

Physik IV (Atomphysik)

Vorlesung SS 2003

Prof. Ch. Berger

Zusammenfassung

Das Skript gibt eine gedrängte Zusammenfassung meiner Vorlesung an der RWTH Aachen im SS 2003. Verglichen mit vielen, auch neueren Lehrbüchern wird versucht, alte Zöpfe abzuschneiden. Sie werden also keine Diskussion des Bohrschen Atom-Modells finden, die Behandlung des Zeeman-Effekts ist auf das nötigste zusammengedrängt, der Stark-Effekt fehlt, etc.etc. Bitte weisen Sie eventuell Ihre Prüfer im Vordiplom darauf hin.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Atome und Kerne	5
2.1	Die atomare Struktur der Materie	5
2.1.1	Daltons chemische Gesetze	5
2.1.2	Gasgesetze	6
2.2	Elektronen	7
2.2.1	Nachweis von freien Elektronen	7
2.2.2	Ladung und Masse des Elektrons	9
2.2.3	Der Radius des Elektrons	10
2.3	Bestimmung der Atommassen	12
2.3.1	Massenspektrometer	12
2.3.2	Ionenfallen	18
2.4	Radien der Atome	22
2.5	Atomkerne	27
2.5.1	Radien der Atomkerne	27
2.5.2	Massen und Bindungsenergien	29
3	Welle und Teilchen	32
3.1	Photonen	32
3.1.1	Röntgenstrahlung	32
3.1.2	Photoeffekt	36
3.1.3	Compton Effekt	37
3.1.4	Photonen und Gravitation	38
3.2	Materiewellen	40
3.2.1	Elektronenbeugung	40
3.2.2	Die Heisenbergschen Unschärferelationen	41
3.2.3	Prinzipien der Quantenmechanik	44
3.2.4	Die Schrödingergleichung	46
3.2.5	Eigenwerte und Eigenfunktionen	48

4	Atombau und Spektrallinien I, das <i>H</i>-Atom	53
4.1	Linienpektren der Atome	53
4.2	Das Elektron im Coulombfeld	55
4.3	Spin und magnetisches Moment des Elektrons	60
4.4	Die Feinstruktur	64
4.5	Die Lambshift	67
4.6	Die Hyperfeinstruktur	71
5	Atombau und Spektrallinien II, Atome mit mehreren Elektronen	75
5.1	Die Alkali-Atome	75
5.2	Das Helium	77
5.2.1	Das Termschema	77
5.2.2	Das Pauli-Prinzip	79
5.2.3	Anschauliche Bedeutung des Pauli-Prinzips	80
5.2.4	Konstruktion der Wellenfunktionen	81
5.2.5	Die niedrigsten Helium-Zustände	83
5.3	Das Periodensystem der Elemente	85
5.4	Atome im Magnetfeld	89
6	Strahlungsprozesse	94
6.1	Auswahlregeln	94
6.2	Die Linienform	96
6.3	Der schwarze Strahler	98
6.3.1	Strahlung fester Körper und Hohlraumstrahlung	98
6.3.2	Atome im Strahlungsfeld	99
6.3.3	Das Strahlungsgesetz von Planck	100
6.3.4	Die Einstein Koeffizienten	104
6.4	Der Drei-Niveau-Laser	104

1 Einleitung

Leitbild der exakten Naturwissenschaften ist der Reduktionismus, d.h. die Zurückführung komplexer Sachverhalte auf wenige Prinzipien. Eines der besten Beispiele: die Chemie hat erkannt, daß die ungeheure Fülle der Stoffe aus 92 Elementen aufgebaut ist. Der Atomismus ist ein weiteres Paradebeispiel des Reduktionismus. Er ist die vielleicht wichtigste wissenschaftliche Erkenntnis überhaupt. Jede Probe eines Elements besteht aus einer Ansammlung identischer kleiner Teilchen, die mit chemischen Mitteln nicht verändert werden können. Diese *Atome* bauen die Verbindungen auf.

Von hier aus gibt es zwei Wege der Physik:

1. Der Weg nach außen. Verbindungen der Chemie (Molekülphysik), \rightarrow Cluster \rightarrow Aggregatzuständen der Materie (Gase, Flüssigkeiten, Festkörper) \rightarrow Planeten, Sterne \rightarrow Galaxien (Gas von Sternen) \rightarrow Kosmos (Gas von Galaxien).
2. Der Weg nach innen: Es sind weitere Ebenen des Atomismus gefunden worden.
 - Radien und Anregungszustände der Atome zeigen, daß diese nicht wirklich elementar sind. Atome bestehen aus dem Kern und einer Hülle von Elektronen. Die Elektronen sind nach heutigem Wissen punktförmig. Sie tragen eine negative Elementarladung e . Je nach der Ordnungszahl Z des Elements im Periodensystem besteht die Hülle aus Z Elektronen. Der Kern hat eine positive Ladung Ze .
 - Radien und Anregungszustände der Kerne zeigen, daß auch sie zusammengesetzt sind. Die Kernbausteine (Nukleonen) sind das Proton (p) und das Neutron (n). Das Proton trägt eine positive Elementarladung e , das Neutron ist neutral.
 - Radien und Anregungszustände der Nukleonen zeigen, daß auch sie zusammengesetzt sind. Die Bausteine sind die Quarks u, d . Die Ladung ist drittelzahlig, $Q_u = 2/3e$, $Q_d = -1/3e$ und es gilt $p = uud$, $n = udd$. Von zusammengesetzten Systemen wird erwartet, daß sie sich in die Einzelteile zerlegen lassen. Dies ist bei Atomen und Kernen auch der Fall. Die Nukleonen lassen sich aber nicht in die einzelnen Quarks zerlegen

Jedes Teilgebiet der Physik hat ein besonders angepaßtes Maßsystem. Die Energieeinheit der Atomphysik ist das eV. Ein Teilchen mit einer Elementarladung e gewinnt beim Durchlaufen eines Feldes mit einer Potentialdifferenz von 1 V die Energie

$$\Delta W = 1\text{eV} = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{Ws} \quad (1)$$

Anstelle von Massen benutzen wir die Ruheenergien

$$W_0 = mc^2 \quad (2)$$

mit $c = 2.9979 \cdot 10^8$ m/s, (Phasengeschwindigkeit des Lichts). Anstelle der Elementarladung $e = 1.6022 \cdot 10^{-19}$ C benutzen wir möglichst die dimensionslose Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137.04} \quad (3)$$

mit der elektrischen Feldkonstanten ε_0 und

$$\hbar c = 197.33 \text{ eVnm} \quad (4)$$

worin \hbar über $\hbar = h/2\pi$ mit der Planckschen Konstanten h verknüpft ist¹.

¹Wir geben hier Konstanten mit einer Genauigkeit von 5 Stellen an, um die Lesbarkeit des Textes zu erhöhen. Genauere Werte finden sich z.B. im Internet http://pdg.web.cern.ch/pdg/2002/contents_sports.html Zur Nomenklatur: Vektoren werden mit fetten Buchstaben gekennzeichnet, ihre Beträge aber mit normalen Buchstaben