

Physik IV: Atome Moleküle Kerne*

Prof. Dr. Christopher Wiebusch
III. Physikalisches Institut B

Vorlesung SS 2024
Mi 10:30-12:00, Hörsaal H-03 (Vorlesung),
Fr 10:30 12:00, H-03 (Vorlesung),
Übungen: Montags

Elearning: <https://moodle.rwth-aachen.de/course/view.php?id=39600>



*Version vom 10. April 2024

Empfohlene Lehrbücher

- [1] Claude Amsler. *Kern-und Teilchenphysik*, volume 2885. vdf Hochschulverlag AG, 2007.
- [2] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer-Verlag, 2016.
- [3] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen-und Astrophysik*. Springer-Verlag, 2017.
- [4] Hermann Haken and Hans C Wolf. *Atom-und quantenphysik*. 8., aktual. u. erw. aufl, 2004.
- [5] Joachim Heintze and Peter Bock. *Lehrbuch zur Experimentalphysik Band 5: Quantenphysik Wellen, Teilchen und Atome*. Springer.
- [6] Theo Mayer-Kuckuk. *Atomphysik: eine einföhrung*. 1977.
- [7] Theo Mayer-Kuckuk. *Kernphysik: eine einföhrung*. 2002.
- [8] Gerd Otter and Raimund Honecker. *Atome, Moleküle, Kerne 2.: Molekülphysik und Kernphysik.*, volume 2. Springer-Verlag, 1996.
- [9] Gerd Otter and Raimund Honecker. *Atome Moleküle Kerne: Band I Atomphysik*. Springer-Verlag, 2013.
- [10] Gerhard Otter and Raimund Honecker. *Atome Moleküle Kerne: Band III Atome: Fragen und Antworten*. 2013.

Dieses neue Skript basiert auf den Skripten der Vorlesungen SS16 and SS19, die mit Hilfe von Benedikt Kalthoff, Sarah Meuter und Patrick Stöcker sowie vieler studentischer Rückmeldungen erstellt wurden. In dieser neuen Version wurden bekannte Fehler korrigiert. Auch diese neue Version wird noch Fehler enthalten. Daher sind uns alle Korrektur-Hinweise sehr willkommen.

Dieses Skript enthält mit Copyright geschützte Materialien. Die Verwendung ist nur im Rahmen der Vorlesung durch die registrierten Teilnehmer der Lehrveranstaltung erlaubt. Die Verbreitung und Weitergabe an Dritte ist nicht erlaubt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die atomare Welt	3
1.1	Hinweise auf Atome	3
1.2	Teilchen-Welle Dualismus	15
1.2.1	Quantisierung des Lichts: das Photon	15
1.2.2	Materiewellen	20
1.2.3	Die Unschärferelation	24
1.3	Das Bohrsche Atommodell	28
1.4	Die Schrödinger Gleichung	33
1.4.1	Heuristische Herleitung	34
1.4.2	Anwendungsbeispiele	36
1.4.3	Observablen und Operatoren in der Quantenmechanik	42
2	Das Wasserstoff Atom	44
2.1	Lösung der Schrödinger Gleichung	44
2.2	Drehimpuls und Spin	56
2.2.1	Bahndrehimpuls und Entartung	56
2.2.2	Magnetisches Moment	57
2.2.3	Der Elektronenspin	58
2.2.4	Der Spin des Photons	64
2.2.5	Addition von Spin und Drehimpulsen	65
3	Äußere Elektromagnetische Felder	68
3.1	Der normale Zeeman Effekt	68
3.2	Der anomale Zeeman Effekt & Paschen-Back Effekt	69
3.3	Der Stark Effekt	75
4	Interne elektromagnetische Felder	78
4.1	Spin-Bahnkopplung und Feinstruktur des H-Atoms	78
4.2	Relativistische Korrekturen	82
4.3	Lamb-Shift und Hyperfeinstruktur	85
4.3.1	Lamb-shift	85
4.3.2	Hyperfeinstruktur	86
4.4	Zusammenfassung des Wasserstoffspektrums	92
5	Mehrelektronenatome	95
5.1	Grundzustands-Energie des He Atoms	95
5.2	Das Pauli Prinzip	97
5.3	Das Helium Spektrum	100
5.4	Vielelektronenatome und das Periodensystem der Elemente	102
5.5	Spektren von Vielelektronatomen	111
5.6	Exotische Atome	116
5.6.1	Positronium	116
5.6.2	Myonische Atome	117
5.6.3	Antiwasserstoff	118
6	Atomübergänge und Strahlung	120
6.1	Übergangswahrscheinlichkeit	120
6.2	Auswahlregeln	123
6.3	Lebensdauer und Linienschärfe	130
6.3.1	Natürliche Linienbreite	130

6.3.2	Messung von Einsteinkoeffizienten	131
6.3.3	Linienform der Spektrallinien	132
6.3.4	Druckverbreiterung	134
6.3.5	Dopplerverbreiterung	135
7	Röntgenstrahlung	140
7.1	Erzeugung und Emissionsspektrum	140
7.2	Streuung und Absorption von Röntgenstrahlung	143
7.2.1	Wechselwirkungen von Photonen	144
7.2.2	Der Wirkungsquerschnitt	145
7.2.3	Abschwächung und Absorptionsspektren von Röntgenstrahlung	150
8	Laser	154
8.1	Grundlagen	154
8.2	Laser-Typen und Anwendungen	165
9	Chemische Bindungen und Moleküle	185
9.1	Molekülorbitale	185
9.1.1	Das H_2^+ Ion	185
9.1.2	Mehrelektronen Molekülorbitale	192
9.2	Chemische Bindungen	199
9.3	Molekülspektren	205
10	Struktur von Atomkernen	220
10.1	Das Rutherfordsche Streuexperiment	220
10.2	Grundlagen der Streutheorie	224
10.3	Die Rutherfordsche Streuformel	227
10.4	Größe und Struktur von Atomkernen	233
11	Kernmodelle	245
11.1	Kernkräfte	245
11.2	Das Fermi-Gas Modell	248
11.3	Kernbindungsenergie und Massendefekt	251
11.4	Das Tröpfchenmodell	253
11.5	Das Schalenmodell des Kerns	258
12	Radioaktivität	271
12.1	Radioaktive Zerfälle	271
12.2	Strahlenschutz	278
12.3	Modell des α Zerfalls	282
12.4	Der β Zerfall, das Neutrino und die schwache Wechselwirkung	284
13	Anwendungen der Kernphysik	298
13.1	Künstliche Kernreaktionen	298
13.2	Künstliche Kernspaltung	300
13.3	Kernfusion	304
13.4	Kernresonanzabsorption	304

Vorbemerkungen

Die moderne Physik beschreibt die Natur auf einem riesigen Bereich an Größenskalen von 10^{-19} m, der feinsten Auflösung für die Größe von Elementarteilchen bis zu 10^{27} m $\approx 100 \cdot 10^9$ la, der Größe des heute sichtbaren Universums, siehe Abbildung 0.1.

Größenskalen der modernen Physik

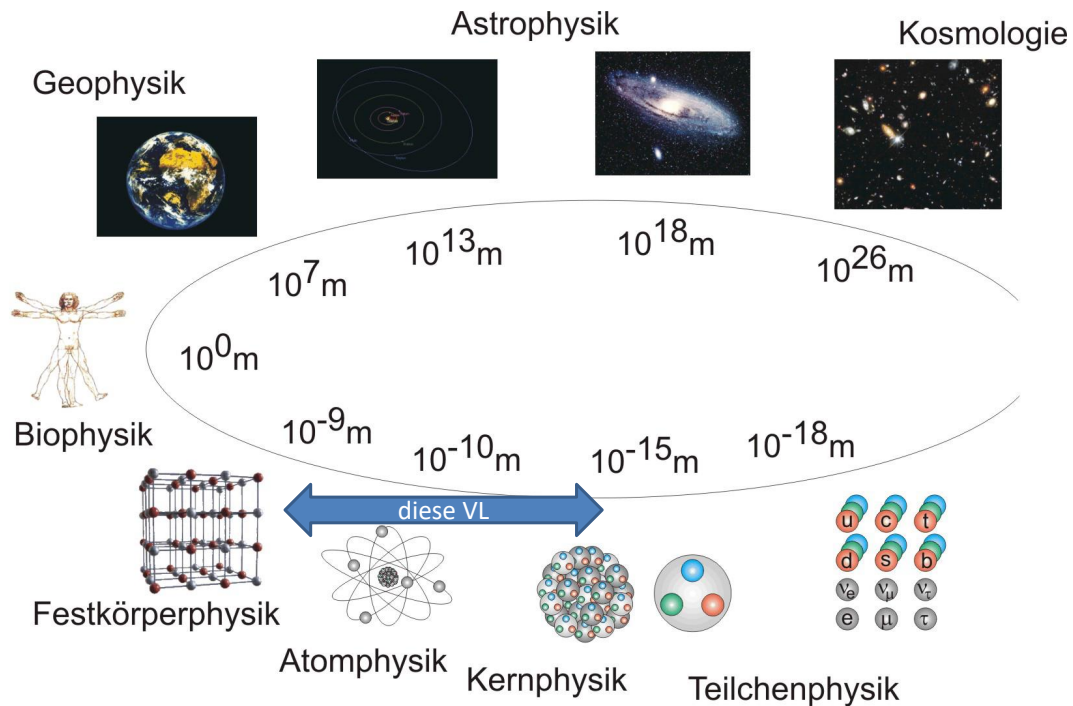


Abbildung 0.1: Bereiche moderner Physik

Über die Quantenphysik



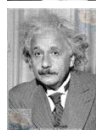
Niels Bohr:

"Anyone who is not shocked by the quantum theory has not understood it."



Erwin Schrödinger:

"Ich mag sie nicht, und es tut mir leid, jemals damit zu tun gehabt zu haben."



Albert Einstein:

"Ich kann [...] nicht ernsthaft daran glauben, weil die Theorie mit dem Grundsatz unvereinbar ist, dass die Physik eine Wirklichkeit in Zeit und Raum darstellen soll, ohne spukhafte Fernwirkung."



Richard Feynman:

"I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics."

Abbildung 0.2: Schockierende Ansichten zur Quantenmechanik

Die klassische Physik beschreibt den Bereich von etwa $1 \mu\text{m}$ bis 10^6 la $\approx 10^{22}$ m. Auf größeren Skalen wird das Universum durch die Allgemeine Relativität (ART) beschrieben (Physik 5) auf kleineren Skalen gilt die Quantenmechanik. Bei letzteren werden kontinuierliche Größen der klassischen Physik quantisiert. Dies sind

zunächst Ladungen und Bausteine der Materie (Atome \rightarrow Elementarteilchen). Wir werden jedoch in der Vorlesung sehen, dass auch Observablen wie Energie, Impuls und Drehimpulse quantisiert werden. Die Konzepte der Quantenmechanik sind mit klassischen Begriffen oft schwer zu fassen, was durch die Zitate berühmter Physiker in Abbildung 0.2 zum Ausdruck kommt. Die äußerst erfolgreiche Beschreibung physikalischer Phänomene rechtfertigt jedoch die Konzepte.

In der Vorlesung Physik 4 werden wir in die atomare Physik vorstoßen und dafür neue theoretische Methoden erlernen und anwenden müssen. Der Größenbereich den wir in der Vorlesung betrachten reicht von Molekülen (10^{-8} m) über Atome (10^{-10} m) bis zu Atomkernen (10^{-15} m).