

Quanten 7

HERAUSGEGEBEN

VON KONRAD KLEINKNECHT

Schriftenreihe der Heisenberg-Gesellschaft

Hirzel Verlag



Quanten 7

Herausgegeben von Konrad Kleinknecht

SCHRIFTENREIHE DER HEISENBERG-GESELLSCHAFT

Herausgegeben von der
Heiseberg-Gesellschaft e.V., München
Band 7

Quanten 7

HERAUSGEGEBEN

VON KONRAD KLEINKNECHT



S. Hirzel Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in
der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

ISBN 978-3-7776-2797-7 (Print)

ISBN 978-3-7776-2817-2 (E-Book)

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsge-
setzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzung,
Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen. Gedruckt auf säurefreiem,
alterungsbeständigem Papier.

© 2019 S. Hirzel Verlag Stuttgart

Druck: Offsetdruck Bokor, Bad Tölz

Printed in Germany

Inhalt

7 *Vorwort des Herausgebers*

T. W. HÄNSCH

9 *Das Wasserstoffatom und die Leidenschaft für Präzision*

KARL VON MEYENN

30 *Zwischen Skylla und Charybdis*

Pauli und Heisenberg auf dem Weg zur Quantenmechanik

WERNER HEISENBERG

83 *Sprache und Wirklichkeit in der Modernen Physik*

WERNER HEISENBERG

105 *Aus meinem Leben*

121 *Autoren*

Vorwort des Herausgebers

Der siebte Band der Reihe „Quanten“ enthält die Vorträge auf der Mitgliederversammlung der Heisenberg-Gesellschaft am 19. Oktober 2018. Der Nobelpreisträger Theodor W. Hänsch berichtete in einem faszinierenden Vortrag über seine experimentellen Forschungen zur optischen Spektroskopie des Wasserstoffs und seine Leidenschaft zu immer präziseren Messungen mit Hilfe des Lasers. Im zweiten Vortrag schilderte Karl von Meyenn, wie man anhand der Briefwechsel und anderer Dokumente den Weg der Freunde Wolfgang Pauli und Werner Heisenberg in den 1920er Jahren und ihre Überlegungen zu den Problemen der Atomphysik verfolgen kann, der dann im Juni 1925 zu Heisenbergs Durchbruch zur Quantenmechanik führte. Außerdem haben wir noch zwei historische Dokumente aufgenommen. Im ersten Text aus dem Jahr 1960 legt Werner Heisenberg dar, wie sich die veränderte Wirklichkeit der atomaren Quantenwelt auf die zur Beschreibung verwendete Sprache auswirkt. Im zweiten Text, einem Transskript aus einem Film

des Jahres 1968, spricht Heisenberg über sein Leben als Forscher, Lehrer, Musiker und Familienvater.

München, im Mai 2019

KONRAD KLEINKNECHT
VORSITZENDER DER HEISENBERG-GESELLSCHAFT

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 Enttaslung 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 ermoglicht 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 eingefuhrt. 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 iberlegen, 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-