

Das Wasserstoffatom und die Leidenschaft für Präzision

Die Spektroskopie am Wasserstoffatom spielte eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung der Quantenmechanik und unserer Erkenntnisse über den Aufbau der Atome und Moleküle. Es ist eine Freude, Ihnen hier etwas über meine Leidenschaft für die Präzisionspektroskopie am Wasserstoffatom zu berichten. Ich will Sie kurz erinnern, wie die Spektroskopie des Wasserstoffs die Geschichte der Quantenmechanik prägte, und Ihnen auch über aktuelle Experimente berichten. Es gibt noch immer viel zu entdecken, die Spektroskopie bleibt spannend, fast wie zu Anfangszeiten.

Die Geschichte der Spektroskopie geht zurück auf das 18. und 19. Jahrhundert. Kirchhoff und Bunsen entdeckten, dass chemische Substanzen, die man in die Flamme eines Bunsenbrenners hält, beim Verbrennen Spektrallinien emittieren – scharfe Linien verschiedener Farben, die man wie Fingerabdrücke benutzen kann, um chemische Elemente zu identifizieren. Aber zu der Zeit war es nicht klar, was denn Atome überhaupt sind und warum sie solche Linien emittieren. Ein besonders wichtiges

Spektrum war das des atomaren Wasserstoffs, des leichtesten der Atome. Dessen Spektrallinien, die sichtbaren Balmer-Linien, wurden zuerst in den Spektren von Sternen gesehen, und etwas später, Mitte des 19. Jahrhunderts, auch in Laborexperimenten. Dieses einfache Spektrum war letztendlich der Schlüssel zur Enttätzelung der merkwürdigen Spielregeln der Quantenmechanik. Und mehr als einmal gab es winzige Diskrepanzen zwischen Modellrechnungen und Experiment, die aber schlussendlich zu grundlegenden neuen Einsichten und Konzepten geführt haben. Dieses Spektrum hat bahnbrechende Entdeckungen ermöglicht von Bohr, Sommerfeld, Heisenberg, Schrödinger, Dirac und Lamb bis hin zur Quantenelektrodynamik.

Balmer, ein Schweizer Schullehrer, war der erste, der gesehen hat, dass man die Wellenlängen dieser Balmer-Linien mit einer einfachen Formel beschreiben kann. Rydberg hat Balmers Formel verallgemeinert und dabei die empirische Rydbergkonstante eingeführt. Aber trotzdem wusste man nicht, wie denn diese Linien zustande kommen. Dazu musste man warten, bis Rutherford den Atomkern entdeckt hatte. Damit konnte sich Bohr ein Konzept überlegen, wie die ganze Masse des Atoms in einem kleinen Protonkern konzentriert sein kann, und wie ein Elektron, ein ganz leichtes Teilchen, fast wie in einem Planetensystem drum herum kreist. Eigentlich sollte das geladene Teilchen kontinuierlich Energie abstrahlen. Bohr spielte mit radikalen, nichtklassischen Ideen, wie es denn wäre, wenn es stationäre Bahnen gäbe, auf denen das Elektron gar nicht strahlen kann, und wenn die Linien bei Quantensprüngen zwischen diesen Bahnen emittiert würden. Das war also damals eine haarsträubende Vorstellung. Aber Bohr konnte mit diesem Modell die Rydbergkonstante in Beziehung zu anderen physikalischen Konstanten setzen, nämlich zur Elektronenmasse, zur Elektronenladung, zu Plancks Konstante und zur Lichtgeschwindigkeit. Das stimmte ziemlich genau, sodass man akzeptieren musste, dass an diesen verrückten Ideen wahrscheinlich etwas dran ist.

Aber mit dem Bohrschen Modell konnte man nicht die Lebensdauer eines solchen Zustands berechnen, und auch nicht, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass Licht emittiert wird. Das schafften dann erst Born und Heisenberg mit ihrer Matrizenmechanik. Heisenberg ging aus von der klassischen Mechanik und betrachtete nichtkommutierende Operatoren. In moderner Form kann man die Matrizenmechanik durch eine einfache Gleichung anschreiben, die die Zeitentwicklung eines Operators angibt. Anschaulicher waren die Konzepte der Materiewellen, die deBroglie und Schrödinger benutzten, um das Wasserstoffatom besser zu verstehen. DeBroglie spekulierte, dass die Bahnen auf denen das Elektron nicht strahlt solche Bahnen sind, bei denen eine ganze Zahl von Wellenlängen auf den Kreisumfang passt. Schrödinger schaffte es, eine Wellengleichung für diese Materiewellen zu formulieren. Seine berühmte Schrödingergleichung konnte man für das Wasserstoffatom sogar in geschlossener Form lösen. Aber es entstand auch eine neue Frage, die noch heute die Philosophen beschäftigt: was beschreibt man denn eigentlich mit der Schrödingerschen Wellenfunktion oder mit einem Zustandsvektor? Ist das etwas Reales, eine Wellenfunktion? Oder ist das etwas, was letzten Endes nur in meinem Kopf existiert? Heisenbergs Position war, dass der Akt der Registrierung, der zur Zustandsreduktion führt, also die Messung, nicht ein physikalischer, sondern sozusagen ein mathematischer Vorgang sei. Mit der un stetigen Änderung unserer Kenntnis ändert sich natürlich auch ihre mathematische Darstellung un stetig. Ich glaube, dass das eine wichtige Einsicht ist. Die Wellenfunktion beschreibt nicht direkt die Realität, sondern sie beschreibt mathematisch, was wir über die Wahrscheinlichkeit von Messergebnissen vorhersagen können. Aus dieser Perspektive verschwinden viele Rätsel und Paradoxe, wie der Kollaps der Wellenfunktion oder die spukhafte Fernwirkung. Aber, dass diese Frage noch immer offen ist, zeigt auch, dass wir letztendlich noch gar nicht verstehen, was denn da eigentlich vor sich geht.

Schrödingers und Heisenbergs Formalismus konnten eine Feinstruktur der Balmer- α Linie, die schon am Ende des 19. Jahrhunderts von Michelson beobachtet wurde, nicht beschreiben. Sommerfeld hatte schon versucht, zu dieser Feinstruktur zu kommen, indem er das Bohrsche Modell verallgemeinerte und auch Ellipsenbahnen und relativistische Effekte berücksichtigte. In dem Zusammenhang hatte er die berühmte Feinstrukturkonstante α eingeführt. Nachdem die Schrödingergleichung formuliert war, gelang es nun Paul Dirac, eine relativistische Verallgemeinerung zu entwickeln, die tatsächlich detaillierte Aussagen über die Feinstruktur von Wasserstoffspektrallinien machte, die den Spin des Elektrons beschreiben konnte und auch die Existenz von Antielektronen, von Positronen, vorher sagte. Das war ein Triumph der mathematischen Physik und die Gleichungen und Ergebnisse waren so schön, dass jeder glaubte „das muss richtig sein, so arbeitet die Natur“. Dass Dirac doch nicht recht hatte, wurde nach dem 2. Weltkrieg von Willis Lamb gezeigt. In Atomstrahlexperimenten mit einem metastabilen Atomstrahl entdeckte er, dass es zwei Energiezustände im Wasserstoff gibt, die nach Dirac genau die gleiche Energie haben sollten, die aber in Wirklichkeit aufgespalten sind, sodass man Mikrowellenübergänge dazwischen treiben kann. Und zwar waren das der $2s$ Zustand, wo das Elektron eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit am Kernort hat, und der $2p$ Zustand, wo es wegbleibt vom Kern. Bethe hatte eine anschauliche, intuitive Erklärung was Dirac nicht berücksichtigt hatte, nämlich Fluktuationen des elektromagnetischen Feldes im Vakuum, die man auch beim absoluten Nullpunkt noch berücksichtigen muss. Die rütteln quasi am Elektron, sodass vom Standpunkt des Elektrons aus der Kern ausgeschmiert erscheint. Im s -Zustand ist das Elektron deswegen weniger stark gebunden als im p -Zustand, wo das Rütteln wegen des größeren Abstands keine so große Rolle spielt. Bethe wies auch darauf hin, dass es einen zweiten, kleineren Effekt mit umgekehrten Vorzeichen gibt, den der Vakuumpolarisation: die Erzeugung virtueller Elektronen-

Positronen-Paare verleiht dem Vakuum Eigenschaften eines Dielektriums. Das war dann der Beginn der Entwicklung der Quantenelektrodynamik, für die Tomonaga, Schwinger und Feynman 1965 mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet wurden. Die Quantenelektrodynamik oder QED ist der Prototyp moderner Quantenfeldtheorien einschließlich der Stringtheorie.

Ein neues Kapitel begann mit der Erfindung des Lasers. Zu der Zeit war die Quantenphysik wunderbar selbstkonsistent und es stimmte alles. Aber, wenn wir realisieren, dass wir nicht alles so gut verstehen, wie kann man dann Fortschritte machen? Um auszurechnen muss man neue Experimente machen, etwas Unerwartetes entdecken! Man kann das bei hohen Energien mit großen Teilchenbeschleunigern versuchen, wie das am CERN passiert, oder die Geschehnisse im Universum mit immer raffinierteren Teleskopen erkunden. Aber es gibt auch andere Leute, die versuchen bei kleinen Energien, mit kleinen Experimenten und kleinen Etats, aber mit extremer Präzision, Diskrepanzen zu finden zwischen Theorie und Experiment. Der Laser wurde ein wichtiges Werkzeug in diesen Präzisionsexperimenten. Der erste Vorschlag, wie man einen Laser realisieren kann, kam 1958 von Arthur Schawlow und Charles Townes, die mit ihrer Arbeit ein Rennen ausgelöst haben, wer denn den ersten Laser bauen kann. Dieses Rennen hat Ted Maiman mit seinem gepulsten Rubinlaser 1960 gewonnen. Der Original-Rubinlaser von Maiman steht im Augenblick am Max Planck Institut für Quantenoptik als Leihgabe der Witwe Kathleen Maiman. Dieser Laser war ein so fantastisches Werkzeug für Wissenschaft und Technik, dass wir inzwischen 32 Nobelpreise rund um den Laser zählen, der neuste davon in diesem Jahr. Wie Sie wissen ging er an Arthur Ashkin für die Erfindung der Laserpinzette und an Gerard Mourou und seine Doktorandin Donna Strickland für ihre Methode zur Erzeugung intensiver, ultra-kurzer Lichtpulse.

Ich selbst bin 1970 als junger Postdoc an die Stanford Universität in Kalifornien gegangen, um bei Art Schawlow zu

arbeiten. Herr Schawlow, Miterfinder des Lasers, war ein sehr humorvoller, verspielter Mann. Viele kennen das Foto, bei dem er mit einem kleinen Rubinlaser einen blauen Mickey Mouse Ballon im Inneren eines klaren Ballons zertrümmert, der dabei heil bleibt. Wenn man ihn am Gang getroffen hat, hat er seine Mitarbeiter gefragt: „What have you discovered?“ Das war eine wichtige Nachricht für die Studenten, die gemerkt haben, „ah wir sind hier nicht um etwas Altes zu lernen, wir sollen etwas Neues entdecken“. Aber meistens hatte man grade nichts Neues entdeckt, was einen etwas in Verlegenheit brachte. Aber in meinem ersten Jahr, so im November, hatte ich einmal tatsächlich etwas zu berichten. Und zwar hatte ich mit Farbstofflasern gespielt. Das waren damals breitbandig abstimmbare Laser, mit einem gepulsten Stickstofflaser gepumpt, mit einem Resonator aus einem teildurchlässigen Spiegel und einem Beugungsgitter am anderen Ende. Wenn man den Winkel des Beugungsgitters änderte, konnte man die Farbe dieses Lasers ändern, von rot nach gelb nach grün. Das konnte man früher nicht machen, da Gaslaser nur bei ganz bestimmten Spektrallinien emittierten. Man hatte also einen breitbandig abstimmbaren Laser, nur war er nicht monochromatisch, und eignete sich ziemlich schlecht für Spektroskopieanwendungen. Ich sah, dass der Strahl auf dem Beugungsgitter nur sehr klein war. Wenn man aber einen hochauflösenden Gitterspektralapparat bauen will, dann muss man alle Gitterlinien ausleuchten. Ich habe daher mein kleines Teleskop benutzt, das ich in der Hosentasche hatte um in Vorlesungen die Tafel auch von weit hinten zu sehen. Ich habe es im Laser montiert und es war fantastisch! Auf einmal war der Laser nicht nur in der Farbe veränderlich, sondern er war auch sehr monochromatisch. Und mit ein bisschen mehr Arbeit hatte man einen Laser, der so monochromatisch war, dass er gut mit Gaslasern konkurrieren konnte, aber mit dem entscheidenden Unterschied, dass man jetzt solch monochromatisches Laserlicht im gesamten sichtbaren Spektralbereich erzeugen konnte. Das hat viel Furore gemacht. 1973 gab es eine Auszeichnung



Abb. 1: (links) Art Schawlow, der mit einem Rubinlaser einen blauen Ballon innerhalb eines durchsichtigen Ballons zertrümmerte. (rechts) Verleihung des „Californian Scientist of the Year 1973“ für die Entwicklung des schmalbandigen, abstimmbaren Lasers an Art Schawlow und den Autor, sowie des Industriepreises an William Hewlett.

„Californian Scientist of the Year“ vom Californian Museum of Science and Industry in Los Angeles. Und die Ausgezeichneten waren eben der Postdoc, der jetzt vor Ihnen steht, und Art Schawlow in der Kategorie Wissenschaft, und in der Kategorie Industrie war es William Hewlett. Sein Partner David Packard war da gerade in Washington zu der Zeit.

Eine der ersten Dinge, die wir mit diesem Laser gemacht haben, war es, die rote Balmer-Linie des Wasserstoffs genauer anzuschauen. Wir konnten nun einen Trick, den man mit Gaslasern beherrschte, anwenden. Man kann nämlich die Dopplerverbreiterung unterdrücken, wenn man mit zwei gegenläufigen Strahlen die Atome anregt. Ein Strahl bleicht den Übergang und sättigt ihn, und der andere sieht das, aber nur, wenn beide mit den gleichen Atomen wechselwirken. Auf Anhieb haben wir es geschafft, einzelne Feinstrukturkomponenten aufzulösen und insbesondere die Lamb-Verschiebung unmittelbar im optischen Spektrum zu sehen. Das war der Beginn einer langen Abenteuerreise, bei der wir versucht haben, mit Hilfe von Lasern am einfachen Wasserstoffatom immer höhere Auflösung und

immer höhere Messgenauigkeit zu erreichen. In der Abbildung 2 sehen Sie, dass man zu Zeiten vor dem Laser zirka sieben Dezimalstellen ausmessen konnte. Sehr bald schaffte man dann mit Lasern und dopplerfreier Spektroskopie ungefähr 10 Dezimalstellen. Heute erzielen wir 15 Dezimalstellen, weil wir gelernt haben, nicht die Wellenlänge von Licht zu messen, sondern die Frequenz, also direkt die Zahl der Schwingungen pro Sekunde des Laserlichts. Die Motivation für dieses lange Abenteuer war, dass man so die Quantenelektrodynamik direkt testen kann, denn vielleicht stimmt sie ja doch nicht immer so gut, wenn man nur ganz genau hinschaut. Und insbesondere die Hoffnung, dass man vielleicht doch noch neue, unerwartete Physik entdecken kann. Wenn die Quantenelektrodynamik aber doch stimmt, kann man diese Messungen benutzen, um Naturkonstanten zu bestimmen, insbesondere die Rydbergkonstante, aber auch den Ladungsradius des Protons. Man kann der Frage

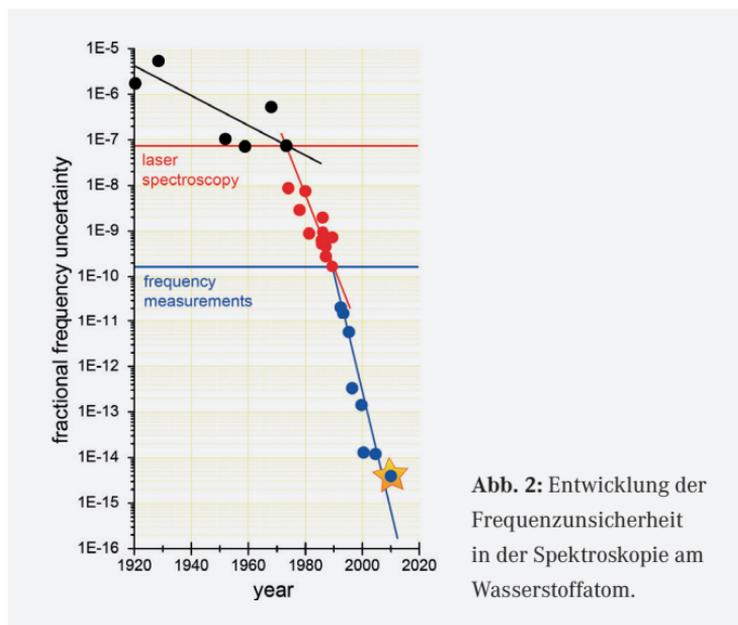


Abb. 2: Entwicklung der Frequenzunsicherheit in der Spektroskopie am Wasserstoffatom.

nachgehen, ob Naturkonstanten auch wirklich konstant sind, oder sich vielleicht nicht doch langsam ändern. Und man kann Wasserstoff und Antiwasserstoff vergleichen, hier gibt es gerade aufregende, neue Experimente am CERN.

Ein Übergang im Wasserstoffatom erlaubt eine besonders hohe Auflösung. Es ist ein Zwei-Photonen-Übergang vom Grundzustand des Wasserstoffs zu dem metastabilen $2s$ -Zustand, den man mit ultraviolettem Laserlicht bei 243 nm anregen kann. Verwendet man zwei gegenläufige Laserstrahlen, dann heben sich Dopplerverschiebungen erster Ordnung gegenseitig weg und ermöglichen dopplerfreie Spektroskopie ohne Geschwindigkeitsselektion. Die natürliche Linienbreite sollte nur mehr ein Hertz betragen, verglichen mit 10^{15} Hz optischer Frequenz. Möglichkeiten, das Wasserstoffatom festzuhalten haben wir noch nicht. Wir haben hier in München 1985 angefangen, mit einem mit flüssigem Helium gekühlten Atomstrahl zu experimentieren. Dafür erzeugt man Wasserstoffatome in einer Gasentladung und lässt die Atome mit den Wänden einer kalten Düse kollidieren, sodass das Gas auf 4 Kelvin abgekühlt wird. Aber auch bei 4 K ist der leichte Wasserstoff noch sehr schnell. Er hat eine mittlere Geschwindigkeit von 300 m/s, sodass die Beobachtungszeiten klein sind. Um ihn von vorne und von hinten anzuregen, verwenden wir ein Stehwellenfeld in einem optischen Resonator mit zwei Spiegeln und erhalten so eine Flugstrecke von 10 cm innerhalb dieser Stehwelle. Ob die Atome angeregt werden, kann durch Anlegen eines elektrischen Feldes nachgewiesen werden. Das zwingt die Atome zum Zerfall, wobei sie Lyman- α ultraviolette Photonen emittieren. Um jetzt doch noch zu langsamen Atomen zu kommen, haben wir einen Trick angewendet. Man kann das Laserlicht mit einem Zerhacker periodisch unterbrechen und nur auf verzögerte Signale schauen. Diese müssen von langsamen Atomen stammen, die nach einer vorher gewählten Verzögerungszeit immer noch im Detektor ankommen. So kann man effektiv Atome bei Millikelvin Temperaturen selektieren.