

Literaturverzeichnis

1. CANET D: *NMR-Konzepte und Methoden*. Springer-Verlag, Berlin, 1994
2. ABE F, MG ALBROW et al.: *Evidence for top quark production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1,8$ TeV*. Phys. Rev. Lett. 73(2):225–231, Jul 1994
3. ADEVA B, O ADRIANI, M AGUILAR-BENITEZ, H AKBARI, J ALCARAZ, A ALOISIO, G ALVERSON, MG ALVIGGI, Q AN, H ANDERHUB et al.: *Measurement of Z_0 decays to hadrons, and a precise determination of the number of neutrino species*. Phys. Lett. B 237(1):136–146, 1990
4. ADLER SL: *Axial-vector vertex in spinor electrodynamics*. Phys. Rev. 177(5):2426–2438, Jan 1969
5. ALPHER RA, H BETHE und G GAMOW: *The origin of chemical elements*. Phys. Rev. 73(7):803–804, Apr 1948
6. ALVAREZ LW: *The capture of orbital electrons by nuclei*. Phys. Rev. 54(7):486–497, 1938
7. AMADO RD und H PRIMAKOFF: *Comments on testing the Pauli principle*. Phys. Rev. C 22(3):1338–1340, Sep 1980
8. AMSLER C et al.: *Data particle book*. Phys. Lett. B 667(1), 2008
9. ANDERSON CD: *The positive electron*. Phys. Rev. 43(6):491–494, Mar 1933
10. APPELQUIST T und HD POLITZER: *Heavy quarks and e^+e^- Annihilation*. Phys. Rev. Lett. 34(1):43–45, Jan 1975
11. ARNETT WD, JN BAHCALL, RP KIRSHNER und SE WOOSLEY: *Supernova 1987A*. Ann. Rev. Astron. Astrophys. 27(1):629–700, 1989
12. ARNISON G, OC ALLKOFER et al.: *Comparison of three jet and two jet cross-sections in p anti- p collision at the CERN SPS p anti- p collider*. Phys. Lett. B 158:494, 1985
13. ARNISON G, A ASTBURY et al.: *Observation of jets in high transverse energy events at the CERN proton antiproton collider*. Phys. Lett. B 123(1–2):115–122, 1983
14. ATKINS PW: *Physikalische Chemie, 3., korr. Aufl.*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002
15. AUGUSTIN JE, AM BOYARSKI et al.: *Discovery of a narrow resonance in e^+e^- annihilation*. Phys. Rev. Lett. 33(23):1406–1408, Dec 1974
16. BAGNAIA P, M BANNER et al.: *Evidence for Z_0 ? e^+e^- at the CERN pp collider*. Phys. Lett. B 129(1–2):130–140, 1983
17. BAHCALL JN und R DAVIS JR: *Solar neutrinos: A scientific puzzle*. Science 191(4224):264–267, 1976
18. BALLAM J, GB CHADWICK et al.: *Bubble-Chamber study of photoproduction by 2.8- and 4.7 GeV polarized photons. I. Cross-Section determinations and production of ρ^0 and Δ^{++} in the reaction $\gamma p \rightarrow p\pi^+\pi^-$* . Phys. Rev. D, 5(3):545–589, Feb 1972
19. BANNER M, R BATTISTON et al.: *Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN pp collider*. Phys. Lett. B 122(5–6):476–485, 1983

20. BARDON M, P NORTON, J PEOPLES, MA SACHS und J LEE-FRANZINI: *Measurement of the momentum spectrum of positrons from muon decay*. Phys. Rev. Lett. 14(12):449–453, Mar 1965
21. BARNES VE, PL CONNOLLY et al.: *Observation of a hyperon with strangeness minus three*. Phys. Rev. Lett. 12(8):204–206, Feb 1964
22. BARTEL W, L BECKER et al.: *Tau-lepton production and decay at Petra energies*. Phys. Lett. B 161(1–3):188–196, 1985
23. BEHREND HJ, J BÜRGER et al.: *A measurement of the muon pair production in e^+e^- annihilation*. Phys. Lett. B 191(1–2):209–216, 1987
24. BERGER C: *Elementarteilchenphysik*. Springer, Heidelberg, 2002
25. BERMAN BL und SC FULTZ: *Measurements of the giant dipole resonance with monoenergetic photons*. Rev. Modern Phys. 47(3):713–761, 1975
26. BERTLMANN RA: *Anomalies in quantum field theory*. Clarendon Press, Oxford, 1996
27. BETH RA: *Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light*. Phys. Rev. 50(2):115–125, 1936
28. BETHE HA und RF BACHER: *Nuclear Physics A. Stationary States of Nuclei*. Rev. Mod. Phys. 8(2):82, Apr 1936
29. BETHE HA und CL CRITCHFIELD: *The formation of deuterons by proton combination*. Phys. Rev. 54(4):248–254, Aug 1938
30. BJØRKEN BJ und SL GLASHOW: *Elementary particles and SU(4)*. Phys. Lett. 11:255–57, 1964
31. BLUDMAN S: *The First Gauge Theory of the Weak Interaction*. In: *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997
32. BODENSTEDT E: *Experimente der Kernphysik und ihre Deutung*. Bibliographisches Inst., Mannheim [u. a.], 1972
33. BOHR A und BR MOTTELSON: *Struktur der Atomkerne Bd. 2*. Hanser, München [u. a.], 1980
34. BOLTZMANN L: *Ueber die Natur der Gasmoleküle*. Ann. Phys. 236(1):175–176, 1877
35. BOLTZMANN L: *Vorlesungen über Gastheorie, 1. Teil*. JA Barth, Leipzig, 3. Aufl., 1898
36. BORN M, W HEISENBERG und P JORDAN: *Zur Quantenmechanik. II*. Z. Phys. A Hadrons and Nuclei 35(8):557–615, 1926
37. BOSE V: *Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese*. Z. Phys. A Hadrons and Nuclei 26(1):178–181, 1924
38. BOTSCH W: *Die Bedeutung des Begriffs Lebenskraft für die Chemie zwischen 1750 und 1850*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1997
39. VAN BRAKEL J und H FREUDENTHAL: *The possible influence of the discovery of radioactive decay on the concept of physical probability*. Arch. Hist. Exact Sci. 31(4), 1985
40. BREIDENBACH M, JI FRIEDMAN et al.: *Observed behavior of highly inelastic electron-proton scattering*. Phys. Rev. Lett. 23(16):935–939, 1969
41. BRINK D: *Nuclear Dynamics*. In: *Twentieth Century Physics*, Seite 1183, American Institute of Physics, 1995
42. BROCKHAUS FA: *Brockhaus' Konversations-Lexikon*. FA Brockhaus, Gütersloh, 1882
43. BROECKER WS und M BARABAS: *Labor Erde*. Springer, Berlin [u. a.], 1995
44. BROWN HN und G BUNCE ET AL.: *Precise measurement of the positive muon anomalous magnetic moment*. Phys. Rev. Lett. 86(11):2227–2231, Mar 2001
45. BROWN LM: *Twentieth century physics, Vol. 1*. Inst. Physics Publ., Bristol [u. a.], 1995
46. BURBIDGE EM, GR BURBIDGE, WA FOWLER und F HOYLE: *Synthesis of the elements in stars*. Rev. Mod. Phys. 29(4):547–650, 1957
47. CABIBBO N: *Unitary symmetry and leptonic decays*. Phys. Rev. Lett. 10(12):531–533, Jun 1963
48. CLOSE F, M MARTEN und C SUTTON: *The particle explosion*. Oxford University Press, New York [u. a.], 1994

49. CONVERSI M, E PANCINI und O PICCIONI: *On the disintegration of negative mesons*. Phys. Rev. 71(3):209–210, Feb 1947
50. COX RT, CG MCILWRAITH und B KURRELMAYER: *Apparent evidence of polarization in a beam of β -rays*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 14(7):544, 1928
51. DANBY G, J-M GAILLARD, K GOULIANOS, L M LEDERMAN, N MISTRY, M SCHWARTZ und J STEINBERGER: *Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos*. Phys. Rev. Lett. 9(1):36–44, Jul 1962
52. DANNEMANN F: *Die Naturwissenschaften in ihrer Entwicklung und ihrem Zusammenhange*, Band 3. W. Engelmann, 1922
53. DAVIS R: *Attempt to detect the antineutrinos from a nuclear reactor by the $Cl^{37}(\nu, e^-)A^{37}$ Reaction*. Phys. Rev. 97(3):766–769, Feb 1955
54. DAVIS R: *Nobel lecture: A half-century with solar neutrinos*. Rev. Mod. Phys. 75(3):985–994, Aug 2003
55. DECAMP D, B DESCHIZEAUX, JP LEES, MN MINARD, JM CRESPO, M DELFINO, E FERNANDEZ, M MARTINEZ, R MIQUEL, LM MIR et al.: *A precise determination of the number of families with light neutrinos and of the Z boson partial widths*. Phys. Lett. B 235(3–4):399–411, 1990
56. DEMTRÖDER W: *Experimentalphysik Bd. 1: Mechanik*. Springer, Berlin [u. a.], 1996
57. DEMTRÖDER W: *Experimentalphysik Bd. 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, Berlin [u. a.], 2005
58. DEMTRÖDER W: *Experimentalphysik Bd. 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer, Berlin [u. a.], 2005
59. DENNISON DM: *A note on the specific heat of the hydrogen molecule*. Proc. Roy. Soc. Lond. A 115(771):483–486, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character (1905–1934), 1927
60. DIRAC PAM: *On the theory of quantum mechanics*. Proc. Roy. Soc. Lond. A 112(762):661–677, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character (1905–1934), 1926
61. DIRAC PAC: *Interview mit Thomas Kuhn, 1963*. In: *Inward bound*, Clarendon Press, Oxford, 1994
62. WOHLFAHRT H (ED.): *40 Jahre Kernspaltung*. Wiss. Buchges., Darmstadt, 1979
63. EDMONDS AR: *Drehimpulse in der Quantenmechanik*. Bibliographisches Institut, Mannheim, 1964
64. EINSTEIN A: *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*. Akademie der Wissenschaften, in Kommission bei W. de Gruyter, Berlin, 1924
65. EINSTEIN A und WJ DE HAAS: *Experimenteller Nachweis der Ampereschen Molekularströme*. Verh. Dtsch. Phys. Ges 17:152, 1915
66. EVANS RD: *The atomic nucleus*. McGraw-Hill, New York [u. a.], 1970
67. FERMI E: *Zur Quantelung des idealen einatomigen Gases*. Z. Phys. A Hadrons and Nuclei, 36(11):902–912, 1926
68. FERMI E: *Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I*. Z. Phys. A Hadrons and Nuclei 88(3):161–177, 1934
69. FERMI E: *Quantum theory of radiation*. Rev. Mod. Phys. 4(1):87, Jan 1932
70. FEYNMAN RP: *The theory of fundamental processes*. Benjamin, New York, 1961
71. FEYNMAN RP, RB LEIGHTON und M SANDS: *The Feynman lectures on physics*. Addison Wesley, Reading MA, 1963
72. FINKELNBURG W: *Einführung in die Atomphysik*. Springer, Berlin [u. a.], 1964
73. FRAUENFELDER H, EM HENLEY und M RECK: *Teilchen und Kerne: Die Welt der subatomaren Physik*. Oldenbourg, München, 1999
74. FRISCH O: *Physical evidence for the division of heavy nuclei under neutron bombardment*. Nature 143:276, 1939
75. GALISON P: *Pure and hybrid detectors: Mark I and the psi*. In: *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*, Seite 308, Cambridge University Press, Cambridge, 1997

76. GAMOW G: *Expanding universe and the origin of elements*. Phys. Rev. 70(7–8):572–573, Oct 1946
77. GEIGER H und E MARSDEN: *On a diffuse reflection of the α -particles*. Proc. Roy. Soc. Lond. A 82:495–500, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1909
78. GELL-MANN M und A PAIS: *Behavior of neutral particles under charge conjugation*. Phys. Rev. 97(5):1387–1389, Mar 1955
79. GELL-MANN M: *Quarks, color, and QCD*. In: *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*, Seite 625, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
80. GENTRY RV: *Creation's tiny mystery*. Earth Science Associates, Knoxville, 1992
81. GLASHOW SL, R JACKIW und SS SHEI: *Electromagnetic decays of pseudoscalar mesons*. Phys. Rev. 187(5):1916–1920, Nov 1969
82. GLASHOW SL, J ILIOPOULOS und L MAIANI: *Weak interactions with lepton-hadron symmetry*. Phys. Rev. D 2(7):1285–1292, 1970
83. GOLDBABER M, L GRODZINS und AW SUNYAR: *Helicity of neutrinos*. Phys. Rev. 109(3):1015–1017, 1958
84. GOLDBABER M und G SCHARFF-GOLDBABER: *Identification of beta-rays with atomic electrons*. Phys. Rev. 73(12):1472–1473, 1948
85. GRIBBIN J: *Science A History*. Penguin Books, London, 2003
86. GRIBOV V und B PONTECORVO: *Neutrino astronomy and lepton charge*. Phys. Lett. B 28(7):493–496, 1969
87. GRIFFITHS DJ: *Einführung in die Elementarteilchenphysik*. Akad.-Verl., Berlin, 1996
88. GRIFFITHS DJ: *Introduction to elementary particles*, 2 Auflage. Wiley-VCH, Weinheim, 2008
89. HAKEN H und HC WOLF: *Atom- und Quantenphysik: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*. Springer, Heidelberg, 2003
90. HANSEL W: *Quantencomputer und Quantenteleportation: Quantenbits in der Ionenfalle Teil 2*. Physik in unserer Zeit 37(6), 2006
91. HASERT FJ, H FAISSNER et al.: *Search for elastic muon-neutrino electron scattering*. Phys. Lett. B 46(1):121–124, 1973
92. HEISENBERG J, R HOFSTADTER, JS MCCARTHY, I SICK, BC CLARK, R HERMAN und DG RAVENHALL: *Elastic electron scattering by Pb^{208} and new information about the nuclear charge distribution*. Phys. Rev. Lett. 23(24):1402–1405, Dec 1969
93. HEISENBERG W: *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*. Z. Phys. 33(1):879–893, 1925
94. HEISENBERG W: *Mehrkörperproblem und Resonanz in der Quantenmechanik*. Z. Phys. A Hadrons and Nuclei 38(6):411–426, 1926
95. HEISENBERG W: *Mehrkörperprobleme und Resonanz in der Quantenmechanik. II*. Z. Phys. A Hadrons and Nuclei 41(8):239–267, 1927
96. HERZBERG G.: *Molecular spectra and molecular structure*. van Nostrand, New York, 1950
97. HEYDENBURG NP und GM TEMMER: *Alpha-alpha scattering at low energies*. Phys. Rev. 104(1):123–134, 1956
98. HILSCHER H: *Kernphysik*. Vieweg, Braunschweig [u. a.], 1996
99. HODDESON L, L BROWN, M RIORDAN und M DRESDEN: *The rise of the standard model: Particle physics in the 1960s and 1970s*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997
100. HÖFFE O: *Kleine Geschichte der Philosophie*. CH Beck, München, 2001
101. HOLTON G: *Subelectrons, presuppositions, and the Millikan-Ehrenhaft dispute*. Hist. Stud. Phys. Sci. Baltim., Md 9:161–224, 1978
102. HOSAKA J und K ISHIHARA ET AL.: *Three flavor neutrino oscillation analysis of atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande*. Phys. Rev. D Particles and Fields 74(3):032002, 2006
103. JACKSON JD: *Classical electrodynamics*. Wiley, New York [u. a.], 1962
104. JAMES FE und HL KRAYBILL: *Interactions of π^+ mesons with protons at 2.08 BeV/c*. Phys. Rev. 142(4):896–912, Feb 1966

105. KANITSCHIEDER B: *Im Innern der Natur: Philosophie und moderne Physik*. Wiss. Buchges., Darmstadt, 1996
106. KANITSCHIEDER B: *Philosophie und moderne Physik: Systeme, Strukturen, Synthesen*. Wiss. Buchges., Darmstadt, 1979
107. KELVIN WT: *On the age of the sun's heat*. Macmillan's Magazine 5:288–293, 1862
108. KERLER W und W NEUWIRTH: *Messungen des Mössbauer-Effekts von Fe⁵⁷ in zahlreichen Eisenverbindungen bei verschiedenen Temperaturen*. Z. Phys. 167:176–193, 1962
109. KETTERLE W: *Bose-Einstein-Kondensate – eine neue Form von Quantenmaterie*. Phys. Blätter 53:677–680, 1997
110. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS HV und A STAUDT: *Teilchenphysik ohne Beschleuniger*. Teubner, Stuttgart, 1995
111. KNECHT M und A NYFFELER: *Hadronic light-by-light corrections to the muon g-2: The pion-pole contribution*. Phys. Rev. D 65(7):073034, Apr 2002
112. KONOPINSKI EJ und HM MAHMOUD: *The universal Fermi interaction*. Phys. Rev. 92(4):1045–1049, Nov 1953
113. KOPFERMANN H: *Kernmomente*. Akad. Verlagsges., Frankfurt, 1956
114. KRANE KS: *Introductory nuclear physics*. Wiley, New York, 1987
115. KUNDT A und E WARBURG: *Ueber die spezifische Wärme des Quecksilbergases*. Ann. Phys. 233(3):353–369, 1876
116. LANDE K, ET BOOTH, J IMPEDUGLIA, LM LEDERMAN und W CHINOWSKY: *Observation of long-lived neutral V particles*. Phys. Rev. 103(6):1901–1904, Sep 1956
117. LARIN I: *A Precision Measurement of the Neutral Pion Life Time: Updated Results from the PrimEx Experiment*. In: *Progress in high energy physics and nuclear safety*, Seite 157, Springer Netherlands, Dordrecht, 2009
118. LAURENCE WL: *Dämmerung über Punkt Null – Die Geschichte der Atombombe*. List Taschenbuch, Berlin, 1952
119. LEE TD: *Particle physics and introduction to field theory*. Harwood Academic Pub, Newark, 1981
120. LEIGHTON RB, CD ANDERSON und AJ SERIFF: *The energy spectrum of the decay particles and the mass and spin of the mesotron*. Phys. Rev. 75(9):1432–1437, May 1949
121. LOHRMANN E: *Einführung in die Elementarteilchenphysik*. Teubner, Stuttgart, 1983
122. LONGO MJ: *Tests of relativity from SN1987A*. Phys. Rev. D 36(10):3276–3277, Nov 1987
123. LÜDERS G: *On the equivalence of invariance under time reversal and under particle-antiparticle conjugation for relativistic field theories*. Det. Kong. Danske Vidensk. Selskab, Mat.-fys. Medd. 28(5):1, 1954
124. MACH E: *Die Principien der Wärmelehre*. Barth, Leipzig, 1900
125. MANNHEIM PD: *Introduction to Majorana masses*. Int. J. Theor. Phys. 23(7):643–674, 1984
126. MATTAUCH J: *Massenspektrographie und ihre Anwendung auf Probleme der Atom- und Kernchemie*. Ergeb. Exakten Naturwiss. 19:170–236, 1940
127. MAYER-KUCKUK T: *Atomphysik*. Teubner, Stuttgart [u. a.], 1997
128. MAYER-KUCKUK T: *Kernphysik*. Teubner, Stuttgart [u. a.], 2002
129. MCMILLAN E und PH ABELSON: *Radioactive Element 93*. Phys. Rev. 57(12):1185–1186, Jun 1940
130. MEIER H und W HECKER: *Radioactive halos as possible indicators for geochemical processes in magmatites*. Geochem. J. 10:185–195, 1976
131. MENDELEJEV D: *Über die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente*. Z. Chem 12:405–406, 1869
132. MESSIAH A: *Quantum mechanics*. North-Holland, Amsterdam, 1970
133. METZ M, P KROUPA, C THEIS, G HENSLER und H JERJEN: *Did the Milky Way dwarf satellites enter the halo as a group?* Astrophys. J. 697(1):269–274, 2009
134. MOHR PJ, BN TAYLOR und DB NEWELL: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006*. Rev. Modern Phys. 80(2):633, 2008

135. MOTT NF: *The solution of the wave equation for the scattering of particles by a coulombian centre of force*. Proc. Roy. Soc. Lond. A Seiten 542–549, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1928
136. MUSIOL G, J RANFT, R REIF und D SEELIGER: *Kern- und Elementarteilchenphysik*. VCH, Weinheim, 1995
137. NERESON N und B ROSSI: *Further measurements on the disintegration curve of mesotrons*. Phys. Rev. 64(7–8):199–201, Oct 1943
138. NEWMAN HB und T YPSILANTIS: *History of original ideas and basic discoveries in particle physics*. Plenum Press, New York, 1996
139. OBERHUMMER H: *Kerne und Sterne: Einführung in die nukleare Astrophysik*. Barth, Leipzig, 1993
140. ODOM B, D HANNEKE, B D'URSO und G GABRIELSE: *New measurement of the electron magnetic moment using a one-electron quantum cyclotron*. Phys. Rev. Lett. 97(3):30801, 2006
141. OLDEKOP W: *Einführung in die Kernreaktor- und Kernkraftwerkstechnik*. Thiemig, München, 1975
142. OSCHMANN W: *Vier Milliarden Jahre Klimageschichte im Überblick*. Klimastatusbericht, 2003
143. OTTER G und R HONECKER: *Atome–Moleküle–Kerne Bd. 2*. Teubner, Stuttgart, 1996
144. OTTO H, F STRASSMANN: *Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle*. Naturwissenschaften 27:11, 1939
145. PAIS A: *Inward bound*. Clarendon Press, Oxford, 1994
146. PAULI W: *Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur des Spectrums*. Z. Phys. 31:765, 1925
147. PAULI W: *Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons*. Z. Phys. 43:601, 1927
148. PAULI W: *Handbuch der Physik, Vol. 24*. Verlag Julius Springer, Berlin, 1933, Seite 226–227
149. PAULI W und F VILLARS: *On the invariant regularization in relativistic quantum theory*. Rev. Mod. Phys. 21(3):434–444, Jul 1949
150. PERKINS D: *Gargamelle and the discovery of neutral currents*. In: *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*, Seite 428, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
151. PERL M: *The discovery of the tau lepton*. In: *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*, Seite 79, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
152. PERL ML, GS ABRAMS et al.: *Evidence for anomalous lepton production in e^+e^- annihilation*. Phys. Rev. Lett. 35(22):1489–1492, Dec 1975
153. PLATTNER GR und I SICK: *Coherence, interference and the Pauli principle: Coulomb scattering of carbon from carbon*. Eur. J. Phys. 2:109–113, 1981
154. POVH B, K RITH, C SCHOLZ und F ZETSCHKE: *Teilchen und Kerne*. Springer, Heidelberg, 2009
155. RENTON P: *Electroweak interactions*. Cambridge University Press, New York, 1990
156. ROBSON J M: *The radioactive decay of the neutron*. Phys. Rev. 83(2):349–358, Jul 1951
157. ROHLF JW: *Modern physics from α to Z_0* . Wiley, New York [u. a.], 1994
158. ROVELLI C: *Notes for a brief history of quantum gravity*. Arxiv preprint gr-qc/0006061, von <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061> 2000
159. RUTHERFORD E: *The scattering of the α & β rays and the structure of the atom*. Philos. Mag. 21:669–688, 1911
160. RUTHERFORD E und H GEIGER: *The probability variations in the distribution of alpha particles*. Philos. Mag. 20:698–704, 1910
161. RUTHERFORD E und T ROYDS: *The nature of the alpha particle from radioactive substances*. Philos. Mag. 6(17):281–286, 1909
162. RUTHERFORD E und E NEVILLE DA COSTA ANDRADE: *The wavelength of the penetrating γ rays from radium B and radium C*. Philos. Mag. 1914

163. RUTHERFORD E und E NEVILLE DA COSTA ANDRADE: *The wavelength of the soft gamma rays from radium B*. Philos. Mag. 6(28):854–868, 1914
164. RUTHERFORD E und J CHADWICK: *The collected papers of Lord Rutherford of Nelson Vol. 1–3*. Allen & Unwin, London, 1962
165. RUTHERFORD E, J CHADWICK und C DRUMMOND ELLIS: *Radiations from radioactive substances*. Cambridge Univ. P., London, 1951
166. RYSSEL H und I RUGE: *Ionenimplantation*. Teubner, Stuttgart, 1978
167. RYSSEL H und H GLAWISCHNIG: *Ion implantation techniques*. Springer Ser. Electrophys. 10. Springer, Heidelberg, 1982
168. SACKUR O: *Die universelle Bedeutung des sog. elementaren Wirkungsquantums*. Ann. Phys. 345(1):67–86, 1913
169. SAMM U: *Controlled thermonuclear fusion at the beginning of a new era*. Contemp. Phys. 44(3):203–217, 2003
170. SCHMITZ N: *Neutrinoophysik*. BG Teubner Verlag, Stuttgart, 1997
171. SCHRÖDINGER E: *Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung)*. Ann. Phys. 79:361–376, 1926
172. SCHRÖDINGER E: *Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung)*. Ann. Phys. 79:361–376, 1926
173. SCHWEBER S: *A historical perspective on the rise of the standard model*, In: *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s*, Seite 645, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
174. VON SCHWEIDLER ER: *Premier congrès international de radiologie*, 1905
175. SEGRÈ E: *Nuclei and particles*. Benjamin (WA), New York, 1964
176. SEGRÈ E und S SUMMERER: *Die großen Physiker und ihre Entdeckungen*. Piper, München, 1990
177. SHANKAR R: *Principles of quantum mechanics*. Plenum Press, N.Y., 1980
178. SHERA EB, ET RITTER, RB PERKINS, GA RINKER, LK WAGNER, HD WOHLFAHRT, G FRICKE und RM STEFFEN: *Systematics of nuclear charge distributions in Fe, Co, Ni, Cu, and Zn deduced from muonic X-ray measurements*. Phys. Rev. C 14(2):731–747, Aug 1976
179. SIMONYI K und K CHRISTOPH: *Kulturgeschichte der Physik*. Deutsch, Thun [u. a.], 1990
180. SODDY F: *Name for the positive nucleus*. Nature 106(2668):502–503, 1920
181. STILLER W: *Ludwig Boltzmann: Altmeister der klassischen Physik, Wegbereiter der Quantenphysik und Evolutionstheorie*. VEB Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1988
182. STREET JC und EC STEVENSON: *New evidence for the existence of a particle of mass intermediate between the proton and electron*. Phys. Rev. 52(9):1003–1004, Nov 1937
183. SUTTON C und HP HERBST: *Raumschiff Neutrino: die Geschichte eines Elementarteilchens*. Birkhäuser, 1994
184. TAMM I: *Über die Wechselwirkung der freien Elektronen mit der Strahlung nach der Diracsehen Theorie des Elektrons und nach der Quantenelektrodynamik*. Z. Phys. 62(7):545–568, 1930
185. VAN DYCK RS, PB SCHWINBERG und HG DEHMELT: *Electron magnetic moment from geonium spectra: Early experiments and background concepts*. Phys. Rev. D 34(3):722–736, Aug 1986
186. VAN DYCK RS, PB SCHWINBERG und HG DEHMELT: *New high-precision comparison of electron and positron g factors*. Phys. Rev. Lett. 59(1):26–29, Jul 1987
187. WEGNER HE, RM EISBERG und G IGO: *Elastic scattering of 40-MeV alpha particles from heavy elements*. Phys. Rev. 99(3):825–833, Aug 1955
188. WEISSKOPF V: *Mein Leben*. Scherz Verlag, Bern, 1991
189. WEIZSÄCKER CF: *Atomenergie und Atomzeitalter*. Fischer, Frankfurt a.M., 1957
190. WEIZSÄCKER CF: *Die Verantwortung der Wissenschaft im Atomzeitalter*. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1963
191. WEYL H: *Quantenmechanik und Gruppentheorie*. Springer, Heidelberg, 1927
192. WEYL H: *Elektron und Gravitation. I*. Z. Phys. 56(5):330–352, 1929

193. WICHMANN EH, F CAP und C KITTEL: *Berkeley-Physik-Kurs Bd. 4: Quantenphysik*. Vieweg, Braunschweig [u. a.], 2., überarb. und erw. Aufl, 1985
194. WIEDEMANN B, G WALTER und K BETHGE: *Kernphysik*. Springer, Berlin [u. a.], 2001
195. WILSON AH: *The theory of electronic semi-conductors*. Proc. Roy. Soc. Lond. A, Seiten 458–491, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1931
196. WINTER RG: *Large-time exponential decay and hidden variables*. Phys. Rev. 126(3):1152–1153, May 1962
197. WOLF-GLADROW D: *Der Ozean als Teil des globalen Kohlenstoff-Kreislaufs*. Umweltwiss. Schadstoff-Forsch. 4(1):20–24, 1992
198. YANG CN und RL MILLS: *Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance*. Phys. Rev. 96(1):191–195, Oct 1954
199. YUKAWA H: *On the interaction of elementary particles*. Proc. Phys. Math. Soc. Japan 17:48–57, 1935
200. ZWICKY F: *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*. Helv. Phys. Acta 6:110–127, 1933

Sachverzeichnis

Symbole

- 2-Körper-System
 - Labor-/Schwerpunktsystem 31, 54, 467, 527
 - bei identischen Teilchen kein klass. Grenzfall 146
 - feste Energie-Aufteilung 498
 - invariante Masse 601
 - kinematische Analyse ($\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$) 490
 - klassisch äquiv. zu 1-Körper-System 146
- 2-Teilchen-Reaktion
 - Stoß *siehe Kap. 5*, 33
 - Impulsübertrag 33
 - Impulsnäherung 36
 - auch ohne abstoßende Kraft 33
 - elastischer 31, 34, 123
 - inelastischer 31
 - von Teilchendichte beeinflusst 162
- 2-Zustands-System
 - Isospin (T)-Dublett 509
 - Kaon/Antikaon 556
 - Neutrino-Mischung 476
 - Quanten-Beat 476, 556
 - angepasste Basis 552
 - immer analog zu Spin $\frac{1}{2}$ 264
- 2. Quantisierung *siehe Abschn. 9.4*, 379, 388
 - Operatoren statt Amplituden 380
- 4-Vektor (Lorentz-Vektor)
 - Energie-Impuls $p^\mu = (E/c, \vec{p})$ 438
 - Stromdichte $j^\mu = (\rho, \vec{j})$ 441
 - elektrodynamisches Potential $A^\mu = (\Phi/c, \vec{A})$ 218, 429

A

- α -Strahlen *siehe Abschn. 6.3*, 26, 186
 - Benennung 26
 - Energie durch Coulomb-Abstoßung 186, 190
 - Vermehrung der Atome 192
- α -Teilchen
 - Bildung nach Urknall 371
 - Masse m_α 15
 - Sonde *siehe Abschn. 2.3*, 42
 - große Bindungsenergie 102, 358
- Abbremsung
 - α -Teilchen 31
 - Bethe-Bloch-Theorie 40
 - Bohrsche Theorie 35
 - kleinster Energieübertrag 39
- Ablenkung
 - durch E- und B-Feld 79
 - maximale bei α -e-Stoß 34
- Abschätzungen, größenordnungsmäßig
 - Anregungsenergie aus Drehimpulsquantelung 10, 258
 - Bohrsches Atommodell für Quarks 611
 - Brenndauer von H-Bombe vs. Sonne 366
 - Energie bei Kernspaltung 340
 - H-Atom vs. Charmonium 613
 - Kraft auf α -Teilchen (Rutherford 1909) 52
 - Neutrino-Wirkungsquerschnitt (Bethe 1934) 245
 - Riesenresonanz (pn -Schwingung) 306
 - Rotation eingefroren bei Atomen 10
 - Stärke der ersten A-Bombe (Fermi 1945) 357
 - Vibration bei Molekülen 309
 - wo sind Caesars Atome 8

- Abschwächung 23
 - exponentielle von γ -Strahlung 196
- Absorptions-Kante (γ -Strahlung) 207
- Absteige-Operator \hat{j}_-, \hat{a}
 - Drehimpuls z -Komponente 253
 - Harmon. Oszillator 214, 260, 264, 324, 388, 397
- Absurde Zwischenwerte (in Quantenfeldtheorie) 380
- aces (Name für Quarks) 587
- Achtfacher Weg 480, 587
 - Cabibbo-Theorie 645
- ad hoc*-Annahme 16, 88, 575, 646
- adiabatische Abkühlung (in der Nebelkammer) 526
- adiabatische Aufheizung (in Sternen) 373
- adiabatische Störung 39
- Aggregatzustände 71, 652
- Aktivität 160, 177
 - Einheiten Becquerel vs. Curie 172
- Alamogordo (erster Kernwaffen-Test, 1945) 357
- Alchemie 28, 74, 82, 192, 583, 678
- Allgemeine Relativitätstheorie
 - Ausgangspunkt $m_{\text{träge}} \propto m_{\text{schwer}}$ 660
 - und Standard-Modell 660
- Alltagsbeobachtung
 - 2-Körper-System von Schwerpunkt-bewegung unbeeinflusst 147
 - Drehungen im Spiegel 281
 - Materie stabil 190
- Alltagsverstand
 - 2 Dinge immer unterscheidbar 396
 - Basis von Verstehen vi, 653, 663
 - Kontinuum vs. Raster 1, 531
 - Stoß bedeutet „Berührung“ 33
 - aus Erfahrungen mit makroskopischen Prozessen 663
 - vs. Ununterscheidbarkeit 394
 - vs. Welle-Teilchen-Dualismus 384
 - vs. makroskopische Quanten-Effekte 395
- Altersbestimmung
 - C-14-Methode 184
 - Rubidium-Strontium-Methode 175
 - an Teilchen nicht möglich 163
- amu (atomic mass unit) 83
- Analog-Digital-Converter 222
- analoge Skala (Zeigerablesung) 176
- analoges Signal
 - aus energieempfindlichem Detektor 222
 - digitale Registrierung 222
 - vs. digitales Signal 1, 176
- angeregte Niveaus
 - Abschätzung für Molekül, Atom, Kern, Nukleon 258
 - Atom 10, 27, 258
 - myonisches 228, 457
 - pionisches 491
 - Rotation bei Atomen 10, 258
 - Rotation bei Molekülen 11, 258, 269
 - Weg zur Erforschung der Wechselwirkungen 480, 599
 - des J/Ψ -Mesons 609, 611
 - des Kerns 221, 258, 304
 - des Nukleons 173, 258, 502, 519, 596
- Annihilation 209, 389, 466, 495, 668
 - in 2 Photonen 210, 417, 494
 - in 2 Quarks (Zweigs Regel) 591
- Anomalie
 - g -Faktor
 - Baryonen 592
 - Präzisionsmessung 443, 462
 - QED -Vorhersage für Leptonen 636
 - am Elektron beobachtet 380
 - in der Quantenfeldtheorie 650
 - axialer Strom verletzt Ladungserhaltung 567, 650
 - ermöglicht $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ 495
 - macht Renormierung unmöglich 567, 586, 650
- Anregung, virtuelle
 - Amplitude $\propto 1/\Delta E$ 407
 - eingefrorener Freiheitsgrad 619
 - verletzt Energieerhaltung 404
- Anregungsspektren
 - drei Typen bei Kernen 318
- Anthropisches Prinzip 659, 660
- Anti-Atomisten 3, 12, 661
- Anti-Koinzidenz-Schaltung
 - gegen Myonen im Neutrino-Nachweis 246
 - zur Teilchen-Identifizierung 503
- Antikommutator (für Fermionen) 397
- Antimaterie *siehe* Antiteilchen
- Antiproton (\bar{p}) *siehe* **Abschn. 11.4**, 522
 - $p\bar{p}$ -Strahl im $Sp\bar{p}S$ -Collider 579
- Antisymmetrie
 - bei Funktion $f(x)$ 452
 - bei Vertauschung identischer Teilchen 149, 391
 - sieht symmetrisch aus 281
- Antiteilchen v, *siehe* **Abschn. 10.2.6, 15.5**, 157, 210, 416, 522, 631, 668
 - Anti-Gravitation? 389
 - CPT -gespiegeltes Teilchen 417, 447
 - Paarerzeugung 210
 - für *alle* Teilchen 380, 389, 668

- in Dirac-Theorie 441
- nicht Loch, sondern eigene Teilchensorte 417, 443, 679
- symmetrisch zu Teilchen 562
- warum weniger häufig? 536
- Aristotelische Mechanik vi
- Aston, Francis (Massenspektrometer 1919) 82
- Astro-Teilchenphysik 377, 655
- Astrophysik („Standard-Modell“) 367, 473
- Asymmetrie-Term (Tröpfchen-Modell) 106
- Asymptotische Freiheit 628
- Äther (für Wellen nicht erforderlich, 1905) 383
- Atom *siehe Kap. 1*
 - Definition (1860) 5
 - Gleichartigkeit 5, 8, 76
 - Ionisierungsenergie 27, 320
 - Masse durchschnittlich 7
 - Masse einzelner 78
 - Radius 7, 42, 53
 - ist Massen-Punkt (1875) 9
 - ist zusammengesetzt 14, 117, 192
 - myonisches 228, 457
 - pionisches 491, 492
 - typische Anregungsenergie 10, 27, 258
- Atom-Minister 358
- Atom-Modell
 - Bohr (1913) 16, 43, 48
 - Prout (1815) 4, 74, 77
 - Rutherford (1911) 61, 70, 74
 - Schalenmodell (~1926) 71
 - Thomas-Fermi (1927) 108
 - Thomson (1903, „Rosinenkuchen“) 15, 44
- Atombombe 346
- Atomenergie in Deutschland (West)
 - auch militärische Option 358
- Atomgewicht A 1, 63, 68, 76
 - Bestimmung 76
 - Regel der Ganzzahligkeit 83
 - im Periodensystem 5
- Atomhülle
 - als Z -Elektronen-Problem 249
 - totale Bindungsenergie $\propto Z^{2,3}$ 98
- Atomhypothese 3, 4
 - bezweifelt 2, 8
 - Wiederholung bei Quarks 599
 - gestützt durch Abschwächung von γ -Strahlen 198
 - gestützt durch Radioaktivität (M. Curie) 26
 - gestützt durch Szintillationen 23
- gestützt durch statistische Schwankungen 12
- atomic mass unit (amu) 83
- Atommüll 340, 356
- Atomradius 6, 69
 - erste Bestimmung (1862) 7
- Atomstrahl-Laser 134
- Atomvolumen periodisch 7
- Atomzeitalter
 - Auswirkung der Modernen Physik 19
 - Folgen der Bombe 357
 - öffentliche Wahrnehmung 250
- Aufsteige-Operator $\hat{j}_+, \hat{a}^\dagger$ 388
 - Drehimpuls z -Komponente 253
 - Erzeugungoperator in QFT 397
 - Harmon. Oszillator 214, 324
 - Pauli-Matrix für Spin $\frac{1}{2}$ 264
- Auger-Effekt 319, 470
- Ausschließungsprinzip *siehe* Pauli-Prinzip
- Austausch-Integral 393
 - beeinflusst Coulomb-Abstoßung 272, 393
- Austauschboson *siehe* Austauschteilchen
- Austauschsymmetrie *siehe* identische Teilchen – Vertauschung
- Austauschteilchen *siehe Abschn. 15.9*, 631, 672
 - W^0 568, 571
 - W^+, W^- 563
 - Z^0 573
 - γ 381, 406, 573
 - Elektron (kovalente Bindung) 483
 - Gluon 586, 615
 - Masse vs. Reichweite 415, 483
 - Yukawa-Hypothese 483, 625
 - konstruiert aus Eichinvarianz 567
 - überträgt Impuls/wirkt wie Kraft 381, 406
 - virtuelle Zustände 381
 - zwei neutrale 571, 576
- Austauschwechselwirkung 89, 633
 - Yukawa-Hypothese 75
 - chemische Bindung 482
 - einfache Deutung *siehe Abschn. 9.8*
 - kurze Reichweite, wenn $m > 0$ 482
- Auswahlregel
 - Drehimpuls bei Emission 219, 233
 - nur „weiße“ Teilchen 595
- Avogadro, Amedeo (*1776, †1856)
 - Atomhypothese 4
- Avogadro-Konstante N_A 1, 7, 13, 23, 27
 - aus statistischen Schwankungen 181
- axialer Strom (aus Dirac-Spinoren) 566
- axialer Vektor

- konstant bei Raumspiegelung 281, 298, 538, 541
- B**
- β -Radioaktivität *siehe Abschn. 6.5, 26*
- Auswahlregeln 115
 - Benennung 26
 - Beziehung Halbwertszeit-Lebensdauer 232
 - Drehimpuls-Erhaltung verletzt? 233
 - Energieerhaltung verletzt? 231, 537
 - Neutrino-Hypothese 233
 - Sargent-Regel für Energie und Lebensdauer 232
 - Teilchenzahl-Erhaltung 234, 244
- β -Teilchen
- Energie/Impuls-Spektrum *siehe Abschn. 6.5.3, 239*
 - Maximal-Energie 232
 - Reichweite in Luft 226
 - mit Elektronen identisch *siehe Abschn. 6.5.1*
 - neu erzeugt *siehe Abschn. 6.5.2*
- β -Zerfall, inverser 241, 469
- Badewanne (Leerlaufen als Relaxationsvorgang) 162
- Badezimmerspiegel (klar/beschlagen) 135
- Balmer-Formel 16, 48, 320, 427
- Bandlücke
- Germanium-Detektor 223
 - in Dirac-Theorie 210
- Bardeen, John (*1908, †1991)
- Theorie d. Supraleitung (1958) 569
 - Transistor (1948) 189
- barn [$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 = (10 \text{ fm})^2$]
- Wirkungsquerschnitt wie ein „Scheunentor“ 69, 344
- Baryon
- Erhaltung 489, 565
 - Erhaltung angezweifelt 532
 - Erhaltungssatz nur empirisch 480, 633
 - Name (1953) 479
 - aus 3 Quarks 583, 589, 596
- Baryonenzahl A 510
- Umkehr bei Ladungskonjugation 549
- Bausteine der Materie *siehe Abschn. 3.5, 8, 15, 70, 425, 583, 631, 666*
- Begriff revidiert 84, 230, 242, 380, 585, 622, 630, 679
 - Erzeugung/Vernichtung 230
 - Konzept zu simpel? 588
 - Massen summieren? 625
 - Standard-Modell 631
- identifizieren durch Stöße? 602
 - im α -Zerfall Anzahl erhalten 192
 - im Teilchenzoo? 587
 - nicht zu finden 532
 - in Nukleonen 506
 - instabil? 192
 - $p + e \rightarrow n + \nu$ 242
 - nicht isolierbar? 584, 598
 - nur 3 (für die stabile Materie): u, d, e (1964) 583
 - nur 3: p, n, e (1933) 117, 425
 - nur eine einzige Sorte? 4, 77
- Becquerel, Henri (*1852, †1908)
- Bq Einheit der Aktivität 160
 - Zufallsfund Radioaktivität 25
- Beer-Lambert-Gesetz (γ -Strahlung) 197
- Bernoulli, Daniel (*1700, †1782, Atomhypothese ~ 1750) 4
- Beschleuniger *siehe Abschn. 11.5.1*
- $p\bar{p}$ -Collider $Sp\bar{p}S$ im CERN 579
 - Entwicklung seit 1895 525
 - Large Hadron Collider (LHC) im CERN 526
 - SLAC (Stanford Linear Accelerator) 140, 601
 - Teilchen auf Bestellung 459
 - immer größere für feinere Auflösung 480
 - in der Strahlentherapie 42
 - neue Teilchen erzeugt 494
- Besselfunktion $j_\ell(x)$
- Potenzgesetz innen, Kugelwelle außen 220
 - in Reihenentwicklung der ebenen Welle 218
- Bethe, Hans (*1906, †2005)
- Abbremsung geladener Teilchen 40
 - Energiequelle der Sterne (1938) 333, 365, 367
 - Neutrino-Wirkungsquerschnitt (1934) 245
 - Tröpfchenmodell 75, 109
- Bethe-Bloch-Formel 38
- Bezugssysteme 31
- Bilder-Sprache *siehe Abschn. 9.7, 380, 673*
- Bindungsenergie E_B
- H-Atom 43
 - Höchstwert im Atom 194
 - Kern *siehe Abschn. 4.2*
 - mittlere im Atom 39
 - pro Nukleon 100
 - totale, der Atomhülle
 - Pauli-Prinzip vs. Coulomb-Abstoßung 99
 - totale, der Hülle 98

- totale, des Kerns 75, 99
 - und Massendefekt 75, 97
 - und Massenzuwachs 87, 624
 - Bindungslänge (Molekül) 270
 - Binnig, Gerd (*1947, Raster-Tunnel-Mikroskop 1981) 190
 - Binomial-Verteilung 178
 - Blasenammer 526
 - Gargamelle 606
 - Bohr, Aage (*1922, Kernmodell ab ~1952) 304
 - Bohr, Niels (*1885, †1962)
 - Abbremsung von α -Teilchen *siehe* **Abschn. 2.2**, 16, 24, 486
 - Deutung des Tröpfchenmodells 109
 - Erhaltungssätze bezweifelt 195, 230
 - Quantenmechanik ungültig für Kerne? 230
 - gegen Photon als Teilchen 387
 - Bohrscher Radius a_{Bohr} 43
 - Bohrsches Atommodell (1913) 16, 43, 48, 71, 585, 609, 665
 - Postulate 39
 - führt zur Quantenmechanik 71
 - für Quarks 611
 - quantenhafte Emission 193
 - totale Bindungsenergie 99
 - versagt ab $Z > 1$ 71, 383
 - Bohrsches Magneton μ_{Bohr} 285
 - Boltzmann, Ludwig (*1844, †1906)
 - Entwicklung und Verteidigung der kinetischen Gastheorie 3, 12, 599
 - eingefrorener Freiheitsgrad (1875) 10
 - erster Massenpunkt (1875) 9
 - Boltzmann-Faktor
 - Element-Häufigkeit 375
 - Proton/Neutron-Verhältnis im Urknall 371
 - und Molekülspektren 270
 - Boltzmann-Konstante k_B 10, 76
 - Boltzmann-Statistik 449
 - Bombe 21, 346, 349, 356, 362
 - Bonhöffer, Karl F. (*1899, †1957), Ortho- und Para-H₂ 275
 - Born, Max (*1882, †1970)
 - Bornsche Näherung 125
 - Wahrscheinlichkeitsdeutung der Quantenmechanik (1927) 165
 - Bornsche Näherung *siehe* **Abschn. 5.2**
 - Bose-Einstein-Kondensation 134, 395, 451
 - Bose-Einstein-Statistik 280
 - täuscht Anziehung vor 451
 - Boson *siehe* **Kap. 14, Abschn. 15.2**, 279, 397, 666
 - Name 450
 - Teilchenzahl darf sich ändern 390
 - aus zwei Fermionen? 451
 - fundamentale Teilchenklasse 631
 - mit *Strahlung* assoziiert 631
 - positive Vertauschungs-Symmetrie 147, 149, 453
 - und klassisches Feld 453
 - bottom*-Quark (*b*) 586, 614, 630, 631, 680
 - b*-Quark *siehe* *bottom*-Quark (*b*)
 - Bottonium 630
 - β^+ -Radioaktivität *siehe* **Abschn. 6.5.9**, 240
 - Bragg, W. Henry (*1862, †1942) und W. Lawrence (*1890, †1971), Braggsche Beugung 1912 134
 - Braggsche Beugung 98, 134
 - Intensitätsmaxima $\propto N^2$ 132, 201
 - vs. Compton-Effekt 198
 - Braggsche Kurve/Maximum 41, 175
 - Brattain, Walter (*1902, †1987, Transistor, 1948) 189
 - Brechungsindex *n*
 - und Cherenkov-Strahlung 248, 531
 - und Standard-Modell 654
 - Brennelement/Brennstab
 - Leistungs-Reaktor 353
 - Brennstoffkreislauf
 - Stromwirtschaft 355
 - Broglie, Louis de *siehe* de Broglie, Louis
 - Brownsche Bewegung 13, 17
 - Burbidge, E. Margaret & Geoffrey R.
 - Element-Entstehung 377
- ## C
- C-14-Methode 184
 - c*-Quark *siehe* *charm*-Quark (*c*)
 - Cabibbo-Theorie (Schwache Wechselwirkung) 645
 - nur 1 Quark-Dublett 649
 - Caesars C-Atome 8, 150
 - CANDU-Reaktor 348
 - Carnotscher Wirkungsgrad
 - im Nuklearen Kraftwerk 353, 354
 - und industrielle Revolution 337
 - CERN*
 - Gründung 358
 - Large Hadron Collider (LHC)* 526
 - Proton-Antiproton-Collider *Sp pS* 524
 - Chadwick, James (*1891, †1974)
 - β -Spektrum kontinuierlich (1914) 231
 - Neutron entdeckt (1932) 88, 230
 - channeling* (Kristallgitter führt Ionenstrahl) 64

- charakteristische Röntgenstrahlung *siehe*
 auch *X-rays*
 -Moseley-Gesetz 187
 -gemischt mit γ -Strahlen 194
 -myonisches Atom 228
 -nie bei β^- -Einfang in Atomhülle 227
 charakteristischer Parameter
 -eine Länge beim Elektron (r_e) 203
 -für Ausdehnung des Streuzentrums 131
 -für Dimensions-Analyse 54
 -für Energieverlust beim Compton-Effekt 200
 -für Längenskala bei Interferenzeffekten 135
 -für Photoeffekt (klassisch) 193
 -für Reichweite der Wechselwirkung 129, 415, 422, 468, 482, 483
 -für Test auf Zulässigkeit klassischer Berechnung 124
 -für Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts 207
charm-Quark (*c*) 585, 612, 631
 -„November-Revolution“ (1974) 518
 -stellt Quark-Lepton-Symmetrie her 464
 -vorhergesagt 576, 680
 Charmonium *siehe Abschn. 13.2.4*, 609, 611
 chemische Analyse
 -durch Massenspektroskopie 93
 -durch Rutherford-Rückstreuung 63
 -durch magnetische Kernresonanz 295
 -erster Nachweis der Kernspaltung 344
 chemische Bindung
 -Prüfstein für Quantenmechanik 270
 -als Austauschkraft 482
 -durch Tunnel-Effekt 189
 -typische Energie: eV 27
 chemische Energie 27, 75, 119, 333, 336
 chemische Verschiebung (in magnet. Kernresonanz) 294
 Cherenkov, Pavel (*1904, †1990) 531
 Cherenkov-Strahlung (1934) 531
 -Geschwindigkeitsfilter bei π^\pm -Lebensdauer-Messung 493
 -Neutrino-Nachweis 248, 471
 Chiralität (γ^5) *siehe Abschn. 10.2.7*
 -Dirac-Theorie 447
 -Unterscheidung Neutrino/Antineutrino 474
 -zentral für die Schwache Wechselwirkung 448
 CKM-Matrix 648
 Clausius, Rudolf (*1822, †1888, mittlere freie Weglänge 1860) 7, 197
 Clebsch-Gordan-Koeffizienten 254, 511
 CNO-Zyklus (Sternenergie) *siehe Abschn. 8.4.2*
 Collider-Beschleuniger 526
 -Produktion neuer Teilchen/Antiteilchen-Paare 466
 Compound-Kern-Resonanz 371
 Compton, Arthur H.
 -Photon-Elektron-Stoß 199, 387
 -Photonen sind Teilchen 383
 Compton-Effekt 195, 198
 -Klein-Nishina-Formel 202, 409, 441, 442
 -Wirkungsquerschnitt 202
 -quantenfeldtheoretisch 409
 Compton-Kante/-Untergrund im γ -Spektrum 224
 Compton-Wellenlänge 200
 -im Feynman-Propagator 415
 -in Yukawa-Hypothese 483
 -vs. klass. Elektronen-Radius 203
confinement 615, 617, 628
conserved vector current (CVC) 650
 Cooper, Leon (*1930)
 -Theorie d. Supraleitung (1958) 569
 Coulomb-Anregung von Rotations-Niveaus 310
 Coulomb-Eichung des Maxwellfelds (schließt die virtuellen Zustände für das Coulomb-Feld aus) 409
 Coulomb-Energie E_{Coulomb}
 -Tröpfchen-Modell 105
 -verschieden je nach Symmetrie bei Teilchenvertauschung 393
 Coulomb-Kraft 87
 -Coulomb-Parameter $e^2/(4\pi\epsilon_0)$ 42, 62
 -ist α (Feinstruktur-Konst.) $\cdot \hbar c$ 43
 -Reichweite ∞ 129, 422, 423
 -Skalen-Invarianz 61, 423, 468
 -Virial-Satz 87, 206, 228
 -beherrscht Atomphysik 70, 71, 98, 116, 207, 221, 318, 510, 615, 666
 -dominant in makroskopischen Prozessen 71, 535, 633, 652
 -entsteht durch virtuelle Photonen 406, 671
 -hält Elektronen im Kern? 87
 Coulomb-Phase η_{Coulomb} 130, 149
 Coulomb-Potential
 -abgeschirmtes 128, 131
 -Feynman-Propagator 415
 -durch Photonen-Austausch 403
 Coulomb-Streuung *siehe Abschn. 5.4*, 58
 -Streuamplitude/Wirkungsquerschnitt 128
 -an Ladungsverteilung 137

- klassische Rechnung auch quantenmechanisch richtig 130
 - wellenmechanische Charakterisierung 130
 - Coulomb-Term (Tröpfchen-Modell) 105
 - Coulomb-Wall 107, 340, 359
 - counts (Zählerstand) 223
 - Cowan, Clyde (*1919, †1974)
 - Neutrino-Nachweis (1956) 234, 246
 - CP-Invarianz 550, 633
 - CP-Verletzung 558, 633, 676
 - , „schlimmer“ als P-Verletzung 559
 - und 3 Quark-Familien 648
 - CPT-Symmetrie 633, 669, 676
 - π^\pm -Lebensdauern gleich 491
 - CP verletzt \rightarrow Zeitumkehr-Invarianz verletzt 559
 - Teilchen/Antiteilchen 447, 562, 669
 - Theorem 562
 - Voraussetzungen 562
 - am genauesten geprüft 563
 - garantiert die Antiteilchen 522
 - Cronin, James (*1931)
 - Superposition Teilchen/Antiteilchen? 517
 - Zeitumkehr-Invarianz verletzt 518
 - CRT (cathode ray tube) 14
 - Curie, Marie (*1867, †1934)
 - Radioaktivität ist Eigenschaft einzelner Atome 162
 - Tod durch Leukämie (1934) 27, 241
 - zwei Nobelpreise 26
- D**
- Δ -Teilchen
 - Vergleich mit Λ 537
 - Verzweigungsverhältnisse ($\Delta \rightarrow \pi^{0,\pm} + \text{Nukleon}$) und Isospin 512
 - erstes Resonanz-Teilchen 169
 - vs. Pauli-Prinzip bei Quarks 593
 - d-Quark *siehe down-Quark* (*b*)
 - Dalton, John (*1766, †1844)
 - Atomhypothese 4
 - Element-Begriff (~ 1803) 82
 - Dampfdruck
 - bei kleinen Tropfen 105
 - in der Blaskammer 528
 - Darwin, Charles (*1809, †1882)
 - Entstehung der Arten* (1859) 335
 - Davis, Raymond (*1914, †2006)
 - Sonnen-Neutrinos 471
 - Davisson, Clinton J. (*1881, †1958, Interferenz von Elektronen an Kristallen 1927) 134
 - de Broglie, Louis (*1892, †1987, Materiewellen 1923) 124, 131, 383, 524
 - Debye, Peter (*1884, †1966)
 - spez. Wärme 11
 - Deformierter Kern 115, 340
 - Quadrupolmoment Q 299
 - Rotation 309
 - Dekohärenz 135
 - Dekuplett
 - Hadronen 586, 593, 597
 - 1962 noch unvollständig 628
 - Delta-Funktion $\delta(x)$ 138, 313
 - benutzt, bevor mathematisch begründet 631
 - Demokrit (* ~ 460 , † ~ 371)
 - Atom-Hypothese 1
 - Rettung der Phänomene 651
 - Denkverbote
 - , „Überlagerung Teilchen/Antiteilchen ist Blödsinn“ 517
 - Elementarladung kann gebrochen sein? 583
 - Spiegelsymmetrie kann verletzt sein? 443, 500, 539, 543
 - Teilchen nicht von anderen isolierbar? 623
 - identische Teilchen einzeln benennen? 390
 - identische Teilchen unterscheidbar? 445
 - neue Teilchen einführen? 74
 - neutraler schwacher Strom? 577
 - und *ad hoc*-Annahmen 575
 - zwei gleiche Gegenstände nicht doch unterscheiden können? 396
 - Dennison, David (*1900, †1976)
 - spez. Wärme beweist Spin des Protons 272
 - Detailliertes Gleichgewicht 385, 386, 560
 - Detektor *siehe Abschn. 11.5.2*, 526
 - Halbleiterdetektor 223
 - Szintillator 225
 - Zählrohr 156
 - immer größer für feinere Auflösung 480
 - Deuteron (*d*)
 - $\pi^- + d \rightarrow n + n$ 500
 - $p + p \rightleftharpoons d + \pi^+$ 497
 - Bindungsenergie ergibt Neutronenmasse 98
 - Photo-Spaltung 98
 - Vorhersage (Rutherford 1920) 86

- als Projektil 242
- einziges stabiles 6-Quark-System 652
- in Kernfusion 362
- magnetisches Moment 287
- differentieller Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$
 siehe Abschn. 5.3, 48, 57, 127
- Diffusion
 - Isotopen-Anreicherung 348
 - macht Atomanzahl bestimmbar 7, 181
- digitale Elektronik (Anfänge) 156, 177
- digitales Zeitalter 1, 175
 - Geiger-Zähler ein Vorbote 156
 - Zähler-Experimente 177
- Dimensions-Betrachtung
 - Compton-Effekt 200
 - Coulomb-Energie im Tröpfchen-Modell 105
 - Coulomb-Kraft skaleninvariant 61, 468
 - Rutherford-Streuung 53
 - Zerfallskonstante 160
 - Zusammenhang Länge und Masse 483
 - klassischer Elektronen-Radius 203
- Dipol-Operator
 - γ -Emission E1/M1 216, 297
- Dipolmoment
 - elektrisches 295, 313
 - elektrisches? *siehe Abschn. 7.4.1*
 - magnetisches *siehe magnetisches Moment*
- Dirac, Paul A.C. (* 1902, † 1984) 588
 - , „Spielen mit Formeln“ 426, 430
 - Besonderheit identischer Teilchen 146
 - Quantisierung des elektromagnetischen Felds 385
 - Störungstheorie (1926) 164, 196
 - hat Fermi-Statistik übersehen 450
- Dirac-Gleichung *siehe Abschn. 10.2*
 - , „nacktes“ Elektron 636
 - Compton-Effekt 202
 - Lorentz-Invarianz 437
 - Paar-Erzeugung 209
 - Voraussage Antiteilchen 426
 - für Quarks 592
 - nicht spiegelinvariant? 437
- Dirac-Kopplung 436
 - elektromagnetisches Feld im Hamilton-Op. 436
- Dirac-Matrizen 430
 - γ^5 447
 - γ^μ 438
- Dirac-Raum 434
 - Ursprung der Antiteilchen 441
 - Ursprung der Chiralität 447
 - Ursprung des Spins 433, 440, 667
- Ursprung des magnet. Moments 435, 667
- Dirac-Spinor 434
 - Bedeutung der Komponenten 440
 - Lorentz-Transformation 439
 - Paritäts-Transformation 437
 - Übergangstrom axial 566
 - Übergangstrom vektorieell 441, 566
- Diracsche Unterwelt 209, 380
 - Deutung der β^+ -Radioaktivität 242
 - in Quantenfeldtheorie 420
 - konnte nicht überzeugen 443
 - nicht bemerkbar 209
 - nicht mehr Stand der Wissenschaft 243, 416
- diskrete Anregungsenergien
 - bei Kernen festgestellt (an Konversions-Elektronen) 221
- Dopingmittel (Massenspektroskopie) 73, 94
- Doppelspalt-Experiment 379
 - populär im Welle-Teilchen-Dualismus 384
 - vs. Stoß identischer Bosonen 147
 - vs. Stoß identischer Fermionen 147, 149
- down-Quark (d) 583, 588, 631
- „Dreck“-Effekt 15
 - 1928: Polarisation der β -Elektronen 543
 - Schwärzung von Becquerels Fotoplatte? 26
 - bis 1909: rückgestreute α -Teilchen 49
 - bis 1973: neutraler schwacher Strom 576
 - in Bildern mit Teilchenspuren 576
 - macht weite Extrapolation riskant 368
- Drehimpuls (j, ℓ, s, I, \dots) *siehe Abschn. 7.1.1*
 - Addition quantenmechanisch 87, 256
 - abwechselnde Symmetrie 255, 454, 597
 - auch bei Isospin T 511, 591
 - Auswahlregel 219, 298
 - Bahn-, Spin-, Gesamt-Drehimpuls 255, 667
 - Bedeutung für Teilchen, Kerne, Atome, Moleküle 252
 - Nachweis durch erhöhte Zustandsdichte 276
 - Quantelung universell 257
 - gekoppelt 262
 - unanschaulich in der Quantenmechanik *siehe Abschn. 7.1.3*, 265
 - und Drehung 259, 264, 667
 - von Oszillator-Zuständen 325
- Drehimpuls-Erhaltung
 - , „... ist die halbe Kernphysik“ 216, 250

- Unterscheidung Neutrino/Antineutrino 474
- bei γ -Übergängen 219
- bei Rotationsinvarianz im Raum 259, 633
- verletzt bei β -Radioaktivität? 233
- Drehimpulseigenzustand 251, 252
 - Kugelfunktion 251, 252, 268
- Drehoperator
 - im Ortsraum \mathbb{R}^3 251, 252, 521
 - im Raum der $SU(3)$ 521
- Druckkessel (Nuklear-Kraftwerk) 353
- Druckwasserreaktor 353
 - Kraftwerk 354
- Dunkle Materie 20, 469, 660
- E**
- Eddington, Arthur S. (*1882, †1944, Sternenergie aus Fusion 1920) 336
- Edelgase 12, 157, 470
- effektive Wechselwirkung
 - macht klassisches Potential 403
- effektives Zentral-Potential
 - aus Coulomb-Abstoßung 100
 - aus kurzreichweitiger Kraft? 319, 322, 329
- efficiency* des Detektors (ϵ) 177
- Ehrenfest'sches Theorem 124
- Eichboson
 - Konstruktion 567
 - Masse Null 568
 - Masse durch Higgs-Mechanismus 568, 574
- Eichgruppe (abelsch/nicht abelsch) 568
- Eigenwert v , 119
 - als Messwert möglich 120
 - reell bei hermiteschem Operator 403
- Eigenzustand
 - des richtigen Hamilton-Operators: absolut stabil 164
 - näherungsweise richtiger 164, 475, 552, 599
 - vs. Wellenpaket 124
- Einfachstreuung 57
- eingefrorener Freiheitsgrad 10, 272
 - Einfrieren durch Fusion 369
- Einheitszelle
 - Kristall-Gitter 139
 - Phasenraum 120
- Einstein, Albert (*1879, †1955)
 - A - und B -Koeffizienten 386
 - $E = mc^2$ 75, 97
 - „Ausstrahlung in Kugelwellen gibt es nicht“ 385
 - Atombombe angeregt 357
 - Bedeutung des Zerfallsgesetzes 156, 163
 - Brownsche Bewegung 13
 - Plancksches Strahlungsgesetz gedeutet 213, 385
 - Quanten 383
 - Relativitätstheorie v , 17
 - und der LASER 386
- Einstein-de Haas-Effekt 261
- Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon 385
- Einzelteilchen-Modell 317
 - Anregungsform „Leuchtelektron“ 305
 - Erfolg durch Pauli-Prinzip *siehe Abschn. 7.6.4*, 331
 - Synthese mit Kollektiv-Modell 314
 - bei Kern/Atom/Festkörper 329
- Eisen-Nickel-Kern (Stern) 374
- Eisen-Peak 72
 - Bildung in Supernova 375
- elastischer Stoß 31
 - α -Teilchen-Elektron 31
 - Elektron-Kern 136
 - Elektron-Proton 601
 - Photon-Elektron 200
- electron capture (EC)* *siehe* Elektronen-Einfang
- Elektrische Momente 295
- Elektrochemie (Faraday-Gesetze) 14
- Elektrolyse (Isotopen-Anreicherung) 349
- Elektromagnetische Wechselwirkung *siehe Kap. 9*
 - dominiert Alltagsprozesse 653, 666
 - erste Quanten-Feldtheorie 379
 - wirkt makroskopisch 633
- elektromagnetischer Übergang
 - Vektorstrom aus Dirac-Spinoren 441
 - beim Kern 217
- Elektron (e, e^-) *siehe Kap. 10*, 2, 14, 15, 379
 - „angezogenes, nacktes“ 421, 636
 - Masse m_e 15
 - genau 96
 - anomaler g -Faktor $g \neq 2$ 382, 636
 - Präzisionsmessung 443
 - QED*-Vorhersage 636
 - anomaler g -Faktor $g \neq 1$ 427, 435
 - anomaler Drehimpuls 427
 - im Atomkern 83, 242
 - im Atomkern? 88, 230, 624
 - klassischer Radius $\sim 10^{-15}$ m 203, 468
 - kleiner als 10^{-18} m 469
 - magnetisches Moment 87
- Elektron-Loch-Paare
- Halbleiter vs. Vakuum 210
- Elektron-Positron-Schauer

- Fingerabdruck zur Unterscheidung von Myonen 463
- im Kamiokande-Detektor 471
- weiche Höhenstrahlung 494
- Elektronegativität
 - und chemische Verschiebung 295
- Elektronen-Einfang (EC) *siehe*
 - Abschn. 6.5.10**, 241
 - β^+ -Radioaktivität 183, 242
 - Argon-37 470
 - Kalium-40 243
 - Radioaktivität chemisch beeinflusst 243
- Elektronendichte n_e 38
 - beeinflusst Zerfallskonstante 243
- Elektroschwache Wechselwirkung 226, 533, 536, 571
 - Neutrale Ströme 572, 647
 - Renormierbarkeit
 - nur ohne Anomalie 567, 651
 - Vorbild für *QCD* 585
 - charm*-Quark vorausgesagt 586
 - bis 1974 hypothetisch 610
 - elektrische Ladung hat 2 Bestandteile 572, 573
 - macht falsche Vorhersage? 630
 - und Quark-Lepton-Symmetrie 650
 - und Zerfallsraten des Z^0 643
- elektrostatische Wechselwirkung (klass.)
 - Coulomb-Energie im Tröpfchen-Modell 105
 - entsteht in Quanten-Elektrodynamik 381, 407
 - invariant gegen Drehung im Raum 510
- Elementarladungen
 - „Atom der Elektrizität“ 14
 - Quarks (el.) vs. Neutrino (schwach) 605
 - gebrochen 583, 588, 606
- Elementarteilchen
 - „weiche“ Definition im Teilchenzoo 481
 - Atome? 3, 14
 - Prozesse: durch Erzeugung/Vernichtung 381, 667
 - die ersten modernen 14
 - grundlegende Eigenschaften *siehe*
 - Abschn. 9.3**
 - im 19. Jahrhundert *siehe* **Abschn. 1.1**
 - keine inneren Freiheitsgrade 200, 664, 675
 - ununterscheidbar 381, 390, 669
- Elemente
 - Begriff (Lavoisier 1789) 4, 82
 - Entstehung aus Wasserstoff *siehe*
 - Abschn. 8.5**, 4, 86, 333, 364, 368, 373
 - Häufigkeit im Sonnensystem 71, 336, 369
 - Obergrenze durch Tröpfchen-Modell 116
 - ordnungstiftendes Konzept 4, 481
- Ellipsoid 115, 299
- Emanation, radioaktive
 - Zerfallsgesetz entdeckt (Rutherford 1900) 157
 - aus Erdboden und Mauern 182, 354
- Emission
 - Übergang, Quantensprung 165
 - induzierte 292, 386
 - grundlegend für LASER 387
 - im Wellenbild einfach zu entdecken 387
 - spontane 163, 213, 386
- Endzustand
 - beim Stoß 127
 - in der Goldenen Regel 166
- Energetik (Anti-Atomismus) 13
- Energie *E*
 - Anregung bei Molekül/Atom/Kern/Nukleon aus Drehimpulsquantelung 258
 - Bedeutung außerhalb der Physik 336
 - Kern-Bindung 75, 97, 336
 - Kern-Spaltung 101, 339
 - Molekül-Bindung 27, 336
 - bei Kern-Fusion 336, 358
 - chemische 27, 75, 333
 - der Sterne 364
 - in Hochenergie-(Kern)-Physik 249
 - in Niederenergie-Kernphysik 258
 - negative? 434
 - thermische 10, 336
 - typische Größenordnungen 336
 - typische bei Kernumwandlungen 27, 157, 333
- Energie-Erhaltung
 - Nebenbedingung der Goldenen Regel 166
 - Widerspruch zur Radioaktivität (1900)? 333
 - bei β -Umwandlung? 231
 - bei Innerer Konversion 221
 - bei Translations-Invarianz in der Zeit 633
 - beim Compton-Effekt 199
 - beim Photo-Effekt 193
- Energie-Impuls-Beziehung
 - für reelles Teilchen 403, 671
 - ist verletzt bei Austauschteilchen 381, 633, 672
 - ungültig im gebundenen Zustand 205
 - ungültig im virtuellen Zustand 381, 405

- verbietet Emission und Absorption an klassischen Teilchen 405
- Energie-Nenner
 - im Feynman-Propagator 414, 485
 - in Resonanz-Kurve 168
 - in Störungstheorie 1. Ordnung 168
 - in Störungstheorie 2. Ordnung 407
- Energie-Unschärfe 168
 - Mössbauer-Effekt 173
 - Niveaubreite 164
 - Riesenresonanz 308
 - bei Resonanz-Teilchen 361
 - bei metastabilem Zustand immer 164
 - durch Paritätsverletzung 548
 - durch Schwache Wechselwirkung 555
 - natürliche Linienbreite 173
- Energie-Zeit-Unschärferelation 168, 610
- Energieauflösung
 - γ -Detektor 225
 - Mössbauer-Effekt 173, 285
- Energieverlust
 - ergibt Tiefenprofil 48
 - maximaler bei α -e-Stoß 34
- Entartungsgrad
 - Dimension des Zustandsraums 260
 - Niveau mit Drehimpuls 260, 271, 497
 - Statistisches Gewicht 270
- Entropie 7
 - irreversibles Anwachsen 12, 535
 - und subjektives Zeitempfinden 560
 - klassische Berechnung falsch 670
 - klassische Berechnung und Wirkungsquantum 121
- Erdalter 156
 - Lord Kelvins Schätzung 334
 - Meteoriten-Alter 175
- Erhaltungssatz *siehe Abschn. 15.11*, 675
 - Baryonenzahl A 244, 668
 - rein empirisch 480, 633
 - Fermionenzahl 668
 - Impuls/Energie im Wechselwirkungs-Operator 402
 - Leptonen-*flavor* 463, 649
 - verletzt 464
 - Leptonenzahl L 244
 - rein empirisch 633
 - Zweifel beim β -Zerfall 157, 231
 - Zweifel beim Compton-Effekt 157, 195, 202
 - bei Paar-Vernichtung 210, 389
 - bei Symmetrie des Hamilton-Operators 508, 633
 - elektrische Ladung Q
 - in Symmetrie begründet 507, 675
 - nicht durch Starke Wechselwirkung modifiziert 606
 - im Standard-Modell 633
 - klassischer 675
 - in Symmetrie begründet 675
 - makroskopisch nur im Idealfall gültig? 675
 - meist in Symmetrie begründet 633
 - nur näherungsweise erfüllt 480, 533, 676
 - strikt gültig 533
- Erwartungswert $\langle x \rangle$, $\langle \psi | \hat{O} | \psi \rangle$ 120, 178
 - Berechnung (Beisp. Chiralität) 449
 - Poisson-Verteilung 177
 - folgt den klassischen Gesetzen 124, 259, 293, 297, 460
- Erzeugung von Bosonen
 - Photon 193, 413
 - wie „Kaninchen aus dem Hut“ 507
- Erzeugung/Vernichtung *siehe Abschn. 15.4*, 157, 380
 - bei *allen* Teilchen 380, 389, 667
 - eines Photons 193
 - Grundprozess der elektromagnetischen Wechselwirkung 402
 - von Materie v, 226, 667
- Erzeugungoperator (\hat{a}^\dagger) 397, 668
- erzwungene Schwingung
 - Resonanzkurve/Dämpfung 168
- EURATOM, Gründung 358
- exakt lösbares Problem
 - in der Quantenfeldtheorie: keins 382
 - in der Quantenmechanik: wenige 388
- experimentum crucis*
 - Unterschied Myon/Elektron 463
 - des Standard-Modells 635
 - innere Reibung von Gasdichte unabhängig 7
 - kann eine ganze Theorie widerlegen 88
- Exponentialgesetz
 - Beer-Lambert 197
 - Reichweiteverteilung 197
 - besondere Charakteristik 159
- exponentielles Zerfallsgesetz 157
 - Entdeckung (1900) 155, 157
 - auch in komplizierten Abläufen 185
 - für Lichtemission 386
 - in Konflikt mit Kausalität 155
 - kein Altern feststellbar 163, 170
 - und Zeitumkehr-Invarianz 561
- Extrapolation (parametrisches Modell) 113
 - große: riskant 368
 - vom H-Atom zum Quark-Quark-System 613

F

- Fallout
 von Atombomben, Unfällen etc. 184, 363
- Faraday, Michael (*1791, †1867)
 -Elektrolyse 14
 -klassischer Feld-Begriff 402
- Farbladung 586, 594, 614
 -Erhaltungssatz 618
- farblos *siehe* Auswahlregel „weiß“
- Farbraum
 -„weißes“ Gluon ausschließen 616, 679
 -Freiheitsgrad bei Quarks 596
- Fehl Anpassung
 -Sendeantenne und Wellenlänge 217, 219
- Fehlerfortpflanzungsgesetz 115, 133
- Fehlergrenzen ($\pm\sigma, \pm2\sigma, \pm3\sigma$) 180
 -Benennung unglücklich 177
- Feinabstimmung
 - ${}^8_4\text{Be}$ knapp instabil 102, 373
 -Problem des Standard-Modells 660
- Feinstrukturaufspaltung
 -2-Phononen-Zustand 315
 -Atomhülle 262
 -durch Spin-Bahn-Wechselwirkung 229, 328
 -im Hadronen-Multiplett 598
- Feinstrukturkonstante α
 -Stärke der elektromag. Wechselwirkung 44, 45, 212, 407, 423, 574, 612
 -durch g -Faktor-Anomalie am genauesten 639
- Feld-Begriff, klassisches Kraftfeld
 durch Quantenfeldtheorie gedeutet 402
- Feld-Quantisierung 379
 -Operatoren an Stelle von Feldstärken 214
- felderzeugende Ladungen 381, 480, 573, 615, 632, 673
- Feldgradient, elektrischer
 Quadrupolwechselwirkung 301
- Feldquanten
 -Erzeugung und Vernichtung 214, 380
 -ununterscheidbar 381
- Fermi, Enrico (*1901, †1954)
 -„Versuch einer Theorie der β -Strahlen“ (1934) 231, 234, 239, 537
 -Matrixelement 237, 239, 244
 -4-Faktor-Formel für Kettenreaktion 351
 -Forschung mit Beschleunigern 502
 -Schwache Wechselwirkung 239, 400
 -erster Reaktor (1942) 352
 -falsche Transurane 344
 -Nobelpreis irrtümlich 346
 -größenordnungsmäßige Abschätzung der ersten Atombomben-Explosion 357
- Fermi-Dirac-Statistik 280, 450
 -Dirac-Theorie 449
 -täuscht Abstoßung vor 451
- Fermi-Energie (E_F) 108
 -erster Nachweis bei Nukleonen 488
- Fermi-Gas
 -Nukleonen im Tröpfchen-Modell 108
 -ideales (Beispiele) 108
- Fermi-Wechselwirkung 563
 -Matrixelement 237, 239, 244
- Fermion *siehe* **Kap. 10**, 136, 149, 227, 251, 252, 279, 397, 666
 -2 Fermionen = 1 Boson? 280
 -Name (von Dirac, 1940) 450
 -Pauli-Prinzip 425
 -Spin halbzahlig 425
 -Stoß zweier identischer 149
 -Teilchenzahl immer erhalten 390, 632
 -fundamentale Teilchenklasse 631
 -in Feynman-Diagramm 417
 -magnet. Moment größer als klassisch möglich *siehe* **Abschn. 10.2.4**, 426
 -mit *Materie* assoziiert 631
 -negative Vertauschungs-Symmetrie 149, 453
 -legt Quark-Zustand fest 595
 -nicht Quant von klassischem Feld 453
- Feynman, Richard (*1901, †1954) 380
 -moderne Physik in 1 Satz 13, 664
- Feynman-Diagramm *siehe* **Abschn. 9.7**, **15.10**, 380, 411, 632, 673
 -1. und 2. Ordnung 412
 -Fermi-Wechselwirkung 564
 -Fermionen-Linie in Pfeilrichtung durchlaufen 418, 565, 626
 -Vertex (\bullet) 412
 -elementare Prozesse 412, 565, 579, 616, 618, 632
 -exakte Bildersprache 414, 673
 -für Z^0 -Zerfälle 643
 -für Schwache Wechselwirkung 565
 -höherer Ordnung 419, 638
 - g -Faktor auf 12 Stellen genau 639
 -Genauigkeit der Quanten-Elektrodynamik 419
 -mit „Photon-Photon-Streuung“ 639
 -mit Vakuumpolarisation 638
 -mit Antiteilchen 416, 562
 -zeigt nicht die Trajektorien 416
- Feynman-Graph *siehe* Feynman-Diagramm
- Feynman-Propagator 129, 414, 415, 485
 -gibt die Streuamplitude $f(\Delta k)$ an 415

- Feynman-Regeln 411, 414
 Finanzmittel
 größere für kleinere Systeme 480
 Fingerabdruck zum Teilchennachweis 73
 -Neutrino (1955) 244
 -Quarks durch Paarerzeugung 608
 -von großen Molekülen 94
 Fitch, Val (*1923, Zeitumkehr-Invarianz verletzt 1964) 518
flavor 464, 519, 588
flavor-Ladung 519, 677
 -Umwandlung nur durch Schwache Wechselwirkung 591, 677
flavor-Raum (Drehung) 627, 634, 646
 Formfaktor 138, 600
 Fortschritt der Wissenschaft
 -durch Spekulation im Überschuss-Formalismus 453
 -planbar (Manhattan-Projekt) 358
 -schwer erarbeitet v, 519
 Fotoplatte 25, 78, 486, 487, 525, 526
 Fourier-Transformierte
 -Coulomb-Potential 129
 -Schwebung: 2 Frequenzen 557
 -der Ladungsverteilung: Formfaktor 138
 -der Orts-Wellenfunktion: Impuls-Wellenfunktion 206
 -der gedämpften Schwingung: Resonanzkurve 170
 -des Potentials: Streuamplitude 128
 Fourier-Zerlegung der Streuwelle 126
 Fowler, William (*1911, †1995, Element-Entstehung 1957) 377
 Franklin, Benjamin (*1706, †1790)
 el. Ladungsvorzeichen 549
 freies Radikal 295
 freies Teilchen 123, 397, 398
 Freiheit, asymptotische 628
 Freiheitsgrade f 8
 -2-atomiges Molekül 11
 -Farbe (bei Quarks) 594
 -Massenpunkt $f = 3$ 9
 -T-Abhängigkeit beim H_2 -Molekül 11, 273
 -aufgetaut 273
 -eingefroren 10
 -durch Bindung 369, 498
 -im Nukleon 619
 -minimale Anzahl 10, 651
 -mit minimalem Wertebereich 263, 267
 -starrer Körper $f \geq 6$ 8
 Friedman, Jerome I. (*1930, Skalenverhalten e - p -Streuung 1972) 604
 Frisch, Otto (*1904, †1979)
 -Kernspaltung bestätigt 346
 -Kernspaltung erklärt 115
 Fundamental-Darstellung ($SU(3)$) 587
 fundamentale Konstanten: c , \hbar , γ 43, 45, 659
 fundamentale Teilchen *siehe Abschn. 9.3, 15.1, 15.2, 15.12*, 2, 631, 664, 666
 -4 verschiedene (1933: e , p , n , γ)? 677
 -6 verschiedene (1933: e^\pm , p , n , γ , ν)? 89
 -61 verschiedene (Standard-Modell)? 677
 -9 wesentlich verschiedene (1998) 680
 -92 verschiedene (vor 1900)? 678
 -93 verschiedene (\sim 1919)? 70
 -Begriff 678
 -für alt: „Elementar“-teilchen 481, 634, 664
 -nur 3 Familien 173, 643
 -nur ein einziges (1815)? 4
 -unentdeckte übersehen? 634, 641
 -wie viele Arten gibt es 677
 fünfte Naturkraft?
 -keine Anzeichen für 634
 fünfte Naturkraft? 559
 Fusion *siehe Abschn. 8.3*, 75, 358
 -2 Protonen zum Deuteron 364
 -2 Stickstoff zu Silizium 102, 357
 -3 α zu ^{12}C 372
 -4 Protonen zu α 333, 368
 -technische Nutzung 362
 -thermonukleare 361
 Fusions-Reaktor 363
- ## G
- γ -Detektor
 -Energie-empfindlicher 222
 γ -Spektroskopie *siehe Abschn. 6.4.8*, 222
 γ -Strahlen *siehe Abschn. 6.4*, 26, 192
 -Benennung 26, 157
 -Beugung (Rutherford 1914) 194
 -Durchdringungsfähigkeit 207
 -elektromagnetische Wellen 192
 (g -2)-Experiment
 -Elektron/Positron 444
 -Myon 461
 g -Faktor *siehe Abschn. 15.3*
 -Dirac-Theorie 435
 -für Nukleonen? 286, 592
 -Elektron/Positron
 -Anomalie 382, 426, 443
 -Präzisionsmessung 443
 -*QED*-Vorhersage 636
 -Kerne 288

- Myon
 - Anomalie 459, 636
 - Präzisionsmessung 459
 - QED*-Vorhersage 636
- Proton/Neutron 284, 291, 592
- Galilei (*1564, †1642)
 - Naturgesetze universell 333
 - Trägheitsprinzip vi
- Gamov, George (*1904, †1968)
 - Tunneleffekt (1928) 188
 - Urknall-Theorie (1946) 371
- Gamov-Faktor 190
 - und Fusionsquerschnitt 359
- Gangunterschied 134
 - Hofstadter-Streuung 137
- Gasentladungen 14
- GAU (größter anzunehmender Unfall) 354
- Gauss, Carl Friedrich (*1777, †1855)
 - Gauss'sche Glockenkurve 35, 178
 - Gauss'sches Durchflutungsgesetz 36
- Gay-Lussac, Joseph L. (*1778, †1850),
 - Atomhypothese 4
- gedämpfte Schwingung
 - Linienbreite ($\Delta\nu$, $\Delta\omega$) 170
- Gedanken-Experiment
 - Doppelspalt-Versuch 147
 - international gebrauchter Begriff 189
- Gehör
 - im Standardmodell: elektromagnetisch 654
- Geiger, Hans (*1882, †1945)
 - Geiger-Nuttal-Auftragung 189
 - Geiger-Zähler 59
 - Null-Effekt 184
 - hörbar tickend 156
 - Rutherford-Formel getestet 59
- Gekoppeltes Pendel (Modell für jedes
 - 2-Zustands-System) 556
- Gell-Mann, Murray (*1929) 614
 - Ω^- -Teilchen vorhergesagt 521, 588, 599, 628
 - Der *Achtfache Weg* 480
 - Quark-Hypothese (1964) 583, 587, 628
 - Seltsamkeit und Schwache Wechselwirkung 537
 - Superposition Teilchen/Antiteilchen vorhergesagt 517
 - strangeness*-Oszillation vorhergesagt 517
 - SU(3)*-Symmetrie 521
 - Begründung ähnlich wie Periodensystem 5
 - neue Ladung *strangeness* (S) 515
- Gell-Mann-Nishijima-Relation 518
- Generationsdauer (Reaktor/Kettenreaktion) 351
- geologische Zeiträume
 - Konstanz von Energie und Übergangsrate 175
 - Meteoriten-Alter 175
 - länger als das Leuchten der Sonne? 335
- geometrische Optik
 - Massenspektrometer 92
 - und Standard-Modell 654
 - und Wellenoptik 383
- Germanium (Ge)
 - γ -Detektor 223
 - Element vorhergesagt 668
- Germer, Lester H. (*1896, †1971, Interferenz
 - von Elektronen an Kristallen 1927) 134
- Gerthsen, Christian (*1894, †1956)
 - Interferenz von Projektil und Target bei *p-p*-Stößen 150
- Geruchssinn, Geschmackssinn
 - im Standardmodell: elektromagnetisch 654
- Gesetz der großen Zahl (Poisson-Verteilung) 181
- Gezeiten – warum unanschaulich? 147
- gg-Kern
 - Boson 278
 - Paarungs-Energie 109
 - größere Häufigkeit 103
- Gibbs, Josiah W. (*1839, †1903)
 - Gibbs'sches Paradoxon und Ununterscheidbarkeit von Teilchen 449, 670
- GIM*-Mechanismus 576
 - Begründung des 4. Quark 647
- Gitter-Eichtheorie (FN) 619
- Gitterkonstante 98, 134
- Glanzwinkel θ_{Bragg}
 - Braggsche Beugung 98, 194
- Glashow, Sheldon
 - Vereinigung von Elektromagnet. und Schwacher Wechselwirkung 536, 571
- Gleichverteilungssatz
 - (Clausius/Boltzmann) 9
- Glockenkurve
 - Poisson- und Gauss-Verteilung 178
- Gluon (g) 586, 631, 666
 - 50% des Proton-Impulses 621
 - Basiszustände im Farb-Antifarbraum 616, 679
 - Masse 617
 - abgestrahlt 621
 - bewirkt *confinement* 618

- für Elektron und Neutrino unsichtbar 621
- freie *glueballs*? 621
- nur 8 (kein „weißes“) 616, 679
- Goepfert-Mayer, Maria (*1906, †1972, Schalen-Modell 1948) 116, 319, 326
- Goldene Regel 156, 162, 165
 - Dipol-Übergang 297
 - Phasenraum-Faktor dn/dE 234, 419, 553
 - für alle relativistischen Teilchen gleich 217, 235, 467
 - beim Photoeffekt 207
 - ergibt auch Wirkungsquerschnitt 127, 166
 - erlaubt Bestimmung des Spins 497
 - für Wechselwirkung mit Photonen 196
 - ist von Pauli (von Fermi nur der Name) 165
 - zeitumkehrinvariant 213, 560
- Goldhaber, Maurice (*1911)
 - β^- -Teilchen sind Elektronen 227
 - Neutrinos linkshändig 546
- Göttinger Achtzehn (Protest gegen Atom-
bewaffnung 1958) 358
- Gravitation
 - (noch) nicht im Standard-Modell 381, 635, 653
 - Gravitationswellen 671, 673
 - schwächste Kraft, aber größter Massen-
defekt 377
- Gravitationsdruck (in Sternen) 373
- Graviton 635, 673
- GRID (Computernetz für LHC) 530
- griechische Philosophen 1, 665
 - Rettung der Phänomene 651
- Größenordnungen 7, 30, 52, 97, 113, 117
 - Abschätzung für Riesen-Resonanz 305
 - Avogadro-Konstante N_A 8
 - Beschleuniger-Entwicklung 525
 - Bethes Abschätzung für Neutronenachweis
(1934) 245
 - Charmonium vs. H-Atom 611
 - Energien 336
 - Stärke der Wechselwirkungen 502, 513
 - chem. Bindung vs. Kernkräfte 483
 - makro/mikroskopisch 7
- Gross, David (*1941, Quarks asymptotisch
frei 1973) 628
- Grundzustand
 - Niveaubreite Null 168
 - der *QFT*: nicht das absolute Vakuum 381
- Gruppentheorie
 - und Drehimpuls 259
 - und Symmetrien 508, 647
- Güte eines Resonators G 372
 - Compoundkern-Resonanz 372
 - Mössbauer-Effekt 173
 - Riesenresonanz 308
- H**
- H-Atom *siehe auch* Wasserstoff
 - Bindungs-Energie · Durchmesser =
Coulomb-Parameter 43
 - Hyperfeinstruktur-Aufspaltung 268
 - Modell für J/Ψ -Meson? 611
- H-Bombe 362
- Häcceität („dies und kein anderes“)
keine Eigenschaft der Teilchen 396
- Hadron *siehe Kap. 11, 13*
 - , „weiche“ Definition von „Elementarteil-
chen“ 481
 - Auswahlregel „weiß“ 595
 - Name (1962) 479
 - Reaktionen im Quark-Modell 590
 - Überlagerungszustand im Farbraum 614
 - bildet Teilchenzoo 481
 - in Mesonen-Wolke 625
 - magnet. Moment anomal 532
 - nicht punktförmig 532
- Hahn, Otto (*1879, †1968)
 - Kernspaltung entdeckt (1938) 344
 - Zerfallskurve von Spaltprodukten 159
- Halbleiter-Detektor 222, 526
- Halbleiter-Fertigung 65
- Halbwertsbreite
 - Energie-Unschärfe 168
 - Linie im Spektrum 224, 225
 - Z^0 -Masse 173, 580, 634, 643
 - partielle (Z^0 -Zerfall) 642
- Halbwertszeit $T_{1/2}$ 159, *siehe auch* Lebens-
dauer
 - , „partielle“ 161, 221
 - Beziehung zur Übergangs-Energie
 - α -Strahlung 187
 - β -Strahlung 232
 - γ -Strahlung 215
 - Messung 171
- Hamilton-Funktion 567
 - klassische für Ladung im elektromagnet.
Potential 436
- Hamilton-Operator \hat{H} 124
 - , „wahrer“, vollständiger 126, 164, 402
 - Vertauschbarkeit und Erhaltungsgröße
259, 395, 433, 440, 508, 548, 549
 - für Prozesse 399
 - für freie Teilchen 399
 - freies Strahlungsfeld (Dirac 1926) 388

- muss sämtliche möglichen Prozesse enthalten 402
- näherungsweise richtiger 164
- rotationsinvariant
 - Drehimpulsquantenzahl 259
 - im Oszillator-Modell 325
- ungestörter (\hat{H}_0) 126, 164, 389, 406, 628
- ,„wahrer“, vollständiger 329
- zweifache Bedeutung 400, 548, 555
- Hanford (USA)
 - Plutonium-Erzeugung 347
- hard core* (des Nukleons) 113, 375
- harmonischer Oszillator *siehe Abschn. 7.6.2*
 - Auf-/Absteige-Operator (\hat{a}^\dagger, \hat{a}) 324
 - in *QFT*: Erzeugungs/Vernichtungs-Operator 388
 - Eigenfunktionen 324
 - Oberflächen-Vibration 315
 - Phasenraum-Volumen 121
 - Quantisierung halbklassisch 121
 - Vorbild für Feld-Quantisierung 214
 - erstes Beispiel der Quantenmechanik (Heisenberg 1925) 388
 - erstes Beispiel der Quantenphysik (Planck 1900) 388
- Harteck, Paul (*1902, †1985, Ortho- und Para- H_2) 275
- Heisenberg, Werner (*1901, †1976) 71
 - Begriff Austauschwechselwirkung (1932) 482
 - Besonderheit identischer Teilchen 146
 - Isospin, Nukleon (1932) 89, 509
 - Kernwaffen-Entwicklung
 - beteiligt (vor 1945) 347
 - verweigert (1958) 358
 - Matrizen-Mechanik (1925) 122
 - Quantenmechanik 119, 196
 - Unbestimmtheitsrelation (1928) 124
 - Zweifel an der Quantenmechanik 230
- Heitler, Walter (*1904, †1981)
 - chemische Bindung durch Tunnel-Effekt (1928) 189
- Helium (He)
 - Atom neu entstanden? 28, 192
 - Bildung in Sternen 367
 - Bildung nach Urknall 371
 - He-He-Fusion nur über Resonanzen 372
 - Helium-Brennen 373
 - Masse 15
 - Ortho-/Para-He: 2 Elemente? 271
 - Streuung von α -Teilchen 123
 - entdeckt durch Spektralanalyse (1868) 16
 - entstanden aus α -Strahlen 28
 - höchste Ionisierungsenergie 27
- Helizität \hbar 539
 - Dirac-Theorie 440
 - Neutrinos 545
 - Unterscheidung Neutrino/Antineutrino 474
 - nicht Lorentz-invariant 448
 - und Chiralität 448
- Hess, Victor (*1883, †1964, Höhenstrahlung 1912) 184, 210
- Higgs (H)*
 - gesucht am *Large Hadron Collider (LHC)* 635, 658
 - notwendig für Standard-Modell 635
 - virtuelle Wirkung 658
 - wahrscheinlicher Massenbereich 658
- Higgs, Peter (*1929)
 - Higgs-Boson (H) vorhergesagt 537, 569
 - Higgs-Mechanismus 568, 574
- Higgs-Boson *siehe Higgs (H)*
- Hilbert-Raum v
- Himmelsblau 13
- Hintergrundstrahlung
 - Mikrowellen und Urknall 378
- Hiroshima
 - Zerstörung durch Uran-Bombe (1945) 357
- Hochenergie-Beschleuniger 525
- Hofstadter, Robert (*1915, †1990)
 - Elektron-Streuung am Kern *siehe Abschn. 5.6*, 112, 136, 601
 - Nukleon nicht punktförmig 137
- Höhenstrahlung 183, 525
 - Elektron-Positron-Schauer 494
 - Myon entdeckt (1936) 454
 - Paarerzeugung entdeckt 209
 - Positron entdeckt (1932) 210, 426
 - Quelle Pulsare? 377
 - harte Komponente 487
 - keine Quarks 584
 - weiche Komponente 494
- Homestake-Mine
 - Neutrino-Nachweis 470
- t'Hooft, Gerardus (*1946)
 - Renormierbarkeit auch mit massiven Austauschteilchen (1971) 571
- Hoyle, Fred (*1915, †2001)
 - 3α -Fusion braucht 2 Resonanzen 373
- Hund, Friedrich (*1896, †1997)
 - Rotationsbanden der Moleküle erklärt 269
- Huygens, Christiaan (*1629, †1695)
 - Huygenssche Elementarwellen: kohärente Summierung 149

- Hybridisierung
 sp-Orbitale in Atomen 282
- Hyperfeinstruktur 262, 278
 -Atomuhr 95
 -Quadrupolmoment Q 299, 314
- Hyperladung
 -Schwache 573, 657, 680
 -Starke 587
- I**
- ideales Fermi-Gas 108
 ideales Gas 9
 -Atomgewichtsbestimmung 76
- identische Teilchen *siehe Abschn. 9.3.3*, 669
 -Abstoßung/Anziehung durch Vertauschungssymmetrie? 451
 -Frage nach unterschiedlicher Herkunft unzulässig 8, 445
 -experimentelle Demonstration 150
 -Pauli-Prinzip 209, 227
 -Problem für die Logik 396
 -Stoß/Streuung *siehe Abschn. 5.7*, 148
 -Vertauschung 146, 391, 449
 -Vertauschungssymmetrie 147, 276, 391, 452
 -Dirac-Theorie 449
 -Ortho/Para-Helium 272
 -Phononen 316
 -Vorzeichen + bei Bosonen 147
 -Vorzeichen – bei Fermionen 149
 -bei Kopplung gleicher Drehimpulse 255, 316, 454, 501
 -Widerspruch zum klassischen Grenzfalle 146
 -gegenseitige Vertretung 396
 -gemessene Übereinstimmung 17, 174, 445
 -im Alltag? 451
 -immer in verschränktem Zustand 136, 392
 -mathematische Gleichheit 396
- Impuls-Erhaltung
 -Nebenbedingung der Goldenen Regel 166
 -bei Annihilation 210
 -bei Translations-Invarianz im Raum 507, 633
 -beim Compton-Effekt 199
- Impuls-Näherung
 -1. Ordnung Störungstheorie 36
 -bei ionisierenden Stößen 36
 -bei tief-inelastischer Streuung 628
- Impulsübertrag $\Delta \vec{p}$ 31
- Invariante 33
 -Lorentz-invariante Form 601
 -aus Kraft-Gesetz berechnet 36, 55
 -bedeutet Stoß 62
 -in Bornscher Näherung 128
- Impulshöhenverteilung 223
- Impulswellenfunktion
 beim Photoeffekt 205
- Indikatormethode
 (Hahn/Strassmann 1938) 345
- induktive Verallgemeinerung 88, 190, 228, 676
- Infinitesimal-Rechnung
 -Leibniz 396
 -Newton vi, 631
- infrarote Sklaverei (FN) 629
- inkohärente Summe *siehe* Überlagerung, inkohärente
- Innere Konversion
 Alternative zur γ -Emission 221
- innere Parität 482
- innere Reibung
 -Reaktor-Kühlwasser 353
 -in Gasen: mikroskopische Deutung (1859) 7
- Interferenz *siehe auch Überlagerung, kohärente*
 -Dekohärenz zeitlich/räumlich 135
 -Kriterium Welle vs. Teilchen 383
 -bei α - α -Streuung 144
 -bei γ -Quanten 194
 -bei Streuung am Kern 136
 -destruktiv bei ident. Fermionen 152
 -hohe Messgenauigkeit 17, 132, 239, 269
 -konstruktiv bei ident. Bosonen 147
 -von Projektil und Targetkern *siehe Abschn. 5.7.2*
- Interferenz-Maximum
 -Lichtbeugung, Bragg'sche Beugung 132
 -bei α - α -Streuung 144
 -verschieden bei ^{12}C - ^{12}C - und ^{13}C - ^{12}C -Streuung 150
- Interferenzterm – wann ist er Null? 133
- intermediäres Elektron (im Compton-Effekt) 409
- Internet (Nebenprodukt der internationalen Forschung) 480
- invariante Masse 523
 -von 2-Teilchen-System 505
- Ionen 14
- Ionenoptik (im Massenspektrometer) 92
- Ionisation 26
 -spezifische 41
- ionisierende Strahlung 183

Ionisierungsenergie 27
 irreversibler Prozess
 -Definition der Zeitrichtung 12, 535, 559
 -aus symmetrischer Grundgleichung? 12, 172, 561
 -in Fluktuationen doch invertiert 12
 -und Kausalität 12, 535
 -und Messprozess 561
 isobare Kerne
 -Definition 106
 -Massen-Parabeln 113
 Isobaren-Regeln 74, 90, 114
 Isomere (stark verzögerter γ -Übergang) 215
 Isospin T *siehe Abschn. 11.2*, 89, 482, 509
 -Multiplett 596, 598, 627
 -Dublett/Triplett/Quartett 510
 -Schwacher 572
 -Symmetrieoperation
 -Drehung im Iso-Raum 509, 510
 -Vertauschung *up/down* 627
 -Triplett von Austauschteilchen 568
 -ist wie Drehimpuls 511
 -formale Grundlage dazu 264
 -und *strangeness* 518
 Isospin-Erhaltung 625
 Isospin-Symmetrie
 -Schwacher Isospin in der Elektroschwachen Wechselwirkung 572
 -im Quark-Modell nur genähert 626
 -in der Starken Wechselwirkung
 -entdeckt 505
 -nur genähert gültig 627
 Isotope (Nuklide) *siehe Abschn. 4.1.3*, 4, 73
 -Tal der stabilen 99, 241, 376
 Isotopen-Anreicherung 347, 348
 Isotopen-Fraktionierung 349
 -bei Verdampfen 74, 349
 -biogene 349
 Isotopenkarte (Nuklidkarte) 74, 89
 -Pfade der Kernsynthese 376
 -mit Quadrupol-Momenten 303
 -mit Spaltprodukten 341
 Isotopie-Effekt
 -bei Atomspektren (D) 86
 -bei Molekülspektren 270
 -in myonischen Atomen 228
ITER (Fusions-Forschung) 364
J
 Jensen, J. Hans D. (*1907, †1973, Schalen-Modell 1948) 116, 319, 326
JET (Fusions-Forschung) 364
jet (hadronisiertes Quark) 620

jj-Kopplung
 -bei Atomen 257
 -bei Kernen 328
 Joliot-Curie, Irene (*1897, †1956)/Joliot, Frederick (*1900, †1958, künstliche Radioaktivität 1934) 240
 Joyce, James (Romanautor) 588
J/ψ-Teilchen 522, 610

K

Kalium (K) 183, 243
 Kamiokande
 -Neutrino-Detektor 248, 471
 -Neutrino-Oszillation 475
 Kanal (bei Analog-Digital-Umwandlung) 223
 „Kanonenkugel“ (α -Teilchen) 47
 Kaon ($K^{0,\pm}$)
 -2 Isospin-Dubletts 516
 -Zerfall in 2 und 3 Pionen möglich 517
 -Zerfall verletzt Paritäts-Invarianz 517, 542
 -neutral
 -1 Teilchen mit 2 Lebensdauern 645
 -Konversion Teilchen \rightleftharpoons Antiteilchen 555
 -Strangeness-Oszillation 556
 -Zerfall verletzt Zeitumkehr-Invarianz 518
 -langlebiges/kurzlebige 558
 -zerfällt nicht in $\mu^+ + \mu^-$ 575, 645
 Katalyse
 -Nuklid-Synthese (CNO-Zyklus) 367
 -an Oberflächen 275, 305
 Kathoden-Strahlen 14
 Katzenauge (3-dim. Spiegelung) 281
 Kausalität 12, 535, 562
 -in Konflikt mit Zerfallsgesetz 155, 162
 Kelvin, Lord William (*1824, †1907) 335
 -Höchstalter der Erde 333
 -distanziert zur Radioaktivität 163, 334
 Kendall, Henry W. (*1926, †1999, Skalenverhalten der *e-p*-Streuung 1972) 604
 Kern
 -Abstand im H_2 -Molekül 270
 -Bausteine 74
 -Bindungsenergie E_B 73, 75
 -Bindungsenergie pro Nukleon E_B/A *siehe Abschn. 4.2.2*
 -Dichte 66
 -Energie-Inhalt *siehe Abschn. 4.2*
 -Entdeckung *siehe Abschn. 3.1*

- Form der Ladungsverteilung 139
- angeregte Niveaus 221, 232, 304
 - Spin- und Paritäts-Quantenzahl I^P 283
- geschützt durch Elektronenhülle 221, 275
- magnetisches Moment *siehe* **Abschn. 7.3.2**
- nicht punktförmig 65, 137
- typische Anregungsenergie (Drehimpuls) 258
- Kern-Fusion *siehe* Fusion
- Kern-Modell
 - Einzelteilchen-Modell *siehe* **Abschn. 7.6**
 - Oszillator-Potential *siehe* **Abschn. 7.6.2**
 - Spin-Bahn-Wechselwirkung *siehe* **Abschn. 7.6.3**
 - Proton-Elektron *siehe* **Abschn. 4.1.4**, 74, 83, 279
 - Proton-Neutron *siehe* **Abschn. 4.1.5**, 74
 - Schalen-Modell *siehe* **Abschn. 7.6**, 116
 - Tröpfchenmodell *siehe* **Abschn. 4.2.3**
 - erstes realistisches 73
 - kollektives *siehe* **Abschn. 7.5**
- Kernenergie *siehe* **Abschn. 8.1**, 75, 338, 358
- Kernforschungszentren 250, 358
- Kernkräfte *siehe* Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung
- Kernladung Ze
 - bestimmt chemische Ordnungszahl 48, 348
 - positiv (Bohrsches Atom-Modell) 187
- Kernmagneton μ_{Kern} 285, 592
- Kernmasse *siehe* **Abschn. 4.1**
 - Höchst-Präzisionsmessung 95
 - Massendefekt *siehe* **Abschn. 4.1.6**
 - Präzisionsmessung (1919) *siehe* **Abschn. 4.1.6**
 - moderne Mess-Methoden *siehe* **Abschn. 4.1.7**
- Kernmaterie
 - Dichte 69
 - maximale Bindungsenergie 112
 - nahezu inkompressibel 69
- Kernradius R_{Kern} *siehe* **Abschn. 3.4.2**, 48, 124, 258
 - aus Coulomb-Energie 112
 - aus Elektronen-Beugung 142
 - aus Isotopie-Effekt 228
 - aus Tunnel-Effekt 191
 - aus anomaler Rutherford-Streuung 65
- Kernrand 66, 141
- Kernreaktion
 - Herstellung von $^{67}_{31}\text{Ga}$ 243
 - Neubildung von C-14 183
 - erste Beobachtung 74
- Kernreaktor *siehe* Reaktor
- Kernspaltung *siehe* **Abschn. 8.2**, 75, 338
 - Ablauf im Tröpfchenmodell 339
 - Energiegewinn 338
 - Kettenreaktion 346
 - Wirkungsquerschnitt bei n -Einfang 343
 - Zerfallskurven von Spaltprodukten (1939) 159
 - durch Neutroneneinfang induziert 342
 - spontane 116, 338
 - symmetrische unwahrscheinlich 341
 - verzögerte Neutronen 351
- Kernspin *siehe* **Abschn. 7.1.6**
 - Null bei gg -Kernen (Grundzust.) 278
 - aus Bahndrehimpuls und Spins 257
 - erste Bestimmung (1928) 263
 - ganzzahlig > 0 bei uu -Kernen (Grundzust.) 278
 - keine Elektronen im Kern 230
 - magnetische Resonanz 95
- Kernsynthese 377, 469
- Kernvolumen V_{Kern} 69, 104, 220, 240
- Kernwaffe 357
 - Zündung durch Überkritikalität 349
 - durch Fusion 362
 - durch Spaltung 346
- Kettenreaktion
 - Regelung 351
 - überkritisch/unterkritisch 346
 - verzögerte Neutronen 351
- Kilomol 1, 7, 14, 76, 83, 172, 457
- kinematisch vollständiges Experiment
 - ATLAS-Detektor 531
 - beim Compton-Effekt 202, 387
- kinetische Gastheorie 1, 3, 8
 - Fehler bei identischen Teilchen 670
- Klassische Elektrodynamik und Wechselwirkung von γ -Quanten 193
- Klassische Mechanik
 - Grenzfall der Quantenmechanik 124
 - nicht Grenzfall der Quantenmechanik 146
- Klassische Physik 2
 - Elementarteilchen unmöglich 665
 - Feynmans Zusammenfassung 663
 - Kraft \rightarrow Feld \rightarrow Welle 671
 - Massenpunkt punktförmig? 665
 - Vorverständnis ist Voraussetzung für Moderne Physik v
 - Welle braucht ein Medium 383
 - skalunenabhängig 665

- versagt bei Photoeffekt 193
- vertraute Anschauungen v, 663
- zahlreiche Kräfte 666
- zahlreiche Parameter 653
- klassischer Elektronen-Radius
 - aus fundamentalen Konstanten 203
- klassischer Grenzfall
 - bei Rutherford-Streuung 124
 - beim Compton-Effekt nur mit Antiteilchen 409, 442
 - nie bei Stößen identischer Teilchen 146
 - selbst mit $\hbar \rightarrow 0$ nicht erreichbar 121
 - und Quantengesetze 219
- Klassisches Kraft-Feld
 - Deutung in der Quantenfeldtheorie 408
 - Feldstärke und Anzahl der Quanten nicht gleichzeitig wohldefiniert 453
 - Quant muss Boson sein 453
 - entsteht in Quanten-Feldtheorie 671
 - im Störoperator 213
- Klein-Gordon-Gleichung 429, 485
- Klein-Nishina-Formel (Compton-Effekt) 202
 - Dirac-Theorie 441
 - quantenelektrodynamisch 409
- KM-Matrix *siehe* CKM-Matrix
- Kobayashi, Makoto (*1944) 648
- Kobayashi-Maskawa-Matrix *siehe* CKM-Matrix
- kohärente Überlagerung *siehe auch* Überlagerung, kohärente
 - bei Vertauschung identischer Teilchen in der Quantenfeldtheorie 408
 - bei Wellen immer richtig 132
 - bei identischen Teilchen immer 136
 - manchmal folgenlos 135, 554
 - vs. inkohärente 132
 - bei Streuung an Quarks 606
- Koinzidenzen
 - mehrere Detektoren
 - zufällige 212, 246
 - zur Teilchen-Identifizierung 212, 503
 - verzögerte (Messmethode für kurze Lebensdauer) 172
 - Myon 455
 - Pion 491
 - bei Neutrino-Nachweis (1955) 246
- Kollektive Anregungsformen *siehe* Abschn. 7.5, 304
 - Rotation
 - Kern *siehe* Abschn. 7.5.2, 309
 - Molekül 11, 269
 - Schwingung
 - Kern *siehe* Abschn. 7.5.1, 7.5.3, 305, 314
 - Molekül 11, 309
- Kommutator 165
 - bewirkt Quantisierung 120
 - für Bosonen/Fermionen 397
 - gemeinsame Eigenzustände 282
- Komplementärfarbe
 - negative Farbladung? 594
- Komplementarität (Bohr)
 - vs. Alltagsverständnis 384
- Kondensationskeim 31, 526
- Kondensationswärme 104
- Kondensator 79
 - Dielektrikum schwächt das Feld 629
 - Veranschaulichung der Starken Wechselwirkung 621
- Konfiguration: reine, gemischte 329
- Konstante, universelle (c, \hbar, γ) 95, 659
- Konstituenten-Quarks 622
 - Masse 593
- kontinuierliches Spektrum
 - bei β -Radioaktivität 232, 537
 - bei 3 Teilchen immer 458, 498
 - bei Myon-Zerfall 458
- Kontinuum (Raum, Zeit, Materie) 2
 - , „wirklich“ oder nur „wahrgenommen“? 1, 531
- Konversion, innere
 - (Alternative zur γ -Emission) 221
- Konversions-Elektronen
 - (scharfe Linien in β -Spektren) 221
- kopernikanische Wendepunkte vi
- Kopplungskonstante g
 - elektromagnetische = Sommerfeldsche Feinstruktur-Konstante α 43, 212, 407, 423, 574
 - im Wechselwirkungs-Operator 402
 - laufende
 - Quanten-Chromodynamik 628
 - Quanten-Elektrodynamik 629
 - zwei für Elektroschwache Wechselwirkung 578
- kosmische Strahlung
 - Element-Zusammensetzung 377
 - Quelle Pulsare? 377
- kosmologische Konstante und Higgs-Feld 660
- Kraft
 - Übertragung in makroskopischer Materie elektromagnetisch 654
 - durch Austauschteilchen bewirkt 381, 672
- Kraftfeld

- Deutung in der Quantenfeldtheorie 408, 672
 - Kraftstoß 33
 - Kraftwerk, nukleares 353
 - Kriechstrom 675
 - Kristallgitter 134
 - durch Röntgenbeugung bestätigt 194
 - führt Ionenstrahl (*channeling*) 64
 - Kritikalität (k)
 - Kettenreaktion 346
 - prompte/verzögerte 352
 - kritische Anordnung (Kettenreaktion) 346
 - kritische Masse (Kettenreaktion) 346
 - Kugelfunktion $Y_\ell^m(\theta, \phi)$
 - Eigenfunktion für Bahndrehimpuls 251, 252
 - in Reihenentwicklung der ebenen Welle 218
 - Kugelsymmetrie
 - Ursache der Drehimpulsquantenzahl 259
 - Kundt, August (*1839, †1894, $c_P/c_V = 5/3$ bei Hg-Dampf 1875) 9
 - „künstlich“ = „unnatürlich“? 184
- L**
- A-Teilchen**
 - Quark-Zusammensetzung (uds) 589
 - Spin-Kopplung 598
 - Vergleich mit Δ 537
 - erste Beobachtung 513
 - in Blasenkammer-Aufnahme 529
 - magnetisches Moment 593
 - nicht allein erzeugt 514
 - und Auswahlregel „weiß“ 594
 - Laborsystem (L) 31, 466, 467, 527
 - Ladungen *siehe Abschn. 15.12*
 - Baryonenzahl A 676
 - Leptonenzahl L 676
 - Schwache Hyperladung 573
 - flavor* (Leptonen) 649, 677
 - flavor* (Quarks) 519, 677
 - elektrische $Q = qe$ 676
 - Erhaltungssatz und komplexe Phase 507
 - effektive (durch Renormierung) 629
 - zusammengesetzt aus 2 Bestandteilen 572, 573
 - erste neue Art (Lepton 1953) 459
 - schwache 650, 676
 - starke (= Farbladung) 676
 - und Teilchenart 676, 677
 - Ladungskonjugation *siehe Abschn. 12.3.1*, 548
 - Ladungspartität 549
 - Lagrange-Formalismus
 - Konstruktion von Austauschteilchen 567
 - lokale Eichinvarianz 567
 - Lamb-Shift (Aufspaltung, 1946) 382
 - Landau-Formel (für g -Faktor) 262
 - Landau-Niveaus (Bahn im Magnetfeld) 443
 - Large Hadron Collider (LHC)* 525, *siehe CERN – Large Hadron Collider*
 - Lärm
 - Verkehrsdichte aus Fluktuation 181
 - inkohärente Summierung von Wellen 385
 - Larmor-Präzession (ω_L) 293
 - von Myonen 461
 - Lasermethode (Isotopen-Anreicherung) 349
 - Laue, Max v. (*1879, †1960, Interferenz von Röntgenstrahlen an Kristallen 1912) 134, 194
 - laufende Kopplungskonstante 629
 - Lauterbur, Paul C. (*1929, †2007, *MRT-Diagnostik*, ab 1973) 293
 - Lavoisier, Antoine (*1743, †1794, Element-Begriff \sim 1785) 82
 - Lawrence, Ernest O. (*1901, †1958, Zyklotron-Beschleuniger 1935) 243
 - Lawson-Kriterium (für Fusions-Reaktor) 363
 - Lebensdauer (mittlere) τ
 - „partielle“ 161, 167, 221
 - Definition 161
 - Messmethoden 172
 - größter gemessener Wertebereich 156
 - künstlich verlängert
 - Myon 461
 - Pion 493
 - kürzeste gemessene (Z^0) 173
 - vs. Wirkungsquerschnitt 166
 - Bethes Abschätzung für Neutrino-nachweis (1934) 245
 - zwei verschiedene bei einem Teilchen? 553
 - „Lebenskraft“ (alte organische Chemie) 654
 - LEGO-Diagramme für Winkelverteilung und Zerfallskinetik 579, 620
 - Leibniz, Gotthold W. (*1646, †1716)
 - logisches Prinzip *pii* (doch verletzt) 396
 - Leichtwasser-Reaktoren 348
 - Leitungsband und Diracs Oberwelt 210
 - Lenard, Phillip (*1862, †1947)
 - Lenard-Fenster 14
 - Photo-Effekt 17
 - Lenzscher Vektor 508

- Lepton *siehe Kap. 10, 14 und Abschn. 15.2,*
666
-2 oder 4 Familien? 643
-3 Familien *siehe Abschn. 14.2,* 464, 469,
634, 641
-Bildungsgesetz unbekannt 427
-Erhaltung 565
-Erhaltungssatz nur empirisch 633
-anomaler g -Faktor *siehe Abschn. 14.1,*
284, 382, 435, 443, 459
-*QED*-Vorhersage 636
- Lepton-Quark-Symmetrie 586, 630, 649
-beseitigt Anomalie (des Stroms) 650
- Leptonenladung
-Erhaltungssatz
-beim Zerfall des Myons 462
-Umkehr bei Ladungskonjugation 549
-elektronische/myonische 462
-erste neue Art von Ladung (1953) 226,
462
-und Schwacher Isospin ergibt elektrische
Ladung 573
- Leptonenzahl *siehe* Leptonenladung
- Leucht-Elektron
typische Anregung der Hülle 318
- Leucht-Nukleon
-Anregungsform des Kerns 317
-magnet. Moment 290
- LHC siehe CERN – Large Hadron Collider*
- Libby, Willard (*1908, †1980, C-14-Methode
zur Altersbestimmung, 1948) 184
- Licht – ist Maxwellsche Welle *und* Newtonsche
Korpuskel 385
- Lichtquant 17, 193
-Hypothese (Einstein 1905) 193
-Quantisierung entdeckt (Planck 1900)
121
- lineare Differentialgleichung, Exponential-
Ansatz 185
- Linearkombination 165, *siehe auch*
Überlagerung (kohärent); Superposition
-von Vektoren: rotationsinvariant? 616
- linkshändig
-Fermionen 545
-chirale Unterscheidung 448
-neutraler schwacher Strom 572
- Linksschraube 538
- Logik
-Dinge ohne Häcceität? 396
-*p*ii Prinzip der Identität der Ununterscheid-
baren (Leibniz) 396
- Logik der Forschung (Popper 1935) 88
- lokale Eichinvarianz (Lagrange-Formalismus)
567
- Lokalität 562
- London, Fritz (*1900 †1954)
chemische Bindung durch Tunnel-Effekt
(1928) 189
- Lorentz, Herman A. (*1853 †1928)
-Lorentz-Transformation 429
- Lorentz-Eichung des Maxwell-Felds 409
- Lorentz-Faktor γ 30
-Zeit-Dilatation beim Pionen-Zerfall 493
-für Myonen der Höhenstrahlung 456
- Lorentz-Invarianz 562
-Dirac-Gleichung 437
-Masse 227, 438, 505, 523
-Skalarprodukt 433
-des Wechselwirkungsoperators 441
-für Chiralität 447
-nicht für Helizität 448
- Lorentz-Kontraktion 41
-Drehachse stellt sich parallel 440
-für Myonen der Höhenstrahlung 456
- Lorentz-Kurve
-Linienform und Energie-Unschärfe aus
Störungstheorie 1. Ordnung 168
-gedämpfte Schwingung 170
- Lorentz-Vektor *siehe* 4-Vektor
- Lorentzboost 439
- Loschmidt, Johann (*1821 †1895, Molekül-
Größe 1862) 7
- ## M
- μ^\pm -Lepton *siehe* Myon
- Mach, Ernst (*1838 †1916) 9
-Anti-Atomismus 3, 12
-will Atome sehen können 3, 584, 653
- Magische Zahlen *siehe Abschn. 7.6.1,* 116,
320
-Kern kugelförmig 321
-doppelt magischer Kern 323
-in Spaltprodukten häufig 341
- Magnetfeld
-Ablenkung geladener Teilchen 14, 26,
377, 531
-Zeeman-Effekt 16
- Magnetische Falle
-Messungen an 1 Elektron 443
-Messungen an 1 Ion 96
- magnetische Kernresonanz *siehe*
Abschn. 7.3.3f
- Magnetisches Moment $\vec{\mu}$ *siehe Abschn. 7.3*
-Baryon: anomal *siehe Abschn. 7.3.1*
-erklärt mit Quarks 592
-Elektron
-(g -2)-Messung 444

- aus Dirac-Theorie 435
- aus Standard-Modell 636
- zu groß für den Kern 230
- Kerne ($A \geq 2$) *siehe Abschn. 7.3.2*
- Myon
 - (g-2)-Messung 459
 - aus Standard-Modell 636
- Neutron 287, 592
- Proton *siehe Abschn. 7.3.1, 592*
- Maiman, Theodore (*1927, †2007, LASER 1960) 387
- Majorana-Teilchen 443, 473
- Manhattan-Projekt 356
 - Transurane 346
- Mansfield, Sir Peter (*1933, MRT-Diagnostik) 293
- Marsden, Ernest (*1889, †1970) 47
 - Rutherford-Formel getestet 59
 - entdeckt die Rückstreuung von α -Teilchen (1909) 49
- Maskawa, Toshihide (*1940) 648
- Masse *m*
 - (Lorentz-)invariante 403, 438, 505, 506, 523, 580, 601
 - als kooperative Erscheinung 625
 - aus Ionisationsspur bestimmt 41
 - bei chemischen Reaktionen streng erhalten 7, 82
 - träge 78
 - träge/schwere proportional 660
- Massendefekt δm *siehe Abschn. 4.1.6, 75, 668*
 - 20% bei Neutronenstern 377
 - Bindungs-Energie 97
 - bei Atomen, Kernen, Paar-Vernichtung 669
- Massenfilter (im Massenspektrometer) 78
- Massenpunkt
 - Bewegungsgleichung wie für Welle (de Broglie 1923) 383
 - Magnetismus klassisch nicht erklärbar 436
 - Prototyp für Materie (klassisch) 384
 - Zustand
 - Erweiterung für Spin (Pauli 1926) 263
 - klassisch (nur 3 Freiheitsgrade) 235
 - fundamentale Teilchen 427, 468, 641, 665
 - macht Trajektorie 128
 - unterscheidbar von Welle? 121, 135
- Massenschwächungskoeffizient μ/ρ (bei γ -Strahlen) 198
- Massenspektrometer *siehe Abschn. 4.1.2*
 - Flugzeitmethode 95
 - Parabel-Methode (1912) 80
 - Quadrupol-Aufbau 94
 - doppelt fokussierendes 93
 - häufige Anwendungen *siehe Abschn. 4.1.7, 73*
- Massenzahl *A* (Atomgewicht)
 - ganzzahlig 4, 83
 - nicht ganzzahlig 4, 73, 77, 92
- Materie
 - Bausteine 583
 - Erkenntnisse über Aufbau 70, 155
 - Stabilität 16, 75, 76, 90, 380, 584, 651
 - Unzerstörbarkeit vs. Erzeugung/Vernichtung 230
 - eine Manifestation von Wellen 380
 - el.-mag. Wechselwirkung bestimmt makroskopische Eigenschaften 535, 652
- Materielle Teilchen
 - Quanten eines Feldes 157, 380
- Materiewelle 120, 124, 379
 - im Tröpfchen-Modell 106
- Matrizelement $\langle \psi_2 | \hat{O} | \psi_1 \rangle$
 - 2-Teilchen-Wechselwirkung 239, 393
 - mit Austausch-Integral 393
 - für Absorption/Emission von Photonen 216
 - für Photoeffekt 207
 - für Störungstheorie 168
 - für Streuung 126
 - in Fermi-Theorie zum β -Zerfall 236, 237, 239
 - in der Goldenen Regel 166, 213, 414
- Matrizen-Mechanik
 - Heisenberg, Born, Jordan (1925) 122
- Matrizenrechnung v
- Maxwell, James C. (*1831, †1879)
 - Atome unveränderlich (1860) 5
 - Elektrodynamik v, 538
 - Maxwellsche Gleichungen 36
 - analog zum harmon. Oszillator 388
 - kinetische Gastheorie (ab 1858)
 - Freiheitsgrade 9
 - Theorie aufgegeben (1860) 9
 - mittlere freie Weglänge 7
- McCarthy-Ära, Wettrüsten 362
- Mechanik
 - Hamiltonsche (ab 1833) 383
 - Klassische (ab 1700...) 124, 146
 - Newtonsche (ab 1680) 30
 - relativistische (ab 1905) 30
- medizinische Anwendung
 - Röntgenstrahlen 21, 184
 - Radioaktive Tracer 250

- Strahlentherapie
 - mit γ -Strahlen 204
 - mit schweren Ionen 42
- Vernichtungstrahlung (*PET*) 212
- magnetische Kernresonanz (Tomographie *MRT*) 293
- Meitner, Lise (*1878, †1968, Kernspaltung 1938) 115, 345
- Meitner-Hupfeld-Effekt 209
- Mendeleejew, Dimitrij (Periodensystem 1869) 5
- Meson *siehe auch* Pion, Kaon, ρ -Meson
 - Paar Quark/Antiquark 583, 589
- Messgenauigkeit
 - bei Frequenzmessungen/bei statistischen Schwankungen 181
 - erhöht durch Relativmessung 93, 96, 443
- Messprozess
 - irreversibel 561
 - legt Basiszustand fest 511
 - projiziert auf Eigenzustand 120, 542, 554
 - und exponentielles Zerfallsgesetz 561
- metastabiler Zustand 162, 164, 599, 652
- Meteoriten-Alter
 - Rubidium-Strontium-Methode 175
- Meyer, Julius Lothar v. (*1830, †1895, Periodensystem und Atomvolumen 1870) 7
- Mikroskop
 - Auflösungsgrenze 131, 139, 600
 - Heisenbergs „Ultra-Mikroskop“ 189
- mikroskopisches Modell
 - Beispiel: kinetische Gastheorie (~ 1860) 9
 - Tröpfchen-Modell 104
 - für Bremsvermögen (Bohr 1913) 42
 - für Wärmestrahlung (Einstein 1917) 386
 - wird bestätigt, nicht bewiesen 61
- Mikrowellen-Technik
 - Fortschritte während des Krieges 382
 - Grenzwerte für Belastung 292
 - Mikrowellenherd 292
- Millikan, Robert A. (*1868, †1953)
 - e bestimmt 15
 - auch $\frac{1}{3}e$ gefunden 590
 - skeptisch gegen Lichtquanten 17
 - skeptisch gegen Name „Proton“ 84
- Mindestenergie
 - Abtrennung eines Elektrons E_{Ion} 27
 - Abtrennung eines Nukleons (S_p, S_n) 107, 304, 320
 - Erzeugung von Antiprotonen 522
 - Erzeugung von Pionen 488, 621
 - Paar-Erzeugung e^+e^- 209
 - in Bohrs Bremsformel 39
- Minimal-Ionisation 40
- Mira-Stern (Schicksal der Sonne) 373
- mittlere Eindringtiefe (γ -Quanten) 197
- mittlere freie Weglänge ℓ 7
- mittlere Lebensdauer *siehe* Lebensdauer, mittlere
- Mobiltelefonie
 - Grenzwerte wegen Absorption im Gewebe 292
- Modell
 - Bestätigung ist nicht Beweis 86
 - Bestätigung stützt die Annahmen 109
 - Überprüfung 84
 - mikroskopisches *siehe* mikroskopisches Modell
 - parametrisches *siehe* parametrisches Modell
- Moderne Physik (ab ~ 1900) *siehe Abschn. 1.3*
 - Beginn 2, 155
 - Feynmans Zusammenfassung in 1 Satz 13
 - Logik der Forschung 88
 - Wegbereiter (Auswahl)
 - Albert Einstein 2, 13, 17, 156, 163, 192, 193, 213, 280, 383, 385, 386, 450
 - Niels Bohr 16, 29
 - löst die klassische ab 2
 - nicht durch Skalierung der Klassischen Physik 1, 9, 665
 - schwer anzunehmen v
- Molekül
 - Bindungslänge 270
 - Definition (1860) 5
 - Dipolschwingung 309
 - Freiheitsgrade 11
 - eingefroren/aufgetaut 273
 - Potentialkurve (enthält kinet. Energie) 340
 - Prüffeld für Quantenmechanik 249, 270
 - Rotation 11, 309
 - Mikrowellen-Strahlung 269, 654
 - durch Austauschsymmetrie der Kerne eingeschränkt 272, 278
 - Trägheitsmoment Θ 258, 270
 - Vibration
 - Infrarot-Strahlung 309, 654
 - kein Treibhauseffekt mit N_2 und O_2 309
 - typische Anregungsenergie (Drehimpuls) 11, 258
 - typisches Spektrum 269
- Mooreches Gesetz (Halbleitertechnologie)
 - bei Kern-Fusion ähnlich 364

- in Beschleuniger-Entwicklung ähnlich 526
 - Moseley-Gesetz 48, 78
 - Auswirkung auf Bindungsenergie der Hülle 98
 - Bestimmung der Kernladung $+Ze$ 183
 - Kernladung positiv 187
 - Mössbauer, Rudolf (*1929, resonante Kernanregung 1958) 173
 - Mott, Sir Nevill (*1905, †1996)
 - $e-e$ -Streuung quantenelektrodynamisch 409
 - Interferenz von Projektil- und Targetzustand 146
 - Rutherford-Formel quantenmechanisch 122
 - Mottelson, Ben (*1926, Kernmodell ab ~1952) 304
 - MRT (magnet. Resonanz-Tomographie) 293
 - Multiplett
 - Austauschbosonen (Isospin) 572
 - Baryonen, Mesonen
 - Isospin T 508, 520
 - $SU(3)$ 519, 520
 - aufgespalten 596, 599, 625, 627
 - Feinstruktur im Atom 262
 - Hyperfeinstruktur im Atom 262
 - Hyperladung 573
 - Zeeman-Aufspaltung 16, 261, 510
 - Multipol-Ordnungen ℓ (γ -Emission $E\ell$, $M\ell$) 216
 - Multipolmoment
 - in Reihenentwicklung 302
 - von Oberflächen-Vibrationen 315
 - Myon (μ^\pm) *siehe Abschn. 10.3.1*
 - Kinematik des Zerfalls 458
 - Lebensdauer 455
 - führt zur Masse des W^\pm 566, 574
 - theoretisch 564
 - und lange Flugstrecke 455
 - Produktion in Beschleunigern 459
 - Zerfallselektron hat max. 50% der Energie 459
 - erstes nachgewiesenes instabiles Elementarteilchen (1936) 455
 - erzeugt von der Höhenstrahlung 427, 454, 487
 - g -Faktor: anomal
 - Präzisionsmessung 459
 - QED -Vorhersage 636, 640
 - irrtümlich begrüßt 485
 - ist nicht angeregtes Elektron 458
 - magnetisches Moment *siehe g-Faktor*
 - nicht Ursache der Kernkräfte 457
 - stört in allen Detektoren (Nulleffekt) 246, 454
 - myonisches Atom 228, 457
- ## N
- Nachkühlung (Reaktor) 354
 - Nachweiswahrscheinlichkeit
 - Definition 177
 - im Photopeak 224
 - Nagasaki (zerstört durch Plutonium-Bombe 1945) 347, 357
 - Näherung
 - 1. Ordnung Störungstheorie 36, 40, 127, 130, 165, 168, 404, 411, 555
 - 2. Ordnung Störungstheorie 555
 - 4. Ordnung Störungstheorie 638
 - 6. Ordnung Störungstheorie 639
 - 8. Ordnung Störungstheorie 419, 639
 - Impulsnäherung 35
 - lineare (Ellipsoid vs. Kugelfunktion) 303
 - Näherungslösungen
 - unumgänglich in der Quantenfeldtheorie 382
 - Nahfeldmikroskopie (FN) 139
 - natürliche Linienbreite ΔE_{nat} 170
 - Bildung/Zerfall von Elementarteilchen 173, 502, 506, 642
 - Compound-Kern 360
 - Riesenresonanz 308
 - im Mössbauer-Effekt 173
 - optische Übergänge 174
 - Natrium (Na)
 - gelbe Spektrallinie: durch Spin aufgespalten 427
 - kleinste Ionisierungsenergie 27
 - Nebelkammer 28, 526
 - Neon (Ne) 80
 - Neptunium (Np) 182
 - erstes Transuran (1940) 346
 - „Neue Physik“ (post Standard-Modell) 641, 658
 - neutraler schwacher Strom 536, 646
 - 3 Ereignisse in 1,4 Mio Aufnahmen 529
 - 6 Jahre lang übersehen 577
 - Entdeckung 576
 - macht falsche Vorhersage 575
 - postuliert 572
 - Neutrino (ν) *siehe Abschn. 6.5.6ff, 10.4*
 - Dirac oder Majorana-Teilchen? *siehe Abschn. 10.4.3*
 - Flussdichte auf der Erde 472
 - Geschwindigkeit im Weltall 471
 - Hypothese (Pauli 1930/33) 226, 233, 588

- Masse Null? 234, 238, 474
- Masse nicht Null 477
- Mischung aus Massen-Eigenzuständen 476
- Nachweis *siehe Abschn. 6.5.11*, 469
 - ν_μ 463
 - ν_τ 466
 - ν_e 234, 244
- Oszillation *siehe Abschn. 10.4.4*, 367, 464, 474
 - bestätigt (1998) 475
 - rechtshändiges Neutrino? 547
- Schauer von der Supernova 472
- Wirkungsquerschnitt (Bethes Abschätzung 1934) 245
- elektronisches \neq myonisches *siehe Abschn. 10.3.2*, 463
- fliegt Lichtjahre in Materie 245, 475
- in der Supernova 375
- notwendig bei Schwacher Wechselwirkung? 244, 514, 537
- verschieden von Antineutrino? 474
- Neutrino-Detektoren *siehe Abschn. 10.4.1*, 246, 469
- Neutrinoquellen
 - Bombe, Reaktor 246
 - Sonne, Supernova 471
- Neutron (n) *siehe Abschn. 4.1.5*, 74
 - β -Zerfall 231
 - Lebensdauer 231
 - Masse m_n 97
 - genau 96
 - Quark-Struktur 589
 - Vorhersage (Rutherford 1920) 86
 - elektrisches Dipolmoment? 297
 - entdeckt (Chadwick 1932) 88
 - magnetisches Moment μ_n 287
 - erklärt mit Quarks 592
- Neutronen-Überschuss
 - bei Uran groß 346
 - im Tröpfchen-Modell 108
 - im r-Prozess der Supernova 376
 - stabiler Kern 90
- Neutronen-Einfang
 - Bildung schwerer Elemente ($A > 60$) 377
 - an Cd (Neutrino-Nachweis) 246
 - an Cd (Reaktor-Regelung) 350
 - an Uran (Pu-Bildung) 343
- Neutronenstern 69, 377
- Newton, Sir Isaac (*1643, †1727) v, 335
 - Begriff der Kraft 82
 - Differentialrechnung entwickelt 631
 - zu schwierig für seine Zeit 631
- Korpuskulartheorie des Lichts (1675) 383
- Naturgesetze universell 333
- Newtonsche Mechanik v
 - Grenzfall der Quantenmechanik 124
- Niederenergie-Kernphysik 117, 249, 258
- Niveau-Breite *siehe* Halbwertsbreite, Energie-Unschärfe
- Niveauschema
 - Bahnbewegung im Magnetfeld 444
 - Feinstruktur 257, 262, 328
 - H₂-Molekül, Rotation 273
 - Hadron 173, 502, 509, 598, 612
 - Kern 221, 304, 312, 314, 317
 - Oszillator 322
 - Weg zur Erforschung der Wechselwirkungen 599, 611
 - für Kern-Schalenmodell 328
 - fundamentale Teilchen 649
 - getrennte (Ortho/Para-Form) 271
 - myonisches Atom 229
- Nobelpreis
 - Rolle in der Modernen Physik 17
 - für einen Irrtum 344
 - nicht an die Entdeckerin 377, 544
 - versäumte Verleihung 387
 - verspätet für Neutrino 464
 - verspätet für Neutronen-Beugung 135
- Noddard, Ida (*1896, †1978)
 - Element Rhenium entdeckt (1925) 72, 344
 - Spekulation über Kernspaltung (1934) 344
- Noether, Emmy (*1882, †1935, Noether-Theorem 1918) 508
- Normalverteilung 178
- Notkühlsystem (Reaktor) 354
- „November-Revolution“ (1974) für das Quark-Modell 518, 522, 585, 609
- Nuklearer Brennstoff-Kreislauf 356
- Nukleon (N) 89
 - Kernkraft im Quark-Modell 625
 - Masse entsteht im Quarkmodell 624
 - angeregtes 173
 - enthält wieviel Quarks und Gluonen? 621
 - im Kern dicht gepackt 111, 319
 - magnetisches Moment 286, 287
 - erklärt mit Quarks 592
 - mittlere Bindungsenergie im Kern E_B/A *siehe Abschn. 4.2.2*
 - nicht punktförmig 137
 - unteilbar? 117, 482
- Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung 75, 625
 - Analogie zur chemischen Bindung 615

- Sättigung? 111
- Stärke 111
- Yukawa-Hypothese 483
 - Austauschteilchen 483
- aus Kernmodellen nur näherungsweise 104, 330, 625
- im Tröpfchen-Modell nur parametrisiert 157
- kurze Reichweite a_{NN} 68, 110, 483, 586, 625
- mit Quarks erklärt 586, 625, 673
- Nuklid *siehe* Isotop
- Nuklid-Synthese 376
- Null-Effekt
 - durch Myonen 184, 454
- O**
- Ω^- -Teilchen
 - Name 521
 - Quark-Zusammensetzung (*sss*) 628
 - in Blasenkammer-Aufnahme 529
 - vorausgesagt einschl. genauer Masse 521, 599
- Oberfläche (bei realen Systemen nicht vernachlässigbar) 305
- Oberflächen-Term (Tröpfchenmodell) 104
- Oberflächen-Vibration 314
- Occams Rasiermesser (Wilhelm von Ockham, *1285, †1347) 473
- Oktett der Hadronen ($SU(3)$) 586, 596
- Oktupol-Vibration (birnenförmig) 317
- Operator \hat{O} v., 120
 - Bahn-Drehimpuls $\hat{\ell}$ 120
 - Energie \hat{H} 124
 - Impuls \hat{p} 120
 - Ort \hat{r} 120
 - Spin \hat{s} aus Dirac-Gleichung 433
 - Vertauschungsregel bewirkt Quantisierung 120
 - hermitesch bedeutet zeitumkehrinvariant 213
- Oppenheimer, J. Robert (*1904, †1967)
 - , „Vater der Atom-Bombe“ 357
 - Interferenz von Projektil- und Targetzustand 146
 - Tunneleffekt 190
- Ordnungszahl, chemische Z 5, 61
 - physikalische Bedeutung 77, 348, 652
- Ortho-/Para-Helium
 - getrennte Niveau-Schemata 271
 - Vertauschungssymmetrie entdeckt 393
- Ortho-Wasserstoff
 - Protonenspins zusammen 1 285
 - Rotations-Spektrum 271
 - spezifische Wärme 273
- osmotischer Druck (Atomgewicht-Bestimmung) 76
- Ostwald, Wilhelm (*1853, †1932, Anti-Atomist bis 1907) 13, 23
- Oszillatorpotential (im Schalenmodell) *siehe* **Abschn. 7.6.2**, 321
- Ozeane (Paläotemperatur) 74, 349
- P**
- Paar-Erzeugung 209, 418, 467, 522, 579, 584, 590, 591, 620, 621, 638, 641, 658, 668
- Paar-Vernichtung *siehe* Annihilation
- Paarungs-Energie 102
- Paarungs-Term (Tröpfchenmodell) 108
- Pais, Abraham (*1918, †2000)
 - Seltsamkeit und Schwache Wechselwirkung 514, 537
 - Superposition Teilchen/Antiteilchen vorhergesagt 517
 - strangeness*-Oszillation vorhergesagt 517
 - wie schwierig die Erforschung der Starken Wechselwirkung 509, 519, 615
- Para-Wasserstoff
 - Protonenspins zusammen Null 285
 - Rotations-Spektrum 271
 - kugelsymmetrischer Grundzustand 312
 - spezifische Wärme 273
- Parabel-Spektrograph
 - J.J. Thomson (1912) 80
- parametrisches Modell 104
 - Extrapolation möglich 113, 368
 - Konstituenten-Quarks 599
 - Quark-Eigenschaften 623
 - Tröpfchen-Modell 104
 - für Wärmestrahlung (Einstein 1917) 386
- Parität (Symmetrie bei Spiegelung) 280
 - Auswahlregel für el. Dipolstrahlung 297
 - der Multipol-Felder 218
 - der Oszillator-Zustände 324
 - elektr. Dipol Null 296
 - innere 482
 - innere bei Teilchen-Antiteilchen-Paar 589
 - innere des Pions 499, 542
 - nicht erhalten *siehe* Paritätsverletzung
 - nur relativ bestimmbar 283
 - scheint durch Anschauung garantiert 539
- Paritäts-Entartung 282
- Paritätsoperator \hat{P} 280, 538

- Nützlichkeit bezweifelt 541
- Paritätsverletzung *siehe Abschn. 12.2*, 538, 542
 - „harmloser“ als CP -Verletzung 559
 - Autofahrer-Beispiel (Lee) 544
 - Problem für die Anschauung 539
 - frühe Beobachtungen verworfen 542
 - beim Kaon-Zerfall 517, 542
 - beim Pion-Zerfall 491
 - in Atom- und Kern-Zuständen 548
 - maximal 559, 566
- Partial-Welle
 - hat Drehimpuls ℓ und Parität $(-1)^\ell$ 218
- partially conserved axial vector current (PCAC)* 496, 566, 623, 650
- Parton 584, 622
- Paschen-Back-Effekt
 - und Drehimpuls-Bestimmung 255
- Paul, Wolfgang (*1913, †1993, Quadrupol-Massenspektrometer 1967) 94
- Pauli, Wolfgang (*1900, †1958)
 - Goldene Regel 165
 - Neutrino-Hypothese 469, 537, 588
 - Spin-Matrizen 431
 - Spin-Statistik-Theorem 453
 - Wette auf Paritätserhaltung 543
- Pauli-Matrizen $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 264, 431
 - kein Drehimpuls-Operator 265
- Pauli-Prinzip *v*, 106, 329
 - Entartungsdruck 374
 - Test auf Identität von Teilchen 227
 - am Periodensystem entdeckt 450
 - bei Quarks 593
 - entscheidend für Bindungsenergie der Hülle 99, 393
 - führt zu Fermi-Dirac-Statistik 452
 - folgt aus Antisymmetrie bei Vertauschung 276
 - im Schalenmodell 319
 - in Quantenfeldtheorie 398
 - ist keine Abstoßung 451
 - ist keine Wechselwirkung 450
 - schließt nicht Teilchen am gleichen Ort aus 451
 - unterdrückt Restwechselwirkung 330
 - verbietet Übergang in Diracs Unterwelt 209, 442
- Pauli-Spinor 263
 - genähert aus Dirac-Spinor 435
- Pauling, Linus (*1901, †1994)
 - chemische Bindung durch Tunnel-Effekt 189
- pep*-Prozess (in der Sonne) 367
- Periodensystem
 - Hinweis auf neue Elemente 6, 77
 - Julius Lothar von Meyer (1870)
 - periodisches Atomvolumen 7
 - Konzept stiftet Ordnung 481
 - Umstellungen nötig 6, 61, 78
 - erweiterungsfähig (Edelgase) 12
 - frühes Ordnungsschema für „Elementarteilchen“ 4
 - nach Mendelejew (1869) 5
 - physikalisch erklärt 5, 652
- Perrin, Jean B. (*1870, †1942, Beobachtung statistischer Fluktuationen 1906) 13
- PET* (Positronen-Emissions-Tomographie) 212
- Phänomene
 - „Rettung der Phänomene“ 651
 - neue analysieren 24
- Phasenraum-Volumen Ω
 - Einheitszelle $(2\pi\hbar)^3$ 121
 - harmonischer Oszillator 121
 - klassisch vs. quantenmechanisch 120, 235
- Phasenraumdichte $\rho_E = dN/dE$
 - in der Goldenen Regel 166
 - klassisch vs. quantenmechanisch 235
- Φ^0 -Meson 518, 591
- Phononen
 - Oberflächen-Vibration 315
 - Schallwellen 259
- Photoeffekt *siehe Abschn. 6.4.4*
 - Einstein (1905) 193
 - Wirkungsquerschnitt 196, 207
 - an Metallen (1902) 17
 - klassisch unmöglich 193
 - Verbot ausgehebelt 205
 - halbklassisches Bild 207
- Photon (γ) *siehe Abschn. 6.4, 9.2*, 14, 631, 666
 - E - p -Beziehung 205, 210
 - Absorption klassisch unmöglich 193
 - Bose-Einstein-Statistik 390, 450
 - Drehimpuls 219
 - Erzeugung *siehe Abschn. 6.4.6, 9.7.4*, 157, 213, 386, 388
 - Hamilton-Operator der Quantenfeldtheorie 401
 - als Zufallsprozess (Einstein 1917) 386
 - durch induzierte Emission (Einstein 1917) 386
 - Plancksches Gesetz 2
 - Photonengas (Einstein 1917) 386
 - Vernichtung
 - Hamilton-Operator der Quantenfeldtheorie 401

- als Zufallsprozess (Einstein 1917) 386
- Welle-Teilchen-Dualismus 379
- als Teilchen betrachtet 17, 89, 199, 387
- als Überlagerung von Austauschteilchen W^0 und B 573, 680
- als elektromagnetische Welle 196
- bei Fusionsreaktionen 361
- bei Paarbildung vernichtet 210
- hoher Drehimpuls behindert Erzeugung 220
- inelastischer Stoß? 200
- intermediäres 405
- nach Compton-Effekt 202
- sichtbares Licht 2, 17, 337
- skalar/longitudinal im virtuellen Zustand 409
- virtuelles *siehe Abschn. 9.6*, 381, 403
 - bei $E_\gamma = 0$, aber $p_\gamma \geq 2m_e c$ 418
 - bei $E_\gamma = 20$ GeV, aber $\vec{p}_\gamma = 0$ 466
 - überträgt Impuls wie die Coulomb-Kraft 406
- Photon-Photon-Streuung
 - Paar-Erzeugung 418
 - erzeugt neutrales Pion 496
 - in Feynman-Graphen 418, 639
- Photonen-Gas
 - Einsteins Erklärung für Plancksches Gesetz 385
 - therm. Gleichgewicht nur mit Compton-Effekt 385
- Photopeak (γ -Spektrum) 223
- Physik lernen
 - mit/gegen den Alltagsverstand vi
- pii (principium identitatis indiscernibilium)* verletzt durch identische Teilchen? 396
- Pion ($\pi^{0,\pm}$) *siehe Abschn. 11.1*, 482
 - Austausch im Quark-Modell 625
 - Eigenparität negativ 499, 542, 589
 - Entdeckung (1947) 485
 - Lebensdauer 491
 - Masse 491
 - Spin 497
 - Vorhersage 482, 588
 - Zerfall $\pi \rightarrow e + \nu$ unterdrückt 547
 - Zerfall $\pi \rightarrow \mu + \nu$ 490
 - geladenes π^\pm 485
 - neutrales π^0 494
 - Lebensdauer falsch in *QED* 495, 607
 - Zerfall nur durch *PCAC*-Anomalie 495, 567, 651
 - nicht Bestandteil des Nukleons 507
- Pion-Nukleon-Streuung 173, 502
- pionisches Atom 491, 492
- Planck, Max (*1858, †1947)
 - Plancksche Konstante 190 192, 383, 385
 - Strahlungsgesetz (1900) 2, 121
 - pleochroischer Halo und Erdalter 174
 - Plücker, Julius (*1801, †1868, Kathodenstrahlen 1858) 14
 - Plutonium (Pu)
 - Bombe 347
 - Isotope 350
 - Kernbrennstoff 355
 - Proliferation 356
 - aus Uran 347
 - in abgebrannten Brennstäben 355
 - Poisson-Verteilung $P_\mu(m)$ *siehe Abschn. 6.1.5*, 35
 - Beispiele 180, 225
 - aus Streuung der Messpunkte abgelesen 492
 - polarer Vektor
 - bei Raumpiegelung 281
 - Polarisation
 - β -Elektronen 543, 545
 - Kernspins
 - Mag. Kernresonanz (*NMR*) 292
 - Wu-Experiment 544
 - Neutrinos 545
 - Photonen 548
 - des Dielektrikums 629
 - des Vakuums 421, 629, 637
 - Politzer, H. David (*1949, Quarks asymptotisch frei 1973) 628
 - Polonium (Po) 26, 174
 - hochenergetische α -Teilchen 241
 - Popper, Karl (*1902, †1994)
 - Logik der Forschung* (1935) 88
 - Positron (e^+)
 - β^+ -Radioaktivität 183
 - als Antiteilchen 447
 - als Loch in Diracs Unterwelt 210, 442
 - anomaler g -Faktor $g \neq 2$
 - Präzisionsmessung 443
 - QED*-Vorhersage 636
 - Positronen-Emissions-Tomographie (*PET*) 212
 - Positronium 210, 306, 438, 446, 495, 550, 611
 - Potential (V , E_{pot})
 - Deutung in der Quantenfeldtheorie 408
 - Potentialbarriere
 - behindert α -Emission 187
 - behindert Fusion 361
 - rechteckig, Tunnel-Effekt 190
 - Potentialstreuung 53

- Powell, Cecil (*1903, †1969, Pion entdeckt 1947) 485
- pp*-Zyklus (Sonnenergie) *siehe* **Abschn. 8.4.1**, 364
- Neutrino-Emission 472
- Präzisionsmessungen *siehe* Resonanzmethoden
- Primär-Kreislauf (Kraftwerk) 354
- Primakoff-Effekt ($\gamma \rightarrow \pi^0$ in Gegenwart eines Kerns) 496
- Prinzipien
- einheitliche in der Physik vi
 - logisch bewiesen, trotzdem verletzt 396
- Produkt-Zustand
- nur bei unterscheidbaren Teilchen 121, 390, 394
- Projektion
- auf Eigenzustand des Messprozesses 120, 542, 554
 - chirale 449
- Proliferation
- Gefahr bei (u. a.) Plutonium 356
- Proton (*p*) *siehe* **Abschn. 4.1.4**
- Austauschsymmetrie *siehe* **Abschn. 7.1.5**
 - Entdeckung 277
 - Masse m_p 15
 - genau 96
 - Quark-Struktur 589
 - Spin *siehe* **Abschn. 7.1.4**, 11, 268
 - Streit um Benennung 84
 - Symmetrie bei Vertauschung 276
 - Widerspruch zur Dirac-Gleichung 286
 - anomaler *g*-Faktor $g_p \approx 5$ *siehe* **Abschn. 7.3.1**, 286
 - elektrisches Dipolmoment? 297
 - enthält punktförmige Streuzentren 602
 - instabil? 471
 - magnetisches Moment μ_p
 - erklärt mit Quarks 592
 - nach Prout benannt (?) 4, 74
- Proton-Elektron-Modell des Kerns Rutherford (1914) 83
- Proton-Neutron-Modell des Kerns (1932) 88
- Prout, William (*1785, †1850)
- alle Elemente aus H-Atomen (1815) 4, 74, 77, 84, 86
 - Atommodell bestätigt (1957) 334, 377
- Prozess
- elementarer in jeder Wechselwirkung 381, 670
 - ist Zustands-Änderung 123
 - makroskopischer Transport mikroskopisch gedeutet 7
 - nur durch Hamilton-Operator eingeführt 396, 399
 - nur mittels Teilchen-Erzeugung/Vernichtung 381, 672
- Pseudo-Skalar 538, 541
- Schraubensinn 538
 - Stabmagnet mit rotem Südpol 298
 - im Wu-Experiment (1957) 543
- pseudoskalare Teilchen
- Deutung erst durch Quark-Modell 501
 - in Dirac-Theorie 438
- ## Q
- QCD* *siehe* Quanten-Chromodynamik
- QED* *siehe* Quanten-Elektrodynamik
- QFT* *siehe* Quantenfeldtheorie
- Quadrupol-Operator
- γ -Emission E2/M2 216
 - statisch 300
- Quadrupolmoment, elektrisches *Q* *siehe* **Abschn. 7.4.2**, 299
- Quanten-Beat, Schwebung 293, 476, 556
- Quanten-Chromodynamik (*QCD*) *siehe* **Abschn. 13.3**, 673
- Asymptotische Freiheit 628
 - Laufende Kopplungskonstante 628
 - Name 585
 - Störungstheorie inkonsistent 619
 - confinement* 617
 - erzeugt die wägbare Masse 624
 - experimentell demonstriert 620
 - als Austauschwechselwirkung 614
 - erklärt Kernkräfte 625
 - genäherte Isospin-Symmetrie 626
 - macht nur Teilchen mit ganzzahliger elektrischer Ladung 589, 590, 652
 - phänomenologisch 590
 - qq*-Potential 613
- siehe auch* Quark, Quark-Modell 614
- Quanten-Elektrodynamik (*QED*) *siehe* **Abschn. 9.4.3**, **9.5ff**, **15.7**, 380
- Genauigkeit unübertroffen 381, 382, 403
 - Hamilton-Operator 215, 403
 - Vorhersagen (quantitativ)
 - Leptonen-Paar-Erzeugung 466
 - anomale *g*-Faktoren 633, 636
 - erst 50 Jahre n.d. Planckschen Gesetz 192
 - skaleninvariant 61, 468
- Quanten-Phänomene
- bei identischen Teilchen 142
 - makroskopische 134

- Quanten-Teleportation 395
- Quantencomputer 134, 395
- Quantenfeldtheorie (*QFT*) 379, 397
 - Grundzustand: das Vakuum 397
 - absurde Zwischenwerte 380, 420
 - für alle Wechselwirkungen 634
 - für schwache/starke Wechselwirkung 522
 - immer alle Teilchensorten beteiligt 641
 - mit Argwohn betrachtet 568, 636
 - nach Yang/Mills 568
- Quantenmechanik
 - Basiswissen v, 119
 - Bornsche Näherung 125
 - Differentieller Wirkungsquerschnitt 127
 - Glücksgriff 146
 - Prüfsteine 122
 - Störungsrechnung *siehe Haupteintrag* Störungstheorie
 - Stoß-Prozess 123
 - Wahrscheinlichkeitsdeutung 156
 - baut auf Bohrschem Atommodell auf 71
 - für Kerne gültig? 103, 191, 230, 257
 - klassischer Grenzfall 124
 - nicht erreichbar 121, 142
 - partiell erreichbar 120
- Quantensprung 157
 - Einstein (1917) 386
 - Emission, Übergang 165
 - in Diracs Feldtheorie 389
 - in der Quantenfeldtheorie 400
- Quantisierung 120
 - der elektrischen Ladung 15
 - des Maxwell-Felds 409
 - via klass. Phasenraum 121
- Quark (*q*) *siehe Kap. 13, 14, und Abschn. 15.2*, 666
 - „nackte“ Masse 624
 - 3 Familien *siehe Abschn. 14.3*, 634, 645
 - Bildungsgesetz unbekannt 586
 - Anziehungskraft (in Tonnen) 613
 - Baryonen, Mesonen 596
 - Auswahlregel „weiß“ 615
 - Begründung der 2. Familie 518, 645
 - Begründung der 3. Familie 648
 - Charmonium 43, 611
 - Farb-Ladung 614
 - Freiheitsgrad *Farbe* 593
 - Hypothese (Murray Gell-Mann, George Zweig 1963) 583, 587
 - Durchbruch 1974 („November-Revolution“) 609
 - anfangs mit Skepsis betrachtet 8, 583, 589, 599, 602
 - Konstituenten-Masse 624
 - Masse nur ungenau 622
 - Namen (Gell-Mann u. Zweig 1963) 583, 587
 - Paarerzeugung 619, 626
 - Paarvernichtung behindert 591
 - Spin-Spin-Kopplung im Baryon 598
 - bottom*-Quark *siehe Haupteintrag* bottom-Quark
 - charm*-Quark *siehe Haupteintrag* charm-Quark
 - confinement* 615, 673
 - experimentell 620
 - down*-Quark *siehe Haupteintrag* down-Quark
 - jets* 620
 - strange*-Quark *siehe Haupteintrag* strange-Quark
 - top*-Quark *siehe Haupteintrag* top-Quark
 - up*-Quark *siehe Haupteintrag* up-Quark
 - echtes Teilchen? 622
 - elektromagnetisch erzeugt 606
 - gebrochene elektrische Ladung 588
 - Messung 606
 - experimenteller Nachweis 604
 - magnetisches Moment 592
 - nachgewiesen? 599
 - nicht in Massenspektren 590
 - nicht in der Höhenstrahlung 584, 590
 - nicht in optischen Spektren 590
 - neuer Begriff eines *Teilchens* 585
 - nie einzeln 585, 615, 618, 620
 - hadronisiert 607, 620
 - qq*-Potential 617
 - und Partonen 603
 - zeigen sich als Stoßpartner 602
 - streuen kohärent oder inkohärent? 606
- Quark-Lepton-Symmetrie *siehe Abschn. 14.4*, 649
 - Begründung 635
 - beseitigt Anomalie (des Stroms) 650
 - durch τ -Lepton gestört 464
 - durch *charm*-Quark hergestellt 464
- Quark-Modell 482
 - Ausgang aus dem Teilchenzoo 533
 - bestechend einfach 589, 592, 596
 - erklärt Reaktionen 590
 - erklärt magnetische Momente 592
 - statisch/dynamisch 585, 600, 621
- Quecksilber (Hg)
 - Atome sind Massenpunkte (1875) 9
 - Entropie und Quantisierung des Phasenraums (1913) 121
- Quellen ionisierender Strahlung

- natürliche und zivilisatorische 182, 363
- R**
- ρ -Meson 505
- r-Prozess (Element-Entstehung) 376
- Rabi, Isidor (*1898, †1988)
 - , „Wer hat das Myon bestellt?“ 457
 - Resonanz-Methode für Kernmomente 286
- Radioaktive Abfälle 355
- Radioaktive Strahlen *siehe Kap. 6*
 - Entdeckung 25
 - Entstehung 155
 - Unterscheidung α , β , γ 155
 - Wechselwirkungen 155
 - nur aus Kernen 160
- Radioaktiver Zerfall *siehe Abschn. 6.1*, 157
- radioaktives Gleichgewicht 185, 186
- Radioaktivität *siehe Abschn. 6.2*, 23
 - , „künstliche“ 250
 - Eigenschaft einzelner Atome 162
 - Entdeckung *siehe Abschn. 2.1*, 13
 - Wärmestrom aus dem Erdinnern 336
 - Zerfallsgesetz 155
 - Zerfallskonstante
 - doch zu beeinflussen 158, 243
 - nicht zu beeinflussen 158
 - chemisch nicht beeinflussbar (M. Curie) 26
- Radionuklide
 - , „künstliche“ 184
 - , „natürliche“ 183
- Radium (Ra) 26
- Radium-Emanation (Radon/Thoron Rn) 49
- Radon (Rn) 49, 182
- Rainwater, Leo (*1917, †1986, Kernmodell ab ~1952) 304
- Raketen-Auto paritätsinvariant? 540, 544
 - Experiment dazu 546
- Raman-Effekt in Molekülspektren 269
- Ramsay, William (*1852, †1916, Edelgase 1895) 12, 28
- Raster, diskretes, vs. Kontinuum 1, 177, 531
- Raster-Tunnel-Mikroskop 190
- Raumspiegelung *siehe* Parität
- Raumwinkel $\Omega = (\theta, \phi)$ 57
- Rayleigh, Lord (*1842, †1919, Argon 1895) 12
 - Rayleigh-Streuung (klassischer Grenzfall des Compton-Effekts) 202
- Reaktor 346, 350
 - Mehrzweckforschungsreaktor MZFR (Karlsruhe 1958) 348
 - Moderation 347
 - Natur-Uran/Kohlenstoff (Fermi 1942) 347
 - Neutrino-Quelle 234, 340
 - Neutronenquelle 231, 246
 - Schneller Brüter 351
 - für U-Boot/Stromerzeugung 348
 - heterogener 347
 - Reaktorperiode 351
 - Reaktorsicherheit, inhärente 352
 - rechte Hand mit Worten definierbar? 540, 544
 - ja 558
 - nein 550
 - rechtshändig
 - Antifermionen 545
 - chirale Unterscheidung 448
 - Rechtsschraube 538
 - reduzierte Masse m_{red} 43, 55, 306
 - im äquivalenten 1-Teilchen-System 146
 - myonisches Atom 229
 - pionisches Atom 491
 - Regularisierung divergierender Integrale 129, 422
 - Reibung
 - nicht bei Elementarteilchen 31, 666, 675
 - Reichweite
 - Unterschied Ionen-/ γ -Strahlung 41
 - der Wechselwirkung
 - Coulomb 105, 423, 672
 - Deutung nach Wick 423
 - Kernkräfte 68, 75, 111, 625
 - Schwache Wechselwirkung 240
 - Schwache vs. el.-mag. 571
 - Yukawa-Hypothese 483, 672
 - abgeschirmtes Coulomb-Pot. 129
 - bei Fusion 359
 - beim Stoß 33
 - charakteristischer Parameter 129, 415, 422, 468, 482, 483
 - durch Elektronen-Austausch 482
 - im Feynman-Propagator 415, 485
 - im Quark-Potential 617
 - max. Korrektur am Coulomb-Gesetz 468
 - und Einzelteilchenmodell 329
 - und Masse der Austauschteilchen 415, 673
 - und Sättigung 111
 - zwischen Molekülen 75
 - der Wechselwirkungen
 - zwischen Atomen 12, 189, 482, 652
 - zwischen Molekülen 652
 - Reichweitenverteilung

- Unterschied α/γ -Strahlung 198
- Reines, Frederick (*1918, †1998)
 - Neutrino-Nachweis (1956) 234, 246, 470
 - Nobelpreis verspätet (1995) 463
- Relativ-Messung
 - Myon nicht Yukawa-Teilchen 457
 - verringert systematische Fehler 271
 - überzeugende Methode 28, 95, 294, 444, 461, 475, 493
- relativistische Invarianz *siehe* Lorentz-Invarianz
- Relativitätsprinzip 205, 426, 429, 567, 667
- Relativitätstheorie v, 17, 30, 97
 - , „Massenzunahme“ 227, 439
 - Energie-Impuls-Beziehung 45, 199, 205, 387, 403, 406, 408, 429, 453, 601
 - Lorentz-Invarianz 429
 - führt Wellen im Vakuum ein 383
 - und klassischer Elektronenradius 203
- Relativkoordinate 55
- Relaxationsvorgang
 - Kernspins bei magnetischer Resonanz 293
 - exponentielles Abfallen 162, 308
 - nicht ohne Antriebskraft 162
- Renormierbarkeit 422
 - Elektroschwache Wechselwirkung 586
 - Quanten-Elektrodynamik 422
 - nur mit Austauschteilchen 563
 - nur mit *Higgs*-Boson 635
 - unmöglich bei massiven Austauschteilchen 568
 - doch möglich mit massiven Austauschteilchen (t'Hoofit 1971) 571, 576
 - unmöglich durch *Anomalie* (der *QFT*) 586, 650
- Renormierung 381, 420
 - bei Elektroschwacher Wechselwirkung 576
 - bei Fermi-Wechselwirkung nicht möglich 563
 - gelernt am anomalen *g*-Faktor des Elektrons 636
 - laufende Kopplungskonstante 629
 - trotz massiver Austauschteilchen 571
- Renormierungsskala (Δ) 422
- Resonanz
 - Anzeichen für Absorption 291
 - Güte Q 173, 308, 372
 - Halbwertsbreite/Lebensdauer 168, 173, 308, 580, 610, 642
 - Riesenresonanz (Dipol-Schwingung des Kerns) 308
 - im Mössbauer-Effekt 173
 - in α - α -Streuung 372
 - in e^+e^- -Reaktion 169, 580, 612, 642
 - in $p\bar{p}$ -Reaktion 580
 - in Kernfusion $3\alpha \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$ 373
 - in Pion-Nukleon-Streuung 173, 502
- Resonanz-Teilchen 170
 - Bildung durch Fusion 361
 - Teilchenzoo 505
- Resonanzkurve 168
- Resonanzmethode für Präzisionsmessung 286
 - Kernmasse 95
 - Magnetisches Moment 286, 290, 443
 - Schallgeschwindigkeit 9
- Restwechselwirkung
 - im Einzelteilchen-Modell 330
 - in der Atomhülle 100, 330
- reziprokes Gitter 139
- Richter, Burton (*1931, *J/ψ*-Meson 1974) 610
- Richtungsquantelung 260
- Riesenresonanz (kollektive Anregung) 305
- Rohrer, Heinrich (*1933, Raster-Tunnel-Mikroskop 1981) 190
- Röntgen, Wilhelm C. (*1845, †1923) 25, 525
- Röntgenstrahlung, charakteristische *siehe* auch *X-rays*
 - nach Elektronen-Einfang (EC) 243
 - nach innerer Konversion 221
- Rosinenkuchen-Modell 16, 42
- Rotation
 - Atom: eingefrorener Freiheitsgrad 10
 - Molekül
 - 2 nicht eingefrorene Freiheitsgrade 11
 - und Definition des Drehimpulses 259, 433
- Rotations-Symmetrie
 - Drehimpuls-Erhaltung 507
- Rotationsbande
 - Kern 310
 - Molekül 269
 - äquidistantes Linien-Spektrum 269, 310
- Rotationsellipsoid (Quadrupolmoment) 299
- Royal Society of London (älteste Wissenschaftsgesellschaft) 335
- Rubbia, Carlo (*1934, W^\pm , Z^0 -Nachweis 1984) 579
- Rubidium (Rb)
 - Rubidium-Strontium-Methode 175
- Rückwärtsstreuung 51, 54
- Ruhezustand
 - der Strahls im *Collider* 527

- nicht für Photon 210, 578
 - nicht für gebundenes Teilchen 205
 - Russel-Saunders-Kopplung 257
 - Rutherford Backscattering Spectroscopy
siehe Abschn. 3.3
 - Rutherford, Ernest (*1871, †1937) 16, 630
 - Atomkern entdeckt *siehe Abschn. 3.1*, 47, 584
 - Atommodell 70
 - wurde zunächst ignoriert 70, 602
 - Nobelpreis für *Chemie* 26
 - Spekulationen
 - α -Energie durch Coulomb-Abstoßung 186
 - „Nutzung der Kernenergie ist Unsinn“ 334
 - Alter der Erde 335
 - Deuteron 86
 - Kernladung positiv 186
 - Neutron 86
 - Proton-Elektron-Modell des Kerns 83, 86
 - Sonne radioaktiv *siehe Abschn. 8.1.1*
 - Stern-Energie 333
 - Transmutations-Gesetze 26, 182, 678
 - exponentielles Zerfallsgesetz (1900) 157
 - geologische Altersbestimmung (1929) 174
 - Rutherford-Formel
 - auf Impulsübertrag zurückgeführt 62
 - experimentelle Überprüfung 59
 - quantenmechanisch exakt bestätigt 130
 - außer wenn Projektil und Target identische Teilchen 143
 - wird falsch bei anderem Kraftgesetz 68, 130
 - Rutherford-Rückstreu-Spektroskopie *siehe Abschn. 3.3*
 - in Festkörperphysik 48
 - Rutherford-Streuung *siehe Abschn. 3.1*, 49
 - Aktuelle Anwendung *siehe Abschn. 3.3*, 62
 - Strahlaufweitung 51
 - anomale *siehe Abschn. 3.4*, 132
 - klassische Theorie *siehe Abschn. 3.2*
 - quantenmechanisch exakt bestätigt 130, 136
 - quantenmechanisch stark modifiziert 146
- S**
- s-Prozess (Element-Entstehung) 376
 - s-Quark *siehe strange-Quark (s)*
 - Sacharow, Andrej (*1921, †1989)
 - H-Bombe/Menschenrechtsaktivist 362
 - Sackur, Otto (*1880, †1914)
 - \hbar hat universelle Bedeutung (1913) 121
 - Entropie klassisch 121
 - Salam, Abdus (*1926, †1996, Elektroschwache Wechselwirkung 1967) 536, 574
 - Sargent-Regel für Energie und Lebensdauer bei β -Radioaktivität 232
 - Satelliten-Linien
 - γ -Spektrum (Paar-Bildung) 211
 - Raman-Molekül-Spektren 269
 - scatter plot* (Bsp. Halbwertszeit vs. α -Energie) 187
 - Schalenabschluss
 - Evidenz bei Kernen 320
 - im Oszillator-Potential 323
 - in der Atomhülle 99, 322
 - Schalenmodell *siehe Abschn. 7.6*
 - Erfolg durch Pauli-Prinzip 331
 - Leucht-Nukleon 290
 - für die Hülle
 - erklärt chemische/mechan. Materialeigenschaften 71, 652
 - führt auf Pauli-Prinzip 450
 - mit Oszillator-Potential 321
 - mit Spin-Bahn-Wechselwirkung 257, 326
 - Schall (langwellige Phononen) 259
 - Schallausbreitung
 - im Standard-Modell: elektromagnetisch 654
 - in der kinetischen Gastheorie 9
 - Scheibenform der Erde vi
 - Schleifen-Diagramm 420, 637
 - Schmidt-Linien (magnetische Kernmomente) 290
 - Schöpfungsakt oder Evolution? 174, 334
 - Schrödinger, Erwin (*1887, †1961) 71
 - Wellen-Mechanik (1926) 122
 - Schrödinger-Gleichung (1926) v, 125
 - Teilchen an klassisch verbotenen Orten 188
 - bestimmt Zustandsänderung 123
 - ergibt Quantisierung des Phasenraumvolumens 120, 235
 - mit Störpotential 165
 - nicht relativistisch 209, 426, 429
 - zeitumkehrinvariant 560
 - Schrieffer, Robert (*1931)
 - Theorie d. Supraleitung (1958) 569
 - Schuhputzen wellentheoretisch 135
 - Schwache Ladung
 - Universalität 535, 605, 645
 - nicht erhalten (CVC, PCAC) FN 623

- Schwache Wechselwirkung *siehe Kap. 12 und Abschn. 6.5.7ff*, 673
- Austauschteilchen 563
 - Nachweis (1984) *siehe Abschn. 12.5.4*, 226
 - als reelle Teilchen erzeugt 578
 - CKM-Matrix 648
 - CP-invariant? 550
 - CVC, PCAC 566
 - Cabibbo-Drehung 645
 - Drehung im *flavor*-Raum 647
 - Fermi-Theorie (1934) *siehe Abschn. 6.5.7ff*, 234, 239, 563
 - Feynman-Diagramm 564
 - Invarianzen 244, 634
 - auch ohne Neutrinos 514
 - bei *pp*-Fusion 366
 - bricht Ladungsumkehrsymmetrie *siehe Abschn. 12.3*, 550, 676
 - bricht Paritäts-Invarianz *siehe Abschn. 12.2*, 226, 542, 676
 - maximal 559, 566
 - bricht Zeitumkehrsymmetrie *siehe Abschn. 12.4*, 562, 676
 - eleganter bei 4 statt 3 Quarks 645
 - erste neue Naturkraft (1934) 226
 - hat Stärken 537, 653
 - in Vertex-Korrektur 639
 - kurze Reichweite erklärt 574
 - lange Brenndauer der Sonne 366
 - macht Energie-Aufspaltung 557
 - nur mit chiralen Teilchen 448
 - schwach durch schwere Austauschteilchen 536
 - stärker als die Elektromagnetische 574
 - universelle Stärke 566, 605, 645
 - wandelt *flavor* um 591, 677
 - wichtige Rolle in der Welt 653
 - zwischen *allen* Fermionen 591
- Schwacher Isospin 572
- Schwarzes Loch 377, 473
- Schwebung, Quanten-Beat 557
- Schwerefeld (Wirkung auf 2-Teilchen-System) 147
- Schwerpunkt-System (S,CMS) 32, 147, 488, 498, 499, 505, 522, 527
- science fiction*
- im Überschuss-Formalismus spekulieren 453
 - unbemerkte Teilchen? 642
- Scissionspunkt (bei Kernspaltung) 338
- Sedimentationsgleichgewicht 13
- See-Quarks 622
- Seegang, rauer (inkohärente Summierung von Wellen) 385
- Seifenblasen (Oberflächen-Vibration) 314
- Sekundär-Kreislauf (Kraftwerk) 354
- Selbstenergie (Energieverschiebung durch virtuelle Anregungen) 381, 406
- Selbstvernichtung (der Zivilisation, möglich durch nukleare Energie) 334
- seltene Teilchen
- Entdeckung (1947) 512
 - strangeness*-Ladung *S* 515
 - strangeness*-Oszillation 517
 - paarweises Entstehen 514
- Shockley, William F. (*1910, †1989, Transistor 1948) 189
- Shull, Clifford G. (*1915, †2001, Interferenz von Neutronenstrahlen an Kristallen 1946) 135
- Siedewasser-Reaktor (Kraftwerk) 354
- Signifikanz 462
- g*-Faktoren Myon/Elektron 445, 462, 640
 - beim Nachweis des Tauons 464
 - statistische 180, 228
- Silizium (Si)
- Si-Brennen – letzte Stunde vor der Supernova 374
 - durch Ionenbeschuss dotiert 64
- Simulations-Methode 139
- Singularität
- Nullpunktsenergie 399
 - durch Renormierung beherrscht 380
 - im Potential (Coulomb, Quark-Quark) 612
- Singulett-Zustand
- Drehimpuls Null 266
 - gegen Transformation invariant 266, 392, 508, 569, 570, 615, 616
- Sinneswahrnehmungen
- Kontinuum „wirklich“ oder „vorge-täuscht“? 1, 3, 531
 - direkter Wahrheitsbeweis? 3, 88, 584
 - gerastert/diskontinuierlich 1, 531
 - physikalische Mechanismen 1, 654
 - und Standardmodell 654
- skalare Kopplung 564
- skalares Teilchen (Spin 0) 499, 564
- Skalarprodukt
- Lorentz-invariantes ($j^\mu A^\mu$) 433
 - von Zustandsvektoren $\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle$ 126
- Skalen-Invarianz 61
- Coulomb-Kraft 54, 61, 423, 468
 - bei Streuung an punktförmigen Zentren 604

- klassische Physik 54, 665
- Skalenfaktor
 - QED*-Wirkungsquerschnitte bei verschiedener Ladung 607
 - atomar vs. makroskopisch 7, 78
- Skalenverhalten
 - Wirkungsquerschnitt $\propto E^{-2}$ 61, 467, 644
 - bei Streuung: nur für punktförmige Streuzentren 628
 - nicht zwischen Klassischer und Moderner Physik 1, 9
- Soddy, Frederick (* 1877, † 1956)
 - Isotopie 82
 - Transmutations-Gesetze 182
 - opponiert gegen Namen „Proton“ 84
- Sommerfeld, Arnold (* 1868, † 1951)
 - Feinstrukturkonstante α 45, 212, 407, 423, 612, 639
 - Standardwerk „Atombau und Spektrallinien“ 71
 - zum Streit Energetik/Atomistik 599
- Sonne
 - Ende als Mira-Stern 373
 - Energie aus Fusion 364
 - am Erlöschen? 473
 - lange Brenndauer
 - durch *pp*-Fusion 366
 - durch Schwache Wechselwirkung 366
 - von Kelvin unterschätzt 335
 - weil ${}^8_4\text{Be}$ nicht stabil 102
 - radioaktiv geheizt? 335
- Sonnen-Neutrinos
 - Defizit 473
 - das „Problem“ 367
 - nachgewiesen 471
- Sonnensystem
 - Entstehung 175
 - Häufigkeit der Elemente 71, 369
- Sp* \bar{p} *S* (Proton-Antiproton-Collider) 524
- Spallation
 - Ursprung der leichtesten Kerne 377
- Spaltbarriere 116, 339
 - Unterschied *gg*/*ug*-Kern 342
- Spaltneutronen
 - Energieverteilung 347
 - prompte 340
 - verzögerte 351
- Spaltparameter 116, 338
- Spaltprodukte
 - Massenverteilung 343
 - Nachkühlung 354
 - Rückhaltung 353
 - radioaktiv 341
- Spaltung *siehe Abschn. 8.2*, 116, 338
- Speicherring 526
- Spektrallinien
 - anomale Intensitäten bei H_2 , N_2 268
 - optische 2
 - natürliche Linienbreite 174
 - von Atomen
 - Balmer-Formel 16
 - Spektralanalyse 16
 - charakteristische Röntgenstrahlung 48, 78, 183, 228
 - von Molekülen
 - Mikrowellen 11
 - Rotationsbanden 269
- Spektroskopie
 - „3 Arten“
 - Hadronen-Massen 599
 - Kernstrahlung 157
 - optische 16
- Spekulationen (*siehe auch Rutherford, Ernest*)
 - im Überschuss-Formalismus 453
 - wissenschaftliche 636
- spezifische Ladung
 - des Elektrons e/m_e (1897) 14
 - im Massenspektrometer Q/m 79
 - von β -Teilchen $\approx e/m_e$ 227
- spezifische Wärme (c_P , c_V)
 - Hinweis auf realen Massenpunkt (1875) 9
 - Zahl der Freiheitsgrade 9
 - anomale T -Abhängigkeit bei H_2 268, 272
- Spiegelsymmetrie *siehe auch Parität*
 - gebrochen v, 226, 536
 - beim Stabmagneten? 298
 - nur geradzahligere Drehimpuls 312
- Spiegelung *siehe Abschn. 7.2*
 - an der Ebene/im Raum 281, 539
 - wechselt im Spiegel der Drehsinn? 281
- Spin $s = \frac{1}{2}$ v, *siehe Abschn. 7.1.2, 10.2.2, 15.3*
 - „parallel zu jedem Vektor“ 267
 - Begründung in Dirac-Theorie 431
 - Modell für jedes 2-Zustandssystem 264
 - Pauli-Spinor *siehe Abschn. 7.1.2*, 10.1
 - äquivalent zum Vektor im 3-dim. Raum 266, 302
 - in die Quantenmechanik eingeführt 263
 - kann bei identischen Fermionen Unterscheidung ermöglichen 152
 - klassische Erklärung unmöglich 428, 436
 - nötig für Rotationsinvarianz der Dirac-Gleichung 433

- zentral in relativistischer Quantenmechanik 267, 431, 433
- Spin-Bahn-Wechselwirkung ($\hat{\vec{L}} \cdot \hat{\vec{s}}$)
 - im Kern-Schalenmodell 326
 - in Proton-Neutron-Streuung 113
 - in der Atomhülle 262
- Spin-Spin-Wechselwirkung ($\hat{\vec{s}}_1 \cdot \hat{\vec{s}}_2$)
 - Kern und Hülle 262
 - Kernspins im Molekül 275, 295
- Spin-Statistik-Theorem *siehe*
 - Abschn. 10.2.8**, 279, 426
 - Beweise 452
 - bei Quarks 594
- spontane Symmetrie-Brechung
 - Beispiel Ferromagnet 569
 - Beispiel Handschuh 541
 - Higgs-Mechanismus 569
- Spurenelement
 - Halbleiter-Dotierung 65
 - Nachweis im Massenspektrometer 73
 - Neutronengift (Reaktor) 347
 - selten, weil Neutroneneinfang stark 376
- stabile Teilchen
 - im Jargon der Elementarteilchenphysik 514
 - nur ein einziges Hadron 532, 653
 - nur je 1 Lepton und Quark 653
- Stabmagnet (S grün, N rot):
 - bei Spiegelung Farben falsch? 298
- Standard-Abweichung (\pm) σ 35
 - in Unschärfe-Relation 124
 - zu *erwartende* Streuung 179
- Standard-Modell *siehe* **Kap. 15**, 379, 631
 - Entstehung (ab 1970) *siehe* **Abschn. 12.5** und **Kap. 14**, 226
 - Erhaltungssätze 633
 - externe Parameter 644
 - frühe „Vorläufer“ 4, 70, 89, 677
 - fundamentale Teilchen 631
 - wie viele Arten gibt es? 677
 - geprüft an g -Faktor-Anomalie 638, 640
 - nicht ohne Higgs-Boson 635
 - offene Fragen *siehe* **Abschn. 14.6**, 635
 - und Alltagsphänomene *siehe* **Abschn. 14.5**, 651
 - und Lebensbedingungen 655
 - und Sinneswahrnehmungen 654
 - und geometrische Optik 654
- Standard-Werkzeug
 - in Experimenten der Kern- und Elementarteilchenphysik 48
- Stärkeparameter der Wechselwirkung (*siehe* auch Kopplungskonstante) 44, 61, 203, 574, 612
- Starke Wechselwirkung *siehe* **Kap. 13**, (*insb. Abschn. 13.3*) und **11**, 173
 - Austauschteilchen Gluon 615
 - Erforschung mit Beschleunigern 502
 - Invarianzen 634
 - SU(3)-Symmetrie 521
 - auch von Gluon zu Gluon 618
 - bewirkt Kernkräfte 615, 625
 - erhält *flavor* 590
 - ist invariant gegen Drehung im Isospin-Raum 510
 - jedenfalls näherungsweise *siehe* **Abschn. 13.3.4**, 510, 520
 - nicht mit Leptonen 590
 - untersucht anhand ihrer Energie-Niveaus 507, 508, 599, 627
- starrer Körper
 - 6 Freiheitsgrade 9
 - nach Relativitätstheorie unmöglich 665
- Statistik
 - Boltzmann 449
 - Bose-Einstein 450
 - Exponentialverteilung 198
 - Mittelwert 161
 - Fermi-Dirac 108, 450
 - Poisson $P_\mu(m)$ 170, 177, 178, 492
 - bei Teilchenvertauschung 276, 391, 426
 - Gibbs'sches Paradoxon 449, 664, 670
 - Spin-Statistik-Theorem 452
 - klassisch 449, 670
 - quantenmechanisch 452
- statistische Schwankungen
 - Poisson-Verteilung 179
 - Zeitumkehr-Invarianz 560
 - als Umkehr *irreversibler* Prozesse 12
 - der Wärmestrahlung (Einstein) 385
 - der Zählrate 170, 177, 465, 492
 - im Mikroskop beobachtet 13
- Statistisches Gewicht, Entartungsgrad 270
- Sterile Teilchen 546
- Stern, Otto (* 1888, † 1969, Protonen- g -Faktor 1933) 286
- Stern-Gerlach-Experiment 255
- Sterne
 - Energie/Entwicklung *siehe* **Abschn. 8.4**, 364
 - Typen 333
 - Neutronenstern 377
 - Schwarzes Loch 377
 - Supernova 374
 - Veränderliche (Mira) 373

- Steuerstäbe (Kernreaktor) 350
- Stoß *siehe auch* Streuung
- Labor-/Schwerpunktsystem 31, 488
 - Streuung oder Stoß? 123
 - durch Austausch virtueller Teilchen 412, 672
 - elastischer 31
 - Elektron-Kern 136
 - Elektron-Proton 601
 - Photon-Atom 201
 - Photon-Elektron 200
 - Photon-Kristallit 201
 - bei Feldquanten immer elastisch 401
 - ist nur Impulsübertrag 33, 62, 124
 - im Hamilton-Operator der Quantenfeldtheorie 401, 672
 - inelastischer
 - Elektron-Proton 602
 - Photon-Molekül 269
 - eines Photons 201
 - invariante Masse 601
 - quantenmechanisch *siehe Abschn. 5.1*
 - in Bornscher Näherung 128
 - und Fusion 361
 - unterdrückt durch Pauli-Prinzip 330
 - von identischen Teilchen
 - klassisch 143
 - quantenmechanisch *siehe Abschn. 5.7.2*
 - wichtiges Untersuchungsmittel 31, 50, 600
 - Stoßparameter 36, 44, 56
 - Störoperator \hat{H}' 165, 282
 - Schwache Wechselwirkung 548, 555
 - Streupotential 126
 - $SU(3)$ -brechend 508, 628
 - elektrisches Dipolmoment 297
 - für Emission/Absorption (Dirac 1926) 389
 - im elektromagnetischen Feld 196, 213
 - Störungstheorie
 - 0. Ordnung 411, 421
 - 1. Ordnung 36, 40, 127, 130, 168, 404, 411, 555
 - zeitabhängig 165
 - zeitunabhängig 168
 - 2. Ordnung 405, 407, 555, 565, 637
 - 4. Ordnung 638
 - 6. Ordnung 639
 - 8. Ordnung 639, 674
 - Angepasste Nullte Näherung 552
 - Dirac (1926) 164
 - Energie-Nenner *siehe Haupteintrag*
 - Energie-Unschärfe 167
 - inkonsistent bei Starker Wechselwirkung 619
 - nur bei Renormierbarkeit 423
 - Strahlenbelastung
 - durch K-40 183
 - durch Kernwaffenversuche 184, 363, 463
 - durch Radon 182
 - durch Spaltprodukte 340, 363
 - zivilisatorische 355
 - Strahlendosis 42
 - Strahlenschutz 27, 29, 204
 - Massenschwächungskoeffizient für γ -Strahlen 198
 - Strahlungsdruck
 - durch Neutrinos 375
 - in Sternen 373
 - in Supernova 374
 - Strahlungsgleichgewicht
 - Urknall
 - Elektron-Positron-Paare 371
 - Kernverschmelzung 371
 - atmosphärische Mikrowellen 11
 - mittlere Temperatur der Erde 336
 - Strahlungskorrektur 381, 410
 - erklärt $g \neq 2$ 382, 636
 - strange-Quark (s) 583, 586, 588, 631
 - $-\Phi^0$ -Zerfall und Zweigs Regel 518, 592
 - strangeness S *siehe Abschn. 11.3.3*, 512
 - und Isospin T 518
 - Strassmann, Fritz (*1902, †1980, Kernspaltung entdeckt 1938) 159, 344
 - Streuamplitude $f(\Delta k)$ 127, 138
 - Fourier-Transformierte des Potentials 128
 - im Hamilton-Operator 401
 - und Feynman-Propagator 415
 - Streustrahlung von γ -Strahlung in Materie 204
 - Streutheorie, Transporttheorie 57
 - Streuung *siehe Abschn. 5.1*, *siehe auch* Stoß
 - $-\alpha$ -Teilchen an Goldatomen 50
 - elastische 136
 - tief-inelastische 600
 - und Stoß 123
 - von Licht
 - am Doppelspalt 132, 379
 - diffuse an Nebel 135
 - diffuse an staubigen Flächen 135
 - ergibt den Brechungsindex 654
 - Streuwelle 125, 127, 165

- Gangunterschiede 134
 - am Kern 136
 - Goldene Regel angewandt 167
 - kugelförmig 126
 - mehrere *siehe* kohärent, inkohärent
 - und reziprokes Gitter 139
 - Streuzentrum 51, 53, 56
 - Formfaktor 138, 600
 - ausgedehntes 137
 - mehrere *siehe* **Abschn. 5.5**, 132
 - punktförmiges 139, 602
 - Parton 585
 - string*-Theorie 636
 - Strom (Ausdruck für Übergang) 244
 - Strom-Strom-Kopplung 441
 - Stromdichte \vec{j} , wellenmechanisch 244
 - Stromdichteverteilung (elekt.)
 - Erzeugung magnetischer Strahlung 218
 - Stromwirtschaft, nukleare 353
 - Strontium (Sr) 175
 - Rubidium-Strontium-Methode 175
 - Struktur-Funktion (Quark-Modell) 604
 - Strychnin zur Pupillen-Erweiterung (Legende) 177
 - $SU(2)$ Symmetrie für jedes 2-Zustands-System 264
 - $SU(3)$ *siehe* **Abschn. 11.3.4**
 - Multipletts für Hadronen 519
 - Ordnungsschema der Hadronen 509, 518
 - reicht nur für drei Quarks 522
 - $SU(3)$ -Symmetrie
 - exakt für die Farbladung ($SU(3)_C$) 594
 - gebrochen in Hadronen-Multipletts 521
 - nur bei 3 Quarks gleicher Masse 627
 - Super-Auswahlregel (=Erhaltungssatz) 395
 - Super-Bombe 363
 - Supernova 333
 - Entstehung schwerer Elemente 377
 - Neutrinos nachgewiesen (1987) 248, 471
 - Superposition
 - bei Vektoren 120
 - nur von gleichartigen Wellen 121, 678
 - von „rechts“ mit „links“ 541
 - von Teilchen mit Antiteilchen:
 - ja 517, 553
 - nein 679
 - von Zuständen 120
 - Bedeutung für die Moderne Physik 120, 384, 476, 517, 552, 554, 557, 595, 645, 678
 - von verschiedenen Teilchen 645
 - Superpositionsprinzip 137, 476, 517, 541, 552, 554
 - Supraleitung 134
 - theoretisches Vorbild bei Elementarteilchen 569
 - $SUSY$ (*Supersymmetrie*) 636
 - Symmetrie 508
 - Gruppen-Theorie 508
 - Ladungsumkehr 548
 - Leitfaden bei neuer Theorie 433, 567, 572
 - Leptonen-Quarks 586, 633, 649
 - durch τ -Lepton gestört 464
 - durch *charm*-Quark hergestellt 464, 630
 - durch *top*-Quark hergestellt 630
 - Noether-Theorem 508
 - Ordnungsprinzip 506
 - bei Drehimpuls-Addition 454
 - bei Funktion $f(x)$ 452
 - bei Vertauschung identischer Teilchen *siehe* identische Teilchen - Vertauschungssymmetrie
 - gebrochen 260, 510
 - in abstrakten Räumen 480
 - klassische Physik 535
 - messbare Folgen für Elektronen-Energie/Schalenmodell/Chemie 393
 - und Erhaltungsgröße 507, 633
 - Symmetrie-Gruppe
 - $SU(3)_C$ 594
 - Fundamental-Darstellung 587
 - $SU(2)$ 264, 509, 627
 - $SU(3)$ 480, 509, 518, 583, 586
 - nicht-abelsch 618
 - räumliche Drehungen im \mathbb{R}^3 264, 519
 - Synchro-Zyklotron (Pionen erzeugt 1946) 487
 - Szintillation 23, 26, 50, 155, 526
 - γ -Detektor 222
 - Rückstreuung von α -Strahlen (Marsden 1909) 49
- ## T
- τ -Lepton *siehe* Tauon
 - Tastsinn
 - im Standardmodell: elektromagnetisch 654
 - Tauon (Entdeckung 1975) 464
 - Taylor, Richard E. (*1941, Skalenverhalten in e - p -Streuung 1972) 604
 - Teilbarkeit der Materie
 - Annäherung an untere Grenze 1, 395
 - Skalenfaktor: Avogadro-Konstante N_A 7
 - Teilchen, neues

- undenkbar (bis ~1930) 74, 89, 233, 442
- vorhergesagt (hypothetisch)
 - Higgs (H) 537, 569, 575, 635, 655
- vorhergesagt (richtig)
 - Ω^- 521
 - ν 233
 - ν_τ 466
 - π^0 494
 - π^\pm 75, 483
 - e^+ 209, 443
 - Yukawa-Meson 455
 - charm-Quark 518
 - top-Quark 630
- Teilchen/Antiteilchen-Paar 157
 - Annihilation *siehe Haupteintrag*
Annihilation
 - Erzeugung aus Energie 466, 522, 641
 - Symmetrie verletzt? 443, 493
 - Vernichtung *siehe* Annihilation
 - erstes Paar Hadron/Antihadron 491
 - virtuell (Vakuumpolarisation) 420, 421, 629, 637, 640
 - wechselseitige Umwandlung 517
- Teilchendichte
 - Fusions-Reaktor 363
 - Weltall (mittel) 660
 - im Photonengas 387
- Teilchenphysik
 - statt „Elementarteilchenphysik“ 634
- Teilchenstrom (Stromdichte) \vec{j} 124, 166, 441
- Teilchenzahl
 - Erhaltung bei α -Radioaktivität (Nukleonen, Elektronen) 192
 - Erhaltung bei β -Radioaktivität (Nukleonen, Leptonen) 234
 - Erhaltung der Fermionen
 - bei Paarerzeugung 210
 - im Feynman-Diagramm 418, 633
 - Erhaltung der Leptonen nicht durch Symmetrie begründbar 633
 - Erhaltung der Quarks nicht durch Symmetrie begründbar 633
 - Quarks und Leptonen nicht erhalten in neuen Theorien 661
- Teilchenzahl-Operator $\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a}$ 398
- Teilchenzoo der Hadronen 479, 583
 - Ausgang *siehe Abschn. 11.6*, 532
 - Eingang 482
 - Vielfalt 506
 - erklärt im Quark-Modell 598
 - hineinschleichen 607
- Teller, Edward (*1908, †2003)
 - „Vater der H-Bombe“ 362
 - Atombombe angeregt 357
 - gegen Teststopp-Abkommen 363
- Temperaturausgleich (Relaxationsvorgang) 162
- Tensor-Operator (Dipol, Quadrupol, ...) 302
- Termsymbol (Schalenmodell) 325
- Teststopp-Abkommen (auch gegen radiologische Umweltbelastung) 363
- Theorie
 - Leitfaden für Experimente 455, 536, 543, 576, 578
 - nicht Leitfaden für Experimente 455
 - vorauslaufende Spekulation 475
- Thermodynamik
 - Gleichgewicht aus Statistik 451
 - zeitumkehrinvariant? 559
- thermonukleare Bombe 362
- Thomson, George P. (*1892, †1975, Interferenz von Elektronen an Kristallen 1927) 134
- Thomson, Joseph J. (*1856, †1940)
 - e/m_e gemessen (1897) 14
 - Chem. Elemente sind Gemische 73
 - Rosinenkuchen-Modell 42
 - Streuquerschnitt für elektromagnetische Wellen 202
 - keine Erklärung für Rutherford-Streuung 52
- Thorium (Th) 23, 157
- Thoron (Tn, Radon-224)
 - Entdeckung des expon. Zerfalls 157
 - Nachbildung 158, 185
- tief-inelastische Streuung 584, 600
 - Hinweis auf Quarks 619
 - mit Neutrinos 606
- Tiefenprofil (Spurenelement) 65
- Ting, Samuel C.C. (*1936, J/Ψ -Meson 1974) 610
- Tochterkern/Tochternuklid 165, 185
- top-Quark (t) 586, 631
 - Masse aus virtueller Mitwirkung abgeschätzt 642, 643
 - Nachweis (1995) 630
 - schwerstes fundamentales Teilchen 641
 - stellt Quark-Lepton-Symmetrie her 630
- t -Quark *siehe top-Quark* (t)
- Trägheitsmoment Θ
 - und Rotations-Spektrum 10, 258, 270, 310
- Trajektorien
 - Unterscheidungsmerkmal klassischer Teilchen 384
 - im Coulomb-Feld 53
 - und Wirkungsquerschnitt 58, 127

- Transistor (und Tunnel-Effekt) 189
 - Translations-Symmetrie
 - im Raum: Impuls-Erhaltung 507
 - in der Zeit: Energie-Erhaltung 507
 - Transmission
 - Absorptions-Spektroskopie 171, 292
 - Transmutationsgesetze 26, 182, 678
 - Transporttheorie, Streutheorie 57
 - Transurane 70, 346
 - irrtümliche 346
 - spontane Spaltung 338
 - Trefferfläche (Wirkungsquerschnitt) σ 56, 128
 - Treibhauseffekt
 - natürlicher 336
 - nicht mit symmetrischen Molekülen 309
 - Triplet
 - Isospin T 568, 571
 - Austauschbosonen $W^{0,\pm}$ 568
 - Pionen ($\pi^{0,\pm}$) 495
 - Rho-Mesonen ($\rho^{0,\pm}$) 506
 - Spin $s = 1$ 255, 256
 - Elektronen nicht am selben Ort 391
 - Kerne im H_2 -Molekül 272
 - fundamentales der $SU(3)$ 587
 - Tritium (3H)
 - großes magnetisches Moment 288
 - in Kernfusion 362
 - Tröpfchenmodell *siehe Abschn. 4.2, 75*
 - 5 Terme 104
 - Kernspaltung 115, 346
 - Obergrenze für stabile Elemente 116
 - Stand der Kernphysik (1935) 249
 - keine stabile Deformation 314
 - kollektive Anregungen 305
 - Tschernobyl
 - Reaktor nicht inhärent sicher 352
 - Reaktor-Katastrophe (1986) 353
 - Tumorgewebe 42
 - Tunneleffekt
 - Raster-Tunnel-Mikroskop 190
 - Transistor 189
 - ähnlich einem virtuellen Zustand 417
 - bei α -Strahlung 188
 - bei Fusion 359
 - erlaubt Wechselwirkung durch Teilchen-austausch 484
 - macht Nukleon-Nukleon-Bindung 586, 625
 - spontane Kernspaltung 338
- U**
- u -Quark *siehe up-Quark (u)*
 - Übergang
 - Emission, Quantensprung 165
 - elektromagnetischer
 - beim Kern 217
 - in Dirac-Theorie 441
 - verbotener in der Atomphysik 221
 - Übergangs-Operator
 - Vektorstrom aus Dirac-Spinoren 441
 - für Quantensprung 400
 - Übergangsrate λ 156
 - Definition 163
 - Erklärung erst durch Quantenmechanik 164
 - Goldene Regel 166
 - Messmethoden 172
 - Störoperator 548
 - Tunnel-Effekt 191
 - bei Verzweigung 161
 - Z^0 -Zerfall 642
 - doppeltwertig? 551
 - im Planckschen Gesetz (nach Einstein) 386
 - und α -Energie 187
 - und β -Energie 232
 - und γ -Energie 215
 - und Wirkungsquerschnitt σ 166
 - variiert mit Zerfalls-Energie 156
 - Übergangsstrom j_{ab}^{μ} 441, 566, 572
 - Übergangswahrscheinlichkeit W pro Zeiteinheit 166
 - Überkritikalität
 - Blaskammer 526
 - Bombe 349
 - Nebelkammer 528
 - Reaktor 352
 - Überlagerung, inkohärente 132, 133
 - Lärm, rauer Seegang 385
 - Streuung verschiedener Teilchen 143
 - bei Energie-Unschärfe 135
 - lässt Wellen wie Teilchen erscheinen 135
 - Überlagerung, kohärente 130
 - Teilchen mit Antiteilchen 549, 551
 - erklärt Brechungsindex 654
 - makroskopisch 133
 - nur bei fester Phase wichtig 133, 557
 - von Austauschteilchen W^0 und B 573, 680
 - von Target- und Projektil 142
 - vs. inkohärente 132
 - wann unbeobachtbar 554, 557
 - Überschuss-Formalismus 453
 - Ultramikroskop (Heisenbergs Gedanken-Experiment) 189
 - ultraviolette Freiheit (FN) 629

- Umwandlungs-Wahrscheinlichkeit W 156, 163
- Umwandlungszeitpunkt 161
- Umweltgift (Massenspektroskopie) 73, 94
- Unbestimmtheitsrelation *siehe* Unschärfe-Relation
- Unbewusstes (in der Psychologie) vi
- ungepaartes Elektron 295
- ungepaartes Nukleon
gibt dem Kern Spin und magnetisches Moment 290
- ungerade Funktion: Integral Null 218, 297
- ungestörte Zustände 36, 399
- Ungleichgewicht, eingefrorenes 371
- Universalität der Schwachen Ladung 548, 571, 605, 645
- unpolarisierte Teilchen (Streuexperimente) 152
- Unschärfe-Relation
- Elektronen im Kern? 87
 - Energie-Zeit 167
 - zur Deutung virtueller Teilchen 382
 - Ort-Impuls 124
 - ergibt Grundzustandsenergie (H-Atom) 230
 - keine Elektronen im Kern 230
 - klass. Feldstärke/Anzahldichte der Feldquanten 453
- Untergrund im Linien-Spektrum 224, 498
- Ununterscheidbarkeit von Teilchen (*siehe* auch *identische Teilchen*) v, *siehe* **Abschn. 15.6**, 153, 669
- Frage nach unterschiedlicher Herkunft unzulässig 8, 150
 - Hamilton-Operator invariant bei Teilchen-vertauschung 395
 - Hinweis auf *elementare* Gebilde 395
 - Konflikt mit der Logik 394
 - Symmetrie der Wellenfunktion 146
 - bei *allen* Arten Elementarteilchen 380
 - geprüft durch Nachmessen 13, 17, 142, 174
 - geprüft durch Pauli-Prinzip 227
 - kommt bei Alltagsdingen wahrscheinlich nicht vor 394
 - hätte gravierende Folgen 394
 - und Gibbs'sches Paradoxon 670
- up*-Quark (u) 583, 588, 631
- Uran (U) 23
- Isotopen-Anreicherung 348
 - Spaltprodukte 159, 341
 - falsch im ersten Periodensystem 6
 - neutroneninduzierte Spaltung 342
- Urknall
- Theorie von Gamov (1946) 371
 - Unsymmetrie Materie/Antimaterie 536, 558, 655
 - Verhältnis He:H 371, 655
 - bestätigt durch Hintergrundstrahlung 378
- Ursubstanz
- in der Atomistik 4
 - in der Energetik 13
- uu*-Kern
- Boson 279
 - nur 4 stabile 90, 103
- V
- Vakuum
- Zustand $|0\rangle$ in der Feldtheorie 214, 397, 562
 - leerer Raum kein Eigenzustand der Quantenfeldtheorie 382
 - notwendiges im Speicherring 525
- Vakuum-Fluktuationen 381
- Renormierung 420
 - im Compton-Effekt 417
- Vakuum-Polarisation 381, 421
- Anomalie des g -Faktors 637
 - bei Quarks 629
 - durch Quark-Antiquark-Paare 640
- Valenz-Quarks 622
- Valenzband und Diracs Unterwelt 210
- van der Meer, Simon (*1925, Speicherring für Antiprotonen-Strahl 1980) 579
- Vektor (axialer, polarer) 296, 298, 538
- Vektorpotential \vec{A}
- in Weisskopf-Abschätzung 218
 - in der Dirac-Gleichung 436
- Verformung
- nicht bei Elementarteilchen 31, 675
- Vernichtungsoperator \hat{a} 397, 668
- Vernichtungsstrahlung *siehe* Annihilation
- des $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ 494
- verschränkter Zustand v, 121, 136
- Gesamtspin Null (Singulett) 394
 - Quarks in weißen Hadronen 596
 - bei zwei identischen Teilchen immer 391
- Versuch und Irrtum (in der Quantenmechanik) 122
- Vertex-Korrektur (in *QED*) 636
- Verzweigungsverhältnis 161
- γ - und α -Übergang 215
 - eine gemeinsame Lebensdauer 161
 - für Zerfälle des Z^0 642
 - und Isospin ($\pi + N \rightleftharpoons \Delta$) 512
- Vierer-Vektor *siehe* 4-Vektor

Villard, Paul (*1860, †1934, γ -Strahlung 1900) 192
 Virial-Satz 87
 - E_{pot} und E_{kin} für gebundene Elektronen 206
 -im H-Atom 228
 virtuell: heißt „nicht wirklich“ 408
 virtuelle Teilchen v, 403
 -doch „real“ 643
 -notwendig für Austauschkraft *siehe* **Abschn. 15.8**, 381, 633
 -prinzipiell unbeobachtbar 381
 Volumen-Term (Tröpfchenmodell) 104, 110
 Vorhersagen
 -eingetroffene
 - Ω^- -Teilchen 521, 529
 - $\sigma \propto E^{-2}$ bei el.-mag. Wechselwirkung 59, 468
 -Brownsche Bewegung 13
 -Neutrino-Wirkungsquerschnitt 245
 -Supernova emittiert Neutrinos 375, 471
 -charakteristische Röntgenstrahlung 187
 -neue chemische Elemente 77
 -neutrales Pion π^0 und sein Zerfall 494
 -irrtümlich bestätigte
 -Yukawa-Hypothese 482
 -irrtümlich widerlegte
 -spez. Wärme bei Gasen 9
 -lang bezweifelte
 -Alle Atome aus Wasserstoff gebildet 4, 377
 -Interferenz bei identischen Teilchen 122
 -Neutraler Schwacher Strom 577
 -Neutrino 233
 -Neutrino-Oszillation 473
 -Quarks 588
 -Superposition von Teilchen 517
 -Superposition von Zuständen 123
 -Tunneleffekt 191
 -schwere Austauschteilchen der Schwachen Wechselwirkung 536
 -noch nicht eingetroffene
 -Higgs-Boson H 537
 -umstrittene
 -2. Hauptsatz statistisch verletzt 12
 -Antiteilchen 123, 209, 443
 -Superposition von Teilchen 123
 -widerlegte
 -2 Dinge immer unterscheidbar 396
 -Kernergie nicht zu erschließen 334
 -Naturgesetze invariant gegen Zeitumkehr 560
 -Parität immer erhalten 543

 -Proton/Neutron nicht zusammengesetzt 482
 -zuerst ignoriert
 -Yukawa-Hypothese 75, 455
 -das 4. Quark *charm* 518, 610
 -die Schweren Austauschbosonen W^\pm, Z^0 610
 Vorverstärker, ladungsempfindlicher 224
 Vorwärtsstreuung 54

W

W^\pm -Boson *siehe* **Abschn. 12.5**, 563, 631, 666
 -Masse
 -frühe Abschätzung 566
 -vorhergesagt 578
 -zweite Abschätzung 574
 Wahrscheinlichkeitsdeutung
 -der Quantenmechanik 156, 165
 -vs. Alltagsverstand 384
 -der Wellenfunktion 127
 -des Entropie-Satzes 12, 535
 Wahrscheinlichkeitsrechnung 177
 Warburg, Emil (*1846, †1931, $c_P/c_V = 5/3$ für Hg-Dampf 1875) 9
 Wärmeabgabe
 -des Erdinnern 336
 -von radioaktiven Präparaten 27
 Wärmeempfinden (physikalische Mechanismen) 654
 Wärmeleitfähigkeit von Ortho- und Para-Wasserstoff 275
 Wasser
 -Isotopenfraktionierung bei Verdampfen 74
 -Wasserspiegel 135
 -Wassertropfen
 -Kondensationswärme 104
 -Modell für Kern 75
 -Oberflächenspannung 115
 -diffuse Reflektion 29, 135
 -erhöhter Dampfdruck 105
 -kritischer Zustand 353
 Wasserstoff (H) *siehe auch* *Ortho/Para-Wasserstoff*
 -„brennbare Luft“ (Lavoisier 1790) 82
 -Baustein aller Elemente (Prout 1815) 4
 -Einfrieren der Rotationsfreiheitsgrade 11, 273
 -Ionenladung max. $+1e$ 16
 -Ionisationsenergie 44
 -Molekül

- Bindung durch Elektronen-Austausch 482
- Trägheitsmoment Θ und Kernabstand 270
- anomale Intensitäten im Spektrum 271
- einfachste Schrödinger-Gleichung 164
- einfachstes optisches Spektrum 16
- größte Abweichung von der Regel der Ganzzahligkeit der Atomgewichte (in amu) 83
- in der Blaskammer Target *und* Nachweis-Medium 526
- ist Mischung zweier Gase 271
- schwerer Wasserstoff (D) 86
- spezifische Wärme 273
- Wechselstrom bestimmt Frequenz der emittierten Welle 193
- Wechselwirkung
 - Elektromagnetische (1867) 402
 - Elektroschwache (1967) 635
 - Erforschung über die verursachten Prozesse 481
 - Kernkräfte 111, 482
 - vs. Coulomb-Kraft 112
 - Nukleon-Nukleon 104
 - Sättigung 111
 - Schwache (1934) 240
 - Starke 507
 - Symmetrien und Erhaltungssätze 508, 633
 - Typen klar unterschieden 512, 590
 - Vertex 633
 - alle beruhen auf Austauschteilchen 111, 480, 633
 - durch Stärke und Erhaltungssätze klar unterschieden 514, 532, 535, 584
 - elementarer Prozess 651, 670
 - fundamentale 631
 - nur 3 verschiedene 535, 633
 - nur 4 verschiedene 480, 514, 666
 - in Quantenfeldtheorie 381, 399
 - kurzreichweitige 104, 574, 625
 - langreichweitige 105, 112, 423
 - nur mittels Teilchen-
Erzeugung/Vernichtung 381, 672
 - punktuelle 240, 563
 - um Größenordnungen verschieden stark 494
- Wegener, Alfred (* 1880, † 1930)
 - Kontinentalverschiebung (1912) lange umstritten 335
- weiß
 - Auswahlregel in *QCD* 595
 - Singulett im Farbraum 615
- Weißer Zwerg, durch Entartungsdruck stabil 375
- Weinberg, Steven (* 1933, Elektroschwache Wechselwirkung 1967) 536, 573
- Weinberg-Winkel 573
 - erste Bestimmung 578
- Weisskopf, Viktor (* 1908, † 2002)
 - Abschätzung der Multipol-Übergangsraten 217
 - Abschätzung zu klein in Rotationsbanden 312
- Weizsäcker, Carl F. v. (* 1912, † 2007)
 - CNO-Zyklus 367
 - Isomerie und Drehimpulserhaltung 215
 - Kernwaffen-Entwicklung
 - beteiligt (vor 1945) 347
 - verweigert (1958) 358
 - Tröpfchen-Modell 75, 104
 - semi-empirische Massenformel 104
- Welle
 - nicht ohne ein Medium? 17, 120, 383
 - zu *Teilchen* sehr gegensätzlich 384
- Welle-Teilchen-Dualismus *siehe* **Abschn. 9.1**, 121, 135
 - Anfänge 383
 - Basis des Standard-Modells 379, 631
 - Doppelspalt-Experiment 147
 - Neutronen-Einfang 343
 - als Ursache der Nukleonenmasse 624
 - am Licht 385
 - im Tröpfchen-Modell 106
 - und Größenwachstum der Apparaturen 524
 - vereint 8 Gegensätze 384
- Wellen-Mechanik 122
- Wellenfront 128
- Wellengleichung, relativistische
 - Dirac-Gleichung 429
 - Klein-Gordon- ($m > 0$) 429
 - Maxwell-Gln. ($m = 0$) 429
- Wellenlänge λ 124
 - und spiegelnde Flächen 135
- Wellenpaket
 - für Drehimpuls und Winkel 268
 - für Ort und Impuls 124
- Wellenvektor \vec{k} 124, 600
- Wettkampf der (polit.) Systeme
 - Beschleuniger-Wettlauf 502
 - Forschung/Ausbildung 250, 362, 502
 - Wettrüsten 21, 362
- widersprüchliche Aspekte
 - klassische/moderne Physik *siehe Kap. 15*,

- Wieder-Aufarbeitung (Kernbrennstoff) 355
Wigner, Eugene (*1902, †1995, Paritätsquantenzahl 1927) 541
Wigner-Eckart-Theorem 302
Wilczek, Frank (*1951, Quarks asymptotisch frei 1973) 628
Wilson, C.T.R. (*1869, †1959, Nebelkammer Spuren 1911) 28
Winkel (polar θ /azimutal ϕ) 128
Winkelverteilung 47, 50, 57, 126, 216, 283, 312, 409, 415, 600, 601
Wirkungsquerschnitt σ
- Bedeutung in der Quantenmechanik 127
- Einheit barn = 10^{-28}m^2 69
- Nukleon-Nukleon 330
- differentieller $d\sigma/d\Omega$
- im Trajektorienbild (Stoß) 57
- im Wellenbild (Streuung) 127
- erste Anwendung 56
- für Rückwärtsstreuung 56
- totaler σ_{tot} 58
- und Goldene Regel 166
Wissensstand
komplexe Entstehungsgeschichte v, 250, 459
Woods-Saxon-Potential 322
Wu-Experiment 543
Würfel gezinkt? 180
- X**
- X-rays (Röntgen-Strahlen) 3, 16, 21, 25, 48, 78, 98, 132, 134, 184, 192, 194, 221, 225, 229, 362, 387, 425, 458, 470, 491, 494, 525
- Y**
- Yang, Chen Ning (*1922)
- Paritätsverletzung vermutet 1956) 542
- Yang-Mills-Theorie 1954 568
Yukawa, Hideki (*1907, †1981)
- Meson-Hypothese der Kernkraft 75, 454, 483, 586, 625
- Feynman-Propagator 415
- Reichweite 536
- im Quark-Modell bestätigt 625
- Z**
- Z^0 -Boson *siehe Abschn. 12.5*, 573, 631, 666
- Lebensdauer 634
- Masse
- gemessen 580
- vorhergesagt 575, 578
- Quelle möglicher Teilchen-Antiteilchen-Paare 641
- Resonanzkurve 173, 648
- als Überlagerung von Austauschteilchen W^0 und B 573
Zählstatistik *siehe Abschn. 6.1.5*
Zähler-Experiment 175
- Beginn der Epoche 156
Zählrate 50
- „Fehlerbalken“ 465, 492
- primäre Messgröße 177
- schwankt statistisch 156, 170, 177
Zeeman, Pieter (*1865, †1943) 16
Zeeman-Effekt 16, 261, 627
- Drehimpuls 255
- Modell für 2-Zustands-System 476
- an Kernen 291
- anomaler 16, 427
- durch Störung der Rotations-Symmetrie 510
- normaler, klassisch erklärt (Lorentz 1902) 16, 427
Zeit-Dilatation (Lorentz-Faktor γ)
- beobachtet bei Myonen 456, 461, 487
- beobachtet bei Pionen 493
Zeit-Richtung
- negative für Antiteilchen 522, 562
- subjektive 536, 560
Zeitumkehr-Invarianz
- bei Hin- und Rückreaktion 499
- in Quantenmechanik 560
- in Thermodynamik 12, 559
- in der Goldenen Regel 213
- in klassischer Physik 12, 559
- verletzt 226, 536, 559
- bei Kaonen 518
Zeitumkehr-Operator \hat{T} 560
Zentrifugal-Aufweitung in Rotations-Spektren 310
Zentrifuge (Isotopen-Anreicherung) 349
Zerfall
Übergang, Quantensprung 165
Zerfallsgesetz *siehe Abschn. 6.1.1*
- Entdeckung (1900) 157
- Gültigkeit 171, 561
- atomistische Deutung 157
- vs. Kausalität 155, 163
- vs. Zeitumkehr-Invarianz 561
Zerfallskonstante λ *siehe Abschn. 6.1*
- α -Zerfall 187
- β -Zerfall 232
- γ -Zerfall 215

- Messmethoden 172
- bei Verzweigung 161
- Zerfallsreihe 185
 - langlebige Muttersubstanz 182
- Zufallsfehler quadratisch summieren 133
- Zufallsprozesse 157
- Zusammenarbeit, internationale
 - Kernforschung in Europa 358
 - und „Wettkampf der Systeme“ 502
- Zustand
 - Produkt-Zustand 121
 - Wellenfunktion $\psi(t, \vec{r})$ v, 120
 - Zerlegung 452
 - Zustandsvektor $|\psi\rangle$ v, 120
 - antisymmetrisch bei 2 Elektronen 392
 - klassisch (Massenpunkt) (\vec{r}, \vec{p}) 121
 - klassischer vs. quantenmechanischer 120
 - metastabiler *siehe Abschn. 6.1.2*
 - negativer Energie 209
 - symmetrisch bei 2 Phononen 317
 - verschränkter *siehe* verschränkter Zustand
 - virtueller *siehe* virtueller Zustand
- Zustandsänderung
 - Streuung 123
 - Übergangs-Operator 400
 - ist ein Prozess 123
- Zustandsdichte dN/dE 166, 235
- Zustandsgleichung 7
- Zustandsraum (Hilbert-Raum) v
 - Basis 253–255, 260, 263, 276, 313, 323, 329, 389, 392, 398, 449, 508, 511, 552, 595, 646, 678
 - für identische Teilchen eingeschränkt 227, 391
- Zustandsraum (klassisch)
 - Einheitszelle 121
- Zwei-Körper-System *siehe* 2-Körper-System
- Zwei-Zustandssystem *siehe* 2-Zustands-System
- Zweig, George
 - Quark-Hypothese (1964) 587
 - Zweigs Regel 591
- Zweite Quantisierung *siehe* 2. Quantisierung
- Zyklotronfrequenz ω_c 79, 95, 443, 525