Quantenfeldtheorie einfach erklärt

QUANTENPHYSIK · THEORIE EINFACH ERKLÄRT

Das Wort „Quantenfeld“ hat in den letzten Jahren eine erstaunliche Karriere gemacht, allerdings vor allem außerhalb der Physik. In Ratgebern und Seminaren steht es für ein Feld aller Möglichkeiten, mit dem unser Bewusstsein verbunden sein soll. Mit der Physik hat das wenig zu tun, wie wir im Artikel über Joe Dispenza und das Quantenfeld erklären. Dabei ist die echte Quantenfeldtheorie mindestens so verblüffend wie jede esoterische Version, und sie hat den Vorteil, dass sie stimmt.

Sie ist die Grundlage der gesamten Teilchenphysik und die am genauesten überprüfte Theorie, die Menschen je aufgestellt haben. Was sie aussagt, lässt sich ohne Mathematik erstaunlich gut verstehen.

Warum die Quantenmechanik nicht reichte

Die Quantenmechanik, wie sie Heisenberg und Schrödinger 1925 und 1926 formulierten, beschreibt eine feste Zahl von Teilchen, die sich bewegen, überlagern und gemessen werden. Ein Elektron bleibt dabei immer ein Elektron. Doch in der Natur entstehen und vergehen Teilchen ständig. Ein Atom sendet ein Photon aus, das vorher nicht da war. Ein Photon mit genug Energie verwandelt sich in ein Elektron und ein Positron. Und Einsteins Relativitätstheorie sagt, dass Energie und Masse ineinander umwandelbar sind. Eine Theorie, die beides ernst nimmt, Quantenphysik und Relativität, muss also erklären können, wie Teilchen entstehen und verschwinden.

Paul Dirac fand 1928 eine Gleichung für das Elektron, die mit der Relativitätstheorie verträglich war, und stieß dabei auf die Antimaterie [1]. Spätestens da war klar, dass das alte Bild von festen Teilchen nicht mehr reicht.

Felder zuerst, Teilchen danach

Die Lösung war ein Perspektivwechsel. In der Quantenfeldtheorie sind nicht die Teilchen das Grundlegende, sondern Felder, die den ganzen Raum erfüllen. Für jede Sorte von Elementarteilchen gibt es ein eigenes Feld: ein Elektronenfeld, ein elektromagnetisches Feld, Felder für die verschiedenen Quarks, das Higgs-Feld und so weiter. Was wir als Teilchen wahrnehmen, ist eine kleine, abgegrenzte Anregung eines solchen Feldes, eine Art Wellenpaket.

Ein Vergleich hilft, auch wenn er hinkt. Stellen Sie sich eine ruhige Wasseroberfläche vor, die den ganzen Raum erfüllt. Eine kleine Welle darauf ist ein Teilchen. Die Quantenphysik

fügt eine Besonderheit hinzu: Die Wellen können nicht beliebig klein sein, sondern kommen in festen Portionen, in Quanten. Ein Photon ist das kleinstmögliche Kräuseln des elektromagnetischen Feldes, ein Elektron das kleinstmögliche Kräuseln des Elektronenfeldes.

Daraus folgen gleich mehrere Dinge, die vorher rätselhaft waren. Alle Elektronen im Universum sind exakt gleich, weil sie Anregungen ein und desselben Feldes sind. Teilchen können entstehen und vergehen, weil Energie von einem Feld auf ein anderes übergehen kann. Und Kräfte entstehen dadurch, dass Felder miteinander wechselwirken. Zwei Elektronen stoßen sich ab, weil sie über das elektromagnetische Feld Photonen austauschen. Die Masse vieler Teilchen schließlich stammt aus ihrer Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld.

Die genaueste Theorie der Welt

Die erste vollständig ausgearbeitete Quantenfeldtheorie ist die Quantenelektrodynamik, kurz QED, die Theorie von Licht und Elektronen. Ihr Weg war steinig. Lange lieferten die Rechnungen unendliche Ergebnisse, ein Zeichen, dass etwas nicht stimmte. Den Ausweg fanden Ende der Vierzigerjahre unabhängig voneinander Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger und Richard Feynman, die dafür 1965 gemeinsam den Nobelpreis erhielten [2]. Den Anstoß gab eine Messung von Willis Lamb, der 1947 eine winzige Verschiebung im Spektrum des Wasserstoffs fand, die Diracs Theorie nicht erklären konnte [3]. Die QED konnte es.

Feynman erfand dabei eine Bildsprache, die heute jeder Physikstudent lernt: die Feynman-Diagramme [4]. Jeder Strich steht für ein Teilchen, jeder Knoten für eine Wechselwirkung (Abb. 1). Hinter jedem Bild steckt eine genaue Rechenvorschrift, und indem man immer kompliziertere Diagramme hinzunimmt, wird das Ergebnis immer genauer.

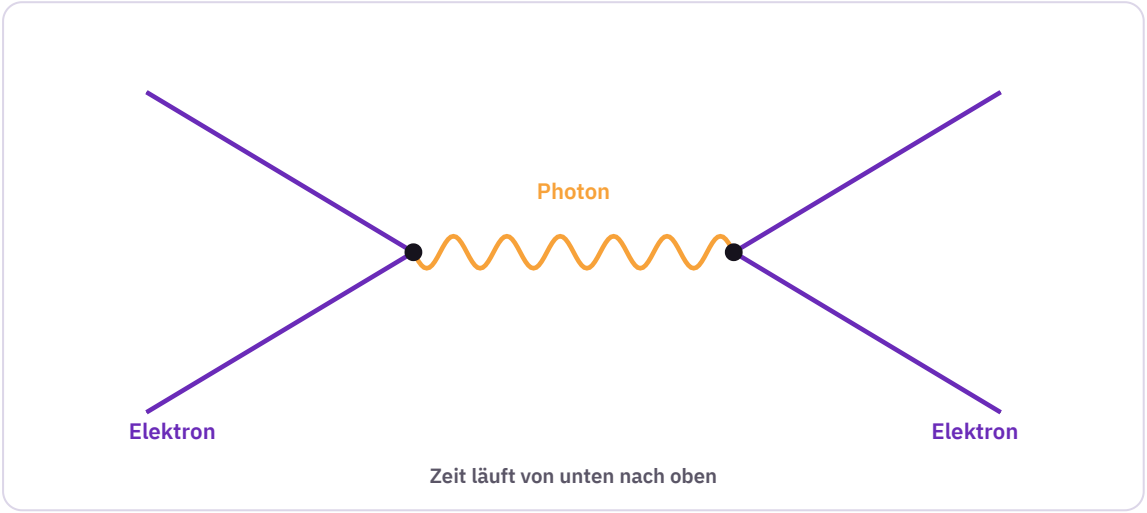


Abb. 1: Das einfachste Feynman-Diagramm für die Abstoßung zweier Elektronen: Sie tauschen ein Photon aus. Eigene Darstellung nach [4].

Wie genau das funktioniert, zeigt das magnetische Moment des Elektrons, also die Stärke, mit der es sich wie ein winziger Magnet verhält. Eine Gruppe um Gerald Gabrielse an der Northwestern University hat es 2023 auf 0,13 Billionstel genau gemessen. Messung und Vorhersage des Standardmodells, deren Kern die QED ist, stimmen auf etwa ein Billionstel überein [5]. Übertragen auf die Entfernung von der Erde zum Mond, rund 384 000 Kilometer, entspräche das einer Abweichung von weniger als einem halben Millimeter. Mehr über das magnetische Moment des Elektrons steht in unserem Artikel Was ist Spin?

Das leere Nichts ist nicht leer

Eine der überraschendsten Folgen der Quantenfeldtheorie betrifft den leeren Raum. Weil auch Felder der Unschärferelation gehorchen, können sie nie völlig in Ruhe sein. Selbst im besten Vakuum zittern die Felder ein wenig. Physiker sprechen von Vakuumfluktuationen.

Das klingt nach Philosophie, hat aber messbare Folgen. Der niederländische Physiker Hendrik Casimir sagte 1948 voraus, dass sich zwei ungeladene Metallplatten im Vakuum anziehen sollten, wenn man sie sehr nahe zusammenbringt, weil zwischen ihnen weniger Schwingungen des Feldes Platz haben als außen [6]. 1997 hat Steve Lamoreaux diese Kraft bei Abständen zwischen 0,6 und 6 Mikrometern gemessen [7]. Auch die Lamb-Verschiebung im Wasserstoff, von der oben die Rede war, lässt sich anschaulich als Folge solcher Fluktuationen verstehen: Das zitternde Feld rüttelt das Elektron ein wenig durch und verschiebt so seine Energie.

Wichtig ist, was daraus nicht folgt. Die Vakuumfluktuationen sind keine Energiequelle, aus der man beliebig schöpfen könnte, und sie sind auch kein Bewusstseinsfeld. Wer „Nullpunktenergie-Generatoren“ oder Heilung durch das Quantenvakuum verspricht, beruft sich auf echte Physik, zieht daraus aber Schlüsse, die sie nicht hergibt.

Was die Theorie nicht kann

Aus Quantenfeldtheorien ist das Standardmodell der Teilchenphysik gebaut, das drei der vier Grundkräfte beschreibt: den Elektromagnetismus, die schwache und die starke Kernkraft. Die vierte, die Schwerkraft, passt nicht hinein. Versucht man, auch die Gravitation wie ein Quantenfeld zu behandeln, laufen die Rechnungen auf eine Weise aus dem Ruder, die sich nicht mehr reparieren lässt. Wie Physiker diese Lücke schließen wollen, beschreibt unser Artikel über Quantengravitation.

Auch sonst bleiben Fragen offen. Woraus die Dunkle Materie besteht, sagt das Standardmodell nicht, und warum die Massen der Teilchen gerade die Werte haben, die sie haben, auch nicht. Die Quantenfeldtheorie ist kein Endpunkt. Aber sie ist das beste Werkzeug, das wir haben, und sie hat jede Prüfung bestanden, der man sie bisher unterzogen hat.

Zum Weiterlesen

QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie

Richard P. Feynman · Piper, E-Book 2012 · ISBN 978-3-492-95986-5

Der Nobelpreisträger erklärt seine eigene Theorie in vier Vorlesungen für Laien, ganz ohne Formeln. Die beste Einführung in die Quantenfeldtheorie, die es gibt.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. P. A. M. Dirac: *The Quantum Theory of the Electron.* In: Proceedings of the Royal Society of London A 117 (1928), S. 610–624, doi:10.1098/rspa.1928.0023.
2. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1965.* nobelprize.org.
3. W. E. Lamb Jr., R. C. Retherford: *Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method.* In: Physical Review 72 (1947), S. 241–243, doi:10.1103/PhysRev.72.241.
4. R. P. Feynman: *Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics.* In: Physical Review 76 (1949), S. 769–789, doi:10.1103/PhysRev.76.769.
5. X. Fan, T. G. Myers, B. A. D. Sukra, G. Gabrielse: *Measurement of the Electron Magnetic Moment.* In: Physical Review Letters 130 (2023), 071801, doi:10.1103/PhysRevLett.130.071801.
6. H. B. G. Casimir: *On the attraction between two perfectly conducting plates.* In: Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen 51 (1948), S. 793.
7. S. K. Lamoreaux: *Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 µm Range.* In: Physical Review Letters 78 (1997), S. 5–8, doi:10.1103/PhysRevLett.78.5.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Quantenfeldtheorie einfach erklärt.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/quantenfeldtheorie.html (PDF: https://quanten.de/pdf/quantenfeldtheorie.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Das Higgs-Boson · Antimaterie · Was ist ein Photon? · Quantengravitation

---

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/quantenfeldtheorie.html