

Wie Krankheiten den Lauf der Geschichte ändern Seite 54

Versteckte Emissionen eines lange verbotenen Treibhausgases Seite 55

Eine übereifrige Qualitätskontrolle, die zu Muskelschwund führt Seite 55

Ein alter Stern war Zeuge einer heftigen Explosion Seite 55

Von grinsenden Katzen und nackten Neutronen

Mithilfe schwacher Messungen schaffen Forscher im Labor das Analogon einer Cheshire Cat

Jeder Physikstudent lernt, dass es unmöglich ist, Informationen über ein Quantenobjekt zu gewinnen, ohne es zu stören. Doch mit schwachen Messungen wird das Unmögliche möglich. Bei der Interpretation der Resultate ist allerdings Vorsicht angebracht.

Christian Speicher

Quantenphysiker haben eine Schwäche für Katzen. Ein berühmtes Beispiel ist Schrödingers Katze. Dabei handelt es sich um ein imaginäres Wesen, das zusammen mit einer todbringenden radioaktiven Substanz in einer Kiste eingesperrt ist. Laut Quantentheorie schwebt die Katze in einem Zustand zwischen tot und lebendig, bis eine Messung Gewissheit darüber bringt, ob ein radioaktiver Zerfall stattgefunden hat oder nicht. Ganz nach dem Geschmack der Quantenphysiker ist auch die Cheshire Cat aus dem Kinderbuch «Alice im Wunderland». Die kleine Alice begegnet dort einer Katze, über die sie sich sehr wundert: «Oho, ich habe oft eine Katze ohne Grinsen gesehen, aber ein Grinsen ohne Katze, so etwas Merkwürdiges habe ich in meinem Leben noch nicht gesehen.»

Getrennte Wege

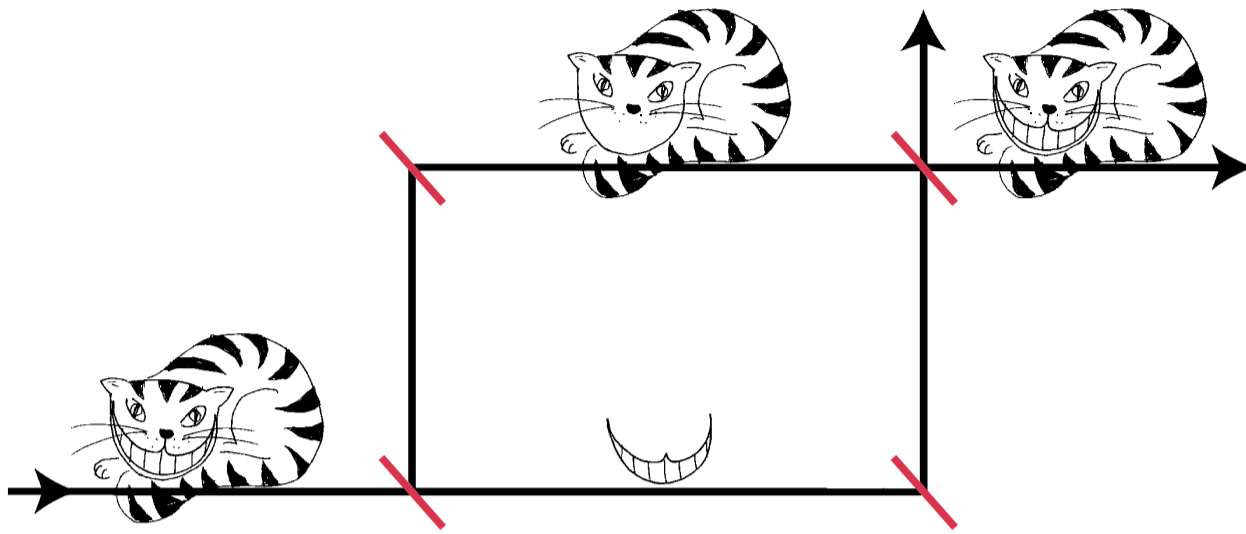
Wer glaubt, so etwas Absurdes wie ein Grinsen ohne Katze gebe es nur in der Fabel, der irrt. Am Institut Laue-Langevin in Grenoble ist es österreichischen, französischen und amerikanischen Forschern kürzlich gelungen, die quantenmechanische Entsprechung einer Cheshire Cat zu beobachten. In einem Interferometer konnte die Gruppe um Tobias Denkmayr und Yuji Hasegawa vom Atominstytut der TU Wien Neutronen von ihren magnetischen Momenten trennen: Während die Neutronen den einen Pfad des Interferometers einschlugen, wählten ihre magnetischen Momente den anderen. Das Grinsen der Katzen hatte sich also gewissermassen verselbstständigt (siehe Grafik).

Das Neutronen-Experiment lässt aufhorchen, weil es auf einem ungewöhnlichen Messkonzept beruht. Die Aussage, dass sich eine physikalische Eigenschaft von ihrem Träger trennen lasse, sei für herkömmliche quantenmechanische Messungen falsch, sagt Johannes Kofler vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Sie gelte nur, wenn man den Anfangs- und den Endzustand der Neutronen in geeigneter Weise selektioniere und zwischendurch schwache Messungen an ihnen vornehme.

Die Idee der schwachen Messung geht auf den israelischen Physiker Yakir Aharonov zurück. Um sie zu verstehen, muss man zunächst erklären, was eine normale (starke) Messung ist. Physikalische Systeme werden in der Quantenmechanik durch eine sich zeitlich entwickelnde Wellenfunktion beschrieben. Diese Wellenfunktion enthält die maximal mögliche Information über das System. Mit ihr lässt sich beispielsweise berechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Elektron bei einer Messung an diesem Ort zu finden sein wird oder mit welcher Wahrscheinlichkeit es jenen Impuls hat.

Um den Ort wirklich zu messen, wird das Elektron an eine Messapparatur gekoppelt. Ist diese Kopplung stark, so liefert das Messinstrument einen scharfen Wert für den Ort des Elektrons. Durch die starke Messung wird aber die zeitliche Entwicklung der Wellenfunktion unwiderruflich gestört. Dadurch geht jegliche Information über den Impuls des Elektrons verloren. Ebenso verhält es sich mit anderen Messgrössen wie Ort und Impuls komplementär zueinander sind: Je genauer man die eine

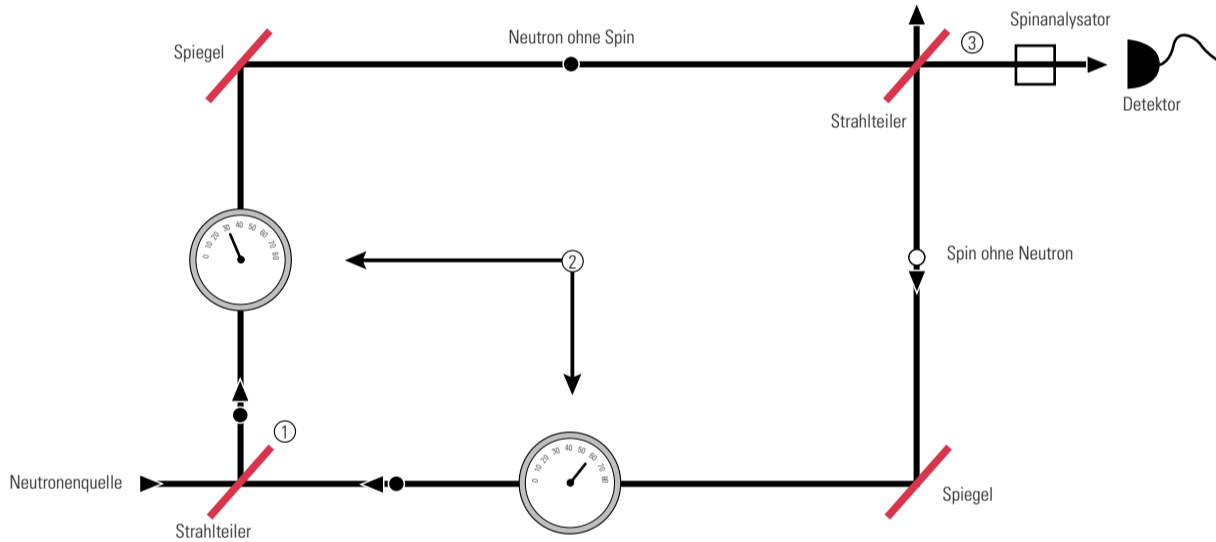
Die Cheshire-Katze und ihre quantenmechanische Entsprechung



- ① Präselektion: Die Neutronen werden so präpariert, dass ihr Spin im oberen Pfad in Bewegungsrichtung und im unteren Pfad in die entgegengesetzte Richtung zeigt.
- ② Schwache Messung: Um die Neutronenpopulation in den Pfaden zu messen, wird ein schwach absorbierender Filter verwendet. Im unteren Pfad hat diese schwache Messung keinen Einfluss auf die Zahl der postselektierten Neutronen, im oberen schon. Das im-

pliziert, dass die postselektierten Neutronen den oberen Pfad gewählt haben. Misst man mit einem schwachen Magnetfeld den Spin der Neutronen, verhält es sich genau andersherum. Hier hat die schwache Messung nur im unteren Pfad einen Einfluss auf die Zahl der postselektierten Neutronen. Die Spins der postselektierten Neutronen scheinen also einen anderen Weg genommen zu haben als die Teilchen selbst. Die Analogie zur grinsenden Cheshire-Katze ist offensichtlich.

- ③ Postselektion: Nach der Zusammenführung der beiden Strahlen erfolgt der Nachweis der Neutronen. Dabei werden nur jene Neutronen gezählt, deren Spin in Bewegungsrichtung zeigt. Nur für diese postselektierten Teilchen gilt die Aussage, dass die Neutronen und ihr Spin getrennte Wege gehen.



QUELLEN: Spe. / ATOMINSTITUT WIEN

NZZ-INFOGRAFIK / cke.

Grösse kennt, desto grösser wird die Unsicherheit bezüglich der anderen.

Schwache Messungen stellen nun den Versuch dar, Informationen über ein System zu gewinnen, ohne einen Kollaps der Wellenfunktion herbeizuführen. Dazu wird die Messapparatur nur schwach an das System angekoppelt. Anders als bei einer starken Messung ist der Messwert in diesem Fall mit einer grossen Unsicherheit behaftet – und damit von geringem Wert. Man kann sich jedoch behelfen, indem man viele identische Kopien des Systems herstellt und immer wieder die gleiche schwache Messung an diesem Ensemble durchführt. In der Summe heben sich die Unsicherheiten dann gegenseitig auf, und der gemittelte Wert entspricht dem Ergebnis einer starken Messung.

Interessant wird es, wenn man sich Anschluss an die schwache Messung eine starke durchführt (etwa der komplementären Variable) und eine Selektion der Endzustände vornimmt. Anstatt über das gesamte Ensemble zu mitteln, mittelt man nur über jene Endzustände, die einem bestimmten Resultat der starken Messung (etwa einem Impuls 0) entsprechen. Auf diese Weise lässt sich bei bekanntem Impuls für den Ort immerhin ein gemittelter Wert angeben – und das, obwohl Ort und Impuls komplementär zueinander sind.

Als Aharonov seinen Vorschlag 1988 präsentierte, stiess er auf grossen Widerstand. Auch heute sind die Diskussionen um die schwachen Messungen noch nicht restlos verebzt. Die Ergebnisse solcher Messungen hätten seltsame Eigenschaften, sagt Kofler. Anders als bei einer starken Messung könne sich als Messwert auch eine kom-

plexe Zahl ergeben. Zudem könnten die schwachen Werte von Projektionsoperatoren (die bei starken Messungen nur das Resultat 0 oder 1 liefern) negativ sein. Damit liessen sich die Werte nicht als Wahrscheinlichkeiten interpretieren.

Damit nicht genug der Merkwürdigkeiten. Das Ergebnis einer schwachen Messung hängt nämlich nicht nur vom gewählten Anfangszustand, sondern auch vom (nachträglich!) ausgewählten Endzustand ab. Auf die merkwürdigen Konsequenzen hatte bereits Aharonov hingewiesen. Wenn der Anfangs- und der Endzustand sehr verschieden gewählt werden, kann eine Grösse Werte annehmen, die weit ausserhalb des üblichen Parameterbereichs liegen. So kann sich bei einer schwachen Spinnmessung an einem Teilchen mit Spin 1/2 auch ein Wert von 100 ergeben.

Anstoss für Experimente

Das klingt paradox. Nicolas Gisin von der Universität Genf sieht die Sache jedoch pragmatisch. Das Konzept der schwachen Messung habe sich bewährt, weil es neue Einsichten liefert und den Anstoss für neue Experimente gegeben habe. Als Beispiel verweist Gisin auf ein Experiment der Gruppe von Paul Kwiat von der University of Illinois in Urbana-Champaign aus dem Jahr 2008. Die Forscher hatten einen polarisierten Laserstrahl durch ein lichtbrechendes Prisma geschickt, um eine Spin-abhängige Aufspaltung des Strahls nachzuweisen. Durch eine nachträgliche Selektion der Lichtpolarisation konnten sie die schwache Aufspaltung des Strahls um einen Faktor zehntausend verstärken und so den subtilen Effekt nachweisen.

Für Aufsehen sorgte 2011 auch eine Arbeit von Aephraim Steinberg und seinen Mitarbeitern von der University of Toronto. Durch schwache Messungen und eine anschliessende Postselektion gelang es den Forschern, die gemittelten Pfade von Photonen zu rekonstruieren, die durch zwei eng benachbarte Schlitze flogen. Das klingt nach einem Ding der Unmöglichkeit. Denn die Kenntnis der Pfade sollte eigentlich das Interferenzmuster zum Verschwinden bringen, das die Photonen auf einem Schirm hinter dem Doppelspalt erzeugen. Der Widerspruch ist aber nur ein scheinbarer. Denn durch die schwache Messung wird nicht der Pfad eines einzelnen Photons gemessen, sondern der eines postselektierten Ensembles von vielen Photonen. Durch welchen Spalt ein einzelnes Photon geht, lässt sich daraus nicht ableiten.

Kofler bestreitet nicht, dass solche Aussagen über das durchschnittliche Verhalten von Teilchen sehr nützlich sein können. Man müsse aber teuflisch vorsichtig sein, wie man das Ergebnis solcher Messungen interpretiere. Auf keinen Fall dürfe man es auf einzelne Photonen beziehen. Korrekterweise müsse es heissen, die Photonen im Doppelspaltexperiment verhielten sich im Mittel so, als folgten sie den rekonstruierten Pfaden, so Kofler.

Auch die Forscher aus Wien sind bei der Wahl ihrer Worte vorsichtig. In ihrer Publikation schreiben sie, dass sich das System so verhalte, als gingen die Neutronen den einen Weg und ihr magnetisches Moment den anderen. Über das Verhalten des einzelnen Neutrons ist damit nichts ausgesagt. Ganz so verrückt wie bei Alice im Wunderland geht es in der Realität vermutlich doch nicht zu.

Lust auf Salz

Schadet ein geringer Salzkonsum?

Die Frage, wie viel Salz man maximal verzehren sollte, erhitzt seit langem die Gemüter. Öl ins Feuer giessen nun die Initiatoren einer weltumspannenden Bevölkerungsstudie.

Nicola von Lutterotti

Laut den gängigen medizinischen Empfehlungen sollten Erwachsene täglich höchstens 2 Gramm Natrium, das entspricht etwa 5 Gramm Salz, zu sich nehmen. Jenseits dieser Menge besteht demnach die Gefahr, dass der Blutdruck und damit das Risiko für Herzleiden und Schlaganfälle ansteigt.

Unerwartetes Ergebnis

In eine andere Richtung weisen die Ergebnisse einer neuen Studie mit dem Kürzel «Pure», an der mehr als 100 000 Personen aus 17 Ländern beteiligt waren.^{1,2} Wie sie nämlich nahelegt, erleiden Personen mit einem täglichen Salzkonsum von maximal 5 Gramm eher Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems als solche mit höherem Verzehr. Müssen die medizinischen Leitlinien also wieder umgeschrieben werden?

Dass wir auf Salziges stehen, kommt nicht von ungefähr: Natrium spielt bei etlichen Stoffwechselprozessen eine wichtige Rolle. Der menschliche Organismus ist daher seit Urzeiten darauf geübt, das lebenswichtige Mineral aufzunehmen und im Körper zu halten. Angesichts dieser evolutionären Weichenstellung ist wenig erstaunlich, dass mehr als 90 Prozent der Teilnehmer von Pure mehr, teilweise sogar deutlich mehr Salz verzehrten als gemeinhin empfohlen. Der durchschnittliche Salzkonsum betrug rund 12 Gramm am Tag.

Wie sich zeigte, erlitten im Verlauf von knapp vier Jahren 3317 Probanden eine teilweise tödliche Herz-Kreislauf-Attacke. Am seltensten betroffen waren hiervon Personen, die täglich etwa 4 Gramm Natrium ausschieden, also rund 10 Gramm Salz am Tag verzehrten. Sowohl oberhalb als auch unterhalb dieses Schwellenwerts nahm die Erkrankungsgefahr deutlich zu. In beiden Richtungen galt dabei: Je weiter sich der Natriumgehalt im Urin von 4 Gramm am Tag entfernte, desto eher kam es zu einem Herz-Kreislauf-Leiden oder zum Tod. Demgegenüber verhielt sich der Blutdruck weitgehend wie erwartet: Er stieg mit der Höhe des Salzkonsums an.

Methodische Schwächen

In einem Editorial bezeichnet Suzanne Oparil von der University of Alabama die Ergebnisse der neuen Studie als «provokant».³ Wie sie zugleich einräumt, besitzt die Erhebung eine nur begrenzte Aussagekraft, zumal sie erhebliche methodische Schwächen aufweist. Hierzu zähle vor allem, dass die Studienleiter jeweils nur eine Urinprobe für ihre Berechnungen verwendet hätten. Für viel genauere lassen sich der Salzverzehr jedoch abschätzen, wenn man den Harn ganztägig sammle und darin den Natriumgehalt bestimme.

Wie Jens Titze von der Vanderbilt University in Nashville, Tennessee, auf Anfrage bemängelt, tritt die Salzforchung seit Jahrzehnten auf der Stelle. Daher würden immer wieder die gleichen Erkenntnisse publiziert – nur mit wechselnden Vorzeichen: Was heute als vorteilhaft gelte, werde morgen als schädlich verworfen. Laut Paolo Suter vom Unispital Zürich ist es ohnehin unsinnig, einzelne Nährstoffe isoliert zu betrachten. «Es gibt viele modifizierbare Einflussgrössen, die im Einzelfall oder auf Bevölkerungsebene wichtiger sind als Natrium», sagt der Internist. Hierzu zähle etwa das Gewicht.

^{1/2/3} New England Journal of Medicine 317, 601–611, 612–623 und 677–679 (2014).