

Inhalt

1 Atome	1
<i>Hans Kleinpoppen</i>	
1.1 Die Entwicklung der Atomphysik	1
1.2 Die ältere Atomtheorie	3
1.2.1 Das Rutherford-Bohrsche Atommodell	3
➔ 1.2.2 Das Energieniveauschema und die Spektralserien des Wasserstoffatoms	10
1.3 Die Quantenmechanik in der Formulierung Schrödingers	14
1.3.1 Die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung	15
1.3.2 Die stationäre Schrödinger-Gleichung	16
1.3.3 Potential-Null-Lösung der Schrödinger-Gleichung	18
1.3.4 Die Lösung der Schrödinger-Gleichung für das zentrale Coulomb-Feld im Wasserstoffatom	18
1.3.5 Die Grobstruktur der Energiezustände des Wasserstoffatoms	28
1.3.6 Die Feinstruktur- und Hyperfeinstruktur-Aufspaltung des Wasserstoffatoms	30
1.3.6.1 Die normale Feinstruktur: Spin-Bahn-Wechselwirkung und relativistische Korrekturen	32
1.3.6.2 Die Hyperfeinstruktur und Isotopie-Verschiebung	42
1.3.6.3 Lamb-Shift als anomale Feinstruktur (quantenelektrodynamischer Effekt) ..	51
1.4 Ansätze zur Verallgemeinerung und Entwicklung einer vollständigen abstrakten Theorie der Quantenmechanik	53
1.4.1 Operatoren, Eigenwerte, Eigenfunktionen und quantenmechanische Mittelwerte	54
1.4.2 Die Dirac-Schreibweise und Matrix-Formulierung der Quantenmechanik ...	57
1.4.2.1 Linearer Vektor-Raum (Hilbert-Raum)	57
1.4.2.2 Die Postulate der Quantenmechanik mit den Zustandsoperatoren und Zustandsvektoren	61
1.4.2.3 Weitere Resultate und Konsequenzen der quantenmechanischen Postulate ..	62
1.4.2.4 Der quantenmechanische Oszillator	65
1.4.2.5 Der quantenmechanische Potentialtopf	69
1.4.2.6 Auswahlregeln und Übergangsmatrixelemente	74
1.5 Struktur der Atome mit mehreren Elektronen	84
1.5.1 Die elektrostatische Korrelation	84
1.5.2 Russel-Saunders- und <i>jj</i> -Kopplung	85
1.5.3 Pauli-Prinzip und Symmetrie der Wellenfunktionen	86
1.5.4 Die Struktur des Heliumatoms	89
1.5.5 Aufbauprinzip und Periodensystem der Atome	97
1.5.6 Die Spektren der Alkalimetallatome	104
1.5.7 Die Spektren der Erdalkalimetallatome und der Zwei-Elektronen-Systeme Zink, Cadmium und Quecksilber	111
1.5.8 Multiplett-Spektren der Mehr-Elektronen-Atome	114

1.5.8.1	Die Elemente der p-Gruppen	114
1.5.8.2	Die Elemente der d-Gruppen	120
1.5.9	Energiestruktur und Spektren positiver Ionen	120
1.5.10	Negative Ionen	121
1.5.11	Energiestruktur der inneren Schalen: Röntgenspektren, Auger-Effekt und Coster-Kronig-Übergänge	123
1.5.12	Röntgenbremsstrahlung	138
1.6	Atome in äußeren Feldern	144
1.6.1	Zeeman-Effekt – Atome in Magnetfeldern	144
1.6.1.1	Normaler Zeeman-Effekt: Lorenz-Triplets	145
1.6.1.2	Anomaler Zeeman-Effekt als allgemeiner Fall und der Landésche g-Faktor ..	148
1.6.1.3	Quadratischer Zeeman-Effekt, Diamagnetismus und Landau-Bereiche	157
1.6.2	Elektrische Aufspaltung der Atome – Stark-Effekt	167
1.7	Experimentelle Methoden und Anwendungen der Atomspektroskopie	177
1.7.1	Atomare Targets und Strahlen	178
1.7.1.1	Atomare Gaszellen und Atomstrahlen	178
1.7.1.2	Ionenstrahlen, Ionen- und Elektronenfallen	183
1.7.2	Die Breite und Linienform atomarer Spektrallinien	187
1.7.2.1	Die natürliche Linienbreite – Lorentz-Linienform	187
1.7.2.2	Die Stoßverbreiterung der Spektrallinien	189
1.7.2.3	Die Doppler-Verbreiterung	190
1.7.2.4	Das Voigt-Profil	192
1.7.2.5	Sättigungseffekt und Selbstumkehr der Spektrallinien	193
1.7.3	Hochfrequenz- und Mikrowellenspektroskopie	195
1.7.3.1	Elektrische und magnetische Dipolübergänge	195
1.7.3.2	Die magnetische Atomstrahl-Resonanzmethode nach Rabi	199
1.7.3.3	Der Wasserstoff-Maser und die Hyperfeinstruktur des Wasserstoffatoms	203
1.7.3.4	Der g-Faktor freier Elektronen und Positronen	206
1.7.4	Optische und Laser-Methoden	207
1.7.4.1	Doppler-freie Ein- und Zwei-Photonen-Laser-Spektroskopie	209
1.7.4.2	Hochfrequenz- und Mikrowellen-Spektroskopie angeregter Atome, Lamb-Shift-Experimente	213
1.7.4.3	Optische Doppelresonanztechnik	215
1.7.4.4	Hanle-Effekt-, Level-Crossing- und Anticrossing-Spektroskopie	223
1.7.4.5	Spektroskopie mit schnellen atomaren Teilchen und Anregung durch Folien (Beam-Foil- und Fast-Beam-Spektroskopie)	233
1.7.4.6	Spektroskopie mit der Synchrotronstrahlung	235
1.7.4.7	Metastabile Zustände	241
1.8	Exotische Atome	253
1.9	Rydberg-Atome	257
1.10	Atomare Stoßprozesse	259
1.10.1	Klassifizierung atomarer Stoßprozesse	259
1.10.2	Totaler und differentieller Wirkungsquerschnitt	261
1.10.3	Photoionisation der Atome	263
1.10.3.1	Experimentelle Methoden zur Messung von Photoionisationsquerschnitten ..	264
1.10.3.2	Resultate für totale Wirkungsquerschnitte	271
1.10.3.3	Spin-Bahn-Wechselwirkung und Fano-Effekt	276
1.10.3.4	Photoionisation mit polarisierten Atomen	279
1.10.4	Stoßprozesse zwischen Elektronen (Positronen) und Atomen	280

1.10.4.1	Partialwellenanalyse und Ramsauer-Townsend-Effekt	281
1.10.4.2	Resonanzstrukturen	289
1.10.4.3	Koinzidenzexperimente	297
1.10.4.4	Spineffekte	313
1.10.5	Ion-Atom- und Atom-Atom-Stoßprozesse	324
1.10.5.1	Stoßparameterdarstellung in klassischer Näherung	324
1.10.5.2	Quasi-Molekül-Bildung	325
1.10.5.3	Potentialstreuung und quantenmechanische Struktureffekte	331
1.10.5.4	Koinzidenz- und Spin-Experimente	335
1.10.5.5	Antiproton-Atom-Stoßprozesse	341
2	Atomkerne	353
	<i>Klaus-Peter Lieb</i>	
2.1	Einleitung	353
2.1.1	Wovon handelt die Kernphysik?	353
2.1.2	Kurzer Abriss der historischen Entwicklung	356
2.2	Allgemeine Eigenschaften von Atomkernen	360
2.2.1	Die Kernladung	361
2.2.2	Kernmassen und Bindungsenergien	365
2.2.2.1	Definitionen	365
2.2.2.2	Massenspektrometer und Massenseparatoren	367
2.2.2.3	Messung von Separationsenergien und Q -Werten – Die Masse des Neutrons	371
2.2.2.4	Systematik der Bindungsenergien	374
2.2.3	Kernradien, Verteilung der Nukleonen im Kern	375
2.2.3.1	Die Nukleonenverteilung im Kern	375
2.2.3.2	Die Ladungsverteilung im Kern	379
2.2.3.3	Elektrische Quadrupolmomente	391
2.2.4	Kernspin und magnetisches Moment	393
2.2.4.1	Definitionen	393
2.2.4.2	Meßmethoden	395
2.3	Kernmodelle	397
2.3.1	Das Tröpfchenmodell	398
2.3.2	Das Kollektivmodell	401
2.3.2.1	Das Vibrationsmodell	401
2.3.2.2	Rotationsbanden in gg-Kernen	406
2.3.3	Das Einteilchen-Schalenmodell	409
2.3.3.1	Magische Zahlen	409
2.3.3.2	Das Schalenmodell	411
2.3.3.3	Konsequenzen des Schalenmodells – Restwechselwirkungen	413
2.3.4	Das Fermigas-Modell	420
2.3.5	Kopplung von kollektiver und Einteilchen-Bewegung	424
2.3.5.1	Schwache Kopplung	424
2.3.5.2	Das Nilsson-Modell	425
2.3.5.3	Coriolis-Entkopplung	428
2.4	Die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung	429
2.4.1	Das Deuteron	430
2.4.2	Nukleon-Nukleon-Streuung	432
2.4.2.1	Proton-Neutron-Streuung	433
2.4.2.2	Proton-Proton-Streuung	438

2.4.3	Der Isospin	441
2.4.4	Phänomenologische Nukleon-Nukleon-Potentiale	445
2.4.5	Mesonen und/oder Quarks in Kernen?	449
2.4.5.1	Hadronenresonanzen	449
2.4.5.2	Das naive Quarkmodell der Hadronen	452
2.5	Kernzerfälle	458
2.5.1	Nuklidkarte – Zerfallsgesetz – Erhaltungssätze	458
2.5.2	Der Alphazerfall	462
2.5.2.1	Einige wichtige Beobachtungen	462
2.5.2.2	Der Gamow-Faktor	464
2.5.2.3	Neuere Ergebnisse	466
2.5.3	Die Kernspaltung	469
2.5.3.1	Der Spaltprozeß	469
2.5.3.2	Energiebilanz – Spaltbarriere	470
2.5.3.3	Spaltreaktoren	473
2.5.4	Elektromagnetische Strahlung des Kerns	475
2.5.4.1	Auswahlregeln	477
2.5.4.2	Einteilchenbreiten	478
2.5.4.3	Messung nuklearer Lebensdauern	480
2.5.4.4	Kernresonanzabsorption und Mößbauer-Effekt	483
2.5.4.5	Elektronen-Konversion (EC)	487
2.5.5	Betazerfälle	489
2.5.5.1	Neutrinos	489
2.5.5.2	Die Form des β -Spektrums	491
2.5.5.3	Die β -Zerfallswahrscheinlichkeit	493
2.5.5.4	Paritätsverletzung beim β -Zerfall	496
2.5.5.5	Die Helizität des Neutrinos	498
2.5.6	Radiodatierung	500

3 Elementarteilchen..... 515

Peter Schmüser, Hartwig Spitzer

3.1	Historische Entwicklung und grundlegende Konzepte der Elementarteilchenphysik	515
3.1.1	Elementarteilchen in der Atom- und Kernphysik	515
3.1.2	Erste Versuche zur Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen	516
3.1.3	Unser heutiges Bild der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen	519
3.2	Beschleuniger und Teilchendetektoren	525
3.2.1	Grundzüge der Beschleunigerphysik und -technik	525
3.2.1.1	Strahloptik und starke Fokussierung	525
3.2.1.2	Beschleunigung	529
3.2.1.3	Synchrotronstrahlung	531
3.2.1.4	Teilchenquellen und Vorbeschleuniger	533
3.2.2	Synchrotrons, Speicherringe und Linearbeschleuniger	534
3.2.3	Wechselwirkungen von Teilchen und γ -Strahlung mit Materie	537
3.2.3.1	Ionisation	538
3.2.3.2	Bremsstrahlung	540
3.2.3.3	Cerenkov- und Übergangsstrahlung	540
3.2.3.4	Paarbildung und elektromagnetische Schauer	542
3.2.3.5	Hadronische Schauer	542

3.2.4	Teilchendetektoren	543
3.2.4.1	Aufgaben der Detektorkomponenten	543
3.2.4.2	Szintillationszähler	543
3.2.4.3	Blaskammer	544
3.2.4.4	Proportional- und Driftkammern	544
3.2.4.5	Cerenkov-Zähler	545
3.2.4.6	Schauerzähler und Kalorimeter	547
3.2.4.7	Ein moderner Speicherringdetektor	548
3.3	Elementarteilchen und ihre Eigenschaften	550
3.3.1	Kurzlebige Teilchen	550
3.3.2	Antiteilchen	555
3.3.3	Masse und mittlere Lebensdauer	558
3.3.4	Spin und magnetisches Moment	561
3.3.5	Ladungsartige Quantenzahlen	564
3.3.6	Parität	565
3.3.7	Ladungskonjugationen	569
3.4	Quarkmodell	569
3.4.1	Einordnung der Hadronen in Teilchenmultipletts	569
3.4.2	Experimentelle Hinweise für die Existenz von Quarks in Hadronen	578
3.4.2.1	Unelastische Elektron-Nukleon-Streuung	578
3.4.2.2	Hadronen-Jets in der Elektron-Positron-Vernichtung	580
3.4.2.3	Charmonium und Bottomium	581
3.4.3	Farbladungen und Gluonen	584
3.4.4	Experimentelle Hinweise auf die Existenz der Gluonen	586
3.5	Elementarprozesse und Teilchenreaktionen	588
3.5.1	Elementarprozesse und Feynman-Graphen in der elektromagnetischen Wechselwirkung	588
3.5.1.1	Einleitung	588
3.5.1.2	Beispiele für elektromagnetische Reaktionen	590
3.5.2	Schwache Wechselwirkung	593
3.5.3	Starke Wechselwirkung	600
3.6	Vereinheitlichung der Wechselwirkungen	601
3.6.1	Experimentelle Grundlagen der vereinheitlichten elektroschwachen Wechselwirkung	603
3.6.2	Die elektromagnetische Wechselwirkung als Eichtheorie	606
3.6.3	Qualitative Beschreibung der elektro-schwachen Wechselwirkung	608
3.6.4	Die Quantenchromodynamik als Eichtheorie	610
3.6.5	Neuere Entwicklungen und offene Fragen	611
Anhang: Relativistische Kinematik und Einheiten		612
Einführende Bemerkungen zu den Kapiteln 4 und 5: Moleküle		619
4 Moleküle – Bindungen und Reaktionen		621
<i>Nikolaus Risch</i>		
4.1	Chemische Bindungen	621
4.1.1	Chemische Formeln	621
4.1.2	Die Periodizität chemischer Eigenschaften	622

XIV	Inhalt	
4.1.3	Metalle	624
4.1.4	Ionenbindung	626
4.1.5	Kovalente Bindung	627
4.2	Reaktionsdynamik	632
4.2.1	Chemisches Gleichgewicht	632
4.2.2	Kinetik, Katalyse	634
4.2.3	Säure-Base-Reaktionen	636
4.2.4	Redoxverhalten	638
4.3	Synthese	639
4.3.1	Reaktionsmöglichkeiten und Mechanismen	639
4.3.2	Stereochemie	643
4.3.3	Strukturaufklärung	648
4.3.4	Beispiele interessanter Strukturen	649
5	Moleküle – Spektroskopie und Struktur	653
	<i>Manfred Fink, Jürgen Geiger</i>	
5.1	Einleitung	653
5.2	Spektroskopie an Molekülen im elektronischen Grundzustand	664
5.2.1	Kernparamagnetische Resonanz (NMR)	665
5.2.1.1	Einleitung	665
5.2.1.2	Absorption und Emission	666
5.2.1.3	Die Blochschen Gleichungen	670
5.2.1.4	Das NMR-Meßverfahren	672
5.2.1.5	Molekulare Strukturen und NMR	680
5.2.1.6	NMR-Spektroskopie in der Medizin	699
5.2.2	Elektronenspinresonanz-Spektroskopie (ESR)	702
5.2.2.1	Definition und Meßverfahren	702
5.2.2.2	Hyperfeinstruktur-Kopplungen	702
5.2.2.3	ESR in Übergangsmetallverbindungen	705
5.2.2.4	ENDOR	707
5.2.3	Mikrowellenspektroskopie	708
5.2.3.1	Einleitung und Definitionen	708
5.2.3.2	Lineare Moleküle	709
5.2.3.3	Nichtlineare Moleküle	711
5.2.3.4	Die Mikrowellen-Meßmethode	716
5.2.3.5	Anwendungen der Mikrowellenspektroskopie	719
5.2.4	Infrarotspektroskopie	723
5.2.4.1	Einleitung	723
5.2.4.2	Symmetrien in polyatomaren Molekülen	727
5.2.4.3	Infrarotspektrometer	730
5.2.4.4	Auswertung der Infrarotspektren	732
5.2.4.5	Der CO ₂ -Laser	737
5.2.4.6	Infrarote Laserspektroskopie	739
5.2.5	Raman-Spektroskopie	740
5.2.5.1	Einleitung	740
5.2.5.2	Raman-Spektrometer	747
5.2.5.3	Raman-Spektren	749
5.2.5.4	Resonanz-Raman-Spektroskopie	759

5.2.5.5	Kohärente Anti-Stokes-Raman-Spektroskopie (CARS).....	764
5.2.6	Multiphotonen-IR-Anregungen	770
5.2.6.1	Einleitung.....	770
5.2.6.2	Messungen im Quasikontinuum	771
5.2.6.3	Modellrechnungen von Vielquantenanregungen.....	772
5.3	Strukturen von Molekülen im elektronischen Grundzustand	774
5.3.1	Hochenergetische Elektronenbeugung.....	776
5.3.2	Niederenergetische Elektronenstreuung	788
5.3.2.1	Einleitung.....	788
5.3.2.2	Elastische Elektronenstreuung an orientierten Molekülen.....	788
5.3.2.3	Elastische Elektronenstreuung an statistisch orientierten Molekülen	796
5.3.2.4	Inelastische Elektronenstreuung innerhalb des Grundzustandes	806
5.3.2.5	Thorie zur Elektron-Molekül-Streuung	810
5.3.3	Röntgenstreuung von Molekülen in der Gasphase	815
5.3.3.1	Einleitung.....	815
5.3.3.2	Meßmethode und Ergebnisse	817
5.3.4	Holographie an Molekülen	820
5.4	Moleküle im angeregten elektronischen Zustand	821
5.4.1	Das Born-Oppenheimer-Theorem	821
5.4.2	Klassifikation und Termsymbole von elektronisch angeregten Molekülzuständen	824
5.4.3	Orbitale für zweiatomige Moleküle	833
5.4.3.1	Homonuklearer Fall	833
5.4.3.2	Molekülorbitale zweiatomiger heteronuklearer Moleküle	838
5.4.4	Auswahlregeln und Intensitäten	840
5.4.4.1	Der elektronische Beitrag.....	840
5.4.4.2	Schwingungsstruktur eines Elektronenbandensystems	842
5.4.4.3	Rotationsstruktur eines Elektronenbandensystems	848
5.4.5	Unelastische Elektronenstreuung	850
5.4.5.1	Vergleich von optischer Anregung mit Elektronenstoßprozessen.....	850
5.4.5.2	Oszillatorstärken, Bethe-Oberflächen und Summen-Regeln	854
5.4.5.3	Experimentelle unelastische Wirkungsquerschnitte	857
5.4.5.4	EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure)	860
5.5	Beispiele für Moleküle von physikalischem Interesse	862
5.5.1	Myonische Moleküle: $(d\mu) de_2$	862
5.5.1.1	Myonischer Wasserstoff	862
5.5.1.2	Myonenkatalysierte Fusion	865
5.5.2	Die metallische Mehrfachbindung von Übergangsmetallen.....	869
5.5.2.1	Einleitung und Überblick.....	869
5.5.2.2	Der ultrakurze Cr—Cr-Abstand.....	873
5.5.2.3	Das Photoelektronenspektrum von Verbindungen mit Metall- mehrfachbindungen	874
5.5.3	Van-der-Waals-Moleküle.....	880
5.5.3.1	Herstellung und Nachweis	880
5.5.3.2	Eigenschaften von van-der-Waals-Molekülen	883
5.5.3.3	Strukturen und Molekülorbitale.....	888
5.5.3.4	Die Rolle der van-der-Waals-Moleküle in der Gasphase	891
	Tabelle der Fundamentalkonstanten	899
	Register.....	903