

Inhaltsverzeichnis

1	Zur Einführung:	
	Atome, und die zwei ersten wirklichen Elementarteilchen	1
	Überblick	1
1.1	Elementarteilchen: Die Ausgangslage um 1900	2
1.1.1	Gibt es überhaupt Atome?	2
1.1.2	Elektron und Photon: Die ersten zwei richtigen Elementarteilchen	14
1.2	Überblick über den weiteren Inhalt	18
1.3	Stichworte zur Geschichte und Bedeutung der Kern- und Elementarteilchenphysik	19
1.3.1	Physikalische Entdeckungen	19
1.3.2	Technische Entwicklungen	21
1.3.3	Militärische Entwicklungen	21
1.3.4	Politisch wirksame Anstöße	21
2	Radioaktive Strahlen und der Weg ins Innere der Atome	23
	Überblick	23
2.1	Erste Experimente mit Radioaktivität	25
2.1.1	Fotoplatte mit Uransalzen: Henri Becquerel 1896	25
2.1.2	Nebelkammer	28
2.2	Abbremsung von α -Teilchen: Niels Bohr 1913	31
2.2.1	Versuch der Deutung der Nebelkammer-Spuren mit klassischer Mechanik	31
2.2.2	Bohrsche Theorie der Abbremsung von α -Teilchen	35
2.2.3	Untere und obere Grenze für den Energieverlust: Formeln von Bohr und Bethe/Bloch für das Bremsvermögen	38
2.3	α -Teilchen: Sonden zur Erkundung des Atominneren	42
3	Entdeckung des Atomkerns mit den Mitteln der klassischen Physik . .	47
	Überblick	47
3.1	Das Rutherford-Experiment	49

3.1.1	Der Vorversuch	49
3.1.2	Streuung von α -Teilchen an Goldatomen	50
3.2	Rutherfordstreuung: Klassische Theorie	52
3.2.1	Thomson-Modell: Keine Erklärung für große Ablenkwinkel	52
3.2.2	Potentialstreuung: Klassische Trajektorien im Coulombfeld	53
3.2.3	Wirkungsquerschnitt	56
3.2.4	Experimentelle Überprüfung der Rutherford-Formel	59
3.2.5	Rutherfords Atommodell	61
3.2.6	Deutung der Rutherford-Formel	62
3.3	Aktuelle Anwendung: <i>Rutherford Backscattering Spectroscopy</i>	62
3.4	Anomale Rutherfordstreuung, Kernradius	65
3.4.1	Wie „punktförmig“ ist der Atomkern?	65
3.4.2	Kernradius	66
3.5	Zusammenfassung: Aufbau der Materie (Zwischenstand)	70
3.5.1	Aufbau der Atome aus Kern und Hülle	70
3.5.2	Vorkommen der Elemente	71
4	Masse und Bindungsenergie der Kerne, Entdeckung von Proton und Neutron	73
	Überblick	73
4.1	Masse der Atomkerne	76
4.1.1	Entwicklung des Kenntnisstands bis etwa 1910	76
4.1.2	Messung der Massen einzelner Atome	78
4.1.3	Isotope	82
4.1.4	Das Proton und Rutherfords Proton-Elektron-Modell des Kerns	83
4.1.5	Das Neutron und das Proton-Neutron-Modell des Kerns	88
4.1.6	Präzisionsmessung und Massendefekt	92
4.1.7	Moderne Anwendungen und Messmethoden der Kernmassen	93
4.2	Energie-Inhalt der Atomkerne: Tröpfchen-Modell	97
4.2.1	Deutung des Massendefekts als Energieabgabe	97
4.2.2	Die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon	98
4.2.3	Tröpfchen-Modell: Schrittweise Entwicklung	104
4.2.4	Tröpfchen-Modell: Physikalische Diskussion	110
4.3	Ausblick	116
5	Stoßprozesse quantenmechanisch	119
	Überblick	119
5.1	Stoß in der Quantenmechanik	123
5.2	Quantenmechanische Bewegungsgleichung/Weg zur Bornschen Näherung	125
5.3	Differentieller Wirkungsquerschnitt	127
5.4	Coulomb-Streuung in Bornscher Näherung	128
5.4.1	Berechnung von Streuamplitude und Wirkungsquerschnitt	128

5.4.2	Wellenmechanische Charakterisierung der Coulomb-Streuung	130
5.5	Mehrere Streuzentren: Die Intensitäten addieren oder die Amplituden?	132
5.5.1	Wann muss man die kohärente Überlagerung bilden?.....	132
5.5.2	Wann gilt Kohärente Summe = Inkohärente Summe?.....	132
5.5.3	Wann verschwindet der Interferenzterm?	133
5.5.4	Wann sind die Phasen der einzelnen Streuwellen gleichmäßig verteilt?	134
5.5.5	Zwischenergebnis: Rutherford-Modell bestätigt	136
5.6	Hofstadter-Streuung: Massen- und Ladungsverteilung im Kern	136
5.6.1	Coulomb-Streuung an ausgedehnter Ladungsverteilung	137
5.6.2	Die Form der Kerne	139
5.7	Ein quantenmechanischer Effekt: Kohärente Überlagerung der Streuamplituden von Projektil und Target.....	142
5.7.1	Abweichungen von der Rutherford-Formel bei Streuung identischer Teilchen	143
5.7.2	Interferenz von Projektil und Target	146
5.7.3	Destruktive Interferenz bei Fermionen	149
6	Physik der Radioaktiven Strahlen	155
	Überblick	155
6.1	Radioaktiver Zerfall, Zufallsprozesse, Quantensprünge	157
6.1.1	Das exponentielle Zerfallsgesetz und seine atomistische Deutung	157
6.1.2	Der metastabile Zustand und seine Lebensdauer: Die Goldene Regel	162
6.1.3	Messung von Halbwertszeiten und Gültigkeit des Zerfallsgesetzes	171
6.1.4	Zähler-Experimente: Der Beginn des digitalen Zeitalters ...	175
6.1.5	Zählstatistik: Poisson-Verteilung	177
6.2	Natürliche und zivilisatorische Quellen ionisierender Strahlung ...	182
6.2.1	Typen radioaktiver Emissionen und Quellen ionisierender Strahlung	182
6.2.2	Radioaktive Zerfallsreihe, radioaktives Gleichgewicht	185
6.3	α -Strahlung	186
6.3.1	Empirische Beziehung zwischen Übergangsrate und α -Energie	187
6.3.2	Tunneleffekt.....	188
6.4	γ -Strahlung	192
6.4.1	γ -Strahlen sind elektromagnetische Wellen	192
6.4.2	Exponentielle Abschwächung in Materie	196
6.4.3	Compton-Streuung	198
6.4.4	Photoeffekt.....	204
6.4.5	Paarerzeugung und Vernichtungsstrahlung.....	209

6.4.6	Erzeugung von Photonen: Spontane Emission	213
6.4.7	Beziehung zwischen Übergangsrate und γ -Energie	215
6.4.8	γ -Spektroskopie: Beispiel	222
6.5	β -Strahlung	226
6.5.1	β -Teilchen sind Elektronen	226
6.5.2	β -Teilchen werden im Emissionsakt neu erzeugt	228
6.5.3	β -Energie-Spektrum kontinuierlich: Energiesatz verletzt?	231
6.5.4	Beziehung zwischen Übergangsrate und β -Energie	232
6.5.5	Drehimpuls-Erhaltung verletzt?	233
6.5.6	Neutrino-Hypothese 1930	233
6.5.7	Fermi-Theorie des β -Zerfalls I: Form des kontinuierlichen Spektrums	234
6.5.8	Fermi-Theorie des β -Zerfalls II: Wechselwirkung mit Reichweite Null	239
6.5.9	β^+ -Radioaktivität	240
6.5.10	Elektronen-Einfang und zwei weit reichende Konsequenzen	241
6.5.11	Neutrino-Nachweis 1955	244
7	Struktur der Kerne: Spin, Parität, Momente, Anregungsformen, Modelle	249
	Überblick	249
7.1	Drehimpuls, Spin und Statistik	250
7.1.1	Drehimpuls von Elektron, Hülle, Kern, Atom, Molekül: Grundlagen	252
7.1.2	Spin $\frac{1}{2}$ und Pauli-Spinor	263
7.1.3	Der unanschauliche Drehimpuls in Beispielen	265
7.1.4	Proton: Spin $\frac{1}{2}$	268
7.1.5	Austauschsymmetrie und Statistik des Protons	276
7.1.6	Weitere Kernspins	278
7.2	Parität	280
7.3	Magnetisches Moment	283
7.3.1	Das magnetische Moment des Protons	285
7.3.2	Magnetische Momente anderer Kerne	287
7.3.3	Anwendung: Magnetische Kern-Resonanz (Prinzip)	290
7.3.4	Magnetische Kern-Resonanz (Beispiel)	294
7.4	Elektrische Momente	295
7.4.1	Elektrisches Dipolmoment?	295
7.4.2	Elektrische Quadrupolmomente	299
7.5	Kollektive Anregungsformen	304
7.5.1	Kollektive Schwingungen: Dipol-Riesenresonanz	305
7.5.2	Kollektive Rotation	309
7.5.3	Kollektive Schwingungen: Oberflächen-Vibration	314
7.6	Einzelteilchen-Modell	317
7.6.1	Evidenz für abgeschlossene Schalen bei Kernen: Die Magischen Zahlen	320

7.6.2	Schalenmodell mit Oszillator-Potential	321
7.6.3	Schalen-Modell mit Spin-Bahn-Wechselwirkung	326
7.6.4	Zur Begründung des Einzel-Teilchen-Modells	329
8	Nukleare Energie, Entwicklung der Sterne, Entstehung der Elemente	333
	Überblick	333
8.1	Größenordnung der Kernenergie	334
8.1.1	Ist die Sonne radioaktiv? Eine Anekdote	334
8.1.2	Größenordnungen und Bedeutung von Energie-Umsätzen ..	336
8.2	Kern-Spaltung	338
8.2.1	Physikalische Grundlagen	338
8.2.2	Entdeckungsgeschichte der induzierten Spaltung	344
8.2.3	Technische Umsetzungen: Reaktor und Bombe	346
8.2.4	Geregelte Kettenreaktion	351
8.2.5	Aufbau eines Kraftwerks und Nukleare Stromwirtschaft ...	353
8.2.6	Die „Atom“-Bombe	356
8.3	Kern-Fusion	358
8.3.1	Physikalische Grundlagen	358
8.3.2	Technische Nutzung	362
8.4	Stern-Energie, Stern-Entwicklung	364
8.4.1	<i>pp</i> -Fusion	364
8.4.2	Katalytischer CNO-Zyklus	367
8.5	Entstehung der chemischen Elemente aus Wasserstoff	369
8.5.1	Häufigkeit der Elemente und Nuklide	369
8.5.2	Entstehung von ^{12}C aus ^4He	371
8.5.3	Stern-Entwicklung und Entstehung der Elemente	373
9	Photon und Elektron – was Elementarteilchen sind und wie sie wechselwirken: Die Quantenelektrodynamik	379
	Überblick	379
9.1	Welle-Teilchen-Dualismus	383
9.2	Das Photon: Ein Teilchen, das erzeugt und vernichtet werden kann	384
9.2.1	Vom Wellenquant zum Teilchen	384
9.2.2	Vom Teilchen zum Feldquant	388
9.3	Das Elektron (und andere Elementarteilchen): Erste Merksätze ...	389
9.3.1	Alle Elementarteilchen können erzeugt und vernichtet werden	389
9.3.2	Zu Teilchen gibt es Antiteilchen	389
9.3.3	Elementarteilchen der gleichen Sorte sind vollständig ununterscheidbar	390
9.4	Zweite Quantisierung/Anfänge der Quanten-Feldtheorie	397
9.4.1	Freie Teilchen im Vakuum	397
9.4.2	Der Hamilton-Operator für freie Teilchen	398
9.4.3	Mögliche Prozesse und der Hamilton-Operator mit Wechselwirkungen	399

9.5	Der grundlegende Prozess der elektromagnetischen Wechselwirkung	402
9.6	Virtuelle Photonen	403
9.7	Feynman-Graphen	411
9.7.1	Elementare Prozesse	411
9.7.2	Elektron-Elektron-Wechselwirkung (virtuelles Photon beteiligt)	412
9.7.3	Elektron-Photon-Wechselwirkung (virtuelles Elektron beteiligt)	413
9.7.4	Photonen-Emission (virtuelles Elektron und virtuelles Photon beteiligt)	413
9.7.5	Feynman-Regeln	414
9.7.6	Antiteilchen	416
9.7.7	Renormierung	420
9.8	Deutung der Austauschwechselwirkung	423
10	Das Elektron als Fermion und Lepton	425
	Überblick	425
10.1	Spin und Magnetisches Moment: Die frühen Befunde	427
10.2	Diracsche Elektronentheorie (1928)	429
10.2.1	Weg zur relativistischen Wellengleichung	429
10.2.2	Spin	431
10.2.3	Negative Energie?	434
10.2.4	Anomales magnetisches Moment	435
10.2.5	Wie die Dirac-Gleichung Lorentz-invariant wird	437
10.2.6	Anti-Teilchen	442
10.2.7	Chiralität	447
10.2.8	Spin, Statistik, Symmetrie	449
10.3	Die weiteren Leptonen	454
10.3.1	Myonen	454
10.3.2	Verschiedene Leptonenladung von Myon und Elektron	462
10.3.3	Die dritte Leptonen-Familie	464
10.4	Neutrinos	469
10.4.1	Neutrino-Reaktionen	469
10.4.2	Neutrinos von der Sonne und der Supernova	471
10.4.3	Dirac-Teilchen oder doch nicht?	473
10.4.4	Neutrino-Oszillation	474
11	Teilchenzoo der Hadronen	479
	Überblick	479
11.1	Pionen	482
11.1.1	Vorhersage und Entdeckung der geladenen Pionen	482
11.1.2	Erzeugung von Pionen	487
11.1.3	Schwacher Zerfall, Masse und Lebensdauer der geladenen Pionen	490

- 11.1.4 Neutrales Pion: Elektromagnetische Produktion und Zerfall 494
- 11.1.5 Spin der Pionen 497
- 11.1.6 Parität der Pionen 499
- 11.1.7 Pionen als Sonden: Resonanzen
 - in der Pion-Nukleon-Streuung 502
- 11.2 Ordnung im Teilchenzoo (1): Symmetrien und Isospin 506
 - 11.2.1 Symmetrien der Wechselwirkung 506
 - 11.2.2 Isospin 509
- 11.3 Ordnung im Teilchenzoo (2): „Seltsamkeit“ und Hierarchie 512
 - 11.3.1 Entdeckung „seltsamer“ Teilchen 512
 - 11.3.2 Charakterisierung und Hierarchie der Wechselwirkungen .. 514
 - 11.3.3 Physikalische Eigenschaft „Seltsamkeit“ 515
 - 11.3.4 Isospin, *strangeness*, und die SU(3)-Symmetrie 518
- 11.4 Antiprotonen 522
- 11.5 Die Instrumente: Beschleuniger und Detektoren 524
 - 11.5.1 Beschleunigerentwicklung – Ein kurzer Eindruck 525
 - 11.5.2 Detektoren – ein kurzer Überblick mit Beispielen 526
- 11.6 Ausgang aus dem Teilchenzoo 532

- 12 Schwache Wechselwirkung und gebrochene Symmetrien 535**
 - Überblick 535
 - 12.1 Frühgeschichte (bis 1956) 537
 - 12.2 Gebrochene Spiegelsymmetrien (I): Parität 538
 - 12.2.1 Raumspiegelung \hat{P} 538
 - 12.2.2 Paritätsinvarianz in der Quantenmechanik 541
 - 12.2.3 Bruch der Paritätsinvarianz 542
 - 12.2.4 Das Wu-Experiment: β^- -Strahlen werden bevorzugt
 entgegen der Spin-Richtung ausgesandt 543
 - 12.2.5 Polarisation von β -Strahlen und Neutrinos 545
 - 12.3 Gebrochene Spiegelsymmetrien (II): Ladungskonjugation 548
 - 12.3.1 Ladungskonjugation \hat{C} 548
 - 12.3.2 Heilung der Paritätsverletzung durch *CP*-Invarianz 550
 - 12.3.3 Strangeness-Oszillationen 554
 - 12.3.4 Brechung der *CP*-Invarianz 558
 - 12.4 Gebrochene Spiegelsymmetrien (III): Zeitumkehr 559
 - 12.4.1 Zeitumkehr \hat{T} 559
 - 12.4.2 Erhaltung von $\hat{C} \hat{P} \hat{T}$ 562
 - 12.5 Die Austauschteilchen *W*, *Z* 563
 - 12.5.1 Fermi-Wechselwirkung nicht renormierbar 563
 - 12.5.2 Konstruktion von Austauschteilchen als Eichbosonen 567
 - 12.5.3 Elektroschwache Wechselwirkung 571
 - 12.5.4 Experimenteller Nachweis der schweren Austauschbosonen 578

- 13 Quarks, Gluonen, Starke Wechselwirkung 583**
 - Überblick 583

13.1	Quarks	586
13.1.1	Die Hypothese	586
13.1.2	Gebrochene Elementarladung	588
13.1.3	Typische Prozesse mit Quarks	590
13.1.4	Anomale magnetische Momente der Nukleonen	592
13.1.5	Neuer Freiheitsgrad: Farbe	593
13.1.6	Auswahlregel: Nur weiße Teilchen reell	594
13.1.7	Aufbau der Hadronen aus Quarks	596
13.2	Quarks nachgewiesen?	599
13.2.1	Tief-inelastische Elektron-Proton-Streuung	600
13.2.2	Quarks elektromagnetisch erzeugt	606
13.2.3	Ein viertes Quark: <i>charm</i>	609
13.2.4	Charmonium und das Quark-Quark-Potential	611
13.3	Chromodynamik	614
13.3.1	Starke Wechselwirkung durch Austausch von Gluonen	614
13.3.2	Einschluss (<i>confinement</i>)	617
13.3.3	Sind Quarks noch Teilchen? Welche Masse haben sie denn?	622
13.3.4	Die Kernkräfte: Reichweite und näherungsweise Symmetrien	625
13.3.5	Asymptotische Freiheit	628
13.4	Schwere Quarks	630
14	Standard-Modell der Elementarteilchenphysik	631
	Überblick	631
14.1	Genauigkeitsrekord: Leptonen- <i>g</i> -Faktoren	636
14.2	Wie viele Familien von Leptonen?	641
14.3	Wie viele Familien von Quarks?	645
14.3.1	Die Einführung der 2. Familie	645
14.3.2	Die Einführung der 3. Familie	648
14.4	Quark-Lepton-Symmetrie	649
14.5	Rückweg nach oben	651
14.5.1	„Die Phänomene retten“	651
14.5.2	Die Materie	651
14.5.3	Die Prozesse	653
14.6	Offene Fragen	655
14.6.1	Higgs-Boson	655
14.6.2	Noch zu viele Parameter?	658
14.6.3	Seltene andere Materie?	660
15	Zwölf wesentliche Ergebnisse der Elementarteilchenphysik	663
	Überblick	663
15.1	Es gibt Elementarteilchen.	664
15.2	Es gibt nur wenige Grundtypen von Elementarteilchen.	666

15.3 Die punktförmigen Elementarteilchen können Drehimpuls haben ohne sich zu drehen, und magnetisch sein, ohne dass ein Strom fließt. 667

15.4 Elementarteilchen können erzeugt und vernichtet werden. 667

15.5 Zu Teilchen gibt es Antiteilchen. 668

15.6 Elementarteilchen sind (wenn von der gleichen Sorte) vollkommen ununterscheidbar. Für Fermionen gilt dazu noch ein absolutes gegenseitiges Ausschließungsprinzip. 669

15.7 Der Elementarakt der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Emittieren oder Absorbieren eines Photons. Auch das elektrostatische Potential entsteht so. 670

15.8 Elementarteilchen entfalten messbare Wirkungen auch aus „unphysikalischen“ Zuständen heraus, in denen sie selbst prinzipiell unbeobachtbar sind (*virtuelle Zustände*). 671

15.9 Jede der vier Grundkräfte der Natur kommt durch Austausch von Elementarteilchen in virtuellen Zuständen zustande (den *Austauschbosonen*). 672

15.10 Für die Wechselwirkungsprozesse gibt es eine exakte Bildersprache 673

15.11 Es gelten die vier Erhaltungssätze der klassischen Physik (für Energie, Impuls, Drehimpuls, elektrische Ladung). Jedoch sind die Spiegel-Symmetrien der klassischen Physik (Raum, Zeit, Ladungsvorzeichen) gebrochen. 675

15.12 Die Teilchen können weitere Arten von Ladung tragen, die sich zum Teil ineinander umwandeln lassen. Das macht unklar, wieviel Arten von Teilchen als verschieden gezählt werden müssen. 676

Literaturverzeichnis 681

Sachverzeichnis 689