

Inhalt

1 Atome

Hans Kleinpoppen

1.1	Die Entwicklung der Atomphysik	1
1.2	Die ältere Atomtheorie	3
1.2.1	Das Rutherford-Bohr'sche 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	17
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) ..	52
1.4	Ansätze zur Verallgemeinerung und Entwicklung einer vollständigen abstrakten Theorie der Quantenmechanik	54
1.4.1	Operatoren, Eigenwerte, Eigenfunktionen und quantenmechanische Mittelwerte	54
1.4.2	Die Dirac-Schreibweise und Matrix-Formulierung der Quantenmechanik ..	58
1.4.2.1	Linearer Vektor-Raum (Hilbert-Raum)	58
1.4.2.2	Die Postulate der Quantenmechanik mit den Zustandsoperatoren und Zustandsvektoren	62
1.4.2.3	Weitere Resultate und Konsequenzen der quantenmechanischen Postulate ..	63
1.4.2.4	Der quantenmechanische Oszillator	66
1.4.2.5	Der quantenmechanische Potentialtopf	70
1.4.2.6	Auswahlregeln und Übergangsmatrixelemente	75
1.5	Struktur der Atome mit mehreren Elektronen	85
1.5.1	Die elektrostatische Korrelation	86
1.5.2	Russel-Saunders- <i>LS</i> - und <i>jj</i> -Kopplung	86
1.5.3	Pauli-Prinzip und Symmetrie der Wellenfunktionen	88
1.5.4	Die Struktur des Heliumatoms	90
1.5.5	Aufbauprinzip und Periodensystem der Atome	99
1.5.6	Die Spektren der Alkalimetallatome	106
1.5.7	Die Spektren der Erdalkalimetallatome und der Zwei-Elektronen-Systeme Zink, Cadmium und Quecksilber	113
1.5.8	Multipllett-Spektren der Mehr-Elektronen-Atome	116

1.5.8.1	Die Elemente der p-Gruppen	117
1.5.8.2	Die Elemente der d-Gruppen	122
1.5.9	Energiestruktur und Spektren positiver Ionen	122
1.5.10	Negative Ionen	123
1.5.11	Energiestruktur der inneren Schalen: Röntgenspektren, Auger-Effekt und Coster-Kronig-Übergänge	125
1.5.12	Röntgenbremsstrahlung	139
1.6	Atome in äußeren Feldern	145
1.6.1	Zeeman-Effekt – Atome in Magnetfeldern	145
1.6.1.1	Normaler Zeeman-Effekt: Lorentz-Triplets	145
1.6.1.2	Anomaler Zeeman-Effekt als allgemeiner Fall und der Landé'scher g-Faktor	148
1.6.1.3	Quadratischer Zeeman-Effekt, Diamagnetismus und Landau-Bereiche	158
1.6.2	Stark-Effekt – Atome in elektrischen Feldern	167
1.6.3	Lichtpolarisation, Photonenspin und -helicität	178
1.7	Experimentelle Methoden und Anwendungen der Atomspektroskopie	181
1.7.1	Atomare Targets und Strahlen	182
1.7.1.1	Atomare Gaszellen und Atomstrahlen	182
1.7.1.2	Ionenstrahlen, Ionen- und Elektronenfallen, gekühlte Atomtargets („kalte Atome“) und Bose-Einstein-Kondensation (BEK)	188
1.7.2	Die Breite und Linienform atomarer Spektrallinien	195
1.7.2.1	Die natürliche Linienbreite – Lorentz-Linienform	196
1.7.2.2	Die Stoßverbreiterung der Spektrallinien	198
1.7.2.3	Die Doppler-Verbreiterung	198
1.7.2.4	Das Voigt-Profil	200
1.7.2.5	Sättigungseffekt und Selbstumkehr der Spektrallinien	201
1.7.3	Hochfrequenz- und Mikrowellenspektroskopie	203
1.7.3.1	Elektrische und magnetische Dipolübergänge	203
1.7.3.2	Die magnetische Atomstrahl-Resonanzmethode nach Rabi	207
1.7.3.3	Der Wasserstoffmaser und die Hyperfeinstruktur des H-Atoms	211
1.7.3.4	Der g-Faktor freier Elektronen und Positronen	214
1.7.4	Optische und Lasermethoden	216
1.7.4.1	Doppler-freie Ein- und Zwei-Photonen-Laserspektroskopie	217
1.7.4.2	Hochfrequenz- und Mikrowellen-Spektroskopie angeregter Atome, Lamb-Shift-Experimente	221
1.7.4.3	Optische Doppelresonanztechnik	224
1.7.4.4	Hanle-Effekt-, Level-Crossing- und Anticrossing-Spektroskopie	232
1.7.4.5	Spektroskopie mit schnellen atomaren Teilchen und Anregung durch Folien (Beam-Foil- und Fast-Beam-Spektroskopie)	242
1.7.4.6	Spektroskopie mit der Synchrotronstrahlung	243
1.7.4.7	Metastabile Zustände	249
1.8	Exotische Atome	260
1.9	Rydberg-Atome	265
1.10	Atomare Stoßprozesse	267
1.10.1	Klassifizierung atomarer Stoßprozesse	267
1.10.2	Totaler und differentieller Wirkungsquerschnitt	270
1.10.3	Photoionisation der Atome	271
1.10.3.1	Experimentelle Methoden zur Messung von Photoionisationsquerschnitten	272
1.10.3.2	Resultate für totale Wirkungsquerschnitte	279

1.10.3.3	Spin-Bahn-Wechselwirkung und Fano-Effekt	282
1.10.3.4	Photonionisation mit polarisierten Atomen	286
1.10.3.5	Doppelphotoionisation	290
1.10.4	Stoßprozesse zwischen Elektronen (Positronen) und Atomen	293
1.10.4.1	Partialwellenanalyse und Ramsauer-Townsend-Effekt	295
1.10.4.2	Resonanzstrukturen	301
1.10.4.3	Koinzidenzexperimente	312
1.10.4.4	Spineffekte in der Elektron-Atom-Streuung	328
1.10.5	Ion-Atom- und Atom-Atom-Stoßprozesse	341
1.10.5.1	Stoßparameter-Darstellung in klassischer Näherung	341
1.10.5.2	Quasi-Molekülbildung	342
1.10.5.3	Potentialstreuung und quantenmechanische Struktureffekte	348
1.10.5.4	Koinzidenz- und Spinexperimente	351
1.10.5.5	Antiproton-Atom-Stoßprozesse	356

Einführende Bemerkungen zu den Kapiteln 2 und 3: Moleküle	371
---	-----

2 Moleküle – Bindungen und Reaktionen

Nikolaus Risch

2.1	Chemische Bindungen	373
2.1.1	Chemische Formeln	373
2.1.2	Die Periodizität chemischer Eigenschaften	374
2.1.3	Metalle	377
2.1.4	Ionenbindung	378
2.1.5	Kovalente Bindung	379
2.2	Reaktionsdynamik	384
2.2.1	Chemisches Gleichgewicht	384
2.2.2	Kinetik, Katalyse	386
2.2.3	Säure-Base-Reaktionen	389
2.2.4	Redoxreaktionen	390
2.3	Synthese	391
2.3.1	Reaktionsmöglichkeiten und Mechanismen	392
2.3.2	Stereochemie	396
2.3.3	Strukturaufklärung	401
2.3.4	Beispiele interessanter Strukturen	402

3 Moleküle – Spektroskopie und Strukturen

Manfred Fink

3.1	Einleitung	405
3.2	Spektroskopie an Molekülen im elektronischen Grundzustand	415
3.2.1	Kernparamagnetische Resonanz (NMR)	416
3.2.1.1	Einleitung	416
3.2.1.2	Absorption und Emission	418
3.2.1.3	Die Bloch'schen Gleichungen	421
3.2.1.4	Das NMR-Messverfahren	423
3.2.1.5	Molekulare Strukturen und NMR	431

3.2.1.6	NMR-Spektroskopie in der Medizin	450
3.2.2	Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie (ESR)	453
3.2.2.1	Definition und Messverfahren	453
3.2.2.2	Hyperfeinstruktur-Kopplungen	454
3.2.2.3	ESR in Übergangsmetallverbindungen	456
3.2.2.4	ENDOR	458
3.2.3	Mikrowellen-Spektroskopie	459
3.2.3.1	Einleitung und Definitionen	459
3.2.3.2	Lineare Moleküle	460
3.2.3.3	Nichtlineare Moleküle	462
3.2.3.4	Die Mikrowellen-Messmethode	468
3.2.3.5	Anwendungen der Mikrowellenspektroskopie	471
3.2.4	Infrarotspektroskopie	475
3.2.4.1	Einleitung	475
3.2.4.2	Symmetrien in polyatomaren Molekülen	479
3.2.4.3	Infrarotspektrometer	482
3.2.4.4	Auswertung der Infrarotspektren	485
3.2.4.5	Der CO ₂ -Laser	489
3.2.4.6	Infrarote Laserspektroskopie	490
3.2.5	Raman-Spektroskopie	492
3.2.5.1	Einleitung	492
3.2.5.2	Raman-Spektrometer	499
3.2.5.3	Raman-Spektren	501
3.2.5.4	Resonanz-Raman-Spektroskopie	511
3.2.5.5	Kohärente Anti-Stokes-Raman-Spektroskopie (CARS)	516
3.2.6	Multiphotonen-IR-Anregungen	522
3.2.6.1	Einleitung	522
3.2.6.2	Messungen im Quasikontinuum	523
3.2.6.3	Modellrechnungen von Vielquantenanregungen	524
3.3	Strukturen von Molekülen im elektronischen Grundzustand	526
3.3.1	Hochenergetische Elektronenbeugung	528
3.3.2	Niederenergetische Elektronenstreuung	540
3.3.2.1	Einleitung	540
3.3.2.2	Elastische Elektronenstreuung an orientierten Molekülen	540
3.3.2.3	Elastische Elektronenstreuung an statistisch orientierten Molekülen	548
3.3.2.4	Inelastische Elektronenstreuung innerhalb des elektronischen Grundzustandes	558
3.3.2.5	Theorie zur Elektron-Molekül-Streuung	561
3.3.3	Röntgenstreuung von Molekülen in der Gasphase	567
3.3.3.1	Einleitung	567
3.3.3.2	Messmethode und Ergebnisse	569
3.3.4	Holographie an Molekülen	572
3.4	Moleküle im angeregten elektronischen Zustand	573
3.4.1	Das Born-Oppenheimer-Theorem	573
3.4.2	Klassifikation und Termsymbole von elektronisch angeregten Molekülzuständen	576
3.4.3	Orbitale für zweiatomige Moleküle	584
3.4.3.1	Homonuklearer Fall	584
3.4.3.2	Molekülorbitale zweiatomiger, heteronuklearer Moleküle	588
3.4.4	Auswahlregeln und Intensitäten	591
3.4.4.1	Der elektronische Beitrag	591

3.4.4.2	Schwingungsstruktur eines elektronischen Zustandes	593
3.4.4.3	Rotationsstruktur eines elektronischen Zustandes	599
3.4.5	Unelastische Elektronenstreuung	604
3.4.5.1	Vergleich von optischer Anregung und Elektronenstoßanregung	604
3.4.5.2	Oszillatorenstärken, Bethe-Oberflächen und Summenregeln	605
3.4.5.3	Experimentelle unelastische Wirkungsquerschnitte	608
3.4.5.4	EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure)	612
3.5	Moleküle von physikalischem Interesse – Beispiele	614
3.5.1	Myonische Moleküle: $(d\mu)_2$	614
3.5.1.1	Myonischer Wasserstoff	614
3.5.1.2	Myonenkatalysierte Fusion	616
3.5.2	Die metallische Mehrfachbindung von Übergangsmetallen	621
3.5.2.1	Einleitung und Überblick	621
3.5.2.2	Der ultrakurze Cr–Cr-Abstand	624
3.5.2.3	Die Photoelektronenspektren von Molekülen mit Metallvielfachbindungen	626
3.5.3	Van-der-Waals-Moleküle	631
3.5.3.1	Herstellung und Nachweis	631
3.5.3.2	Eigenschaften von van-der-Waals-Molekülen	636
3.5.3.3	Strukturen und Molekülorbitale	640
3.5.3.4	Die Rolle der van-der-Waals-Moleküle in der Gasphase	643
3.5.4	Buckminsterfullerene	646
3.5.4.1	Historische Einleitung	646
3.5.4.2	Herstellung von Fullerenen	647
3.5.4.3	Spektren der Fullerene im Grundzustand	648
3.5.4.4	Die elektronischen Zustände	652
3.5.4.5	Winkelaufgelöste Photoelektronenspektren	654
3.5.4.6	Endohedrale Fullerene	656

4 Atomkerne

Klaus-Peter Lieb

4.1	Einleitung	663
4.1.1	Wovon handelt die Kernphysik?	663
4.1.2	Kurzer Abriss der historischen Entwicklung	666
4.2	Allgemeine Eigenschaften von Atomkernen	670
4.2.1	Die Kernladung	671
4.2.2	Kernmassen und Bindungsenergien	676
4.2.2.1	Definitionen	676
4.2.2.2	Massenspektrometer und Massenseparatoren	678
4.2.2.3	Messung von Separationsenergien und Q -Werten – Die Masse des Neutrons	682
4.2.2.4	Systematik der Bindungsenergien	686
4.2.3	Kernradien, Verteilung der Nukleonen im Kern	687
4.2.3.1	Die Nukleonenverteilung im Kern	687
4.2.3.2	Die Ladungsverteilung im Kern	691
4.2.3.3	Elektrische Quadrupolmomente	706
4.2.4	Kernspin und magnetisches Moment	706
4.3	Kernmodelle	709
4.3.1	Das Tröpfchenmodell	710
4.3.2	Das Kollektivmodell	712

4.3.2.1	Das Vibrationsmodell	712
4.3.2.2	Rotationsbanden in gg-Kernen	717
4.3.3	Das Einteilchen-Schalenmodell	723
4.3.3.1	Magische Zahlen	723
4.3.3.2	Das Schalenmodell	724
4.3.3.3	Konsequenzen des Schalenmodells – Restwechselwirkungen	729
4.3.4	Das Fermigas-Modell	734
4.3.5	Kopplung von kollektiver und Einteilchen-Bewegung	738
4.3.5.1	Schwache Kopplung	739
4.3.5.2	Das Nilsson-Modell	740
4.3.5.3	Coriolis-Entkopplung	742
4.3.6	Elementare magnetische Anregungen	744
4.4	Die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung	748
4.4.1	Das Deuteron	749
4.4.2	Nukleon-Nukleon-Streuung	751
4.4.2.1	Proton-Neutron-Streuung	752
4.4.2.2	Proton-Proton-Streuung	757
4.4.3	Der Isospin	761
4.4.4	Phänomenologische Nukleon-Nukleon-Potentiale	765
4.4.5	Mesonen und/oder Quarks in Kernen?	768
4.4.5.1	Hadronenresonanzen	769
4.4.5.2	Das naive Quarkmodell der Hadronen	771
4.5	Kernzerfälle	774
4.5.1	Nuklidkarte – Zerfallsgesetz – Erhaltungssätze	774
4.5.2	Der Alphazerfall	779
4.5.2.1	Einige wichtige Beobachtungen	779
4.5.2.2	Der Gamow-Faktor	781
4.5.2.3	Neuere Ergebnisse	783
4.5.3	Die Kernspaltung	786
4.5.3.1	Der Spaltprozess	786
4.5.3.2	Energiebilanz – Spaltbarriere	787
4.5.3.3	Spaltreaktoren	790
4.5.4	Elektromagnetische Strahlung des Kerns	794
4.5.4.1	Auswahlregeln	794
4.5.4.2	Einteilchenbreiten	795
4.5.4.3	Messung nuklearer Lebensdauern	798
4.5.4.4	Kernresonanzabsorption und Mößbauer-Effekt	802
4.5.4.5	Elektronen-Konversion	805
4.5.5	Betazerfälle	806
4.5.5.1	Neutrinos	807
4.5.5.2	Die Form des β -Spektrums	809
4.5.5.3	Die β -Zerfallswahrscheinlichkeit	811
4.5.5.4	Paritätsverletzung beim β -Zerfall	813
4.5.5.5	Die Helizität des Neutrinos	816
4.5.6	Radiodatierung	818

5 Elementarteilchen

Rolf-Dieter Heuer, Peter Schmüser

5.1	Historische Entwicklung und grundlegende Konzepte der Elementarteilchenphysik	831
5.1.1	Elementarteilchen in der Atom- und Kernphysik	831
5.1.2	Erste Versuche zur Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen ...	832
5.1.3	Unser heutiges Bild der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen ...	835
5.2	Beschleuniger und Teilchendetektoren	840
5.2.1	Grundzüge der Beschleunigerphysik	840
5.2.1.1	Strahloptik und Betatronschwingungen	840
5.2.1.2	Beschleunigung und Synchrotronschwingungen	844
5.2.1.3	Synchrotronstrahlung	846
5.2.1.4	Teilchenquellen und Vorbeschleuniger	848
5.2.2	Kreisförmige und lineare Collider	849
5.2.3	Wechselwirkungen von Teilchen und γ -Strahlung mit Materie	850
5.2.3.1	Ionisation	851
5.2.3.2	Bremsstrahlung	853
5.2.3.3	Tscherenkow- und Übergangsstrahlung	854
5.2.3.4	Elektromagnetische Schauer	855
5.2.3.5	Hadronische Schauer	856
5.2.4	Teilchendetektoren	856
5.2.4.1	Aufgaben der Detektorkomponenten	856
5.2.4.2	Szintillationszähler	856
5.2.4.3	Blasenkammer	857
5.2.4.4	Proportional- und Driftkammern	857
5.2.4.5	Tscherenkow-Zähler	859
5.2.4.6	Schauerzähler und Kalorimeter	860
5.2.4.7	Mikrovertexdetektoren	862
5.2.4.8	Ein moderner Speicherringdetektor	863
5.3	Wichtige Eigenschaften der Elementarteilchen	863
5.3.1	Teilchen mit starken Zerfällen	864
5.3.2	Dirac-Gleichung und Antiteilchen	869
5.3.3	Masse und mittlere Lebensdauer	872
5.3.4	Spin und magnetisches Moment	875
5.3.5	Ladungsartige Quantenzahlen	878
5.3.6	Parität	880
5.3.7	Ladungskonjugation, CP und CPT	883
5.4	Quark-Modell	884
5.4.1	Einordnung der Hadronen in Isospin- und SU(3)-Multipletts	884
5.4.2	Die Neuen Teilchen	887
5.4.3	Experimentelle und theoretische Argumente für die Existenz von Quarks ..	890
5.4.3.1	Tief inelastische Elektron-Nukleon-Streuung	890
5.4.3.2	Hadronen-Jets in der Elektron-Positron-Vernichtung	893
5.4.3.3	Charmonium und Bottomium	894
5.4.4	Farbladungen und Gluonen	896
5.4.5	Entdeckung der Gluonen	898
5.5	Elementarprozesse und Teilchenreaktionen	901
5.5.1	Elementare Prozesse und Feynman-Graphen in der QED	901

5.5.2	Schwache Wechselwirkung	907
5.6	Vereinigung der Wechselwirkungen	911
5.6.1	Experimentelle Grundlagen der vereinheitlichten elektroschwachen Wechselwirkung	911
5.6.2	Die Eichtheorie der elektromagnetischen Wechselwirkung	914
5.6.3	Das Standard-Modell der elektroschwachen Wechselwirkung	917
5.6.4	Die Quantenchromodynamik als Eichtheorie	925
5.6.5	Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen	927
5.6.6	Große Vereinheitlichung	927
5.6.7	Supersymmetrie	928
5.7	Zusammenfassung und Ausblick	928
Anhang	Relativistische Kinematik und Einheiten	929
Tabelle der Fundamentalkonstanten		935
Register		939