Das Pauli-Prinzip

QUANTENPHYSIK · THEORIE EINFACH ERKLÄRT

Warum fallen Sie nicht durch Ihren Stuhl? Die Frage klingt albern, ist aber eine der tiefsten in der Physik. Atome bestehen fast vollständig aus leerem Raum. Wäre ein Atomkern so groß wie ein Stecknadelkopf, säßen die Elektronen in einigen Dutzend Metern Abstand um ihn herum. Trotzdem sind Stuhl und Hosenboden undurchdringlich füreinander. Die elektrische Abstoßung allein erklärt das nicht. Es braucht eine Regel, die so unscheinbar klingt, dass man ihre Tragweite leicht übersieht.

Formuliert hat sie 1925 ein 24-jähriger Wiener namens Wolfgang Pauli. Sie besagt, dass zwei Elektronen nie im selben Zustand sein können. Aus diesem einen Satz folgen die Ordnung des Periodensystems, die Festigkeit der Materie und das Schicksal ausgebrannter Sterne.

Ein Rätsel in den Spektren

Anfang der Zwanzigerjahre gab es ein Problem mit den Atomen. Man wusste aus dem Bohrschen Modell, dass Elektronen nur bestimmte Energiestufen besetzen. Aber warum fallen nicht einfach alle Elektronen eines Atoms auf die unterste Stufe? Dann wären alle Elemente chemisch ziemlich gleich, und das sind sie offensichtlich nicht. Edelgase wie Neon sind träge, Natrium direkt dahinter reagiert heftig mit Wasser.

Pauli fand die Lösung, indem er die Spektren der Atome genau studierte. In seiner Arbeit von 1925 schrieb er jedem Elektron vier Kennzahlen zu, die man heute Quantenzahlen nennt, und stellte die Regel auf, dass in einem Atom nie zwei Elektronen in allen vier übereinstimmen dürfen [1]. Eine dieser Zahlen hatte zunächst keine anschauliche Bedeutung. Pauli nannte sie eine „klassisch nicht beschreibbare Zweideutigkeit“. Noch im selben Jahr deuteten George Uhlenbeck und Samuel Goudsmit sie als Eigendrehimpuls des Elektrons, den Spin.

Pauli erhielt dafür 1945 den Nobelpreis, „für die Entdeckung des Ausschließungsprinzips, auch Pauli-Prinzip genannt“ [2].

Wie daraus das Periodensystem entsteht

Mit dem Pauli-Prinzip lässt sich ein Atom wie ein Haus mit Stockwerken füllen. Jeder Zustand, den die Quantenmechanik erlaubt, nimmt höchstens ein Elektron auf. Weil der Spin zwei Werte annehmen kann, passen in jedes Orbital genau zwei Elektronen, eines mit

Spin nach oben und eines mit Spin nach unten. Ist eine Schale voll, muss das nächste Elektron eine Etage höher einziehen.

Schale	Unterschalen	Höchstzahl Elektronen	Beispiele
1. Schale	1s	2	Wasserstoff, Helium
2. Schale	2s, 2p	2 + 6 = 8	Lithium bis Neon
3. Schale	3s, 3p, 3d	2 + 6 + 10 = 18	beginnt mit Natrium
4. Schale	4s, 4p, 4d, 4f	2 + 6 + 10 + 14 = 32	beginnt mit Kalium

Höchstzahl je Schale nach der Regel $2n^2$. Ab der dritten Schale werden die Unterschalen nicht streng der Reihe nach gefüllt; so kommt die 4s-Schale vor der 3d-Schale an die Reihe.

Wie viele Elektronen in der äußersten Schale sitzen, bestimmt das chemische Verhalten. Neon hat eine volle zweite Schale und ist deshalb reaktionsträge. Natrium hat ein einzelnes Elektron in der dritten Schale, das es gern abgibt. Die Zeilen und Spalten des Periodensystems sind nichts anderes als dieses Auffüllen, Schale für Schale. Ohne das Pauli-Prinzip gäbe es keine Chemie, wie wir sie kennen.

Warum gerade Elektronen?

Das Pauli-Prinzip gilt nicht für alle Teilchen. Es gilt für die sogenannten Fermionen, zu denen Elektronen, Protonen und Neutronen gehören, also alle Bausteine der Materie. Photonen dagegen, die Teilchen des Lichts, gehören zu den Bosonen und dürfen sich in beliebiger Zahl im selben Zustand drängen. Das nutzt man im Laser.

Mathematisch steckt dahinter eine einfache Bedingung. Beschreibt man zwei gleiche Fermionen durch eine gemeinsame Wellenfunktion und vertauscht sie, muss die Wellenfunktion ihr Vorzeichen wechseln:

$$\psi(1,2) = -\psi(2,1) \tag{1}$$

Wären beide Teilchen im selben Zustand, dann wäre ψ(1, 2) dasselbe wie ψ(2, 1). Eine Zahl, die gleich ihrem eigenen Negativen ist, kann nur null sein. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Fall ist also null, und das ist das Pauli-Prinzip. Welche Teilchen Fermionen sind und welche Bosonen, hängt am Spin. Teilchen mit halbzahligem Spin sind Fermionen, Teilchen mit ganzzahligem Spin sind Bosonen. Pauli hat 1940 gezeigt, dass dieser Zusammenhang aus der Verbindung von Quantenmechanik und Relativitätstheorie folgt[3]. Mehr dazu in unserem Artikel über Fermionen und Bosonen.

Die Festigkeit der Materie

Zurück zum Stuhl. Wenn Ihr Körper auf den Stuhl drückt, werden die Elektronen in den Atomen beider Seiten zusammengeschoben. Weil sie nicht in dieselben Zustände rücken dürfen, müssen sie auf energiereichere ausweichen, und das kostet Energie. Diese Energie spüren Sie als Widerstand. Es ist also nicht nur die elektrische Abstoßung, die Sie trägt, sondern ganz wesentlich das Pauli-Prinzip.

Wie wichtig das ist, haben die Physiker Freeman Dyson und Andrew Lenard 1967 mathematisch bewiesen. Gewöhnliche Materie aus Kernen und Elektronen ist nur deshalb stabil, also nimmt mit wachsender Menge proportional mehr Raum ein und setzt beim Zusammenfügen nicht unbegrenzt Energie frei, weil die Elektronen Fermionen sind [4]. Elliott Lieb hat den Beweis später deutlich vereinfacht [5]. Wären Elektronen Bosonen, würde Materie in sich zusammenfallen.

Sterne, die das Pauli-Prinzip zusammenhält

Am deutlichsten zeigt sich die Regel im Weltall, und zwar am Ende eines Sternenlebens. Hat ein Stern wie die Sonne seinen Brennstoff verbraucht, schrumpft er zu einem Weißen Zwerg, einer Kugel etwa von der Größe der Erde, aber mit der Masse der Sonne. Was ihn davor bewahrt, weiter zu kollabieren, ist kein Feuer mehr, sondern allein der Widerstand der Elektronen, die sich nicht noch enger zusammendrängen lassen. Physiker nennen das Entartungsdruck.

Dieser Druck hat eine Grenze. Der junge indische Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar rechnete 1931 aus, dass ein Weißer Zwerg ab einer bestimmten Masse nicht mehr stabil sein kann [6]. Nach heutigem Wissen liegt diese Chandrasekhar-Grenze bei etwa 1,4 Sonnenmassen. Darüber werden die Elektronen in die Kerne gedrückt, und es entsteht ein Neutronenstern, der wiederum vom Pauli-Prinzip der Neutronen zusammengehalten wird. Erst wenn auch dieser Widerstand nicht mehr reicht, entsteht ein Schwarzes Loch.

Der gefürchtete Pauli-Effekt

Wolfgang Pauli war nicht nur ein brillanter, sondern auch ein gefürchteter Physiker. Seine Kritik war scharf. Über eine besonders unausgegorene Arbeit soll er gesagt haben, sie sei „nicht einmal falsch“. Unter Kollegen kursierte außerdem der „Pauli-Effekt“, eine scherzhafte Legende, nach der experimentelle Apparaturen kaputtgingen, sobald Pauli den Raum betrat. Pauli, der als Theoretiker selbst kaum experimentierte, soll das mit einer gewissen Freude gehört haben.

Sein Prinzip dagegen ist so solide, wie Physik nur sein kann. Experimente suchen mit großem Aufwand nach winzigen Verletzungen, etwa das Experiment VIP-2 tief unter dem

Gran-Sasso-Massiv in Italien, bisher ohne jeden Hinweis darauf [7]. Das Pauli-Prinzip ist eine dieser leisen Regeln, ohne die nichts funktioniert. Der Stuhl, auf dem Sie sitzen, ist der Beweis.

Zum Weiterlesen

Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik

Werner Heisenberg · Piper · ISBN 978-3-492-22297-6

Heisenbergs Erinnerungen, in denen Wolfgang Pauli als scharfsinniger Freund und unbestechlicher Kritiker immer wieder auftritt.

Bei Amazon ansehen*

Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper

Wolfgang Demtröder · Springer Spektrum · ISBN 978-3-662-49093-8

Pauli-Prinzip, Schalenaufbau und Periodensystem mit allen Rechnungen, verständlich für das Grundstudium.

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. W. Pauli: *Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren.* In: Zeitschrift für Physik 31 (1925), S. 765–783, doi:10.1007/BF02980631.
2. Nobel Prize Outreach: *Wolfgang Pauli – Facts.* nobelprize.org.
3. W. Pauli: *The Connection Between Spin and Statistics.* In: Physical Review 58 (1940), S. 716–722, doi:10.1103/PhysRev.58.716.
4. F. J. Dyson, A. Lenard: *Stability of Matter. I.* In: Journal of Mathematical Physics 8 (1967), S. 423–434, doi:10.1063/1.1705209.
5. E. H. Lieb: *The stability of matter.* In: Reviews of Modern Physics 48 (1976), S. 553–569, doi:10.1103/RevModPhys.48.553.

6. S. Chandrasekhar: *The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs.* In: The Astrophysical Journal 74 (1931), S. 81–82, doi:10.1086/143324.
7. L. De Paolis u. a. (VIP-2): *Search for a signature of Pauli exclusion principle violation by VIP-2.* In: Physica Scripta 97 (2022), 084001, doi:10.1088/1402-4896/ac76ec.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Das Pauli-Prinzip.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/pauli_prinzip.html (PDF: https://quanten.de/pdf/pauli_prinzip.pdf)

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

Weiterlesen: Was ist Spin? · Fermionen und Bosonen · Das Periodensystem · Die Schrödinger-Gleichung

---