen in einem ovalen Pool aus.